



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL II

TESIS DOCTORAL

**Optimización de los procesos de evaluación
de riesgos por atmósferas explosivas.
Aplicación a industrias agroalimentarias y
otras de eliminación de residuos**

Javier Telmo Miranda

Ferrol, 2012



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL II

TESIS DOCTORAL

**Optimización de los procesos de evaluación
de riesgos por atmósferas explosivas.
Aplicación a industrias agroalimentarias y
otras de eliminación de residuos**

Autor: Javier Telmo Miranda

Director: Dr. Eugenio Muñoz Camacho

Ferrol, 2012

A mis padres

Agradecimientos

Mi primer agradecimiento, cómo no, es a mi director de tesis, el Dr. D. Eugenio Muñoz Camacho por haber aceptado la dirección de la misma, por su apoyo, sus consejos y su cercanía, y sin el cual esta tesis no habría sido posible.

A D. Juan de Dios Rodríguez García, profesor de la UDC por sus consejos a la hora de manejar el programa de simulación GAMBIT-FLUENT y por los tutoriales del programa facilitados.

A D. Pedro José Aguado Rodríguez, profesor de la Universidad de León por su amabilidad y sus enseñanzas sobre el comportamiento de los materiales en silos.

A D. Alberto Tascón Vegas, profesor de la Universidad de la Rioja por sus consejos y por facilitarme varios artículos sobre explosiones en secaderos.

A D. Xavier de Gea Rodríguez, director de la empresa LPG vent por facilitarme el software de dimensionamiento de venteos.

A D. José Cedrón Pérez, sargento del Parque de Bomberos de Lugo por sus explicaciones y por permitirme tomar datos de escapes de gas para realizar las simulaciones.

A mis amigos Pablo Díaz Gay, Alberto López Redondo, Germán Alonso Veiga y Antonio Vázquez Vázquez y a mi compañero de trabajo José Luis Lucas Sánchez por su colaboración y ayuda.

Expreso mi agradecimiento también a D. Ángel Algora Aizpurua y a D. Javier García Fernández responsables de prevención de riesgos laborales y de la secciones de recepción y torre respectivamente de la fábrica CAPSA, por sus indicaciones y por permitirme visitar y tomar datos en la fábrica.

Por último, debo hacer una mención especial a D. Joaquín Garrido Martín y D. Jesús Garrido Pedraz gerente y jefe de fábrica respectivamente de la empresa EUROSERUM IBÉRICA, S.L. en la cual se han realizado la mayor parte de los estudios por haber hecho de su casa la mía y a D. Roberto Parada Veiga jefe de mantenimiento por sus explicaciones y atención.



Índice

AGRADECIMIENTOS	I
ÍNDICE	II
RESUMEN	IX
ABSTRACT	X
RESUMO	XI
CAPÍTULO 1. Revisión bibliográfica. Análisis del R.D. 681/2003.	
Planteamiento formal de objetivos e hipótesis	1
1.1. Revisión Bibliográfica	1
1.2. Análisis del R.D. 681/2003	16
1.3. Planteamiento formal de objetivos e hipótesis	21
CAPÍTULO 2. Recopilación y sistematización de la información necesaria para la cuantificación y análisis de los problemas surgidos en la aplicación del R.D. 681/2003 y accidentes producidos en la industria	23
2.1. Estado del arte	23
2.2. Análisis de accidentalidad por atmósferas explosivas ATEX	27
2.2.1. Descripción de las principales bases de datos	29
2.2.2.1. Elección de la base de datos	30
2.2.1.2. Base de Datos "FACTS"	30
2.3. Análisis histórico de accidentes aplicado a explosiones	33
2.3.1. Fuente de registro	33
2.3.2. Fecha del incidente	34
2.3.3. Localización de los incidentes	37
2.3.4. Sustancias que han intervenido en los incidentes	38
2.3.5. Tipos de explosión	40
2.3.6. Origen de los incidentes	41
2.3.7. Sectores y actividades afectados por los incidentes	42
2.3.8. Causas generales de los incidentes	43
2.3.9. Población afectada por el incidente	44
2.3.10. Número de muertos provocados por el incidente	45
2.3.11. Número de heridos provocados por el incidente	46
2.3.12. Fuentes de ignición	46



CAPÍTULO 3. Estimación de las actuaciones necesarias para la mejora en la detección de riesgos.	48
3.1. Clasificación y extensión de las zonas por atmósferas explosivas	48
3.2. Detección de chispas	51
3.3. Chispas mecánicas y calentamiento mecánico. Técnicas de mantenimiento	52
3.3.1. Termografía	53
3.3.2. Pistolas infrarrojas	55
3.4. Detección de monóxido de carbono (CO)	56
3.5. Supresión de explosiones en silos	59
3.6. Descarga electrostática	60
3.7. Fuego	60
3.7.1. Identificación de peligros de incendio	61
3.7.2. Control del fuego	61
3.7.3. Protección adecuada	62
CAPÍTULO 4. Recopilación de las actuaciones preventivas realizadas por EUROSERUM IBERICA, S.L. con relación a las atmósferas explosivas	63
4.1. Identificación de la empresa objeto de estudio EUROSERUM IBÉRICA, S.L.	63
4.2. Proceso productivo de la planta UEROSERUM IBÉRICA, S.L.	65
4.2.1. Proceso productivo general	65
4.2.2. Proceso productivo detallado	67
4.3. Zona de riesgo por atmósferas ATEX y actuaciones previas adoptadas por la empresa EURSOERUM IBÉRICA, S.L. con relación a la prevención del riesgo de explosión	76
4.3.1. Depósitos de gas natural licuado	77
4.3.1.1. Depósito criogénico	82
4.3.1.2. Tuberías de interconexión entre depósitos	83
4.3.1.3. Apaga-llamas	83
4.3.1.4. Protección contra incendios	83
4.3.2. Sala de calderas	84
4.3.3. Zona de frío	86
4.3.4. Zona de carga de carretillas	87
4.3.5. Estación depuradora E.D.A.R.	90
4.3.5.1. Desarrollo del proceso en la E.D.A.R.	92
4.3.5.1.1. Zonas de riesgo de la E.D.A.R	93
4.3.6. Torre de leche en polvo	95
4.3.6.1. Secado. Secado por aspersión	95
4.3.6.2. Atomización	97
4.3.6.2.1. Atomizadores rotativos	97



4.3.6.3. Contacto aire-gota. Parámetros que actúan sobre la gota dentro de la cámara de secado	98
4.3.6.4. Recuperación del producto	106
4.3.6.5. Dimensiones de la cámara de secado	106
4.3.6.6. Sistemas de la cámara de secado	107
4.3.6.7. Sistema de ensacado	114
CAPÍTULO 5. Análisis necesarios para la mejor definición de zona	120
5.1. Visita y descripción de la instalaciones a clasificar	123
5.2. Sustancias inflamables y pulverulentas	123
5.3. Grado de escape	126
5.4. Metodología para la clasificación de emplazamientos peligrosos	129
5.4.1. Metodología para la clasificación de emplazamientos peligrosos gases y vapores	129
5.4.1.1. Metodología cuantitativa para gases y vapores	129
5.4.1.2. Metodología cualitativa para gases y vapores	142
5.4.1.3. Metodología por CFD para gases y vapores	148
5.4.2. Metodología para la clasificación de emplazamientos peligrosos para polvos combustibles	150
5.4.2.1. Fuentes y tasas de escape para polvos combustibles	151
5.4.2.2. Actuaciones frente atmósferas explosivas por polvos combustibles	153
5.4.2.3. Metodología para el cálculo de extensión de la atmósfera combustible por polvo	154
5.4.2.4. Aplicación de la simulación dinámica al análisis de atmósferas explosivas por polvo. Programa FLUENT	155
CAPÍTULO 6. Elaboración de propuestas de definición y ubicación de detectores de riesgo (compuestos peligrosos)	156
6.1. Caracterización de las sustancias pulverulentas	157
6.1.1. Características generales	158
6.1.2. Sensibilidad a la ignición	158
6.1.3. Severidad de la explosión	159
6.1.4. Susceptibilidad térmica	161
6.1.5. Parámetros de granulometría y humedad de las muestras de leche en polvo y suero en polvo de Euroserum Ibérica, S.L.	163
6.2. Caracterización de sustancias y compuestos, gases, vapores y nieblas	168



CAPÍTULO 7. Formulación del nuevo procedimiento	172
7.1. Procedimiento para clasificar atmósferas explosivas para gases y/o vapores	172
7.1.1. Clasificación zonal para gases, vapores, nieblas o líquidos	172
7.1.1.1. Metodología cuantitativa según norma UNE 60079-10	172
7.1.1.2. Metodología cuantitativa basada en la norma italiana CEI 31-35. Programa ProgEx	175
7.1.1.3. Metodología CFD	179
7.1.1.4. Programa GAMBIT y FLUENT	182
7.1.1.4.1. Generación de la malla. Programa GAMBIT	182
7.1.1.4.2. Programa FLUENT	188
7.2. Procedimiento para evaluar las atmósferas explosivas por polvos	198
7.3. Determinación de las fuentes de ignición mediante la técnica de termografía	199
7.3.1. Teoría de la termografía	199
7.3.2. Cámara termográfica FLIR E60	204
CAPÍTULO 8. Aplicación de los nuevos procedimientos a la industria láctea	209
8.1. Metodología según norma UNE 60079	209
8.1.1. Depósitos de GNL	209
8.1.2. Sala de calderas	218
8.1.3. Zona de carga de baterías	224
8.1.3.1. Zona de carga de batería próxima a taller	224
8.1.3.2. Zona de carga en el interior de la cámara de congelado	225
8.1.3.3. Consideraciones para la zona de carga de baterías	227
8.1.4. Zona de carga de frío	227
8.1.4.1. Zona de frío Balsa 2	227
8.1.4.2. Zona de frío Balsa 3	230
8.1.4.3. Clasificación y extensión de la zona ATEX (B2 y B3)	233
8.2. Metodología cuantitativa basada en la norma italiana CE 31-35 (2001). Programa ProgEX	238
8.2.1. Depósitos de GNL	238
8.2.2. Sala de Calderas	239
8.2.3. Zona de carga de baterías	240
8.2.4. Sala de frío 2	241
8.3. Aplicación de la metodología CFD a las zonas de estudio. Programa Fluent	241
8.3.1. Validación del programa Fluent	241
8.3.1.1. Simulación del proceso de combustión para una botella de gas butano de 0,5 kg	241
8.3.1.2. Simulación del proceso de combustión para una botella de gas propano de 35 kg	246



8.3.2. Estudio de los depósitos de gas natural licuado	250
8.3.2.1. Estudio del escape de los depósitos en la zona de influencia de 15 metros	251
8.3.2.2. Estudio del escape de los depósitos en la zona de influencia de 25 metros	256
8.3.2.3. Estudio del escape en los depósitos y durante el proceso de descarga	258
8.3.3. Estudio de escape de gas en la sala de calderas	263
8.3.4. Estudio del escape de hidrógeno en la zona de carga de baterías	272
8.3.4.1. Simulación en 3D para un escape de hidrógeno	282
8.3.5. Estudio de escape de amoníaco en la sala de frío 2	284
8.3.6. Estudio de las atmósferas explosivas por polvo en la torre de leche en polvo	289
8.3.6.1. Estudio del caso de incendio en el atomizador	297
8.3.6.2. Estudio del caso de propagación de una explosión en el interior de la cámara de secado	306
8.3.6.3. Determinación del área de venteo necesaria para el alivio de presión en la cámara de secado	314
8.3.6.3.1. Sistemas de venteo	315
8.3.6.3.2. Dispositivos de venteo	317
8.3.6.3.3. Normas para el dimensionamiento de venteos de explosión	319
8.3.6.3.4. Consideraciones de los parámetros y efectos sobre los venteos	325
8.3.6.3.5. Resultados del dimensionamiento de venteos de explosión según las normas EN 14491 y NFPA 68	331
8.3.6.3.6. Resultados del dimensionamiento de venteos de explosión aplicando el software LPGVent 1.06	341
8.3.6.4. Consideraciones al estudio de la geometría en 3D de las cámaras de secado	344
8.4. Determinación de las fuentes de ignición en las zonas de estudio mediante la técnica de termografía	346
8.4.1. Termografía de superficies en la Sala de Calderas	347
8.4.2. Termografía de superficies en la Zona de frío 2	349
8.4.3. Termografía de superficies en la Torre de Leche en Polvo	351



CAPÍTULO 9. Aplicación de los nuevos procedimientos a una industria de tratamiento de residuos	353
9.1. Descripción de los procesos y actividades	354
9.2. Identificación de las sustancias utilizadas	367
9.3. Clasificación de zonas	368
9.3.1. Extensión de zonas	369
9.4. Metodología cualitativa según norma UNE 60079-10	371
9.4.1. Estación de regulación y medida 1.ERM1	371
9.4.2. Antorcha de alta temperatura	372
9.4.3. Tanque de metanol	373
9.4.4. Clasificación de botellones de gas	374
9.4.5. Almacenamiento de carbón	375
9.5. Metodología según norma CEI 91-95. Programa ProgEx	381
9.5.1. Estación de regulación y medida 1. ERM1	381
9.6. Metodología CFD. Programa Fluent	382
9.6.1. Estación de regulación y medida 1.ERM1	382
CAPÍTULO 10. Análisis de los procesos en función de los procedimientos empleados	388
Ventajas e inconvenientes	
10.1. Análisis de las zonas clasificadas según la metodología basada en la norma UNE 60079-10	388
10.2. Análisis de las zonas clasificadas según la metodología ProgEx para gases, vapores y nieblas	389
10.3. Análisis de las zonas clasificadas según la metodología CFD. Programa Gambit-Fluent	391
CAPÍTULO 11. Equipos utilizados	394
11.1. Hardware	394
11.2. Software	394
11.3. Equipos de detección de gas	394
11.3.1. Equipo MSA modelo Orion ^{plus}	395
11.3.2. Equipo Dragüer Xam 7000	395
11.4. Cámara termográfica FLIR E60 y pistola THERMOFIX LÁSER	395
11.5. Equipo de medición Láser BOSCH	395
11.6. Equipos de medición de condiciones termohigrométricas	395
11.7. Botellas de gas	396
11.8. Normativa	396



CAPÍTULO 12. Conclusiones	398
12.1. Conclusiones de la aplicación de las metodologías cuantitativa y cualitativa según la norma UNE 60079-10, metodología con programa ProgEx y metodología CFD-Fluent a los Depósitos de GNL	399
12.2. Conclusiones de la aplicación de las metodologías cuantitativa según norma UNE 60079-10, metodología con programa ProgEx y de la aplicación de la metodología CFD-Fluent a la Sala de Calderas	403
12.3. Conclusiones de la comparativa de la aplicación de las normas italiana CEI 31-35 a la zona de carga de baterías, metodología ProgEx y metodología CFD-Fluent	405
12.4. Conclusiones de la comparativa de la aplicación de la metodología cualitativa según la norma UNE 60079, la metodología ProgEx y la metodología CFD-Fluent a la Zona de Frío (Balsa de agua helada 2)	406
12.5. Conclusiones de la comparativa de la aplicación de la metodología cualitativa según la norma UNE 60079-10, la metodología ProgEx y la metodología CFD-Fluent a la ERM de la planta de tratamientos de residuos sólidos	407
12.6. Conclusiones de la utilización de los equipos de detección de gas: Orion ^{PLUS} y Dragüer Xam 7000 a la clasificación y extensión de las zonas ATEX	408
12.7. Conclusiones de la aplicación de la norma UNE EN 60079-10-2 de Clasificación de emplazamientos por atmósferas peligrosas de polvo para la Torre de Leche en Polvo de la industria láctea y Almacenamiento de Carbón en la Planta de tratamientos de RSU.	409
12.8. Conclusiones de la comparativa de las normas de venteo para el dimensionamiento de los venteos de presión en las cámaras de secado	412
12.9. Conclusiones de la aplicación de la dinámica de fluidos computacional en el desarrollo de la tesis. Programa Gambi-Fluent	413
12.10. Conclusiones de la aplicación de la termografía a la determinación de fuentes de ignición	414
12.11. Conclusiones finales sobre los trabajos realizados	415
12.12. Propuestas de futuras líneas de investigación	418
APÉNDICE I. Metodología de Evaluación del Riesgo de Explosión	420
BIBLIOGRAFIA	444



RESUMEN

El objetivo de la presente tesis es el estudiar diferentes metodologías para valorar atmósferas explosivas, bien sean por gases, vapores o nieblas y/o por polvos combustibles.

Las metodologías propuestas se encuentran basadas en la norma UNE 60079-10 y norma italiana CEI 91-95, ambas normas son de reconocido prestigio y de aplicación en multitud de escenarios. En nuestro caso ambas son comparadas mediante la aplicación a casos prácticos de una industria láctea y a una planta de tratamiento de residuos.

Asimismo, han sido elaborados varios modelos CFD simplificados, mediante el código comercial FLUENT, capaz de predecir el comportamiento de la propagación de los escapes de gas y de la propagación de las llamas y variación de presiones para las atmósferas pulverulentas. Los modelos utilizados incluyen diferentes geometrías, condiciones iniciales y de contorno.

También se analizan las normas de dimensionamiento más utilizadas para la protección de silos mediante sistemas de venteo, la norma americana NFPA 68 y la europea EN 14491 y su aplicación a los ejemplos estudiados.

Por último se hace uso de la técnica de la termografía mediante cámara infrarroja para el estudio de diferentes fuentes de ignición debidas a superficies calientes.

Los resultados obtenidos contribuyen a comprender mejor la extensión de las atmósferas explosivas y el desarrollo de las explosiones.



ABSTRACT

The objective of this thesis is to study different methodologies to value explosive atmospheres, whether by gases, vapours or mists or combustible dusts.

The proposed methodologies are based on the norm UNE 60079-10 and Italian norm CEI 91-95, both standards are prestigious and application in a variety of scenarios. In our case, both are compared by the application to practical cases of a milk industry and waste treatment plant.

Several simplified CFD models through the commercial code FLUENT, able to predict the behavior of the spread of the leakage of gas and the spread of the flames and variation of pressures for pulverulent atmospheres have also been elaborated. The models used include different geometries, initial and boundary conditions.

Also sizing standards used to protect silos through systems analyses of venting, the American standard NFPA 68 and the European EN 14491 and its application to the studied examples.

Finally makes use of the technique of thermography by infrared camera for the study of different ignition sources due to hot surfaces.

The results obtained contribute to better understand the extent of explosive atmospheres and the development of the explosions.



RESUMO

O obxectivo da presente tese é estudar diferentes metodoloxías para valorar atmósferas explosivas, ben sexan por gases, vapores ou néboas e/ou por pos combustibles.

As metodoloxías propostas encóntranse baseadas na norma UNE 60079-10 e na norma italiana CEI 91-95, ambas normas son de recoñecido prestixio e de aplicación en multitude de escenarios. No noso caso ambas as dúas son comparadas mediante a aplicación a casos prácticos dunha industria láctea e a unha planta de tratamento de residuos.

Así mesmo, foron elaborados varios modelos CFD simplificados, mediante o código comercial FLUENT, capaz de predicir o comportamento da propagación dos escapes de gas e da propagación das chamaz e variación de presións para as atmósferas pulverulentas. Os modelos utilizados inclúen diferentes xeometrías, condicións iniciais e de contorno.

Tamén se analizan as normas de dimensionamento máis utilizadas para a protección de silos mediante sistemas de vento, a norma americana NFPA 68 e a europea EN 14491 e a súa aplicación aos exemplos estudados.

Por último faise uso da técnica da termografía mediante cámara infravermella para o estudo de diferentes fontes de ignición debidas a superficies quentes.

Os resultados obtidos contribúen a comprender mellor a extensión das atmósferas explosivas e o desenvolvemento das explosións.



CAPITULO 1. REVISIÓN BIBLIOGRAFICA. ANÁLISIS DEL R.D. 681/2003. PLANTAMIENTO FORMAL DE OBJETIVOS HIPÓTESIS

1.1. Revisión Bibliográfica

La evolución histórica de la normativa reguladora de las atmósferas explosivas dio sus primeros pasos el 23 de agosto de 1934 fecha en la cual apareció el reglamento de policía minera y metalúrgica que establecía las reglas a las cuales deben ajustarse las explotaciones e industrias relacionadas con la minería, así concretamente en su *Artículo 23* se establece que se clasificarán como minas o zonas con polvos explosivos, aquellas que explotan combustibles cuyos polvos son capaces de producir o propagar una explosión. Este reglamento fue posteriormente ampliado y actualizado mediante las siguientes disposiciones complementarias y modificaciones del mismo: el Decreto 2540/1960, de 22 de diciembre, *ventilación en las minas*; Decreto 1466/1962, de 22 de junio, *sobre explosivos*; Decreto 416/1964, de 6 de febrero, *sobre instalaciones eléctricas en minería*, y Decreto 2991/1967, de 14 de diciembre, sobre *ventilación de locomotoras de combustión interna*.

Ya en el año 1976-1977 y 1981 se edita el libro ***Polvos Combustibles***, (publicado por D. José Luis Villanueva Muñoz,) donde en sus Capítulos I y II. "Análisis y Evaluación del Riesgo de Explosión en Polvos Combustibles" se hace una primera aproximación al estudio de las explosiones debidas a polvo. En el capítulo 3 de este mismo libro se detallan las normas de Prevención y Protección del Riesgos de Incendio y Explosión en Polvos combustibles.

Desde un punto de vista reglamentario industrial y en lo relativo a las atmósferas por polvo, el Reglamento Electrotécnico de Baja tensión (Decreto 2413/1973 derogado por el Decreto 842/2002) establece en su Instrucción Técnica Complementaria MIE BT 026 (1988) las prescripciones particulares para las instalaciones de locales con riesgo de incendio o explosión donde se distinguen dos tipos de zona:

- **Zona Z** (con nubes de polvo): Es aquella en la que hay o puede haber polvo combustible, durante las operaciones normales de funcionamiento, puesta en marcha o limpieza, en cantidad suficiente para producir una atmósfera explosiva.



- **Zona Y** (con capas de polvo): Es aquella que no está clasificada como zona Z, pero en la cual pueden aparecer acumulaciones de capas de polvo combustible a partir de las cuales pueden producirse atmósferas explosivas.

La Instrucción Técnica Complementaria MIE BT 026 (1988) también clasifica los emplazamientos de Clase I, es decir, aquellos en los que se manipulan gases, vapores o nieblas inflamables en tres tipos de zonas en función de la probabilidad de presencia de la atmósfera explosiva:

- **Zona 0:** Es aquella en la que una atmósfera de gas explosiva está presente de forma continua, o se prevé que esté presente durante largos períodos, o por cortos períodos, pero que se producen frecuentemente.
- **Zona 1:** Es aquella en la que una atmósfera de gas explosiva se prevé pueda estar presente de forma periódica u ocasionalmente durante el funcionamiento normal.
- **Zona 2:** Es aquella en la que una atmósfera de gas explosiva no se prevé pueda estar presente en funcionamiento normal y si lo está, será de forma poco frecuente y de corta duración.

De forma paralela en el tiempo, el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT), órgano de especial relevancia en la seguridad y salud en el trabajo en España, ha venido aportando desde la década de los 80 hasta la fecha su grano de arena en el estudio de las atmósferas explosivas con la publicación de normas de reconocido prestigio como son las Notas Técnicas de Prevención. Así, la primera publicación de este organismo en el tema en cuestión ha sido la Nota Técnica de Prevención (NTP) 29 de título ***“Instalaciones de recogida de polvos combustibles. Control del riesgo de explosión”***. En esta publicación se establecía de forma esquemática las bases técnicas para la evaluación y control del riesgo de explosión inherentes a la manipulación de polvos combustibles.

El siguiente paso lo dio la NTP 223: ***“Trabajos en recintos confinados”*** donde se dedicaban unos párrafos al riesgo de incendio y explosión dentro de los espacios confinados, estableciendo también las medidas preventivas para el control de trabajos en las atmósferas peligrosas. Se introdujo en la publicación el término de autorización de entrada al recinto y un aspecto de vital importancia como es la medición y evaluación de la atmósfera interior tanto en la medición de oxígeno, como en la medición de atmósferas explosivas o inflamables y/o las atmósferas tóxicas.



Las siguientes notas técnicas en hacer mención a las Atmósferas Explosivas fueron la NTP 369: **“Atmósferas potencialmente explosivas: instalaciones eléctricas”** y la NTP 370: **“Atmósferas potencialmente explosivas: clasificación de emplazamientos de clase I”**.

Estas dos publicaciones desarrollan contenidos de la Instrucción Técnica Complementaria MIE BT 026. En la NTP 369 se establecen los parámetros básicos sobre atmósferas explosivas debido a la presencia de gases, vapores o nieblas inflamables y polvos combustibles. Asimismo, se articulan las medidas preventivas y las categorías de los equipos eléctricos para las zonas explosivas referencias en la correspondiente instrucción Técnica.

La NTP 370 profundiza en la descripción de los emplazamientos de Clase I (REBT MIBT 026) y más concretamente, detalla los aspectos más relevantes para la adopción de criterios en la delimitación de áreas afectadas, como puede ser la influencia de la ventilación en la determinación del tipo y extensión de zonas. En esta norma ya se relaciona el tipo de zona con las características del escape de la sustancia inflamable, desde los equipos de proceso (fuente posible de escape) y duración de la atmósferas explosivas una vez que se produce el escape (ventilación).

Posteriormente se publicaron dos notas técnicas relativa al estudio de los alivios de presión para explosiones por polvos: la NTP 427: **“Paramentos débiles para el venteo de explosiones (I)”** y la NTP 428: **“Paramentos débiles para el venteo de explosiones (II)”**. La primera revisa los principios fundamentales de estas explosiones y la forma de actuación de los sistemas de protección. También en esta norma se definen los parámetros necesarios para el dimensionado de las superficies de venteo explicándolos brevemente.

La segunda norma (NTP 428) complementa a la anterior y presenta una metodología (método del monograma K_{St} para P_{red} superiores a 1,2 bar) para el cálculo del área de venteo según la norma alemana VDI 3673 incluyendo una caso de aplicación práctico.

No podía faltar el estudio de la electricidad estática como posible fuente de ignición en presencia de atmósferas explosivas de gases, vapores y nieblas inflamables o de polvos combustibles que pueden dar lugar a incendios y explosiones, y ello tuvo como resultado la aparición de las notas técnicas siguientes: NTP 567: **“Protección frente a cargas**



electrostáticas”, la NTP 827: “Electricidad estática en polvos combustibles (I): características de las descargas electrostáticas” y la NTP 828: “Electricidad estática en polvos combustibles (II): medidas de seguridad“.

La primera de ellas expone de forma más general lo que es una carga electrostática, así como las medidas de prevención para las mismas. En las dos últimas (NTP 827 y NTP 828) se expone de forma sencilla la generación y acumulación de cargas electrostáticas que dan lugar a una de las fuentes de ignición que pueden conllevar a incendios y explosiones en las plantas de procesos de polvos combustibles, describiéndose los tipos de descargas electrostáticas que pueden aparecer y las medidas de seguridad a adoptar.

Continuando con las publicaciones sobre la materia que nos afecta, desde la Asociación para Prevención de Accidentes (**aPa**) se edita en el año 2000 y dentro del marco de la Asociación Internacional de la Seguridad Social (AISS) un manual práctico muy interesante titulado “**Explosiones de Polvo y su Prevención**”, el cual consta de dos partes:

- Una primera titulada “**Explosiones de polvo**” obra del grupo de trabajo denominado “Prevención de Explosiones” creado en el seno del Comité Internacional de la AISS para la Prevención de Riesgos Profesionales en la Industria Química. En esta primera parte se presentan los conceptos básicos sobre explosiones de polvo (génesis, naturaliza, factores, etc.) y sobre las medidas de prevención tanto técnicas como organizativas que pueden adoptarse en la práctica para evitarlas o atenuar significativamente sus efectos.
- La segunda parte se titula “**Reglas para la protección contra explosiones debidas a materiales pulvígenos en máquinas y aparatos**” y es obra del grupo de trabajo denominado “Explosiones de Polvo” del Comité Internacional de la AISS para la Protección de Máquinas. En esta segunda parte se desarrollan los conceptos expuestos en la primera, referidos a las medidas preventivas de carácter técnico. Así, se establecen medidas de protección como la eliminación de las fuentes de ignición, la inertización, limitación de la concentración de polvo, etc., y se desarrolla un capítulo sobre medidas de protección constructivas y concretamente se aborda la construcción resistente a explosiones: según la presión de explosión probable, atendiendo a la limitación (escape) de la presión de explosión y a la supresión de la explosión. En una última parte de este capítulo se aborda el aislamiento de la explosión mediante el



desacoplo de los sistemas: esclusa giratoria, barrera de agente extintor, válvula de cierre rápido, etc.

Desde el punto de vista reglamentario en cuanto a la normativa retomamos el hilo con el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión (orden de 1973 y derogado por el decreto 842/2002) y concretamente con la publicación del BOE n. 174 de 22/7/1983, ORDEN del 11 de Julio del 1983 por la que se modifican las instrucciones técnicas complementarias MI BT 008 (puesta a neutro de masas en redes de distribución de energía eléctrica) y MI BT 044 del Reglamento Electrotécnico para baja tensión. También se declaran de obligado cumplimiento (Anexo II de dicha Orden) diversas normas UNE relativas a la utilización de material eléctrico en atmósferas potencialmente explosivas y el alumbrado de emergencia recogidas en la tabla siguiente (tabla 1.1).

Número UNE	Fecha de aprobación	Denominación
20318	Diciembre 1969	Sistemas de protección del material eléctrico utilizado en atmósferas que contengan gases o vapores inflamables. Definiciones
20-319-78	Enero 1978	Material eléctrico para atmósferas explosivas. Envolventes con sobreposición interna. *
20-320-80	Diciembre 1980	Material eléctrico para atmósferas explosivas. Construcción, verificación y ensayos de las envolventes antideflagrantes de aparatos eléctricos
20321	Marzo 1971	Material eléctrico para atmósferas explosivas con protección por relleno con aislante pulverulento.
20-323-78	Abril 1978	Material eléctrico para atmósferas explosivas. Marcas
20-325-77	Enero 1977	Material eléctrico para atmósferas explosivas. Método de ensayo para la determinación de la temperatura de inflamación.
20326	Noviembre 1970	Material eléctrico sumergido en aceite para su utilización en atmósferas explosivas
20-327-77	Marzo 1977	Material eléctrico para atmósferas explosivas. Clasificación de las temperaturas superficiales máximas
20328	Febrero 1972	Construcción y ensayo de material eléctrico de seguridad aumentada. Protección eléctrica
20-329-75	Julio 1975	Material eléctrico para atmósferas explosivas. Explosor para circuitos de seguridad intrínseca
20-062-73	Marzo 1973	Aparatos autónomos para alumbrado de emergencia
20-392-75	Noviembre 1975	Aparatos autónomos para alumbrado de emergencia con lamparas de fluorescencia.

Tabla 1.1. Normas UNE referenciadas en el ANEXO II de la Orden del 13 de Julio de 1983

El siguiente paso tiene lugar cuando se publica el BOE n.85 de 8/4/1996 que conduce al REAL DECRETO 400/1996 del 1 de Marzo, por el que se dicta las disposiciones de aplicación de la directiva del Parlamento Europeo y del Consejo 94/9/CE, relativa a los *aparatos y sistemas de protección para usos en atmósferas potencialmente explosivas*. Este Real Decreto era muy necesario ya que resulta imperioso el establecer la correspondiente normativa interna y su desarrollo para dar cumplimiento a la Directiva 94/9/CE y aproximar las legislaciones (armonizar) de los estados miembros sobre los aparatos y sistemas de protección para su uso en atmósferas explosivas.



La aplicación del Real Decreto 400/1996 no sólo abarca a los aparatos y sistemas de protección para su uso en atmósferas explosivas, sino que va un poco más allá y también es de aplicación a los dispositivos de seguridad, control y reglaje destinados a utilizarse fuera de atmósferas potencialmente explosivas, pero que son necesarios o contribuyen al funcionamiento seguro de los aparatos y sistemas de protección, en relación con los riesgos de explosión.

El último eslabón de la cadena en cuanto a legislación de aplicación en España sobre Prevención de Riesgos en Atmósferas Explosivas lo constituye el REAL DECRETO 681/2003, del 12 de junio, (BOE n.145 de 18/6/2003) sobre la *protección de la salud y la seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo* y que resulta de la transposición de la Directiva 1999/92/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 16 de diciembre de 1999 relativa a las disposiciones mínimas para la mejora de la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores expuestos a riesgos derivados de atmósferas explosivas.

Debido a la complejidad de la aplicación del Real Decreto 681/2003 motivado entre otros factores por: la gran diversidad de los sectores de aplicación, la multitud de productos químicos inflamables, fuentes de escape, etc., se encomienda al Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, de acuerdo con lo dispuesto en el artículo 5.3 del Real Decreto 39/1997, de 17 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de los Servicios de Prevención, tiene entre sus cometidos el relativo a la elaboración de Guías destinadas a la evaluación y prevención de los riesgos laborales) según se recoge en la disposición final primera del R.D. 681/2003, la elaboración y el mantenimiento actualizado de una Guía Técnica de carácter no vinculante, para la evaluación y prevención de los riesgos relacionados con las atmósferas explosivas que puedan formarse en los lugares de trabajo.

Esta Guía ve la luz en el año 2008 con el nombre de "GUÍA TÉCNICA PARA LA EVALUACIÓN Y PREVENCIÓN DE LOS RIESGOS DERIVADOS DE ATMÓSFERAS EXPLOSIVAS EN EL LUGAR DE TRABAJO". El objetivo fundamental de la misma es el proporcionar criterios y recomendaciones, que pueden facilitar (aunque a veces no lo consiguen) a los empresarios y a los responsables de prevención la interpretación y aplicación del citado Real Decreto, especialmente en lo que se refiere a la evaluación del riesgo por presencia de atmósferas explosivas y en lo que concierne a medidas preventivas y de protección aplicables.



Tanto el Real Decreto 681/2003 como la Guía Técnica por su importancia serán analizadas en el punto 1.2. del presente capítulo de la tesis.

Amén de la Guía publicada por el INSHT, vieron la luz otras publicaciones algunas por Comunidades Autónomas y otras por sectores con el fin clarificar (no todas aciertan en este propósito) la Evaluación y Control de las Atmosferas Explosivas. Así, tenemos:

- **“GUÍA DE APLICACIÓN ATEX EN EL SECTOR DE ALIMENTACIÓN ANIMAL, fundación CESFAC”** y cofinanciada por el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural e Interat (Interprofesional Española de la Alimentación Animal). Editorial Agrícola Española, S.A., año 2010.
- **“GUÍA INFORMATIVA PARA LA CORRECTA IMPLEMENTACIÓN DE LA NORMATIVA ATEX/ATMÓSFERAS EXPLOSIVAS EN PEQUEÑAS EMPRESAS DEL SECTOR DE LA MADERA Y EL MUEBLE”**, confemadera (Confederación Española de Empresarios de la Madera), CCOO fecoma, UGT MCA y con la financiación de la Fundación para la Prevención de Riesgos Laborales.
- **“GUÍA BÁSICA PARA LA PROTECCIÓN DE LOS TRABAJADORES FRENTE AL RIESGO DE CREACIÓN DE ATMÓSFERAS EXPLOSIVAS Y USO DE PRODUCTOS QUÍMICOS EN CABINAS DE PINTURA”**, editado por FATA (Federación Andaluza de Talleres, Automóviles y Afines).
- **“MANUAL PRÁCTICO CLASIFICACIÓN DE ZONAS EN ATMÓSFERAS EXPLOSIVAS”**, elaborado por Francesc Escuer Ibars y Javier García Torrent y publicado por el Colegio de Ingenieros Técnicos Industriales de Barcelona en 2005. Este manual es de suma importancia, la correcta evaluación de una atmósfera explosiva comienza por una más importante clasificación zonal de la misma.
- **“Prevención y Protección de explosiones de polvo en instalaciones industriales”** cuyo autor es Xavier de Gea Rodríguez y que aparece publicado por FREMAP en el año 2007.

Para finalizar este subcapítulo vamos a reflejar primero las Directivas Europeas relacionadas con la Prevención de riesgos debidos a atmósferas explosivas y segundo las normas de referencia EN (tabla 1.2)

DIRECTIVAS EUROPEAS

- DOUE n. 134 de 7/6/2000 Rectificación a la Directiva 1999/92/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, del 16 de Diciembre del 1999, relativa a las disposiciones



mínimas para la mejora de la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores expuestos a los derivados de atmósferas explosivas (Quincena Directiva específica con arreglo al apartado 1 del artículo 16 de la Directiva 89/391/CEE del Consejo).

- DOUE n. 23 de 28/1/2000 Directiva 1999/92/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, del 16 de Diciembre del 1999, relativa a las disposiciones mínimas para la mejora de la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmósferas explosivas.
- DOUE n. 21 de 26/1/2000 Rectificación a la Directiva 94/9/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, del 23 de marzo del 1994, relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros sobre los aparatos y sistemas de protección para usos en atmósferas potencialmente explosivas.
- DOUE n. 257 de 19/9/1998 Directiva 98/65/CE de la Comisión, del 3 de septiembre 1998, por el cual se adapta al progreso técnico la Directiva 82/130/CEE relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros relativas al material eléctrico utilizable en atmósferas potencialmente explosivas en las minas con peligro de grisú.
- DOUE n. 248 de 23/9/1994 DIRECTIVA 94/44/CE de la Comisión, del 19 de Septiembre del 1994, por la que se adapta al progreso técnico la Directiva 82/130/CEE del Consejo Relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados Miembro relativas al material eléctrico utilizable en atmósferas potencialmente explosivas en las minas con peligro de grisú.
- DOUE n. 100 de 19/4/1994 DIRECTIVA 94/9/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, del 23 de Marzo del 1994 relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados Miembros sobre los aparatos y sistemas de protección para uso en atmósferas potencialmente explosivas.
- DOUE n.134 de 29/5/1991 DIRECTIVA de la Comisión, del 20 de Abril del 1991, por la que se adapta al progreso técnico la directiva 82/130/CEE del Consejo Relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados Miembros relativas al material eléctrico utilizado en atmósferas potencialmente explosivas en las mines con peligro de grisú.

La tabla 1.2. recoge la publicación de títulos y normas de referencia conforme a la Directiva 94/9/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de marzo de 1994, relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros sobre los aparatos y sistemas de protección para uso en atmósferas potencialmente explosivas.



Referencia y título de la norma (documento de referencia)			
EN 1010-1:2004 Seguridad de las máquinas. Requisitos de seguridad para el diseño y la construcción de máquinas de impresión y transformadoras de papel. Parte 1: Requisitos comunes	EN 1010-2:2006 Seguridad de las máquinas. Requisitos de seguridad para el diseño y la construcción de máquinas de impresión y transformadoras de papel. Parte 2: Máquinas de impresión y barnizado incluyendo la maquinaria de preimpresión	EN 1127-1:2007 Atmósferas explosivas. Prevención y protección contra la explosión. Parte 1: Conceptos básicos y metodología	EN 1127-2:2002+A1:2008 Atmósferas explosivas. Prevención y protección contra la explosión. Parte 2: Conceptos básicos y metodología para minería
EN 1710:2005+A1:2008 Equipos y componentes con uso previsto en atmósferas potencialmente explosivas en minería de interior	EN 1755:2000+A1:2009 Seguridad de las carretillas de funcionamiento en atmósferas potencialmente explosivas. Utilización en ambientes con gases, vapores, nieblas y polvos inflamables	EN 1834-1:2000 Motores alternativos de combustión interna. Requisitos de seguridad para el diseño y la fabricación de motores para atmósferas potencialmente explosivas. Parte 1: Motores del grupo II utilizados en atmósferas de gas y de vapores inflamables	EN 1834-2:2000 Motores alternativos de combustión interna. Requisitos de seguridad para el diseño y la fabricación de motores para atmósferas potencialmente explosivas. Parte 2: Motores del grupo I utilizados en trabajos subterráneos con grisú y/o con polvos inflamables.
EN 1834-3:2000 Motores alternativos de combustión interna. Requisitos de seguridad para el diseño y la fabricación de motores para atmósferas potencialmente explosivas. Parte 3: Motores del grupo II utilizados en atmósferas con polvo inflamable	EN 1839:2003 Determinación de los límites de explosividad de gases y vapores	EN 12581:2005+A1:2010 Plantas de tratamiento. Maquinaria para el tratamiento por electroforesis para aplicaciones de líquidos orgánicos en el tratamiento de materiales. Requisitos de seguridad	EN 12581:2005+A1:2010 Plantas de tratamiento. Maquinaria para el tratamiento por electroforesis para aplicaciones de líquidos orgánicos en el tratamiento de materiales. Requisitos de seguridad
EN 12757-1:2005+A1:2010 Mezcladoras para materiales de revestimiento. Requisitos de seguridad. Parte 1: Mezcladoras para usar en el acabado de vehículos	EN 13012:2001 Gasolineras. Construcción y funcionamiento de las pistolas automáticas de llenado utilizadas en los surtidores de combustible	EN 13160-1:2003 Sistemas de detección de fugas. Parte 1: Principios generales	EN 13237:2003 Atmósferas potencialmente explosivas. Términos y definiciones para equipos y sistemas de protección destinados a utilizarse en atmósferas potencialmente explosivas
EN 13463-1:2009 Equipos no eléctricos destinados a atmósferas potencialmente explosivas. Parte 1: Requisitos y metodología básica	EN 13463-2:2004 Equipos no eléctricos para atmósferas potencialmente explosivas. Parte 2:	EN 13463-3:2005 Equipos no eléctricos para atmósferas potencialmente explosivas. Parte 3: Protección por envolvente antideflagrante «d»	EN 13463-5:2003 Equipos no eléctricos destinados a atmósferas potencialmente explosivas. Parte 5: Protección por seguridad constructiva «c»



	Protección por envolvente con circulación restringida «fr»		
EN 13463-6:2005 Equipos no eléctricos para atmósferas potencialmente explosivas. Parte 6: Protección por control de las fuentes de ignición «b»	EN 13463-8:2003 Equipos no eléctricos destinados a atmósferas potencialmente explosivas. Parte 8: Protección por inmersión en líquido «k»	EN 13616:2004 Dispositivos de prevención del rebosamiento para tanques estáticos para combustibles petrolíferos líquidos	EN 13617-1:2004+A1:2009 Gasolineras. Parte 1: Requisitos de seguridad para la construcción y funcionamiento de bombas contadoras, surtidores y unidades de bombeo remotas
EN 13617-2:2004 Gasolineras. Parte 2: Requisitos de seguridad para la construcción y funcionamiento de los cortes de seguridad de bombas contadoras y surtidores	EN 13617-3:2004 Gasolineras. Parte 3: Requisitos de seguridad para la construcción y funcionamiento de las válvulas de seguridad	EN 13673-1:2003 Determinación de la presión máxima de explosión y de la velocidad máxima de aumento de presión en gases y vapores. Parte 1: Determinación de la presión máxima de explosión	EN 13673-2:2005 Determinación de la presión máxima de explosión y de la elevación máxima de la presión de explosión de gases y vapores. Parte 2: Determinación de la elevación máxima de la presión de explosión
EN 13760:2003 Sistemas de llenado de GLP para vehículos ligeros y pesados. Boquillas de llenado, requisitos de ensayo y dimensiones	EN 13821:2002 Atmósferas potencialmente explosivas. Prevención y protección contra la explosión. Determinación de la energía mínima de inflamación de las mezclas polvo/aire	EN 13980:2002 Atmósferas potencialmente explosivas. Aplicación de sistemas de calidad	EN 14034-1:2004 Determinación de las características de explosión de nubes de polvo. Parte 1: Determinación de la presión máxima de explosión p _{max} de nubes de polvo
EN 14034-2:2006 Determinación de las características de explosión de nubes de polvo. Parte 2: Determinación del incremento de presión máximo de la velocidad de explosión (dp/dt) max. de nubes de polvo	EN 14034-3:2006 Determinación de las características de explosión de nubes de polvo. Parte 3: Determinación del límite inferior de explosividad LIE de nubes de polvo	EN 14034-4:2004 Determinación de las características de explosión de nubes de polvo. Parte 4: Determinación de la concentración límite de oxígeno CLO de nubes de polvo	EN 14373:2005 Sistemas de supresión de explosiones EN 14460:2006 Equipos resistentes a las explosiones EN 14491:2006 Sistemas de protección por venteo contra explosiones de polvo
EN 14492-1:2006+A1:2009 Grúas. Cabrestantes y polipastos motorizados. Parte 1: Cabrestantes motorizados EN 14492-2:2006+A1:2009 Grúas. Cabrestantes y polipastos motorizados. Parte 2: Polipastos motorizados	Determinación de la temperatura mínima de ignición de gases y vapores	EN 14591-1:2004 Prevención y protección contra explosiones en minas subterráneas. Sistemas de protección. Parte 1: Estructura de ventilación a prueba de explosiones de 2 bar	EN 14591-2:2007 Prevención y protección contra las explosiones en minas subterráneas. Sistemas de protección. Parte 2: Barreras pasivas de recipiente de agua



EN 14591-4:2007 Prevención y protección contra las explosiones en minas subterráneas. Sistemas de protección. Parte 4: Sistemas de extinción automática para minadores	EN 14677:2008 Seguridad de las máquinas. Marcado del acero secundario. Maquinaria y equipos para el tratamiento del acero líquido. (Ratificada por AENOR en mayo de 2008.)	EN 14678-1:2006+A1:2009 Equipos y accesorios para GLP. Construcción y funcionamiento de los equipos de GLP para estaciones de servicio para automoción. Parte 1: Surtidores	EN 14756:2006 Determinación de la concentración límite de oxígeno (CLO) para gases y vapores inflamables EN 14797:2006 Dispositivos de venteo de explosiones
EN 14973:2006+A1:2008 Cintas transportadoras para utilización en instalaciones subterráneas. Requisitos de seguridad eléctrica y protección contra la inflamabilidad	EN 14983:2007 Prevención y protección frente a la explosión en minas subterráneas. Equipos y sistemas de protección para la evacuación del grisú	EN 14986:2007 Diseño de ventiladores destinados a utilizarse en atmósferas parcialmente explosivas EN 14994:2007 Sistemas de protección por venteo contra las explosiones de gas EN 15089:2009 Sistemas de aislamiento de explosión	EN 15188:2007 Determinación de la tendencia a la autoinflamación de acumulaciones de polvo EN 15198:2007 Metodología para la evaluación del riesgo de ignición de equipos y componentes no eléctricos destinados a atmósferas potencialmente explosivas
EN 15233:2007 Metodología para la evaluación de la seguridad funcional de los sistemas de protección para atmósferas potencialmente explosivas	EN 15268:2008 Gasolineras. Requisitos de seguridad para la construcción de conjuntos de bombas sumergibles	EN 15794:2009 Determinación de los puntos de explosión de los líquidos inflamables	EN ISO 16852:2010 Apagallamas. Requisitos de funcionamiento, métodos de ensayo y límites de utilización
EN 50050:2006 Aparatos eléctricos para atmósferas potencialmente explosivas. Equipo manual de pulverización electrostática	EN 50104:2002 Aparatos eléctricos para la detección y medida de oxígeno. Reglas funcionales y métodos de ensayo	EN 50176:2009 Equipo estacionario de proyección electrostática para material de recubrimiento líquido inflamable. Requisitos de seguridad	EN 50177:2009 Equipos fijos de pulverización electrostática para polvos de revestimiento inflamables. Requisitos de seguridad
EN 50223:2010 Equipos fijos de proyección electrostática de «flock» inflamable. Requisitos de seguridad	EN 50241-1:1999 Especificación para aparatos de camino óptico abierto para la detección de gases y vapores. Parte 1: Requisitos generales y métodos de ensayo	EN 50241-2:1999 Especificación para aparatos de camino óptico abierto para la detección de gases y vapores Parte 2: Reglas funcionales para aparatos de detección de gases combustibles	EN 50241-2:1999 Especificación para aparatos de camino óptico abierto para la detección de gases y vapores Parte 2: Reglas funcionales para aparatos de detección de gases combustibles
EN 50303:2000 Equipos del Grupo I, Categoría M1 destinados a permanecer en funcionamiento en atmósferas con peligro de grisú y/o polvo de carbón.	EN 50381:2004 Cámaras transportables ventiladas con o sin una fuente interna de puesta en circulación	EN 50495:2010 Dispositivos de seguridad requeridos para el funcionamiento seguro de equipos con respecto a los riesgos de explosión	EN 60079-0:2009 Atmósferas explosivas. Parte 0: Equipo. Requisitos generales IEC 60079-0:2007
EN 60079-1:2007 Atmósferas explosivas. Parte 1: Protección del equipo por envolventes	EN 60079-2:2007 Atmósferas explosivas. Parte 2: Equipos de	EN 60079-5:2007 Atmósferas explosivas. Equipos de protección por relleno	EN 60079-6:2007 Atmósferas explosivas. Parte 6: Protección del equipo por inmersión en



antideflagrantes «d» IEC 60079-1:2007	protección por envolventes presurizadas «p» IEC 60079-2:2007	pulverulento «q». IEC 60079-5:2007	aceite «o» IEC 60079-6:2007
EN 60079-7:2007 Atmósferas explosivas. Parte 7: Protección del equipo por seguridad aumentada «e» IEC 60079-7:2006	EN 60079-7:2007 Atmósferas explosivas. Parte 7: Protección del equipo por seguridad aumentada «e» IEC 60079-7:2006	EN 60079-15:2005 Material eléctrico para atmósferas de gas explosivas. Parte 15: Construcción, ensayo y marcado de material eléctrico de modo de protección «n» no productor de chispas IEC 60079-15:2005	EN 60079-18:2009 Atmósferas explosivas. Parte 18: Protección del equipo por encapsulado «m» IEC 60079-18:2009
EN 60079-20-1:2010 Atmósferas explosivas. Parte 20-1: Características de los materiales. Clasificación de los gases y vapores, métodos y datos de ensayo IEC 60079-20-1:2010	EN 60079-25:2004 Material eléctrico para atmósferas de gas explosivas. Parte 25: Sistemas de seguridad intrínseca IEC 60079-25:2003	EN 60079-26:2007 Atmósferas explosivas. Parte 26: Material con nivel de protección de material (EPL) Ga IEC 60079-26:2006	EN 60079-27:2008 Atmósferas explosivas. Parte 27: Concepto de bus de campo de seguridad intrínseca (FISCO) IEC 60079-27:2008
EN 60079-28:2007 Atmósferas explosivas. Parte 28: Protección de material y sistemas de transmisión que utilizan radiación óptica IEC 60079-28:2006	EN 60079-29-1:2007 Atmósferas explosivas. Parte 29-1: Detectores de gas. Requisitos de funcionamiento par los detectores de gases inflamables IEC 60079-29-1:2007 (Modificada)	EN 60079-30-1:2007 Atmósferas explosivas. Parte 30-1: Calefactores para traceado por resistencia eléctrica. Requisitos generales y ensayos IEC 60079-30-1:2007	EN 60079-30-1:2007 Atmósferas explosivas. Parte 30-1: Calefactores para traceado por resistencia eléctrica. Requisitos generales y ensayos IEC 60079-30-1:2007
EN 60079-31:2009 Atmósferas explosivas. Parte 31: Protección del material contra la inflamación de polvo por envolvente «tD» IEC 60079-31:2008	EN 61241-4:2006 Material eléctrico para uso en presencia de polvo inflamable. Parte 4: Modo de protección «pD» IEC 61241-4:2001	EN 61241-11:2006 Material eléctrico para uso en presencia de polvo inflamable. Parte 11: Protección por seguridad intrínseca «iD» IEC 61241-11:2005	EN 62013-1:2006 Lámparas de casco para utilización en minas con riesgo de grisú. Parte 1: Requisitos generales. Construcción y ensayos relacionados con el riesgo de explosión IEC 62013-1:2005

Tabla 1.2. Títulos y normas de referencia conforme a la a Directiva 94/9/CE

Como resumen de la normativa reguladora de la Prevención de Riesgos en Atmósferas Explosivas en España, podemos escribir:

- **Real Decreto 400/1996**, relativo a los aparatos y sistemas de protección para uso en atmósferas potencialmente explosivas [Transposición de la Directiva 94/9/CE (ATEX-100).
- **Real Decreto 681/2003**, sobre protección de la salud y seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de la presencia de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo [Transposición de la Directiva 99/92/CE (ATEX-137)].



- **La Ley 31/1995**, de *Prevención de Riesgos Laborales* que determina el cuerpo básico de garantías y responsabilidades para una adecuada protección de la salud de los trabajadores en el lugar de trabajo, dejando al desarrollo de normas reglamentarias la fijación de las medidas mínimas para la adecuada protección (Art. 43 Ley 31/1995 L.P.R.L.).

Al igual que la Ley de Prevención de Riesgos Laborales (Ley 31/95) derivada de la directiva marco 89/391 CEE, la *Unión Europea* ha desarrollado una serie de directivas, para el establecimiento de los llamados *Requisitos Esenciales de Seguridad*, que pretenden mejorar la seguridad frente a los riesgos de explosión en atmósferas potencialmente explosivas de gases, vapores, nieblas, polvos o fibras. La transposición de estas directivas a la legislación estatal obliga a la industria, principalmente a la industria química, a adecuar sus plantas a las disposiciones requeridas por estas normativas.

A través del siguiente cuadro puede apreciarse la correspondencia existente entre las directivas comunitarias más destacables en materia de seguridad frente a los riesgos de explosión definidos en el párrafo anterior, y las normativas resultado de la transposición de las primeras al ordenamiento jurídico español.

Reglamentación comunitaria	Reglamentación estatal
Directiva 89/392/CEE	Real Decreto 1435/1992
Directiva 94/103/CEE	Real Decreto 56/1995
Directiva 94/9/CE	Real Decreto 400/1996
Directiva 1999/92/CE	Real Decreto 681/2003

Tabla 1.3. Correspondencia entre la Reglamentación comunitaria y la Reglamentación estatal en materia de seguridad frente a explosiones

Las tres primeras directivas que aparecen en el cuadro anterior derivan del *artículo 100 del Tratado de la UE* (actualmente renumerado como *artículo 95*), enfocado a la *seguridad de los equipos y productos*; mientras que la *Directiva 1999/92/CE* tiene su origen en el actual *artículo 137 del Tratado de la Unión Europea*, y se centra en la *seguridad de los trabajadores*.

La *Directiva 89/392/CEE* se conoce como la *Directiva Marco de Máquinas*, transpuesta en el *Real Decreto 1435/1992*, y hace referencia directa en su párrafo 1.5. a las medidas



de seguridad que deben tomarse contra los riesgos de incendio, *explosión* y emisiones de gases, polvo, etc. Una última modificación de esta directiva se presenta en la *Directiva 94/103/CEE*, que se refleja en el *Real Decreto 56/1995*.

La *Directiva 94/9/CE* conocida como la *Directiva ATEX 95 (100A)*, es relativa a legislaciones sobre equipos y sistemas de protección para uso en atmósferas potencialmente explosivas.

Analizamos a continuación la normativa anteriormente referenciada.

ATEX 100 (94/9/CE) (RD 400/1996)

El Real Decreto 400/1996, de 1 de marzo, dicta las disposiciones de aplicación de la Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo “94/9/CE”, relativa a los aparatos y sistemas de protección para uso en atmósferas potencialmente explosivas (BOE de 8 de abril de 1996).

Objetivo de la directiva

Su objetivo es garantizar en el territorio de la UE la libre circulación de los productos que entran dentro de su ámbito de aplicación.

Campo de aplicación

Este Real Decreto se aplica a los aparatos y sistemas de protección para uso en atmósferas potencialmente explosivas. Se aplica también a los dispositivos de seguridad, control y reglaje destinados a utilizarse fuera de atmósferas potencialmente explosivas, pero que son necesarios, o que contribuyen al funcionamiento seguro de los aparatos y sistemas de protección, en relación con los riesgos de explosión.

- Se entiende por “aparatos” las máquinas, los materiales, los dispositivos fijos o móviles, los órganos de control y la instrumentación, los sistemas de detección y prevención que, solos o combinados, se destinan a la producción, transporte, almacenamiento, medición, regulación, conversión de energía y transformación de materiales y que, por las fuentes potenciales de ignición que los caracterizan, pueden desencadenar una explosión.
- Se entiende por “sistemas de protección” los dispositivos, distintos de los componentes de los aparatos definidos anteriormente, cuya función es la de detener



inmediatamente las explosiones incipientes y/o limitar la zona afectada por una explosión, y que se comercializan por separado como sistemas con funciones autónomas.

- Se entiende por “componentes” las piezas que son esenciales para el funcionamiento seguro de los aparatos y sistemas de protección, pero que no tienen función autónoma.

Fecha de aplicación y derogaciones

Obligatoria a partir del 1 de julio de 2003.

Deroga las Directivas 76/117/CEE, 79/196/CEE y 82/130/CEE

Exclusiones

Quedan excluidos del este Real Decreto (*y por tanto de la Directiva 94/9/CE*):

- Los dispositivos médicos para uso en un entorno sanitario.
- Los aparatos y sistemas de protección cuando el peligro de explosión se deba exclusivamente a la presencia de sustancias explosivas o sustancias químicas inestables.
- Los equipos destinados a usos en entornos domésticos y no comerciales, donde las atmósferas potencialmente explosivas se crean muy rara vez, únicamente como consecuencia de una fuga fortuita de gas.
- Los equipos de protección individual, que están regulados por el Real Decreto 1407/1992, de 20 de noviembre, modificado por el Real Decreto 159/1995, de 3 de febrero, de aplicación de la Directiva 89/686/CEE.
- Los navíos marinos y las unidades offshore (instalaciones marítimas móviles), así como los equipos a bordo de los mismos. No se excluyen instalaciones marítimas fijas ni sus equipos de a bordo, así como tampoco las embarcaciones que no se consideren de navegación marítima (que pesen menos de 500 Tm y no hayan sido diseñadas para navegar por alta mar, sino para la navegación interior en ríos, canales y lagos).
- Los medios de transporte, es decir, los vehículos y sus remolques destinados únicamente al transporte de personas o mercancías por vía aérea, red vial, red ferroviaria o vías acuáticas. No están excluidos los vehículos destinados al uso en una atmósfera potencialmente explosiva.



- Los equipos contemplados en el párrafo b) del apartado 1 del artículo 223 del Tratado de Roma (equipos específicos para las fuerzas armadas o para el mantenimiento de la ley y el orden).

1.2. Análisis del Real Decreto 681/2003 -ATEX 137 (1999/92/CE)

La aparición del Real Decreto 681/2003, de 12 de junio, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo (BOE de 18 de junio), vino a cubrir un vacío legal en la regulación de las atmósferas explosivas. Así, anteriormente a este Real Decreto sólo existían por este orden las directivas (y sus transposiciones a real decreto) siguientes:

- *Directiva Marco de Máquinas*, (Real Decreto 1435/1992 y que hace referencia directa en su párrafo 1.5. a las medidas de seguridad que deben tomarse contra los riesgos de incendio, *explosión* y emisiones de gases, polvo,) modificada por la *Directiva 94/103/CEE* que se refleja en el *Real Decreto 56/1995* y
- La Directiva 94/9/CE conocida como la *Directiva ATEX 95* (100A) relativa a legislaciones sobre equipos y sistemas de protección para uso en atmósferas potencialmente explosivas.

Quedaba pues, sin definir la obligatoriedad por parte del empresario a la hora de establecer las disposiciones mínimas con relación a la protección de la salud y seguridad de los trabajadores que pudieran verse expuestos a riesgos derivados de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo y que con el R.D. 681/2003 se ha tratado de cumplir.

Sin embargo, las expectativas tan altas depositadas en este real decreto no han tenido su eco en el tejido industrial susceptible de aplicación y a día de hoy aunque muchas empresas lo conocen y saben que es obligatorio por su actividad no son capaces de aplicarlo de forma efectiva y práctica, lo mismo sucede con las empresas que se dedican a realizar los estudios de atmósferas explosivas conocido como DOCUMENTO DE PROTECCIÓN CONTRA EXPLOSIONES (DOPE).

De un análisis detallado del Real Decreto 681/2003 se desprende una falta de concreción y claridad en lo referente a dos artículos clave que contribuyen (a mi juicio) de forma negativa en la aplicación de la normativa.



- **Capítulo II-Artículo 7** (Áreas en las que puedan formarse atmósferas explosivas). Aquí se nos indica textualmente en el orden siguiente que:
1. El empresario deberá clasificar en zonas, con arreglo al **anexo I**, las áreas en las que pueden formarse atmósferas explosivas.
 2. El empresario deberá garantizar, en las áreas a que se refiere el apartado 1, la aplicación de las disposiciones establecidas en el anexo II (Disposiciones mínimas destinadas a mejorar la seguridad y la protección de la salud de los trabajadores potencialmente expuestos a atmósferas explosivas).
 3. Sin perjuicio de lo establecido en el **Real Decreto 485/1997**, de 14 de abril, sobre disposiciones mínimas en materia de señalización de seguridad y salud en el trabajo, los accesos a las áreas en las que puedan formarse atmósferas explosivas en cantidades tales que supongan un peligro para la salud y la seguridad de los trabajadores deberán señalizarse, cuando sea necesario, con arreglo a lo dispuesto en el anexo III.

El problema que se plantea es como realizar la clasificación zonal (por áreas que se recoge en el anexo II) ya sea por gases, vapores o nieblas y/o por polvos y que queda definida de forma ambigua por ejemplo en la Clase I (gases vapores o nieblas) para las Zonas 1 y 2.

• **Zona 1**

Emplazamiento en el que cabe contar, en condiciones normales de funcionamiento, la formación ocasional de atmósfera explosiva.

• **Zona 2**

Emplazamiento en el que no cabe contar, en condiciones normales de funcionamiento, con la formación ocasional de atmósfera explosiva, y en la que, en caso de formarse, solo subsiste por espacios de tiempo muy breves.

Se antoja difícil pues, por no decir imposible, en muchos casos el establecer de forma objetiva (no cabe contar, en condiciones normales....) una clasificación zonal en base a lo expuesto en el Real Decreto. Esto mismo también es extrapolable a la hora de realizar una clasificación para zonas de Clase II en las cuales hay o puede haber polvos inflamables).



• **Zona 20**

Emplazamiento en el que la atmósfera explosiva, en forma de nube de polvo inflamable, está presente de modo permanente, por un espacio de tiempo prolongado o frecuentemente. (Las capas en si mismas no constituyen una zona 20. En general estas condiciones se dan en el interior de conducciones, recipientes, etc. Los emplazamientos en los que hay capas de polvo pero no hay nubes de forma continua o durante largos periodos de tiempo no entran en este concepto).

• **Zona 21**

Emplazamiento en el que cabe contar, en condiciones normales de funcionamiento, con la formación ocasional de atmósfera explosiva, en forma de nube de polvo inflamable. Esta zona puede incluir, entre otros, los emplazamientos en la inmediata vecindad de, por ejemplo, lugares de vaciado o llenado de polvo.

• **Zona 22**

Emplazamiento en el que no cabe contar, en condiciones normales de funcionamiento, con la formación ocasional de atmósfera explosiva, en forma de nube de polvo inflamable, y en la que, en caso de formarse, solo subsiste por espacios de tiempo muy breves. (Esta zona puede incluir, entre otros, entornos próximos de sistemas conteniendo polvo de los que puede haber fugas y formar depósitos de polvo).

La clasificación zonal es clave, ya que nos va a condicionar la aplicación del artículo 4 de Evaluación de los Riesgos de explosión. Este artículo presenta también gran ambigüedad ya que nos dice que tenemos que evaluar, pero no nos dice como, no establece un método concreto, definido y de reconocido prestigio que podamos utilizar como herramienta de evaluación.

- **Capítulo II-Artículo 4** (Evaluación de los Riesgos de explosión), que como es lógico lo relaciona primero con la Ley de Prevención de Riesgos Laborales y dicta la misiva de que el empresario evaluará los riesgos específicos derivados de las atmósferas explosivas (artículos 16 y 23 la sección 1.ª del capítulo II del Reglamento de los Servicios de Prevención Real Decreto 39/97) teniendo en cuenta, al menos:
 - a. La probabilidad de formación y la duración de atmósferas explosivas.
 - b. La probabilidad de la presencia y activación de focos de ignición, incluidas las descargas electrostáticas.
 - c. Las instalaciones, las sustancias empleadas, los procesos industriales y sus posibles interacciones.



d. Las proporciones de los efectos previsibles.

En este artículo se nos indica además que:

- Los riesgos de explosión se evaluarán globalmente y que en la evaluación de los riesgos de explosión se tendrán en cuenta los lugares que estén o puedan estar en contacto, mediante aperturas, con lugares en los que puedan crearse atmósferas explosivas.
- Y que con objeto de preservar la seguridad y la salud de los trabajadores, y en aplicación de lo establecido en los **artículos 3 y 4**, el empresario tomará las medidas necesarias para que:
 - En los lugares en los que puedan formarse atmósferas explosivas en cantidades tales que puedan poner en peligro la salud y la seguridad de los trabajadores o de otras personas, el ambiente de trabajo sea tal que el trabajo pueda efectuarse de manera segura.
 - En los ambientes de trabajo en los que puedan formarse atmósferas explosivas en cantidades tales que puedan poner en peligro la salud y la seguridad de los trabajadores, se asegure mediante el uso de los medios técnicos apropiados, una supervisión adecuada de dichos ambientes, con arreglo a la evaluación de riesgos mientras los trabajadores estén presentes en aquéllos.

Tenemos que tener claro pues, que metodología de clasificación zonal para gases vapores o nieblas podemos utilizar, (y por ende de evaluación del riesgo de explosión) de manera, que nos permita clasificar y acotar de forma sencilla tanto una zona concreta como por ejemplo una zona con una sola fuente de escape (como puede ser una válvula de una caldera), o una zona más compleja como puede ser una balsa de refrigeración de amoníaco. Lo expuesto es aplicable para un proceso en el que existan polvos explosivos y que hasta la fecha no ha sido tratado con el rigor suficiente.

La ambigüedad del Real Decreto propició la aparición de múltiples guías de aplicación para zonas ATEX que en casos propiciaron una mejor comprensión para la aplicación del real decreto pero que en otros contribuyó a generar mayor confusión (a modo de ejemplo tenemos la GUÍA TÉCNICA DEL INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO) que sistematiza la evaluación del riesgo de explosión en el la figura 1.1 (página 53 de la guía).



En esta guía, se incurre en un planteamiento equivocado a la hora de determinar la extensión de una zona por vapores, gases o polvos invocando a realizar mediciones para valorar la extensión del gas. Esta acción puede ser poco representativa ya que las condiciones ambientales en una industria pueden variar considerablemente de un día a otro y por otra parte se presta a confusión sobre como medir, con que tipo de equipo (los equipos de lectura directa no disponen de células para captar todo tipo de gases, captan los más habituales como el CO, CO₂, CH₄). Hubiese sido más aconsejable el invitar a realizar la extensión zonal mediante un método cualitativo y el realizar mediciones puntuales de acompañamiento en aquellos casos que sea factible.

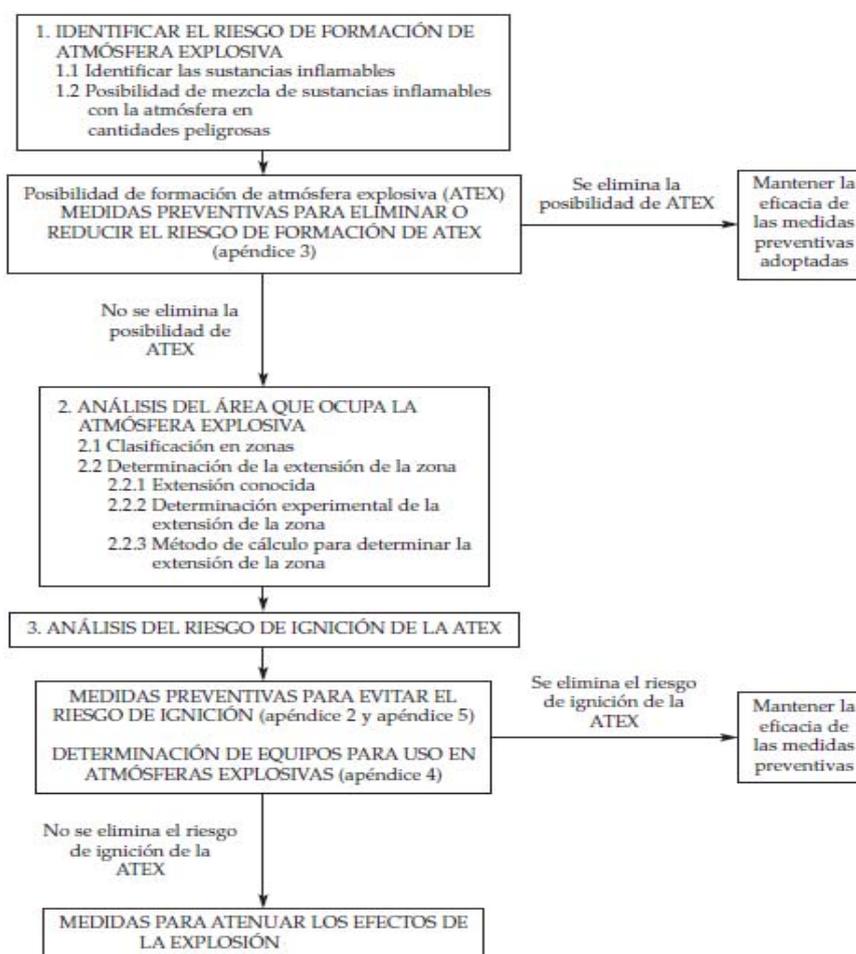


Figura 1.1. Sistematización del riesgo por explosión (Guía Técnica INSHT)

Resulta también preocupante el planteamiento que establece en la página 63 de la guía sobre cómo medir, “invitando a recrear” la posible fuga o emisión para realizar las mediciones de concentración de la sustancia inflamable en el aire. Estas prácticas comportan por lo general serios riesgos y contradicen el principio fundamental de la Ley de Prevención de Riesgos Laborales (Ley 31/95).



Por otra parte, es paradójico ver el escaso tratamiento y la disparidad para la clasificación de las zonas para polvos explosivos. Tenemos a modo de ejemplo la Metodología para la Clasificación de Zonas con Riesgo de Incendio y Explosión debido a polvo combustible editada por la Junta de Castilla y León y que invoca a realizar la clasificación para polvos explosivos mediante al utilización de los parámetros siguientes:

- Tamaño medio de las partículas.
- Presión interna del sistema de contención del polvo.
- Altura de la fuente de emisión.
- Caudal de emisión.
- Humedad del polvo combustible.
- Tipo de ambiente (cerrado o abierto).
- Velocidad de sedimentación del polvo.
- Velocidad del aire.

No es que resulte difícil de obtener estos parámetros, si no que a veces es imposible.

Podríamos seguir detallando situaciones anómalas de la normativa y guías existentes pero no es éste el objetivo de la tesis.

1.3. Planteamiento formal de objetivos e hipótesis

El objetivo propuesto en la presente tesis es múltiple, a saber:

- Estudiar de forma rigurosa la normativa y legislación vigente sobre la prevención de riesgos por atmósferas explosivas, así como bibliografía de reconocido prestigio: normas, publicaciones, etc.
- Realizar un análisis detallado de los accidentes producidos en la industria y relacionados con las atmósferas explosivas, prestando atención a los sucesos acaecidos en España.
- Establecer metodologías rigurosas para las clasificaciones de emplazamientos peligrosos para polvos inflamables y polvos combustibles. En este apartado se hará uso de métodos cualitativos combinados con simulaciones computacionales, haciendo uso de programas de reconocido prestigio como el GAMBIT-FLUENT, ProgEx, etc.
- Proponer medidas de actuación y factores limitadores frente a dichas atmósferas explosivas.
- Aplicar las metodologías definidas en los puntos anteriores a dos casos prácticos: el primero de ellos una industria láctea que presenta gran variedad de emplazamientos



con probabilidad por riesgo explosión y el segundo una planta de tratamiento de residuos. En ambos casos se va a proceder a validar los resultados.

Las hipótesis que vamos a considerar son las siguientes:

- Para determinar la clasificación de zonas con riesgo de incendio y explosión debido a la presencia de polvos combustibles vamos a partir en primera instancia de las indicaciones de la norma UNE-EN 61241-10.
- La clasificación de zonas con riesgo de incendio y explosión debido a gases y/o líquidos la efectuaremos siguiendo indicaciones de la norma UNE -EN 60079-10 y la norma italiana CEI 31-35.
- Emplearemos el programa ProgEx para determinar la extensión de las zonas por gases y/o vapores, así como el programa de simulación de dinámica de fluidos computacional (FLUENT)
- Para el cálculo de la superficie de alivio de presión en la cámara de secado de leche en polvo vamos a utilizar y comparar tanto la norma europea EN 144491 como la norma americana NFPA 68.
- Utilizaremos los valores más restrictivos para el cálculo de las atmósferas pulverulentas en el caso práctico (industria láctea) correspondientes a tres productos de fabricación: leche entera en polvo, leche en polvo con porcentaje de materia grasa y suero en polvo.
- Consideraremos el caso más desfavorable para el cálculo de la extensión de la zona en los depósitos de GNL, que sería el escape de forma continua en los dos depósitos a la vez y durante la descarga.



CAPITULO 2. RECOPIACIÓN Y SISTEMATIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN NECESARIA PARA LA CUANTIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS PROBLEMAS SURGIDOS EN LA APLICACIÓN DEL RD 681/2003 Y ACCIDENTES PRODUCIDOS EN LA INDUSTRIA

2.1. Estado del arte

Hemos analizado en el capítulo 1 (punto 1.1) de forma cronológica en el tiempo la normativa reguladora de atmósferas explosivas, así como normas de reconocido prestigio (notas técnicas de prevención, publicaciones y libros) y guías de aplicación y desarrollo de la legislación vigente en materia de atmósferas explosivas. En este punto pues, vamos a analizar como se encuentra el estado del arte en la materia que nos ocupa, no desde un punto de vista regulador, sino desde la óptica de aplicación de la normativa en estudios y proyectos.

No son muchos los estudios realizados en nuestro país en relación con las Atmósferas Explosivas y pueden reducirse a los trabajos siguientes:

- Proyecto: “**Clasificación de emplazamientos peligrosos para atmósferas explosivas de gases y polvos combustibles**”, (UPC-ETSIB) y cuyo autor es D. Carlos Pérez Carbonell. Fecha diciembre de 2005.

Constituye un trabajo interesante que se introduce con un análisis del riesgo de explosión ligado a un histórico de accidentes (el análisis es detallado y para realizarlo se han consultado bases de datos), posteriormente se realiza una descripción ligera del marco legal (legislación europea y estatal) para a continuación establecer una metodología para la clasificación de emplazamientos peligrosos tanto para gases y vapores como para polvos combustibles. La última parte del proyecto la cierra la aplicación a un caso práctico de una industria química en la cual se llevan a cabo procesos de fabricación de productos acelerantes y endurecedores para resinas. Este caso práctico viene desarrollado de forma completa en un anexo junto con otros apartados y aunque se encuentra presentado de forma detallada con tablas concatenadas, se hecha de menos un resumen detallado con los datos más relevantes obtenidos en la aplicación de la metodología.



➤ Proyecto: **“Clasificación y análisis de los métodos disponibles para la aplicación de la directiva ATEX”**.

Al igual que el anterior, es un proyecto de la UPC-ETSIIB y su autor es D. Javier Martín Acosta. Este trabajo es similar al anterior y lo que aquí se propone es una metodología para elaborar el “Documento de Protección Contra Explosiones (DPCE) tal y como se establece en el R.D. 681/2003. Como hemos indicado presenta similitudes con el anterior: se establece una clasificación de áreas para atmósferas explosivas considerando las fuentes de ignición, tasas de escapes, características de sustancias utilizadas y a mayores presenta la evaluación del riesgo de explosión (algo necesario para realizar el DCPE) en base a:

- Valoración de la probabilidad de explosión.
- Valoración de la severidad de las consecuencias.
- Valoración del riesgo de explosión.

También introduce un pequeño apartado para la señalización de zonas de riesgo de Atmósferas Explosivas y un punto interesante de verificación del cumplimiento de equipos de trabajo conforme al R.D. 1215/97, de 18 de julio por el que *se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud para la utilización por los trabajadores de los equipos de trabajo*.

En la última parte de este trabajo, se tratan de forma somera las medidas correctoras para la prevención y protección contra explosiones, así como a la presentación de un pequeño caso práctico donde se evalúa el riesgo de explosión en una planta de proceso donde se generan gases/vapores inflamables, analizando reactores y equipos auxiliares asociados. Como en el proyecto anterior se hubieran agradecido unas conclusiones resumidas de la evaluación del riesgo de explosión al caso práctico.

Este trabajo también es de diciembre de 2005

➤ Proyecto: **“Metodología de análisis sobre la protección de los riesgos derivados de atmósferas explosivas. Caso Práctico”**

Es un proyecto presentado en mayo de 2006 en la UPC-ETSIIB y cuyo autor es D. Ramón Bosch Torres. Este trabajo presenta una metodología para la evaluación de



riesgos derivados de atmósferas explosivas. La metodología pretende sistematizar la evaluación del riesgo y la elaboración del DPCE, así como permitir en palabras de su autor, su aplicación al mayor número de casos posibles, intentando salvar las características diferenciales de las muy variadas ramas de actividad en las que pueden aparecer atmósferas explosivas. La metodología ha sido aplicada en un caso práctico, que pretende ser representativo del sector industrial actual (una compañía del sector químico dedicada a la fabricación de colorantes orgánicos), donde se describen los procesos y actividades y se analizan las sustancias utilizadas. El riesgo de explosión se evalúa mediante el estudio de probabilidades de formación de atmósferas explosivas (clasificación de zonas) y presencia de fuentes de ignición efectivas. Posteriormente se evalúa el riesgo global, introduciendo factores para considerar el riesgo asociado a la antigüedad de la planta, la presencia de personas o las zonas clasificadas con elevada probabilidad de presencia de atmósferas explosivas. La obtención de esta valoración global facilita la interpretación del nivel de riesgo y una primera orientación de las prioridades de intervención

En la última parte del proyecto se definen medidas de protección contra explosiones bien sean desde un punto de vista organizativo o bien de índole técnica. El proyecto constituye un documento de protección contra explosiones para el caso de estudio si bien adolece de unas necesarias conclusiones.

- Tesis: **“Aplicación de la dinámica de fluidos computacional al estudio de las explosiones en silos y su protección mediante venteos”**.

Teniendo en cuenta que una parte de esta tesis versa sobre la aplicación de la dinámica de fluidos computacional (CFD-FLUENT) a casos prácticos de estudio (entre los que se encuentra una cámara de secado de leche en polvo), es necesario comentar esta tesis. El autor/director de la misma son respectivamente D. Alberto Tascón Vegas y D. Pedro José Aguado Rodríguez y fue defendida en diciembre de 2009 en la Universidad de León (Departamento de Ingeniería y Ciencias Agrarias-Escuela Superior y Técnica de Ingeniería Agraria).

La tesis se introduce con un pequeño capítulo informativo sobre explosiones, para continuar con las definiciones y conceptos básicos sobre explosiones (polvo combustible, propagación de una explosión, explosiones en silos, granulometría de los polvos, fuentes de ignición, etc.), el venteo de explosiones (dispositivos de venteo,



normas de venteo (norma europea EN 14491, norma americana NFPA 68 y norma alemana VDI 3673), efectos del venteo y estudios experimentales) y la simulación de explosiones donde se desarrollan los fundamentos teóricos de la dinámica de fluidos computacional y el código utilizado por los autores (DESC-Dust Explosion Simulation Computer).

A continuación sobrevienen por este orden el capítulo de objetivos y el de la metodología que se va a utilizar: material, programa DESC, etc. Estos capítulos son previos al capítulo de resultados donde se analizan y comparan los datos obtenidos con las simulaciones y las exigencias normativas de venteo. En este capítulo se recrean diferentes escenarios para valorar la influencia tanto del punto de ignición como del tamaño y la posición de la nube de polvo en el resultado de la explosión.

Posteriormente se desarrollan conclusiones de los análisis y comparación de las normas de dimensionamiento de venteos anteriormente citadas y se establecen de forma general recomendaciones para el diseño de silos con venteos frente a explosiones.

En resumen, la tesis en cuestión presenta un excelente trabajo donde se comparan y analizan entre otras cosas las diferentes normas de venteo (norma europea EN 14491, norma americana NFPA 68 y norma alemana VDI 3673), para posteriormente y mediante la aplicación del programa DESC simular explosiones de polvo de maíz y así poder estudiar la influencia de los paneles de venteo sobre la geometría de los silos simulados. Los datos obtenidos han permitido comparar las diferentes normas de venteo y determinar las áreas de venteo mínimas requeridas según las diferentes normas comentadas.

- Otros proyectos: Los trabajos comentados no son los únicos existentes hasta la fecha. Así, existen dos proyectos de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Minas de la Universidad de Oviedo, uno de título **“Prevención en relación con el riesgo de formación de atmósferas explosivas ATEX”** cuyo autor es D. Ramón Sánchez García y el otro titulado **“Prevención , tratamiento y protección frente a atmósferas explosivas”** cuyo autor es D^a. Manuela García Fernández y otro proyecto más de la Universidad de Zaragoza **“Adecuación de una planta piloto de combustión de biomasa a la normativa ATEX”** elaborado por D. Ismael Aso



Aguarta. Lamentablemente estos proyectos no los podemos comentar pues no ha sido posible su cesión-préstamo por las correspondientes universidades.

- Otras publicaciones: no podemos finalizar este apartado sin mencionar a otros autores que han contribuido al estudio de las atmósferas explosivas y de los cuales se ha bebido para realizar la presente tesis. En concreto:
 - D. Xavier de Gea Rodríguez, director de LPG Prevención y Protección de explosiones y autor de diversos artículos relacionados con la temática y del manual “Prevención y protección de explosiones de polvo en instalaciones industriales” (FREMAP 2007) y
 - D. Javier García Torrent, profesor del departamento de Ingeniería Química y Combustibles (UPM) y responsable del área de seguridad de procesos sólidos del Laboratorio Oficial de Madariaga (LOM) y autor entre otros de las obras: “**Manual Práctico Clasificación de zonas en atmósferas explosivas**” COITI de Barcelona 2004 y “**Seguridad Industrial en Atmósferas Explosivas**”. Madrid: Laboratorio Oficial José María Madariaga, D.L. 2003.

Fuera de España los trabajos realizados son múltiples pero vamos a destacar los realizados por:

- Eckhoff, R.K., cuyos estudios y experimentos en el campo de las atmósferas explosivas por polvos han contribuido y contribuyen al mejor entendimiento de los procesos explosivos y a la mejora de seguridad de las instalaciones siendo fuente de consulta e inspiración para profesionales del resto del mundo.
- Y los realizados por los miembros de GexCon As, entre otros: Davis, S; Wingerden, K.V.; Skoljd,T; Pedersen, G; etc,. GexCon As es responsable de la creación, desarrollo y mantenimiento de los software de simulación de fluidos computacional FLACS (Flame Acceleration Simulator) y DESC (Dust Explosion Simulation Computer). Los trabajos realizados por los profesionales de GexCon incluyen simulaciones con estos códigos, lo que permite estudiar y predecir comportamientos de explosiones en multitud de escenarios.

2.2. Análisis de Accidentalidad por Atmósferas Explosivas

Durante los últimos cincuenta años el sector industrial y en especial el químico han experimentado cambios de gran importancia como: avances tecnológicos, aparición de nuevos procesos, de nuevas industrias y de nuevos productos químicos en el mercado.



Todos estos avances han ayudado a hacer crecer a las industrias, incrementando su capacidad de producción. Junto a ellas, ha aumentado también el número de personas, que trabajan en las plantas de proceso y que viviendo en las proximidades pueden estar expuestas a las consecuencias de un accidente industrial. Esto ha propiciado una toma de conciencia sobre la seguridad industrial, y con ella, han aparecido a nivel administrativo y técnico, medidas para identificar peligros y así acotar el riesgo de accidentes industriales. El Análisis Histórico de Accidentes (AHA) es una de estas medidas.

Como ya indicó D. Carlos Pérez Carbonell en su trabajo **“Clasificación de emplazamientos peligrosos para atmósferas explosivas de gases y polvos combustibles”**, el Análisis Histórico de Accidentes (AHA) es una herramienta de identificación de riesgos que hace uso de los datos recogidos el pasado sobre accidentes industriales. La ventaja de este análisis radica en que se refiere a accidentes ya ocurridos y por tanto, los peligros identificados son reales. La principal limitación del análisis es que sólo hace referencia a accidentes que han tenido lugar y de los cuales se posee información suficiente, así como el hecho de que muchos accidentes e incidentes se registran de forma restringida o no se registran. Además, el número de casos a analizar es finito y no cubre todas las posibilidades importantes. Otras veces, sin embargo, solamente es posible identificar un cierto número de situaciones, operaciones o errores, que han propiciado el inicio de un accidente en un determinado tipo de instalación.

A pesar de lo anterior, el análisis histórico de accidentes es una técnica útil que permite la identificación de riesgos concretos. Al menos, puede indicar qué dirección seguir en una empresa cuyas instalaciones son análogas a otras, o que procesan sustancias similares a las de éstas en las cuales ya ha ocurrido un incidente y así evitar que éste suceda. Esto sería suficiente para iniciar un análisis de riesgos que indique si es o no verosímil que el accidente tenga lugar en la empresa en cuestión. Además, es un medio muy valioso para una verificación de los modelos de que se dispone en la actualidad en cuanto a la predicción de las consecuencias de accidentes.

Parece lógico pues, realizar un Análisis Histórico de Accidentes describiendo los tipos de incidentes en los cuales haya estado una explosión ya sea: física, no confinada, confinada, de polvo, de aerosol o bleve.



2.2.1. Descripción de las principales bases de datos

Las Bases de Datos de accidentes industriales más conocidas debido al elevado número de registros de incidentes grabados y a la facilidad con que pueden ser consultados son: FACTS, ACCIDENT DATABASE, MHIDAS y MARS. Si bien, hay otras (tabla 2.1).

Las bases de datos MHIDAS, FACTS y SONATA se nutren de diferentes fuentes de información, principalmente extraídas de revistas especializadas (como por ejemplo el 'Hazardous Cargo Bulletin') y de periódicos.

La MARS (Major Accident Report System) se ha desarrollado por el Institute for Systems Engineering and Informatics. Se nutre de las informaciones que los Servicios de Protección Civil de los Estados Miembros de la Unión Europea recopilan sobre Accidentes Mayores ocurridos en cada país, en cumplimiento de la "Directiva Seveso".

Base de datos	Características Principales
OSIRIS 1	<ul style="list-style-type: none"> - 3000 accidentes registrados en periodo 1970-1990 - Incluye accidentes con sustancias peligrosas e instalaciones fijas y de transporte - Se nutre de fuentes públicas de carácter general - Desarrollada en Italia, en inglés
OSIRIS 2	<ul style="list-style-type: none"> - 2500 accidentes registrados en periodo 1977-1992 - Incluye accidentes con hidrocarburos - Se nutre del Oil Spill Intelligence Report - Desarrollada en Italia, en inglés
WOAD	<ul style="list-style-type: none"> - Registra accidentes en plataformas petrolíferas con carácter general - Tienen su desarrollo en Noruega - Recopila accidentes desde el año 1975 - Su fuente es el banco Del Morske Veritas
SONATA	<ul style="list-style-type: none"> - 2500 accidentes registrados en periodo 1930-1980 - Ha dejado de actualizarse - Fuentes públicas de carácter general - Incluye accidentes con sustancias peligrosas e instalaciones fijas y de transporte - Desarrollada en Italia, en inglés
CHAFINCH	<ul style="list-style-type: none"> - Registra accidentes, fallos y riesgos en la industria química - Desarrollada en Gran Bretaña por Risk Management Ltd.

Tabla 2.1. Bases de datos de accidentes industriales



2.2.1.1. Elección de la Base de Datos

Para realizar el Análisis Histórico se ha elegido la Base de Datos FACTS (Failure and Accidents Technical information Swystem). La elección de esta base de datos se justifica en bases al gran número de registros (más de 22000), su claro enfoque al estudio de accidentes industriales con sustancias peligrosas y a que se mantiene actualizada.

Los contenidos son completos y permiten seleccionar distintos parámetros de búsqueda. El idioma usado es el inglés, mientras que en las otras bases de datos se usa el idioma del país de origen (italiano, holandés, etc.)

2.2.1.2. Base de Datos “FACTS”

La Base de Datos FACTS ('Failure and Accidents Technical information System') ha sido desarrollada y es gestionada por TNO” Division of Technology for Society). Los registros que se pueden consultar sobrepasan los 23000 y presenta un claro enfoque a los accidentes industriales con sustancias peligrosas. Aunque comenzó a recopilarse en el año 1980 presenta registros anteriores a 1930 y de cualquier parte del mundo.

Sus fuentes de información provienen de diversas revistas técnicas, informes técnicos de organismos públicos y privados: departamentos de policía, agencias gubernamentales, bomberos, industrias, etc.

La base de datos recoge tanto accidentes graves (con heridos y fallecidos) como leves, incluyendo incidentes. Estos últimos lógicamente tienden a estar infrarepresentados debido a tener menos difusión pública.

Para acceder a la información debe hacerse por suscripción y actualización periódica en CR-rom o mediante consulta puntual al TNO, debiendo detallar de forma clara las especificaciones de búsqueda.

La información que se recopila en cada accidente es microfilmada y se registra en los campos de la base de datos indicados en la tabla 2.2.

Tipo de Incidente

En la búsqueda del incidente introducimos las palabras con las cuáles se ha registrado (explosión de gas, explosión por polvo, bleve, etc.). En las tablas 2.3-1 y 2.3-2 se muestran los tipos básicos de incidentes y subdivisiones. La selección de los registros



permite hacerse de forma versátil gracias al gestor avanzado de que dispone la base de datos que posibilita la selección por múltiples criterios-filtros: país de origen, año, actividad, localización, sustancias que intervienen en los incidentes, etc.

La información filtrada y extraída se presenta en informes de extensión pdf los cuáles incluyen una descripción de los criterios de búsqueda y selección de los campos codificados, así como tablas resumen con diversos parámetros.

CAMPOS		CARACTERÍSTICAS
Identificación	Nº de accidente Referencia de microfilm	---
Fuente	Fuente bibliográfica Referencias Datos de archivo	---
Datos de localización	Fecha completa Estado Localidad Dirección Alrededores	---
Actividad	Actividad desarrollada:	Transporte, proceso,..
Entidad causante	Nombre de la empresa Dirección País Actividad industrial	---
Causas de ocurrencia	Natural Fallo humano Fallo mecánico	Sobrecalentamiento, bleve, incendio,
Circunstancias	Natural Fallo humano Error mecánico	---
Equipamiento	Fallo humano, natural o mecánico	Filtros, tuberías, etc.
Productos químicos	Identificación de los productos y de sus propiedades físicas y de almacenamiento	---
Consecuencias	Humanas Materiales Medioambientales	---
Comentarios	Breve descripción Mapas Fotos	---

Tabla 2.2. Campos de la base de datos FACTS

La base de datos FACTS presenta una característica diferencial respecto a otras que se puedan encontrar actualmente y consiste en que está relacionada con cuatro de bases de datos adicionales, a saber:

- Una base datos de transporte de materias peligrosas con más de 2000 registros de accidentes.



- Una base de datos sobre posibles causas de los accidentes que pueden ocurrir en equipos y/o instalaciones.
- Una base de datos que contiene información sobre sustancias y reacciones químicas que intervienen en un accidente o un incidente previo.
- Una base de datos que contiene información sobre los resultados de las investigaciones de las causas de los daños en los equipos, materiales usados, condiciones de proceso y fallos del material.

TIPO de INCIDENTE		DEFINICIÓN
1	<i>EXPLODE - EXPLOSION</i> Explosión	Liberación de energía produciendo gas a una temperatura, presión y velocidad tales como para causar daños a los alrededores
1a	<i>PHYSEXP - PHYSICAL EXPLOSION</i> Explosión física	Explosión de un sistema físico que no involucra necesariamente ninguna ignición. Por ejemplo, rotura de un depósito a presión. (no incluye BLEVE).
1b	<i>UNCONEXP - UNCONFINED EXPLOSION</i> Explosión no confinada	Explosión en aire libre de una nube formada por una mezcla de un gas o vapor inflamable con aire.
1c	<i>CONEXP - CONFINED EXPLOSION</i> Explosión confinada	Explosión de una mezcla de aire combustible en un sistema cerrado.
1d	<i>DUSTEXP - DUST EXPLOSION</i> Explosión de polvo	Explosión de una suspensión de polvo en aire.
1e	<i>MISTEXP - MIST EXPLOSION</i> Explosión de mezcla L-G	Explosión de una dispersión de líquido en gas (diámetro de partículas de líquido: $0.1E^{-6}$ a $5000E^{-6}$ metros).
1f	<i>DENSEXP - DENSE PHASE EXPLOSION</i> Explosión fase densa	Explosión causada por la reacción química de un material sólido o líquido.
1g	<i>BLEVE - BLEVE</i> Explosión BLEVE	Rotura súbita de un depósito o sistema que contiene gas licuado presurizado debido al contacto directo de un fuego.
2	<i>RELEASE - RELEASE</i> Fuga	Fuga donde no se sabe si es instantánea o continua
2a	<i>INSTREL - INSTANTANEOUS RELEASE</i> Fuga instantánea	Escape de una cantidad de material en un corto espacio de tiempo (normalmente unos pocos segundos).
2b	<i>CONTREL - CONTINUOUS RELEASE</i> Fuga continua	Escape de material con un caudal que se mantiene por un periodo prolongado.
2c	<i>POOL - POOL</i> Charco	Formación de charco de líquido.

Tabla 2.3-1. Tipos y subtipos de accidentes



3	<i>FIRE - FIRE</i> Incendio	Proceso de combustión caracterizado por calor, humo o llama, o cualquier combinación de éstos.
3a	<i>POOLFIRE - POOL FIRE</i> Incendio de charco	Incendio donde el combustible está en forma de charco de líquido en la base del incendio
3b	<i>VAPFIRE - VAPOUR/FLASH FIRE</i> Incendio de nube de vapor	Combustión de una mezcla inflamable de vapor y aire en la cual la velocidad de la llama es inferior a la del sonido. Los daños generados por la sobrepresión son despreciables (combustión no explosiva).
3c	<i>FIREBALL - FIREBALL</i> Bola de fuego	Incendio que quema lo suficientemente rápido para que la masa quemada se eleve en el aire como una nube o bola
3d	<i>TORCH - TORCH/JET FIRE</i> Dardo de fuego	Combustión de material que sale con una inercia significativa de un orificio.
3e	<i>TANKFIRE - TANK FIRE</i> Incendio de tanque	Incendio quemando en un tanque o depósito.
3f	<i>FIREST - FIRE STORM</i> Tormenta de fuego	Incendio de área extremadamente grande que puede provocar un gran movimiento de aire que puede alcanzar la fuerza de un huracán.
4	<i>GASCLD - GAS CLOUD</i> Nube de gas	Mezcla aire/gas dentro de una particular envolvente de concentración límite (y densidad no definida).
4a	<i>DENSGSCL - DENSE GAS CLOUD</i> Nube de gas pesado	Nube de gas más pesada que el aire que la rodea inmediatamente después de la fuga.
4b	<i>NEUGSCL - NEUTRAL DENSITY GAS CLOUD</i> Nube de gas densidad neutra	Nube de gas que tiene una densidad igual a la del aire que la rodea.
4c	<i>BOUGSCL - BUOYANT GAS CLOUD</i> Nube de gas flotante	Nube de gas que es más ligera que el aire que la rodea.

Tabla 2.3-2. Tipos y subtipos de accidentes

Para elaborar el análisis histórico de accidentes hemos utilizado como tipo básico: „EXPLOSION“ (incluidos los tipos más específicos: gas explosion, dust explosion, bleve, etc.).

2.3. Análisis Histórico de Accidentes aplicado a Explosiones

En este apartado se ha realizado un análisis histórico de accidentes ocurridos para el tipo de incidente “explosión” y sus variantes (“*Tipos y subtipos de incidentes*”, por incidente se entenderá cualquier tipo de explosión).

2.3.1. Fuente del Registro

Las fuentes de información que conformar los registros de la base de datos FACTS proceden de diversas revistas de índole técnico, periódicos e informes técnicos de



organismos públicos y privados: informes policiales, agencias gubernamentales, informes de industrias, informes de los departamentos de bomberos, etc.

2.3.2. Fecha del Incidente

El gráfico siguiente (figura 2.1) muestra la evolución de los incidentes explosión desde el año 1901 hasta el año 2010. En este año aparece registrada la primera explosión del siglo XX. La base de datos también registra 7 explosiones pertenecientes al siglo XIX, 1 explosión en el siglo XVIII y otro en el siglo XVII.

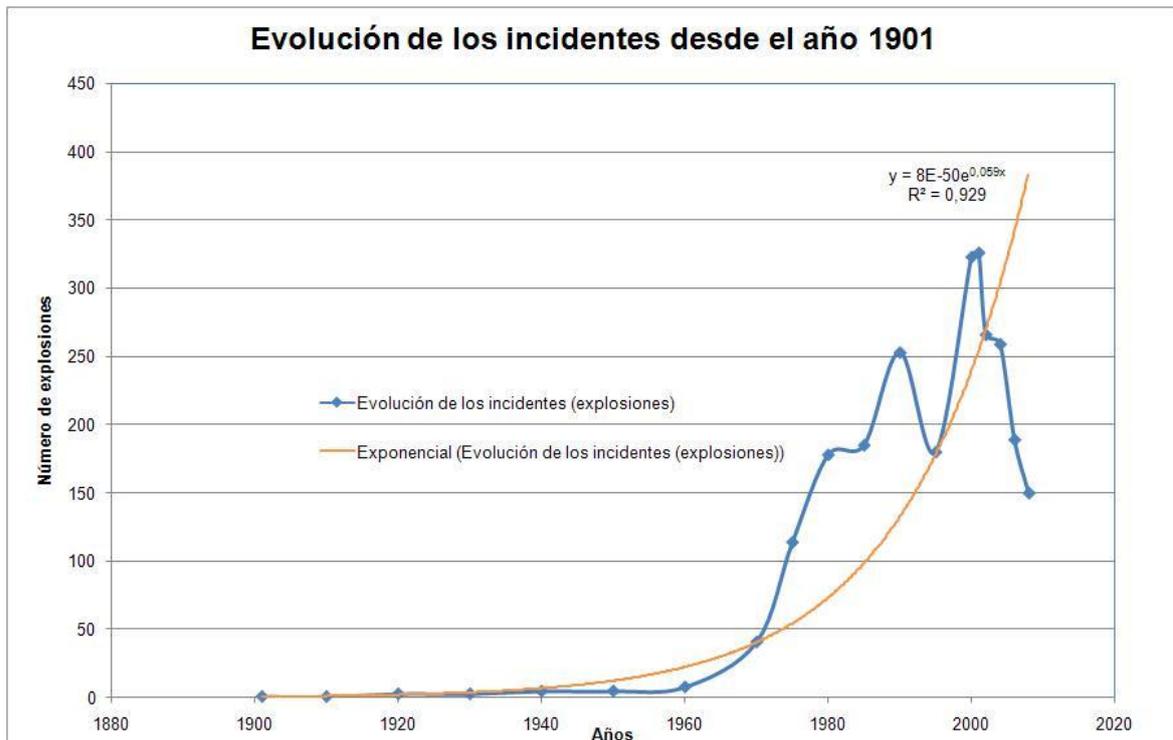


Figura 2.1. Evolución de incidentes por explosión desde el año 1901-2010

En el gráfico de la figura anterior se aprecia un importante aumento del número de incidentes registrados con el paso de los años principalmente a partir de la década de los 50. Esto se debe principalmente a dos factores: el primero es debido al incremento de la actividad industrial en todo el mundo y el segundo, al mayor registro y acceso a la información de incidentes ocurridos. Hay que recordar que los registros de la base de datos FACTS comenzaron a recopilarse en el año 1980 y la mayoría de ellos son posteriores a 1970.

Es de resaltar la tendencia a la baja en la mitad de la primera década del siglo XXI. En el año 2000 se contabilizan 323 registros disminuyendo a 189 en el año 2005, 148 en el año 2008, etc.



La tendencia a la baja de los incidentes por explosión viene motivada en gran parte por la aparición de normativa reguladora que hizo su aparición a finales del siglo XX y comienzos del XXI. Así, en Europa la DIRECTIVA DEL CONSEJO de 12 de junio de 1989 relativa a la aplicación de medidas para promover la mejora de la seguridad y de la salud de los trabajadores en el trabajo (89/391/CEE) y su correspondiente transposición a los países miembros ha permitido el establecer cauces comunes en materia de protección contra explosiones.

A continuación, se muestra la agrupación de datos por décadas naturales a partir de la década de 1950. En ella se podrá observar la proporción de incremento de explosiones de una década respecto a la anterior (cociente entre década actual y década anterior), siendo este valor un indicativo de la progresión del número de incidentes con el paso del tiempo.

EXPLOSIONES POR DÉCADAS NATURALES			
	Nº registros	Crecimiento	% sobre total
Del 1/1/1950 al 31/12/1959	77	--	1,09
Del 1/1/1960 al 31/12/1969	249	3,23	3,26
Del 1/1/1970 al 31/12/1979	1263	5,1	16,55
Del 1/1/1980 al 31/12/1989	1836	1,45	24
Del 1/1/1990 al 31/12/1999	1893	1,03	24,8
Del 1/1/2000 al 31/12/2010	2311	1,22	30,3
TOTAL	7629		100,00

Tabla 2.4. Explosiones por décadas naturales

Se observa pues, que conforme se ha ido industrializando más la sociedad, el número de registros ha aumentado de forma considerable.

Por otra parte, tal como refleja la columna „crecimiento“, se observa una progresiva disminución del crecimiento de incidentes con el paso del tiempo que se acusa más en las últimas décadas. Es decir, aún habiendo aumentado el número de explosiones la tasa de crecimiento con respecto a décadas anteriores disminuye. Esto podría deberse al incremento de las medidas de seguridad establecidas en las instalaciones industriales, motivado por el control administrativo a nivel de reglamentos y leyes más estrictas en materia de seguridad, así como por la sensibilización pública frente a importantes incidentes.



No obstante, estas consideraciones hay que observarlas bajo un prisma adecuado. Si bien el número de explosiones se ha reducido progresivamente, en los últimos años han ocurrido accidentes con resultados muy graves como el de IMPERIAL SUGAR en EEUU (fotos 2.1 y 2.2) y más recientemente el accidente acaecido en A CORUÑA (ESPAÑA) en la fábrica de REPSOL y en el cual un operario falleció y el otro resultó gravemente herido (foto 2.3).



Fotos 2.1 y 2.2 (arriba-abajo). Explosión en la fábrica IMPERIAL SUGAR (EEUU) con resultado de 13 muertes (8 de Febrero de 2008)



Foto 2.3. Explosión en la refinería de REPSOL en A CORUÑA (ESPAÑA-GALICIA) (15/04/ 2010)



2.3.3. Localización de los incidentes

La siguiente tabla nos muestra en qué zonas o países han ocurrido los incidentes (explosiones), desde el año 1916 hasta el año 2010.

LOCALIZACIÓN DEL INCIDENTE		
	Nº registros	% sobre total
Localización conocida	7848	99,3
Localización desconocida	57	0,7
TOTAL	7935	100,00
	Nº registros	% sobre total
USA	2672	34,0
Países Bajos	1412	18
Alemania	489	6,23
Reino Unido	464	5,91
Canadá	208	2,65
Francia	205	2,61
China	182	2,32
India	134	1,7
Australia	127	1,62
Rusia	112	1,42
Italia	106	1,35
Méjico	98	1,24
España	84	1,07
Otros	1642	20,9
TOTAL	7848	100,00



Tabla 2.5. Localización del incidente



Aproximadamente el 65% de los incidentes registrados se encuentran repartidos entre los países de: USA, Países Bajos, Alemania e Inglaterra. El 35% restante se encuentra dividido entre varios países entre los que figuran Canadá, Francia, China y Alemania. El mantenimiento y explotación de la base de datos FACTS se realiza por el Puerto Industrial Unificado y el Departamento de Bomberos de Rotterdam-Rozenburg, de ahí que un gran porcentaje (18%) de los registros se reportan de los Países Bajos.

Aunque España se encuentra entre los países con menor cantidad de explosiones, posiblemente esto sea debido a no haber registrado todos los incidentes como tal al igual que también sucede con otros países más industrializados.

2.3.4. Sustancias que han intervenido en los incidentes

En este apartado se presentan la tipología de sustancias que han intervenido en los incidentes registrados. Esto se muestra a través de la siguiente tabla resumen (tabla 2.6) y también del gráfico correspondiente (figura 2.2).

SUSTANCIAS INVOLUCRADAS EN EL INCIDENTE		
Causa específica	Nº registros	% sobre total
Registro de sustancias conocido	7822	98,57
Registro de sustancias desconocido	113	1,43
TOTAL	7935	100,00
Nombre de la sustancia	Nº registros	% sobre total conocido
Gas Natural	1141	14,58
Propano	603	7,68
LPG	456	5,81
Polvo combustible	431	5,49
Petróleo	402	5,11
Hidrógeno	354	4,51
Benceno	264	3,36
Butano	222	2,82
Gasolina	214	2,72
Amoníaco	191	2,43
Fuel-oil	172	2,19
Explosivos	142	1,81
Productos plásticos	109	1,38



Metanol	98	1,24
Etileno	80	1,01
Metano	76	0,96
Nafta	73	0,93
Gasóleo	52	0,66
Aerosoles	47	5,98
Propileno	45	5,73
Hexano	43	5,47
Otras sustancias	2607	33,2
TOTAL	7822	100,00

Tabla 2.6. Sustancias involucradas en los incidentes



Figura 2.2. Sustancias que intervienen en las explosiones

La principal sustancia involucrada en las explosiones con casi un 15% es el gas natural, el propano contribuye con un 7,68% y el LPG con un 5,81% al total de registros. El petróleo crudo presenta un 5,1% del total de registros. Cabe destacar que una gran parte de las sustancias arriba reflejadas (gasolina, gasóleo, LPG, etc.) también son derivados del petróleo.



En un mismo incidente, se puede registrar más de una sustancia. Esto puede ser debido a que una sustancia puede ser la iniciadora de la explosión, mientras que otra/s que estén registradas en el mismo incidente participen por causas secundarias (proximidad, formar parte del mismo proceso, etc.)

2.3.5. Tipos de incidentes/explosión

Los datos estadísticos sobre la clasificación de explosiones sucedidas en los incidentes estudiado se muestran en la tabla siguiente (tabla 2.7).

TIPOS DE EXPLOSIÓN		
	Nº registros	% sobre total conocido
Explosiones de gas	4746	60
Explosiones de polvos	486	7
Bleve	219	2,86
Explosiones confinadas	202	2,55
Explosiones por nieblas	40	0,5
Explosiones de fase densa	13	0,15
Desconocido	21	0,3
Otras	2208	26
TOTAL	7935	100,00



Tabla 2.7. Clasificación del tipo de explosión para cada incidente



2.3.6. Origen de los incidentes

A continuación, se tabulan los valores estadísticos extraídos del análisis de los registros, efectuando su representación en un diagrama de pastel (dicho tipo de representación es posible dado que se asigna a cada incidente un único valor de origen general del incidente).

ORIGEN GENERAL DEL INCIDENTE		
	Nº registros	% sobre total
Origen general conocido	7935	100
Origen general desconocido	0	0
TOTAL	7935	100,00
	Nº registros	% sobre total conocido
Plantas de proceso	4237	53,39
Transporte	1716	21,63
Plantas de almacenamiento	1054	13,28
Tratamiento de residuos	157	1,98
Otras	771	9,7
TOTAL	7935	100,00

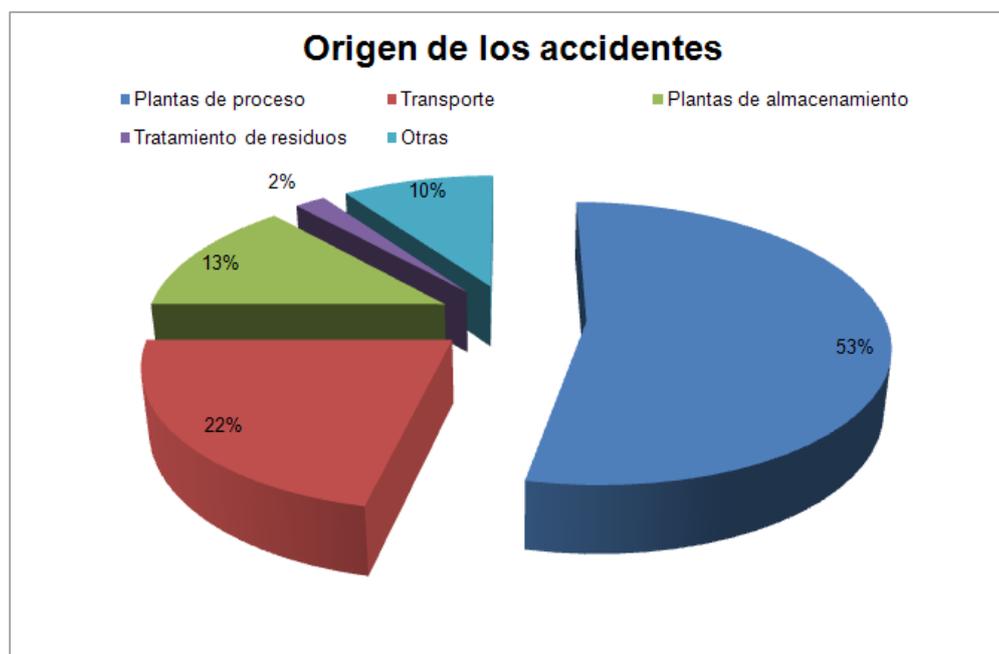


Tabla 2.8. Origen general del incidente



En la tabla anterior (tabla 2.8) se muestra como el origen general principal de los incidentes explosión son las plantas de proceso y el transporte de estas sustancias. Entre este par de orígenes se acumula casi un 65%, aproximadamente de los registros de incidentes. Le sigue con un 13,3%, las plantas de almacenamiento y las plantas de tratamientos de residuos con casi un 2%. Estos cuatros orígenes acumulan alrededor de un 80%.

2.3.7. Sectores y actividades afectos por los incidentes

La tabla 2.9 muestra los sectores-actividades afectados por los incidentes de explosión. En ella, podemos observar como casi un 50% del total de los registros corresponde a las actividades de: industrias, zonas de almacenamiento, transporte por carreteras, refinerías y construcción.

SECTORES/ACTIVIDADES DEL INCIDENTE		
	Nº registros	% sobre total
Origen general conocido	7935	100
Origen general desconocido	0	0
TOTAL	7935	100,00
	Nº registros	% sobre total conocido
Industrias	1302	16,40
Almaceneramientos/depósitos	727	9,16
Trans. Carr.	589	7,42
Refinerías	474	5,97
Construcción	381	4,80
Ferrocarril	150	1,89
Laboratorios	135	1,70
Tanques	133	1,67
Estaciones servicio	102	1,28
Centrales y subestaciones	98	1,23
Barcos	66	0,83
Granjas	50	0,63
Otras	3728	46,9
TOTAL	7935	100,00

Tabla 2.9. Sectores/actividades del incidente



Figura 2.3. Sectores/actividades en los cuales han sucedido los incidentes

2.3.8. Causas generales de los incidentes

Un incidente puede llevar asociado más de una causa general. Así, un mismo registro puede a su vez estar incluido en más de una causa diferente. Por ello, no es posible efectuar algunas de las estadísticas que hemos venido haciendo hasta el momento como por ejemplo los diagramas pastel, ya que podemos llegar a tener valores por encima del 100%.

Por tanto, para analizar el campo de causas generales, se ha tomado cada una de las causas generales y se ha efectuado un recuento del número de registros en los que por lo *menos* aparece la causa en cuestión.

A continuación, se incluyen en la tabla 2.10 los valores obtenidos con el criterio anteriormente descrito.



CAUSAS GENERALES DEL INCIDENTE		
Causa específica	Nº registros	% sobre total
Causas Generales conocidas	7130	89,80
Causas Generales desconocidas	805	10,20
TOTAL	7935	100,00
	Nº registros	% sobre total conocido
Causas externas	2101	29,57
Factor humano	1805	25,31
Fallo mecánico	1646	23,08
Fallo por impacto	876	12,28
Reacción Violenta	443	6,21
Fallo de instrumentación	206	2,88
Fallo de servicios	53	0,74
TOTAL		100,00

Tabla 2.10. Causas generales del incidente

Podemos observar en la tabla anterior que las causas que más habitualmente se dan son: causas externas (29%) debidos a un suceso externo (un rayo, un incendio exterior, etc.), las causas por factor humano (25%), las causas por fallo mecánico (23%) y finalmente las causas por impacto con un (12%). Estas cuatro causas suma aproximadamente un 89% del total de causas conocidas, lo cual significa que acotando y trabajando en la prevención de dichas causas generales se puede llegar a prevenir de una manera correcta una explosión.

2.3.9. Población afectada por el incidente

Se ha efectuado un análisis para el campo de población afectada. Para ello, se ha de tener en cuenta tanto los muertos o los heridos que ha tenido un incidente. Primeramente se ha estudiado cuantos incidentes han tenido muertos o heridos conocido (>0), recordando que basta con que uno de los dos valores (muertos o heridos) sea mayor que 0 para que se considere como un incidente con daños a personas. Por el contrario, un incidente se considera sin muertos ni heridos cuando ambos valores son conocidos e iguales a 0. A continuación, se muestra una tabla resumen que contempla este hecho:



POBLACIÓN AFECTADA POR EL INCIDENTE		
	Nº registros	% sobre total
Población afectada conocida	7457	94
Población afectada desconocida	478	6
TOTAL		100,00

Tabla 2.11. Población afectada por el incidente

Podemos ver como existe un alto porcentaje de población afectada conocida (94%), es decir, que los dos valores referentes al número de muertos y heridos se conoce y son mayores que 0.

2.3.10. Número de muertos provocados por el incidente

¿Cómo evaluar un incidente por explosión? A menudo es difícil cuantificar las consecuencias de una explosión ya sea desea desde un punto de vista económico y humano. Uno de los datos que dan el nivel de consecuencias de una explosión es el número de muertos causadas por el incidente.

La tabla siguiente (tabla 2.12) resume los datos estadísticos obtenidos del análisis:

MUERTOS PROVOCADOS POR EL INCIDENTE		
	Nº registros	% sobre total
Número de muertos conocidos (>=0)	2825	35,6
Total registros	7935	64,4
TOTAL		100,00
	Nº registros	% sobre total conocido
Entre 1 y 10 muertos	1924	68,1
Entre 11 y 100 muertos	858	30
Más de 101 muertos	43	1,9
TOTAL	2825	100,00

Tabla 2.12. Muertos provocados por el incidente

Se observa como en un gran número de explosiones (68%) el número de muertos está entre 1 y 10. Eso puede significar que las pequeñas explosiones, es decir, explosiones que afecten al lugar de trabajo pero no se extiendan más allá de éste (explosiones muy localizadas), son mucho más frecuentes que las explosiones que afectan a más de un sitio de trabajo (afectan a otras instalaciones de la instalación). Esto nos da una idea de que realizando la prevención y protección de atmósferas explosivas que afecten al lugar



de trabajo puede hacer disminuir el número de población afectada, lo que se traduce en menos muertos.

2.3.11. Número de heridos provocados por el incidente

HERIDOS PROVOCADOS POR EL INCIDENTE		
	Nº registros	% sobre total
Número de heridos conocido (≥ 0)	4632	58,4
Total registros	7935	41,6
TOTAL		100,00
	Nº registros	% sobre total conocido
Entre 1 y 10 heridos	2387	51,2
Entre 11 y 100 heridos	2016	43,5
Más de 101 heridos	229	5,3
TOTAL	4632	100,00

Tabla 2.13. Heridos provocados por los incidentes

En el análisis del número de heridos provocados por el accidente se puede observar que el número de incidentes en los cuáles hay al menos un herido constituye el 58,3% del total de los registros.

Las explosiones que causan entre 1 y 10 heridos son las más frecuentes (51,2%). Este dato refuerza la idea que las explosiones que afectan al lugar de trabajo (corta distancia) son más frecuentes que las que afectan además a otras instalaciones o incluso toda la planta en sí.

En un mismo incidente pueden coexistir tres posibilidades, es decir, puede haber muertos y heridos, o muertos sólo o heridos sólo.

2.3.12. Fuentes de ignición

Para finalizar este capítulo se analizan las principales fuentes de ignición y su peso sobre los registros consultados. Los resultados se recogen en la tabla 2.14.

Como podemos observar las principales fuentes de ignición son para un total de un 64%: las chispas mecánicas(30%), las brasas (20%) y las llamas libres (14%). No obstante, hay que pensar que en muchas ocasiones es bastante difícil después de una explosión determinar la fuente de ignición que la ha podido ocasionar.



FUENTES DE IGNICIÓN CLASIFICADAS SEGÚN TIPOS BÁSICOS		
	Nº registros	% sobre total
Fuente de ignición conocida	1501	18,91
Fuente de ignición desconocida	7935	81,09
TOTAL	2906	100,00
Chispas mecánicas	454	30,2
Brasas o chispas	316	21,02
Llama libre	210	13,99
Descarga electrostática	173	11,52
Autocombustión	125	8,32
Superficies calientes	156	10,39
Equipo eléctrico	67	4,46
TOTAL	1501	100,00

Tabla 2.14. Fuentes de ignición clasificadas

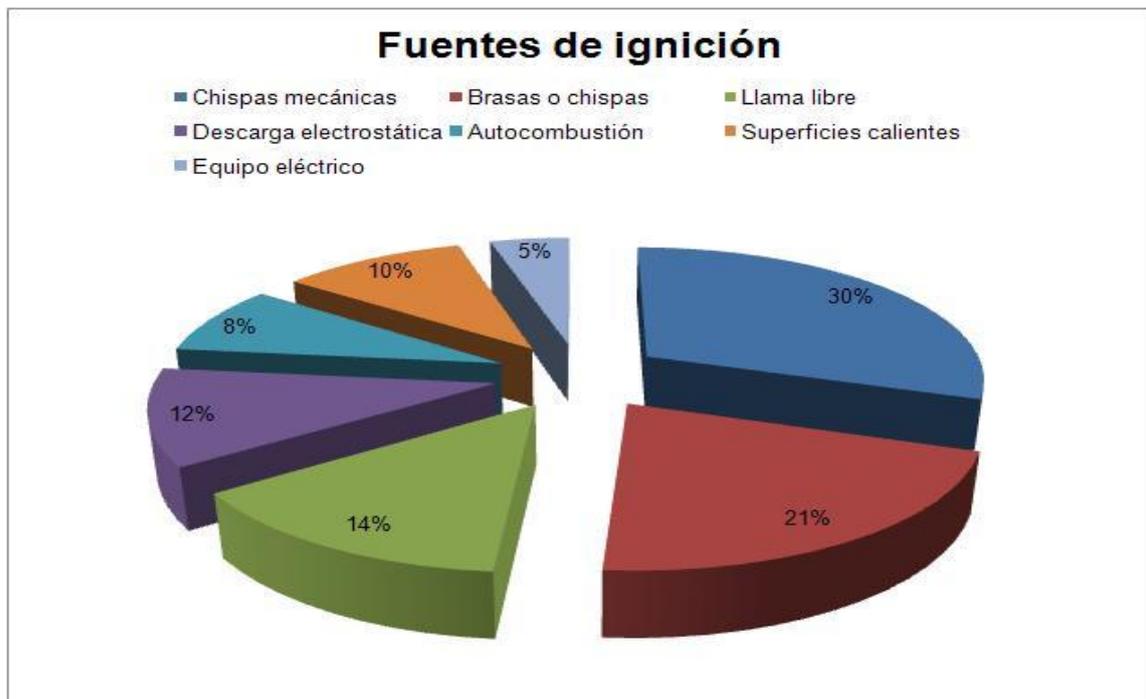


Figura 2.4. Fuentes de ignición



CAPITULO 3. ESTIMACIÓN DE LAS ACTUACIONES NECESARIAS PARA LA MEJORA EN LA DETECCIÓN DE RIESGOS

La principal técnica de prevención de incendios y explosiones tiene carácter organizativo. Muchos accidentes producidos por atmósferas explosivas ATEX tienen su origen en malos procederes durante la realización de trabajos concretos y específicos de gran riesgo, a saber:

- Trabajos en espacios confinados.
- Trabajos en caliente.
- Trabajos donde se utilice aire comprimido como sistema de limpieza.
- Trabajos que generen volúmenes importantes de partículas en suspensión (foto 3.1)
- Escasa o nula limpieza en emplazamientos con presencia de polvo bien sea en capa o en suspensión (véase la fotografía 3.2).



Foto 3.1. Nube de polvo



Foto 3.2. Falta de limpieza en dispositivo (De Gea)

Todos estos trabajos tienen que estar completamente protocolizados, haciendo uso de las medidas preventivas pertinentes.

3.1. Clasificación y extensión de las zonas por atmósferas explosivas

El primer paso para mejorar la detección de riesgos por atmósferas explosivas surge en una identificación adecuada de las zonas de explosión ya sean por gases o vapores (zonas 0,1 y 2) o por sustancias pulverulentas (zonas 20, 21 y 22). En estos casos, es necesario el concretar lo mejor posible las zonas para gases o vapores y para polvos y su extensión y aquí, radica una parte importante del problema que definiremos en los capítulos 5 y 7 de la tesis.



Sin entrar en mucho detalle (ya que se hará en capítulos posteriores de la tesis) se esboza en este capítulo una de las técnicas que vamos a utilizar en este trabajo para la mejor determinación de la extensión de las zonas por atmósferas explosivas. El método en cuestión es la dinámica de fluidos computacional (CFD) y que vamos a aplicar haciendo uso del programa GAMBIT-FLUENT (el GAMBIT es el interfaz del FLUENT, es decir es el programa con el que vamos a generar las mallas -ver figuras 3.1. y 3.2- y el FLUENT es el Solver). Con estos dos programas vamos a simular la evolución de las tasas de escape, así como incendios que podamos tener en determinadas zonas.

Para el estudio de las atmósferas explosivas por polvo vamos a hacer uso también del programa FLUENT.

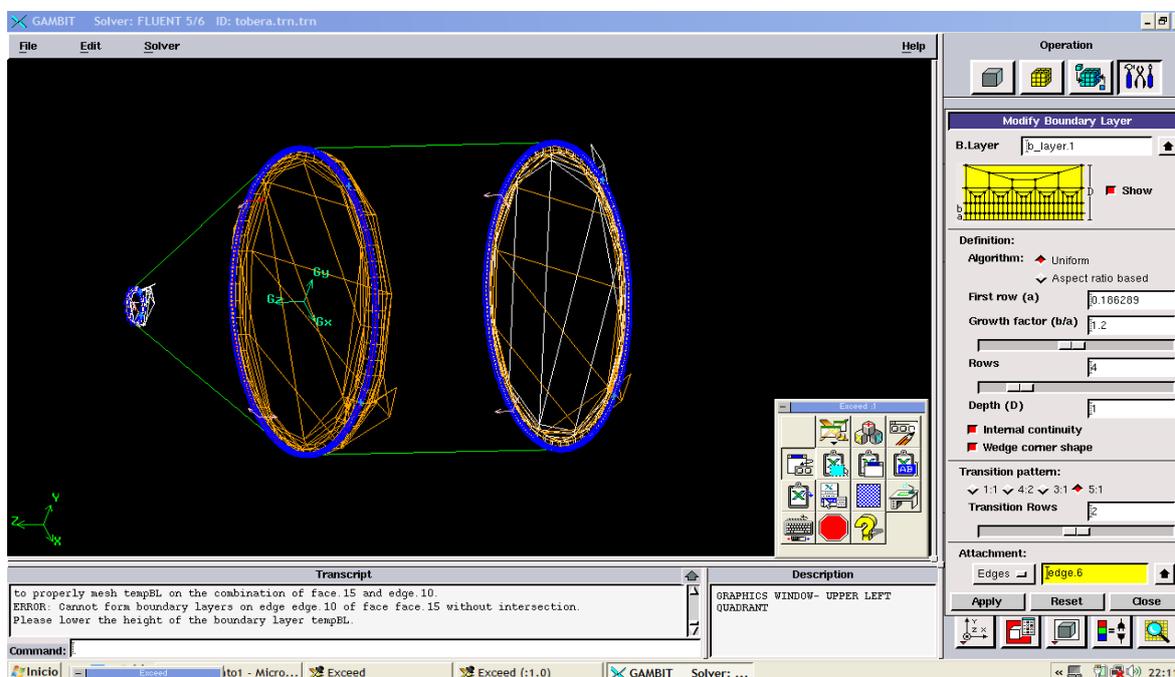


Figura 3.1. Creación de la geometría de un silo con el programa GAMBIT- FLUENT

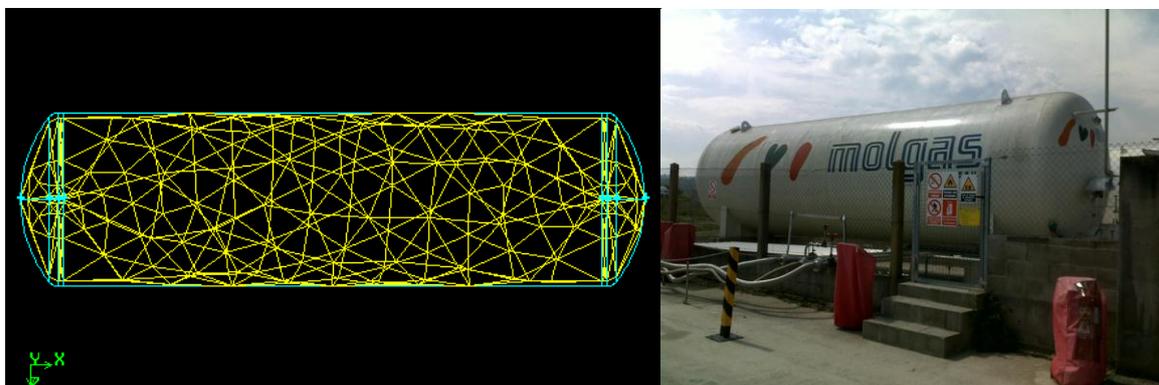


Figura 3.2. y Foto 3.3. Creación del mallado de uno de los depósitos de gas de la empresa EUROSERUM IBÉRICA, S.L. y depósito de gas real



Otro de los elementos que vamos a utilizar para determinar la extensión de las zonas y así poder comparar metodologías es el empleo de un aparato de detección de gases del que hablaremos en el capítulo 5.

Desde el punto de vista de las fuentes de ignición (elemento muy importante dentro de la formación de una atmósfera explosiva) y si nos atenemos a la norma UNE EN 1127-1 sobre fuentes de ignición que intervienen en las atmósferas explosivas obtenemos la tabla siguiente (tabla 3.1.).

Fuentes de ignición	% en industria general	% en industria Plásticos
Chispas mecánicas	26,1	21,2
Brasas o chispas	11,3	9,6
Calentamiento mecánico	8,9	9,6
Descarga electrostática	8,7	34,6
Fuego	7,8	--
Auto-combustión	4,9	--
Superficie caliente	4,9	3,9
Soldadura y trabajos calientes	4,9	--
Equipo eléctrico	2,8	--
Desconocido	16,0	11,5
Otros	3,5	9,6

Tabla 3.1. Origen de las fuentes de ignición en industrias en general y en industrias plásticas en % (extraído norma UNE EN 1127-1)

Podemos observar en la tabla anterior que en el caso de la industria en general el mayor porcentaje de fuentes de ignición corresponde a las chispas mecánicas, esto nos indica la importancia del mantenimiento preventivo en todo tipo de industrias. Asimismo, no podemos desligar la componente humana en este tipo de fuentes de ignición, que duda cabe que el componente organizativo tienen mucho que decir a la hora de reducir este porcentaje (trabajos de soldadura y en calientes, calentamiento mecánico, etc.).

A continuación, vamos a analizar en detalle como podemos mejorar la reducción de los porcentajes más importantes de fuentes de ignición en la industria en general y que son:

- Chispas mecánicas.
- Calentamiento mecánico.
- Descarga electrostática.
- Fuego.



3.2. Detección de chispas

Como vimos anteriormente un porcentaje elevado de las fuentes de ignición y por tanto de los incendios y explosiones se deben a la formación de chispas. Las chispas se generan habitualmente por efectos mecánicos, en el transporte neumático, transportadores mecánicos, elevadores, etc. También, pueden ser generados en los intercambiadores térmicos (secaderos, etc.).

Principalmente los sistemas de extinción y detección de chispas se emplean en conducciones. En éstas se detectan las partículas incandescentes mediante infrarrojos, colocando unas boquillas extintoras aguas debajo de los detectores, a una velocidad distinta que dependerá de la velocidad del flujo (figura 3.3.).

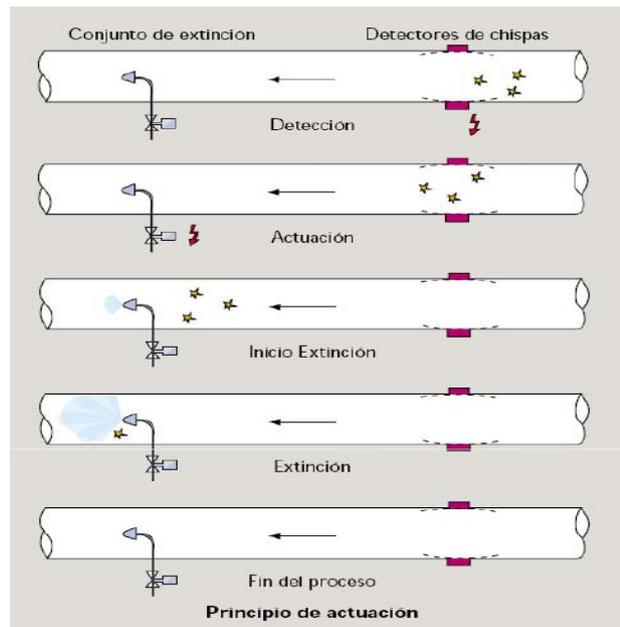


Figura 3.3. Sistema de detección y extinción en conducción

Los detectores ópticos instalados en el interior del conducto (figura 3.4) reciben el impulso de la radiación de la fuente de ignición y lo transmiten al panel de control, donde se produce la evaluación de dicha señal y se ordena la actuación del sistema de extinción.



Figura 3.4. Sistema de detección de chispas en conducto

La totalidad del proceso se produce en fracciones de segundo; este tiempo y la velocidad del transporte neumático determinan la distancia de separación entre los detectores ópticos y entre boquillas de agua pulverizada.

La presión de la fuente de suministro de agua debe ser de 7 bar por lo menos, y si dicha presión no puede ser mantenida deberá instalarse una fuente de suministro independiente.

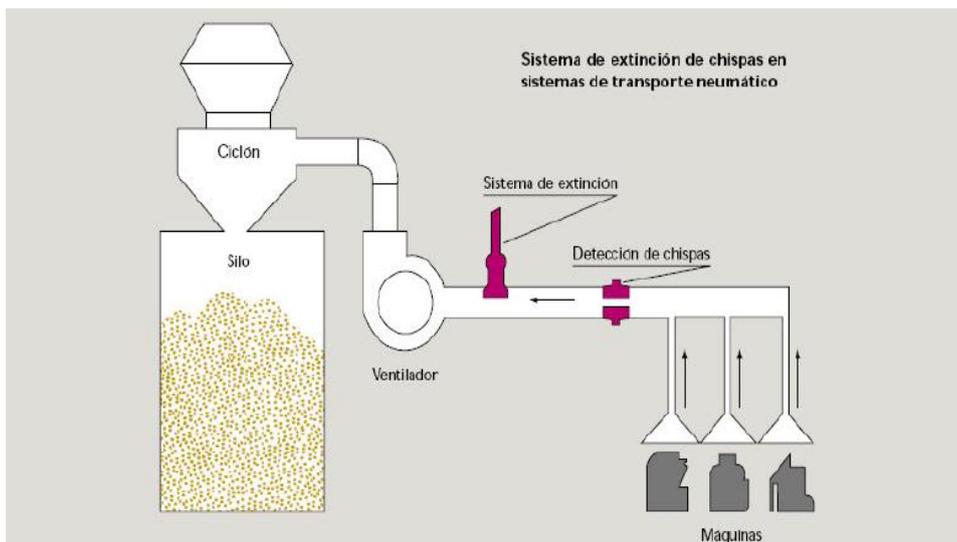


Figura 3.5. Sistema de detección de chispas en sistemas de transporte neumático

El agua de extinción se descarga a través de una o más boquillas de agua pulverizada en el centro del conducto de transporte neumático; la descarga en forma de niebla garantiza un óptimo efecto con muy poco consumo de agua. La cantidad de agua que llega a los filtros o al silo es todavía mucho menor, y no conlleva por tanto ningún tipo de perjuicio para el funcionamiento normal de las instalaciones de proceso (figura 3.5).

3.3. Chispas Mecánicas y Calentamiento Mecánico. Técnicas de Mantenimiento

El propósito de la clasificación en zonas es pues, el facilitar la correcta selección e instalación de aparatos eléctricos y no eléctricos que se utilizan en dichas zonas con modos de protección adecuado, y tomando en consideración las características particulares de los productos gaseosos o pulverulentos.

Tanto las chispas mecánicas como el calentamiento mecánico podemos englobarlos como problemas de falta de mantenimiento preventivo. Por ello, es necesario el definir técnicas de mantenimiento adecuados de cara a la eliminación de estos “sucesos” dentro de las fuentes de ignición.



3.3.1. Termografía

En la actualidad la termografía por infrarrojos aplicada al mantenimiento preventivo presenta un gran auge. La presentación de imágenes térmicas se ha convertido en una de las herramientas de diagnóstico más valiosas en el mantenimiento preventivo. Al detectar anomalías a menudo invisibles para el ojo humano, la termografía permite adoptar una acción correctora antes de que se produzca un costoso fallo en el sistema.

Las cámaras de infrarrojos se han convertido en sistemas compactos parecidos a las cámaras de vídeo normales, son fáciles de usar y generan imágenes de muy alta resolución en tiempo real. Muchas son las industrias en todo el mundo que han descubierto las ventajas que supone la incorporación de cámaras de infrarrojos en sus programas de mantenimiento preventivo.

Gracias a la termografía, se pueden detectar sin esfuerzo zonas recalentadas (figura 3.6) que puedan provocar incendios en distintos elementos y detectar riesgos de incendios por excesiva proximidad a zonas salida de gases.

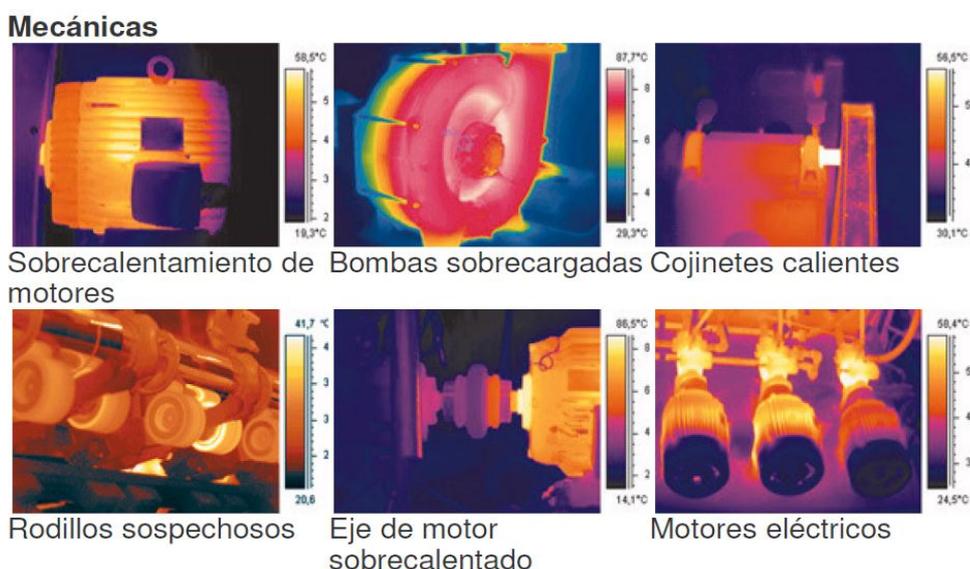


Figura 3.6. Imágenes termográficas tomadas de diferentes elementos mecánicos

En esta tesis, vamos a hacer uso de una cámara termográfica modelo FLIR E60 para analizar en tiempo real la temperatura superficial de elementos mecánicos susceptibles de convertirse en fuente de ignición importantes dentro de las zonas de riesgo de la empresa de estudio EUROSERUM IBÉRICA, S.L. El empleo de la cámara nos va a permitir definir mejor las posibles fuentes de ignición de origen mecánico.



El modelo que vamos a utilizar es el FLIR E60 (figura 3.7.) cuyas características son las que figuran en la tabla 3.2.



Figura 3.7. Cámara termográfica FLIR E60 (FLIR)

CÁMARA TERMOGRÁFICA FLIR E60		
CARACTERÍSTICAS DE LA IMAGEN	PRESENTACIÓN DE LA IMAGEN	ANÁLISIS DE MEDIDA
Resolución IR 320 × 240 píxeles Resolución espacial 1.36 mrad Sensibilidad Térmica < 0.05 °C zoom 1-4x zoom digital continuo	Imagen en Imagen Área IR escalable en imagen visual Fusión Térmica	Rango de temperaturas de medida -20°C a +120 °C / 0°C a +650 °C Punto de medida 3 Área 3 Recuadros con min/max/promedio Diferencia de temperatura Temperatura delta, entre las funciones de medida y la temperatura de referencia
Informes	Cámara digital	Anotaciones de imagen
Informe instantáneo: Si	Integrada 3.1 megapíxeles, iluminación LED	Voz 60 segundos via Bluetooth® Texto Lista de texto predeterminado o teclado en la pantalla táctil Sensores externos Posible conectar a través de Bluetooth, Medidor de humedades Extech MO297 o Pinzas EX845

Tabla 3.2. Características cámara termográfica FLIR E60



3.3.2. Pistolas Infrarrojas

Este tipo de equipos complementan a las cámaras termográficas en cuanto a la determinación de la temperatura en la superficie en caliente de un equipo o parte de instalación (tuberías, carcasas de motores, etc).

El funcionamiento de este tipo de equipos es muy sencillo, para determinar una zona caliente basta apuntar con el puntero láser fuera de la región o zona de interés, luego pasar el aparato con un movimiento hacia arriba y hacia abajo (barrido) hasta ubicar la zona caliente (fotos 3.4, 3.5 y 3.6).



Fotos 3.4, 3.5 y 3.6. Pistola Thermofix y valores de temperatura superficial en válvula y bancada en la zona de calderas de EUROSERUM IBÉRICA, S.L.

Las características de la pistola infrarroja que vamos a utilizar son las que se muestran en la tabla 3.3.



PISTOLA THERMOFIX LÁSER	
ESPECIFICACIONES	VALORES
Rango de Temperaturas	-18 hasta 400°C (0 hasta 750° F)
Display de temperaturas	0,5°C ó 1,0 °F
Precisión	-1 hasta 275°C (30 hasta 525 °F) $\pm 2\%$ del valor de lectura o ± 2 °C ($\pm 3,5$ °F)
Tiempo de respuesta	500 mSec
Respuesta espectral	7-18 μm
Rango de temperatura ambiente	0 hasta 50 °C (32 hasta 120 °F)
Humedad relativa	10-95 %
Peso/Dimensiones	227 g: 152x101x38 mm
Distancias hacia el tamaño del spot	10:1

Tabla 3.3. Características de la pistola THERMOFIX LÁSER

3.4. Detección de monóxido de carbono (CO)

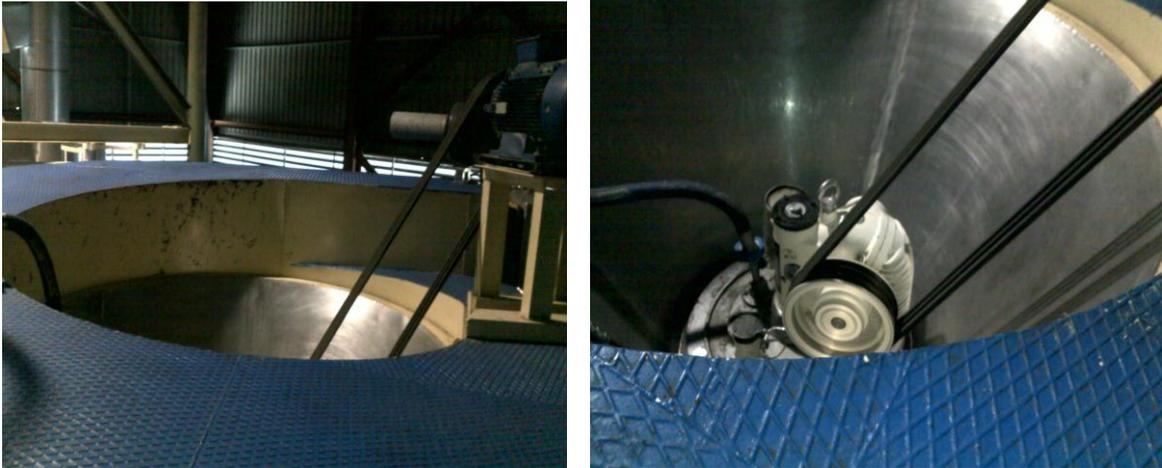
El fuego contribuye como fuente de ignición según la tabla 3.1 con un peso de 7,8 % siendo por lo tanto un ítem importante dentro de las fuentes de ignición. El control del mismo se antoja imprescindible a la hora de controlar las atmósferas explosivas, siendo el control por detección de monóxido de carbono un sistema eficaz y rápido.

Cuando se produce un fenómeno de combustión lenta, como es la autocombustión por oxidación se produce una emisión inicial de CO (figura 3.8) La lectura del mismo debe hacerse por diferencia de concentración a la entrada y salida del mismo. Este tipo de técnica es muy utilizada para la detección de cuadros eléctricos, o más concretamente para secado por atomización por ejemplo de la leche en polvo.



Proceso de autocombustión en un atomizador de leche en polvo

Figura 3.8. Proceso de autocombustión en un atomizador de leche



Fotos 3.7 y 3.8. Atomizador de torre de leche en polvo visto desde su parte exterior

El sistema de detección de monóxido de carbono permite la detección desde el primer momento de formación de un incendio, que lógicamente podría causar también una explosión. Un sistema bien diseñado debería disponer de los tres niveles de alarma:

- El primero de ellos avisa de que se está generando monóxido de carbono, lo que permite la intervención del personal.
- Si la concentración de monóxido persiste y sigue aumentando se activa el segundo nivel que determina la parada del proceso.
- Por último, si la concentración de monóxido sigue aumentando se activa el sistema de extinción automático.

Un esquema del sistema se muestra en la figura y foto 3.9.

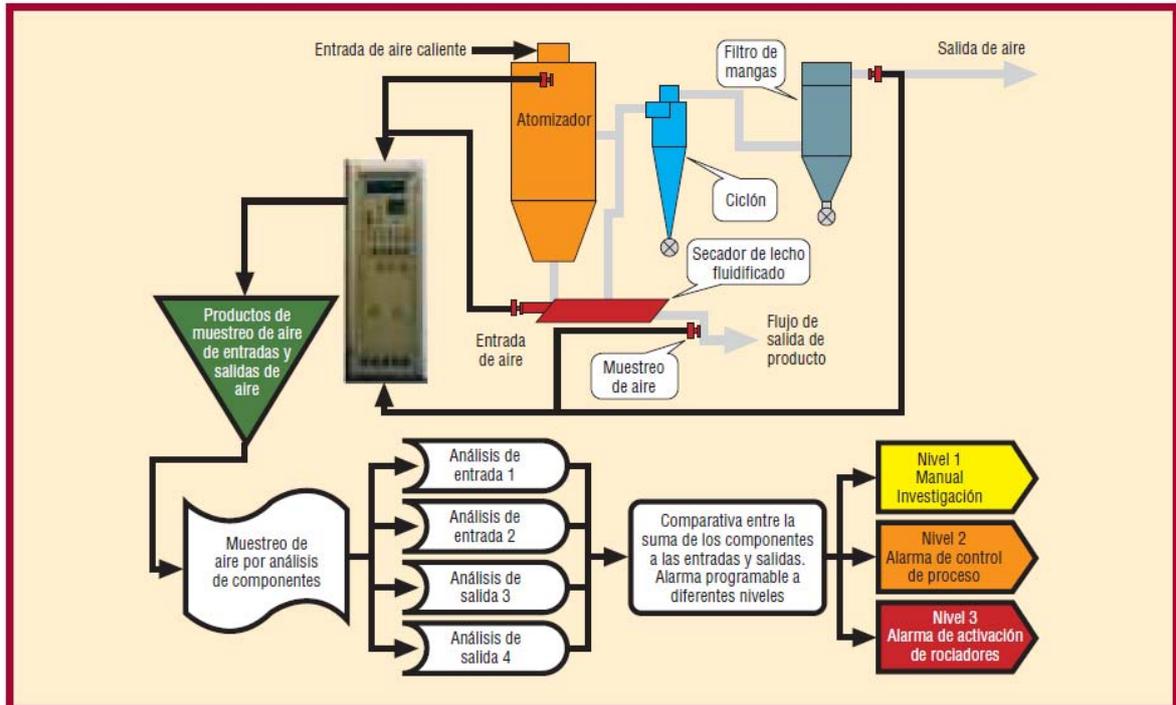


Figura 3.9. Sistema de detección de monóxido de carbono en una cámara de secado con atomizador (De Gea)



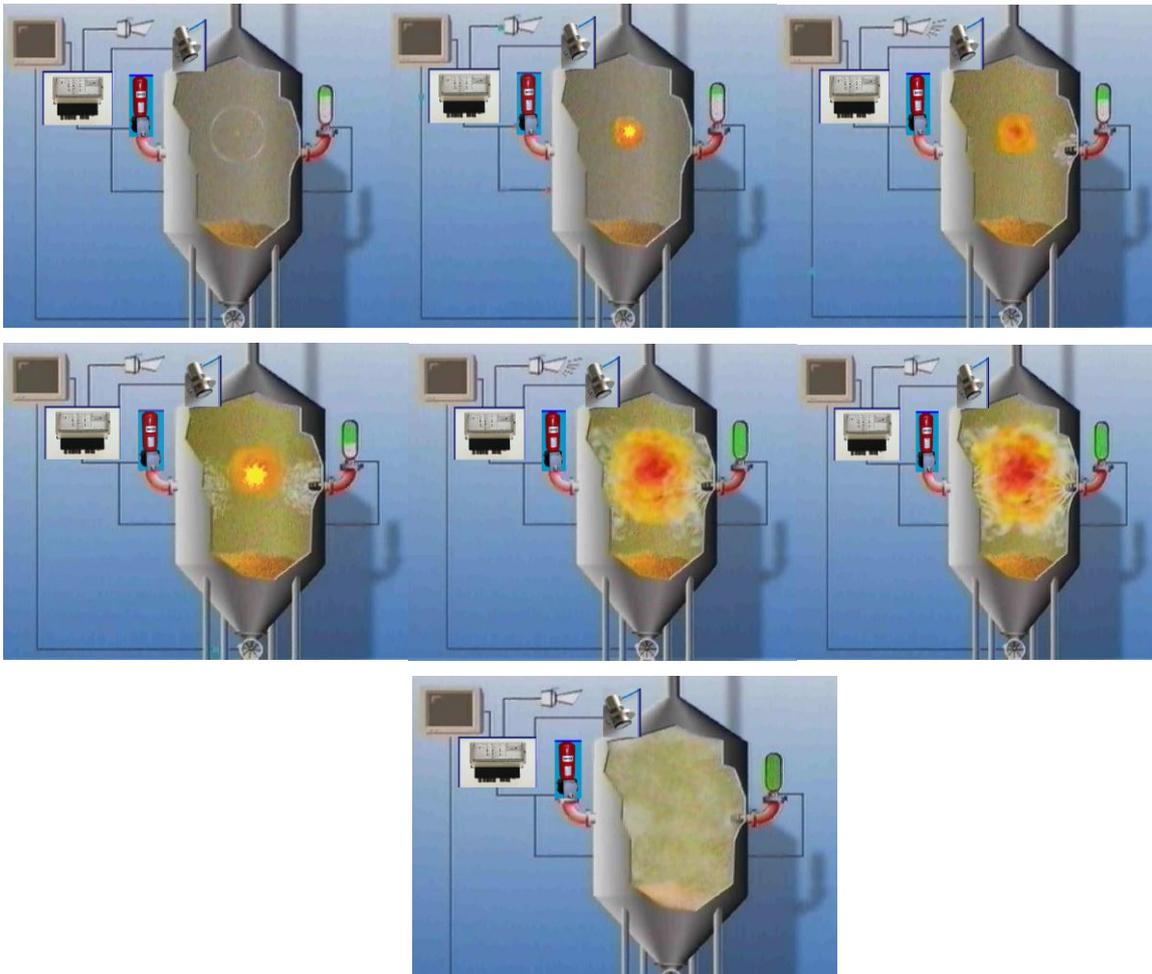
Foto 3.9. Cuadro de control de un sistema de torre de leche en polvo

3.5. Supresión de explosiones en silos

La detección de monóxido de carbono puede complementarse con un sistema de supresión de explosiones, este tipo de técnica suele utilizarse en toda clases de silos con independencia del producto almacenado.

Esta técnica tiene el inconveniente de su elevado coste y dificultad técnica (la distribución de las bombonas de supresión pueden quedar tapadas por el producto). Su aplicación en volúmenes muy pequeños se desaconseja debido a que el incremento de la presión del nitrógeno propelente puede dañar al recipiente.

En la secuencia de figuras siguiente (figuras 3.10- 3.16) se muestra como funciona la supresión de una explosión en el interior de un silo.



Figuras 3.10-3.16. Funcionamiento en etapas de un sistema supresión de explosiones en un silo



3.6. Descarga Electrostática

Es importante considerar la generación de la electricidad estática durante los procesos de trasiego de gases con partículas y sólidos, ya que esto último puede causar la ignición de la mezcla explosiva. Para gases o vapores las energías mínimas de ignición son de microjulios (μJ), mientras que para sólidos es milijoules (1 a 1000 mJ).

Para el control de la electricidad estática es muy importante el empleo de materiales antiestáticos y sobre todo el disponer de una adecuada y eficaz puesta a tierra de las instalaciones y equipos, así como el efectuar las comprobaciones periódicas de la misma.

Esta puesta a tierra es una medida esencial y a menudo suficiente. La resistencia eléctrica de fuga a tierra de las unidades de una planta no debe superar 1 megaohmio (106 ohmios) en las condiciones más desfavorables. En ausencia de cantidades elevadas de cargas electrostáticas o de explosivos se puede llegar a aceptar hasta 108 ohmios en condiciones de humedad relativa baja o con formación lenta de capas aislantes. El total de la resistencia volumétrica presentada por el calzado y la resistencia de fuga a tierra no debe superar 108 W. Estas mediciones requieren instrumentos especiales y se deben realizar por personal adiestrado.

La conexión equipotencial entre diversos equipos evita la posible existencia de diferencias de potencial entre elementos conductores. La puesta a tierra se puede hacer directamente o a través de la conexión equipotencial con otro elemento conectado a tierra. Las tuberías enterradas y los tanques de almacenamiento apoyados sobre el terreno se consideran puestos a tierra. Una aplicación de esta medida se recomienda en el trasvase de líquidos inflamables. Si el suelo es algo conductor y los recipientes metálicos, no es necesario un conductor especial de puesta a tierra. No debe haber pinturas o recubrimientos aislantes que corten la continuidad del camino a tierra. Si así fuera, se deberían establecer las conexiones en metal a la vista y un cable de puesta a tierra conectado a una toma de tierra prevista para este fin.

3.7. Fuego

La industria moderna continúa en la senda de la expansión y cambios haciendo que el manejo del riesgo de incendio sea cada vez más complejo. Los nuevos procesos y productos traen consigo nuevos peligros de incendio y consecuencias de pérdidas que pueden comprometer daños a la propiedad, paralizaciones de actividades, seguridad de vida, daños medioambientales, daños a la imagen corporativa y futura rentabilidad, y



pueden llegar a presentar una amenaza mayor a los objetivos y la sobrevivencia de la actividad.

El proceso de evaluar el peligro de incendio de una actividad comprende la identificación de peligros de incendio, el control del fuego y la protección adecuada.

El control del riesgo de incendio pasa por controlar aquellas instalaciones, procesos y equipos que puedan ser peligrosos, es decir, pasa por la identificación de peligros de incendio.

3.7.1. Identificación de Peligros de Incendio

Esta etapa incluye la identificación de fuentes de ignición, materiales combustibles, factores que contribuyen a la coexistencia de fuentes de ignición y combustibles en espacio y tiempo y factores que contribuyen a la propagación del fuego y puesta en peligro de la vida o la propiedad. El peligro de incendio se refiere a una condición que puede contribuir al inicio o propagación del fuego o a la puesta en peligro de la vida o la propiedad por este fuego. Los peligros de ignición son condiciones bajo la cual algo que puede arder (combustible) está o puede estar demasiado cerca de algo que está caliente (fuente de energía). Los peligros de incendio pueden llevar a considerable daño y someter a personas expuestas a un riesgo indebido. Las cuatro categorías generales de peligros de incendio son ignición, combustibilidad, peligros estructurales de incendio y peligros a las personas. La ignición es la iniciación de la combustión y se origina con el calentamiento de un combustible por una fuente de calor. Cualquier forma de energía es una fuente potencial de ignición. Combustibilidad es la propiedad que tienen la mayoría de los materiales comunes excepto algunos metales, minerales y el agua, de encenderse y arder. Hay dos tipos de características estructurales de edificación que constituyen peligros de incendio: las condiciones estructurales que promueven la propagación del fuego y las condiciones que pueden llevar a una falla estructural durante un incendio. La evacuación de los ocupantes es la principal condición de seguridad a la vida en un incendio. Se requieren adecuados medios de salida en los lugares de trabajo. El escape es un espacio de la edificación que provee una vía protegida de trayecto de seguridad.

3.7.2. Control del Fuego

El control de fuego es logrado mediante una protección pasiva y activa de fuego. Las técnicas más comunes de control de fuego son la detección y alarma, la supresión automática y el manejo estructural del fuego. La tecnología moderna contra incendio ha



producido numerosos métodos para detectar la presencia de un fuego y alertar a la gente de su existencia. Los sistemas de supresión automática de incendio están diseñados e instalados para controlar o extinguir fuegos no deseados, siendo los más comunes los sistemas automáticos de sprinklers. El manejo estructural del fuego se refiere al control del crecimiento del fuego y del movimiento de los productos del fuego usando características de construcción de edificación.

3.7.3. Protección Adecuada

La selección de los métodos más apropiados para controlar los peligros de incendio es la etapa final de una evaluación de peligros. Los objetivos más básicos de protección contra incendio son controlar los peligros de incendio significativos y cumplir con los requerimientos legales de protección contra incendio. Las estrategias conceptuales para lograr los objetivos de protección contra incendio están divididas en dos categorías: impedir la ignición del fuego y manejar el impacto del fuego. El impedir la ignición del fuego se puede lograr por la sustitución de materiales y procesos no peligrosos. La minimización de este peligro se puede obtener mediante el uso de materiales menos peligrosos, por la reducción de la cantidad de material peligroso en un lugar dado y por el uso de sistemas inherentemente de bajo nivel de energía. Manejar el impacto del fuego es la estrategia de reducir los peligros asociados con el crecimiento y propagación del fuego mediante un proceso de control de combustión, supresión del fuego y control del fuego por construcción. Incluye el manejo de expuestos que es la coordinación de medidas para proteger los objetivos de gente, propiedad, actividades u otras consideraciones valiosas. Esto se logra ya sea limitando la cantidad de expuesto o salvaguardando el expuesto.



CAPITULO 4. RECOPIACIÓN DE LAS ACTUACIONES PREVENTIVAS REALIZADAS POR LA EMPRESA EUROSERUM IBÉRICA CON RELACIÓN A LAS ATMÓSFERAS EXPLOSIVAS ATEX

Antes de efectuar el estudio sobre las actuaciones preventivas realizadas en EUROSERUM IBÉRICA, S.L. parece lógico comenzar este apartado de la tesis identificando primeramente la empresa objeto de estudio y posteriormente definir el proceso productivo de la misma. Así, estaremos en condiciones de identificar las situaciones de riesgo de la empresa y las medidas preventivas adoptadas para la minimización de los riesgos de explosión.

4.1. Identificación de la empresa objeto de estudio EUROSERUM IBÉRICA, S.L.

En el la siguiente imagen (foto 4.1) se localiza el Polígono Industrial de “El Reboredo” en Monforte de Lemos, donde se encuentra la planta de EUROSERUM IBERICA, S.L. objeto de estudio y que aparece ampliada en la foto 4.2.



Foto 4.1. Localización del Municipio de Monforte de Lemos y el Polígono Industrial “El Reboredo”



Foto 4.2. Vista aérea de la empresa EUROSERUM IBÉRICA, S.L.

Los datos de la empresa EUROSERUM IBÉRICA, S.L. son los que se recogen en la tabla siguiente (tabla 4.1.).

EMPRESA			
Razón social	EUROSERUM IBÉRICA, S.L.		
Domicilio social	Parcelas 29-30 del Polígono Industrial "El Reboredo"		
Código postal	27400	Población	Monforte de Lemos
Provincia	Lugo	Teléfono	982 400 202
Fax	982 404 951	Correo electrónico	moto@deza.com
INSTALACIÓN			
Denominación	EUROSERUM IBÉRICA, S.L.		
Dirección	Polígono Industrial "El Reboredo" Parcelas 29-30 del	Código Postal	27400
Población	Monforte de lemos	Provincia	Lugo
Teléfono	982 400 202	Correo electrónico	moto@deza.com
Persona de contacto	JESÚS GARRIDO PEDRAZ (Jefe de fábrica)		
Fecha de puesta en marcha de la instalación		1986	
Coordenadas UTM	X:620499	Y: 4705652.94	
Coordenas geográficas	Latitud	Longitud	
Extensión de la instalación		22545 m ²	
Ayuntamientos colindantes		Norte: Bóveda y O Saviñao Sur: Sober Este: A Pobra de Brollón Oeste: Pantón y Sober	
Cursos fluviales afectados		Ninguno	
Infraestructuras primarias		- Comarcal 533 une la capital de Lemos con Lalín y Santiago. - Comarcal 546 la enlaza con la capital de Lugo, donde entronca con la N-VI con destino a A Coruña. - Ourense y Vigo se comunican con Monforte a través de la N-120 de Logroño a Vigo.- Carreteras secundarias Lugo LU-664, LU-903, LU-933. - Líneas férreas con servicios regulares, a Madrid y Barcelona. - Ferrocarril Líneas Vigo-Ourense y A Coruña-Palencia	

Tabla 4.1. Datos de la industria láctea EUROSERUM IBÉRICA, S.L.



La foto 4.3 muestra la ubicación aérea de la planta de EUROSERUM IBERICA, S.L. en el Polígono Industrial de “El Reboredo”:



Foto 4.3. Localización de la empresa EUROSERUM IBÉRICA, S.L.

4.2. Proceso productivo de la planta EUROSERUM IBÉRICA, S.L.

La actividad principal de la planta EUROSERUM IBÉRICA, S.L. es el tratamiento térmico de la leche y productos derivados, efectuándose parte de la actividad principal en régimen de maquila. La capacidad de recepción de leche se sitúa en unos 700.000 L/día. El funcionamiento actual es de 24 h/día, 7 días/semana.

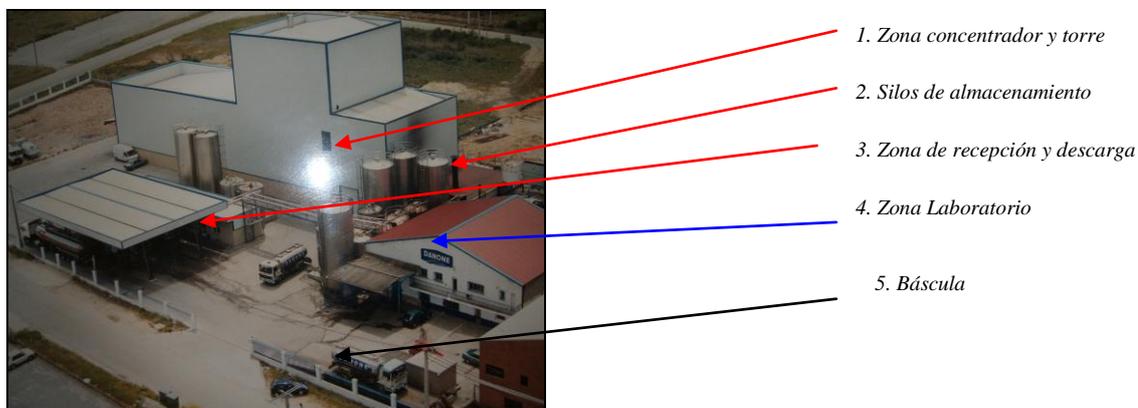


Foto 4.4. Vista aérea parcial de la planta con sus diferentes secciones

4.2.1. Proceso productivo general

En el proceso productivo que se recoge en el diagrama de la figura 4.1, se distinguen diferentes tratamientos en función del producto a obtener: leche termizada, leche desnatada termizada, nata pasteurizada, leche concentrada, leche en polvo, mantequilla, mazada, lacteosuero concentrado y base láctea.



El proceso comienza con la recepción de la materia prima, que llega a la planta en camiones cisterna proveniente de proveedores homologados. A la llegada a la planta, se toman muestras para los correspondientes análisis de calidad y tras su recepción se bombean a los silos. Durante este proceso se efectúa su higienización, haciendo pasar a la materia prima a través de filtros con el objeto de eliminar posibles residuos sólidos.

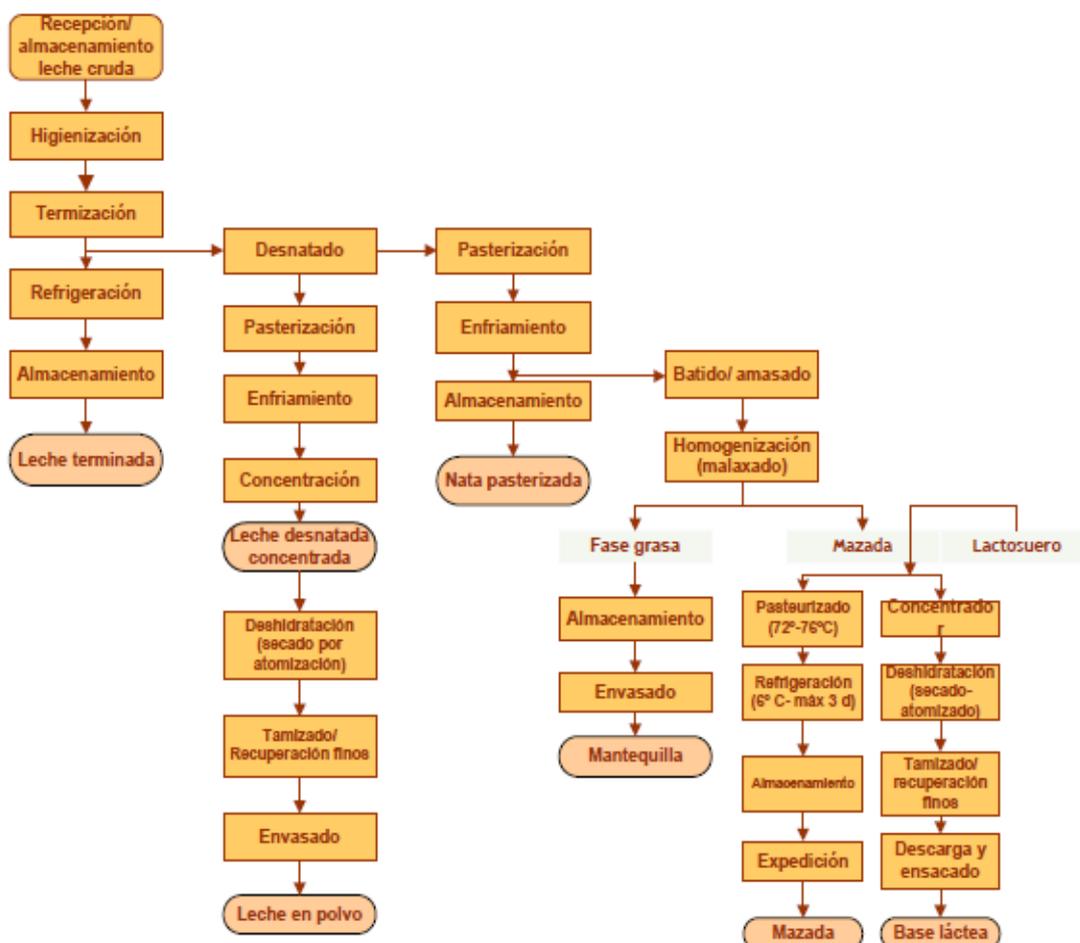


Figura 4.1. Diagrama de producción de la industria EUROSERUM IBÉRICA, S.L.

Las fases posteriores van a estar en función del producto final que se quiera obtener siendo los procesos principales:

- Termización: proceso térmico que se efectúa con calentamiento a una temperatura comprendida entre 57°C y 68°C durante 15-20 segundos. Finalizado, el producto se enfría y se almacena en silos de acero inoxidable en los cuales se somete a una suave agitación en continuo.



- Desnatado: proceso consistente en la separación por centrifugación de la grasa de la leche para la obtención de leche parcial o completamente desnatada y nata.
- Pasteurización: En este caso la materia prima (leche, mazada o lacteosuero) es calentada uniformemente a temperatura elevada (variable en función de la materia prima) durante 15 segundos. Posteriormente, se pasa por un enfriador de placas y se almacena en tanques o silos refrigerados.
- Concentrado: proceso que consiste en la eliminación mediante evaporadores de múltiples efectos de parte del agua de constitución de la materia prima, aproximadamente en un 70%.
- Atomización o deshidratación: consiste en la extracción de agua de constitución de la materia prima.
- Batido para la producción de mantequilla: este proceso se efectúa en una mantequera en la cual las natas maduradas de concentración media son batidas y amasadas, pudiendo añadirse diferentes aditivos. En este proceso, además de la mantequilla se obtiene la mazada.

4.2.2. Proceso productivo detallado

Los procesos de elaboración se detallan a continuación:

- Leche terminada

La leche cruda procedente de los tanques cisterna en la zona de recepción (fotos 4.5 y 4.6) es bombeada a tanques pulmón (foto 4.7), y por medio de una bomba es enviada a la primera sección de la planta, donde se pasa por una higienizadora, que mediante centrifugación elimina los posibles residuos sólidos y gases.

La leche higienizada entra en la planta de procesado donde se somete a un tratamiento de termización en un intercambiador de calor, donde se alcanza una temperatura comprendida entre 57°C-68°C durante 15 segundos como mínimo. A continuación la leche se refrigera mediante un enfriador de placas (foto 4.8) y se almacena en silos de acero inoxidable isoterms de 25.000 y 100.000 (fotos 4.9 y 4.10) litros de capacidad, donde se somete a una suave agitación en continuo.

El tiempo máximo que la leche permanece almacenada en los silos es de 24-36 horas, durante este tiempo se toman muestras de cada silo para realizar controles en el laboratorio.



Fotos 4.5 y 4.6. Zona de recepción



Foto 4.7. Depósitos pulmón



Foto 4.8. Enfriador de placas



Fotos 4.9 y 4.10. Silos de almacenamiento de leche



- Línea de leche desnatada y nata pasterizada

Para la producción de leche desnatada termizada se utiliza la misma línea de procesado que para la leche termizada. La leche cruda, en este caso se pasa por una higienizadora desnatadora, que por centrifugación separa la nata de la leche (foto 4.11). A partir de este momento la leche sigue el proceso de termización explicado anteriormente.



Foto 4.11. Separación de la nata de la leche en la higienizadora-desnatadora

La nata, que directamente se obtiene de la higienizadora-desnatadora se almacena en un tanque pulmón (foto 4.12) desde el cual se conduce hasta un pasterizador para nata. Aquí, se le aplica un tratamiento térmico a 95°C durante 15 segundos. Desde el pasterizador se envía a un enfriador de placas que la enfría hasta una temperatura inferior a 60°C. El almacenamiento de la nata se realiza en tanques de 15.000 y 30.000 litros de capacidad respectivamente, donde permanecen un máximo de 24 a 48 horas.



Foto 4.12. Tanques pulmón



- Línea de leche concentrada

La leche concentrada es aquella que se ha privado de parte de su agua de constitución. La base fundamental para su obtención es la leche desnatada pasteurizada. La leche cruda es clarificada y desnatada en una higienizadora-desnatadora; a continuación esta leche entra en el pasteurizador donde se somete a un tratamiento térmico de pasteurización seguido de un enfriamiento.

La leche desnatada pasteurizada y refrigerada se almacena en tanques de acero inoxidable, donde permanece hasta el momento de su utilización en la planta de concentración. La producción de leche concentrada se realiza siempre mediante el calentamiento hasta la ebullición, el concentrador (foto 4.13) consigue que se rebaje la temperatura para evitar modificaciones profundas en la estructura de la leche.



Foto 4.13. Cubas concentrador



Foto 4.14. Multivías del concentrador

- Línea de leche en polvo

En este caso la materia prima es la leche desnatada concentrada, el producto final es leche en polvo envasada entre otros formatos en sacos de 25 Kg. Éstos poseen dos características muy importantes, un periodo de conservación elevado (1 año), y un espacio reducido para almacenarla y transportarla (4 litros de leche cruda → 1 litro de leche desnatada concentrada → 400 g de leche en polvo).

El proceso consiste en eliminar el agua de la leche manteniendo el resto de sus componentes, proteínas, sueros etc., de tal modo que en cualquier momento partiendo de la leche en polvo, se puede obtener leche normal sin más que añadirle agua en la proporción adecuada sin alterar las características básicas de la misma.

- Proceso de elaboración de la leche en polvo

La leche concentrada desnatada (fotos 4.15 y 4.16) entra en la máquina por la parte superior (foto 4.17), donde se atomiza (foto 4.18) y cae por la tolva pasando a través de una corriente de aire de 196°C; las partículas secas (foto 4.19) caen a una especie de tamiz donde selecciona el tamaño del polvo. Aquí, la temperatura es elevada para garantizar el perfecto secado de la leche. Aquellas partículas cuyo tamaño sea el adecuado caen directamente a un tubo que posee una válvula, ésta selecciona dos canales en cuyas bocas se sitúan los sacos de almacenamiento (foto 4.20).



Fotos 4.15 y 4.16. Conducción de la leche concentrada a la parte superior de la torre



Foto 4.17. Conducción de la entrada de aire en la parte superior de la torre



Foto 4.18. Caracol donde se encuentra el atomizador



Foto 4.19. Leche en polvo



Foto 4.20. Ensacado leche en polvo

Las partículas que en algún punto del proceso no han quedado suficientemente secas se someten de nuevo al mismo ciclo en tolvas de menor tamaño, la máquina posee dos de estas tolvas de recuperación, ambas desembocan en el tamiz.

Para evitar que alguna bola de leche se pegue a las paredes la máquina está vibrando continuamente (fotos 4.21, 4.22, 4.23).



Fotos 4.21 y 4.22. Equipo vibratorio de la torre de leche en polvo

Foto 4.23. Martillo de disparo que evita que la leche en polvo se quede pegada a la tolva interior





- Embalaje, presentación y almacenamiento

El producto final se presenta normalmente en sacos de 25 Kg. formados por dos capas de papel y una interior de plástico, así como en big-bags de 1000 kg. El embalaje de los sacos de 25 Kg. se realiza de forma automática, un operario selecciona mediante una válvula el canal por el cual sale la leche, en cuya boca ha tenido que colocar el saco previamente. El saco se sitúa sobre la pesadora, de tal modo que cuando se alcancen los 25 Kg. el saco es cosido por la cosedora y se deja sobre el palet.

El tiempo de llenado es de aproximadamente 1 minuto. Los sacos se colocan en palets de 3 x 2,5 m cada uno con capacidad para 750 Kg.; los palets se transportan en una carretilla desde la torre hasta el almacén, donde se almacenan.

La siguiente figura (figura 4.2) se presenta un esquema del funcionamiento de la sección de leche en polvo.

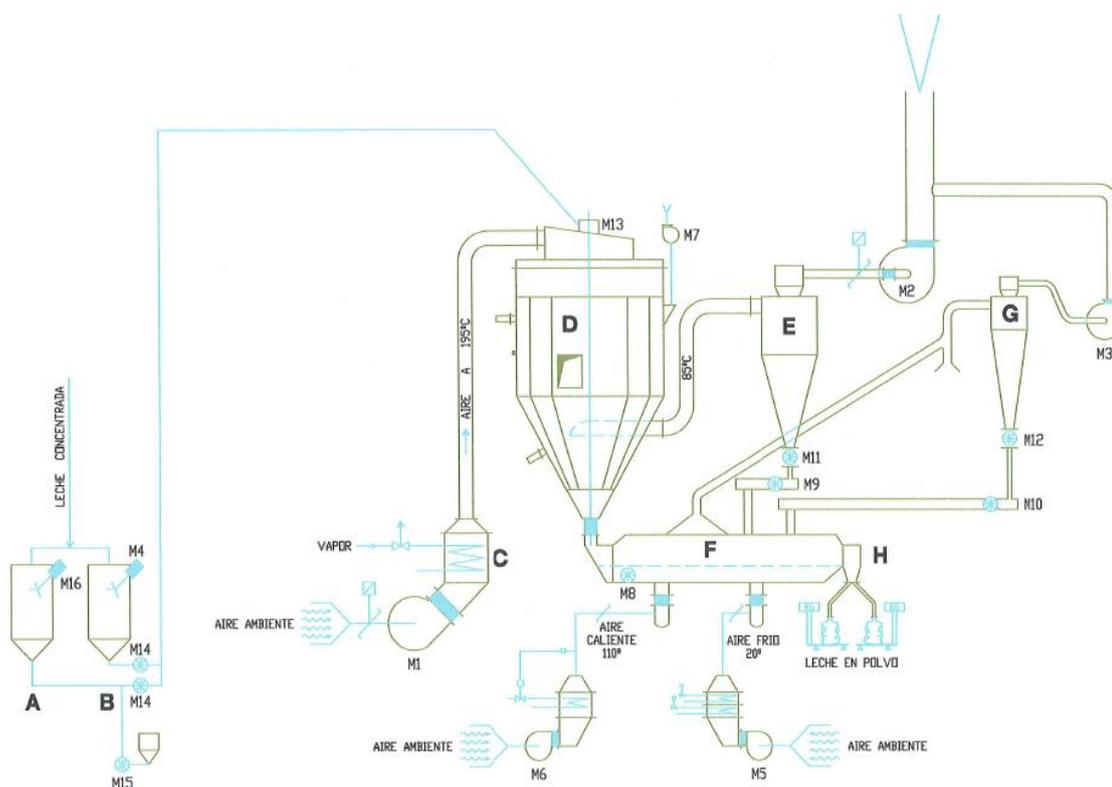


Figura 4.2. Esquema de la sección de la torre de leche en polvo con los distintos equipos

En la leyenda de la tabla 4.2. se identifican los equipos reseñados en la figura anterior.



LEYENDA

A y B Silos de leche concentrada,
C Batería de calefacción;
D Cámara;
E y G ciclón;
F Vibrofluidificador;
H Cámara de salida

LISTA DE MOTORES

M1: Ventilador de cabeza 45 W; M2: Ventilador de cola 75 kW; M3: Ventilador de refrigeración 18 kW; M4: Agitador Silo nº 1, 1,5 kW; M5: Ventilador refrigeración Vibro 18 kW; M6: Ventilador calentamiento vibro 18 kW; M7: ventilador Barrido cámara; M8: Vibrador LF 1kW; M9: Pasillo de extracción 1 kW; M10: Pasillo de ensacado 1kW; M11: Exclusa nº1 0,37kW; M12: Exclusa nº2 0,37 kW; M13: Atomizador 22,5 kW; M14: Bomba inyección 1,5 kW; M15: Bomba limpieza 3,5 kW; M16: Agitador silo nº2 1,5 kW

Tabla 4.2. Equipos de la sección de leche en polvo

- Mantequilla

El proceso de elaboración de mantequilla consiste en un proceso de batido acelerado. En este procedimiento se tratan natas maduras de concentración media (40 a 50 % de materia grasa). La mantequera comprende esencialmente dos partes:

- Un cilindro de batido refrigerado a 9°C en el cual gira a gran velocidad (200 r.p.m.) un batidor; la formación de los granos de mantequilla es instantánea.
- Un cilindro de malaxado inclinado, en el cual dan vueltas en sentido inverso dos tornillos de arquímedes que comprimen la mantequilla y la fuerzan a pasar a través de placas perforadas; se obtiene así una excelente homogeneización. El suero cae hacia la parte baja de este cilindro.

La mantequilla sale de la mantequera en forma de banda o cinta y cae directamente en la tolva del contistor, donde se procede al empaquetado.

- Mazada y lactosuero

En el proceso de mazado de la mantequilla se obtiene por una de las líneas la mazada. Además, EUROSERUM IBÉRICA, S.L. consume como materia prima procedente de queserías el lactosuero, éste sigue el mismo proceso que la mazada obtenida en planta. La mazada al igual que el lactosuero, es desviada a un depósito pulmón regulado por sondas de nivel que accionan una bomba que traslada la mazada a través de un enfriador de placas a un silo de almacenamiento.

La mazada y el lactosuero se pasteurizan a 72-76°C durante 15 segundos en un intercambiador de placas y se almacenan en silos refrigerados donde permanecerá a una temperatura no inferior a 6°C durante un máximo de 3 días hasta su expedición en cisternas isoterma.



- Mazada o lactosuero concentrado

Los productos pasteurizados pasan a un concentrador de cuatro efectos donde sufre la eliminación parcial de su agua de constitución hasta lograr la concentración deseada. Una vez finalizado el proceso se almacena hasta su expedición o su posterior transformación en base láctea en polvo.

No es habitual realizar expediciones de mazada concentrada, las que se realizan son por pedido, por ello, los parámetros de producción pueden ser variados por el responsable de producción para cumplir el pedido correspondiente.

- Base láctea

La mazada concentrada se envía hasta la torre de polvo, donde por medio de un atomizador se transforma la corriente de mazada en pequeñísimas gotas, que al salir del atomizador caen sobre una corriente de aire caliente en sentido ascendente, la cual provoca una reducción del contenido en agua de las gotas de hasta un 90%, transformándose en pequeñas partículas de polvo. Con objeto de obtener un máximo rendimiento en el proceso de secado, la torre cuenta con varios sistemas de recuperación de partículas, lo que garantiza una mayor efectividad en el secado. Una vez que las partículas llegan al final de la torre, van cayendo sobre un tamiz que las clasifica y unifica por tamaños; el proceso finaliza cuando las partículas llegan a la tolva de descarga donde se inicia el ensacado. Se obtiene así la base láctea en polvo.

Actualmente la empresa elabora base láctea en polvo 6% y base láctea en polvo 26 %. La diferencia entre ambas estriba en que en la base láctea en polvo 6% todo proviene de la mazada pasterizada, mientras que la base láctea en polvo 26 % contiene una parte pequeña de nata pasterizada.

4.3. Zonas de riesgos por atmósferas y actuaciones previas adoptadas por EUROSERUM IBÉRICA, S.L. con relación a la prevención del riesgo de explosión

Descrito el proceso productivo de la empresa en cuestión, pasamos a continuación a estudiar las zonas de riesgo, así como las actuaciones preventivas realizadas por la empresa EUROSERUM IBÉRICA, S.L. para minimizar las atmósferas explosivas. En la figura siguiente (figura 4.3.) se muestran las zonas de riesgo en relación a las atmósferas explosivas (ATEX) en la fábrica.

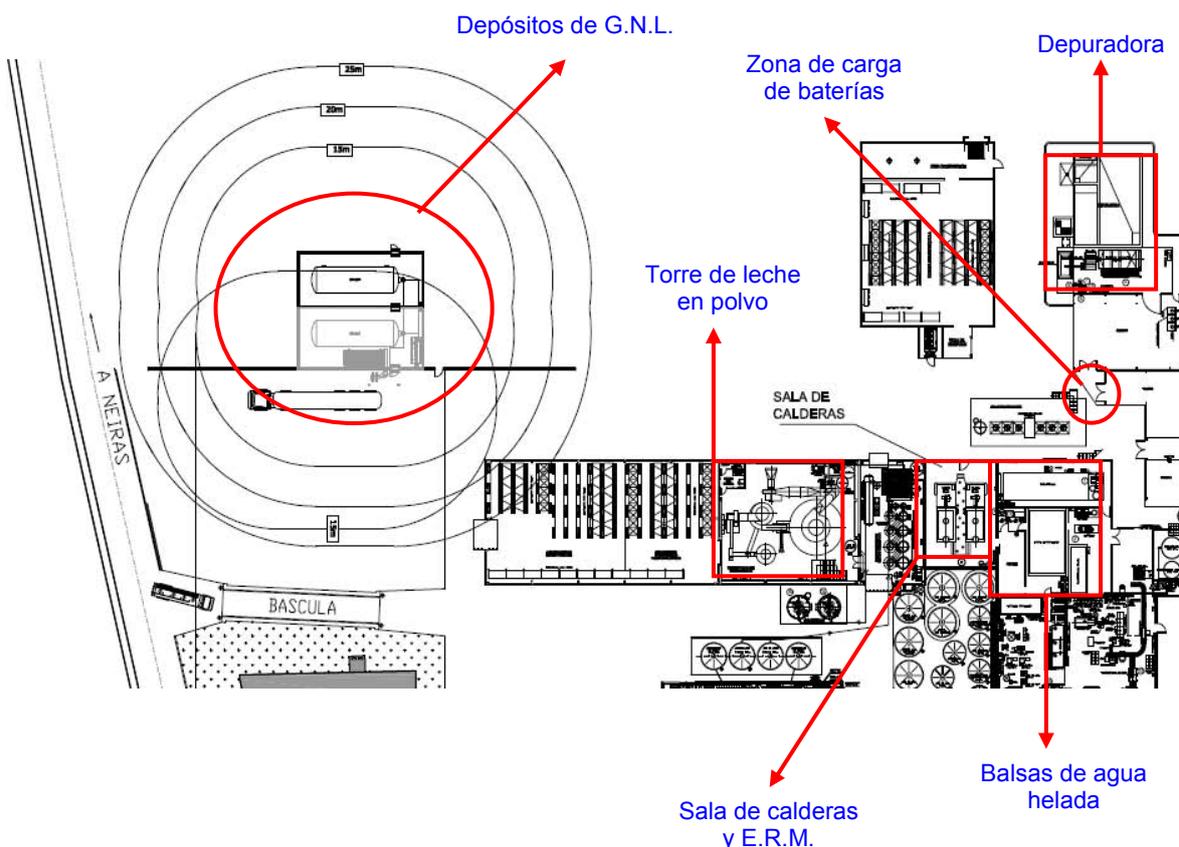


Figura 4.3. Planta de la fábrica EUROSERUM IBÉRICA, S.L. y zonas de riesgo ATEX

A continuación, pasamos a analizar en detalle cada una de las zonas reflejadas en la figura estudiando la problemática de las mismas (riesgos) y las medidas preventivas implantadas por EUROSERUM IBÉRICA, S.L.



4.3.1. Depósitos de gas natural licuado (GNL)

Se dispone de dos depósitos de gas natural licuado de 60.000 litros cada uno. Ambos depósitos se encuentran identificados como zona ATEX (fotos 4.24, 4.25 y 4.26) y con las características que se indican en la tabla 4.3.



Fotos 4.24, 4.25 y 4.26 (izquierda derecha). Señalización ATEX, vista del primer depósito de GNL y vista de los dos depósitos de 60.000 litros cada uno en la parte posterior de la fábrica

DEPÓSITOS DE GNL	
Marca y modelo	Ros Roca INDOX, DGN-60
Contraseña certificación	S/ Proyecto Tipo y marcado CE
Volumen total	64.050 litros
Volumen útil:	60.848 litros
Tipo:	Horizontal
Grado de llenado:	95%
Temperatura de diseño:	-196 °C
Temperatura de servicio:	-160 °C
Presión máxima de servicio (P_t):	5 bar
Presión prueba hidráulica (P_p):	7,5 bar
Aislamiento:	Vacío + Perlita
Gradiente típico:	200

Tabla 4.3. Características de los depósitos de GNL

Para la determinación de las distancias de seguridad se ha tenido en cuenta la capacidad de almacenaje geométrica de la instalación que con los dos depósitos es de 120 m³. Se asegura el cumplimiento de las distancias de seguridad entre los límites de los depósitos y los diferentes elementos indicadas en la tabla siguiente, de acuerdo con lo recogido en el apartado D de la UNE 60210: Plantas satélite de gas natural licuado (GNL).



TIPO DE RIESGO	UNE-60210 COL. D
Aberturas de inmuebles, sótanos, alcantarillas o desagües	20 m
Motores, interruptores (no antideflagrantes), dep. de materiales inflamables	15 m
Proyección de líneas eléctricas	15 m
Límite de propiedad, vías públicas, carreteras, ferrocarriles	25 m
Llamas controladas	25 m
Abertura de edificios de uso docente, sanitario, etc.	45 m
Distancia de cisterna en momento de la descarga a elementos establecidos.	15m. excepto último pto. 45 m

Tabla 4.4 distancia de seguridad según norma UNE 60210: Plantas Satélite de GNL

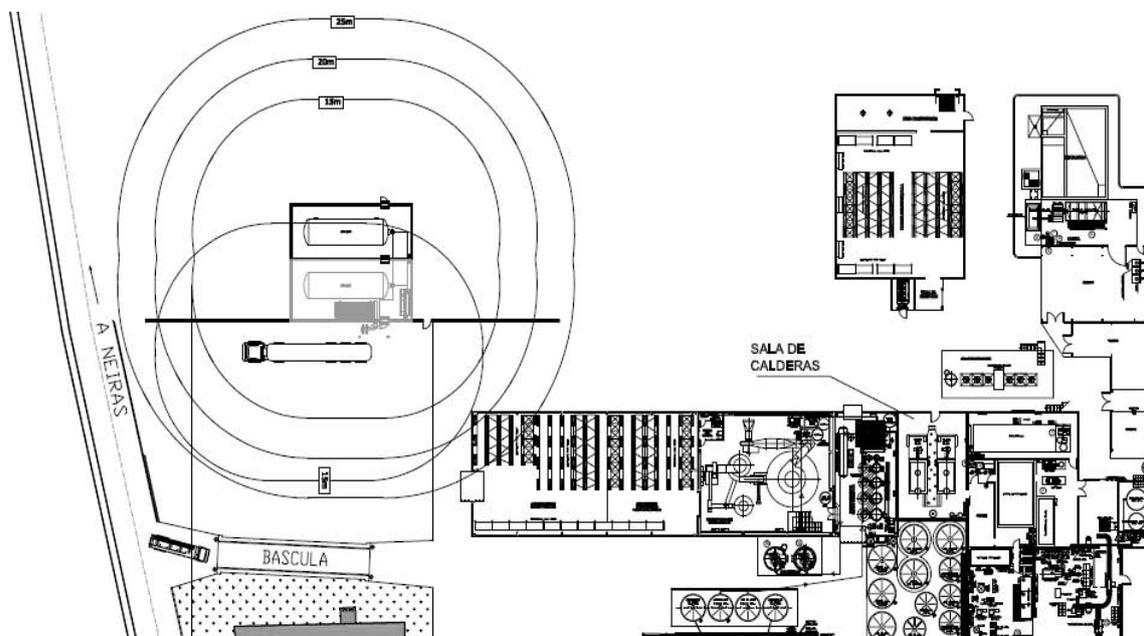


Figura 4.4. Vista de la ubicación de los depósitos con los zonas de seguridad en la fábrica EUROSERUM IBÉRICA, S.L.

En la figura superior (figura 4.4.) se presenta la ubicación de los dos depósitos de GNL de 60.000 litros de capacidad cada uno. Estos depósitos se encuentran ubicados en la parte posterior de la fábrica tal y como puede verse, detrás de la zona de almacenamiento. En la figura pueden apreciarse las curvas concéntricas que establecen las distancias de seguridad atendiendo a las especificaciones que se establecen en la norma UNE 60.210.



La tabla siguiente (tabla 4.5) se muestra las especificaciones del gas natural licuado empleado en la fábrica.

Componente	% Volumen
CH ₄	91,15
C ₂	7,33
C ₃	0,67
C ₄	0,03
NC ₄	0,03
N ₂	0,79

Tabla 4.5. Especificaciones del gas

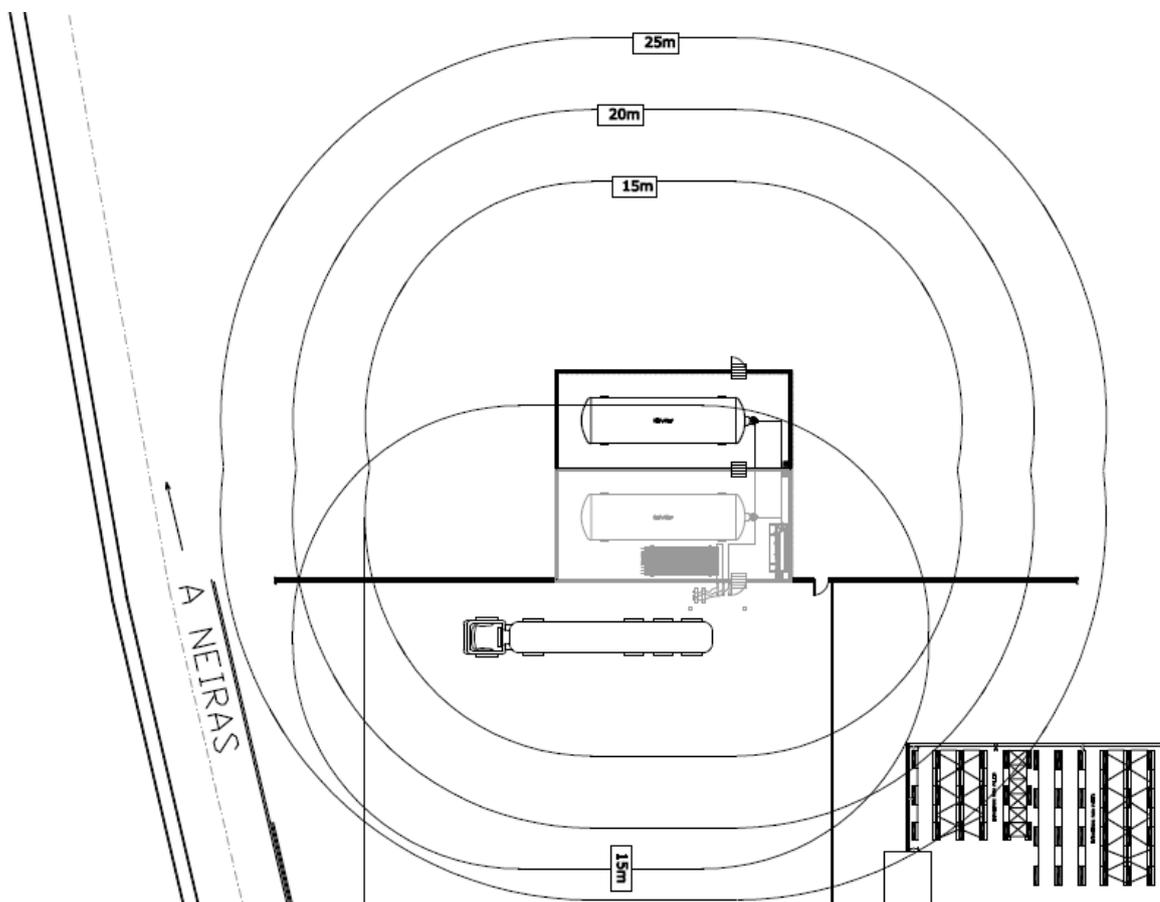
Los parámetros físicos utilizados en la realización de cálculos que vamos a realizar se refieren al metano al ser componente proporcional del producto utilizado en la instalación:

- Peso molecular: 17,3 kg/kmol.
- Límite inferior de inflamabilidad (% v/v): 4,4.
- Límite inferior de inflamabilidad (kg/m³): 0,0033.
- Temperatura de autoignición: 595°C.
- Densidad relativa (aire=1): 0,68.

En la figura siguiente (figura 4.5.) se muestra ampliado el detalle de las zonas de seguridad de los depósitos anteriormente comentadas.



Figura 4.5. Detalle ampliado de la zona de seguridad de los depósito de GNL, donde se muestra también la posición del camión en la descarga





A continuación, se enumeran los elementos de seguridad tanto de los depósitos, como del equipo de puesta a presión que lleva incorporado, como de las líneas de interconexión entra ambos depósitos.

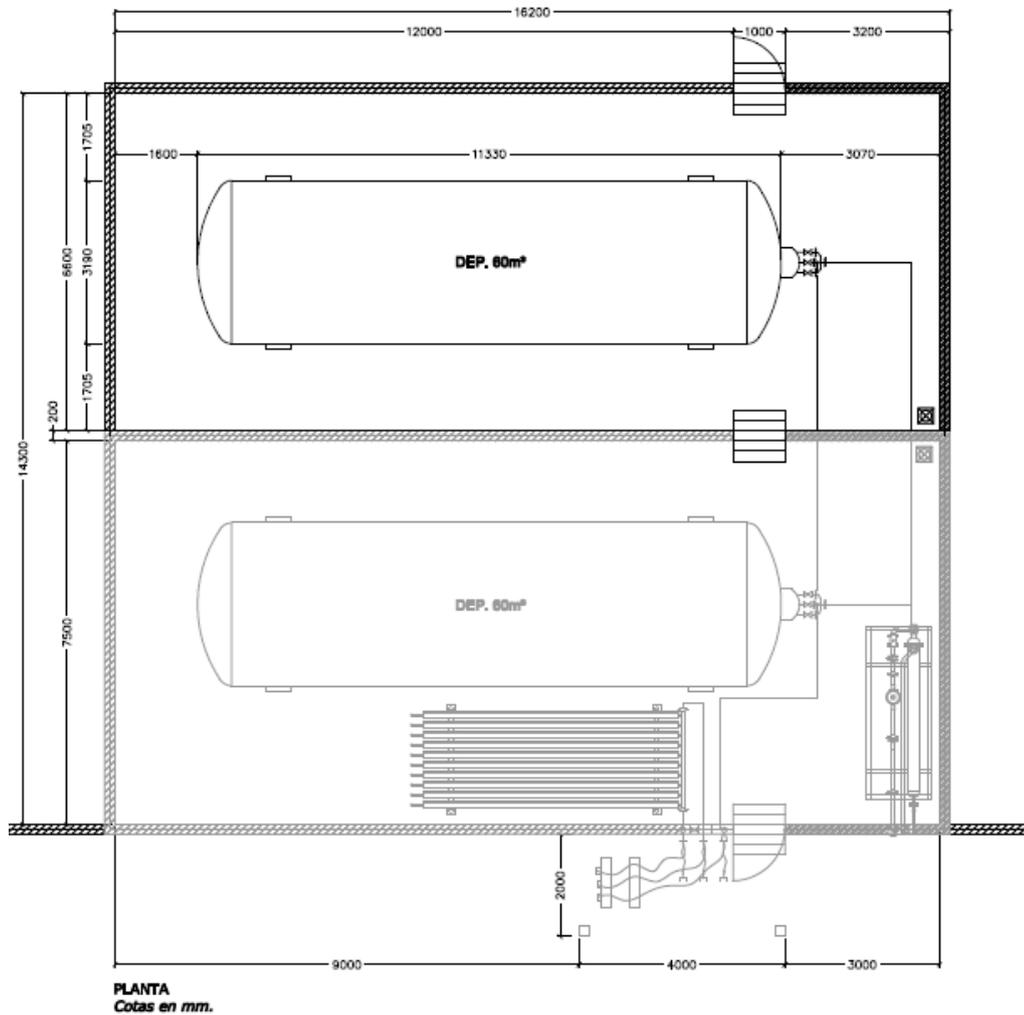
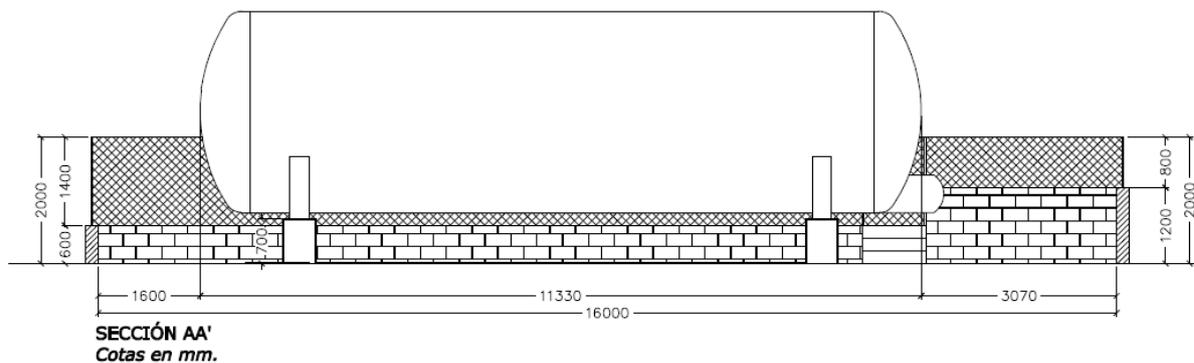


Figura 4.6-1 (arriba). Vista en planta de los dos depósitos donde también se muestra la interconexión de ambos depósitos y **Figura 4.6-2** (abajo). Sección de uno de los depósitos





4.3.1.1. Depósito criogénico

El recipiente interior de los depósitos de almacenamiento de GNL está protegido por un doble sistema de válvulas de seguridad colocadas en la fase gas y en comunicación permanente con el interior del recipiente. La descarga de estas válvulas está conectada y dirigida de forma que no dañe los elementos estructurales del depósito o a las personas o cosas que puedan estar próximas, ni debe crear condiciones peligrosas ambientales.

Las válvulas de seguridad se encuentran colocadas de forma que no es posible su bloqueo por formación de hielo. Todas las válvulas pueden ser precintadas, y cuentan con un sistema de tarado de seguridad tal que empieza a abrir a una presión no superior a la presión máxima de trabajo. Llevan también grabada su respectiva presión de tarado, y serán de elevación total con sistema de resorte. La apertura de la válvula asegura una sección de paso mínima del 80 % de la sección neta de paso en el asiento.

Las válvulas de seguridad están instaladas de forma que están en comunicación permanente con la cámara de gas del depósito, en su punto más alto.

Las tuberías a las que se conecta el sistema de seguridad del depósito tienen una sección equivalente a la suma de las válvulas de seguridad del circuito. No existe ninguna válvula de cierre entre el depósito y el sistema de seguridad. En este caso, al existir doble sistema de seguridad, se dispone sobre una válvula de tres vías dispuesta de forma que en ningún momento permita aislar a los dos sistemas de seguridad simultáneamente.

El tubo de venteo de las válvulas de seguridad está provisto de apaga-llamas y efectúa la descarga en puntos donde no se cree atmósfera explosiva, y siempre en el interior del área del cubeto. Además el venteo está diseñado y montado para prevenir acumulación de agua, hielo u otras materias extrañas que pudieran impedir el taponamiento.

En lo referente a la envolvente del depósito criogénico, y de acuerdo con lo que se indica al tratarse de un depósito con aislamiento al vacío, la parte exterior del depósito (envolvente) está protegida por un sistema capaz de eliminar las sobre-presiones que pudieran generarse en la cámara.



4.3.1.2. Tuberías de interconexión entre depósitos

Las tuberías de conexión entre ambos depósitos, se encuentran dispuestos de forma suficientemente flexible para evitar tensiones debidas a cambios de temperatura que pudieran producirse.

Los tramos de tubería comprendidos entre dos válvulas de cierre están protegidos por una válvula de alivio de presión para aquellos casos en que quede líquido criogénico frío atrapado entre ambas válvulas. Estas válvulas de alivio (con presión de tarado aprox. 9 bar) están separadas de la línea lo suficiente para evitar posible bloqueo por hielo.

4.3.1.3. Apaga-llamas

Los alivios a la atmósfera de las válvulas de seguridad de gas, están protegidos por los correspondientes apaga llamas, y efectúan su descarga en puntos donde no se puedan crear atmósferas explosivas.

Para las válvulas de seguridad del depósito se realiza una recogida de sus puntos de alivio, uniéndose sus salidas a un colector común, el cual es conducido finalmente hasta su salida al exterior situada a una altura próxima a 6 m. sobre el nivel del fondo del cubeto, y está dotado de apaga llamas.

4.3.1.4. Protección contra incendios

La instalación dispone de 6 extintores de 50kg cada uno, lo cual es indicado para un solo depósito, al doblar el almacenamiento de GNL de 60.000 litros a 120.000 litros se necesitarían un total de 12 extintores en la instalación según se indica a continuación.

La capacidad geométrica de almacenamiento de un depósito de 60.000 litros x 0.446 kg./l equivalente a 26,760 Kg.; por lo tanto, para cumplir con los requisitos de la norma UNE 60210 debe existir una proporción de 10 kg. de polvo seco por cada 1.000 Kg. de producto requeridos, es decir, se necesitarán $(26,760 / 1000) \times 10 = 267,6$ Kg.

Así, la instalación de almacenamiento de GNL debe disponer de un conjunto de 12 carros de 50 Kg., todos ellos de polvo seco, con una capacidad total mínima de 600 Kg. de producto extintor. Los extintores se colocarán a ambos lados de la estación descarga de las cisternas y junto al depósito y las líneas de gas del cubeto.

4.3.2. Sala de calderas

Para suministrar el vapor necesario para las distintas secciones de la fábrica, se dispone de una sala de calderas con dimensiones 9m x 11m y altura variable de 4 a 7 metros, esta sala dispone de ventilación natural habilitada con dos puertas. La puerta principal de entrada presenta dimensiones de 2,20m x 1,20m y rejilla de ventilación de 1m x 0,40m, dispone también en uno de los laterales de otra puerta que comunica con la zona de frío de 2,20m x 1,20m (esta puerta normalmente está abierta). En la sala de calderas hay dos generadores (foto 4.27) de vapor de 6000 Kg/h cada uno. Las calderas disponen de libro de registro y desde el año 2010 se ha cambiado el combustible de las mismas que antes era fuel-oil por gas natural licuado. Lógicamente se ha procedido al cambio de los quemadores de ambas calderas, así como de los calentadores.



Foto 4.27. Sala calderas



Foto 4.28. Entrada de gas en la sala calderas



Foto 4.29. Calentadores



Foto 4.30. Quemador (entrada llama piloto y gas)



Las calderas se alimentan con el gas procedente los depósitos exteriores que se conduce a la entrada de la sala de calderas mediante tubería con válvula de corte (foto 4.28). También se dispone de calentadores automáticos de fase líquida a gas (foto 4.29), el gas previamente calentado se conduce a cada una de las líneas del quemador junto con la entrada de la llama piloto (foto 4.30). El vapor de agua calentado se conduce al colector de salida para alimentar las distintas secciones de la fábrica: torre, producción, recepción, etc. (foto 4.31).

La sala de calderas dispone de múltiples elementos de seguridad, a la entrada de la tubería principal se dispone de una válvula de corte, seguida de una válvula reguladora para las calderas pequeñas (calentadores). A la entrada de línea de ambos quemadores hay por este orden una válvula de corte, una válvula reductora/estabilizadora, un filtro para partículas y otra válvula reguladora de la que parten: la conducción para la llama piloto y la alimentación del gas al quemador.



Foto 4.31. Colector de vapor de salida



Foto 4.32. Línea del quemador

Las calderas y recipientes a presión (denominación: BPV) y sus sistemas de tuberías, plantean accidentes por explosiones e implosiones por exceso o reducción excesiva de la presión interna, o por fallo de la resistencia de las paredes o sus componentes a cualquier presión, por fallos en el quemador, por combustión de los vapores de combustible, etc.

Estas explosiones e implosiones provocan daños por la propagación de la onda de presión liberada, por las llamas, humos y escapes de fluidos y por los fragmentos que salen proyectados.



4.3.3. Zona de frío

Se dispone dos compresores tipo ATLAS COPPO que proporcionan el frío para las balsas de agua helada (fotos 4.33, 4.34 y 4.35). Estos compresores disponen también de libro registro de mantenimiento y se someten a las revisiones que se recogen en el reglamento de aparatos a presión.

Se dispone de cuatro balsas de agua helada tal que funcionan con amoníaco como gas refrigerante. Las características del gas son las que se recogen en la tabla siguiente:

AMONÍACO		
LIE	15%	0,1063 kg/m ³
LSE	28%	0,1948 kg/m ³
Densidad relativa al aire	0,60	
Masa molar (kg/kmol)	17,03	
Coeficiente gamma	1,31	
Masa volúmica del líquido (kg/m ³)	760	
Calor específico a T ^a ambiente, C _{sl} (kJ/(kgK))	4980	
Calor latente de vaporización a la T _b , C _{lv} (kJ/kg)	1370000	
Coeficiente de difusión del gas, C _d (m ² /h)	0,092	
Temperatura de ebullición T _b (°C)	-33,4	
Tensión de vapor (P _v) a 20°C (kPa)	869,728	
Grupo y clase de temperatura	IIA T1	
Número CAS	7664-41-7	

Tabla 4.6. Especificaciones del gas amoníaco empleado en las balsas de agua helada



Fotos 4.33, 4.34 y 4.35 (izquierda-derecha). Balsas de agua helada (zona de frío)

Para el amoníaco usado en la sala de compresores existen dos referencias normativas para este producto susceptible de formar atmósferas explosivas en el exterior: la Guía 31-35: 2001-10 y la norma UNE 60079:10. Estas normas indican:



- Guía CEI 31-35: 2001-01.

“ El amoniaco anhidro tiene un LIE relativamente alto (15% en el aire), su vapor es más ligero que el aire y con una elevada energía de ignición, es por tanto difícil de inflamar y al aire libre, una emisión en estado gaseoso se difunde rápidamente dando una extensión de la atmósfera explosiva despreciable.

- Norma EN 60079-10:2004

“La experiencia ha demostrado que el amoniaco es muy difícil de inflamar y el gas fugado se disipa rápidamente en el aire, en este caso la extensión de la atmósfera de gas es despreciable”.

En el caso de la instalación cerrada **como es el caso que nos afecta**, debido a la existencia de un detector de amoniaco que “en teoría” detendría la instalación en caso de una fuga de dicho gas mucho antes de llegar al LIE, y a las condiciones de ventilación del local, la única posibilidad de generación de atmósfera potencialmente explosiva es el interior de los conductos por los que circula o se almacena. En este caso las tuberías (fotos 4.36, 4.37 y 4.38) se consideran llenas al 100%, así que en los casos de arranque y parada se podría dar la formación de una atmósfera potencialmente explosiva.



Fotos 4.36, 4.37 y 4.38 (izquierda-derecha). Conducciones de las balsas de agua helada

4.3.4. Zona de carga de carretillas

Existen dos zonas de cargas de baterías de carretillas:

- Una primera zona ubicada al lado del taller mecánico y próximo a los depósitos de sosa y ácido. Esta zona se encuentra abierta por dos de sus laterales presentando ventilación natural excelente que permite que el hidrógeno que se desprende durante la carga de carretillas no se acumule, lo que podría dar lugar a la formación de atmósferas explosivas.

Esta primera zona comprende dos baterías de marca Tudor (foto 4.39) y tres cargadores (foto 4.40) de marcas Linde, Hawker y RTM.



Batería Tudor
Tipo: 40-04 EPZS 620
Cap: (Ah) 620
Peso: 1529 Kg

Batería Tudor
Tipo: 12-04 EPZS 460
Cap: (Ah) 460
Peso: 361 Kg

Foto 4.39. Baterías Tudor y características de las mismas.



Batería LINDE
560-800 Ah
80V/120A

Batería HAWKER
560-800 Ah

Batería RTM
380-500 Ah
80V/80A

Foto 4.40. Cargadores de esta primera zona de carga y características de las mismas



- La segunda zona de baterías se encuentra en el interior de la cámara de congelado (foto 4.41), aquí se dispone de una batería para cargar la máquina traspaleta eléctrica utilizada en las operaciones de congelado.

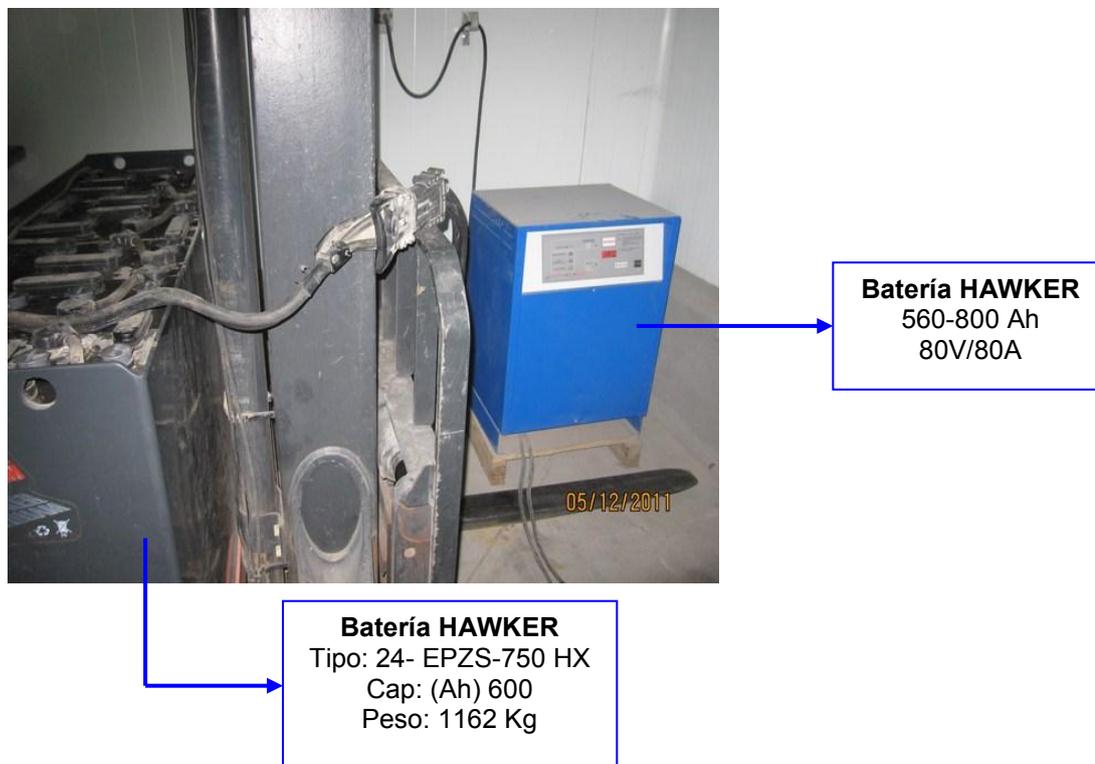


Foto 4.41. Cargador y batería de la zona de carga de la cámara de congelado

El hidrógeno que se desprende durante la carga de baterías, es más ligero que el aire y se clasifica en el Grupo II subgrupo C conforme a la norma UNE-EN 50.014.

De acuerdo con la tabla 2 del apartado 5.4. de EN 60079-14:1997, el subgrupo de material eléctrico a utilizar debe ser IIC en todas las zonas clasificadas por la presencia de hidrógeno.

La temperatura de ignición mínima del hidrógeno es de 500°C, por lo que la clase de temperatura de los aparatos, sistemas de protección y componentes será T1 en las zonas clasificadas por la presencia de dicho gas (incluyendo el coeficiente de seguridad especificado en la UNE-EN1127-1).

En la tabla siguiente (tabla 4.7) se muestran las características de este gas.



HIDRÓGENO		
L.I.E. (límite inferior de explosividad)	4%	0,0034 kg/m ³
L.S.E. (límite superior de explosividad)	75%	0,0629 kg/m ³
Densidad relativa al aire		0,07
Masa molar (kg/kmol)		2,016
Coefficiente gamma		1,41
Masa volúmica del líquido (kg/m ³)		90
Calor específico a T ^a ambiente, C _{sl} (kJ/(kgK))		9800
Calor latente de vaporización a la T _b , C _{lv} (kJ/kg)		454000
Coefficiente de difusión del gas, C _d (m ² /h)		0,148
Temperatura de ebullición T _b (°C)		-252,7
Tensión de vapor (P _v) a 20°C (kPa)		9413
Grupo y clase de temperatura		II C T1
Número CAS		1333-74-0

Tabla 4.7. Especificaciones del gas hidrógeno

4.3.5. Estación depuradora de aguas residuales (E.D.A.R.)

En este apartado realizamos una breve descripción de la instalación E.D.A.R. de que dispone la empresa EUROSERUM IBÉRICA, S.L. con sus dos líneas diferenciadas:

- **Línea de agua**

- Homogeneización en balsa existente. Mediante un bombeo que conduce el vertido hasta el mezclador estático, seguido de un caudalímetro y variador de frecuencia.
- Tratamiento físico-químico con adición en mezclador estático de coagulante y polielectrolito. Para el control de pH se realiza una adición de sosa y ácido sulfúrico.
- Flotación con unidad de flotación para aire disuelto (DAF), para la separación de los flóculos formados en el físico-químico.

- **Línea de fangos**

- Salida de fangos por gravedad del flotador a través de una tolva.
- Acondicionamiento de fangos con polielectrolito dosificado en depósito de floculación.
- Deshidratación de fangos mediante Hidrofan.
- Evacuación de los fangos por gravedad hasta contenedor.

El proceso de tratamiento descrito se recoge en el diagrama de la figura 4.7. ampliándose el mismo en el diagrama detallado del proceso en planta y recogido como figura 4.8.

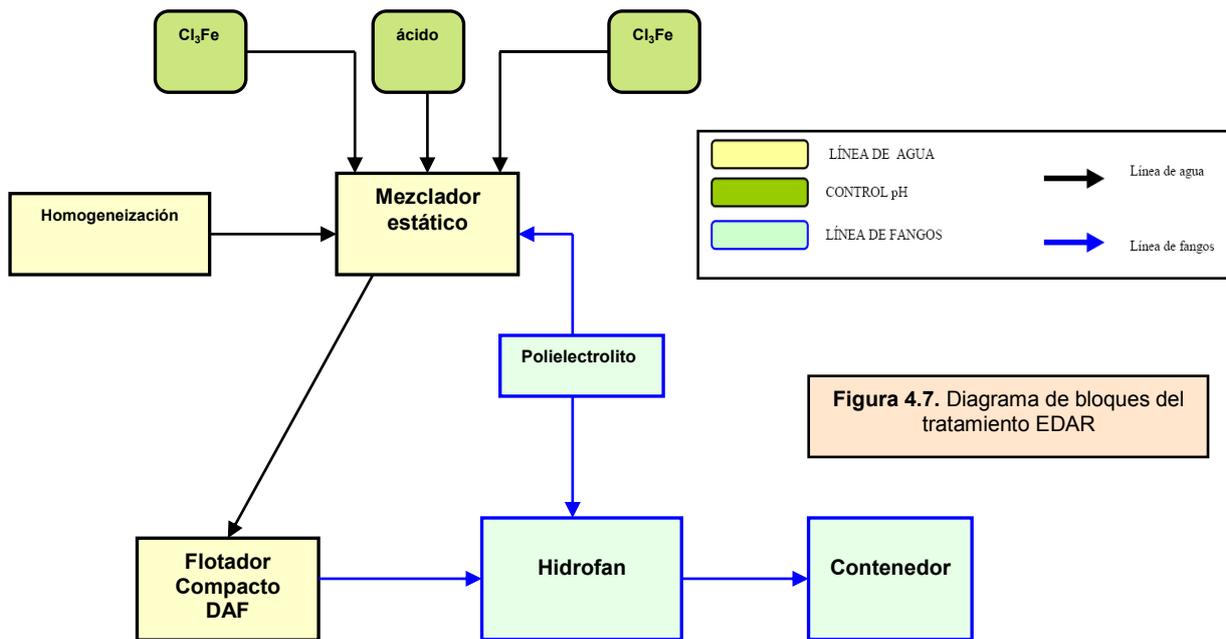


Figura 4.7. Diagrama de bloques del tratamiento EDAR

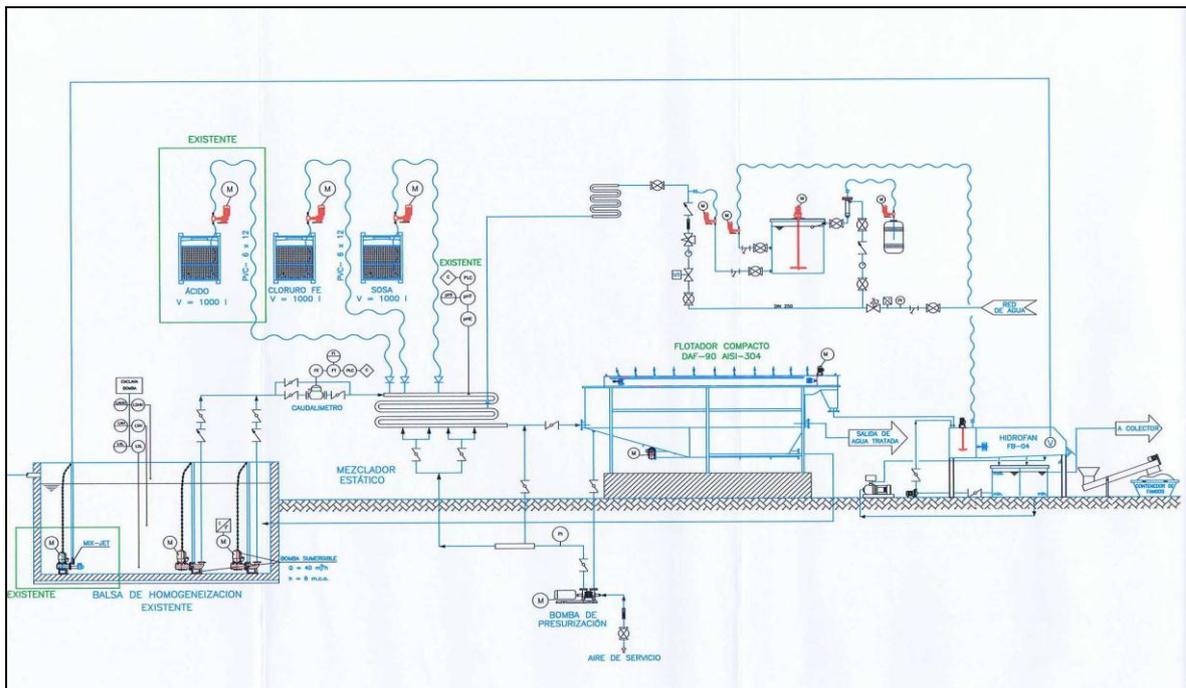


Figura 4.8. Diagrama de proceso de la E.D.A.R.

La capacidad de tratamiento diaria actualmente de la E.D.A.R. es de uno $500m^3/día$, la capacidad de la balsa es de uno $220 m^3$ y por hora se vienen tratando actualmente $40m^3/h$.



4.3.5.1. Desarrollo del proceso en la E.D.A.R.

El agua que entra en la depuradora presenta una carga orgánica importante: son aguas del proceso, de limpieza de recogida de leche, de silos, de limpieza de máquinas, sanitarias, etc., y que van a parar a la balsa de aireación (foto 4.42). Este agua precisa ser tratada en la E.D.A.R. (foto 4.43) a fin de obtener unas concentraciones permitidas que posibiliten su posterior vertido al colector del polígono.



Foto 4.42. Balsa de aireación de aguas sucias



Foto 4.43. Tratamiento en EDAR

El agua referida pasa a un pozo de bombeo y de éste pasa a través de un tamiz rotativo a la balsa de homogeneización. Este agua se bombea entre unidades mediante dos bombas centrífugas que funcionan alternativamente y que se encuentran tratadas con pintura epoxi para así evitar la corrosión de las mismas. El rodete de las bombas actúa como un tamiz rotativo, es decir, dejan un paso libre de partículas sólidas con un diámetro entre 60mm y 100mm.

Desde la balsa de homogeneización el agua pasa al mezclador donde tiene lugar el proceso de tratamiento físico-químico totalmente automático. El tratamiento comienza con el proceso de coagulación en el que se trata de desestabilizar las partículas coloidales mediante la neutralización de sus cargas eléctricas, utilizando un coagulante que puede ser policloruro de aluminio solución al 18% o cloruro férrico (foto 4.44). Previamente a este proceso de coagulación tiene lugar un control del pH en línea, que tiene como misión la adecuación del pH para la flotación de los floculos formados por las sustancias coloidales y las sales de hierro. Para controlar el pH se utiliza ácido sulfúrico e hidróxido sódico al 50%.



El vertido floculado pasa a la unidad de flotación en la que se inyecta aire para favorecer la flotación del fango producido. El equipo de flotación dispone de un sistema de barrido para la recogida de los fangos mediante un sistema de rasquetas. Estas rasquetas (foto 4.45) entran en el agua a una profundidad controlada y van arrastrando los fangos a una tolva que conduce a un depósito donde se procede al acondicionamiento y tratamiento del fango y que consiste en lo siguiente:



Foto 4.44. Depósitos cloruro férrico y ácido



Foto 4.45. Rasquetas de la E.D.A.R.

Para el acondicionamiento se hace uso del polielectrolito utilizado en el proceso de flotación y que es el DKFLOC C-1598. Mediante la aplicación de este producto se consigue una floculación que facilita la deshidratación del fango. El fango floculado llega a una primera zona de tranquilización desde donde se reparte a la tela filtrante que se mueve sobre dos cilindros, uno motriz y otro loco. En esta primera zona se sitúan unos rascadores que facilitan el drenaje del agua a través de la tela. Este agua eliminada en esta zona se desvía directamente al vertido de la depuradora.

A continuación el fango sobre la tela es transportado a una zona de succión donde el “Hidro-jet” de la arqueta de fangos, aspira una mezcla de agua y aire. La corriente de los dos fluidos llega hasta el “Hidro-jet” y se mezcla con el fango de la arqueta, recirculándose por tanto de nuevo al “HIDROFAN”. Mediante un rascador se expulsa el fango deshidratado directamente sobre un contenedor (fotos 4.46 y 4.47).

4.3.5.1.1. Zonas de riesgo de la E.D.A.R.

➤ Línea de aguas

En el ámbito del real decreto 681/2003 únicamente se deben tener en cuenta las zonas donde se pueden formar gases o vapores en una concentración suficientemente alta para formar una atmósfera explosiva.



Fotos 4.46 y 4.47. Contenedor de lodos

En la línea de aguas se podría generar puntualmente ácido sulfhídrico y metano, sin embargo, según la experiencia basada en instalaciones similares esto no suele ser habitual (teniendo en cuenta además que sólo se realiza proceso físico-químico). Ello permite desestimar habitualmente la formación de una atmósfera explosiva en toda la línea de aguas, y por tanto, no es necesario realizar un estudio más exhaustivo de esta instalación.

➤ **Línea de fangos**

Línea en la que se realiza desde la digestión y el espesamiento de los fangos, hasta la deshidratación de los mismos.

Según la experiencia basada en instalaciones similares, los únicos puntos donde se puede generar una atmósfera explosiva es en la digestión y espesamiento de los fangos, así como en la tolva de fangos deshidratados y en el contenedor. Este punto debe ser confirmado con mediciones de metano.

Los extremos anteriormente expuestos se van a desarrollar en el capítulo 5 de la tesis.



4.3.6. Torre de Leche en Polvo

Debido a la peligrosidad de las explosiones por polvo que se pueden producir en esta sección, vamos a analizar de forma rigurosa el proceso productivo que en ella tiene lugar. La leche concentrada desnatada entra en la torre de polvo por la parte superior, donde se atomiza y cae a la tolva pasando a través de una corriente de aire de 196 °C; las partículas secas caen a una especie de tamiz que selecciona el tamaño del polvo. En estas etapas la temperatura elevada es fundamental para garantizar el perfecto secado de la leche. Las partículas que no han quedado suficientemente secas se someten de nuevo al mismo ciclo de secado en tolvas de menor tamaño, denominadas tolvas de recuperación. Ambas tolvas desembocan de nuevo en el tamiz central. Aquellas partículas cuyo tamaño sea el adecuado caen directamente, desde el tamiz central, a un tubo que posee una válvula, ésta selecciona dos canales en cuyas bocas se sitúan los sacos de almacenamiento.

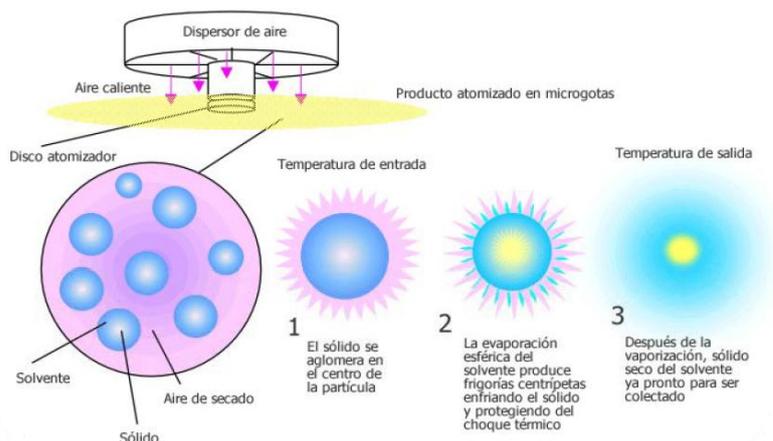


Figura 4.9. Proceso de formación del producto en polvo (leche en polvo, suero en polvo, etc.)

4.3.6.1. Secado. Secado por aspersión

El secado es la operación unitaria en la cual el contenido de humedad del material es eliminado hasta alcanzar la humedad de equilibrio mediante evaporación como resultado de la aplicación de calor bajo condiciones controladas. La reducción de la actividad acuosa se logra a través de la aplicación de calor al producto a tratar.

En esta operación se produce una involucración de la transferencia de calor y masa produciendo transformaciones físicas y químicas. Estos cambios que se producen pueden ser de tipo físico como: encogimiento, cristalización, etc.; o bien pueden suceder reacciones de tipo químico o bioquímicas deseables o indeseables como pueden ser: cambios de textura, color, olor, etc.



La operación de secado por aspersión (que es nuestro caso) consiste en la transformación de la alimentación en estado líquido a un producto sólido y seco cuando ponemos en contacto dicha alimentación en forma de finas gotas (figura 4.9) con una corriente de aire caliente (190°C aprox.). Este tiempo de contacto es muy corto y por lo tanto el daño que se pueda producir en la gota debido al calor es mínimo.

Los secadores por aspersión son usados para el secado de multitud de productos: productos alimenticios (leche, suero, etc.), productos químicos (cerámicas, detergentes, pinturas, cemento, etc.), productos de tipo médico (enzimas, hormonas, etc.).

En la figura siguiente (figura 4.10) puede observarse como se produce el secado por aspersión. En la parte izquierda de la figura la flecha oscura simboliza la transferencia de materia (leche) de la gota a la corriente de aire caliente, y la flecha blanca indica la transferencia de la calor por la corriente de aire a la gota. Se puede observar como es lógico la correspondiente reducción del tamaño de la gota debido a la pérdida de agua de la misma.

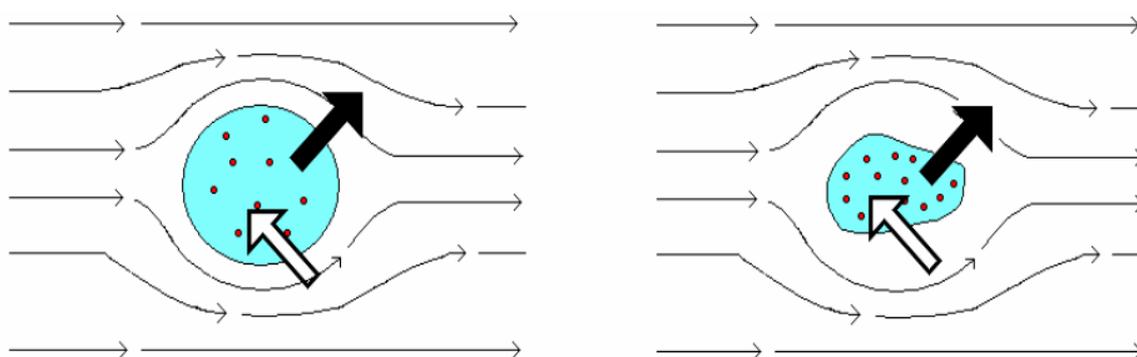
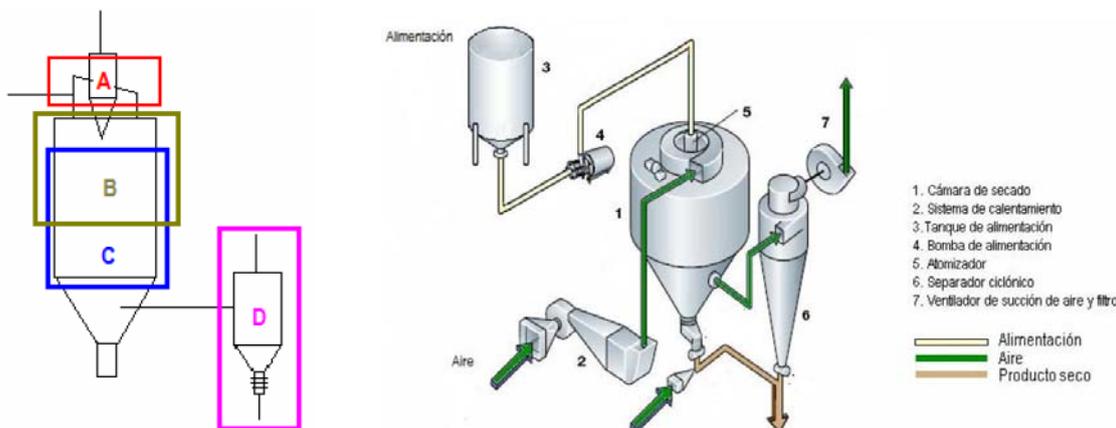


Figura 4.10. Proceso del secado por aspersión

Las etapas del secado por aspersión (figura 4.11) son:

- A) Atomización.
- B) Contacto aire-gota
- C) Evaporación.
- D) Recuperación del producto seco.



Figuras 4.11. Etapas y diagrama de flujo del secado por aspersion

4.3.6.2. Atomización

La atomización se logra al aplicar energía a la masa del líquido que va a ser procesado. Esta operación debe producir una nube con alta relación superficie-masa y la dispersión de partícula debe mantenerse al mínimo. La atomización es la operación más importante en el proceso de secado por aspersion. El tipo de atomizador determina la energía que es necesaria para formar la nube, el tamaño y la distribución de tamaño de las partículas atomizadas, su trayectoria y su velocidad, siendo estos factores los que condicionan el tamaño final de la partícula seca.

La trayectoria de la gota asperjada, sobre todo si son gotas grandes merece especial atención ya que el tamaño de la cámara debe dimensionarse de tal forma que las gotas más grandes de la nube deben secarse antes de alcanzar la pared de la cámara de secado.

4.3.6.2.1. Atomizadores rotatorios

Los atomizadores rotatorios (del tipo que tenemos en nuestra cámara de secado) originan una descarga de líquido a alta velocidad desde el eje de un disco rotatorio. En este tipo de atomizadores las gotas de líquido se alimentan al centro del disco rotatorio, donde se mueven al borde del disco por acción de la fuerza centrífuga y allí se desintegran en finas gotas (figura 4.12). El ángulo de atomización es aproximadamente 180° y forma una nube. El tamaño de las partículas obtenidas mediante este método va de $1-600 \mu\text{m}$. Este dato (junto con la humedad de la partícula que obtengamos) es muy importante porque la definición de polvo corresponde a aquellas partículas cuyo tamaño se encuentra por debajo de las $500 \mu\text{m}$ y el tamaño de partículas que nosotros vamos a obtener oscila entre los $100-165 \mu\text{m}$ en función de si lo que obtenemos es suero en polvo o leche en



polvo. Tanto el suero en polvo como la leche en polvo tienen características combustibles importantes.

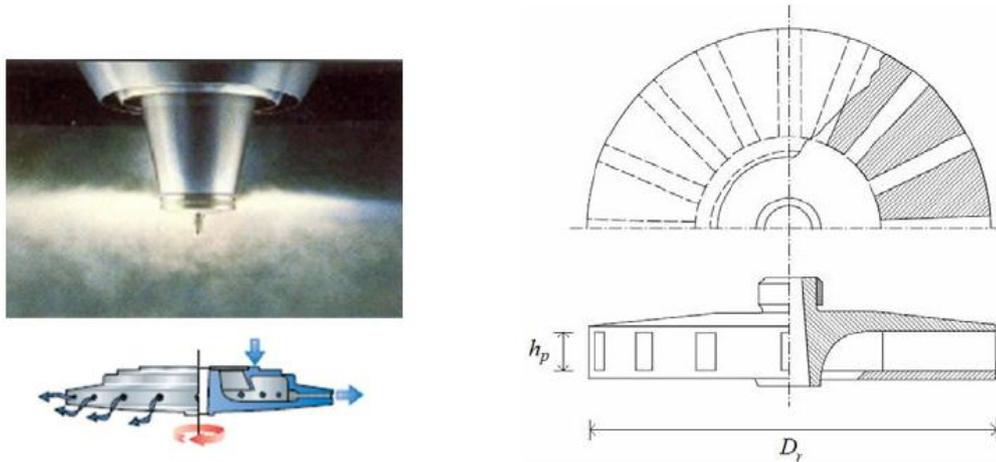


Figura 4.12. Atomizador rotatorio (NIRO)

Debido a la trayectoria horizontal estos atomizadores requieren cámaras de secado con diámetros muy grandes. Las ventajas y desventajas de este tipo de atomizadores son:

Ventajas:

- ◆ Pueden manejar altas velocidades de alimentación.
- ◆ Son recomendados para materiales abrasivos.
- ◆ El control del tamaño de la gota se realiza al cambiar la velocidad angular del atomizador.
- ◆ Es despreciable la tendencia a la obstrucción.

Desventajas:

- ◆ Alto consumo de energía con relación a otros métodos como pueden ser las boquillas de presión.
- ◆ Alto costo de capital en comparación con las boquillas de presión.
- ◆ Cámaras de secado con diámetros grandes.

4.3.6.3. Contacto aire-gota. Parámetros que actúan sobre la gota dentro de la cámara de secado

Existen tres formas básicas de contacto aire-gota: flujo paralelo, flujo a contracorriente y flujo mixto.

Para el caso que nos ocupa el tipo de contacto aire-gota es del tipo flujo paralelo donde la alimentación (gotas de líquido) y el aire caliente se introducen en la zona superior de la cámara y viajan en la misma dirección a través del secador (figura 4.13). El aire caliente



contacta inicialmente con las gotas atomizadas “robándoles” su humedad hasta convertirlas en “elementos secos” que caen al fondo de la tolva.

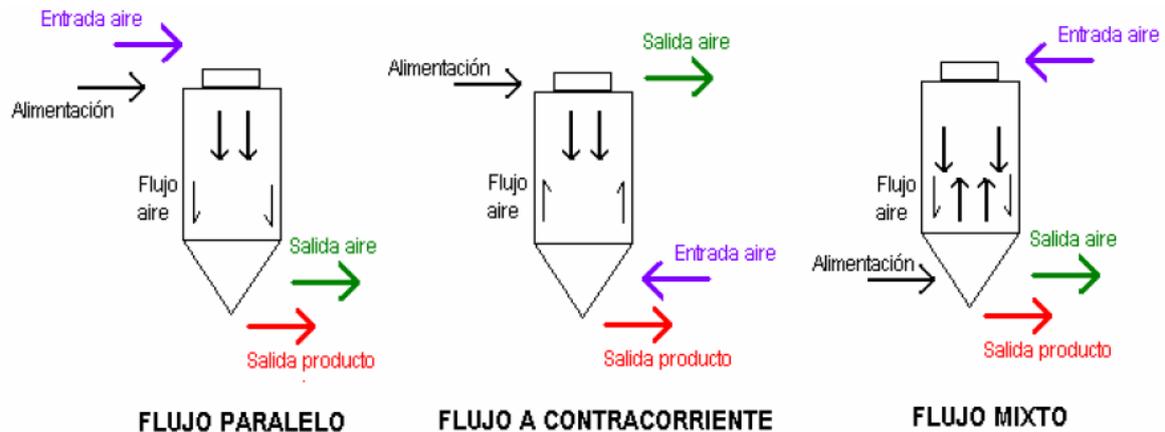


Figura 4.13. Tipos de contacto aire-gota

• Trayectoria de la gota

Una vez que la gota de leche entra en la cámara de secado actúan sobre ella una sumatoria de fuerzas (figura 4.14) que van a determinar la trayectoria de la gota. Esta trayectoria puede obtenerse haciendo uso de un sistema de referencia Lagrangiano, de tal forma que el sistema de referencia se encuentra sobre la gota que está en movimiento.

Las fuerzas que actúan sobre una partícula que se mueve a través de un fluido son:

- ◆ Fuerzas externas: gravitacional y centrífuga.
- ◆ Fuerza de flotación, que es paralela a la fuerza externa y de sentido contrario.
- ◆ Fuerza de arrastre, que actúa en la dirección del movimiento pero en sentido contrario.
- ◆ Fuerza de Coriolis, fuerza ficticia que actúa sobre un cuerpo en un sistema de rotación, que es perpendicular a la dirección del eje de rotación del sistema y a la dirección del movimiento del cuerpo.

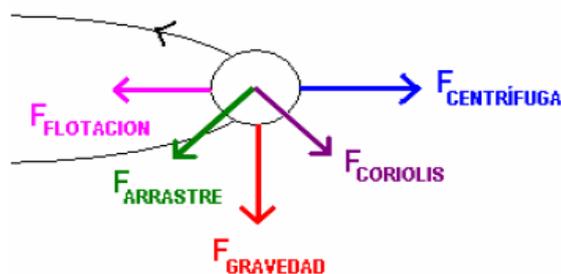


Figura 4.14. Esquema de las fuerzas que actúa sobre la gota dentro de la cámara de secado



Las ecuaciones que determinan el movimiento de la gota en tres dimensiones (tangencial, radial y axial) vienen dadas por:

$$\frac{dV_t}{dt} = -\frac{V_t \cdot V_r}{r} - \frac{3 \cdot C_D \cdot \rho_a \cdot V_{rel} \cdot (V_t - V_{at})}{4 \cdot D_d \cdot \rho_d} \quad (\text{Ec.4 - 1})$$

$$\frac{dV_r}{dt} = -\frac{V_t^2}{r} - \frac{3 \cdot C_D \cdot \rho_a \cdot V_{rel} \cdot (V_t - V_{ar})}{4 \cdot D_d \cdot \rho_d} - \frac{F_L}{m_d} \quad (\text{Ec.4 - 2})$$

$$\frac{dV_v}{dt} = g - \frac{3 \cdot C_D \cdot \rho_a \cdot V_{rel} \cdot (V_v - V_{av})}{4 \cdot D_d \cdot \rho_d} \quad (\text{Ec.4 - 3})$$

Donde:

- C_D : coeficiente de arrastre (adimensional)
- ρ_a : densidad de la mezcla aire-leche a un tiempo t dado
- ρ_d : densidad de la gota a un tiempo t dado
- D_d : diámetro de la gota a un tiempo dado.
- m_d : masa de la gota a un tiempo dado.
- V_{at} : velocidad del chorro de aire que sale del atomizador (ms^{-1}).
- V_{ar} : velocidad radial del aire a un tiempo dado (ms^{-1}).
- V_{rel} : velocidad relativa entre el aire y la gota a un tiempo dado (ms^{-1}).
- V_{av} : velocidad axial del aire a un tiempo t dado (ms^{-1}).
- V_r : velocidad radial de la gota, a un tiempo dado (ms^{-1}).
- V_t : velocidad tangencial de la gota, a un tiempo dado (ms^{-1}).
- V_v : velocidad axial de la gota a un tiempo dado (ms^{-1}).
- r : distancia radial recorrida por la gota a un tiempo t dado (m).
- F_L : fuerza de flotación que actúa sobre una gota (N).
- g : gravedad ($9,81 \text{ ms}^{-2}$).

Existen dos zonas de influencia sobre el movimiento de la gota de leche (figura 4.15):

- *Una zona de influencia del atomizador*, que es aquella donde la gota que sale a velocidades altas del atomizador desacelera hasta que la velocidad relativa entre la gota y el aire (V_{rel}) es cero.



- Una zona de influencia del aire de secado, en la cual el movimiento de la gota no se ve afectado por el atomizador y es gobernado por el aire que gira en espiral (V_{rel} cero).

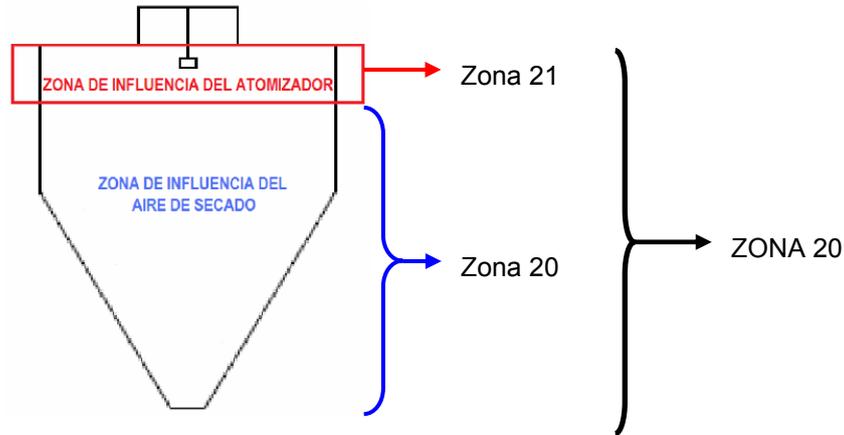


Figura 4.15. Zonas de influencia sobre el movimiento de la gota dentro del cámara de secado y su relación con la clasificación zonal para atmósferas ATEX por polvo

En el interior de la torre se introduce pues, el producto leche o suero en estado líquido, pulverizándose en el interior de la misma. La determinación del punto exacto en el cual el líquido se transforma en polvo presenta gran complejidad, pues entran en juego numerosos factores y es preciso el echar mano de las herramientas de simulación.

Para determinar exactamente el punto donde la gota se transforma en polvo necesitaríamos determinar:

- **La evolución de la temperatura dentro de la gota** (la cual debemos discretizar espacialmente). La alta temperatura del aire (aprox. 196 °C) que está en contacto con la gota eleva la temperatura de esta última. El calor es conducido hacia el centro de la gota lo que provoca un gradiente de temperatura dentro de la misma, una vez que la temperatura superficial de la gota (T_{dR}) alcanza la temperatura de bulbo húmedo (T_{bh}), sigue la evaporación de la humedad que se ve reflejado en la disminución del tamaño de la gota y lógicamente en el cambio de estado de líquido a partícula sólida.

El gradiente de temperatura dentro de la gota (T_d) obedece a la ecuación parabólica siguiente

$$\frac{\partial T_d}{\partial t} = \alpha \cdot \frac{1}{r_d^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r_d} \left(r_d^2 \frac{\partial T_d}{\partial r_d} \right) \quad (\text{Ec.4 - 4})$$



Lógicamente para resolver la ecuación es necesario imponer las condiciones iniciales

$$T_d(r_d, 0) = T_{s1} \quad t \geq 0 \quad \text{y de contorno para el centro de la gota} \quad \frac{\partial T_d}{\partial r_d}(0, t) = 0 \quad t \geq 0, \text{ y}$$

también debemos tener en cuenta la condición a la frontera en la superficie de la gota para la etapa de calentamiento, suponiendo que todo el calor que se transfiere del aire a la gota por convección es utilizado para el calentamiento de la gota

$$-k_s \cdot \frac{\partial T_d}{\partial r_d}(R_d, t) = -h_c \cdot (T_a - T_{dR}) \quad T_{dR} < T_{bh}$$

Donde:

- α : coeficiente de difusividad térmica.
- T_d : temperatura dentro de la gota.
- T_{dR} : temperatura superficial de la gota
- T_{bh} : temperatura de bulbo húmedo.
- h_c : coeficiente de transferencia de calor.
- R_d : radio de la gota.
- T_a : temperatura del aire en un tiempo dado.
- T_{s1} : temperatura a la entrada de la cámara de secado

- **La concentración de agua dentro de la gota.** El gradiente de concentración agua dentro de la gota C_w está determinado también por una ecuación parabólica similar a la Ec 4-4 introduciendo el coeficiente de difusión del agua en el sólido \wp .

$$\frac{\partial C_w}{\partial t} = \wp \cdot \frac{1}{r_d^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r_d} \left(r_d^2 \frac{\partial C_w}{\partial r_d} \right) \quad (\text{Ec.4 - 5})$$

Con sus correspondientes condiciones iniciales y de contorno

- **La velocidad de disminución del diámetro de la gota.** Ésta se relaciona con la pérdida de humedad de la misma, de tal forma que comienza a disminuir una vez que se alcanza la temperatura de bulbo húmedo (T_{bh}), es decir, en la etapa de evaporación. La velocidad con que disminuye el diámetro de la gota se obtiene de un balance de calor, donde el calor transferido del aire a la gota por convección ($Q_{\text{convección}}$) es igual al calor utilizado para la evaporación de la humedad de la gota ($Q_{\text{evaporación}}$) más el calor utilizado para incrementar su temperatura por conducción ($Q_{\text{conducción}}$), por lo tanto:

$$Q_{\text{conducción}} = Q_{\text{evaporación}} + Q_{\text{conducción}} \quad (\text{Ec.4 - 6})$$



que podemos escribir como sigue:

$$-h_c \cdot (T_a - T_{dR}) = -\frac{1}{A} \cdot \frac{dq_{\text{evaporación}}}{dt} - k_s \cdot \frac{\partial T_d}{\partial r_d} \quad (\text{Ec.4-7})$$

la velocidad con que disminuye el radio de la gota asperjada se define:

$$\frac{dR_d}{dt} = -\frac{1}{A} \cdot \frac{dq_{\text{evaporación}}}{dt} \cdot \frac{1}{\lambda_{bh}} \cdot \frac{1}{\rho_w} \quad (\text{Ec.4-8})$$

Si ahora sustituimos la Ec. 4-7 en la Ec. 4-8, obtenemos:

$$\frac{dR_d}{dt} = -\left[h_c \cdot (T_a - T_{dR}) - k_s \left(\frac{\partial R_d}{\partial t} \right) \right] \cdot \frac{1}{\lambda_{bh}} \cdot \frac{1}{\rho_w} \quad (\text{Ec.4-9})$$

Con λ_{bh} : calor latente de vaporización a la temperatura de bulbo húmedo y ρ_w : densidad de la gota de leche (muy próxima a la del agua).

El diámetro de la gota D_d ($D_d = 2 \cdot R_d$) disminuye hasta alcanzar el diámetro crítico D_c a partir de ese momento el diámetro permanece constante.

Hemos introducido las fórmulas (Ec. 4-4 a Ec. 4-9) para darnos una idea de la dificultad que entraña el determinar el punto espacial exacto en el cual la partícula gota se transforma en polvo en el interior de la cámara de secado. Es por ello, que por seguridad en la clasificación ATEX de una cámara de secado debemos considerarla toda ella como zona 20 (figura 4.15) y no considerar el atomizador como zona 21 y el resto de la cámara zona 20 como actualmente se está haciendo.

• Evaporación

El proceso de evaporación del agua de la gota de leche se lleva a cabo en dos etapas:

- La primera de ellas se produce a velocidad constante. En esta etapa la difusión de humedad desde dentro de las gotas permite tener la superficie saturada de líquido, el tamaño de la gota va disminuyendo y en la superficie de las misma la temperatura permanece constante. El aire de secado disminuye su temperatura a medida pues lógicamente gana humedad.



- La segunda etapa se produce a velocidad decreciente. Aparecen áreas secas sobre la superficie de la gota debido a que la velocidad de migración de la humedad a la superficie no es suficiente para mantenerla saturada, así se alcanza el punto crítico de humedad según el cual la gota de leche ya no se puede contraer más en volumen y su temperatura comienza a descender. Llegados a este punto el aire de secado llega a la temperatura y a una humedad crítica, su temperatura sigue disminuyendo hasta la fijada por el final del proceso aumentando su humedad.

El tiempo requerido para el secado y la velocidad de ídem son dependientes de la temperatura del aire de secado, el coeficiente de transferencia de calor y el diámetro de la gota a secar.

La figura 4.16 representa los cambios de geometría que va sufriendo la gota de leche a medida que se produce el secado.

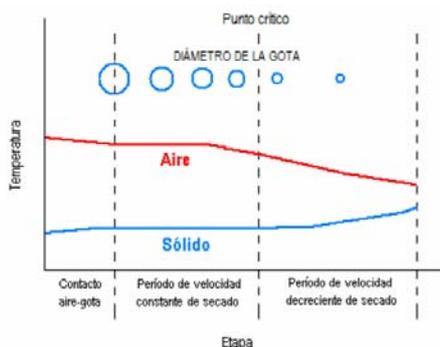


Figura 4.16. Cambios en la geometría de la gota de leche durante el proceso de secado

En las figuras siguientes (figuras 4.17 a 4.21) se muestra la modelización mediante los programas GAMBIT-FLUENT de una gota de leche aumentada en el interior de la cámara de secado en el proceso de evaporación a velocidad constante.

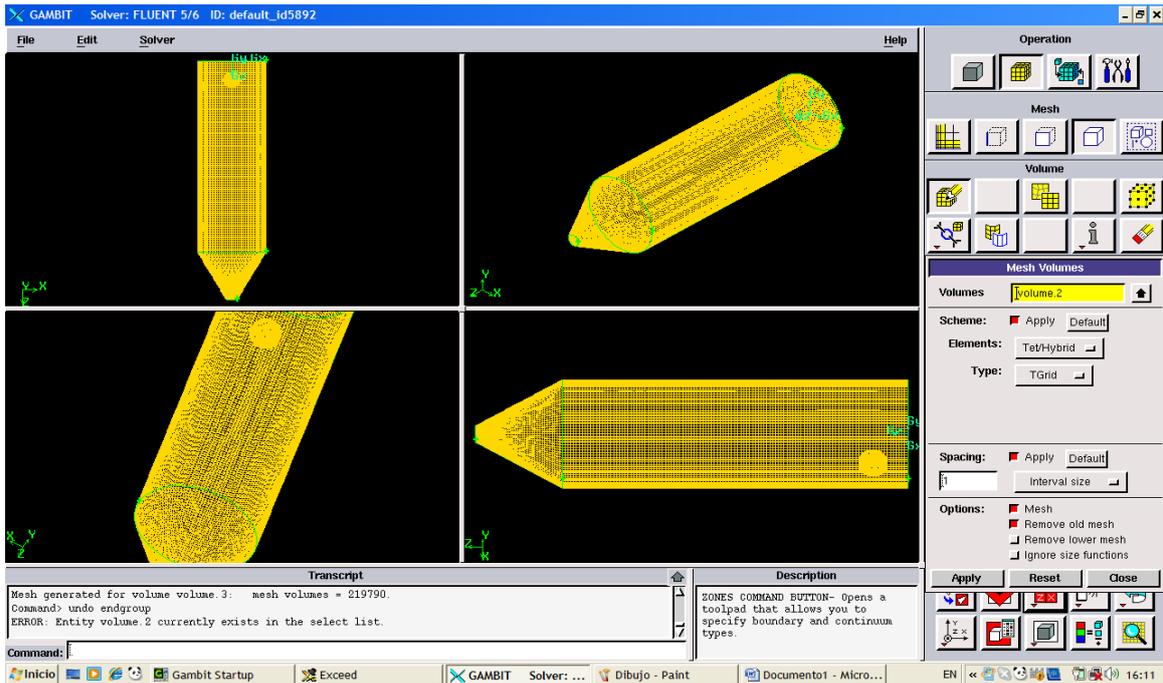


Figura 4.17. Creación de la geometría del silo con la gota en su parte superior y mallado

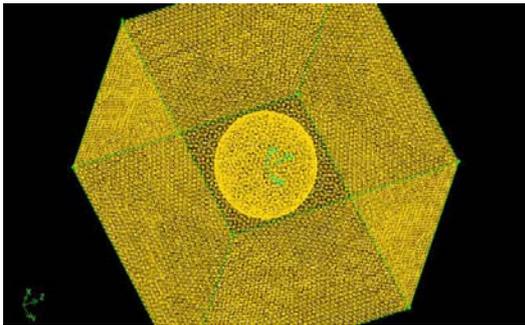


Figura 4.18. Mallado de la gota de leche confinada en un volumen cúbico creada mediante la geometría del programa GAMBIT

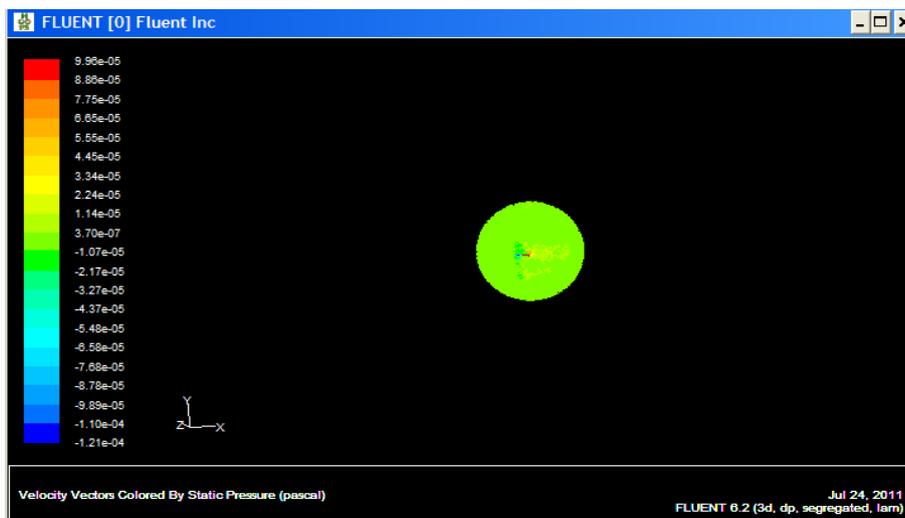
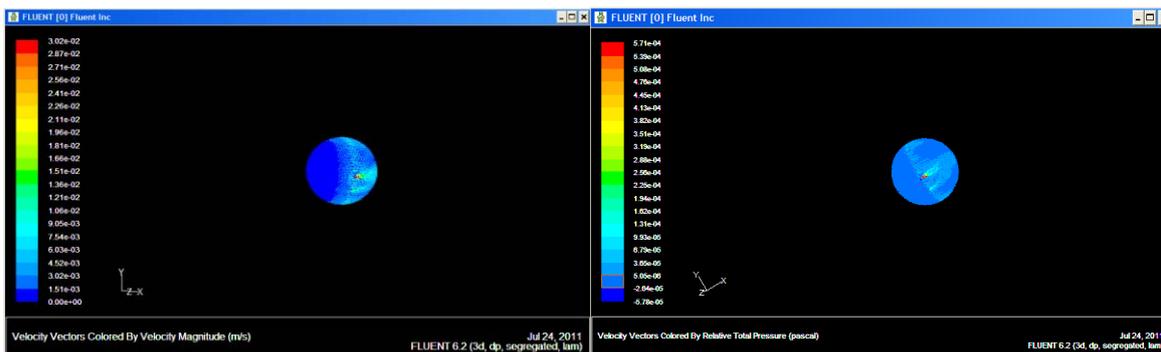


Figura 4.19. Simulación de los vectores de presión en la gota de leche cuando comienza el proceso de evaporación mediante el programa FLUENT



Figuras 4.20 y 4.21. Vectores de velocidad en m/s y presión absoluta en Pascales de la gota de leche mediante FLUENT

4.3.6.4. Recuperación del producto

La recuperación del producto en este caso leche o suero en polvo se realiza primero en la base de la cámara de secado donde el producto cae al vibrofluidificador, seguido de la separación de finos denominada secundaria que se realiza normalmente mediante separadores ciclónicos.

Los separados ciclónicos son los más empleados para la separación y recolección de polvo. En estos el aire cargado de polvo entra en forma tangencial a una cámara de geometría cilíndrico-cónica girando rápidamente y que sale por la parte central superior. El producto seco, debido a la inercia que presenta, tiende a moverse hacia la pared exterior del separador donde continua hasta caer a un receptor.

4.3.6.5. Dimensiones de la cámara de secado

La relación $H_{cámara}/D_{cámara}$ de la cámara de secado con una sección cilíndrica ($H_{cilindro}$) y una cónica (H_{cono}), con atomizador rotatorio como es nuestro caso es de 1,2 a 1,5. Estos son valores típicos obtenidos de la revisión de literatura de equipos comerciales (Alamilla 2001).

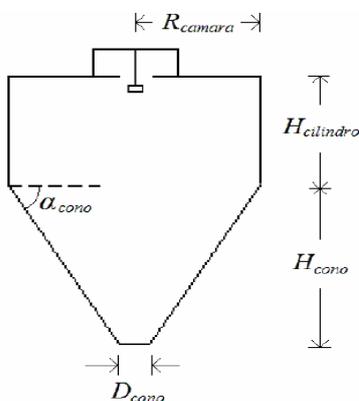


Figura 4.22 Esquema de las dimensiones de una cámara de secado



De la revisión de los equipos comerciales se encontró que las dimensiones de la cámara de secado pueden expresarse:

$$H_{\text{cámara}} = 1,5 \cdot D_{\text{cámara}} \quad (\text{Ec.4 - 10})$$

$$H_{\text{cono}} = \left[R_{\text{cámara}} - \frac{D_{\text{cono}}}{2} \right] \cdot \tan \alpha_{\text{cono}} \quad (\text{Ec.4 - 11})$$

$$H_{\text{cilindro}} = H_{\text{cámara}} - H_{\text{cono}} \quad (\text{Ec.4 - 12})$$

$$D_{\text{cono}} = \frac{D_{\text{cámara}}}{10} \quad (\text{Ec.4 - 13})$$

$$\alpha_{\text{cono}} = 60^\circ \quad (\text{Ec.4 - 14})$$

4.3.6.6. *Sistemas de la cámara de secado*

Para evitar que la leche se pegue a las paredes de la torre, existe un dispositivo que origina un proceso de vibrando continuo, que además permite conseguir una mayor capacidad de la planta. Amén de este sistema, y para una mayor seguridad de los equipos y unas mejores condiciones sanitarias la cámara dispone de:

- **Sistema de enfriamiento para el dispersor de aire**, enfriando así el espacio existente entre el dispersor y el techo de la cámara; este sistema de enfriado está compuesto por un filtro de aire y ventilador radial de acero dulce con motor de bridas de acoplamiento directo.
- **Equipos contra incendios en la cámara de secado**, diseñado para rociar con agua toda la superficie de la cámara. Dicho equipo está compuesto por un conjunto de toberas situadas en la parte cilíndrica de la cámara de secado, que en un principio permanecerán ocultas en la pared de la cámara y sobresaldrán al recibir la presión de agua una vez que se haya activado el sistema contra incendios, que está automatizado por medio de sensores (termostatos). En la siguiente figura (figura 4.23) se muestra un esquema completo de la torre de leche en polvo con los equipos de sistema contra incendios.

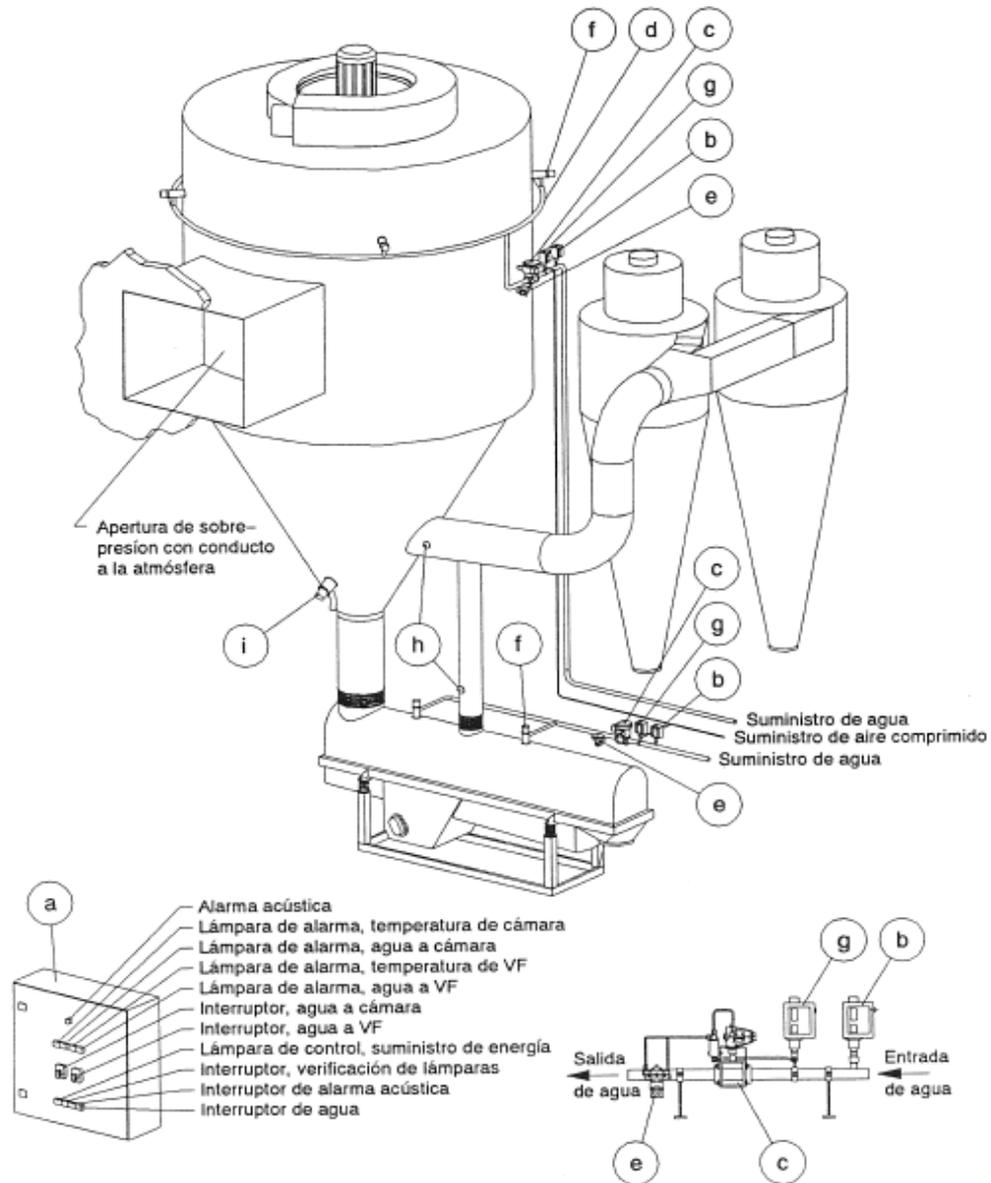


Figura 4.23. Esquema de la torre de leche en polvo con los sistemas de protección

- **Sistema de alivio de explosiones en cámaras de secado**, para protección de equipos y operarios. Está compuesto principalmente por una puerta de sobrepresión situada en la cámara de secado de acero inoxidable y diseñada para permitir la liberación de aire cuando la presión alcance unos 2,5-3 KPa.

La puerta de alivio de presión y los componentes principales se muestran en la siguiente figura (figura 4.24).

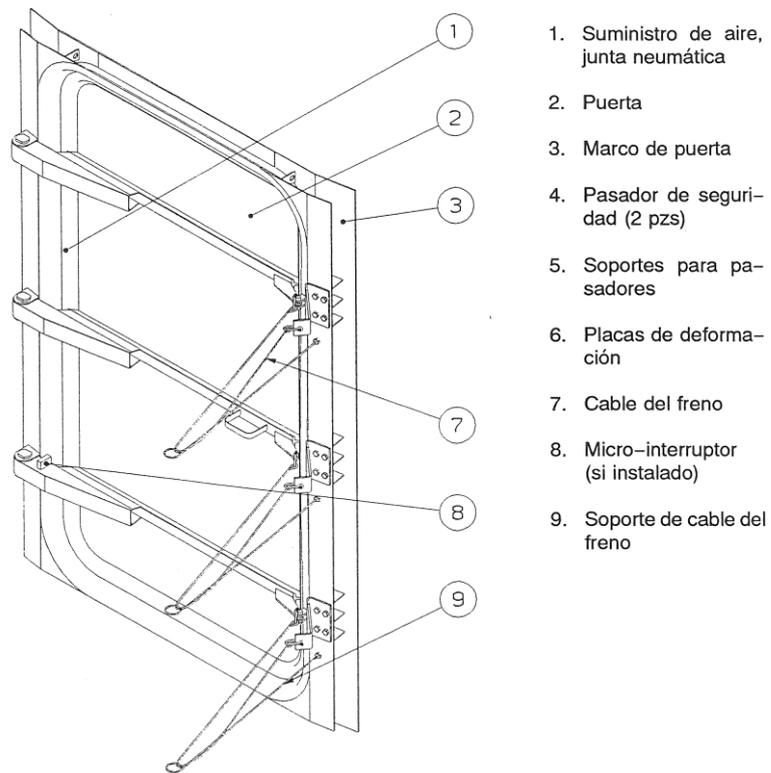


Figura 4.24. Puerta de alivio de presión y elementos principales de la misma

En la foto 4.48 se muestra la puerta de alivio de presión vista desde dentro y en la foto 4.49 la apertura de sobrepresión con conducto a la atmósfera.



Foto 4.48. Puerta alivio presión



Foto 4.49. Apertura sobrepresión a la atmósfera

La puerta está sujeta con 3 bisagras, en cada una de las cuales hay un fusible de aluminio rebajado que se encuentra “tarado” para que “rompa” a 1,5 KPa de presión, junto con un final de carrera de aviso. La puerta se encuentra sujeta con eslingas para que en caso de apertura por sobrepresión no salga despedida por el pasillo de ventilación y pueda causar daños. Lo anteriormente expuesto se muestra en la foto 4.50.

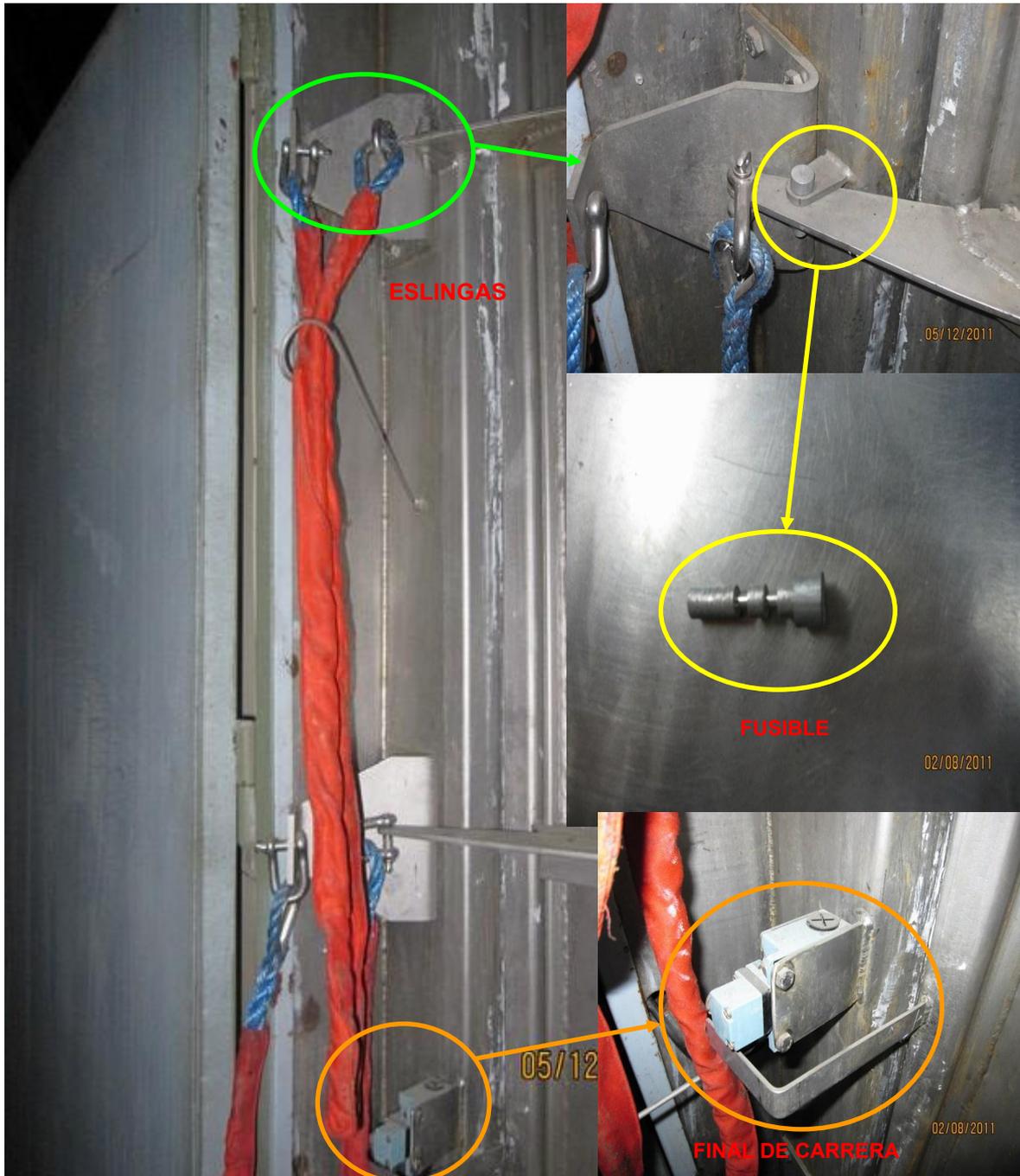


Foto 4.50. Puerta de alivio de presión y elementos de sujeción y apertura



La presión de liberación de apertura de la puerta que da el fabricante es de (2,5 -3KPa), es decir, valores superiores a la presión del fusible. Presenta una geometría rectangular de dimensiones de 2,10m x 1,10m, el pasillo que conduce desde la puerta al exterior presenta una altura de 2,60 metros de alto por aproximadamente 5 metros de largo tal y como puede verse en las fotos siguientes (foto 4.51, 4.52 y 4.53). La importancia de considerar las dimensiones tanto de la puerta de alivio de presión como del pasillo se van a constatar en el capítulo 8 en la realización de la simulación mediante CFD de una sobrepresión en el interior de la cámara de secado.



Fotos 4.51 y 4.52. Secuencias de la medición de la puerta de alivio y pasillo



Fotos 4.53, 4.54 y 4.55. (izquierda-derecha). Dimensiones (ancho-alto) del pasillo de alivio de presión, vista del pasillo de alivio desde el interior de la torre y puerta de entrada al pasillo y a la puerta de sobrepresiones

- **Sistema vibrofluidizador** para un tratamiento suave del producto mediante fluidificación. Está compuesto por: (a) un vibro-fluidizador de 4m² de acero inoxidable montado sobre resortes espirales, (b) sistema para extinción de incendios diseñado para rociar con agua la superficie interna del mismo (c) panel de control para sistemas de protección contra incendios.

- **Sistema de limpieza para la planta de secado por atomización (figura 4.25)**, compuesto por toberas CIP para limpieza de los conductos y ciclones, dos bombas centrífugas de acero inoxidable para alimentación de la solución de limpieza, una bomba centrífuga para retomar la solución de limpieza (desagüe), dispositivo de lavado (turbina giratoria) para la cámara de secado, de accionamiento hidráulico y compuesta por cuatro toberas giratorias, dos obturadores para un sellado hermético de la cámara de secado evitando así el paso de vahos a los restantes equipos y tanque de lanzamiento de 3000 litros de capacidad.

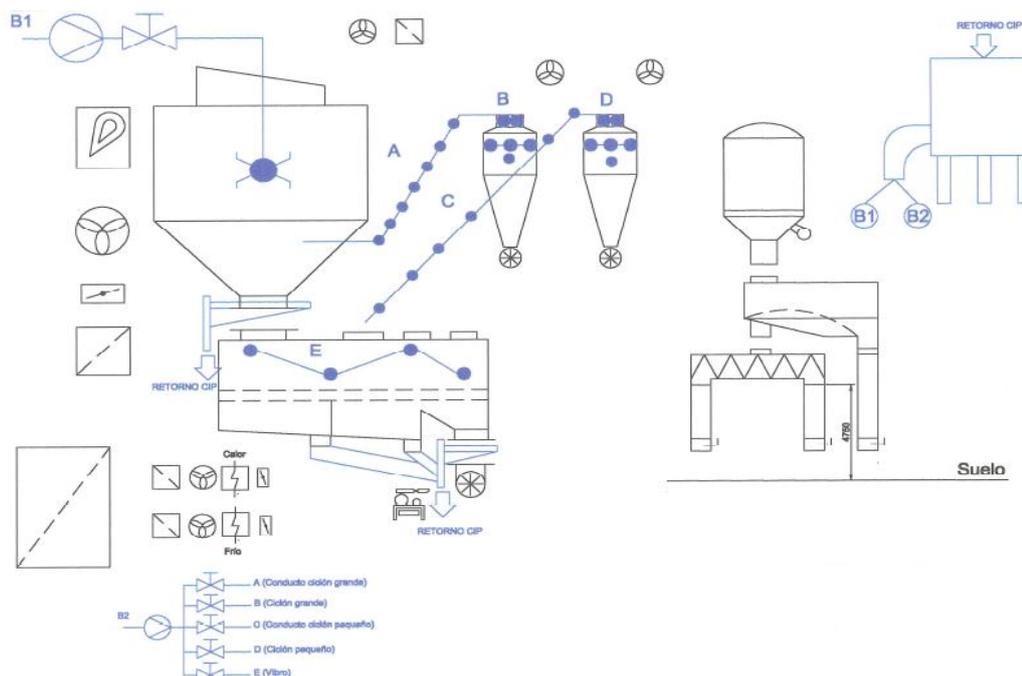


Figura 4.25. Esquema del sistema de limpieza para la planta de secado

- **Sistema de limpieza para la planta de secado por atomización (figura 4.25)**, compuesto por toberas CIP para limpieza de los conductos y ciclones, dos bombas centrífugas de acero inoxidable para alimentación de la solución de limpieza, una bomba centrífuga para retomar la solución de limpieza (desagüe), dispositivo de lavado (turbina giratoria) para la cámara de secado, de accionamiento hidráulico y



compuesta por cuatro toberas giratorias, dos obturadores para un sellado hermético de la cámara de secado evitando así el paso de vahos a los restantes equipos y tanque de lanzamiento de 3000 litros de capacidad.

- ❑ **Sistema de tamizado de polvo de acero inoxidable** y compuesto por una malla, una unidad vibradora ajustable y bastidor con resortes espirales.
- ❑ **Sistema de manejo de polvo (figura 4.26)**, compuesto por: (a) sistema de transporte de polvo sinfín (válido tanto para el ensacado manual como automático), (b) sistema de aire de transporte compuesto por una válvula de descarga del polvo del sinfín al sistema de transporte a presión, soplante rotativa para suministro de aire de transporte para el polvo y conductos para transporte de finos de acero inoxidable.
- ❑ **Sistema de filtraje para aire de proceso**, para una mejora de los aspectos sanitarios de la planta. Dicho sistema está compuesto por: (a) filtro general para aire con una eficacia del 86% montado sobre bastidor de acero inoxidable (b) conductos de aire de acero inoxidable (c) filtro fino, ubicado después de ventiladores y baterías/enfriadores con una eficacia del 99%.
- ❑ **Sistema de control automático de la temperatura de salida**, mediante ajuste de la velocidad de giro de la bomba de alimentación.
- ❑ **Mejora del sistema de alimentación**, compuesto por un precalentador tubular del concentrado (desde 25°C hasta 45°C), un intercambiador de acero inoxidable de superficie rascada para precalentamiento del concentrado, permitiendo así un incremento de la capacidad evaporativa de la torre en un 5%.



Fotos 4.56, 4.57 y 4.58 (izquierda-dcha). Correas del sistema atomizador en la parte superior del silo (fotos 4.56 y 4.57) y silo secundario de calentamiento (foto 4.58)

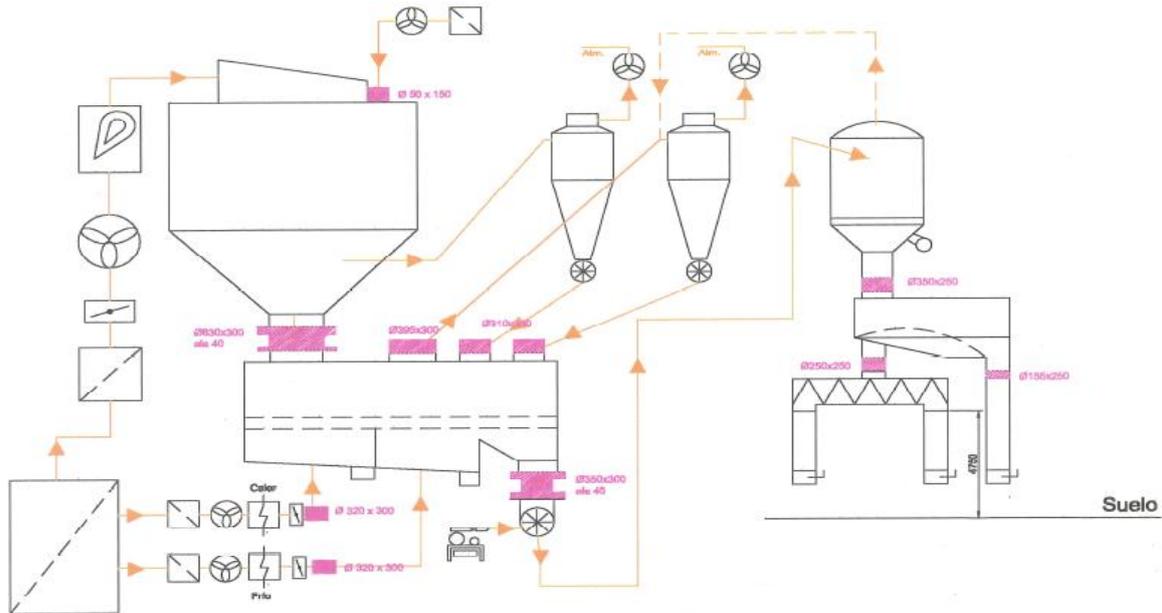


Figura 4.26. Esquema del sistema de producción y transporte de polvo



Fotos 4.59, 4.60 y 4.61 (izquierda-dcha). Martillos de impacto en el silo para evitar alpezamientos, conductos de secado en primera etapa del producto terminado y caída del producto seco en el cono de la cámara de secado al sistema vibrofluidificador

4.3.6.7. Sistema de ensacado automático

Se dispone de un sistema de ensacado automático que la empresa ha instalado recientemente. El sistema se muestra en las fotografías 4.62 a 4.64 y figuras 4.27 a 4.33. La instalación de pesaje y llenado de sacos o big-bags consta de distintas partes conceptualmente separadas y que son:

1. Dosificación de producto

La dosificación del producto puede realizarse por distintos métodos:

- Dosificación CG: Aportación del producto por gravedad a través de compuertas accionadas neumáticamente.
- Dosificación CGS: Aportación del producto por gravedad a través de compuerta accionada por servomotor.



- Dosificación CA: Aportación del producto por sinfines tubulares.
- Dosificación CT: Aportación del producto por cinta y compuerta accionada neumáticamente
- Dosificación CTS: Aportación del producto por cinta y compuerta accionada por servomotor.

2. Estación de pesaje y llenado

La máquina dispone de un sistema de pesaje y llenado automático en función de las necesidades.

Desde un punto de vista de las atmósferas explosivas el sistema de ensacado automático se encuadra dentro de los equipos manejan polvo combustible con una energía de ignición mayor de 3 mJ ($EMI > 3 \text{ mJ}$) y una temperatura mínima de ignición mayor de 210 °C ($TMI > 210 \text{ °C}$).



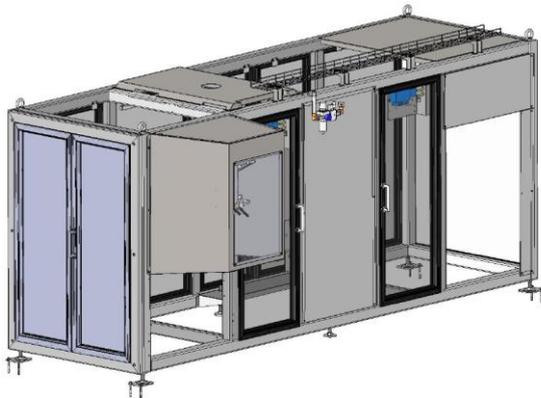
Foto 4.62. Panel posterior de la estructura que apoya y protege a los dispositivos de ensacado



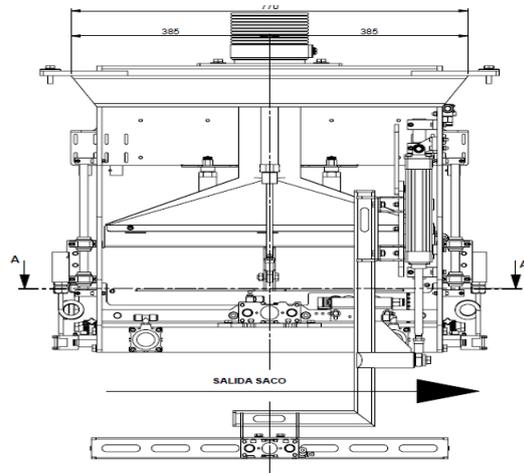
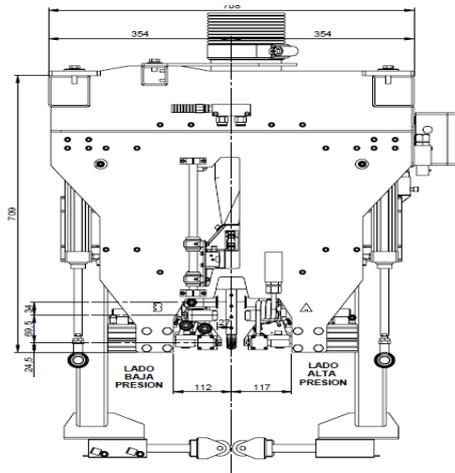
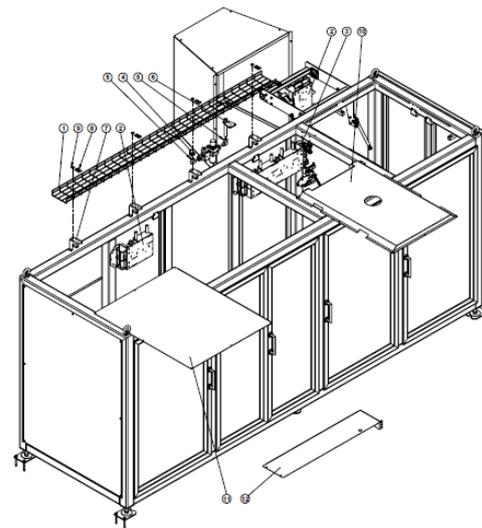
Foto 4.63. Panel frontal de la estructura



Foto 4.64. Acumulador de rodillos de ensacado CSA 75 IF



Figuras 4.27 y 4.28. Estructura del sistema de ensacado, vista completa y modular



Figuras 4.29 y 4.30. Colocador de sacos

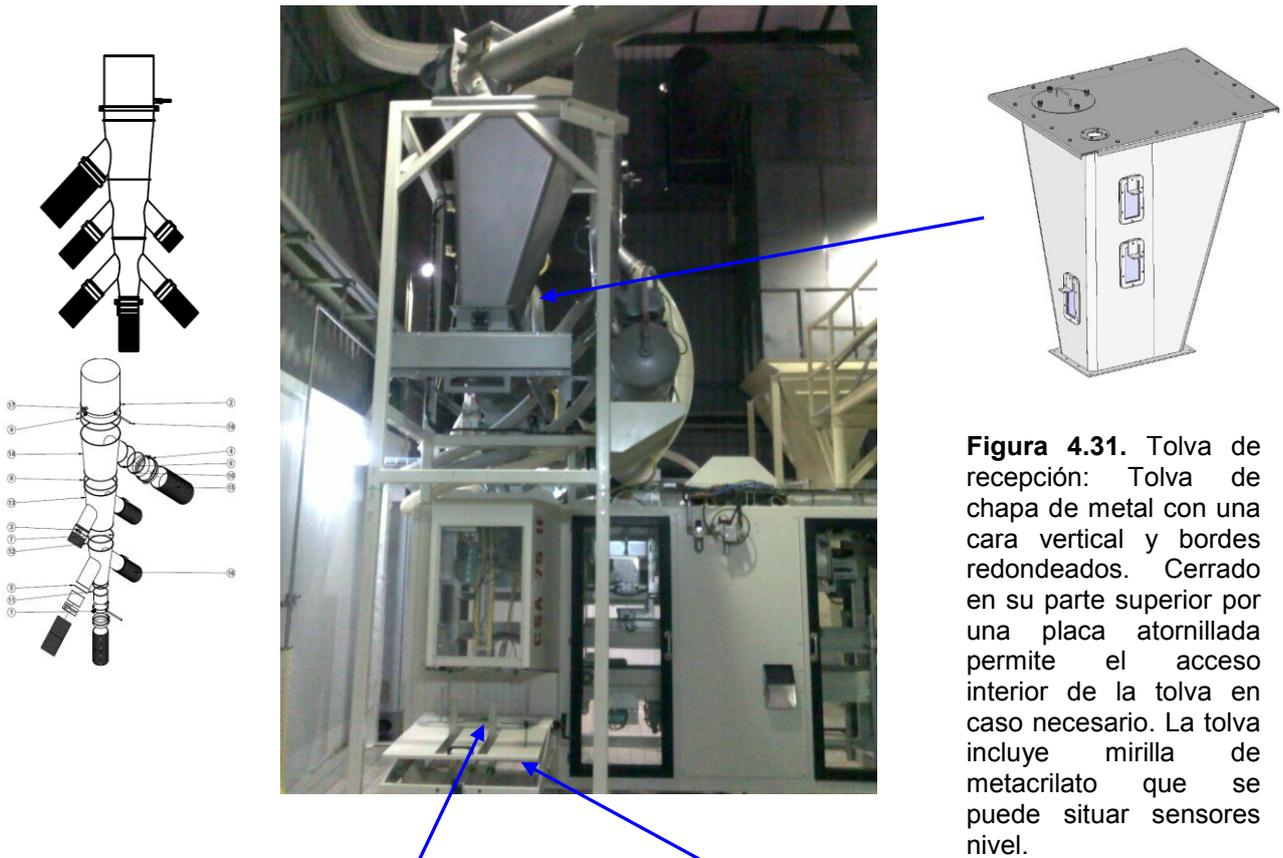


Figura 4.31. Tolva de recepción: Tolva de chapa de metal con una cara vertical y bordes redondeados. Cerrado en su parte superior por una placa atornillada permite el acceso interior de la tolva en caso necesario. La tolva incluye mirilla de metacrilato que se puede situar sensores nivel.

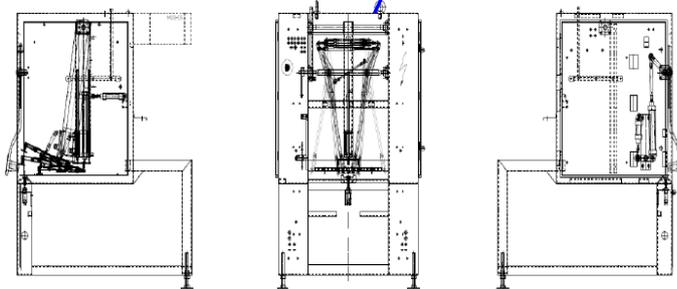


Figura 4.32. Bolsa de posicionador de ensacado. Dispositivo para abrir y la posición de la bolsa. En primer lugar tazas de succión se mueven verticalmente hacia abajo, se dejan llevar por un cilindro neumático. Ellos cogen la bolsa y la suben. Un cilindro neumático con un brazo abre la bolsa y cae el producto

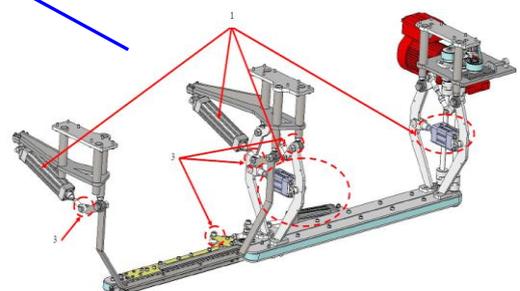
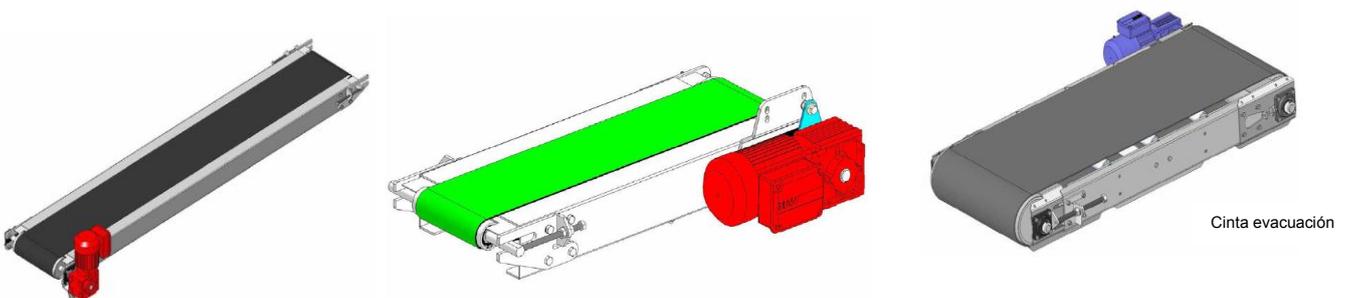


Figura 4.33. Canalizador. Dispositivo que hace que pase la bolsa a la siguiente etapa a través de un sistema de cintas accionado por un motorreductor. Su movimiento está sincronizado con la cinta transportadora inferior.



Cinta evacuación



La clasificación de esta parte de la instalación en áreas de riesgo de acuerdo con el R.D. 681/2003 y la norma UNE 61241-10: Material eléctrico para uso en presencia de polvos, se ha realizado teniendo en cuenta la frecuencia con que se producen atmósferas explosivas y la duración de las mismas.

De acuerdo con el mencionado Real Decreto las zonas con riesgo de atmósfera potencialmente explosiva de polvo se clasifican en zona 20, zona 21 y zona 22.

Siendo zona 20 aquella área de trabajo en la que una atmósfera explosiva en forma de nube de polvo combustible en el aire está presente de forma permanente, o por un periodo de tiempo prolongado, o con frecuencia.

Siendo zona 21 aquella área de trabajo en la que es probable la formación ocasional, en condiciones normales de explotación, de una atmósfera explosiva en forma de nube de polvo combustible en el aire.

Siendo zona 22 aquella área de trabajo en la que no es probable, en condiciones normales de explotación, la formación de una atmósfera explosiva en forma de nube de polvo combustible en el aire o en la que, en caso de formarse, dicha atmósfera explosiva sólo permanece durante un breve periodo de tiempo.

Las áreas de trabajo de una instalación que no cumplan las características de las zonas anteriormente mencionadas son áreas no clasificadas sin riesgo de atmósfera potencialmente explosiva y por lo tanto sin ningún tipo de exigencia desde el punto de vista de este estudio.

En las instalaciones de llenado de Big-Bags como norma general, se considera todo el conducto de aportación de producto como zona 20 (interior tolvas, interior sinfines, interior pesadoras, tubos de descarga...), la zona del alrededor inmediato de boca la de llenado se considera zona 21 (30 centímetros alrededor de la boca), basándose dicha clasificación en asegurar la existencia de una aspiración suficiente que impide que el posible polvo generado se extienda más allá de la distancia considerada.

Alrededor de las máquinas de llenado, la zona se clasifica como 22. Se estima una distancia de 1 metro en horizontal. En las figura siguiente (figura 4.34) puede verse la clasificación ATEX de la zona de ensacado con los elementos anteriormente descritos.

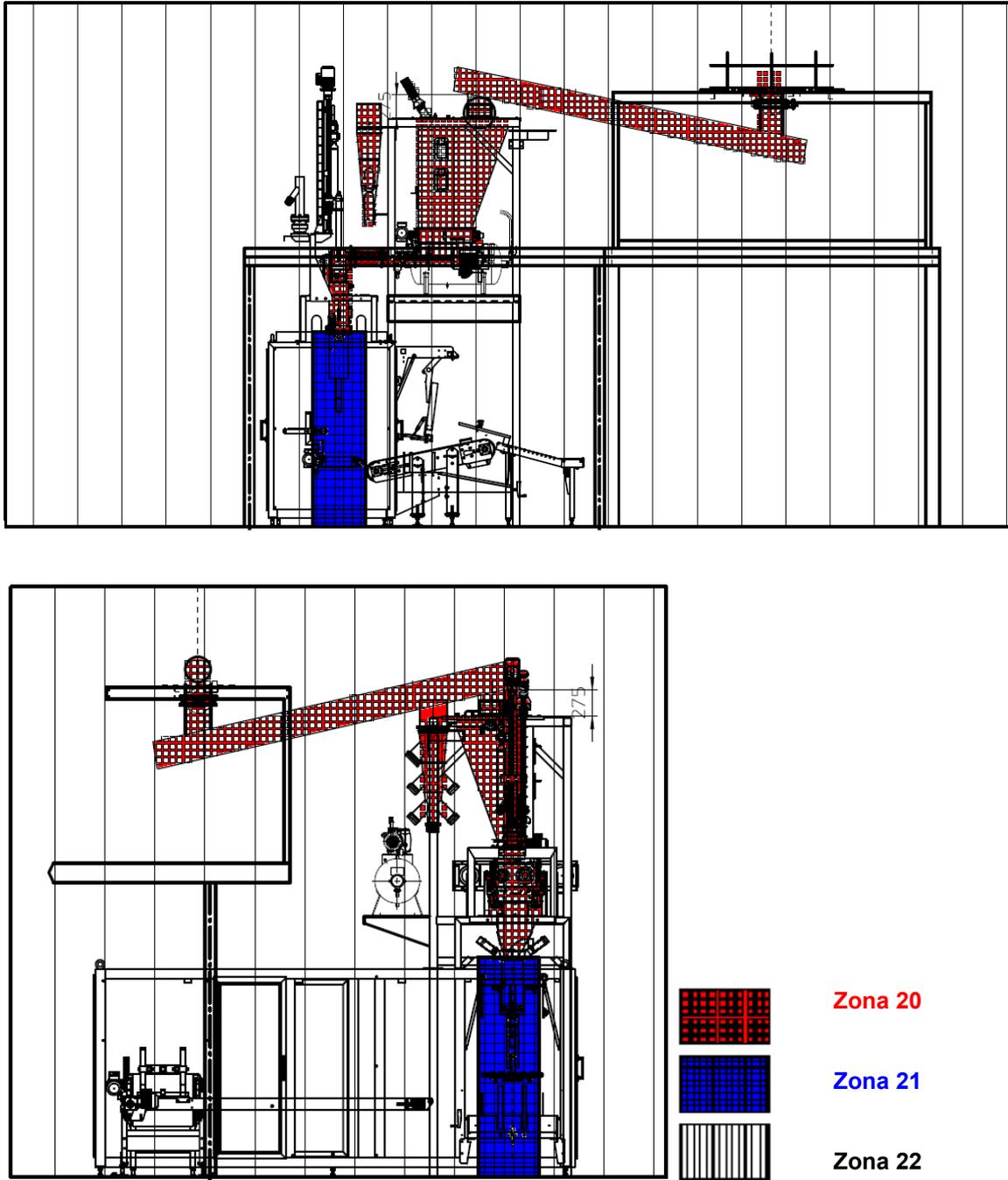


Figura 4.34. Clasificación zonal ATEX de la zona de ensacado



CAPITULO 5. ANÁLISIS NECESARIOS PARA LA MEJOR DEFINICIÓN DE ZONAS

Para realizar la clasificación de zonas de una planta, es necesario estudiar detalladamente la posibilidad de aparición de atmósfera de gas explosiva o de polvo combustible en cada equipo de proceso, o almacenamiento que contenga sustancias inflamables y que a la vez represente una fuente de escape potencial.

Dicha clasificación se debe realizar de acuerdo a las definiciones de „zona“ que marca el R.D. 681/2003, (teniendo en cuenta la frecuencia y duración de una atmósfera explosiva) y que son:

Definiciones de tipos de zonas para atmósferas de gas/vapor explosivas

- *Zona 0*: área en la que una atmósfera explosiva, formada por una mezcla de sustancias inflamables en forma de gas, vapor o niebla con aire, está presente de modo *permanente*, o por un periodo de *tiempo prolongado*, o *frecuentemente*.
- *Zona 1*: área en la que es probable, en *condiciones normales de explotación*, la *formación*
ocasional de una atmósfera explosiva consistente en una mezcla con aire de sustancias inflamables en forma de gas, vapor o niebla.
- *Zona 2*: área en la que normalmente *no es probable* (rara vez), en *condiciones normales de explotación*, la formación de una atmósfera explosiva consistente en una mezcla con aire de sustancias inflamables en forma de gas, vapor o niebla, o en la que, en caso de formarse, dicha atmósfera explosiva sólo permanece durante breves periodos de tiempo.

Definiciones de tipos de zonas para atmósferas de polvo combustible

- *Zona 20*: área en la que una atmósfera explosiva en forma de nube de polvo combustible en el aire está presente de forma *permanente*, o por un *periodo prolongado*, o *frecuentemente*.
- *Zona 21*: área en las que *ocasionalmente* puede formarse, en *condiciones normales de explotación*, una atmósfera explosiva en forma de nube de polvo combustible contenido en el aire.
- *Zona 22*: área en la que *no es probable*, en *condiciones normales de explotación*, la formación de una atmósfera explosiva en forma de polvo combustible contenido en el

aire y en la que, en caso de formarse, sólo permanece durante un periodo de tiempo corto.

Las zonas de estudio que vamos a estudiar son las que se muestran en la figura siguiente (figura 5.1), también en este capítulo vamos a justificar la desclasificación de la estación depuradora.

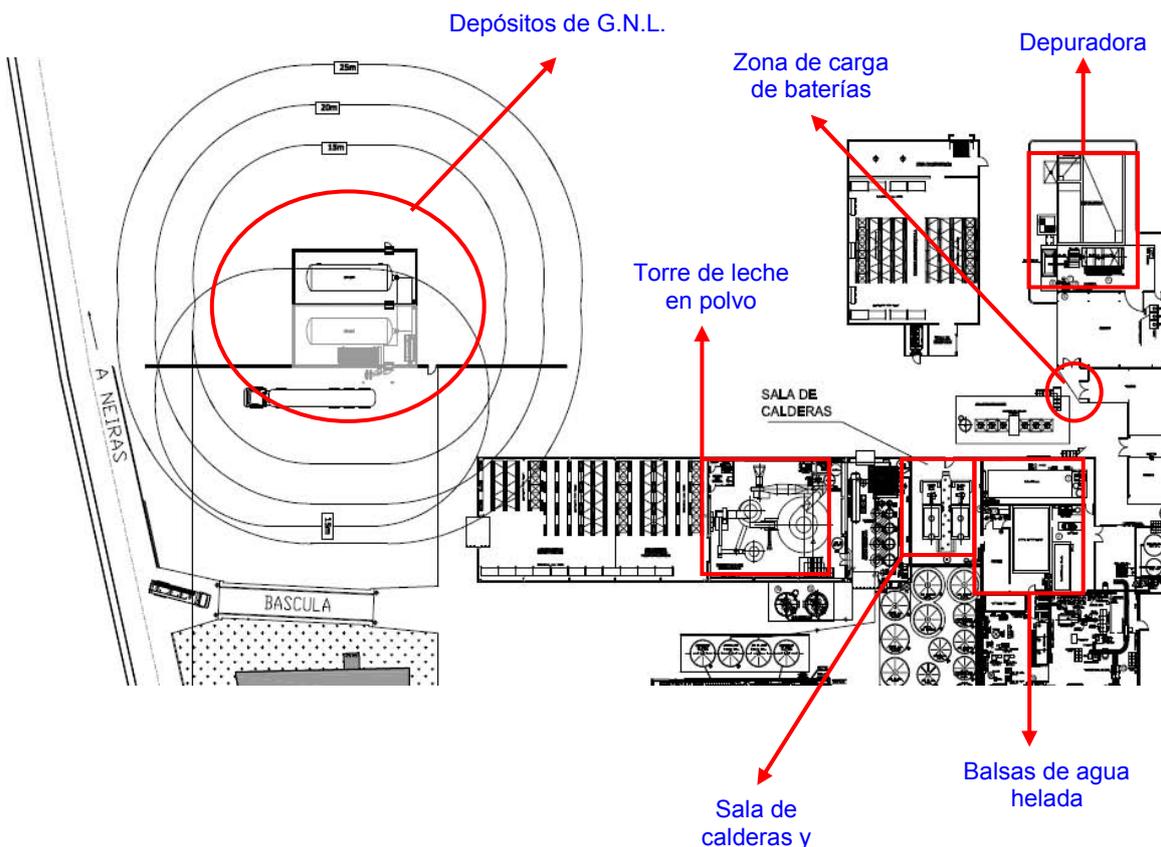


Figura 5.1. Zonas a evaluar para su clasificación ATEX

Al clasificar un emplazamiento peligroso hay que mostrar *sentido común* y *buen criterio*, anteponiendo siempre la seguridad de los trabajadores. Dicha clasificación dependerá el alcance de las medidas que deban adoptarse de acuerdo con el apartado A del anexo II del R.D. 681/2003. Las medidas para una instalación en funcionamiento antes de la entrada en vigor de dicho Real Decreto, pueden conllevar una gran inversión (no siendo “rentable” para la empresa) con implicaciones de: cambios de fabricación, cambios de producción e incluso el propio cierre de la planta. Para instalaciones posteriores a la entrada en vigor de dicho Real Decreto la instalación de aparatos, equipos, sistemas de protección y sus correspondientes dispositivos de conexión, que podrán instalarse en las



diferentes zonas, viene establecida por la definición de las categorías de equipos que establece el R.D. 400/1996 y que relaciona la probabilidad de explosión establecida en la clasificación de zonas con los requisitos que debe tener un equipo.

Conviene resaltar que la clasificación de áreas se realiza en condiciones de funcionamiento normal de la explotación de un equipo o una instalación. Es decir, que al analizar las fuentes de escape se deben considerar sólo aquellas que puedan estar presentes durante: el funcionamiento “normal” de un equipo (tiempo en que se lleva a cabo la función principal de un equipo, por ejemplo, en una bomba: el trasvase de producto, tiempo de llenado de un saco de producto) y el mantenimiento periódico del equipo y en caso de fallos del equipo previsibles (fugas a través de cierres, pequeños derrames en el suelo, etc.). Sin embargo, el estudio no prevé la clasificación de zonas considerando situaciones catastróficas (rotura de una tubería soldada o de un recipiente, formación de grandes derrames en el interior de un cubeto o rotura de un recipiente en el interior del almacén de sustancias inflamables, etc.). A continuación, se muestra una serie de situaciones que son consideradas, como fuentes de escape, en condiciones de funcionamiento normal:

- Tuberías, conductos y circuitos de conexión sin juntas.
- Tuberías soldadas y contenedores soldados.
- La estructura principal de revestimiento, incluyendo las toberas de cierre y los registros de inspección en tanques a presión.
- Las uniones de tuberías y contenedores mediante dispositivos de unión estancos (emisiones irrelevantes) que han sido construidos según normas específicas y son utilizados y mantenidos de forma que tal que asegure en el tiempo el mantenimiento de los requisitos de seguridad.
- Contenedores de sustancias inflamables con tapas cerradas cuidadosamente o con emisiones irrelevantes cuando:
 - son de material idóneo y están construidos respetando las normas de construcción y prueba.
 - son depositados y agitados de forma de forma tal que se considera razonable no prever caídas que puedan provocar la abertura de la tapa o el derrame significativo de la sustancia inflamable contenida.
 - se actúa con precaución, con los medios adecuados y con rapidez frente a posibles charcos en el suelo.
- Prensaestopas de válvulas y juntas embridadas preparadas (diseño y construcción) para prevenir los escapes de polvo.



- Doble estanqueidad aplicada sobre ejes rotatorios o de translación, provista de dispositivos tales que excluyan pérdidas significativas incluso en funcionamiento normal.

Las disposiciones del R.D. 681/2003 tampoco son de aplicación para:

- Las áreas utilizadas directamente para el tratamiento médico de pacientes y durante dicho tratamiento.
- La utilización reglamentaria de los aparatos de gas conforme a su normativa específica.
- La fabricación, manipulación, utilización, almacenamiento y transporte de explosivos o sustancias químicas inestables.
- Las industrias extractivas por sondeos y las industrias extractivas a cielo abierto o subterráneas, tal como se definen en la normativa específica.
- La utilización de medios de transporte terrestres, marítimo y aéreo, a los que se aplican las disposiciones correspondientes de convenios internacionales.

5.1. Visita y descripción de las instalaciones a clasificar

El primer y más importante paso para realizar el documento de clasificación es la visita a las instalaciones y su evaluación. A través del trabajo de campo se llegan a observar: instalaciones, prácticas, procedimientos e incluso sustancias, que en documentos escritos (planos, listado de sustancias almacenadas, etc.) no pueden llegarse a percibir. La gran mayoría de las empresas realizan cambios, casi a diario, en sus instalaciones: se instalan o sustituyen equipos, se almacenan sustancias donde „ayer“ habían otras, etc. Por ello, la clasificación de emplazamientos peligrosos ni mucho menos es un trabajo de despacho; todo lo contrario, se necesita ver la instalación y los procesos „in situ“.

A continuación, estaremos en condiciones de poder describir el proceso teniendo presentes todos los equipos y sustancias, organizados según la instalación a la cual pertenezcan, que estarán presentes en el emplazamiento industrial.

5.2. Sustancias inflamables y pulverulentas

Para que se forme una explosión, es necesaria la presencia de sustancias inflamables o polvo combustible en el proceso de trabajo. Éstos se pueden presentar como materia prima o materia auxiliar (aditivo, sustancia de limpieza, residuo, intermedio o acabado) o pueden ser generados por un fallo o error en el sistema de fabricación.



En principio, se deben considerar inflamables todas las sustancias capaces de sufrir una reacción de oxidación, lo que incluye aquellas sustancias según la Directiva 67/548/CEE de sustancias peligrosas que deben estar etiquetadas con las frases de riesgo R10, sustancias inflamables, R11/R15/R17 -sustancias fácilmente inflamables (F)-, o R12, -sustancias extremadamente inflamables (F+)-.

Actualmente, debemos tener en cuenta el REACH, Reglamento (CE) n° 1907/2006 del Parlamento Europeo y del Consejo). Es el Reglamento europeo relativo al registro, la evaluación, la autorización y la restricción de las sustancias y preparados químicos (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals). Fue aprobado el 18 de diciembre de 2006 y entró en vigor el 1 de junio de 2007. Este Reglamento supone una reforma total del marco legislativo sobre sustancias y preparados químicos en la Unión Europea y su principal objetivo es garantizar un alto nivel de protección de la salud humana y el medio ambiente.

Gases inflamables, categoría 1 Aerosoles inflamables, categoría 1 Líquidos inflamables, categoría 1		H220 H222 H224	Atención / Peligro	 (R12)  (R12) R12	Extremadamente inflamable
Líquidos inflamables, categoría 2 Sólidos inflamables, categoría 1 Sólidos inflamables, categoría 2		H225 H228 H228	Atención	 R11 (R11) (R11)	Fácilmente inflamable
Aerosoles inflamables, categoría 2 Líquidos inflamables, categoría 3		H223 H226	Atención	Sin símbolo (R10) R10 Sin clasificación. Punto de inflamación 56-60°C	Inflamable
Líquidos pirofóricos, categoría 1 Sólidos pirofóricos, categoría 1 Sustancias/mezclas que, en contacto con el agua, desprenden gases inflamables, categorías 1, 2 y categoría 3		H250 H250 H260 H261 H261	Atención / Peligro	 R17 (R15) (R15) (R15)	Fácilmente inflamable
Sustancias/mezclas que reaccionan espontáneamente, tipo B Sustancias/mezclas que reaccionan espontáneamente, tipos C y D y tipos E y F Sustancias/mezclas que experimentan calentamiento espontáneo, categoría 1 y categoría 2		H241 H242 H242 H251 H252	Atención / Peligro	 R12 R12	Fácilmente inflamable
Peróxidos orgánicos, tipo B Peróxidos orgánicos, tipos C y D Peróxidos orgánicos, tipos E y F		H241 H242 H242	Atención / Peligro	 R7 R7	Comburente

Figura 5.2. Pictogramas identificativos y frases de peligro para sustancias inflamables

El Reglamento (CE) n.º 1272/2008, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de diciembre de 2008, sobre clasificación, etiquetado y envasado de sustancias y mezclas establece la armonización de la clasificación y el etiquetado de sustancias y mezclas en la Unión Europea. Esta armonización incorpora los criterios de clasificación y etiquetado de sustancias y mezclas del Sistema Globalmente Armonizado (SGA) de clasificación y



etiquetado de productos químicos, adoptado a escala internacional en el marco de las Naciones Unidas tal y como puede verse en la figura 5.2. donde cambian los pictogramas (de naranja negro a rojo blanco y negro) y las frases de riesgo R por H (Hazard).

Según el reglamento de almacenamiento de productos químicos (ITC MIE-APQ1), una sustancia con un punto de inflamación superior a 150 °C no es considerada como sustancia combustible. Sin embargo, hay sustancias que no son clasificadas según lo expuesto anteriormente, pero, cumplen con los criterios de inflamabilidad. Por ejemplo, sustancias como el anhídrido ftálico o el propilenglicol tienen una temperatura de inflamación que supera ligeramente los 100 °C. En condiciones normales, estas sustancias se almacenan a temperatura ambiente (25 °C), por ello no es de esperar que a dicha temperatura generen una cantidad suficiente de vapores como para formar una atmósfera potencialmente explosiva. En cambio, si dichas sustancias son usadas en proceso, donde, por lo general, se realizan operaciones a temperaturas próximas o superiores a su temperatura de inflamación, sí generarán una cantidad suficiente de vapores como para formar una atmósfera potencialmente explosiva.

En definitiva, puede observarse que una sustancia no clasificada como inflamable o combustible, según la Directiva 67/548/CEE o según el ITC MIE-APQ1, puede ser, o no, considerada como una sustancia capaz de generar una atmósfera potencialmente explosiva al tiempo de clasificar un emplazamiento. Dependerá de las condiciones de operación en que se use dicha sustancia.

Parece lógico pensar que existen unas cantidades mínimas de almacenamiento y de proceso, a partir de las cuales se haga necesaria la clasificación de zonas. Por ejemplo, un mismo combustible que se usa en una planta origina una clasificación de zonas y requiere el uso de aparatos con modos de protección, y sin embargo, al usarlo a nivel doméstico para cocinar, ello no da lugar a ninguna clasificación ni a la implantación de aparatos „especiales“. Existen textos sobre clasificación de zonas que recomiendan unos volúmenes mínimos por debajo de los cuales la presencia de sustancias que puedan generar vapores o gases inflamables no den lugar a una clasificación de zonas peligrosas. La siguiente tabla (tabla 5.1) muestra estos volúmenes en función de la temperatura de inflamación.



Grupo de sustancia	Temperatura de inflamación (°C)	Volumen mínimo	
		Proceso	Almacenamiento
A	$T_i \leq 0\text{ °C}$ ($T_e > 0\text{ °C}$)	0,1 m ³	1 m ³
B	$0\text{ °C} < T_i \leq 21\text{ °C}$	0,5 m ³	2 m ³
C	$21\text{ °C} < T_i \leq 40\text{ °C}$	1 m ³	10 m ³
D	$40\text{ °C} < T_i \leq 65\text{ °C}$	2 m ³	20 m ³
E	$T_i > 65\text{ °C}$	4 m ³	40 m ³
F	Gases inflamables y gases inflamables licuados a presión	Según el tipo de sustancia	

Tabla 5.1. Volúmenes mínimos en función de la temperatura de inflamación

La tabla anterior (tabla 5.1) no pretende establecer valores exactos de las cantidades mínimas que implican una clasificación de zonas, sino que el manejo de cantidades muy pequeñas, por ejemplo en laboratorios o en tomas de muestra, pueden ser aceptables. La peligrosidad de dichas cantidades de sustancia se determinará en función de las condiciones locales y operativas.

Las sustancias pulverulentas pueden ser o no combustibles según sean las propiedades intrínsecas de la sustancia: tamaño de partícula, humedad resistividad eléctrica, temperatura mínima de inflamación en capa y en nube, concentración mínima explosiva, energía mínima de inflamación, etc. Existe diversa bibliografía que lista distintas clases de polvos orgánicos e inorgánicos según su capacidad a formar una atmósfera potencialmente explosiva. No obstante, muchas clases de sustancias pulverulentas no son comunes y por ello, se hace difícil encontrar datos de explosividad sobre éstas. En ese supuesto, puede recurrirse a bases de datos sobre sustancias pulverulentas o se puede optar por realizar un análisis de sensibilidad a la inflamación, severidad de explosión y susceptibilidad térmica en laboratorios autorizados para ello (p.e. Laboratorio Oficial J.M. Madariaga).

5.3 Grado de escape

En el interior de una planta, cualquier equipo que contenga una sustancia inflamable o polvo combustible debe considerarse como fuente potencial de escape. No obstante, hay ciertas situaciones que no deberían ser consideradas fuentes de escape, como ya se ha visto en la introducción del presente capítulo.



Las fuentes de escape, o aberturas, pueden ser clasificadas según sean de:

- *Tipo A*: Aberturas que no son ni B, ni C, ni D (tuberías, conductos abiertos, techos, suelos, orificios de ventilación, etc.)
- *Tipo B*: Aberturas que normalmente están cerradas (raramente abiertas)
- *Tipo C*: Una abertura del tipo B con cierre o dos del tipo B en serie con cierres independientes.
- *Tipo D*: aberturas del tipo C que sólo se abren en caso de emergencia.

Según el tipo de aberturas (fuentes de escape) y la frecuencia y duración del escape se definen los grados de escape siguientes:

1. *Continuo*: escape que se produce de forma continua o presumiblemente durante largos períodos. De manera continua.
2. *Primario*: escape que se produce presumiblemente de forma periódica u ocasionalmente durante el funcionamiento normal.
3. *Secundario*: escape que no se produce en funcionamiento normal y si se produce es posible que ocurra infrecuentemente y en períodos de corta duración (asociado a fallo o a funcionamientos anormales de los equipos, procesos o condiciones de operación).

A continuación en la tabla 5.2 se muestra el grado de escape según el tipo de abertura y el tipo de zona clasificada:

Zona al otro lado de la abertura	Tipo de abertura	G.E. (grado de escape de la abertura)
Zona 0/Zona 20	A	Continuo
	B	Continuo/primario
	C	Secundario
	D	Sin escape
Zona 1/ Zona 21	A	Primario
	B	Primario/Secundario
	C	Secundario/sin escape
	D	Sin escape
Zona 2/Zona 22	A	Secundario
	B	Secundario
	C	Secundario/sin escape
	D	Sin escape

Tabla 5.2. Grado de escape en función del tipo de abertura



Parece lógico pues, que cuanto más se use un equipo que utiliza sustancia inflamable o polvo combustible, más probabilidad habrá que se forme una atmósfera explosiva. Entonces, se observa que según la frecuencia de operación el grado de una fuente de escape variará.

La norma italiana CEI 31-35 (2001) propone analizar los escapes esperables en un año y sumar las duraciones de los eventos individuales. Aún así, se debería comprobar que ello no representa peligro de explosión mediante un análisis del riesgo (efectuado en el documento de protección contra explosiones).

Grado de escape	GAS	POLVO	Probabilidad de atmósfera explosiva en 365 días	Duración (horas/año)
Continuo	0	20	$P > 10^{-1}$	>1000
Primario	1	21	$10^{-1} \geq P > 10^{-3}$	Entre 10 y 1000
Secundario	2	22	$10^{-3} \geq P > 10^{-5}$	Entre 0,1 y 10

Tabla 5.3. Relación del grado de escape con la zona y la frecuencia de formación de una atmósfera explosiva ATEX

Puede observarse en la tabla 5.3 que el grado de escape analizado está muy relacionado con el tipo de zona que finalmente obtendremos. Es por ello, que debe analizarse detalladamente el tipo de operación, mantenimiento y procedimientos que se usan con dicho equipo. Por ejemplo, el interior de un reactor puede contener sustancias inflamables capaces de generar los suficientes vapores como para formar una atmósfera explosiva en su interior, con lo cual el grado de escape del reactor sería continuo. No obstante, debido a que la frecuencia de operación es baja, podría reducirse el grado llegándose a considerar como un grado primario.

Imaginemos que un reactor opera bajo atmósfera inerte, en dicho caso, el grado de escape para la atmósfera explosiva en el interior del reactor no correspondería a un grado continuo sino a uno primario ya que “ocasionalmente” se tendrá la atmósfera explosiva (aire y sustancia inflamable) dentro de ese reactor. Si además, se tuviera un sistema redundante o un enclavamiento del equipo en caso de fallo del sistema de inertización se podría llegar a un grado de escape secundario ya que raramente (en caso de doble fallo) se tendrá una atmósfera explosiva en el interior del reactor o depósito. Por ello, se puede observar como determinadas condiciones de operación: la inertización, el vacío, los procedimientos de operación, el mantenimiento de dicho equipo pueden afectar en la selección del grado de escape.



5.4. Metodología para la clasificación de emplazamientos peligrosos

El cálculo y extensión de un emplazamiento peligroso no es un procedimiento fácil o trivial. A nivel administrativo tanto el R.D. 681/2003 como la Guía de desarrollo que indica como realizar un Documento de Protección Contra Explosiones (DPCE), y con él la Clasificación de Emplazamientos Peligrosos no presenta metodologías de concreción amén de las definiciones vistas. Técnicamente, cabe destacar las discrepancias que existen entre diferentes normativas internacionales al clasificar un emplazamiento peligroso de manera diferente. Tenemos como muestra que para la clasificación de una bomba que trasiega LPG hay normas que llegan a extender distancias de hasta 30 metros de zona clasificada (ICI/RoSPA). Otras, menos conservadoras, clasifican 6 metros alrededor de la bomba (API-500, US). Lo mismo ocurre para bridas y para tanques de almacenamiento fijo.

Debido a ello, se hace necesario analizar distintas metodologías de cálculo de atmósferas explosivas para la clasificación de un emplazamiento peligroso.

La operativa que vamos a realizar para definir mejor las zonas es la siguiente:

5.4.1 Metodología para la clasificación de emplazamientos peligrosos para gases, vapores, nieblas y líquidos

Las diferentes metodologías que vamos a utilizar para la clasificación y extensión de la zona para gases, vapores, nieblas y líquidos aparecen indicadas en la figura 5.3.

Pasamos a analizar cada una de ellas, para así determinar cual o cuales se ajustan mejor a nuestros casos de estudio.

5.4.1.1. Metodología Cuantitativa para gases y vapores inflamables

En esta metodología vamos a determinar el tipo de zona, estimando el grado de escape y el grado y disponibilidad de la ventilación cuantitativamente, es decir, mediante fórmulas.

Previamente al cálculo de la extensión de la atmósfera explosiva es necesario que hayamos determinado las fuentes de escape del proceso y las sustancias que intervienen en el mismo.

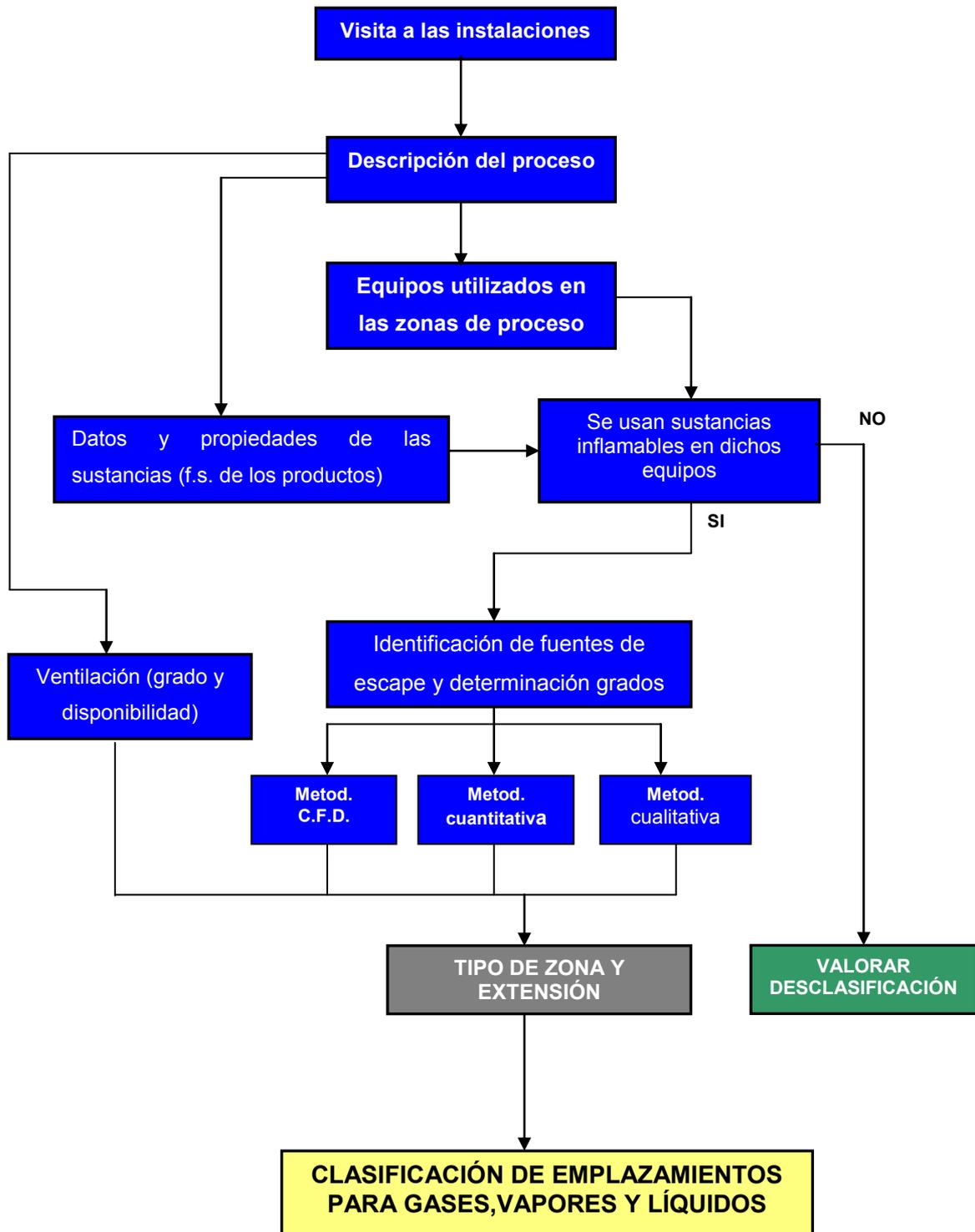


Figura 5.3. Proceso para la clasificación de emplazamientos peligrosos para gases, vapores, nieblas y líquidos

La metodología (que se muestra en la figura 5.4) conlleva los pasos siguientes:

1. Determinación del grado de escape.
2. Evaluación de la tasa o *caudal mínimo de ventilación* necesario para impedir la



formación de una atmósfera explosiva.

3. Cálculo de un volumen V_z (m^3).
4. Estimación del tiempo de permanencia (t_p) para determinar si el grado de ventilación es alto, medio o bajo.
5. Determinación del tipo de zona (zona 0, zona 1 o zona 2) mediante la tabla 5.1 “Clasificación de zonas según la ventilación”, fijando como variables el grado de escape definido y el grado y disponibilidad de ventilación.
6. Cálculo de la extensión de la zona a partir de V_z .

El proceso cuantitativo que vamos a determinar se muestra en la figura siguiente (figura 5.4). Vamos a determinar el cálculo del volumen teórico V_z en m^3 de la envolvente inflamable de una fuente de escape y a partir de este dato podemos determinar el radio de la esfera ficticia de extensión de nuestra zona a clasificar. La secuencia sería la siguiente.

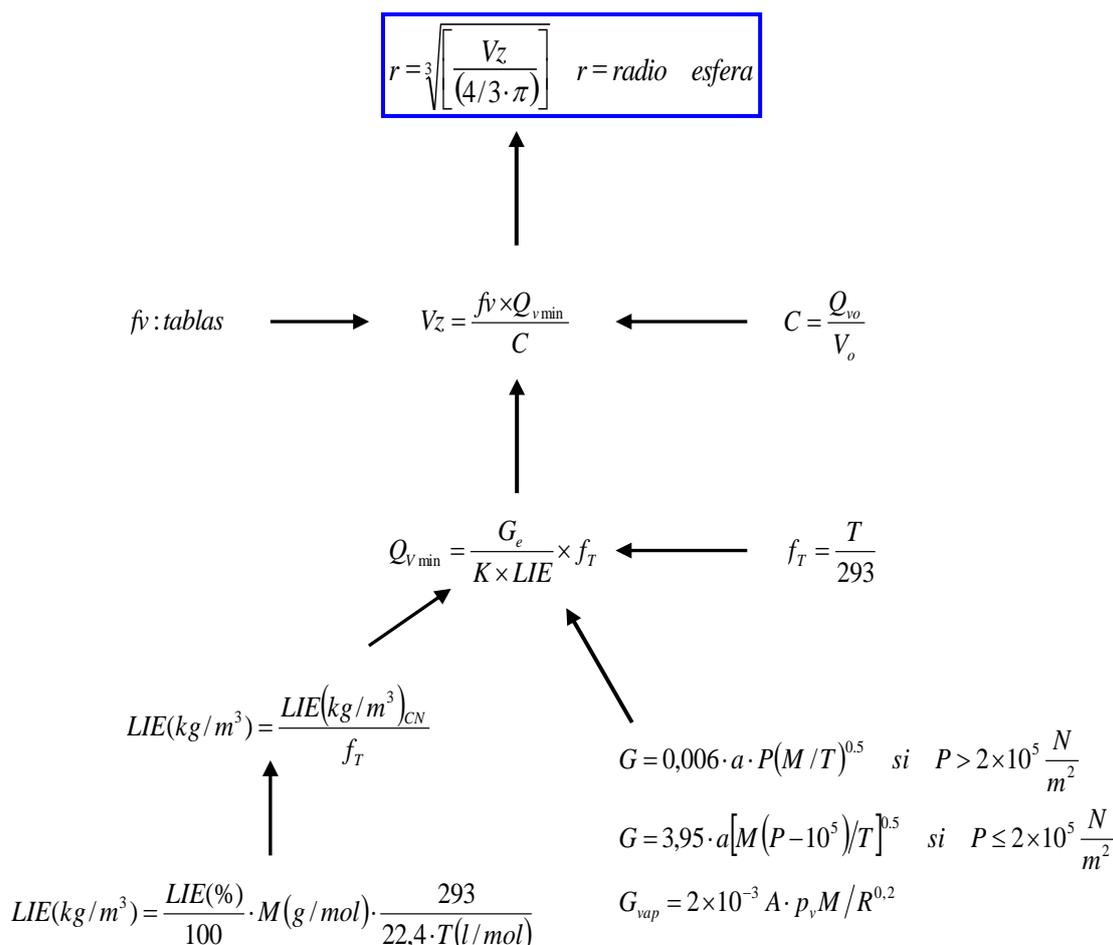


Figura 5.4. Pasos a seguir para determinar la extensión de la zona ATEX (volumen en m^3 y radio de la esfera en metros)



A continuación, en las tablas siguientes (tablas 5.4 a 5.8) se detallan los pasos reflejados en la figura 5.4.

INTERIOR DE EDIFICIOS
<p>ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN TEÓRICO V_z</p> <p>El volumen teórico V_z da una indicación del volumen de la envolvente inflamable de una fuente de escape. Sin embargo, dicha envolvente normalmente no equivaldrá al volumen del emplazamiento peligroso ya podrá tener una forma u otra según las condiciones de ventilación (grado y disponibilidad). El volumen teórico, se desplazará en la dirección a favor de la ventilación. Además, se debe tener en cuenta que las variaciones de la velocidad del aire, pueden ser cambiantes, por lo que se deberá tomar el caso más restrictivo posible en cuanto fijar una velocidad de viento o ventilación (el mínimo caudal de ventilación que puedan dar los sistemas de ventilación en caso de ser ventilación artificial, o la mínima velocidad del viento en un día calmado).</p> <p>Por lo tanto, debido a que difícilmente es predecible el movimiento de una atmósfera explosiva para pequeñas distancias, será de esperar que el volumen del emplazamiento peligroso desde una fuente de escape dada, generalmente sea mayor que el volumen hipotético V_z que se calcula. En la práctica, dicha diferencia se puede llegar a contrarrestarse con coeficientes de seguridad. Primeramente, la evaluación del grado de ventilación requiere que se conozca la cuantía máxima de la fuga de gas o vapor de la fuente de escape, a partir del análisis de los equipos de la planta y de las características y condiciones de proceso.</p> <p>“Fuentes de escape y tasas de escape para gases y vapores”.</p> <p>El siguiente paso es el cálculo del caudal mínimo teórico de ventilación necesario para diluir un escape dado de una sustancia inflamable hasta una concentración por debajo del límite inferior de explosión. Esto se realiza mediante el empleo de la expresión:</p> $Q_{vmin} = \frac{G_e}{K \times LIE} f_T \quad (\text{kg/m}^3) \quad (\text{Ec.5-1})$ <p>Donde:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Q_{vmin} = caudal mínimo en volumen de aire fresco por segundo (m^3/s). • G_e = tasa máxima de escape de la fuente (kg/s). • K = es un coeficiente de seguridad, de tal modo que la concentración se diluya k veces por debajo del LIE. Tiene el valor de 0,25 para escapes continuos y primarios (quieres una ventilación que te permita tener un 25% del LIE) y 0,5 para escapes secundarios (se quiere una ventilación que te permita tener un 50% del LIE). • LIE = límite inferior de inflamabilidad (kg/m^3). • f_T = es un factor de corrección de la temperatura que viene dado por: $f_T = \frac{T}{293} \quad (\text{Ec.5-2})$ <p>Para el cálculo del LIE en kg/m^3 se puede calcular a cualquier temperatura mediante:</p> $\text{LIE}(\text{kg/m}^3) = \frac{\text{LIE}(\%)}{100} \cdot M(\text{g/mol}) \cdot \frac{293}{22,4 \cdot T(\text{l/mol})} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (\text{Ec.5-3})$

Tabla 5.4. Estimación del volumen teórico V_z para interior de edificios



INTERIOR DE EDIFICIOS

Al calcular el caudal mínimo necesario que se debe aportar, se considera que la concentración de la mezcla es de sustancia explosiva respecto a 100% aire puro, cuando sin embargo, el LIE se encuentra en bibliografía como concentración de sustancia explosiva respecto a la mezcla de sustancia explosiva y aire. Esta aproximación, simplifica el proceso de cálculo y además aporta un factor de seguridad añadido.

El Q_{vmin} a considerar será el que a continuación se detalla en la siguiente figura para fuentes de escape no independientes:

Grado de escape	Acción para Q_{vmin}
Continuo	Sumar todos los valores de Q_{vmin} y aplicar el resultado total en las fórmulas de cálculo.
Primario	Sumar el número correspondiente de los valores mayores de Q_{vmin} y aplicar el resultado total en las fórmulas de cálculo.
Secundario	Usar sólo el mayor valor de Q_{vmin} y aplicarlo en las fórmulas de cálculo.

Tabla 5.5-1. Q_{vmin} necesarios para el cálculo de V_z

Número de fuentes de escape Primarias	Número de escapes primarios considerables simultáneos
1	1
2	2
3 a 5	3
6 a 9	4
10 a 13	5
14 a 18	6
19 a 23	7
24 a 27	8
28 a 33	9
34 a 39	10
40 a 45	11
46 a 51	12
>51	12+20% (n-51)*

* n es el número total de emisiones de primer grado

Tabla 5.5-2. Fuentes de escape a considerar para el Q_{vmin}

Para el cálculo de V_z , para un volumen total ventilado V_o (m^3) y en función de un determinado caudal de ventilación en la instalación de Q_o (m^3/s), se usa la siguiente fórmula:

$$V_z = \frac{Q_{vmin}}{Q_o} V_o \quad (m^3) \quad (Ec.5 - 4)$$

La expresión de Q_o/V_o también se puede expresar como el número dado de cambios de aire por unidad de tiempo C, en función de la ventilación general del emplazamiento (renovaciones de aire):

$$C = \frac{QV_o}{V_o} \quad (s^{-1}) \quad (Ec.5 - 5)$$



INTERIOR DE EDIFICIOS

Generalmente, se toma para recintos cerrados (ventanas y puertas cerradas) el valor de C es del orden de 1 renovación/h, o en caso más conservador de 0,25 renovación/h. Sin embargo, habitualmente se toma la expresión Q_0/V_0 que muestra el cociente entre el caudal de aire que entra en la sala a través de las aberturas y el volumen de la sala.

La fórmula de aplicación es la recogida en la Ec. 5-4 vista anteriormente y que se aplica al caso ideal en que haya una mezcla instantánea y homogénea debido a unas condiciones ideales de movimiento de aire fresco. En la realidad, dichas condiciones no se dan ya que ciertas partes del emplazamiento pueden estar mal ventiladas por haber obstáculos en la circulación de aire. Por ello, se añade un factor (f_v) de ineficacia de la ventilación que dejará la fórmula:

$$V_z = \frac{Q_{vmin} f_v}{Q_0} (m^3) \quad (Ec.5-6)$$

ESTIMACIÓN DEL TIEMPO DE PERMANENCIA (t_p)

El siguiente paso es calcular, si es necesario, el tiempo de permanencia (t_p) que es el tiempo requerido para que la concentración media descienda desde un valor inicial X_0 hasta un % por debajo de LIE (k) después que el escape haya terminado (por ello, en escapes continuos el tiempo de permanencia no tiene sentido):

$$t_p = \frac{-f_v}{C} \ln \frac{LIE \cdot K}{X_0} (s^{-1}) \quad (Ec.5-7)$$

Donde:

- C = número de renovaciones de aire fresco por unidad de tiempo. (s^{-1})
- t_p = tiempo de permanencia (s^{-1})
- f_v = factor de ineficacia de ventilación
- k = factor de seguridad aplicado a LIE.
- LIE = límite inferior de inflamabilidad. (kg/m^3)
- X_0 = es la concentración inicial de sustancia inflamable expresada en las mismas unidades que el LIE, en la práctica parece razonable tomar para X_0 valores mayores que el LIE.

Una vez calculado V_z y t_p se puede pasar a calcular tipo de zona y su extensión. Si V_z es menor que el volumen del emplazamiento cerrado es posible clasificar como peligrosa sólo una parte de él. Mientras que, en los casos donde el V_z sea similar al del local cerrado convendría clasificar todo el recinto cerrado. Para valores de V_z mucho mayores que el recinto cerrados, tendríamos una situación de grado de ventilación bajo.

Éstas serán zonas en las que la ventilación no tendrá la suficiente entidad como para dispersar la atmósfera explosiva.

Con estos parámetros calculados se pasa a calcular la extensión de la zona, tomando una geometría esférica desde la fuente de escape.

$$R = \sqrt[3]{\left(\frac{3 \cdot V_z}{4 \cdot \pi}\right)} (m) \quad (Ec.5-8)$$

Donde:

- R = radio de la esfera
- V_z = volumen de la atmósfera inflamable

Tabla 5.6. Estimación del volumen teórico V_z , el tiempo de permanencia y el radio R de la esfera para interior de edificios



EMPLAZAMIENTOS CON VENTILACIÓN NATURAL

ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN TEÓRICO V_z

El volumen teórico V_z da una indicación del volumen de la envolvente inflamable de una fuente de escape. Sin embargo, dicha envolvente, normalmente, no equivaldrá al volumen del emplazamiento peligroso ya que éste podrá tener una forma u otra según las condiciones de ventilación (grado y disponibilidad). El volumen teórico, se desplazará en la dirección de la ventilación. Además, se debe tener en cuenta que las variaciones de la velocidad del aire, pueden ser cambiantes, por lo que se deberá tomar el caso más restrictivo posible en cuanto fijar una velocidad de viento o ventilación (el mínimo caudal de ventilación que puedan dar los sistemas de ventilación en caso de ser ventilación artificial, o la mínima velocidad del viento en un día calmado).

Para un emplazamiento con ventilación natural, es considerado admisible, según bibliografía, un valor mínimo de velocidad del viento de 0,5 m/s lo que origina un número de renovaciones de $C=100 \text{ h}^{-1} = 0,03 \text{ s}^{-1}$ (se ha considerado un volumen cúbico hipotético de 15 m de lado).

Por lo tanto, debido a que difícilmente es predecible el movimiento de una atmósfera explosiva para pequeñas distancias, será de esperar que el volumen del emplazamiento peligroso desde una fuente de escape dada, generalmente sea mayor que el volumen hipotético V_z que se calcula. En la práctica, dicha diferencia se puede contrarrestar con coeficientes de seguridad.

Primeramente, la evaluación del grado de ventilación requiere que se conozca la cuantía máxima de la fuga de gas o vapor de la fuente de escape, a partir del análisis de los equipos de la planta y de las características y condiciones de proceso.

El siguiente paso es el cálculo del caudal mínimo teórico de ventilación necesario para diluir un escape dado de una sustancia inflamable hasta una concentración por debajo del límite inferior de explosión. Esto se realiza mediante el empleo de la expresión

$$Q_{vmin} = \frac{Ge}{K \cdot LIE} \cdot f_T \quad (\text{kg/m}^3) \quad (\text{Ec.5-9})$$

Donde:

- Q_{vmin} = caudal mínimo en volumen de aire fresco por segundo (m^3/s)
- Ge = tasa máxima de escape de la fuente. (kg/s)
- k = es un coeficiente de seguridad, de tal modo que la concentración se diluya k veces por debajo del LIE. Tiene el valor de 0,25 para escapes continuos y primarios (quieres una ventilación que te permita tener un 25% del LIE) y 0,5 para escapes secundarios (se quiere una ventilación que te permita tener un 50% del LIE).
- LIE = límite inferior de inflamabilidad. (kg/m^3)
- f_T = es un factor de corrección de la temperatura

Para el cálculo de LIE en kg/m^3 se puede calcular a cualquier temperatura mediante la fórmula siguiente:

$$LIE(\text{kg/m}^3) = \frac{LIE(\%)}{100} \cdot M(\text{g/mol}) \cdot \frac{293}{22,4 \cdot T(\text{l/mol})} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (\text{Ec.5-10})$$

Tabla 5.7. Estimación del volumen teórico V_z , el caudal mínimo Q_{vmin} y el límite inferior de inflamabilidad LIE para emplazamientos con ventilación natural



EMPLAZAMIENTOS CON VENTILACIÓN NATURAL

A continuación, se puede calcular el tiempo de permanencia (t_p) que será el tiempo requerido para que la concentración media descienda desde un valor inicial X_0 hasta un % por debajo de LIE (k) después que el escape haya terminado (por ello, en escapes continuos el tiempo de permanencia no tiene sentido):

$$t_p = \frac{-f_v}{C} \ln \frac{LIE \cdot K}{X_0} \quad (s^{-1}) \quad (Ec.5 - 11)$$

Donde:

- C = número de renovaciones de aire fresco por unidad de tiempo. (s^{-1})
- t_p = tiempo de permanencia (s^{-1})
- f_v = factor de ineficacia de ventilación
- k = factor de seguridad aplicado a LIE.
- LIE = límite inferior de inflamabilidad. (kg/m^3)
- X_0 = es la concentración inicial de sustancia inflamable expresada en las mismas unidades que el LIE, en la práctica parece razonable tomar para X_0 valores mayores que el LIE.

Una vez calculado V_z y t_p se puede pasar a calcular tipo de zona y su extensión. Es de esperar que el valor de V_z en el exterior con ventilación natural sea mayor que el volumen en el interior de un recinto cerrado con ventilación natural.

Con estos parámetros calculados se pasa a calcular la extensión de la zona, tomando una geometría esférica desde la fuente de escape.

$$R = \sqrt[3]{\left(\frac{3 \cdot V_z}{4 \cdot \pi}\right)} \quad (m) \quad (Ec.5 - 12)$$

Donde:

- R = radio de la esfera (m)
- V_z = volumen de la atmósfera inflamable (m^3)

Tabla 5.8. Estimación del tiempo de permanencia t_p y el radio de la esfera del escape para emplazamientos con ventilación natural

A la hora de determinar el volumen teórico V_z y por lo tanto el radio de la esfera del escape (tal y como hemos visto en la figura 5.2), amén de utilizar los cálculos teóricos vamos a ayudarnos de equipos de muestreo de lectura directa. Para ello, vamos a utilizar un equipo de detección de la casa MSA modelo Orion^{plus} y un equipo de la casa dragüer el Xam 7000. Veamos la características principales de ambos.

Equipo **MSA modelo Orion^{plus}**, es un aparato de lectura directa (fotos 5.1, 5.2 y 5.3) que dispone de varios sensores (células) para la determinación de los gases en las zonas de estudio.



El ORION^{plus} es un aparato portátil que se emplea para medir la concentración de gases y vapores tóxicos y combustibles en el lugar de trabajo, así como para monitorizar la deficiencia, el exceso o la inertización de oxígeno.



Fotos 5.1.-5.3. Equipo Orion^{plus} de MSA para la detección de gases

El ORION^{plus} presenta 4 alojamientos para la conexión de sensores Ex y Tox para medición del nivel de gases, así como un sensor de infrarrojos (figura 5.5.). El ORION^{plus} sólo puede utilizarse para aquellos gases y vapores para los que se haya instalado un sensor configurado por MSA.



Figura 5.5. Vista del equipo de detección de gases Orion^{plus}



La simbología del display de la pantalla así como el significado de la misma son los que se muestran en la figura siguiente (figura 5.6)

Símbolo	Significado
	Indicación de funcionamiento – parpadea cuando el detector está funcionando.
	Funcionamiento de la bomba – se muestra la alarma en la bomba
	Calibración a cero – aparece durante el Ajuste en Aire Limpio
	Indicación del nivel de batería – muestra el estado de carga de la fuente de energía. La señal de alarma de la batería se activa cuando se han vaciado los 4 segmentos.
	Indicación de alarma – el símbolo aparece cuando se dispara la alarma.
	Símbolo que aparece cuando se invocan los menús de configuración o de ajuste.
	Indicación de calibración

Figura 5.6. Simbología de la pantalla del equipo de detección de gases Orion^{plus}

Las características del equipo son las que indicadas en las tablas 5.9, 5.10 y 5.11.

Peso	Aparato	< 430 g
	Bloque para baterías (recargable)	< 290 g
	Bloque para las pilas	< 220 g
Dimensiones	165 x 92 x 66 mm (L x An x Al)	
Alarma	Dos LEDs de alta intensidad y una señal de alarma de elevada sonoridad	
Pantallas	Pantalla grande para mostrar las mediciones. Pantalla pequeña separada para mostrar el estado de carga de la batería e información adicional	
Tipo de batería	Batería recargable de NiMH o pilas alcalinas AA de 1,5 V (Alcalina T3: Varta 4006/8006 o Alcalina T4: Duracel MN). La unidad para baterías y las pilas pueden sustituirse en atmósferas Ex	
Duración de la batería	NiMH:	10 h
	Alcalinas:	6 h
	Batería interna de mantenimiento	> 10 años
Tiempo de carga	≤ 3 h con la unidad de carga rápida MSA (100-250 VAC)	
Tiempo de calentamiento	2 min	
Rango de temperatura	- 20°C a +50°C, Almacenamiento de -5°C a +40°C	
Rango de humedad	15 a 90% de humedad relativa, sin condensación, 5% a 95% de humedad relativa, durante periodos cortos	
Rango de presión atmosférica	800 a 1200 kPa	
Flujo	0,2 a 0,5 l/min	

Tabla 5.9. Características generales del equipo Orion^{plus}



Protección frente al polvo y la humedad	IP 54	
Métodos de medida	Gases combustibles:	Sensor catalítico Sensor IR
	Oxígeno: Gases tóxicos	Sensor electroquímico Sensor electroquímico Sensor IR
Garantía	5 años para la carcasa y la electrónica 2 años para los sensores, la batería recargable y la bomba no obstante, 0,5 años para fosgeno y ozono 1 año para HCN, Cl ₂ y NH ₃	

Tabla 5.10. Características generales del equipo Orion^{plus}

Los umbrales de alarma ajustados de fábrica para los sensores son los indicados en la tabla siguiente (tabla 5.11).

Sensores Tox	Baja (LO)	Alta (HI)	TWA	STEL
CO	30 ppm	60 ppm	30 ppm	60 ppm
CO ₂	0,5 % Vol	1,5 % Vol	0,5 % Vol	1,5 % Vol
H ₂ S	5 ppm	10 ppm	10 ppm	10 ppm
O ₂	22,0 % Vol	19,5 % Vol	---	---
Cl ₂	0,5 ppm	1,0 ppm	0,5 ppm	1,0 ppm
NH ₃	25 ppm	50 ppm	25 ppm	50 ppm
SO ₂	5 ppm	10 ppm	5 ppm	10 ppm
NO ₂	5 ppm	10 ppm	5 ppm	10 ppm
ClO ₂	0,1 ppm	0,1 ppm	0,1 ppm	0,1 ppm
PH ₃	0,1 ppm	0,3 ppm	0,1 ppm	0,3 ppm
O ₃	0,1 ppm	0,1 ppm	0,1 ppm	0,1 ppm
HCN	2,0 ppm	4,7 ppm	1,9 ppm	4,7 ppm
COCl ₂	0,1 ppm	0,1 ppm	0,1 ppm	0,1 ppm

Sensores EX	Baja (LO)	Alta (HI)
WT Metano (LEL)	15 % LEL	30 % LEL
WT Propano (LEL)	15 % LEL	30 % LEL
IR Propano (LEL)	15 % LEL	30 % LEL
IR Butano (LEL)	15 % LEL	30 % LEL
IR Metano (25 % Vol.)	8 % Vol	15 % Vol
IR Propano (25 % Vol.)	8 % Vol	15 % Vol
IR Butano (25 % Vol.)	8 % Vol	15 % Vol

Sensor OX	Baja (LO)	Alta (HI)
O ₂	19,0 % Vol	18,0 % Vol

Tabla 5.11. Umbrales de alarma para los distintos sensores



El equipo presenta cuatro sensores: CO, CO₂, CH₄, H₂S. Estos sensores nos van a permitir verificar los datos de las fuentes de escape para nuestro estudio en cuestión.

Retomamos ahora el capítulo anterior en el cual describimos las instalaciones susceptibles de riesgo explosión y hacemos uso del explosímetro Orion^{plus} para efectuar mediciones en la línea de aguas y de fangos de la estación depuradora de aguas residuales (fotos 5.4, 5.5 y 5.6). Los resultados obtenidos son los que se recogen en la tabla 5.12.



Fotos 5.4. y 5.5. Mediciones de gases en las balsas de aireación



Foto 5.6. Medición de gases en la estación de tratamiento físico-químico



GASES	METANO (CH4) % LIE	H2S ppm	OXÍGENO O2 % Vol	MONÓXIDO CARBONO (CO) ppm
BALSAS DE AIREACIÓN	1	0	19,8	1
LÍNEA DE FANGOS	1	0	20,1	1
ESTACIÓN TRATAMIENTO	1	0	20,6	1

Tabla 5.12. Valores obtenidos en la zona de tratamiento de aguas residuales

Como podemos observar, los valores obtenidos para el metano son muy inferiores al LIE, lo mismo sucede con los gases. Esto nos lleva a poder desclasificar esta zona como zona ATEX. Con frecuencia es necesario el complementar los métodos analíticos con mediciones reales que nos van a permitir concretar o acotar determinadas zonas.

El equipo **dragüer Xam 7000** (figura 5.7) es también un equipo de lectura directa que permite la detección simultánea y continua de hasta cinco gases. Una combinación de más de 25 sensores permite soluciones flexibles para tareas de monitorización individuales. El Dräger Xam 7000 puede ser equipado con tres sensores electroquímicos (EC) y dos sensores a combinar entre dos catalíticos (CatEX), dos infrarrojos (IR EX o CO2) o un sensor de fotoionización (PID).

La amplia gama de más de 25 sensores permite la detección de más de 100 gases y vapores diferentes. Las características de medida de los sensores (rango, unidad de medida, niveles de alarma, gas de calibración,...) electroquímicos, catalíticos Ex e infrarrojos pueden configurarse de una forma sencilla en el propio equipo, sin necesidad de recalibración del mismo. De esta manera, la exactitud y el rango de sustancias monitorizadas aumenta. Los sensores Dräger son conocidos por su rápida respuesta, mínima sensibilidad cruzada, gran exactitud y larga vida de uso.



Figura 5.7. Dragüer Xam 7000



Este equipo lo vamos a utilizar para muestrear el amoníaco en las balsas de frío y el hidrógeno que se produce en la carga de baterías de carretillas.

5.4.1.2. Metodología Cualitativa para gases y vapores inflamables

La metodología cualitativa propone realizar el cálculo y la extensión de zona a partir de los valores numéricos presentados en los casos prácticos que se proponen en normativas nacionales e internacionales como son: la UNE-EN-60079-10 "*Clasificación de emplazamientos peligrosos*", la NFPA 497-1997 o la API 500-2002 .

En la práctica, para poder clasificar emplazamientos peligrosos con esta metodología exige un conocimiento del comportamiento de los gases y líquidos inflamables cuando se escapan de los equipos y un criterio técnico basado en la experiencia del comportamiento de cada equipo de proceso en las condiciones específicas. Por ello, se hace muy difícil poder tener en cuenta todos los casos que puedan estar presentes en una planta de proceso. En muchos casos no se tendrá un caso práctico de referencia donde basarse para realizar la clasificación de emplazamientos peligrosos. Sin embargo, de cada uno de los ejemplos prácticos expuestos en la normativa se pueden extraer distintas situaciones aplicables a casos que carezcan de ejemplo directo. Es decir, en las normativas no se encuentra ningún ejemplo práctico sobre la clasificación de almacenes de sustancias inflamables, no obstante, sí se tienen distancias y extensiones para un depósito que pueda abrirse normalmente y por el que puedan escapar vapores o derramarse líquidos inflamables a través de sus cierres.

Para aplicar el método cualitativo, debe primeramente haberse identificado las posibles fuentes de escape de sustancia inflamable en la zona a estudiar. A continuación, se debe determinar el grado de escape de dichas fuentes de escape y el grado y la disponibilidad de ventilación.

Para emplazamientos al aire libre se toma una disponibilidad de ventilación "Muy buena" ya que siempre se tendrá presencia ininterrumpida de aire. El grado de ventilación será, en la mayoría de ocasiones, "Medio" a menos que se aprecie la existencia de obstáculos que dificulten o lleguen a poder confinar la atmósfera explosiva. Por ejemplo, una atmósfera explosiva se puede presentar en el interior de un cubeto en el cual haya tal cantidad de tuberías que dificulten su dilución con el aire, o se podría dar un escape en un cubeto considerado "confinado" (con paredes de más de 2 m). En dichos casos, se consideraría por tanto un grado de ventilación "Bajo" aún siendo la disponibilidad de



ventilación “Muy Buena” (recordemos que son conceptos distintos). El grado de ventilación “Alto” queda reservado para la presencia de equipos de ventilación o extracción que garanticen el suficiente número de renovaciones como para impedir la formación de una atmósfera explosiva. En el aire libre, dicho grado no tiene sentido ya que se consideran velocidades de aire correspondientes a un día calmado (el caso más restrictivo corresponde a una velocidad de aire de 0,5 m/s).

En espacios interiores sin ventilación artificial (espacios cerrados como el interior de plantas de proceso) se asigna, para renovaciones de aire de entre 1 renovación/h y 0,25 renovación/h¹, un grado de ventilación “Medio”. Generalmente, en las plantas de proceso se tienen renovaciones superiores a las descritas anteriormente. En caso contrario, se estaría ante un caso de confinamiento con una baja ventilación y se le asignaría un grado de ventilación “Bajo” (plantas de proceso con muchos equipos, salas de almacenamiento de botellones sin ventilación, interior de vías de drenaje y sumideros, etc.). El grado de ventilación “Alto” quedaría reservado, únicamente, a espacios interiores cerrados con ventilación artificial general o localizada que garantice la no formación de una atmósfera explosiva, por ejemplo, extracciones localizadas en el trasvase de producto de contenedores a equipos de proceso o la ventilación forzada en una sala donde se realizan habitualmente trasvase entre recipientes.

La disponibilidad de ventilación para el interior de edificios o espacios interiores se asocia a la presencia o no de equipos redundantes de ventilación/extracción. La presencia de equipos redundantes de ventilación o sistemas de enclavamiento del proceso en caso de fallo o paro del sistema de ventilación habitual hacen que la disponibilidad de ventilación sea “Muy buena”, mientras que, en caso contrario se asigna la disponibilidad “Buena” a dicha situación. La disponibilidad “Mala” raramente se aplica ya que si no se tiene ventilación artificial si se tiene en la gran mayoría de casos ventilación natural.

Una vez determinados los grados de escape, ventilación y su disponibilidad se aplica la tabla 5.13 donde se obtiene el tipo de zona/as a clasificar el emplazamiento peligroso. La extensión de la atmósfera explosiva se realiza siguiendo los ejemplos prácticos de la normativa aplicable.



Ventilación							
Grado de Escape	Grado						
	Alto			Medio			Bajo
	Disponibilidad						
	Muy buena	buena	mediocre	Muy buena	buena	mediocre	Muy buena, buena o mediocre
Continuo	(ZONA 0 ED) No peligrosa ^a	(ZONA 0 ED) Zona 2 ^a	(ZONA 0 ED) Zona 1 ^a	Zona 0	Zona 0 ⁺ Zona 2	Zona 0 ⁺ Zona 1	Zona 0
Primario	(ZONA 1 ED) No peligrosa ^a	(ZONA 1 ED) Zona 2 ^a	(ZONA 1 ED) Zona 2 ^a	Zona 1	Zona 1 ⁺ Zona 2	Zona 1 ⁺ Zona 2	Zona 1 o Zona 0 ^c
Secundario	(ZONA 2 ED) No peligrosa ^a	(ZONA 2 ED) Zona 2 ^a	Zona 2	Zona 2	Zona 2	Zona 2	Zona 1 e igual Zona 0 ^c

Nota “+” significa rodeado por

^a Zona 0 ED, 1 ED, ó 2 ED indica una zona teórica de extensión despreciable en condiciones normales.

^b La zona 2 creada por un escape de grado secundario puede ser excedida por las zonas correspondientes a los escapes de grado continuo o primario, en este caso debería tomarse la extensión mayor.

^c Será zona 0 si la ventilación es tan débil y el escape es tal que prácticamente la atmósfera de gas explosiva esté presente de manera permanente (una situación próxima a la ausencia de ventilación).

Tabla 5.13. Clasificación de las zonas según la ventilación

A continuación, se muestra un cuadro resumen (tabla 5.14 y 5.15) para la aplicación del grado de ventilación y disponibilidad de ventilación para atmósferas explosivas en el interior de edificios y al aire libre según el método cualitativo.

EMPLAZAMIENTOS CON VENTILACIÓN NATURAL	
Disponibilidad de ventilación	
Muy buena	La disponibilidad en el aire libre siempre es muy buena
Buena	Raramente se aplica
Mala	Raramente se aplica
Grado de ventilación	
Alto	Parámetro reservado para ventilación artificial, para instalaciones de ventilación/extracción que garanticen un número tal de renovaciones que impidan la formación de atmósfera explosiva.
Medio	Habitualmente se usa dicho grado de ventilación en el aire libre calculado a partir de unas 300 renovaciones/hora (para una velocidad de viento de 0,5 m/s).
Bajo	Aplicable únicamente en caso de que la ventilación no cumpla con las 300 renovaciones/hora como sucede en el caso del interior de drenajes y sumideros u otras zonas con una gran cantidad de obstáculos.

Tabla 5.14. Grado y disponibilidad de ventilación para la metodología cualitativa en aire libre



INTERIOR DE EDIFICIOS	
Disponibilidad de ventilación	
Muy buena	Se aplica únicamente en caso de tener un sistema redundante de ventilación artificial o en caso de tener un enclavamiento del proceso en caso de fallo de la ventilación.
Buena	Generalmente, se asigna dicho valor de disponibilidad para el interior de un edificio con ventilación natural o con un sistema de extracción/ventilación sin sistema redundante.
Mala	Raramente se aplica. Tiene que haber muchos obstáculos y la ventilación tiene que ser muy pobre como para asignar disponibilidad Mala.
Grado de ventilación	
Alto	Parámetro reservado para aquellas instalaciones de ventilación/extracción que garanticen un número tal de renovaciones que impidan la formación de atmósfera explosiva.
Medio	Habitualmente aplicado y asociado muchas veces al interior de edificios con ventilación natural y con renovaciones/hora superiores a 1 renovación/hora (gran mayoría de salas y habitaciones con ventanas y puertas cerradas).
Bajo	Aplicable únicamente en caso de que la ventilación no cumpla con las 300 renovaciones/hora como sucede en el caso del interior de drenajes y sumideros u otras zonas con una gran cantidad de obstáculos.

Tabla 5.15. Grado y disponibilidad de ventilación (metolog. cualitativa) en espacios interiores

Las distancias que se vienen aplicando en la metodología cualitativa para las distintas situaciones de una instalación industrial en la extensión de una atmósfera explosiva se muestran en la tabla 5.16.

Cabe destacar que la forma y extensión de los emplazamientos puede variar según sean las condiciones específicas (presión, temperatura, obstáculos exteriores, etc.) de cada equipo de planta. La extensión y la forma de las zonas clasificadas debe ser tomada en cuenta para cada caso particular.

Como ya indicamos anteriormente, la metodología va exige un gran conocimiento del comportamiento de los gases y líquidos inflamables cuando se escapan de los equipos y un criterio técnico basado en la experiencia del comportamiento de cada equipo de proceso en las condiciones específicas que se analizan, es por ello, que debemos utilizar esta metodología con criterio y con “reservas” teniendo siempre claro la protección del trabajador e instalaciones. En el capítulo 8 de la tesis vamos a aplicar esta metodología y compararla con la metodología cuantitativa para entender mejor lo expuesto.



Nº	Fuente de escape	Distancia de extensión desde la fuente de escape		Observaciones	Ejemplo de referencia
		Vertical (m)	Horizontal (m)		
1	Fuga o derrame a través del sello de la bomba o compresor (Presión de operación baja, inferior a 19 bar)	1*	3**	* Por encima de la fuente de escape. ** Desde la fuente de escape.	Ej. nº 1 de la UNE-EN 60079
2	Fuga o derrame a través del sello de la bomba o compresor en el interior de un edificio.	*	*	* En función del volumen de la sala. En caso de tener un grado medio de ventilación pueden tomarse los valores del caso 1.	Ej. nº 2 de la UNE-EN 60079
3	Fuga o derrame a través del sello de la bomba o compresor (presión de operación media/alta, superior a 19 bar)	7,5*	7,5**	* Por encima de la fuente de escape. ** Desde la fuente de escape. Se debe clasificar 7,5 m. por cada lado de la fuente de escape con una altura de 0,6 m.	Fig. 93 de la API 500
4	Fuga de vapores a través de la válvula de seguridad, alivio de presión o disco de seguridad de un recipiente, depósito o reactor al aire libre (tarada a 1,5 bar) ²	3 ó 5*	3 ó 5*	* En función del tipo de zona.	Ej. nº 3 de la UNE-EN 60079
5	Fuga de vapores a través de la válvula de seguridad, alivio de presión o disco de seguridad de un recipiente, depósito o reactor al aire libre (presiones superiores a 7 bar) ²	7,5*	7,5*	* Desde la fuente de escape en todas direcciones.	Fig. 3-9.14 NFPA 497
6	Fuga de vapores a través de bridas, uniones y conexiones a presiones inferiores a 19 bar.	1*	1*	* Desde la fuente de escape en todas direcciones.	Ej. nº 4 de la UNE-EN 60079 Fig. 96 de la API 500

²La válvula de seguridad, disco de ruptura, boca de emergencia o válvula de presión/alivio son elementos que tienen como función principal fugar o dejar escapar vapores debido a una sobrepresión en el equipo. Sin embargo, la presente fuente de escape tiene en cuenta la fuga de vapores inflamables cuando estos elementos de alivio de presión están cerrados.



Nº	Fuente de escape	Distancia de extensión desde la fuente de escape		Observaciones	Ejemplo de referencia
		Vertical (m)	Horizontal (m)		
7	Fuga de vapores a través de válvulas, bridas y conexiones a alta presión y sustancias muy volátiles	3*	3*	* Desde la fuente de escape en todas direcciones.	Fig. 96 de la API 500
8	Fuga de vapores a través de la boca de hombre, boca de descarga, abertura del recipiente.	1*	1*	* Desde la fuente de escape en todas direcciones.	Ej. nº 5 de la UNE-EN 60079
9	Interior del recipiente, reactor, agitador, cisterna, bidón o contenedor.	*	*	* Interior del recipiente, reactor, agitador, cisterna, bidón contenedor.	Ej. nº 5 de la UNE-EN 60079
10	Derrame o fuga en el suelo a través de bridas, uniones y conexiones del equipo.	1*	4**	* Por encima del charco formado. ** Desde la fuente de escape.	Ej. nº 5 de la UNE-EN 60079
11	Interior de vías de drenaje, arquetas y sumideros	*	*	* Interior de las vías de drenaje y sumideros.	Ej. nº 1, 5, 8, 9 de la UNE-EN 60079
12	Presencia de vapores en el interior de el tanque de almacenamiento.	*	*	* Interior del tanque de almacenamiento.	Ej. nº 8 de la UNE-EN 60079
13	Fuga de vapores a través de bridas, uniones y conexiones en el tanque de almacenamiento.	3*	3*	* Desde la fuente de escape en todas las direcciones.	Ej. nº 8 de la UNE-EN 60079
14	Fuga de vapores a través del venteo atmosférico del tanque y de otras aberturas del techo.	3*	3*	* Desde la fuente de escape en todas las direcciones.	Ej. nº 8 de la UNE-EN 60079
15	Fuga de vapores a través de las aberturas del techo de la cisterna.	1,5*	1,5*	* Desde la fuente de escape en todas las direcciones.	Ej. nº 9 de la UNE-EN 60079
16	Pérdidas a través de las tuberías flexibles de conexión.	1,5*	1,5*	* Desde la fuente de escape en todas las direcciones.	Ej. nº 9 de la UNE-EN 60079
17	Derrame en el suelo a través de las bridas, uniones y conexiones de la cisterna o de la manguera flexible.	1,5*	4,5*	* Por encima de la fuente de escape. ** Desde la última brida, unión, conexión o sumidero.	Ej. nº 9 de la UNE-EN 60079
18	Presencia de vapores en el interior de la cisterna	*	*	* Interior de la cisterna	Ej. Nº 9 de la UNE-EN 60079

Tabla 5.16. Distancias en la extensión de emplazamientos peligrosos



5.4.1.3. Metodología por CFD para gases y vapores inflamables

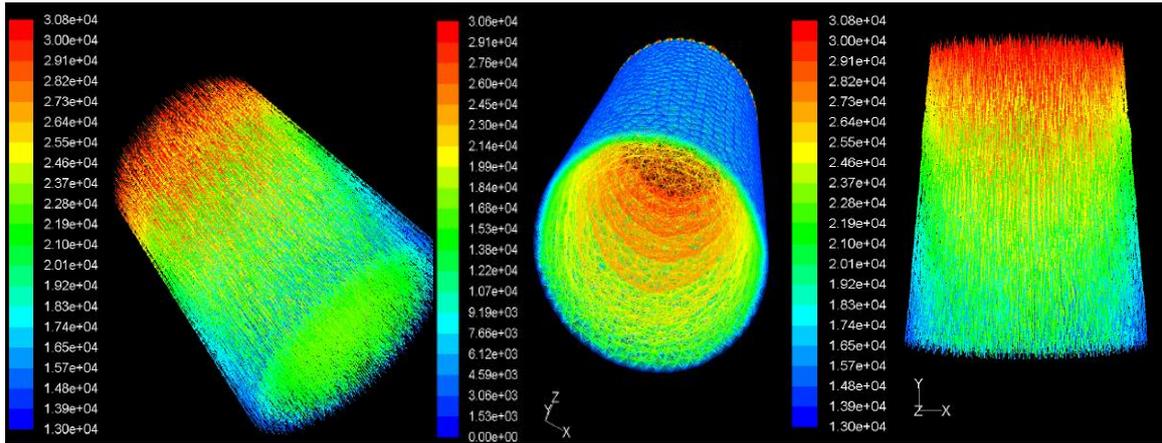
Debido a la complejidad creciente de los análisis que se realizan en todas las ramas de la Ingeniería Mecánica, el cálculo asistido por ordenador ha ido adquiriendo siempre mayor protagonismo. En la actualidad se ha producido una evolución en la representación de los sistemas físicos, pasando de esquematizar partes del sistema en modo aproximado a reproducir todo el conjunto en modo detallado. Este proceso ha sido posible en gran parte debido a la constante mejora de las prestaciones de los equipos informáticos, y a la mejora de los programas de cálculo.

En el diseño de nuevos componentes, el uso de estas herramientas permite en la mayoría de los casos obtener resultados más precisos y sobre todo una reducción de costes al permitir analizar virtualmente el comportamiento de nuevas soluciones.

En el proceso de análisis y diseño se utilizan herramientas de cálculo como el análisis mediante elementos finitos (FEA por sus siglas en inglés) o la dinámica de fluidos computacional (CFD).

La metodología de “Dinámica de Fluidos por Computador” (*Computer Fluid Dynamics, CFD*) están en boga actualmente. Esto es debido a que dicha metodología puede usarse en muchas aplicaciones como: la aeronáutica, la industria automovilística, en procesos químicos (mezcla, reacción, etc.), en procesado de polímeros (inyección, bufado, etc.), en HVAC (Heating Ventilation Air Conditioning), entre otras, con unos resultados excepcionales.

Los escapes, o emisiones fugitivas, de sustancias inflamables en las inmediaciones de un edificio o al aire libre, también pueden ser modelados. Por ello, esta metodología nos va a resultar de gran ayuda para simular escapes o emisiones y así comparar la metodología cuantitativa que antes hemos expuesta con la CFD, para ello vamos a hacer uso del software GAMBIT-FLUENT. Esta técnica se describirá con más detalle en el capítulo 7 de la tesis.



Figuras 5.8, 5.9. y 5.10. Simulación con el programa FLUENT del perfil de velocidades en m/s del flujo de aire en una conducción de la torre de leche en polvo

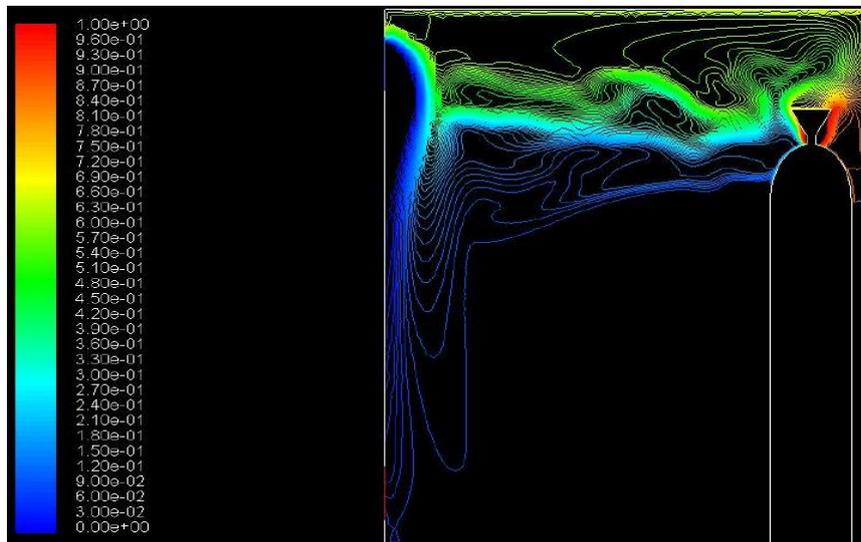


Figura 5.11. Simulación con el programa FLUENT de una fuga de metano a través de la válvula de un botellón en el interior de una caseta

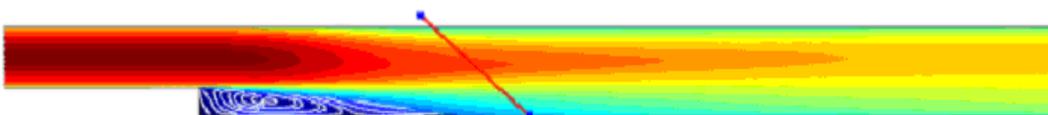


Figura 5.12. Simulación del comportamiento del flujo de un fluido con escalón



5.4.2. Metodología para la clasificación de emplazamientos peligrosos para polvos combustibles

La metodología que vamos a utilizar para la clasificación para sustancias pulverulentas se recoge en la figura siguiente (figura 5.13).

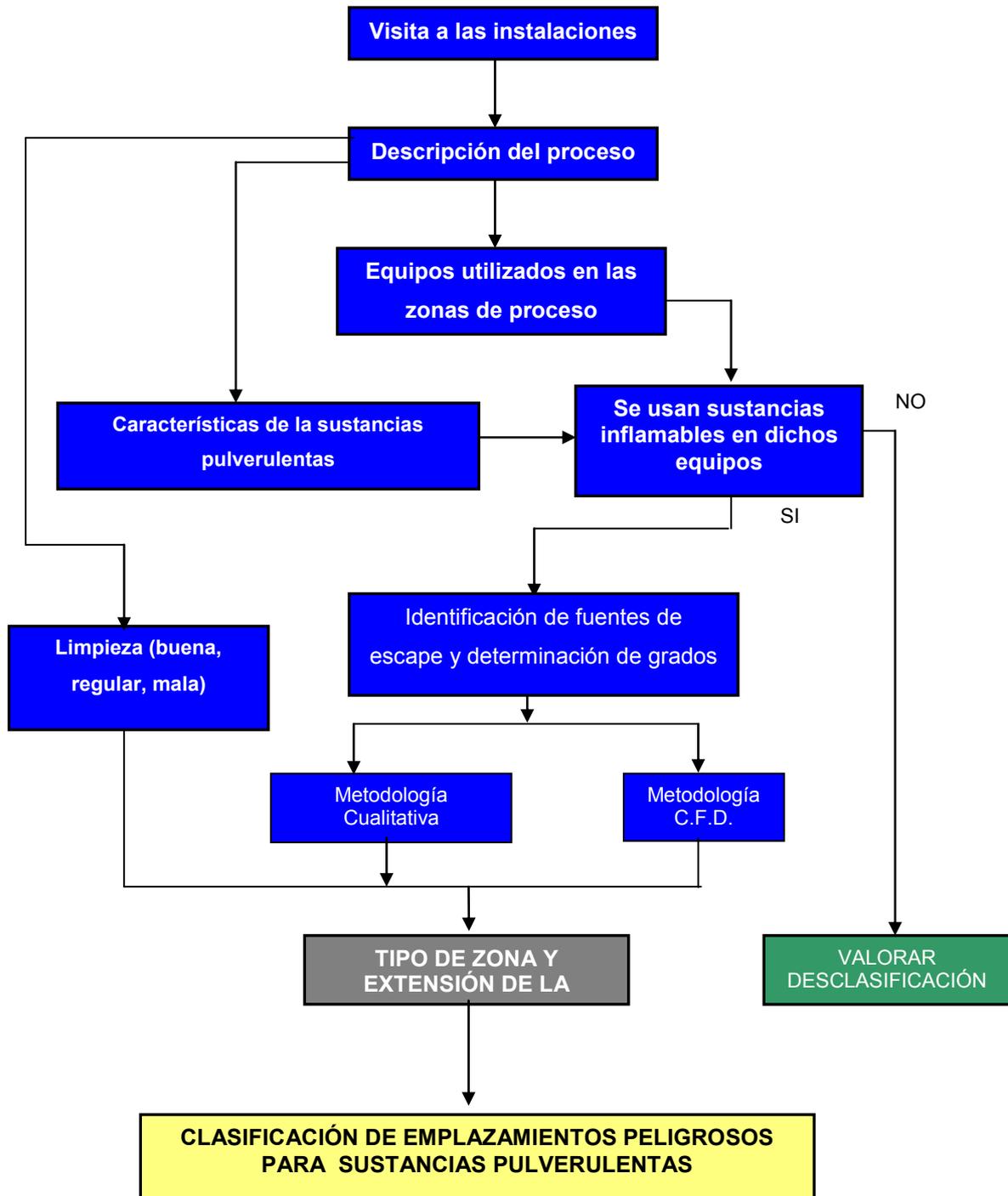


Figura 5.13. Procedimiento para la clasificación de emplazamientos peligrosos por polvos combustibles



5.4.2.1. Fuentes de escape y tasas de escape para polvos combustibles

Las fuentes de escape de polvo son un punto, o un lugar a partir del cual los polvos combustibles pueden ser liberados o dispersados, de tal manera que se pueda formar una atmósfera explosiva de polvo y aire.

La principal fuente de escape para polvos combustibles son *las nubes de polvo combustible*. Éstas pueden presentarse en el interior de equipos (silos, mezcladoras, filtros de mangas, tolvas, etc.) y también en el exterior de las instalaciones debido a posibles juntas o equipos mal instalados o conectados. Sin embargo, otra posible fuente de escape son las capas de polvo acumuladas durante la operación. Éstas son potenciales nubes de polvo ya que una corriente o movimiento de aire puede hacer dispersar las capas y convertirlas en nubes de polvo. Además, las capas de polvo presentan tres riesgos diferenciados:

- Una explosión primaria en un edificio puede levantar capas de polvo y formar nubes, y provocar explosiones secundarias más perjudiciales que la primaria. Para reducir este riesgo, deberían controlarse las capas de polvo.
- Las capas de polvo pueden ser inflamadas por el flujo de calor proveniente del aparato sobre el que se ha depositado la capa. El riesgo es de incendio, más que el de una explosión, pudiendo constituir un proceso lento.
- Una capa de polvo puede convertirse en una nube, inflamarse sobre una superficie caliente y provocar una explosión. En la práctica, las temperaturas de inflamación en nube de polvo son a menudo mucho más elevadas que las temperaturas de inflamación en capa. De hecho, hay muy pocos ejemplos de explosiones que han comenzado por una capa transformada en nube de polvo en el exterior de un sistema de contención.

Cuando un equip en el que se usa polvo, opera con presiones más altas que la presión atmosférica, el polvo puede ser soplado fácilmente fuera del equipo. Otras situaciones operativas en las que el polvo puede salir despedido son: durante el transporte (velocidad de transporte), la extracción y retención del polvo.

Una vez identificada la fuente de escape debe determinarse el grado de escape (continuo, primario o secundario) del mismo. Los tipos de fuentes de escape que presenta están relacionadas con el grado de escape:



- Fuente de escape continua de una nube de polvo: los lugares en los que una nube de polvo puede existir continuamente o que es susceptible de persistir durante largos períodos o durante períodos cortos que se presentan frecuentemente.
- Fuente de escape de grado primario: una fuente de la que puede esperarse que ocasionalmente pueda liberar polvo combustible en funcionamiento normal (p.e. proximidad inmediata de llenado de una bolsa abierta o de un punto de vaciado).
- Fuente de escape de grado secundario: una fuente que no es susceptible de liberar polvo combustible durante el funcionamiento normal y si lo liberase, sucedería raramente y en períodos cortos (p.e. una boca de hombre que necesitara ser abierta ocasionalmente).

En función del grado de escape la clasificación de zonas es la siguiente (tabla 5.17).

GRADO DE ESCAPE	CLASIFICACIÓN DE ZONAS
Escape continuo	20
Escape primario	21
Escape secundario	22

NOTA 1:
 Ciertos silos pueden llenarse o vaciarse raramente, y entonces el interior puede clasificarse como zona 21. Los equipos en el interior del silo pueden utilizarse solamente cuando el silo está en el transcurso de vaciado o de llenado. En la elección de los equipos, debería tenerse en cuenta que es probable que la nube de polvo esté presente cuando los equipos estén en funcionamiento.

NOTA 2:
 La eventualidad poco frecuente de una ruptura de un gran recipiente que contenga polvo puede provocar la formación de una capa espesa. Si se elimina rápidamente cualquier capa importante formada de esta forma o si los equipos están aislados, es posible que no sea necesario clasificar el emplazamiento como zona 22.

NOTA 3:
 Numerosos productos tales como los cereales y el azúcar contienen una pequeña cantidad de polvo mezclado en una gran cantidad de sustancias granulares. En la elección de los equipos, debería tenerse en cuenta el riesgo por sobrecalentamiento del material grueso que podría comenzar a quemarse, aunque no sea posible una explosión de polvo en este lugar. El material granular inflamado puede ser transportado a lo largo del proceso, y crear en otra parte un riesgo de explosión.

Tabla 5.17. Grado de escape y clasificación de zonas para polvos

Con frecuencia, gran parte de las áreas de trabajo se clasifican en zona 21, este hecho conlleva grandes problemas a la hora de evaluar la conformidad del material existente y de adquirir material nuevo. El argumento que se da para justificar tal clasificación es la presencia de acumulaciones excesivas de polvo.



Si durante el funcionamiento normal de una instalación una capa de polvo por el motivo que sea puede ser puesta en suspensión entonces sí esta capa conduce a una zona 21. Por ejemplo, limpiar zonas de trabajo con aire a presión. El limpiar con aire a presión provoca el levantamiento de las capas de polvo acumulado generando nubes de polvo. La formación de dichas nubes de polvo tendría lugar cada vez que se llevara a cabo la limpieza, presumiblemente, en funcionamiento normal.

En este caso si estaría justificada la clasificación de las áreas de trabajo en zona 21.

Si las capas de polvo acumuladas en las áreas de trabajo solo pueden ser puestas en suspensión como consecuencia de disfunciones, deben clasificarse las áreas de trabajo en zona 22. Una posible disfunción puede ser la rotura de un tubo de aire a presión, como los que se utilizan para accionar tajaderas por ejemplo, provocando la puesta en suspensión del polvo acumulado en las áreas de trabajo.

Otra posible disfunción sería una explosión primaria en un equipo de trabajo. La onda expansiva generada por la explosión primaria también pondría en suspensión el polvo acumulado, generando una atmósfera explosiva.

La llama de la explosión primaria causaría entonces la ignición de la nube de polvo generada por la onda expansiva, causando una explosión secundaria. Además de ser un factor a tener en cuenta en la clasificación en zonas, la limpieza de las áreas de trabajo debe considerarse principalmente como una medida más para reducir los efectos de las explosiones (limpieza equivale a seguridad).

Es necesario evitar las zonas 21 en las áreas de trabajo. No solo desde un punto de vista de la protección contra las explosiones sino también desde el punto de vista de la higiene y la prevención laboral (salud del trabajador).

5.4.2.2. Actuaciones frente atmósferas explosivas de polvos combustibles

La presencia y duración de capas de polvo puede modificar la probabilidad de formación de una atmósfera explosiva. Contrariamente a las atmósferas explosivas de gases y vapores, la ventilación para polvos combustibles puede resultar perjudicial ya que puede hacer dispersar las capas de polvo acumuladas. En su caso, la actuación válida es la limpieza. Una buena limpieza y mantenimiento puede hacer reducir la zona debido a que con ella se encuentra implícita la desaparición de una fuente de escape potencial, la capa de polvo.



En función del nivel de limpieza se pueden encontrar tres situaciones:

- *Buen mantenimiento y limpieza*: No se requiere clasificación de zonas debido a las capas de polvo ya que nunca se llegan a acumular. Se considera buen mantenimiento y limpieza cuando quedan capas de polvo de un espesor sin importancia o bien son inexistentes, cualquiera que sea la categoría del escape.
- *Mantenimiento y limpieza suficientes (regular)*: Las capas de polvo no son insignificantes pero tienen una vida corta (menos que la duración de un turno de trabajo). Según la probabilidad de que se produzca la dispersión en funcionamiento normal, se establece la siguiente clasificación (tabla 5.18).

Grado de escape	Dispersión probable en funcionamiento normal	Dispersión improbable en funcionamiento normal
Primario	21	22
Secundario	22	No se clasifica

Tabla 5.18. Tipología de zonas en función del grado de escape y limpieza

- *Mal mantenimiento y limpieza (mala limpieza)*: las capas de polvo no son insignificantes y persisten durante más tiempo que la duración de un turno de trabajo. La clasificación de zonas se muestra a continuación (tabla 5.19).

Grado de escape	Dispersión probable en funcionamiento normal	Dispersión improbable en funcionamiento normal
Cualquiera	21	22

Tabla 5.19. Tipología de zonas en función del grado de escape y limpieza

5.4.2.3. Metodología para el cálculo de extensión de la atmósfera combustible por polvos combustibles

La extensión de una zona para atmósferas explosivas pulverulentas se define como la distancia, en todas direcciones, desde el borde de una fuente de escape de polvo hasta el punto en donde el riesgo asociado a esta zona está considerado como inexistente.

La extensión de la zona vamos a realizarla en base a la norma UNE-EN 61241-10: Material eléctrico para uso en presencia de polvos. Ésta clasifica las zonas según sean:

- **Zona 20**: Dicha extensión incluye el interior de los conductos y de los equipos de producción y de tratamiento en los que la mezcla explosiva de polvo y aire están continuamente presentes durante largos períodos de tiempo o frecuentemente. Si dicha mezcla se encuentra en el exterior, deberá clasificarse la zona como zona 20. En un lugar de trabajo la zona 20 está prohibida.



- **Zona 21:** Habitualmente, incluye aquellas zonas de carga o descarga de sacos o zonas de envasado. Además, se puede considerar zona 21 el interior de un equipo que esté inertizado. Dicha zona debería ser de una pequeña extensión, habitualmente, es suficiente una distancia de 1 metro alrededor de la fuente de escape y en el exterior de edificios, podría llegar a ser despreciable (en función de la meteorología, etc.).
- **Zona 22:** La zona 22 se extiende 1 metro más allá de la zona 21.

Al clasificar y extender una zona hay que tener en cuenta el apartado relativo a la limpieza de emplazamientos peligrosos en presencia de polvos.

Al igual que sucede en la clasificación de gases y vapores, cuando en la clasificación se presenten pequeños emplazamientos no peligrosos entre emplazamientos peligrosos, la clasificación debería extenderse a toda el área. Además, cerramientos, paredes y muros pueden hacer de limitación a la atmósfera explosiva.

5.4.2.4. Aplicación de la simulación dinámica al análisis de atmósferas explosivas por polvo. Programa FLUENT

El programa FLUENT es una herramienta informática del tipo código CFD de volúmenes finitos en la cual las ecuaciones de masa, momento lineal, entalpía, combustible, fracción de mezcla, energía cinética de turbulencia y velocidad de disipación de la energía de turbulencia son resueltas en una malla cartesiana de volúmenes. Los objetos sólidos son ajustados a la malla utilizando porosidades, y se utilizan modelos de sub-mallado para poder describir fenómenos que no pueden ser resueltos en la malla geométrica.

Los escenarios, incluyendo geometría, condiciones iniciales y de contorno, punto de ignición, puntos de monitorización, etc. son definidos en un pre-procesador, y los resultados de las simulaciones son presentados de manera gráfica en un post-procesador.

En el capítulo 7 describiremos de forma más detallada esta herramienta informática.



CAPITULO 6. ELABORACIÓN DE PROPUESTAS DE DEFINICIÓN Y UBICACIÓN DE DETECTORES DE RIESGOS (COMPUESTOS PELIGROSOS)

Son múltiples los compuestos peligrosos que nos podemos encontrar en una industria, éstos van a constituir lógicamente un añadido en el riesgo de atmósferas explosivas.

Como primer paso vamos a realizar una primera clasificación de los compuestos peligrosos atendiendo a su naturaleza física, es decir, según sean sólidos o líquidos (tabla 6.1). Así tenemos para cada uno de estos grupos tres tipos de volatilidad alta, media o baja (figura 6.1).

Sólidos	
1-Alta	Polvo fino que forma nubes en suspensión varios minutos. Fibras. Humo
2-Media	Sólido granular o cristalino, se deposita rápidamente en superficies adyacentes
3-Baja	Sólido en pellets, lentejas o granza sin tendencia a formar polvo

Tabla 6.1. Tabla de volatilidad para sólidos

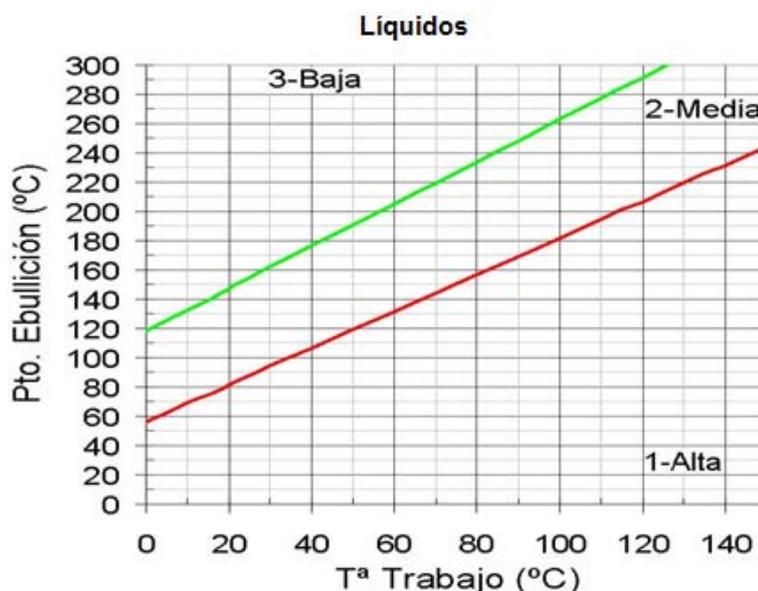
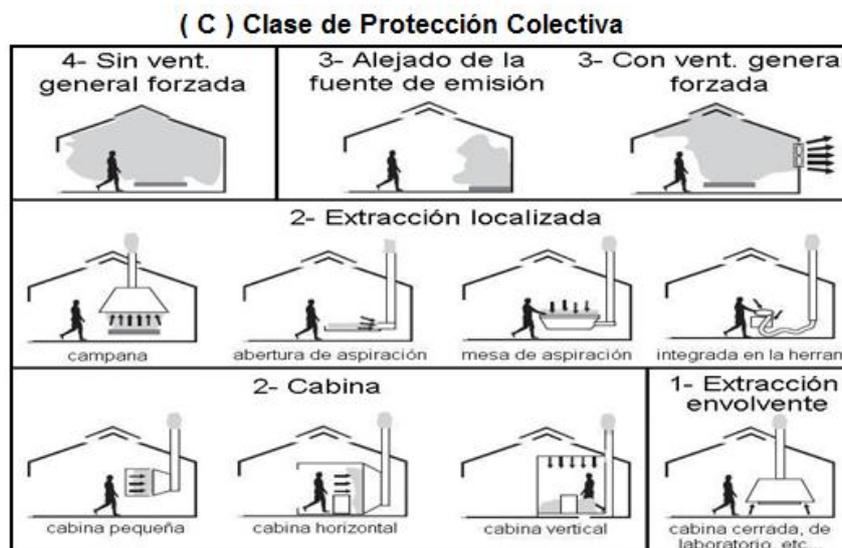
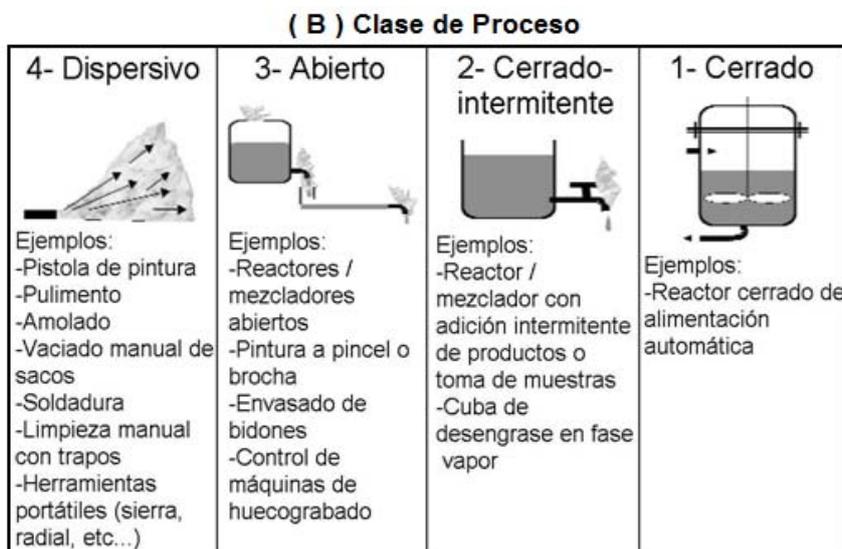


Figura 6.1. Gráfica de volatilidad para líquidos en función del punto de ebullición (°C) y la temperatura de trabajo (°C)



Una segunda clasificación es la que se recoge en la figura 6.2 en función de las clases de proceso y de la clase de protección colectiva.



Figuras 6.2 (B). Clase proceso y (C) clase de volatilidad para compuestos sólidos y líquidos o gases

6.1. Caracterización de las sustancias pulverulentas

Los productos sólidos frecuentemente generan polvo durante las diferentes operaciones de proceso, transporte, almacenamiento y molienda. Existe un elevado número de sustancias sólidas que procesadas son combustibles en el sentido de que pueden reaccionar con el oxígeno liberando calor (es decir, de forma exotérmica). Por lo tanto, el polvo de los materiales combustibles, cuando alcanza un tamaño y concentración determinados, puede ser explosivo. Incluso a pesar de que el polvo, a diferencia del gas,



tiende a sedimentarse, no por ello deja de ser peligroso, ya que cualquier causa puede ponerlo en suspensión.

Podemos agrupar las distintas características de los sólidos pulverulentos en varios grupos, según la naturaleza de los parámetros que se determinen, entre ellos:

- Características generales.
- Sensibilidad a la ignición.
- Severidad de la explosión.
- Susceptibilidad térmica.

Sepamos un poco más de estos parámetros:

6.1.1. Características generales

Las características relacionadas con el comportamiento de los sólidos pulverulentos como pueden ser su pasivación por oxidación, ensuciamiento o contaminación de superficies, etc. son difíciles de determinar y lo que debe hacerse, cuando se van a caracterizar los parámetros de una sustancia, es tomar una muestra lo mas representativa y actual de dicha sustancia. Tenemos dos variables fundamentales que deben medirse siempre y asociarse a los diferentes parámetros que luego se determinen y que son:

- La humedad.
- El tamaño de partícula.

6.1.2. Sensibilidad a la ignición

Esta característica nos informa de la facilidad que tienen algunas sustancias sólidas, granuladas o en forma fibras para inflamarse (sensibilidad a la ignición o inflamabilidad) frente a distintos tipos de fuentes de ignición (focos térmicos, descargas electrostáticas, etc.). Los parámetros que caracterizan la sensibilidad son:

- *Temperatura mínima de inflamación, TMI*. Es la menor temperatura a la que se inicia el proceso de inflamación de una muestra de polvo. La TMI puede obtenerse para una capa de polvo, hablamos luego de TMIc o para una muestra dispersada en forma de nube, es decir, TMIn.
- *Concentración mínima explosiva, CME*. También se le conoce con el nombre de LIE (designación habitual para gases inflamables) y es el límite inferior del intervalo de concentraciones de polvo en suspensión para el cual la mezcla de aire polvo es potencialmente explosiva.



- **Energía mínima de inflamación, EMI.** Es la menor energía eléctrica almacenada en un condensador, que al descargarse es justo suficiente para producir la inflamación de la mezcla más inflamable de una nube de polvo, obtenida variando la concentración de polvo en el aire.

Estos cuatro parámetros (TMIc, TMIIn, CME y EMI) se utilizan en la práctica para el diseño e implantación de medidas de prevención de la explosión. Cuanto más bajas sean las temperaturas, concentraciones o energías necesarias para que se inflame un producto pulverulento, más sensible será la ignición y por lo tanto habrá que extremar las medidas de prevención.

6.1.3. Severidad de la explosión

Las consecuencias de la explosión (severidad de la explosión o también explosividad) dependen de los siguientes parámetros:

- **Presión máxima de explosión ($P_{m\acute{a}x}$).** Esta presión es la diferencia entre la presión en el instante de la ignición (presión normal) y la presión en el punto máximo de la curva del registro presión-tiempo (figura 4).

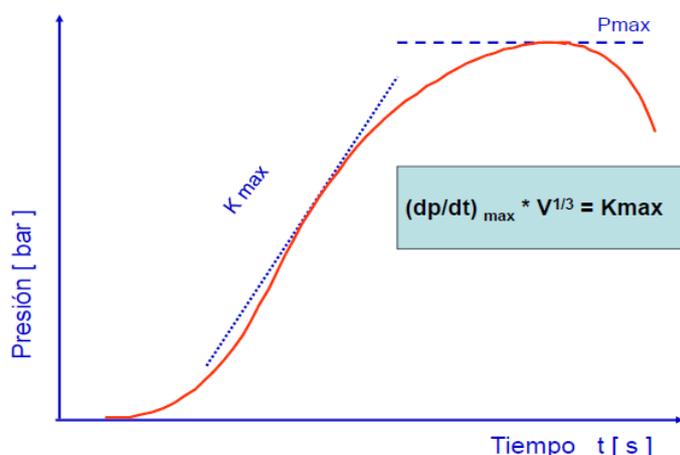


Figura 6.3. Ley cúbica de variación de la presión respecto al tiempo

La velocidad máxima de aumento de la presión con el tiempo $(dP/dt)_{m\acute{a}x}$ se define como la máxima pendiente de la tangente a la curva presión-tiempo a cada concentración nominal del polvo.

Se obtienen valores de presión máxima de explosión y de la velocidad máxima para diferentes curvas de explosión al variar la concentración entre amplios límites que van desde 60-125 g/m³ hasta 1000-2000 g/m³.



- **Constante característica ($K_{m\acute{a}x}$)** conocida como Ley Cúbica se obtiene mediante el producto de la velocidad máxima de aumento de presión y la raíz cúbica del volumen del recinto donde se produce la explosión.

$$K_{m\acute{a}x} = \left(\frac{dP}{dt} \right)_{m\acute{a}x} V^{1/3} \quad (\text{Ec. } 6-1)$$

Se expresa en bar m/s y nos da una idea de a que velocidad reacciona una sustancia, siendo un valor mas elevado sinónimo de mayor riesgo.

Este valor se ha empleado tradicionalmente para seleccionar la peligrosidad de los productos:

- St-1 hasta 199 bar m/s.
- St-2 de 200 a 299 bar m/s.
- St-3 mas de 300 bar m/s.

El valor de la $K_{m\acute{a}x}$ **es crítico** a la hora de diseñar un sistema de venteo, ya que a mayor $K_{m\acute{a}x}$ mayor área de venteo o menor presión de activación del venteo (P_{stat}).

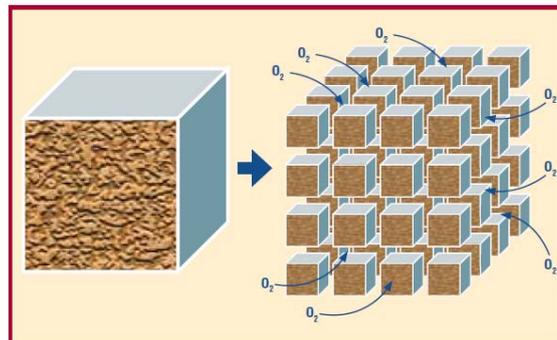


Figura 6.4. Aumento de la superficie al disminuir la granulometría

- **Concentración límite de oxígeno (CLO)**, que se define como el porcentaje de oxígeno por debajo del cual no hay ignición en el intervalo de concentraciones explosivas.

En la tabla siguiente (tabla 6.2) se presentan algunos valores orientativos para algunos productos en función de los parámetros anteriormente definidos, es decir: tamaño de partícula, Temperatura mínima de inflamación en capa (TMlc), Temperatura mínima de inflamación en nube (TMIn), Concentración mínima explosiva (CME), Energía mínima de inflamación, Concentración límite de oxígeno (CLO), Constante característica ($K_{m\acute{a}x}$) y Presión máxima ($P_{m\acute{a}x}$).



Conviene resaltar que los datos para polvos que se presentan en tablas deben servir de forma orientativa, ya que los valores dependen de la repartición granulométrica y de la forma de las partículas, del contenido de la humedad y de la presencia de aditivos, incluso en pequeñas proporciones.

Producto	Tamaño Partícula μm	TMIc ($^{\circ}\text{C}$)	TMIIn ($^{\circ}\text{C}$)	CME g/m^3	EMI mJ	CLO %	$K_{\text{máx}}$ bar m/s	$P_{\text{máx}}$ bar
Almidón de maíz	11	>400	400	60	>5	9	164	9,2
Arroz polvo	35	360	380	30	30	13	101	8,3
Avena	295	>400	350	750	>10	--	14	6,0
Cacao	<10.000	250	560	125	100	9	108	7,2
Harina de trigo	65	>400	410	60	>100	11	77	6,9
Piensos	26	280	460	30	<100	--	96	7,6

Tabla 6.2. Valores de seguridad de algunos productos pulverulentos

6.1.4. Susceptibilidad térmica

Debemos caracterizar la susceptibilidad térmica de aquellos productos pulverulentos que intervengan en procesos de oxidación y autocalentamiento. Así, de esta manera podemos conocer el comportamiento térmico y la presencia de reacciones exotérmicas y determinar su tendencia a la autocombustión. Los parámetros que intervienen en la susceptibilidad se obtienen mediante ensayos y son:

- **Índice de Maciejasz (IM).** Se obtiene al realizar un ensayo de reactividad al oxígeno, en particular a los peróxidos. Está indicado para comprobar la susceptibilidad o tendencia a la autoinflamación de sustancias orgánicas.
- **Temperatura de emisión de volátiles inflamables (TEV).** Este ensayo es de gran utilidad para analizar la posible degradación térmica de materias orgánicas con generación de sustancias volátiles.
- **Ensayo de Termogravimetría (TG).** Consiste en registrar la pérdida de peso experimentada por una muestra cuando ésta es sometida a un calentamiento programado.
- **Ensayo de Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC).** En este ensayo se miden los cambios de calor sufridos por la muestra de polvo, por comparación con una muestra de referencia, determinando cuantitativamente los procesos exotérmicos y endotérmicos.



Son muchos los parámetros que determinan el comportamiento de los sólidos, aunque como se ha indicado los más importantes son el tamaño de partícula y el grado de humedad de la misma.

Para el caso que nos ocupa de la industria láctea EUROSERUM IBÉRICA, S.L. los polvos combustibles susceptibles de la formación de atmósferas explosivas, son la leche en polvo y el suero en polvo obtenidos en el proceso de secado que tiene lugar en la sección de torre.



Foto 6.1. Atomizador de la cámara de secado



Foto 6.2. Puerta alivio presión vista desde dentro



Foto 6.3. Conducto de extracción a ciclón grande y pico de la cámara de secado



Foto 6.4. Interior del vibrofluidificador

Vemos en la fotos superiores como la formación del producto (en este caso suero en polvo) conlleva a la generación de capas de polvo importantes en el interior de los equipos.



Los valores característicos de temperatura mínima de ignición tanto para la leche en polvo como para el suero en polvo extraídos del BIA-report son los que se muestran en la tabla siguiente (tabla 6.3).

Producto	Tamaño Partícula μm	TMIc ($^{\circ}\text{C}$)	TMIIn ($^{\circ}\text{C}$)	CME g/m^3	EMI mJ	CLO %	$K_{\text{máx}}$ bar m/s	$P_{\text{máx}}$ bar
Leche en polvo	165	350 $^{\circ}\text{C}$	280	60	> 30	--	102	7,7
Suero en polvo	105	470 $^{\circ}\text{C}$	395	125	>100		41	7,4

Tabla 6.3. Características leche en polvo y suero en polvo

La temperatura superficial máxima de los equipos instalados en zonas clasificadas por polvo combustible nunca podrá sobrepasar la temperatura de ignición del polvo que pueda formar una atmósfera potencialmente explosiva. Por otra parte, esta temperatura debe estar minorizada según los coeficientes de seguridad especificados en la norma UNE-EN 61241-14:2006 "Material eléctrico para uso en presencia de polvo inflamable. Parte 14: Selección e instalación". En este caso, el valor más desfavorable corresponde a la leche en polvo y es de 280 $^{\circ}\text{C}$ en capa, por lo que aplicando el coeficiente de seguridad especificado en la UNE EN 1127-1 la máxima temperatura superficial que alcancen los equipos de manejo de polvo combustible deberá ser inferior a **190 $^{\circ}\text{C}$** .

6.1.5. Parámetros de granulometría y humedad de las muestras de leche y suero en polvo de EUROSERUM IBÉRICA, S.L.

Como antes hemos comentado para los polvos combustible necesitamos determinar la humedad y la granulometría. En este trabajo se han analizado 10 muestras de 30 gramos cada una, 5 de leche en polvo y 5 suero en polvo (foto 6.5) para determinar el tamaño de partícula y el grado de humedad de las mismas (fotos 6.6, 6.7, y 6.8)



Foto 6.5. Muestras de leche y suero en polvo analizadas



Fotos 6.6, 6.7, y 6.8. Determinación de la humedad de una de las muestras

En la tabla siguiente (tabla 6.4) se muestran los resultados del análisis para las muestras analizadas.

MUESTRAS DE LECHE EN POLVO			MUESTRAS DE SUERO EN POLVO		
μm	masa	%	μm	masa	%
< 80	0,8	2,67	< 80	1,1	3,67
80	1,3	4,33	80	3,3	11,00
100	2	6,67	100	11,6	38,67
125	3,8	12,67	125	5,1	17,00
150	5,1	17,00	150	3,3	11,00
160	10,2	34,00	160	2,1	7,00
200	4,1	13,67	200	1,8	6,00
250	2,5	8,33	250	1,2	4,00
500	0,2	0,67	500	0,5	1,67
masa total	30	100,00		30	100,00

Tabla 6.4. Características de las muestras leche en polvo y suero en polvo

Los gráficos 6.1. y 6.2 recogen los resultados del promedio en % del tamaño de gránulos en μm para las cinco muestras analizadas (cada una de ellas de 30 gramos) de leche en polvo. Como en ellos se puede apreciar, el mayor porcentaje (un 34%) corresponde a granulometrías de 160 μm , este dato está en consonancia con los resultados bibliográficos que se recogen en la tabla 6.3 sobre tamaño de partícula para la leche en polvo y suero en polvo y que es de 165 μm para el primero. El siguiente porcentaje con mayor peso es del 17% para los tamaños de 150 μm . La suma de estos dos porcentajes junto con el porcentaje del casi 13% para el tamaño de gránulos de 125 μm constituye casi un 65% sobre el total (lo cual se ajusta bastante bien a los datos de la tabla 6.3). La dispersión existente que posibilita encontrar tamaños de partículas inferiores a 125 μm y superiores a 200 μm es debida al propio proceso de atomización por dispersión que provoca que el secado no sea completamente homogéneo.

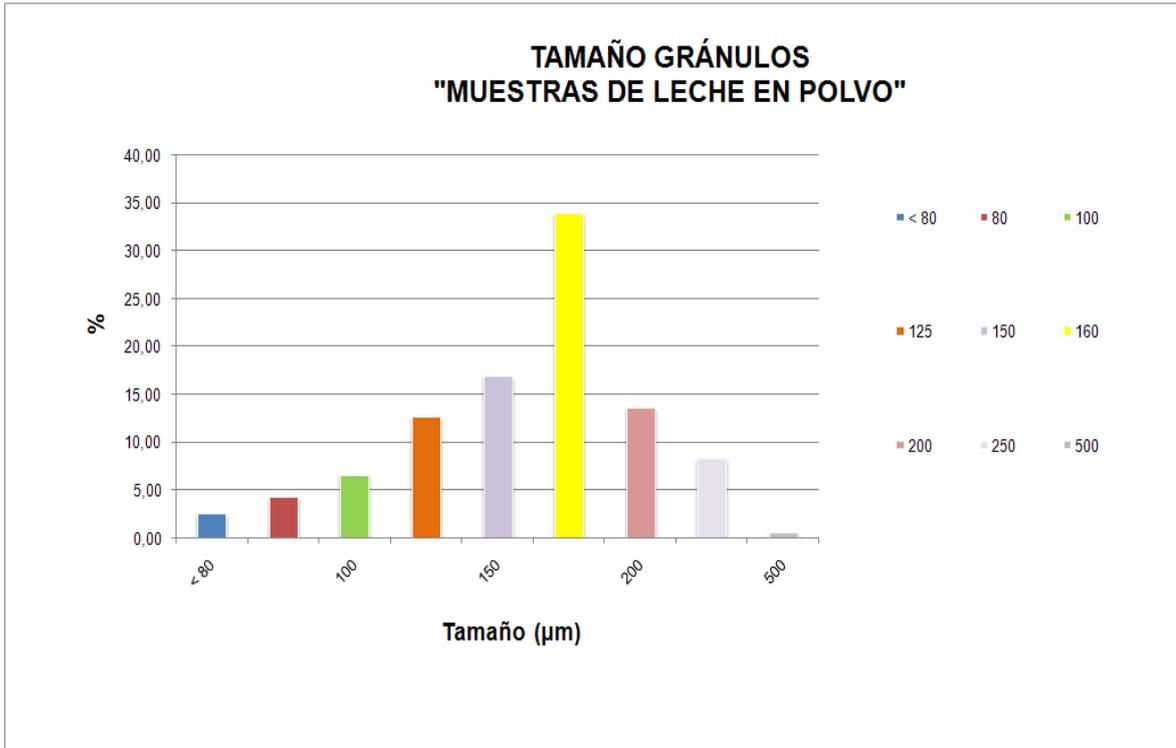


Gráfico 6.1. Tamaños de los gránulos de leche en polvo en μm

En el gráfico siguiente se indica el porcentaje exacto para los tamaños analizados.

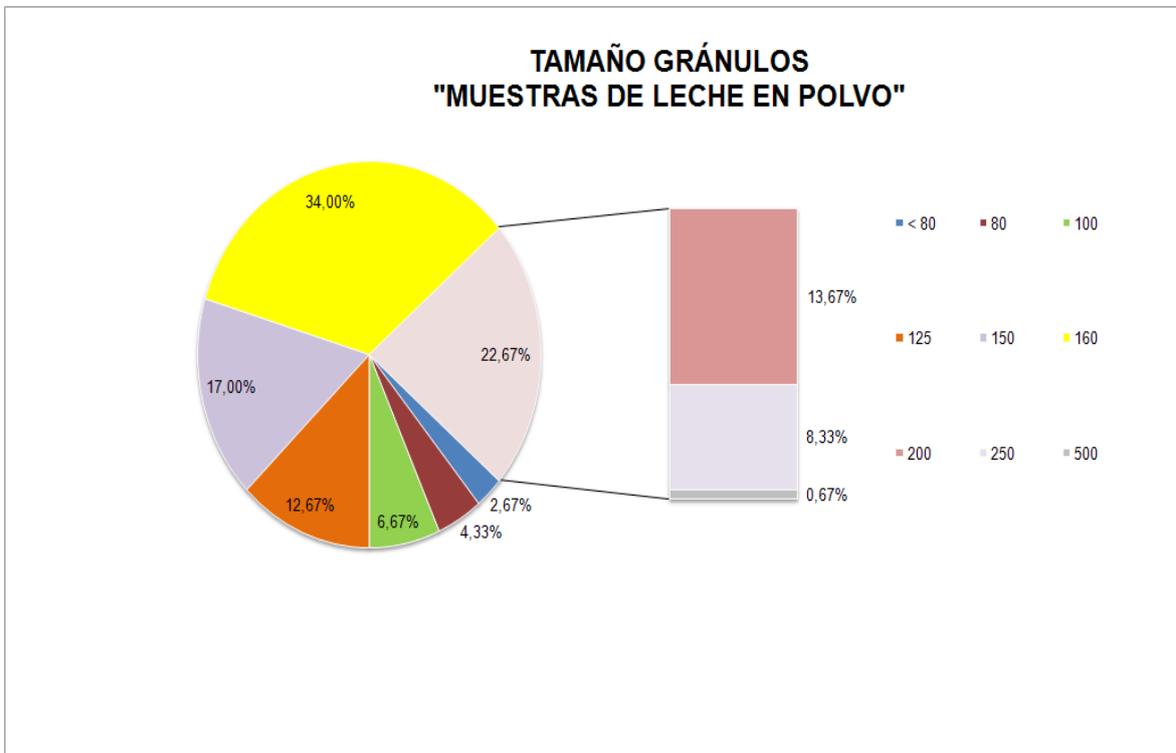


Gráfico 6.2. % para los tamaños de los gránulos en μm



Lo anteriormente expuesto para las muestras de leche en polvo tiene su espejo para las muestras de suero en polvo tal y como se recoge en los gráficos 6.3 y 6.4.

Los gráficos 6.3 y 6.4 muestran en % los tamaños de los gránulos de suero en polvo. Como en ellos se puede observar el mayor porcentaje (casi un 39%) corresponde a la granulometría de 100 μm , valores que comparados con los estándar para el suero en polvo establecidos en la tabla 6.3 presentan buena correlación. Podemos apreciar también que el tamaño de gránulo de 80 μm presenta un porcentaje sobre el total de la muestra de un 11% y que para el tamaño de 125 μm el porcentaje es del 17%. El total de estos tres tamaños de granulometría (80, 100 y 125 μm) comprenden un porcentaje de casi el 70% sobre el total de la muestra.

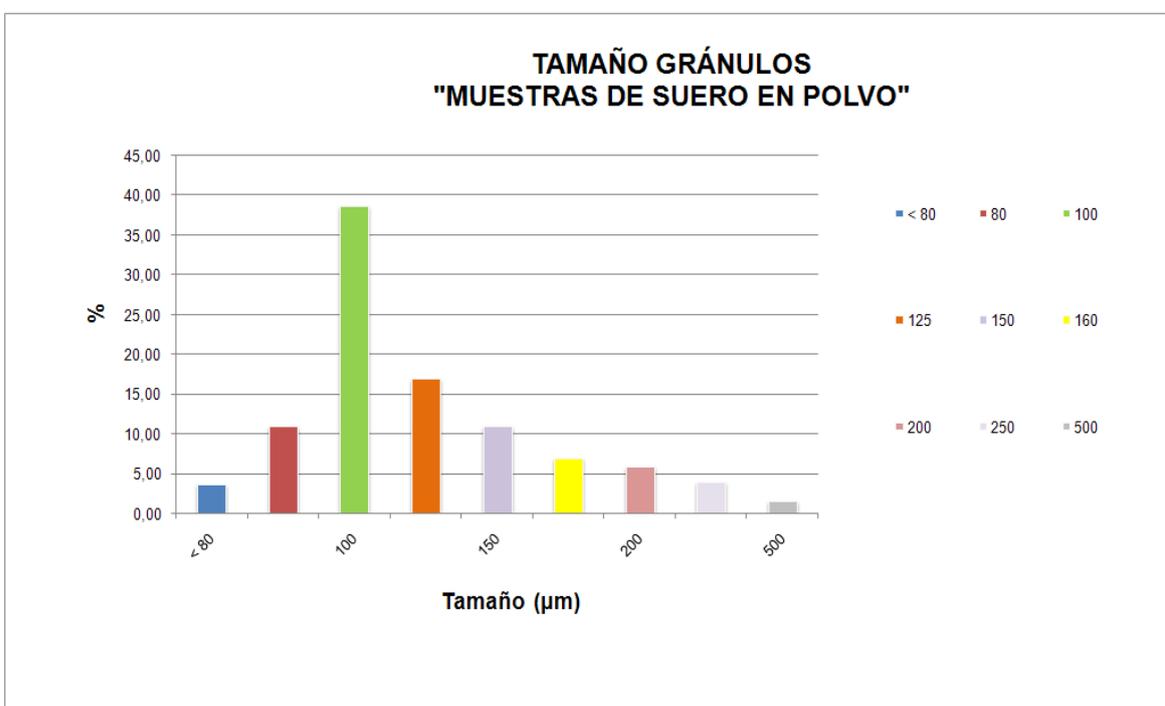


Gráfico 6.3. Media de los tamaños de los gránulos en μm para las muestras de suero en polvo

En el gráfico 6.4. se presentan los porcentajes para los diferentes tamaños de granulometría obtenidos. Podemos observar lo anteriormente expuesto con relación al mayor peso del porcentaje de las muestras para los tamaños de 80, 100 y 125 μm y, como existe un valor de porcentaje en torno al 12% que se lo reparten los tamaños de grano de 200, 250 y 500 μm . Como antes hemos apuntado existe una pequeña dispersión de los tamaños de gránulo debido al proceso de secado.

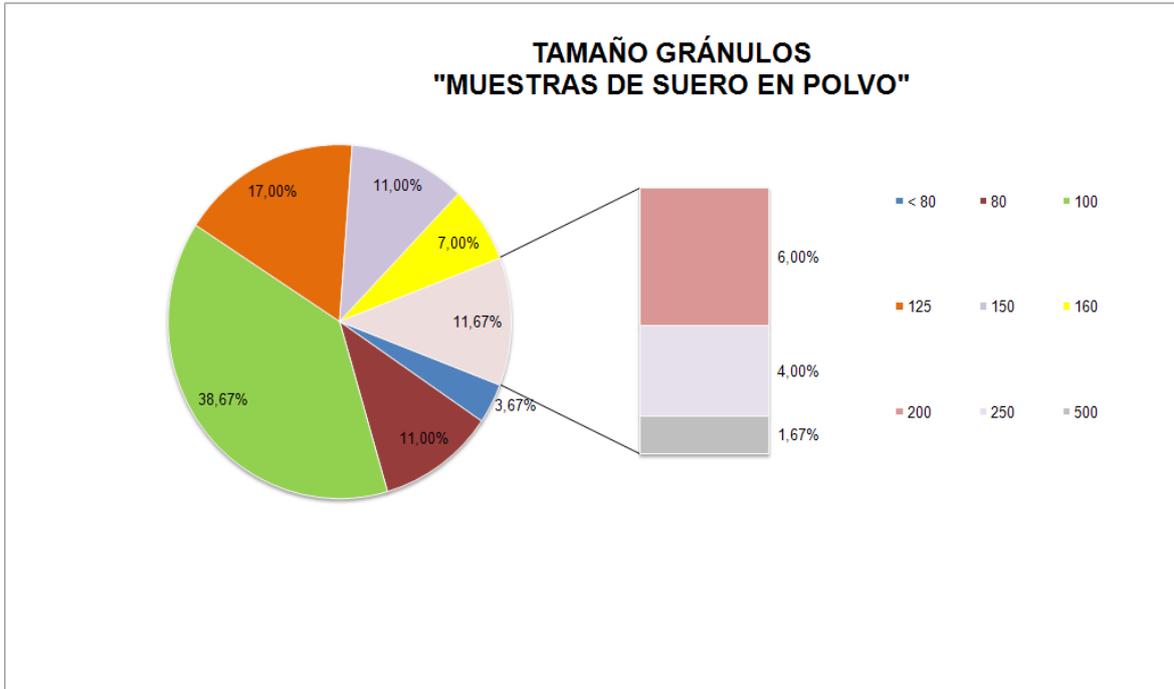


Gráfico 6.4. % de los tamaños de los gránulos en µm para las muestras de suero en polvo

Los resultados comparativos de granulometría para la leche y el suero se muestran en los gráficos 6.5 y 6.6 donde se recogen los resultados anteriormente expuestos.

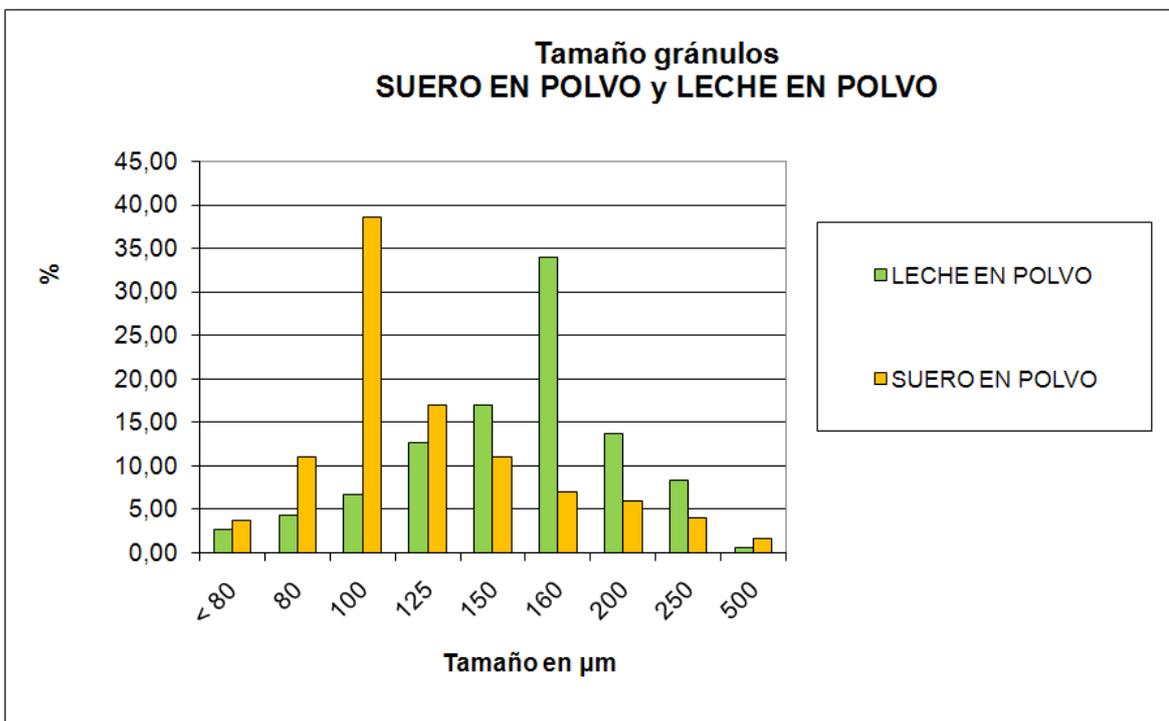


Gráfico 6.5. Tamaños %en de los gránulos en µm para las muestras de leche y suero en polvo



En el gráfico siguiente (gráfico 6.6) podemos apreciar los tamaños de gránulos de forma comparativa entre la leche en polvo y el suero y la dispersión de tamaño que ambos presentan.

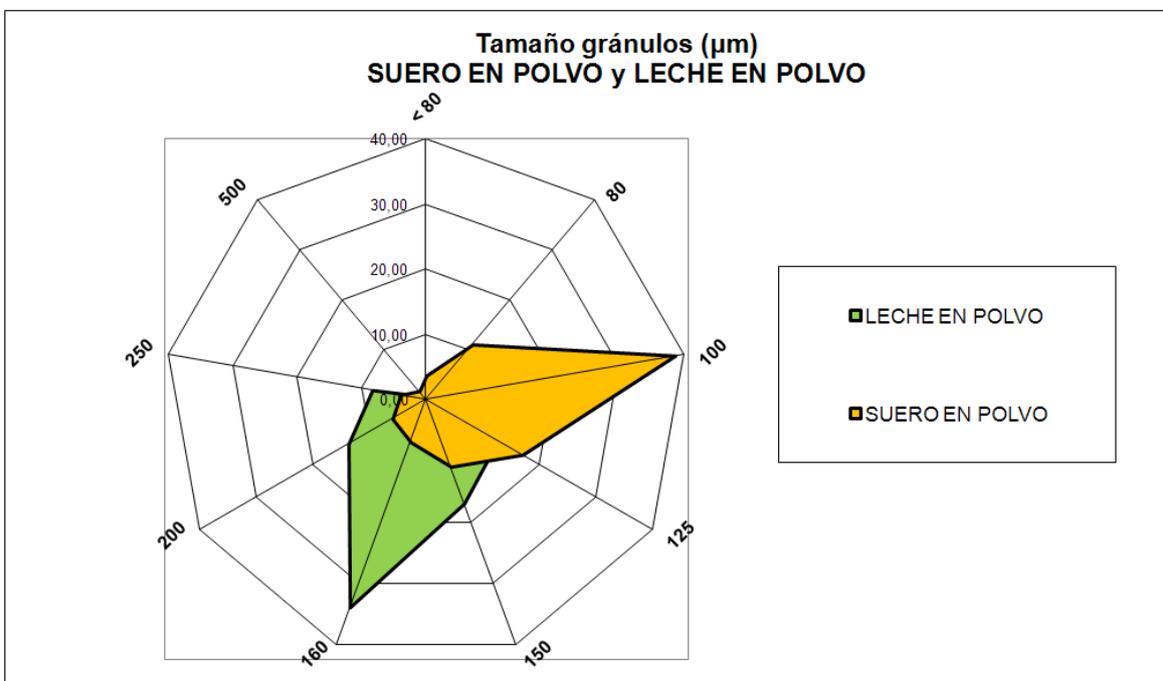


Gráfico 6.5. Comparativa de los tamaños de los gránulos en μm (leche y suero en polvo)

Los valores de humedad para el conjunto de las muestras analizadas se recogen en la tabla siguiente.

MUESTRAS DE LECHE EN POLVO		MUESTRAS DE SUERO EN POLVO	
% humedad		% humedad	
Muestra 1	2,7	Muestra 1	2,4
Muestra 2	2,5	Muestra 2	2,5
Muestra 3	2,5	Muestra 3	2,5
Muestra 4	2,6	Muestra 4	2,6
Muestra 5	2,6	Muestra 5	2,4
Media	2,6	Media	2,5

Tabla 6.5. % de humedad para las muestras de leche y suero en polvo

6.2. Caracterización de sustancias y compuestos, gases, vapores y nieblas

Una primera clasificación que debemos hacer a la hora de determinar los compuestos peligrosos es lógicamente el identificarlos, su ubicación, el nombre del producto, si está o no etiquetado y algo muy importantes si se dispone de la ficha de seguridad del producto en cuestión (FDS).



Asimismo, también podemos establecer una clasificación en función la temperatura de inflamación de la sustancia y el volumen mínimo tanto empleado como almacenado (ver tabla 6.6).

Grupo de sustancia	Temperatura de inflamación (°C)	Volumen mínimo	
		Proceso	Almacenamiento
A	$T_i \leq 0 \text{ °C}$ ($T_e > 0 \text{ °C}$)	0,1 m ³	1 m ³
B	$0 \text{ °C} < T_i \leq 21 \text{ °C}$	0,5 m ³	2 m ³
C	$21 \text{ °C} < T_i \leq 40 \text{ °C}$	1 m ³	10 m ³
D	$40 \text{ °C} < T_i \leq 65 \text{ °C}$	2 m ³	20 m ³
E	$T_i > 65 \text{ °C}$	4 m ³	40 m ³
F	Gases inflamables y gases inflamables licuados a presión	Según el tipo de sustancia	

Tabla 6.6. volúmenes mínimos en función de la temperatura de inflamación

Esta tabla no debe establecer valores exactos de las cantidades mínimas que implican una clasificación de zonas, sino que nos debe indicar y aconsejar que el manejo de cantidades muy pequeñas en: laboratorios, tomas de muestra, etc., pueden ser aceptables. La peligrosidad de dichas cantidades de sustancia se determinará en función de las condiciones locales y operativas.

Amén de lo dicho, para caracterizar los gases y líquidos vapores empleados que pueden generar atmósfera ATEX (compuestos peligrosos) necesitamos conocer los siguientes parámetros:

- L.I.E.
- L.S.E.
- Densidad relativa al aire.
- Masa molar (kg/kmol).
- Coeficiente gamma.
- Masa volúmica del líquido (kg/m³).
- Calor específico a T^a ambiente, C_{sl} (kJ/(kgK)).
- Calor latente de vaporización a la T_b, C_{lv} (kJ/kg).
- Coeficiente de difusión del gas, C_d (m²/h).
- Temperatura de ebullición T_b (°C).
- Tensión de vapor (P_v) a 20 °C (kPa).



- Grupo y clase de temperatura IIA T1.
- Número CAS.

En la planta objeto de estudio se manejan gas natural licuado, amoníaco e hidrógeno como productos a reseñar y cuyas características son:

GAS NATURAL LICUADO		
LIE	4,4 %	0,0350 kg/m ³
LSE	17 %	0,2048 kg/m ³
Densidad relativa al aire	0,554	
Masa molar (kg/kmol)	16,04	
Coefficiente gamma	1,31	
Masa volúmica del líquido (kg/m ³)	415	
Calor específico a T ^a ambiente, C _{sl} (kJ/(kgK))	3,454	
Calor latente de vaporización a la T _b , C _{lv} (kJ/kg)	510,00	
Coefficiente de difusión del gas, C _d (m ² /h)	0,074	
Temperatura de ebullición T _b (°C)	- 161,4	
Tensión de vapor (P _v) a 20 °C (kPa)	25456,8	
Grupo y clase de temperatura	IIA T1	
Número CAS	74-82-8	

Tabla 6.7. Parámetros característicos para el gas natural licuado

AMONÍACO		
LIE	15 %	0,1063 kg/m ³
LSE	28 %	0,1948 kg/m ³
Densidad relativa al aire	0,60	
Masa molar (kg/kmol)	17,03	
Coefficiente gamma	1,31	
Masa volúmica del líquido (kg/m ³)	760	
Calor específico a T ^a ambiente, C _{sl} (kJ/(kgK))	4980	
Calor latente de vaporización a la T _b , C _{lv} (kJ/kg)	1370000	
Coefficiente de difusión del gas, C _d (m ² /h)	0,092	
Temperatura de ebullición T _b (°C)	33,4	
Tensión de vapor (P _v) a 20 °C (kPa)	869,728	
Grupo y clase de temperatura	IIA T1	
Número CAS	7664-41-7	

Tabla 6.8. Parámetros característicos para el amoníaco



HIDRÓGENO		
LIE	4%	0,0034 kg/m ³
LSE	75%	0,0629 kg/m ³
Densidad relativa al aire		0,07
Masa molar (kg/kmol)		2,016
Coefficiente gamma		1,41
Masa volúmica del líquido (kg/m ³)		90
Calor específico a T ^a ambiente, C _{sl} (kJ/(kgK))		9800
Calor latente de vaporización a la T _b , C _{lv} (kJ/kg)		454000
Coefficiente de difusión del gas, C _d (m ² /h)		0,148
Temperatura de ebullición T _b (°C)		-252,7
Tensión de vapor (P _v) a 20 °C (kPa)		9413
Grupo y clase de temperatura		IICT1
Número CAS		1333-74-0

Tabla 6.9. Parámetros característicos para el hidrógeno



CAPITULO 7. FORMULACIÓN DEL NUEVO PROCEDIMIENTO

El procedimiento que vamos a establecer para determinar la clasificación y extensión de atmósferas explosivas lo vamos a subdividir en función de si la atmósfera explosiva es debida a gases o vapores, o si pueden ser debidas a atmósferas pulverulentas. Así, tenemos:

7.1. Procedimiento para clasificar atmósferas explosivas por gases o vapores

7.1.1. Clasificación zonal para gases, vapores, nieblas y líquidos

Como ya hemos venido advirtiendo el primer paso primordial es la determinación de la extensión zonal. Para ello, vamos a hacer uso de la metodología cuantitativa y de la metodología CFD. Veamos ahora cada una de ellas.

7.1.1.1. Metodología cuantitativa basada según norma UNE 60079-10: "Clasificación de emplazamientos peligrosos"

El objetivo de esta metodología es determinar el volumen teórico V_z en m^3 de la envolvente inflamable de una fuente de escape y a partir de este dato determinar el radio de la esfera ficticia de extensión de nuestra zona a clasificar. El proceso se recoge en la figura siguiente (figura 7.1).

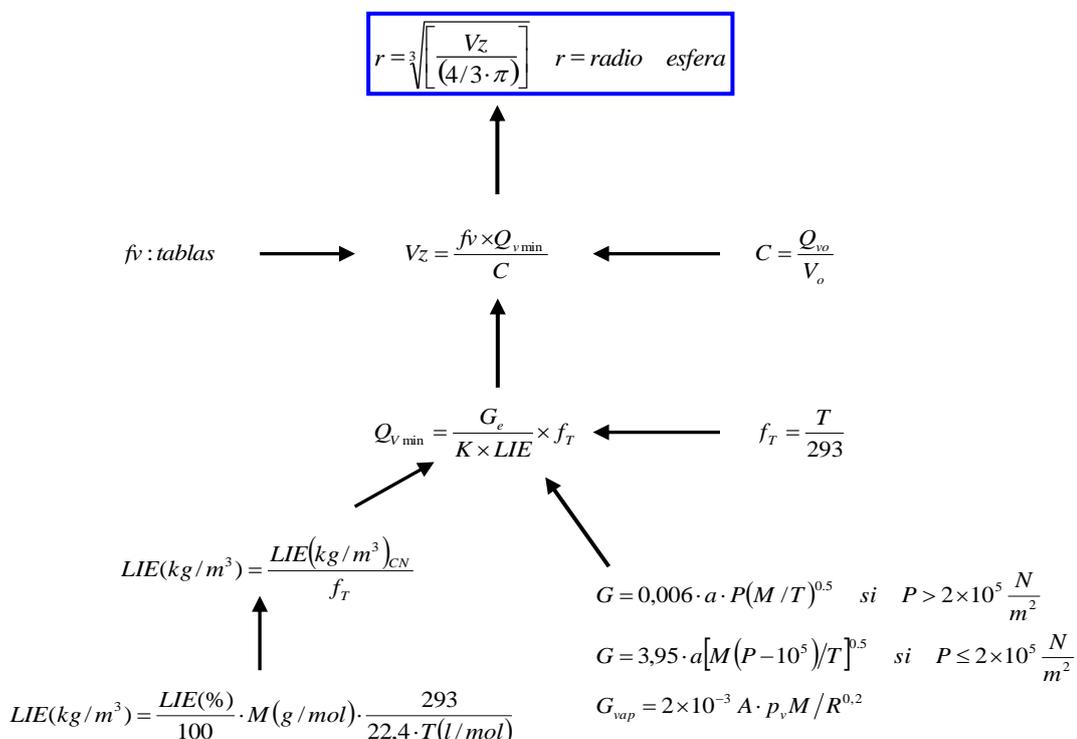


Figura 7.1. Pasos para determinar la extensión de una ATEX (gases, vapores, nieblas y líquidos)



Las magnitudes que intervienen en la secuencia de fórmulas de la figura 7.1. aparecen reflejadas en las tablas 5.4, 5.5, 5.6 y 5.7 del capítulo 5.

Para facilitar la aplicación de la secuencia de fórmulas de la figura 7.1 vamos a hacer uso de un pequeño programa en Excel, el cual nos va a permitir determinar el cálculo del volumen V_z y por tanto, del radio de la esfera para los ejemplos de aplicación a la industria de estudio. La secuencia se establece en cuatro pasos:

1º Determinamos el L.I.E. de la sustancia en cuestión en Kg/m^3 (tabla 7.1).

CALCULO DEL LIE					
Nº	Sustancia	LIE (% vol aire)	Masa molecular (kg/kmol)	Temperatura proceso (°K)	LIE (kg/m^3)
1	n-pentano	1,5	72,2	293	0,048
2	Isopentano	1,4	72,2	293	0,045
3	Ciclopentano	1,1	70,1	293	0,034
4	Gasóleo	0,6	230	293	0,062

Tabla 7.1. Determinación del LIE de la sustancia

2º Calculamos la tasa de escape $G_{em\acute{a}x}$ en Kg/s (tabla 7.2).

CALCULO DE LA TASA DE ESCAPE					
Superficie evap. A (m^2)	P_{vliq} (kPa a 20°C)	Pv	Masa molecular (kg/kmol)	R0,2	$G_{em\acute{a}x}$ (kg/s)
0,7854	56,8	0,560711	72,2	11,5	0,0055297
0,7854	79	0,779862	72,2	11,5	0,0076909
0,7854	45	0,444225	70,1	11,5	0,0042535
0,7854	0,3	0,002962	230	11,5	9,304E-05

Tabla 7.2. Determinación tasa de escape $G_{em\acute{a}x}$

3º Calculamos la ventilación Q_v en m^3/s (tabla 7.3).

CALCULO DE LA VENTILACION				
$G_{em\acute{a}x}$ (kg/s)	K	Temperatura proceso (°K)	LIE (kg/m^3)	CALCULO DE LA EXTENSION
0,0055297	0,5	293	0,0483482	4
0,0076909	0,5	293	0,045125	2
0,0042535	0,5	293	0,0344241	2
9,304E-05	0,5	293	0,0616071	2

Tabla 7.3. Determinación del caudal de ventilación Q_v



Y por último, determinamos la extensión de la zona (tabla 7.4).

CALCULO DE LA EXTENSION DE LA ZONA					
fv	Q_{vmin} (m ³ /s)	C	V _z (m ³)	V _z /(4/3π)	Extensión (m)
2	0,228743	0,03	15,2496	3,64056	1,538
2	0,340871	0,03	22,7248	5,42513	1,757
2	0,247122	0,03	16,4748	3,93306	1,578
4	0,00302	0,03	0,40272	0,09614	0,458

Tabla 7.4. Determinación de la extensión de la zona en metros

En la figura siguiente (figura 7.2) se recogen los cuatro pasos anteriormente citados en el programa de Excel.

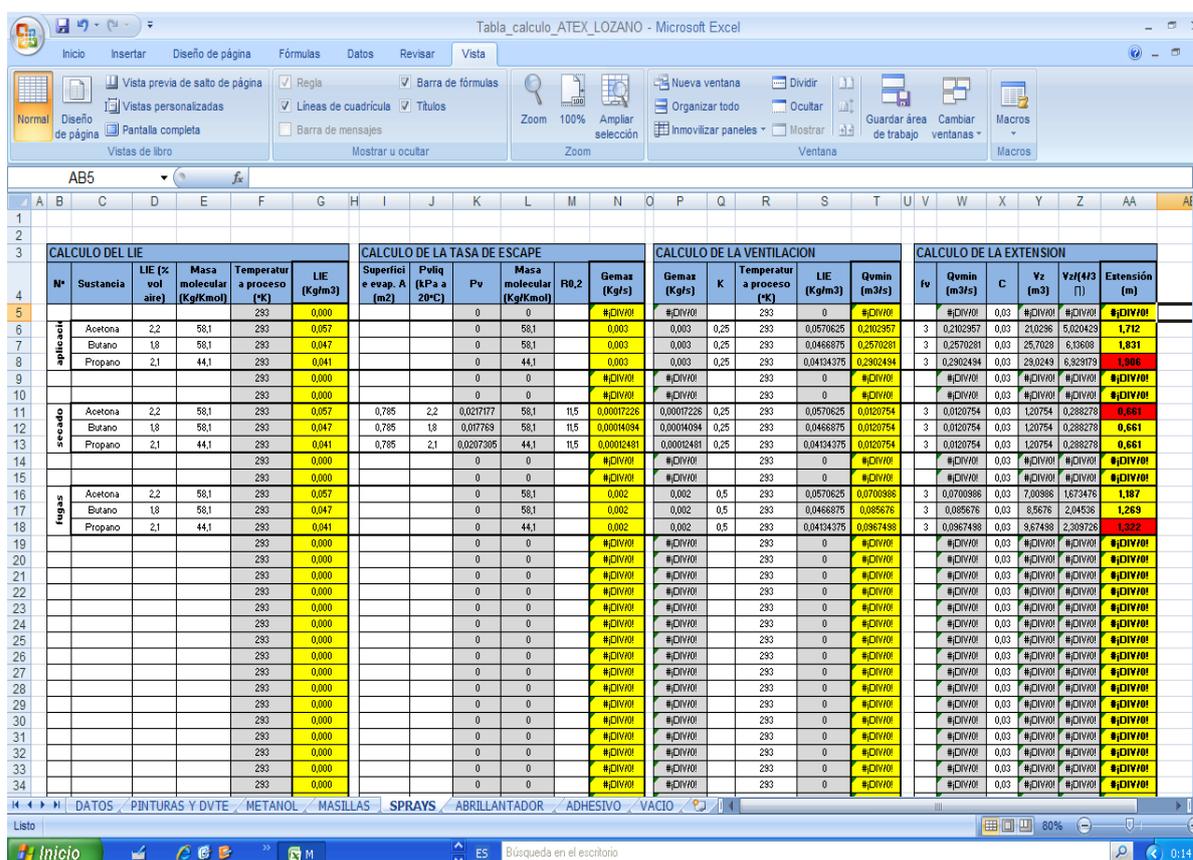


Figura 7.2. Programa en Excel utilizado para la determinación del radio de esfera y volumen según la figura 7.1.



7.1.1.2. Metodología cuantitativa basada en la norma italiana CEI 31-35 (2001). Programa ProgEX

La norma italiana propone determinar la extensión de la zona en base a los datos siguientes:

- Datos ambientales
 - Altura sobre el nivel del mar [m].
 - Presión atmosférica P_a [Pa].
 - Temperatura ambiental T_a [°C].
- Características de la sustancia peligrosa
 - Denominación.
 - Servicio Abstracto Químico (CAS) número.
 - Masa volumétrica del gas ρ_{gas} (a T_a y a P_a) [kg/m³].
 - Masa molar M [kg/kmol].
 - Relación entre los calores específicos $\gamma=C_p/C_v$.
 - Límite inferior de explosividad en volumen $LEL_{\%vol}$.
 - Límite inferior de explosividad en masa LEL [kg/m³].
 - Temperatura de ebullición T_b [°C].
 - Grupo y clase de temperatura.
- Características de la fuente de escape
 - Presión absoluta en el sistema contenedor [bar].
 - Área del orificio de emisión [mm²].
 - Grado de emisión.
 - Coeficiente de fluencia.
 - Temperatura de emisión del gas T_s [°C].
 - Concentración inicial máxima del gas X_o .
- Características de la ventilación
 - Velocidad mínima del viento [m/s].
 - Factor de eficacia de la ventilación f .
 - Disponibilidad de la ventilación.
- Cálculo del alcance o emisión

El gas puede escaparse o emitirse de dos formas o en dos regímenes:

 - Régimen subsónico o no turbulento o
 - Régimen sónico o turbulento

Para determinar el régimen comparamos la relación de presiones internas y externas con la razón crítica de los gases que es constante.



$$\frac{p}{p_a} \geq \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\left[\frac{\gamma}{\gamma - 1} \right]} \quad (\text{Ec 7 - 1})$$

Si la relación entre las presiones internas y externas es superior a la denominada razón crítica, el régimen es subsónico, no turbulento.

Para régimen sónico γ es 1, para régimen subsónico hay que calcular γ

Para régimen subsónico: CASO MAS DESFAVORABLE $\gamma = 1$

Para el cálculo de las tasas de escape partiremos de la expresión general para determinar la masa que es emitida a través de un orificio o tobera:

$$G = C_d a \left[\gamma \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\left[\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \right]} \right] \left[\left(\frac{P}{\left(\frac{R T}{M} \right)^{0.5}} \right) \right] \quad (\text{Ec. 7 - 2})$$

Donde:

- **G** = caudal másico de sustancia emitida por el escape (kg s^{-1}).
 - **Cd** = Coeficiente de descarga (valor máximo 0,8).
 - **a** = área transversal (m^2).
 - **P** = presión aguas arriba (N m^{-2}).
 - γ = relación entre los calores específicos c_p/c_v (1,4 para la mayoría de los gases).
 - **M** = masa molecular de la sustancia emitida (g mol^{-1}).
 - **R** = constante de los gases ($8314 \text{ J kmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$).
 - **T**=Temperatura absoluta (K)
- Grado de la ventilación
En ambiente abierto, el grado de la ventilación es definido MEDIO cuando el volumen de la atmósfera explosiva producido por la fuente de escape no es despreciable. El grado de la ventilación es definido ALTO cuando el citado volumen es despreciable. Un índice de las dimensiones del volumen peligroso producido por fuente de escape es dato del volumen hipotético de atmósfera explosiva V_z , se define como:

$$V_z = \frac{f(dV/dt)_{\min}}{C_o} = \frac{f \cdot Q_{\min}}{C_o} \quad (\text{Ec. 7 - 3})$$



por tanto,

$$(dV/dt)_{\min} = Q_{\min} = \frac{(dG/dt)_{\max}}{K \cdot \text{LEL}} \cdot \frac{T_a}{293} = \frac{G_{\text{vap}}}{K \cdot \text{LEL}} \cdot \frac{T_a}{293} \quad (\text{Ec. 7-4})$$

para las emisiones de grado continuo, el tiempo de persistencia (t) se calcula con la relación siguiente

$$t = \frac{-f}{C_o} \ln\left(\frac{k \cdot \text{LEL}}{X_o}\right) \quad (\text{Ec. 7-5})$$

con:

- Factor de eficacia de la ventilación f.
- Número de cambios de aire C_o [s^{-1}].
- Temperatura ambiental T_a [$^{\circ}C$]: 20,0.
- Límite inferior de explosividad en volumen LEL%vol.
- Factor de seguridad k: 0,25.
- Volumen a ventilar V_o [m^3].
- Alcance de emisión G de la Fuente de escape considerada [kg/s].
- Mínimo alcance de ventilación Q_{amin} [m^3/s].

En base a tal suposición se calcula:

- Volumen Hipotético V_z [m^3].
- Tiempo de persistencia t [s].
- Grado de ventilación: MEDIO.

- Extensión de la zona peligrosa

La distancia d_z de la fuente de escape a la que la sustancia peligrosa puede ser considerada diluida en un nivel no peligroso se calcula mediante.

$$d_z = 16.5(P \cdot 10^{-5})^{-0.5} \cdot M^{-0.4} \left(\frac{\text{LEL \%vol}}{100}\right)^{-1} \cdot A^{-0.5} \cdot 1.5 \quad (\text{Ec. 7-6})$$

donde:

- Masa molar: M [$kg/kmol$]
- Límite inferior de explosividad en volumen LEL %vol
- Presión absoluta en el sistema de confinamiento: P [bar]
- Área del orificio de emisión: A [mm^2]

Entonces podemos determinar el radio de la esfera tal y como se muestra en la figura 7.3.

- Distancia d_z [m].



- Radio a [m].

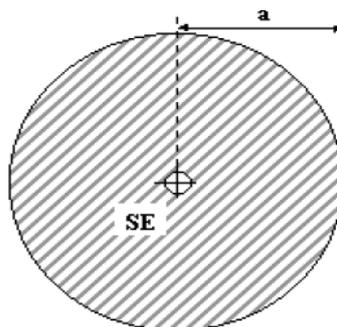


Figura 7.3. Obtención del radio de la esfera

Con el grado de emisión, la disponibilidad de ventilación y el grado de ventilación determinamos el tipo de zona (0, 1 ó 2).

Estos datos los podemos implementar con el programa ProgEx que es un software cerrado basado en la norma italiana CEI 31-35. Introducimos en él, los datos necesarios y obtenemos la clasificación zonal y la extensión de la zona peligrosa, tal y como puede verse en la figura siguiente (figura 7.4) para un escape de gas natural.

ProgEx
 Gas natural

Emissione		Ventilazione	
0,001322	Qg [kg/s]	0,5	w [m/s]
2,5	foro [mm ²]	2,0	coeff. f
3,813	press. [bar]	0,00758	Co [1/s]
Grado emisione: PRIMO		52,2384	Vz [m ²]
Campo vicino		3375,0	Va [m ²]
0,636	dz [m]	287496,0	Vo [m ²]
1,0	kz	Grado ventilazione: MEDIO	
0,8	a [m]	Disponib. ventilazione: BUONA	
Campo lontano concentrazione		Tempi	
0,0%	del LEL	persistenza [s]	
< 2%		1036,9	
2 ÷ 5%		conc. regime [s]	
5 ÷ 20%		non calc.	
20 ÷ 40%		durata emiss. [s]	
40 ÷ 60%		0	
60 ÷ 80%		Nome file	
> 80%		venteo.exf	

La zona pericolosa interessa solamente l'intorno della sorgente di emissione (campo vicino) per una distanza a=0,8 m

Classificazione zona: ZONA 1

Figura 7.4. Clasificación zonal y extensión de la zona para un escape de gas de 2,5 mm² mediante la utilización del programa ProgEx



7.1.1.3. Metodología CFD

Introducción

La dinámica de fluidos computacional o CFD es el arte, más que la técnica, que intenta utilizar los ordenadores para la simulación del movimiento de los fluidos y, en ocasiones, de otros fenómenos asociados: transferencia de calor, reacciones químicas, arrastre de sólidos, etc.

Los paquetes de CFD existentes en el mercado son lo suficientemente potentes y fáciles de utilizar como para que resulte rentable su utilización a nivel industrial. Sus beneficios vienen principalmente de la reducción del número de ensayos experimentales necesarios y del tiempo de desarrollo.

También pueden proporcionar bastante información complementaria del comportamiento detallado, que resulta muy difícil conocer experimentalmente. Un valor añadido es poder poner en el producto la etiqueta de "Diseñado con ayuda del ordenador", y la facilidad para generar dibujos espectaculares, que estimulan la "compra" del producto.

Con la proliferación de programas comerciales, un número creciente de técnicos ha entrado en contacto con estos métodos. Sin embargo, frecuentemente no se conocen bien las características que tiene el CFD, y por ello, los resultados a los que se llegan pueden no ser correctos, ni útiles. Por ello, se ha hecho muy importante para el manejo de CFD, la formación en dinámica de fluidos y el conocimiento de la filosofía, capacidades y limitaciones del sistema.

Utilidad

El software de CFD busca el cálculo detallado del movimiento de los fluidos por medio de la utilización del ordenador para la resolución de las ecuaciones matemáticas que expresan las leyes por las que se rigen. En los resultados de estas técnicas, junto con el movimiento y la presión, pueden obtenerse las variaciones de las propiedades, las fuerzas que ejercen sobre los sólidos adyacentes, los intercambios de energía, etc.

Algunos de los campos de aplicación son:

- Aerodinámica de vehículos terrestres, aviones, entrada y salida de la atmósfera de vehículos espaciales.
- Diseño de motores de combustión, calderas, turbomáquinas (bombas, ventiladores, compresores, turbinas, etc.)
- Refrigeración de equipos eléctricos y electrónicos.



- Equipos para procesos físicos y químicos: reactores, sedimentadores, mezcladores, intercambiadores, eyectores, etc.
- Desarrollo de sistemas de ventilación, calefacción y aire acondicionado.
- Predicción meteorológica.
- Influencia del viento sobre edificios, puentes, etc.
- Dispersión de contaminantes en la atmósfera, ríos y mares.
- Biomedicina: respiración y circulación de la sangre.
- Hidrología y oceanografía: corrientes en ríos, estuarios y océanos.
- Hidrodinámica de buques.

En general, son casos en los que resulta necesario entrar en los detalles de la dinámica de fluidos para obtener los resultados que se buscan.

Las ecuaciones que definen en cualquier punto del espacio la velocidad y presión de un fluido fueron descubiertas hace más de siglo y medio por el ingeniero francés Claude Navier y el matemático irlandés George Stokes. Estas ecuaciones se derivan directamente de las leyes del movimiento de Newton, y son ecuaciones diferenciales en derivadas parciales. Las ecuaciones son las mismas para cualquier situación de flujo de fluidos. La particularización a los casos concretos viene definida por las condiciones de contorno y los valores iniciales. Por ejemplo, los cuerpos sólidos sumergidos en una corriente, o actuando como contornos exteriores van a definir por exclusión la zona del espacio en la que hay que resolver las ecuaciones, y van a introducir condiciones de contorno en la variable velocidad (velocidad nula en las paredes).

Estas ecuaciones son lo suficientemente complicadas como para que su solución analítica sólo sea posible en casos muy elementales. La utilización del ordenador para su resolución numérica es lo que ha dado origen a la dinámica de fluidos computacional o CFD.

Incluso hoy día, la complejidad del cálculo y las limitaciones de los superordenadores más potentes, hacen que sea absurdo intentar utilizar las técnicas de CFD en los casos en los que otras técnicas han logrado simplificaciones adecuadas, como el cálculo de pérdidas de carga en tuberías y canales, golpe de ariete, diseño de sistemas oleohidráulicos y neumáticos, etc. También resultan impracticables para procesos muy extensos, como puede ser la simulación global de una planta química, una depuradora, o incluso un motor de explosión o una turbina de gas en su conjunto (sí se pueden estudiar por partes).



Algunas ventajas e inconvenientes

Hasta el final de los 60, los ordenadores no alcanzaron velocidades de cálculo suficientes para resolver casos sencillos, como el flujo laminar alrededor de un obstáculo. Antes de eso, la experimentación constituía el medio básico de cálculo y desarrollo. En la actualidad, los ensayos experimentales siguen siendo necesarios para la comprobación de diseños no excesivamente complejos. Los continuos avances en los ordenadores y algoritmos, permiten una reducción importante en el número de ensayos necesarios. El diseño típico de un modelo de ala de avión, se hace ahora con 3 ó 4 ensayos en túnel aerodinámico, en vez de los 10 ó 15 que eran necesarios anteriormente.

Las ventajas que proporciona el análisis por CFD se pueden resumir en:

- Reducción sustancial de tiempos y costes en los nuevos diseños.
- Posibilidad de analizar sistemas o condiciones muy difíciles de simular experimentalmente: velocidades hipersónicas, temperaturas muy altas o bajas, movimientos relativos, etc.
- Capacidad de estudiar sistemas bajo condiciones peligrosas o más allá de sus condiciones límite de funcionamiento, por ejemplo accidentes.
- Nivel de detalle prácticamente ilimitado. Los métodos experimentales son tanto más caros cuanto mayor es el número de puntos de medida, mientras que los códigos de CFD pueden generar un gran volumen de resultados sin coste añadido, y es muy fácil hacer estudios paramétricos.

Por el contrario, las técnicas de CFD no son baratas. En primer lugar, son necesarias máquinas de gran capacidad de cálculo (los investigadores de CFD son usuarios habituales de los ordenadores más potentes que existen), y un software con precio todavía no accesible al gran público.

En segundo lugar, se necesita personal cualificado que sea capaz de hacer funcionar los programas y analizar adecuadamente los resultados. Los desarrollos en el campo del CFD se están acercando cada vez más a los de otras herramientas de CAE como las de análisis de esfuerzos en sólidos y estructuras. El motivo del retraso es la gran complejidad de las ecuaciones y, sobre todo, la dificultad de modelizar adecuadamente la turbulencia.

El mayor inconveniente del CFD consiste en que no siempre es posible llegar a obtener resultados suficientemente precisos, y la facilidad de cometer graves errores de bulto.



Esto proviene de:

- La necesidad de simplificar el fenómeno a estudiar para que el hardware y software sea capaz de tratarlo. El resultado será tanto más preciso cuanto más adecuadas hayan sido las hipótesis y simplificaciones realizadas.
- La limitación de los modelos existentes para la turbulencia, flujo bifásico, combustión, etc.

7.1.1.4. Programa GAMBIT Y FLUENT. Discretización de las ecuaciones de flujo

7.1.1.4.1. Generación de la malla. Programa GAMBIT

El análisis de un problema de CFD comienza creando un modelo matemático de un problema físico. Después de generar la estructura física debemos mallarla, es decir, tenemos que dividir el volumen en pequeñas celdas (figura 7.5) y para ello vamos a hacer uso del software GAMBIT. La exactitud de los cálculos y por lo tanto la obtención de resultados más aproximados a los reales va a depender de la solución del mallado, por lo tanto el tamaño de la malla debe ser lo más pequeño posible (figura 7.6) para así, obtener más valores por unidad de volumen. No obstante, cuanto más precisión busquemos mayor va a ser el consumo de cálculo y de tiempo ya que el número de ecuaciones a resolver sobre el mallado va a aumentar de forma considerable.

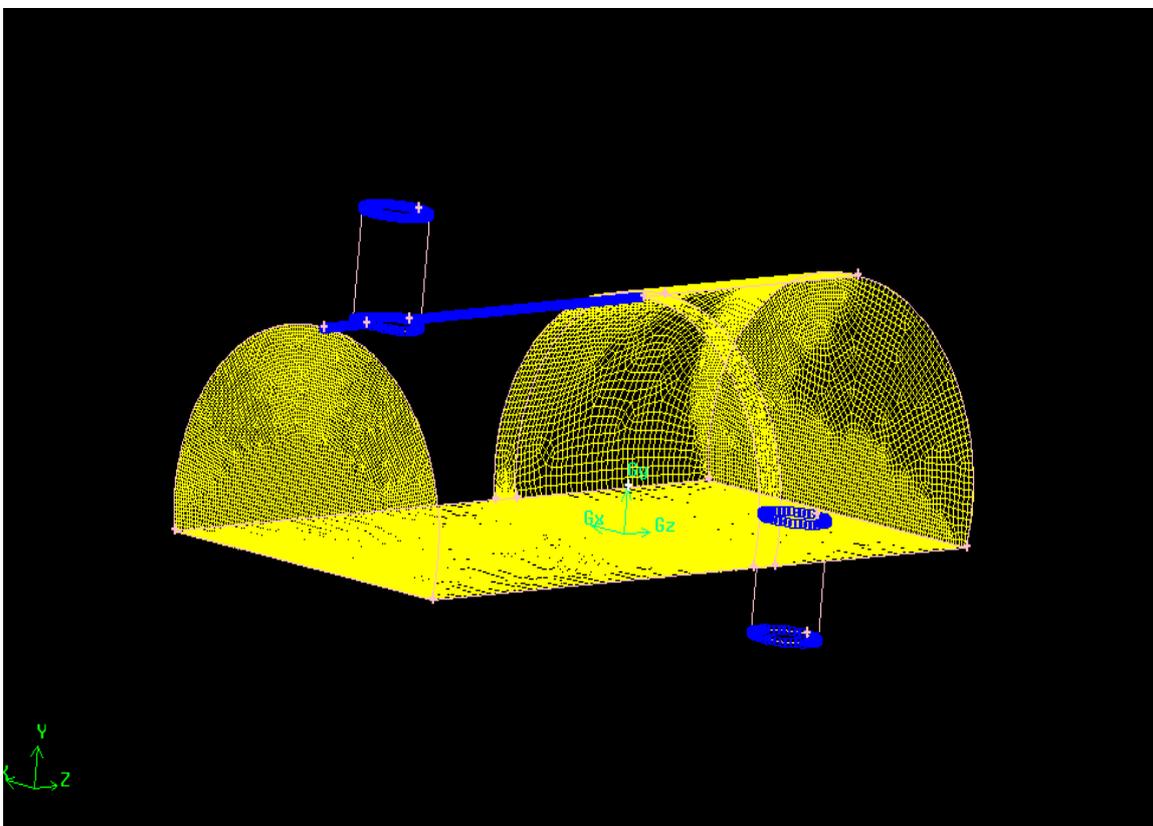


Figura 7.5. Mallado de la geometría de un vibrofluidificador realizado con el programa GAMBIT



Como normas generales la generación del mallado debe seguir varias pautas:

- La geometría del dominio computacional debe estar correctamente representada al igual que las condiciones del flujo y los gradientes de solución.
- No deben existir elementos mallados con ángulos de distorsión elevados, pues el solver daría error.

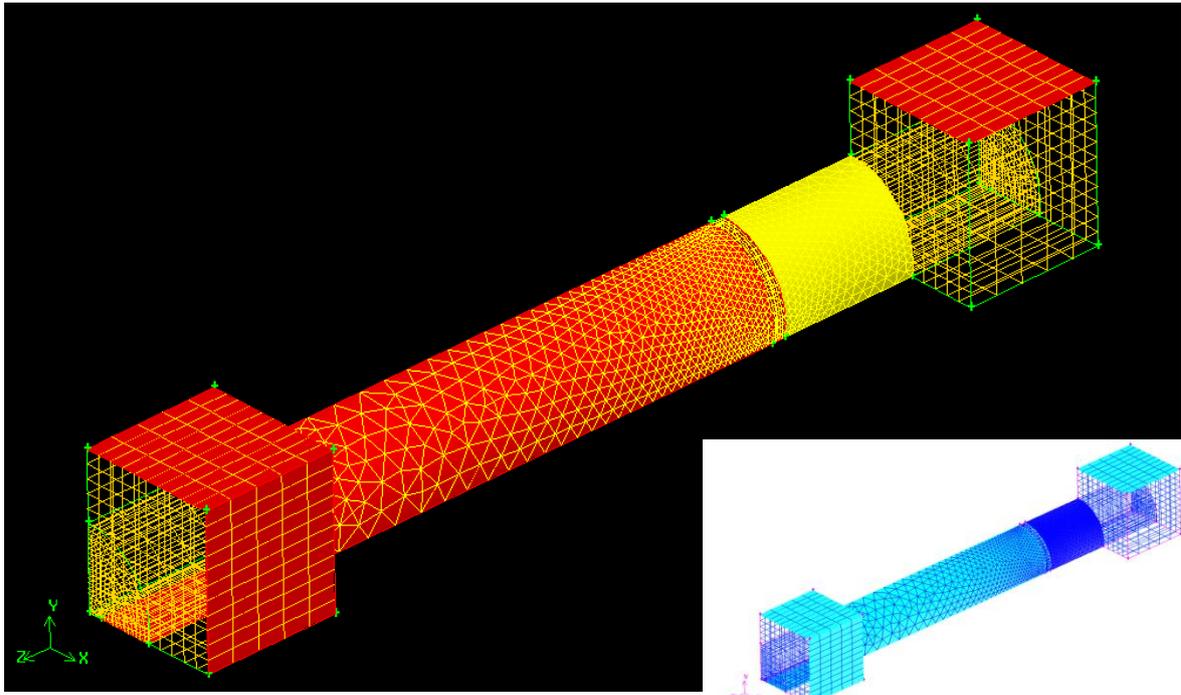


Figura 7.6 Disposición del tipo de mallado en una geometría de un túnel

Tipos de elementos de mallado y refinado

El software que vamos a utilizar (GAMBIT) permite mallar superficies o volúmenes y tiene también la opción de elegir la forma de los elementos de mallado. Para sistemas bidimensionales los elementos empleados pueden tener forma triangular o de cuadrilátero. En sistemas tridimensionales los elementos que se emplean son tetraedros, hexaedros, prismas o pirámides (figura 7.7).

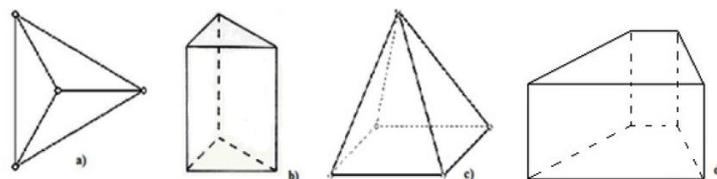


Figura 7.7. a) Tetraedro, b) Prisma, c) Pirámide, d) Hexaedro



A fin de reducir el error numérico de la solución se puede refinar el mallado manipulando parámetros y definiendo el tamaño de los elementos cerca de un punto, borde o superficie o en un subdominio (figuras 7.8 y 7.9). Tenemos varias opciones de refinado:

- Refinar el mallado mediante división de los elementos en dos o más elementos del mismo tipo.
- Refinar los elementos existentes por otros de mayor orden.
- Refinar mediante la división de los elementos en dos o más elementos en algunos lugares y reemplazados por elementos de mayor orden en otros lugares.

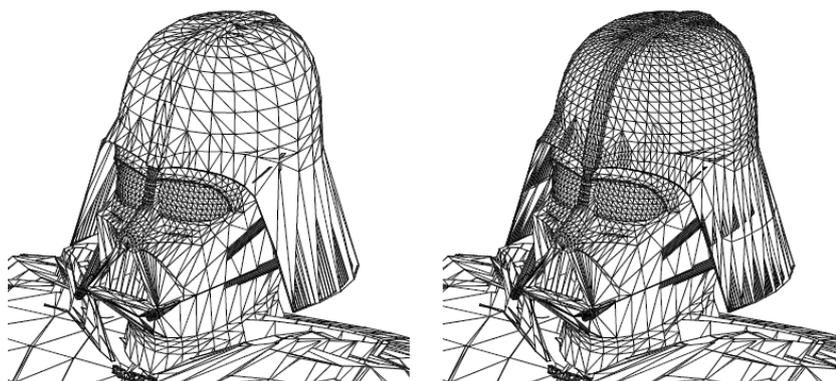


Figura 7.8. (a) Malla Original (b) Malla Refinada

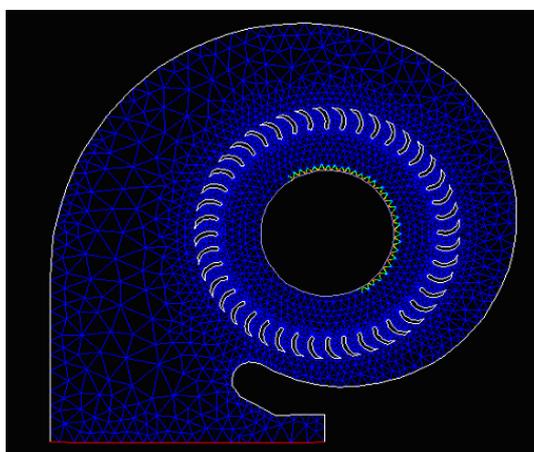


Figura 7.9. Mallado de una turbina axial refinada en 2D realizada con el programa GAMBIT

Para realizar la malla con el programa GAMBIT debemos seguir los siguientes pasos:

1. *Dibujar las geometría.*

Tenemos que determinar en los casos de estudio que geometrías se ajustan mejor al modelo que vamos a estudiar. En la mayor parte de los casos haremos uso de la configuración en 2D ya que nos va a aportar sencillez y rapidez en los cálculos,



dejando los estudios en 3D para escenarios de menor complejidad que demanden menos recursos del propio software y del hardware (ordenador). En la figura 7.10 se muestran los pasos a realizar con el programa GAMBIT para crear una geometría.

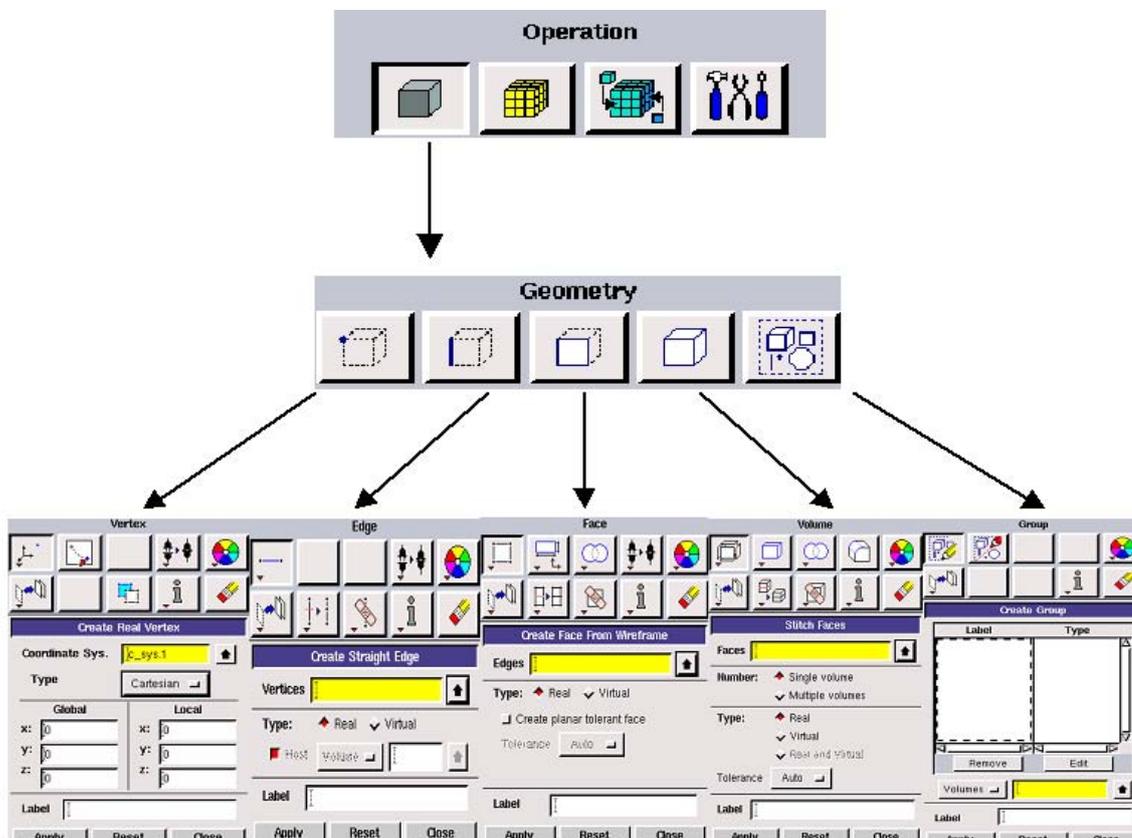


Figura 7.10. Barra de operaciones completa para la creación de la geometría con GAMBIT

2. Mallar la geometría

Finalizado el dibujo de la geometría debemos proceder al mallado de las mismas (figura 7.11). Utilizaremos diferentes escalas de mallado, siendo inferiores en las zonas críticas de estudio, es decir, debemos utilizar un mallado más denso en las zonas de estudio o críticas y refinándolo.

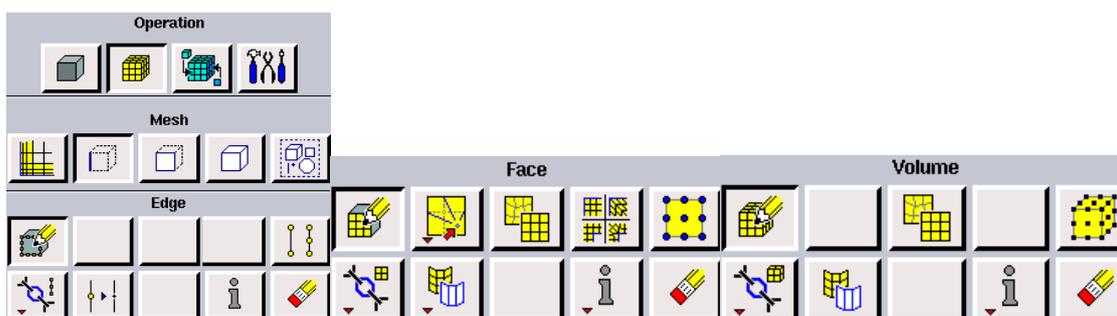


Figura 7.11. Barra de operaciones para la creación del mallado de la geometría con GAMBIT



Por último debemos escoger el tipo de malla en las celdas según vimos anteriormente para 2D y 3D.

En la figura siguiente (figura 7.12) se muestra la creación del mallado del silo de una torre de leche en polvo, así como de los ciclones. Los círculos azules sobre la geometría indican el equiespaciado del mallado.

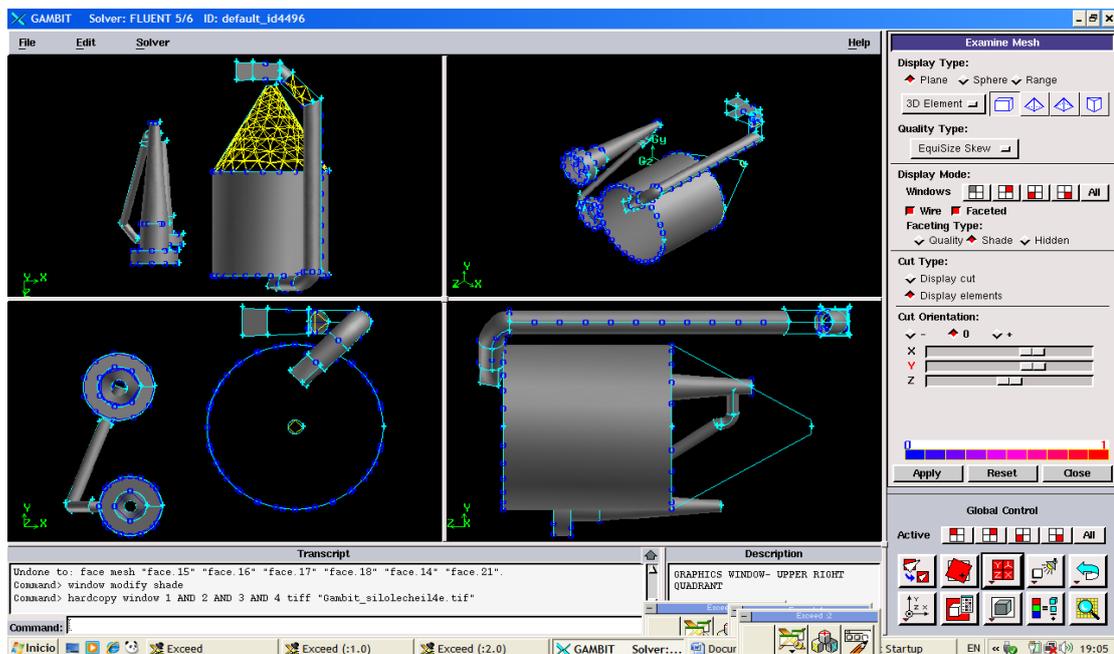


Figura 7.12. Mallado del silo y ciclones de la torre de leche en polvo

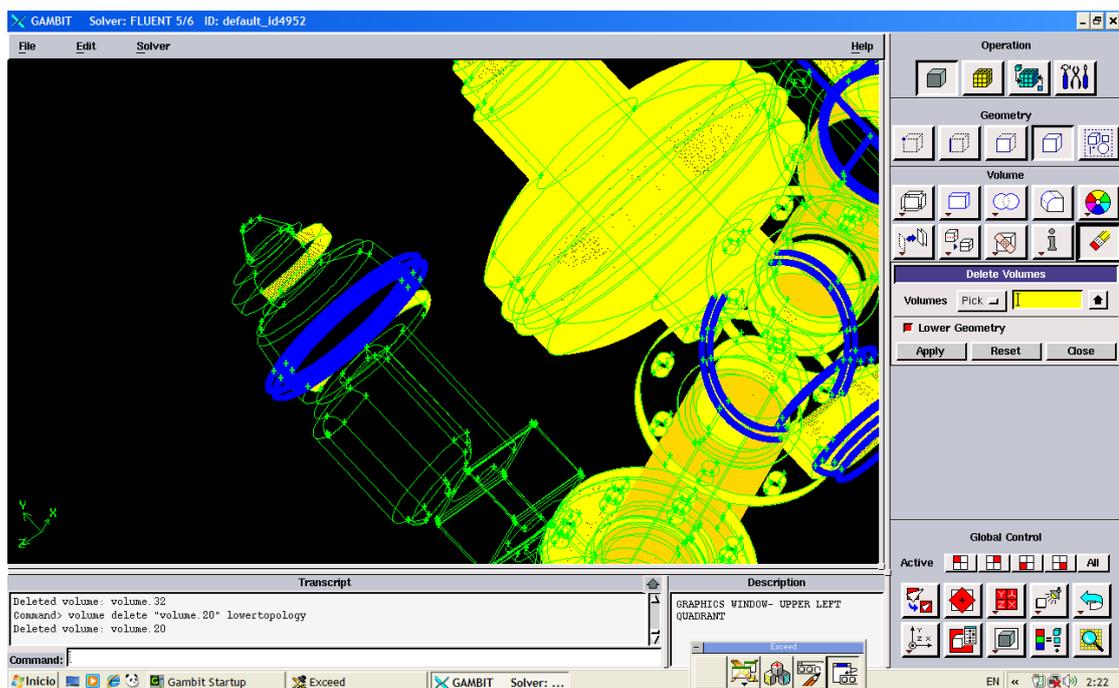


Figura 7.13. Mallado de las válvulas de una caldera de vapor



Las figuras 7.13 y 7.14 representan el mallado de las válvulas y circuito de quemador para una caldera de vapor. En ellas, puede apreciarse la compacticidad de la malla.

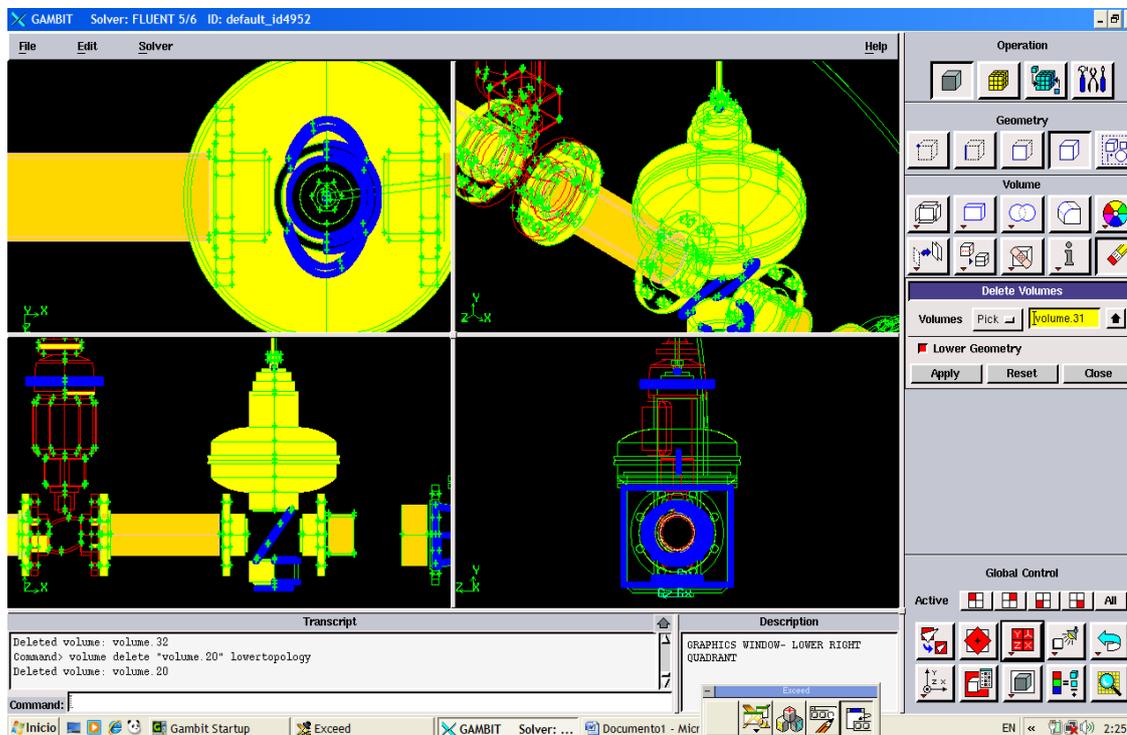


Figura 7.14. Mallado de las válvulas pertenecientes al circuito del quemador de una caldera

3. Definir las condiciones de contorno en las geometrías malladas.

Una vez tenemos la geometría dibujada y mallada debemos imponer sobre la misma las condiciones de contorno en cada zona de la geometría tal y como se muestra en la figura siguiente (figura 7.15).

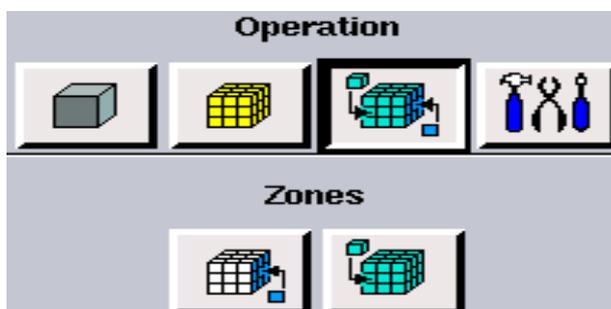


Figura 7.15. Cuadro de herramientas para la adición de condiciones de contorno con GAMBIT

En la figura 7.16 se muestra la geometría generada por GAMBIT del sistema vibrofluidificador de la sección de torre de leche en polvo y superpuestas figuran las condiciones de contorno impuestas.

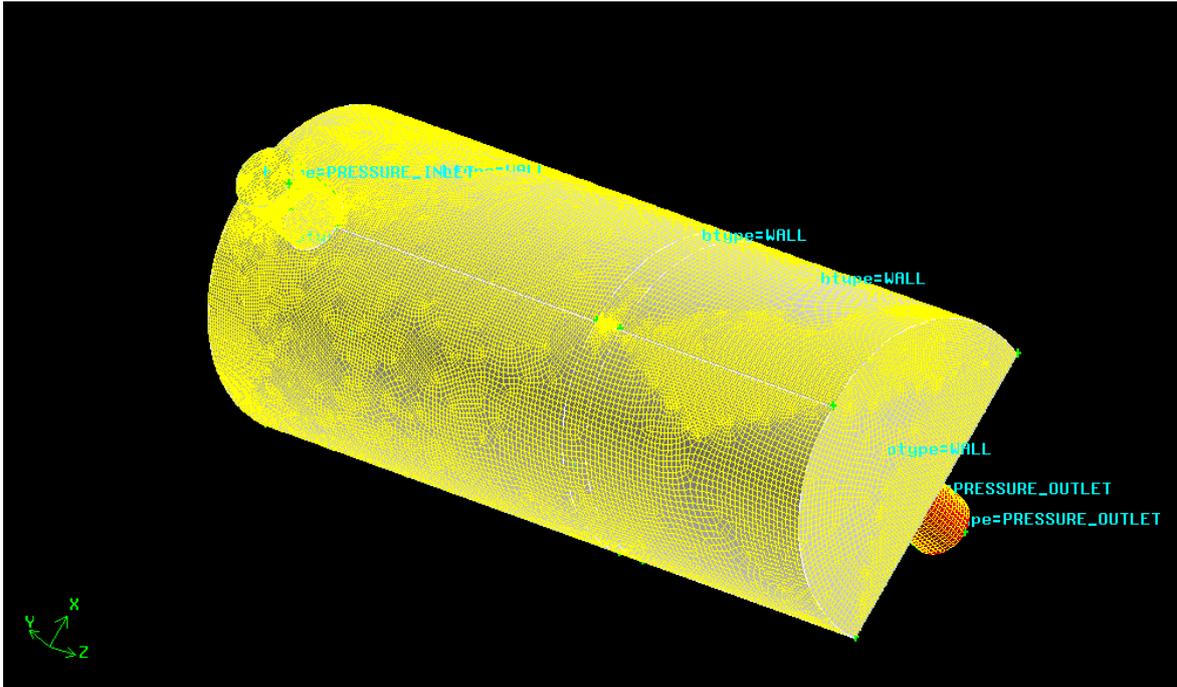


Figura 7.16. Mallado y condiciones de contorno impuestas sobre la geometría del vibrofluidicador de la sección de torre de leche en polvo en EUROSERUM IBÉRICA, S.L.

Realizado estos pasos podemos exportar la geometría mallada en formato *msh* bien sea como 2D ó 3D para poder aplicar el solver FLUENT.

7.1.1.4.2. Programa FLUENT

Una vez hemos definido las condiciones de contorno de la geometría a estudiar debemos exportar la malla y aplicar el solver (en nuestro caso FLUENT) que es el programa que va a implementar la geometría con sus condiciones de contorno, con las condiciones de fluido que deseemos imponer (incompresible, condiciones de turbulencia, etc.).

Las ecuaciones que rigen el comportamiento del sistema se resuelven en localizaciones discretas dentro de los dominios de flujo -método de elementos finitos (MEF)- mediante metodologías tipo Crack-Nicholson y similares, etc. Estas localizaciones se establecen en función del mallado. La exactitud de los cálculos y el tiempo de resolución requerido dependen de la solución del mallado.

Para que un ordenador pueda resolver las ecuaciones que describen el movimiento del fluido, éstas han de ser transformadas en expresiones algebraicas que sólo contengan números, combinados mediante operaciones sencillas, tales como sumar, restar y multiplicar.



La transformación de las ecuaciones diferenciales en su análogo numérico, es lo que se llama proceso de discretización numérica. Hay varias técnicas de discretización, dependiendo de los principios en que se basen. Las más usadas son: diferencias finitas, volúmenes finitos, y elementos finitos. Aquí, describimos el método de los volúmenes finitos, que es el utilizado por el programa FLUENT.

Método de los volúmenes finitos

Este método consiste fundamentalmente, en convertir las ecuaciones diferenciales en su análogo numérico, mediante una transformación física de las ecuaciones. Por ejemplo, la ecuación de la cantidad de movimiento puede ser considerada como una serie de flujos dentro de un volumen de fluido, junto con un término de fuente que es el gradiente de presiones.

Para mostrar la discretización, se crean volúmenes finitos (particiones del espacio) en la dirección x y, se fija la atención en el volumen n-ésimo por simplicidad. En la figura 7.18 se puede ver un volumen finito, o celda, típico donde el centro del volumen, punto P, es el punto de referencia en el que se quiere hallar el análogo numérico de la ecuación diferencial. Los puntos centrales de las celdas vecinas se denominan W y E (celda oeste y celda este). Las caras que delimitan la celda a un lado y a otro se denominan w y e (cara oeste y cara este).

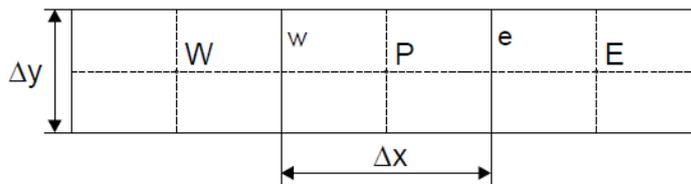


Figura 7.17. Celda de volumen finito

Supóngase que se quiere discretizar la derivada segunda siguiente $\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}$ (Ec. 7.7)

Hay que hacerlo a partir de las derivadas primeras en las caras que limitan la celda:

$$\left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}\right)_P = \frac{\left(\frac{\partial U}{\partial x_e}\right) - \left(\frac{\partial U}{\partial x_w}\right)}{x_e - x_w} \quad (\text{Ec. 7-8})$$

Las derivadas se calculan, a su vez, a partir de los valores de la variable U en los centro de las celdas vecinas:



$$\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)_e = \frac{U_E - U_p}{x_E - x_p} \quad (\text{Ec. 7.9}); \quad \left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)_w = \frac{U_p - U_w}{x_p - x_w} \quad (\text{Ec. 7.10})$$

Estas expresiones son utilizadas para implementar las derivadas de las ecuaciones en una celda cualquiera. De esta manera, se puede hallar el análogo numérico de las ecuaciones diferenciales para cada volumen finito, y después resolver el sistema de ecuaciones algebraicas que resulta. De la misma manera, pueden introducirse las condiciones de contorno, añadiendo términos fuente en las ecuaciones de las celdas correspondientes.

Fundamentos del flujo de fluidos

Sirven para solucionar iteraciones de CFD del flujo de fluidos y balances de energía, y están basadas en las ecuaciones de Navier Stokes. Los balances son generalizados, por eso el usuario puede influir en si añadir algunos elementos y cuales no. El número de balances a solucionar también es definido por el usuario.

Los balances generalizados que son usados en los paquetes comerciales CFD de FLUENT son las ecuaciones de Navier Stokes para la conservación de masa y momento, (cuando hay flujo laminar sin transferencia de calor). Se solucionan ecuaciones adicionales de transferencia de calor, mezcla de especies o reacción o ecuación de conservación de especies o bien modelos para los casos turbulentos.

- **Ecuaciones de Navier-Stokes**

- ❖ **Conservación de masa**

La ecuación general de conservación de masa (ecuación de continuidad), se define como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = S_m \quad (\text{Ec. 7 - 11})$$

El término S_m contiene la masa añadida por los cambios de gases.

Para las geometrías 2D simétricas, la ecuación de continuidad viene dada por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_r)}{\partial r} + \frac{\rho u_r}{r} = S_m \quad (\text{Ec. 7 - 12})$$

Donde x es la coordenada axial, r es la coordenada radial, u_x es la velocidad axial y u_r es la velocidad radial.



❖ **Conservación del momento**

La ecuación para la conservación del momento en la dirección i y en una referencia no acelerada viene dada por:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \eta_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (\text{Ec. 7-13})$$

En el balance de la ecuación 7.13, p es la presión estática, τ_{ij} es el tensión de tensión, g_i es la fuerza de la gravedad y F_i es un componente de las fuerzas externas; esto puede incluir fuerzas de interacción de fases, fuerzas centrífugas, fuerzas de Coriolis.

El tensor de tensiones para un fluido Newtoniano es definido:

$$\eta_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (\text{Ec. 7-14})$$

Aquí μ es la viscosidad molecular; el segundo término del lado de la derecha es debido al efecto de la dilatación del volumen.

Para las geometrías 2D simétricas, la ecuación de continuidad viene dada por:

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho u_x)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho u_r)}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \left(2 \frac{\partial u_x}{\partial x} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \bar{u}) \right) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial x} \right) \right] + F_x$$

y

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u_r)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho u_x)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho u_r)}{\partial r} = & -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \left(\frac{\partial u_r}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial r} \right) \right] + \\ & + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(2 \frac{\partial u_x}{\partial x} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \bar{u}) \right) \right] - 2\mu \frac{u_r}{r^2} + \frac{2}{3} \frac{\mu}{r} (\nabla \cdot \bar{u}) + \rho \frac{u_z^2}{r} + F_r \end{aligned} \quad (\text{Ec. 7-15})$$

donde:

$$\nabla \cdot \bar{u} = \frac{\partial u_x}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial x} + \frac{u_r}{r} \quad (\text{Ec. 7-16})$$



• **Modelos de turbulencia empleados en el programa FLUENT**

Un flujo puede ser laminar o turbulento atendiendo a su número de Reynolds. El que un flujo presente fenómeno de turbulencia implica que los campos de velocidad son fluctuantes. Estas fluctuaciones mezclan las cantidades transportadas, como la cantidad de movimiento, concentraciones de especies, energía, etc., y provocan que éstas también fluctuen. Las fluctuaciones puede ocurrir a pequeña escala y a alta frecuencia lo que dificulta el cálculo de las mismas. Para ello, las ecuaciones exactas se manipulan para obtener unas ecuaciones más sencillas de resolver, no obstante para simplificarlas es necesario el introducir incógnitas adicionales.

Existen bastantes modelos de turbulencia, pero no existe un modelo universal que nos sirva para cualquier tipo de problema. La elección de un modelo para resolver los problemas de turbulencia va a depender de las consideraciones efectuadas, características del flujo así como del nivel de precisión buscado en la solución y capacidad de cálculo de equipo informático.

A continuación vamos a ver los diferentes modelos de turbulencia con las ecuaciones completas que emplea el programa FLUENT y que vamos a utilizar para el estudio de las atmósferas explosivas.

❖ **Modelo k-ε estándar**

Este modelo fue propuesto por Launder y Spalding y es el modelo completo más simple de turbulencia. Es un modelo semi-empírico en el cual su ecuación deriva de las ecuaciones de Reynolds-Average de Navier-Stokes. Las mayores asunciones en este modelo es que se trata de un flujo totalmente turbulento y con efecto de la viscosidad negligible, además únicamente puede utilizarse para flujos totalmente turbulentos.

Con Reynolds Averaging las variables para solucionar las ecuaciones de Navier-Stokes son descompuestas en las componentes de significado u_i y las fluctuaciones u_i' . Este proceso se aplica a las ecuaciones de Navier-Stokes y, el resultado que se obtiene es:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \left(\frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial(-\rho \bar{u}_i' u_j')}{\partial x_j} \quad (\text{Ec. 7-17})$$



Las velocidades y otras soluciones son ahora representadas con los valores del tiempo de cálculo, los efectos de turbulencia son representadas por el “Stress de Reynolds”, $(-\rho \bar{u}_i' \bar{u}_j')$, que es modelado por la hipótesis de Bosussinesq:

$$-\rho \bar{u}_i' \bar{u}_j' = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \left(\frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) - \delta_{ij} \quad (\text{Ec. 7-18})$$

La viscosidad turbulenta, μ_t , es definida con k , la energía de turbulencia cinética (turbulent kinetic energy) y ε que es el factor de disipación y viene dada por:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (\text{Ec. 7-19})$$

Esta ecuación ha sido adaptada de las ecuaciones de transporte siguientes:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\zeta_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (\text{Ec. 7-20})$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\zeta_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \{ G_k + (1 - C_{3\varepsilon}) G_b \} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (\text{Ec. 7-21})$$

Donde G_b se define como la generación de la turbulencia cinética.

❖ Modelo k-w estándar

Este modelo está basado en el modelo **k-w Wilcox** que incorpora modificaciones para números de Reynolds bajos y compresibilidad. El modelo k-w estándar es un modelo empírico basado en las ecuaciones del modelo de transporte para la energía cinética turbulenta, k y el ratio de disipación específico w . También utiliza dos ecuaciones como el modelo k- ε . Las ecuaciones de transporte para este modelo son:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k + \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + Y_k + S_k \quad (\text{Ec. 7-22})$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i w)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_w + \frac{\partial w}{\partial x_j} \right) + G_w + Y_w + S_w \quad (\text{Ec. 7-23})$$

G_k es la generación de energía cinética turbulenta debido a los gradientes de velocidad media, y que se define como sigue:

$$G_k = \rho u_i u_j \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (\text{Ec. 7-24})$$



G_w es la generación de w , Γ_w y Γ_k representan la difusividad efectiva de w y de k respectivamente, Y_w y Y_k representa la disipación efectiva de w y de k debido a la turbulencia y S_w y S_k , son términos que los define el usuario.

Las difusividades efectivas para el modelo k - w , Γ_w y Γ_k , se calculan mediante:

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\zeta_k} \quad (\text{Ec. 7-25})$$

$$\Gamma_w = \mu + \frac{\mu_t}{\zeta_w} \quad (\text{Ec. 7-26})$$

Con ζ_w y ζ_k números de Prandtl turbulento para w y k respectivamente.

La viscosidad turbulenta μ_t se calcula como sigue:

$$\mu_t = \alpha^* \frac{\rho k}{w} \quad (\text{Ec. 7-27})$$

Donde α^* es el coeficiente que interfiere en la viscosidad turbulenta causando una corrección para números de Reynolds bajos

$$\alpha^* = \alpha_0^* \left(\frac{\alpha_0^* + Re_t/R_k}{1 + Re_t/R_k} \right) \quad (\text{Ec. 7-28})$$

Siendo los coeficientes y variables de la ecuación 7-28 los siguientes:

$Re_t = \frac{\rho k}{\mu w}$	$R_k = 6$	$\alpha_0^* = \frac{\beta_i}{3}$	$\beta_i = 0.072$
-------------------------------	-----------	----------------------------------	-------------------

Para números de Reynolds altos, el coeficiente $\alpha^* = \alpha_0^* = 1$

La generación de w , G_w , viene dada por:

$$G_w = \alpha \frac{\omega}{k} G_k \quad (\text{Ec. 7-29})$$

Donde el coeficiente α es:

$$\alpha = \frac{\alpha_0^*}{\alpha^*} \left(\frac{\alpha_0^* + Re_t/R_w}{1 + Re_t/R_w} \right) \quad (\text{Ec. 7-30})$$

con $R_w = 2.95$

La disipación de la energía de k se define:

$$Y_k = \rho \beta^* f_\beta \cdot k w \quad (\text{Ec. 7-31})$$



Siendo los términos de la Ec. 7-31 los que se reflejan en el cuadro siguiente:

$f_{\beta} = \begin{cases} 1 & \chi_k^2 \leq 0 \\ \frac{1+680\chi_k^2}{1+400\chi_k^2} & \chi_k^2 > 0 \end{cases}$	$\beta_i^* = \beta_{\infty}^* \left(\frac{4/15 + (Re_t/R_{\beta})^4}{1 + (Re_t/R_{\beta})^4} \right)$	$R_{\beta} = 8$
$\chi_k = \frac{1}{\omega^3} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial w}{\partial x_j}$		$\beta_{\infty}^* = 0.09$
$\beta^* = \beta_i^* [1 + \xi^* F(M_t)]$		$\xi^* = 1.5$

La disipación de w , Y_w se define:

$$Y_w = \rho \beta f_{\beta} \omega^2 \quad (\text{Ec. 7-32})$$

$f_{\beta} = \frac{1+70\chi_w}{1+80\chi_w}, \quad \chi_w = \frac{ \Omega_{ij}\Omega_{jk}S_{ki} }{(\beta_{\infty}^*\omega)^3}$	$\beta = \beta_i \left[1 - \frac{\beta_i^*}{\beta_i} \xi^* F(M_t) \right]$	$F(M_t) = \begin{cases} 0 & M_t \leq M_{t0} \\ M_t^2 - M_{t0}^2 & M_t > M_{t0} \end{cases}$
$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$		$M_t^2 = \frac{2k}{a^2}; \quad a(\text{velocidad sonido})$
$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$		$M_{t0} = 0.25$

Las constantes del modelo k-w estándar son:

$\alpha_{\infty}^* = 1$	$\beta_{\infty}^* = 0.09$	$R_k = 6$	$M_{t0} = 0.25$
$\alpha_{\infty} = 0.52$	$\beta_i = 0.072$	$R_{\omega} = 2.95$	$\zeta_k = 2.0$
$\alpha_0 = \frac{1}{9}$	$R_{\beta} = 8$	$\xi^* = 1.5$	$\zeta_{\omega} = 2.0$

❖ Modelo Spalart-Allmaras

Este modelo utiliza únicamente una ecuación para resolver el fenómeno de turbulencia. Esta ecuación es la de transporte que utiliza la variable $\bar{\nu}$ que es la viscosidad cinemática turbulenta y viene dada por:

$$\frac{\partial(\rho\bar{\nu})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\bar{\nu}u_i)}{\partial x_i} = G_{\bar{\nu}} + \frac{1}{\zeta_{\bar{\nu}}} \left[\frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ (\mu + \rho\bar{\nu}) \frac{\partial \bar{\nu}}{\partial x_i} \right\} + C_{b2}\rho \left(\frac{\partial \bar{\nu}}{\partial x_j} \right)^2 \right] - Y_{\bar{\nu}} + S_{\bar{\nu}} \quad (\text{Ec. 7-33})$$



G_v es la producción de viscosidad turbulenta, Y_v es la destrucción de viscosidad turbulenta (fenómeno que ocurre cerca de la región cercana a la pared debido al efecto de bloqueo de la pared), $S_{\tilde{v}}$ es el término fuente definido por el usuario, C_{b2} y $\zeta_{\tilde{v}}$ son constantes y ν es la viscosidad cinética molecular.

La viscosidad turbulenta μ_t viene dada por:

$$\mu_t = \rho \tilde{\nu} f_{v1} \quad (\text{Ec. 7-34})$$

La función viscosa f_{v1} se determina por:

$$f_{v1} = \frac{\chi^3}{\chi^3 + C_{v1}^3} \quad (\text{Ec. 7-35}); \text{ con } \chi = \frac{\tilde{\nu}}{\nu} \quad (\text{Ec. 7-36})$$

El término de producción, G_v viene dado por:

$$G_v = C_{b1} \rho \tilde{S} \tilde{\nu} \quad (\text{Ec. 7-37}) \text{ con } \tilde{S} = S + \frac{\tilde{\nu}}{\kappa^2 + d^2} f_{v2} \quad (\text{Ec. 7-38})$$

$f_{v2} = 1 - \frac{\chi}{1 + \chi f_{v1}}$	<p>C_{b1} y $\kappa = \text{ctes}$, $S =$ medida escalar del tensor deformación $S = \sqrt{2\Omega_{ij}\Omega_{ij}}$, $\Omega_{ij} =$ tensor medio del ratio de rotación $\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$</p>
---	---

El término de destrucción Y_v , viene dado por:

$$Y_v = C_{w1} \rho f_w \left(\frac{\tilde{\nu}}{d} \right)^2 \quad (\text{Ec. 7-39})$$

$f_w = g \left[\frac{1 + C_{w3}^6}{g^6 + C_{w3}^6} \right]$	$g = r + C_{w2} (r^6 - r)$	$r = \frac{\tilde{\nu}}{\tilde{S} \kappa^2 d^2}$
--	----------------------------	--

C_{w1} , C_{w2} y $C_{w3} = \text{ctes}$ y \tilde{S} viene definida en la ecuación 7-38.

Las constantes del modelo Spalart-Allmaras tienen los valores por defecto los siguientes:

$C_{b1} = 0.1355$	$C_{b2} = 0.622$	$\zeta_{\tilde{v}} = 2/3$	$C_{v1} = 7.1$
$C_{w1} = \frac{C_{b1}}{\kappa^2} + \frac{(1 + C_{b2})}{\zeta_{\tilde{v}}}$	$C_{w2} = 0.3$	$C_{w3} = 2.0$	$\kappa = 0.4187$



• **Ecuación de Energía**

La ecuación de energía en FLUENT se soluciona mediante la ecuación para el transporte de la temperatura estática. La ecuación de la temperatura se obtiene de la ecuación de la entalpía, y sólo se soluciona en casos especiales, tomando como variable dependiente la temperatura. La ecuación de entalpía se define como:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i h)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (k + k_t) \frac{\partial T}{\partial x_i} - \frac{\partial \sum_j h_j J_j}{\partial x_i} + \frac{Dp}{Dt} + (\eta_k)_{\text{eff}} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} + S_h \quad (\text{Ec. 7-40})$$

En esta ecuación S_h , incluye el calor de la reacción química y k_t es el intercambio de calor k_t que se define como la conductividad debida al transporte turbulento

$$k_t = \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \quad (\text{Ec. 7-41})$$

La entalpía h se define como,

$$h = \sum_j m_j h_j \quad (\text{Ec. 7-42}); \quad \text{con} \quad h_j = \int_{T_{\text{ref}}}^T C_{p,j} dT \quad (\text{Ec. 7-43})$$

y donde m_j es la masa de las especies j

• **Ecuaciones de Transporte de Especies**

El programa FLUENT permite solucionar las ecuaciones de transporte de especies químicas, el programa predice la fracción másica para cada especie Y_i . Para ello se resuelve la ecuación de convección-difusión para cada especie, esta ecuación de conservación viene dada por:

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla(\rho \bar{u} Y_i) = -\nabla \cdot \bar{J}_i + R_i + S_i \quad (\text{Ec. 7-44})$$

Donde \bar{J}_i es el flujo de difusión de la especie i , R_i es el factor neto de deformación de la especie i en la reacción química, S_i es un factor añadido por la adicción de las fases dispersas.

- Difusión de Masa en flujos laminares

En este caso FLUENT utiliza por defecto la aproximación para \bar{J}_i la expresión siguiente:

$$\bar{J}_i = -\rho D_{i,m} \nabla Y_i \quad (\text{Ec. 7-45})$$

donde $D_{i,m}$ es el coeficiente de difusión de la especie i en la mezcla



□ Difusión de Masa en flujos turbulentos

En flujos turbulentos, la difusión de masa obedece a la fórmula:

$$\vec{J}_i = \left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{S_{ct}} \right) \nabla Y_i \quad (\text{Ec. 7 - 46})$$

S_{ct} es el número turbulento de Schmidt, $S_{ct} = \left(\frac{\mu_t}{\rho D_t} \right)$ con μ_t viscosidad turbulenta y D_t difusividad turbulenta. Se considera por defecto $S_{ct} = 0,7$.

□ Tratamiento del Transporte de Especies en la Ecuación de Energía

Para muchos flujos con mezcla de varios componentes de varios componentes, el transporte de la entalpía es debida a la difusión de especies:

$$\nabla \left[\sum_{i=1}^n h_i \vec{J}_i \right] \quad (\text{Ec. 7 - 47})$$

Lo cual puede tener un efecto importante en la entalpía y debería no ser negligible. En particular cuando interviene el número de Lewis

$$Le_i = \frac{k}{\rho c_p D_{im}} \quad (\text{Ec. 7 - 48})$$

□ Formulación general para la simulación de reacciones

El factor de la reacción que aparece en la ecuación del transporte de especies se solventa mediante el programa FLUENT con uno de los siguientes modelos:

- Laminar finite-rate model.
- Eddy-dissipation model.
- Eddy-dissipation-concep (EDC) model.

A la hora de seleccionar uno de estos tres modelos debemos tener en cuenta los costosos cálculos cinéticos químicos de Arrhenius que utiliza el modelo EDC, siendo preferible optar por el modelo Eddy-dissipation model donde el factor de reacción que se asume es controlado por la turbulencia.

7.2. Procedimiento para evaluar las atmósferas explosivas por polvos

El procedimiento que vamos a utilizar para evaluar las atmósferas explosivas por polvos es la utilización del código FLUENT como anteriormente hemos expuesto recreando diferentes escenarios para la cámara de secado con diferentes condiciones iniciales y de contorno. Por otra parte, vamos a determinar mediante las normas NFPA 68 y EN 14491



y el programa comercial LPG vent las dimensiones de un panel “teórico” de venteo para la cámara y así poder comparar los resultados con el programa de simulación.

Una de las futuras líneas de investigación se establece en colaboración con la Universidad de León y la utilización del software específico DESC (figura 7.18) para simulación de explosiones por polvos. Este software se ha desarrollado a partir de los ensayos realizados en la esfera de 20 litros que permiten obtener los datos necesarios para la simulación de la combustión y las fracciones de combustible quemable.

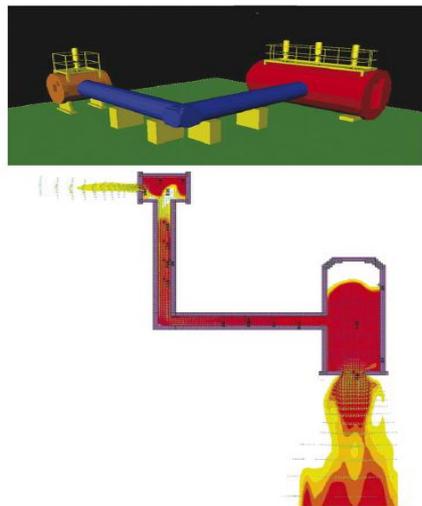


Figura 7.18. Simulación con DESC de la explosión de carbón en dos cilindros

7.3. Determinación de las fuentes de ignición mediante la técnica de la termografía

Como ya indicamos en el capítulo 3 la termografía es una herramienta en auge con multitud de aplicaciones, permite inspeccionar edificios (daños por humedad y agua, deficiencias de aislamiento, corrientes de aire, conectores oxidados, etc.), es de aplicación a las instalaciones eléctricas y en nuestro caso vamos a utilizar esta técnica para determinar fuentes de ignición en la empresa objeto de estudio mediante el empleo de una cámara FLIR E60. Veamos algunos conceptos sobre la teoría de la termografía.

7.3.1. Teoría de la termografía

➤ Introducción

La termografía es un método de inspección de equipos eléctricos y mecánicos mediante la obtención de imágenes de su distribución de temperatura. Este método de inspección se basa en que la mayoría de los componentes de un sistema muestran un incremento de temperatura en mal funcionamiento. El incremento de temperatura en un circuito eléctrico podría deberse a una mala conexión o problemas con un rodamiento en caso de



equipos mecánicos. Observando el comportamiento térmico de los componentes pueden detectarse defectos y evaluar su seriedad.

➤ **El espectro electromagnético**

Cualquier objeto emite energía electromagnética. La cantidad de energía está relacionada con la temperatura del objeto. La cámara de termografía puede determinar la temperatura sin contacto físico con el objeto midiendo la energía emitida.

La energía procedente de un objeto caliente se emite a distintos niveles en el espectro electromagnético. En la mayoría de las aplicaciones industriales se utiliza la energía radiada en el espectro infrarrojo para medir la temperatura del objeto. La figura 7.19 muestra los diferentes espectros electromagnéticos donde se emite energía incluyendo Rayos X, Ultra Violeta, Infrarrojo y Radio. Se emite en forma de onda y viaja a la velocidad de la luz. La única diferencia entre ellas es su longitud de onda que está relacionada con la frecuencia.

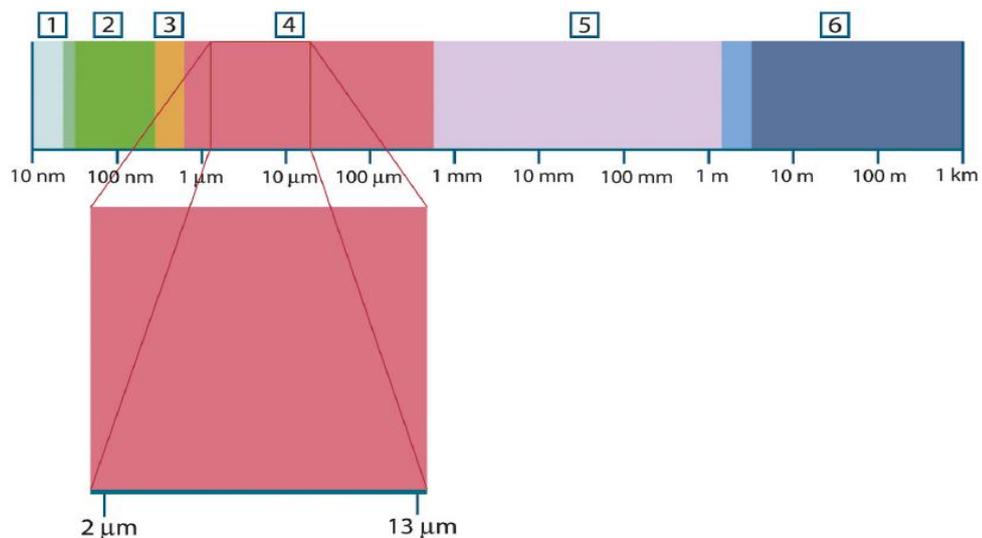


Figura 7.19. Espectro electromagnético con indicación de las diferentes regiones, a saber: 1: rayos X, 2: Ultravioleta, 3: Luz visible, 4: Infrarrojos, 5: Microondas y 6 Ondas de radio

La gran mayoría de la medida de temperatura infrarroja se realiza en el rango de 0.2 a 20 micras. Aunque las emisiones no pueden detectarse por una cámara normal, la cámara térmica puede enfocar esta energía a través de un sistema óptico hacia el detector de forma similar a la luz visible. El detector convierte la energía infrarroja en tensión eléctrica, que después de amplificarse y de un complejo procesamiento de la señal, se utiliza para construir una imagen térmica en el visor del operador montado en la cámara de termografía.



Habitualmente la banda infrarroja, se subdivide a su vez en cuatro bandas menores cuyos límites son igualmente arbitrarios.

- *infrarroja cercana* (0,75–3 μm).
- *infrarroja media* (3–6 μm).
- *infrarroja lejana* (6–15 μm).
- *infrarroja extrema* (15–100μm).

➤ Radiación de un cuerpo negro

Se define cuerpo negro como aquel objeto que absorbe toda la radiación que incide sobre él con cualquier longitud de onda. Independiente de su nombre, el cuerpo negro emite luz y constituye un modelo ideal físico para el estudio de la emisión de radiación electromagnética. El nombre *Cuerpo negro* fue introducido por Gustav Kirchhoff en 1862. La luz emitida por un cuerpo negro se denomina *radiación de cuerpo negro*.

Todo cuerpo emite energía en forma de ondas electromagnéticas, siendo esta radiación, que se emite incluso en el vacío, tanto más intensa cuando más elevada es la temperatura del emisor. La energía radiante emitida por un cuerpo a temperatura ambiente es escasa y corresponde a longitudes de onda superiores a las de la luz visible (es decir, de menor frecuencia). Al elevar la temperatura no sólo aumenta la energía emitida sino que lo hace a longitudes de onda más cortas; a esto se debe el cambio de color de un cuerpo cuando se calienta. Los cuerpos no emiten con igual intensidad a todas las frecuencias o longitudes de onda, sino que siguen la ley de Planck.

➤ Ley de Planck

Recibe el nombre en honor a Max Planck (1858-1947) que describió la distribución espectral de la radiación de un cuerpo negro

$$W_{\lambda b} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda KT} - 1)} 10^{-6} [\text{Watt/m}^2] \quad (\text{Ec. 7 - 49})$$

Donde:

- $W_{\lambda b}$: emitancia radiante espectral del cuerpo negro con una longitud de onda λ .
- c : velocidad de la luz = 3×10^8 m/s.
- h : constante de Planck = $6,6 \times 10^{-34}$ J/s.
- T : temperatura absoluta K de un cuerpo negro.
- K : constante de Boltzmann = $1,4 \times 10^{-23}$ J/K.
- λ : longitud de onda (μm).



Si representamos gráficamente la fórmula de Planck para diferentes temperaturas, obtenemos una familia de curvas, donde en cada una de éstas podemos observar que la emitancia espectral tiende a cero cuando $\lambda=0$; posteriormente la emitancia aumenta rápidamente cuando la longitud de onda es $\lambda_{m\acute{a}x}$ y si superamos este punto, se aproxima al cero de nuevo con longitudes de onda muy largas. Como podemos observar en las figura siguiente (figura 7.20) cuanto más elevada es la temperatura, más corta es la longitud de onda según la cual se establece el punto máximo.

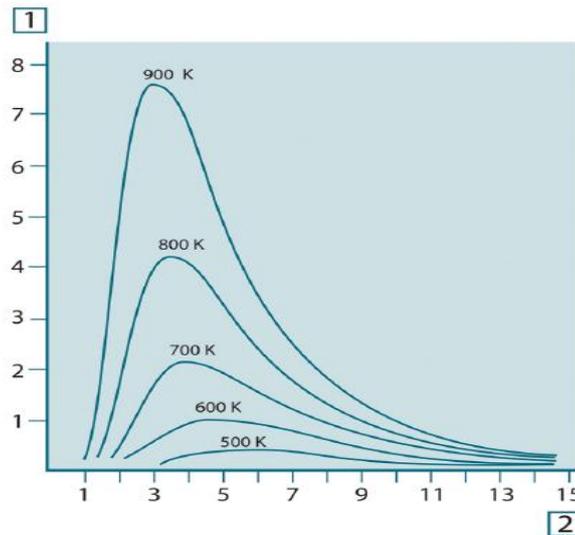


Figura 7.20. Distribución de la emitancia radiante espectral según la Ley de Planck para diferentes temperaturas. Eje ordenadas 1: emitancia espectral en $(W/cm^2 \times 10^3 \text{ } (\mu m))$ y eje de abscisas 2: longitud de onda en μm

➤ **Ley de Wien**

Si diferenciamos la ecuación 7-49 de la fórmula de Planck y determinamos su máximo, obtenemos la fórmula de Wien (Wilhem Wien, 1864-1928):

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{2898}{T} [\mu m] \quad (\text{Ec. } 7-50)$$

La fórmula de Wien expresa de forma matemática la observación normal de que los colores varían pasando del rojo al naranja o amarillo a medida que aumenta la temperatura del objeto radiante térmico. La longitud de onda del color es la misma que la longitud calculada para $\lambda_{m\acute{a}x}$. Así, para el sol (cuya temperatura en superficie es aproximadamente 6000 K) que emite una luz amarilla su pico se sitúa aproximadamente en 0,5 μm en el centro del espectro de luz visible.



Para una temperatura ambiente de 300 K, la emitancia radiante se sitúa en aproximadamente con 9,7 μm en el infrarrojo lejano.

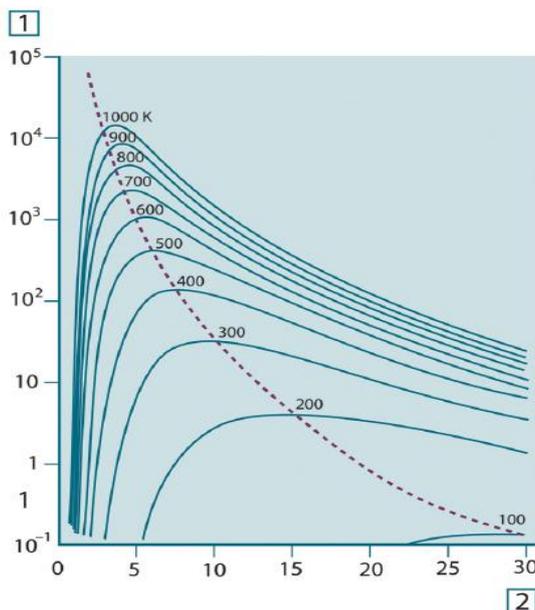


Figura 7.21. Distribución de la emitancia radiante espectral según la Ley de Planck para temperaturas desde 100 K a 1000 K. La línea discontinua indica el lugar de máxima emitancia radiante para cada una de las temperaturas según la Ley de Wien. Eje ordenadas 1: emitancia espectral en $(\text{W}/\text{cm}^2 (\mu\text{m}))$ y eje de abscisas 2: longitud de onda en μm

➤ Ley de Stefan-Boltzmann

Al integrar la fórmula de Planck

$$W_b = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda KT} - 1)} 10^{-6} d\lambda \Rightarrow W_b = \zeta T^4 \quad (\text{Ec. } 7-51)$$

Lo que obtenemos es la fórmula de Stefan-Boltzmann (Josef Stefan, 1835-1893 y Ludwig Boltzmann, 1844-1906), según la cual se establece que la radiancia intrínseca de un cuerpo negro es proporcional a la potencia cuarta de su temperatura absoluta. W_b representa el área por debajo de la curva de Planck para una temperatura dada.

Si utilizamos la fórmula de Stefan-Boltzmann para determinar la potencia radiada por un cuerpo humano a una temperatura de 300 K y para una superficie externa (área) aproximada de 2 m^2 , obtenemos 1kW. Esta pérdida de energía de energía se compensa con la absorción de radiación de las superficies circundantes.



➤ Emisores que no constituyen cuerpos negros

Existen tres procesos que pueden producirse y que evitan que un objeto real se comporte como un cuerpo negro: una fracción de la radiación incidente α puede absorberse, otra fracción ρ puede reflejarse y una última fracción τ puede transmitirse. Como todos estos factores dependen de la longitud de onda en mayor o menor medida, se suele utilizar el subíndice λ para denotar la dependencia espectral de sus definiciones. Por lo tanto:

- La absorbancia espectral α_λ es igual a la proporción de energía radiante espectral absorbida con respecto a la que incide sobre él.
- El factor espectral de reflexión ρ_λ es igual a la proporción de energía radiante espectral reflejada por un objeto con respecto a la que incide sobre él.
- La transmitancia espectral τ_λ es igual a la proporción de la energía radiante espectral transmitida a través de un objeto con respecto a la que incide sobre él.

La suma de los tres factores debe coincidir con el total, así:

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1 \quad (\text{Ec. } 7-52)$$

Para materiales opacos tenemos que $\tau_\lambda=0$, por lo tanto la relación se simplifica a:

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda = 1 \quad (\text{Ec. } 7-53)$$

También tenemos que tener en cuenta otro factor que es la emisividad, que es necesario para describir la fracción ϵ de la emitancia radiante de un cuerpo.

7.3.2. Cámara termográfica FLIR E60

El equipo que vamos a utilizar para realizar el análisis termográfico de las fuentes de ignición es una cámara termográfica modelo FLIR E 60 (foto 7.1) tal y como hemos indicado en el capítulo 5.



Foto 7.1. Equipo FLIR E60



Las partes y elementos de la cámara FLIR E60 son las que se muestran en las figuras 7.22, 7.23 y 7.24.

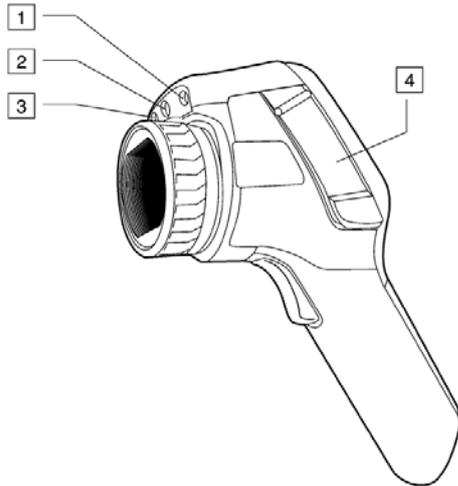


Figura 7.22. Vista izquierda de la cámara

1. Puntero láser
2. Lámpara para la cámara digital
3. Cámara digital
4. Cubierta de los conectores:
 - Tarjeta memoria.
 - Salida de vídeo

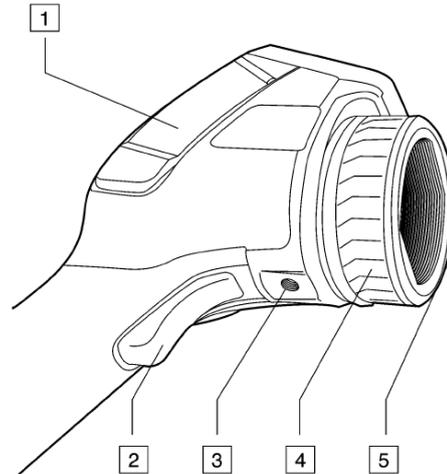


Figura 7.23. Vista derecha de la cámara

1. Cubierta del comportamiento conectores: (USB-A, USB mini-B, alimentación)
2. Disparador para imágenes.
3. Montura para el trípode
4. Anilla de enfoque.
5. Lente de infrarrojos.

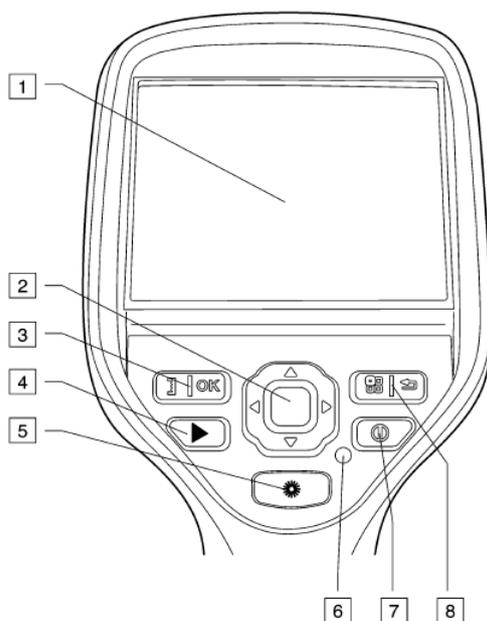


Figura 7.24. Teclado de la cámara FLIR E60

1. Pantalla táctil LCD
2. Mando de navegación.
 - Botón para confirmar elecciones.
 - Botón para cambiar entre los nodos de ajuste manual y automático
3. Botón de navegación
4. Archivo de imágenes.
5. Botón para utilizar el puntero láser,
6. Indicación de alimentación.
7. Botón de encendido.
8. Botón para mostrar el sistema de menús.



En la figura siguiente (figura 7.25) se muestra los elementos de la pantalla de la cámara FLIR E60 y en la tabla 7.5 se explican los elementos que figuran en la misma.



Figura 7.25. Elementos de la pantalla de la cámara FLIR E60

ELEMENTOS DE LA PANTALLA FLIR E60	
1	Tabla de resultados de medición
2	Herramientas de medida (por ejemplo, puntero de medida)
3	Iconos de estado y modo
4	Escala de temperatura
5	Modo de configuración
6	Grabación en modo de vídeo
7	Modo de cámara/modo de imagen en vivo
8	Modo de presentación (cámara de infrarrojos, cámara digital, fusión térmica, imagen dentro de imagen)
9	Herramientas de medida
10	Paletas de colores
11	Parámetros de medida
12	Zoom

Tabla 7.5. Elementos de la pantalla de la cámara FLIR E60



La cámara FLIR E60 permite además de tomar imágenes termográficas propiamente dichas (fotos 7.2 y 7.3) el trabajar con los modos de fusión térmica y de imagen dentro de imagen.

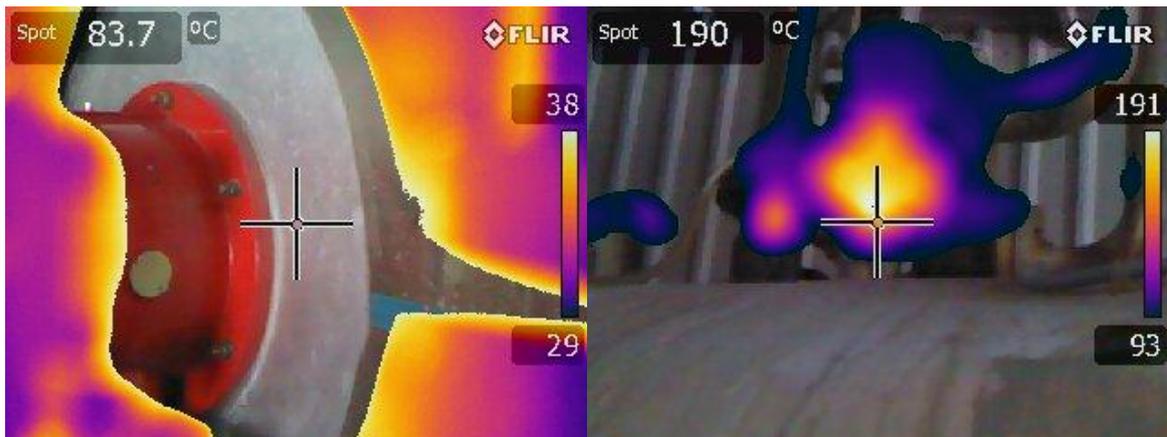
- **Fusión térmica:** función que permite mostrar parte de una fotografía digital como una imagen de infrarrojos (fotos 7.6 y 7.7). Se puede configurar la cámara para se muestre en infrarrojos todas las áreas de una imagen que tenga una determinada temperatura, y que muestre todas las demás como una foto digital.
- **Imagen dentro de imagen:** es una función similar a la fusión térmica en tanto que permite mostrar parte de un a fotografía digital como una imagen de infrarrojos. No obstante la imagen dentro de la imagen (fotos 7.8 y 7.9) muestra un marco de imagen de infrarrojos sobre una fotografía digital. Esta función es útil a la hora de identificar elementos muy similares cuya imagen “sólo” termográfica nos complicaría la discriminación de los elementos a analizar.



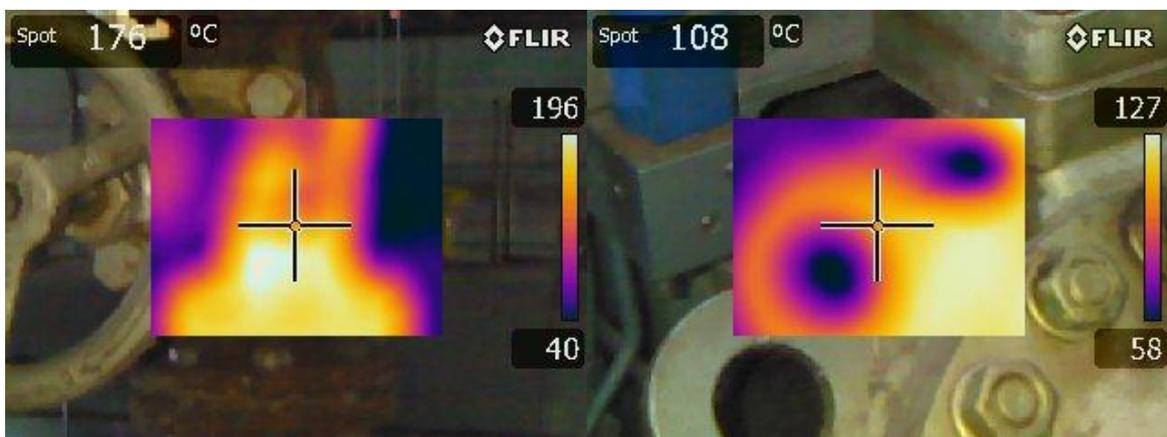
Fotos 7.2 y 7.3: imágenes termográficas; izquierda: parte superior de la cámara de secado, derecha: pico del silo de la cámara-entrada al vibrofluidificador



Fotos 7.4 y 7.5. Imágenes tomadas de con la cámara FLIR E 60



Fotos 7.6 y 7.7. Imágenes fusionadas térmicamente en la sala de caldera, izquierda: quemador caldera, derecha: chimenea salida de vapor



Fotos 7.8 y 7.9. Imágenes dentro de imágenes obtenidas con la cámara FLIR E 60. Izq: válvula apertura en la sala de calderas, derecha: cuerpo del compresor de balsa de agua helada

En el capítulo siguiente se presentan las imágenes térmicas en diferentes modos de las fuentes de ignición más importantes de la empresa EUROSERUM IBÉRICA, S.L.

CAPITULO 8. APLICACIÓN DE LOS NUEVOS PROCEDIMIENTOS PROPUESTOS A LA INDUSTRIA LÁCTEA EUROSERUM IBÉRICA, S.L.

En nuestro caso de estudio y después de haber desclasificado la EDAR, tenemos las zonas ATEX que se muestran en la figura siguiente y que son:

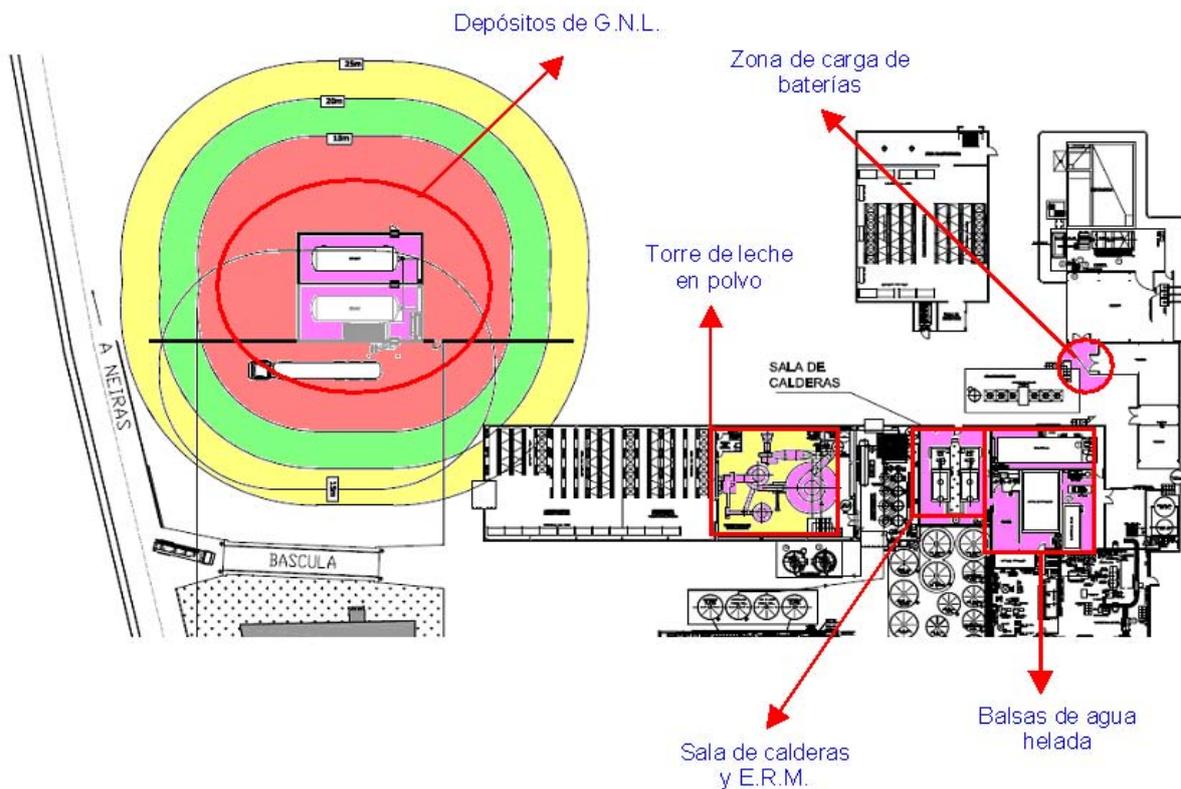


Figura 8.1. Disposición de las zonas de estudio ATEX en EUROSERUM IBÉRICA, S.L.

- DEPÓSITOS DE GNL.
- SALA DE CALDERAS.
- ZONA DE FRÍO (BALSAS DE AGUA HELADA).
- ZONA DE GARGA DE BATERÍAS.
- TORRE DE LECHE EN POLVO.

A continuación analizamos cada una de ellas con las metodologías propuestas.

8.1. Metodología según norma UNE 60079-10

8.1. 1. Depósitos de GNL

Las características de las sustancias utilizadas son las que se recogen en la tabla siguiente (tabla 8.1).



Sustancia inflamable			LIE			Volatilidad			
Nº	Nombre	Composición	Pto. inflam.	kg/m ³	Vol%	Tensión vapor 20°C (kPa)	Pto. ebullición °C	Densidad relativa respecto aire	T ^a autoignición (°C)
1	Gas Natural	CH ₄ y otros	-	0,033	4,4	-	-161,4	GNL-446 kg/m ³ Gas-0,77 kg/m ³	580
2	Odorizante	THT tetrahidrotiofeno	-	0,033	1,1	1,9	120,9	3,04	202

Tabla 8.1. Características de inflamabilidad de los productos que intervienen en el proceso

Cálculos para la clasificación del emplazamiento

Evaluación del grado ventilación

El cálculo del grado de ventilación se realiza atendiendo a la cuantía de las fugas de gas estimadas en base a la experiencia de la explotación y conservación de las instalaciones criogénicas de GNL. También, vamos a determinar el tiempo de permanencia de los escapes.

A continuación se especifican las fuentes de escape y su grado:

Primarios	Secundarios
Venteo de cisterna	Fugas de líquido por empaquetaduras o juntas de válvulas criogénicas
Venteos de tanque y escape de válvulas de seguridad de depósito	Fugas de líquido por bridas o poros
Escape de válvula de seguridad en línea de regulación de gas	Fugas de gas por bridas o poros
Desconexión de mangueras	Fugas de gas en conexiones de instrumentos y accesorios de tuberías
	Purgas de gas en tramos

Tabla 8.2. Características de las fuentes de escape en las zonas de estudio

La estimación de las tasas de escape varía considerablemente en los del tipo primario, cuyo cálculo se efectúa individualmente, no así en los secundarios, cuyo caso más desfavorable es el de fuga de líquido por empaquetaduras o juntas de válvulas criogénicas y/o el de fugas de líquidos por las bridas.



a) Venteos de cisterna

Determinación del volumen de gas de cisterna

$$V_e = V_c K_p K_t K_z = 299,7 \text{ N/m}^3 \text{ (a ventear)}$$

Siendo:

- $K_p = 3,5$
- $K_t = 273/153 = 1,78$
- $K_z = 1$
- $V_c = 48$

Partiendo del volumen de gas calculado, calculamos a hora el grado de ventilación atendiendo a:

- Sustancia inflamable: gas metano.
- Fuente de escape: venteo.
- $LIE = 0,033 \text{ kg/m}^3$.
- Grado de escape: primario.
- Factor de seguridad: 0,25.
- Condiciones en el interior de la cisterna: -165°C de T^a y 7 bar de presión.
- Tasa de escape $dG/dt(E_{\text{máx}})$: $0,0911 \text{ kg/s}$.
- Instalación tipo: exterior.
- Resultante renovaciones diaria: $3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$.
- Temperatura ambiente (20°C). 293K.

Cálculo del caudal volumétrico mínimo de aire fresco

$$\left(\frac{dV}{dt}\right)_{\min} = \left[\frac{E_{\max}}{k \times LIE}\right] \left(\frac{T}{293}\right) = \left[\frac{0,0911}{0,25 \times 0,033}\right] \left(\frac{T}{293}\right) = 10,82 \text{ m}^3/\text{s} \quad (\text{Ec.8 - 1})$$

Cálculo del volumen teórico V_z

$$V_z = \left[f \times \left(\frac{dV}{dt}\right)_{\min} \right] / c = \frac{[3 \times 10,82]}{0,03} = 1082 \text{ m}^3 \rightarrow r = \sqrt[3]{\left[\frac{V_z}{(4/3)\pi}\right]} \approx 6,5 \text{ m} \quad (\text{Ec.8 - 2})$$

Cálculo del tiempo de permanencia

$$t = \left(\frac{-f}{c}\right) \ln \left[\frac{LIE \times K}{x_o}\right] = \left(\frac{-3}{0,03}\right) \ln \left[\frac{5 \times 0,25}{100}\right] = 438,2 \text{ s} \quad (\text{Ec.8 - 3})$$

donde x_o es la concentración inicial de gas natural en %.



b) Venteos de tanque y escape de válvulas de seguridad del depósito

El caso más desfavorable de este escape es cuando se produce la apertura de las dos válvulas de seguridad de que dispone el depósito, pues se suman los dos escapes. Este venteo es mucho mayor que el venteo manual que pueda realizar un técnico o un operador de planta.

El escape de válvulas según la literatura es:

- 1ª válvula=11,47 kg/h, equivalente a 0,19 kg/min.
- 2ª válvula=67,67 kg/h, equivalente a 1,127 kg/min.

Es decir, se ventea 1,317kg/min, que es igual a 0,02 kg/s.

Aplicando las fórmulas del cálculo anterior tenemos:

Cálculo caudal volumétrico mínimo de aire fresco

$$\left(\frac{dV}{dt}\right)_{\min} = \left[\frac{E_{\max}}{k \times LIE}\right] \left(\frac{T}{293}\right) = \left[\frac{0,02}{0,25 \times 0,033}\right] \left(\frac{T}{293}\right) = 1,187 \text{ m}^3/\text{s} \quad (\text{Ec.8 - 4})$$

Cálculo del volumen teórico Vz

$$Vz = \left[f \times \left(\frac{dV}{dt}\right)_{\min} \right] / c = \frac{[3 \times 1,187]}{0,03} = 118,7 \text{ m}^3 \rightarrow r = \sqrt[3]{\frac{Vz}{(4/3)\pi}} \approx 3 \text{ m} \quad (\text{Ec.8 - 5})$$

Cálculo del tiempo de permanencia

$$t = \left(\frac{-f}{c}\right) \ln \left[\frac{LIE \times K}{x_o} \right] = \left(\frac{-3}{0,03}\right) \ln \left[\frac{5 \times 0,25}{100} \right] = 438,2 \text{ s} \quad (\text{Ec.8 - 6})$$

c) Escape de válvula de seguridad en línea de regulación de gas de salida del cubeto

La tasa máxima de escape de esta válvula de seguridad es 0,002093 kg/s (13 Nm³/h), teniendo en cuenta una presión de 4 bar que lleva el gas en la línea.

Cálculo caudal volumétrico mínimo de aire fresco

$$\left(\frac{dV}{dt}\right)_{\min} = \left[\frac{E_{\max}}{k \times LIE}\right] \left(\frac{T}{293}\right) = \left[\frac{0,002093}{0,25 \times 0,033}\right] \left(\frac{T}{293}\right) = 0,2846 \text{ m}^3/\text{s} \quad (\text{Ec.8 - 7})$$



Cálculo del volumen teórico Vz

$$Vz = \left[f \times \left(\frac{dV}{dt} \right)_{\min} \right] / c = \frac{[3 \times 0,2846]}{0,03} = 24,86 \text{ m}^3 \rightarrow r = \sqrt[3]{\left[\frac{Vz}{(4/3)\pi} \right]} = 1,9 \text{ m} \quad (\text{Ec.8 - 8})$$

Cálculo del tiempo de permanencia

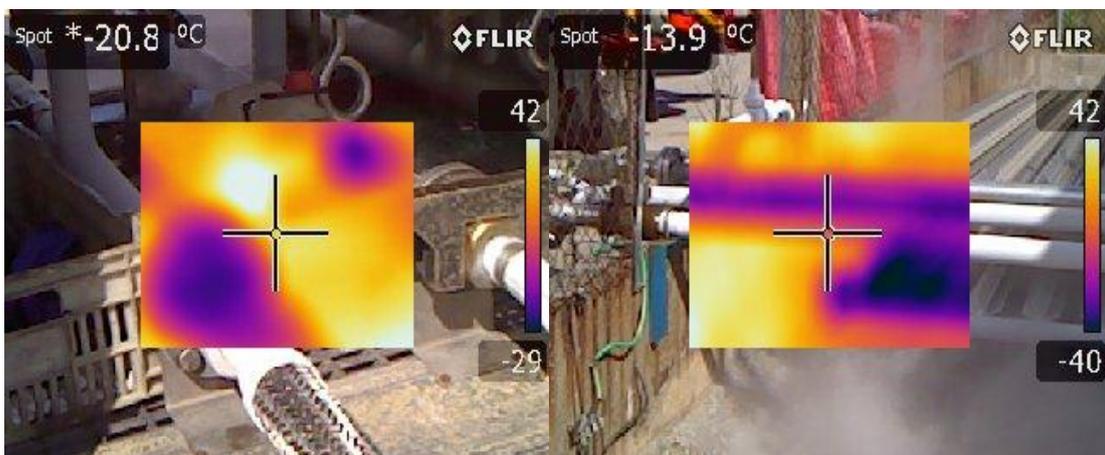
$$t = \left(\frac{-f}{c} \right) \ln \left[\frac{LIE \times K}{x_0} \right] = \left(\frac{-3}{0,03} \right) \ln \left[\frac{5 \times 0,25}{100} \right] = 438,2 \text{ s} \quad (\text{Ec.8 - 9})$$

d) Desconexión de mangueras

Se considera que el volumen de gas viene dado por las tres mangueras de 5 metros de longitud (fotos 8.1, 8.2, 8.3 y 8.4), lo que representa una expulsión de gas de 0,275 kg en 1 segundo (se considera instantánea).



Fotos 8.1. y 8.2. Proceso de descarga de gas



Fotos 8.3. y 8.4. Fotografías termográficas del proceso de descarga de gas



Cálculo caudal volumétrico mínimo de aire fresco

$$\left(\frac{dV}{dt}\right)_{\min} = \left[\frac{E_{\max}}{k \times LIE}\right] \left(\frac{T}{293}\right) = \left[\frac{0,275}{0,25 \times 0,033}\right] \left(\frac{T}{293}\right) = 16,7 \text{ m}^3/\text{s} \quad (\text{Ec.8 - 10})$$

Cálculo del volumen teórico Vz

$$Vz = \left[f \times \left(\frac{dV}{dt}\right)_{\min} \right] / c = \frac{[3 \times 16,7]}{0,03} = 1670 \text{ m}^3 \rightarrow r = \sqrt[3]{\left[\frac{Vz}{(4/3)\pi}\right]} \approx 7,5 \text{ m} \quad (\text{Ec.8 - 11})$$

Dado que es instantáneo, se considera un tiempo de dilución muy corto y no se realiza cálculo de tiempo de permanencia. No obstante existe un procedimiento de descarga que incluye la indicación de un tiempo de espera necesario para que la cisterna abandone el área de de descarga en 5 minutos.

e) Fugas de líquido por empaquetaduras o juntas

Se establece una fuga por empaquetadura de un equipo (válvula, instrumento, etc.) poro o brida con defecto de ajuste, en régimen de goteo o dardo de gas frío.

La fuga máxima, según bibliografía se estima en 35 Nm³/h, lo que representa 27,3 kg/h o lo que es lo mismo 7,50x10⁻³ kg/s.

Los cálculos se refieren a una fuente de escape de grado secundario, con factor de seguridad k=0,5.

Cálculo caudal volumétrico mínimo de aire fresco

$$\left(\frac{dV}{dt}\right)_{\min} = \left[\frac{E_{\max}}{k \times LIE}\right] \left(\frac{T}{293}\right) = \left[\frac{0,0075875}{0,25 \times 0,033}\right] \left(\frac{T}{293}\right) = 0,450 \text{ m}^3/\text{s} \quad (\text{Ec.8 - 12})$$

Cálculo del volumen teórico Vz

$$Vz = \left[f \times \left(\frac{dV}{dt}\right)_{\min} \right] / c = \frac{[3 \times 0,450]}{0,03} = 45 \text{ m}^3 \rightarrow r = \sqrt[3]{\left[\frac{Vz}{(4/3)\pi}\right]} \approx 2,3 \text{ m} \quad (\text{Ec.8 - 13})$$

Cálculo del tiempo de permanencia

$$t = \left(\frac{-f}{c}\right) \ln \left[\frac{LIE \times K}{x_o}\right] = \left(\frac{-3}{0,03}\right) \ln \left[\frac{5 \times 0,5}{100}\right] = 368,8 \text{ s} \quad (\text{Ec.8 - 14})$$



De acuerdo a los datos obtenidos se estiman las zonas siguientes dentro del emplazamiento con los parámetros anteriormente determinados (tabla 8.3).

Escape	Zona	Tasa de escape G (kg/s)	Grado escape	K (coef)	Q _{vmin} (m ³ /s)	V _z (m ³)	Radio de la esfera en m	Tiempo perman. s
Venteo de la cisterna	1	9,11x10 ⁻²	primario	0,25	10,82	1082	6,5	438,2
Venteo del tanque	1	2x10 ⁻²	primario	0,25	1,187	118,7	3	438,2
Venteo de la línea de gas	1	2,1 x10 ⁻³	primario	0,25	0,2846	24,86	1,9	438,2
Descarga	1	0,275	primario	0,25	16,67	1667	7,5	
Tubuladuras y regulación	2	7,58 x10 ⁻³	primario	0,5	0,450	45	2,3	368,8

Tabla 8.3. Valores obtenidos para los depósitos de GNL

Retomando el capítulo 5, en su apartado 5.4.1.2. (metodología cualitativa para gases y vapores inflamables), habíamos indicado el utilizar esta metodología basada en normas internacionales (UNE-EN 60079-10, NFPA 4970-1997) con reservas y con criterio aduciendo la imposibilidad de predecir el comportamiento de toso los gases cuando estos fugan. Estas normas establecen distancias de extensión vertical y horizontal de la fuente de escape en base a casos prácticos y ejemplos. Si tenemos en cuenta el caso que nos ocupa y hacemos uso de la metodología cualitativa, tendríamos los resultados que se muestran en la tabla 8.4. para la clasificación y extensión de la zona de estudio. En ella, podemos observar por ejemplo como para la descarga se establece una extensión para la atmósfera ATEX de 4 metros en vertical y de 4,5 metros en horizontal; si nos fijamos en la tabla 8.3 donde hemos obtenido el valor del radio de la esfera mediante metodología analítica, podemos observar como para la operación de descarga se establece una zona de riesgo de 7,5 metros de radio de esfera, es decir, un valor mas conservador. Debemos recordar siempre y desde la óptica de la seguridad que estamos hablando de atmósferas explosivas con lo que ello implica. Por lo tanto, para este caso de estudio (depósitos de GNL) no vamos a considerar los resultados obtenidos mediante la metodología cualitativa.

Sin embargo, esta metodología tiene su utilidad -como vamos a ver en el caso de estudio de la zona de frío- en instalaciones en las cuales resulta muy complicado y tedioso el determinar todas las tasas de escape de los diversos elementos y equipos, así como los correspondientes volúmenes de dilución de la atmósfera explosiva. Para estos casos, la metodología proporciona una herramienta rápida y sencilla para clasificar y determinar la extensión de la zona peligrosa pero siempre teniendo en cuenta la seguridad de personas e instalaciones.

CLASIFICACIÓN DE ZONAS (DEPÓSITOS DE GNL)

CLASIFICACIÓN DE ZONAS (DEPÓSITOS DE GNL)														
Fuentes de Escape			Sustancia inflamable					Ventilación			Emplazamiento peligroso			
Nº	Descripción	Localización	Grado de escape	Nombre	Tª y P de operación		Estado	Tipo	Grado	Disponibilidad	Tipo de zona	Extensión zona (m)		Observaciones
												Vertical -	Horizontal	
1	Venteo	Cisterna	P	GN	Amb	Amb	G	N	Medio	Muy buena	1	6,5	6,5	*Por encima fuente **Desde la fuente es
2	Venteo	Sup depósito	P	GN	Amb	Amb	G	N	Medio	Muy buena	1	5	5	*Por encima fuente **Desde la fuente es
3	Venteo	Válvula de seguridad línea de gas	P	GN	Amb	Amb	G	N	Medio	Muy buena	1	2	2	*Por encima fuente **Desde la fuente es
4	Desconexión mangueras	Zona descarga	P	GN	Amb	Amb	G	N	Medio	Muy buena	1	4	4,5	*Por encima fuente **Desde la fuente es
5	Purgas de tubería o depósito	Conjunto tuberías	P	GN	Amb	Amb	G	N	Medio	Muy buena	2	4	2,5	*Por encima fuente **Desde la fuente es
6	Accesorios de tubería e instrumentación	Tuberías	S	GN	Amb	Amb	G	N	Medio	Muy buena	2	4	1,5	*Por encima fuente **Desde la fuente es
7	Accesorios de botella THT	THT	S	THT	Amb	Amb	G	N	Medio	Muy buena	2	4	1,5	*Por encima fuente **Desde la fuente es

Tabla 8.4. Clasificación de zonas ATEX para depósitos de GNL según norma UNE 60079 (metodología cualitativa)

Hemos visto para este caso de estudio (depósitos de GNL) que la aplicación de la metodología cuantitativa devuelve resultados de “mayor seguridad” respecto a la metodología cualitativa. Pero, para este tipo de instalaciones existe tal y como hemos comentado en el capítulo 4 una norma UNE que les afecta de lleno la UNE 60210: “Plantas Satélites de gas natura licuado” y que establece para el caso que nos ocupa las zonas de seguridad definidas en la figura 8.2.

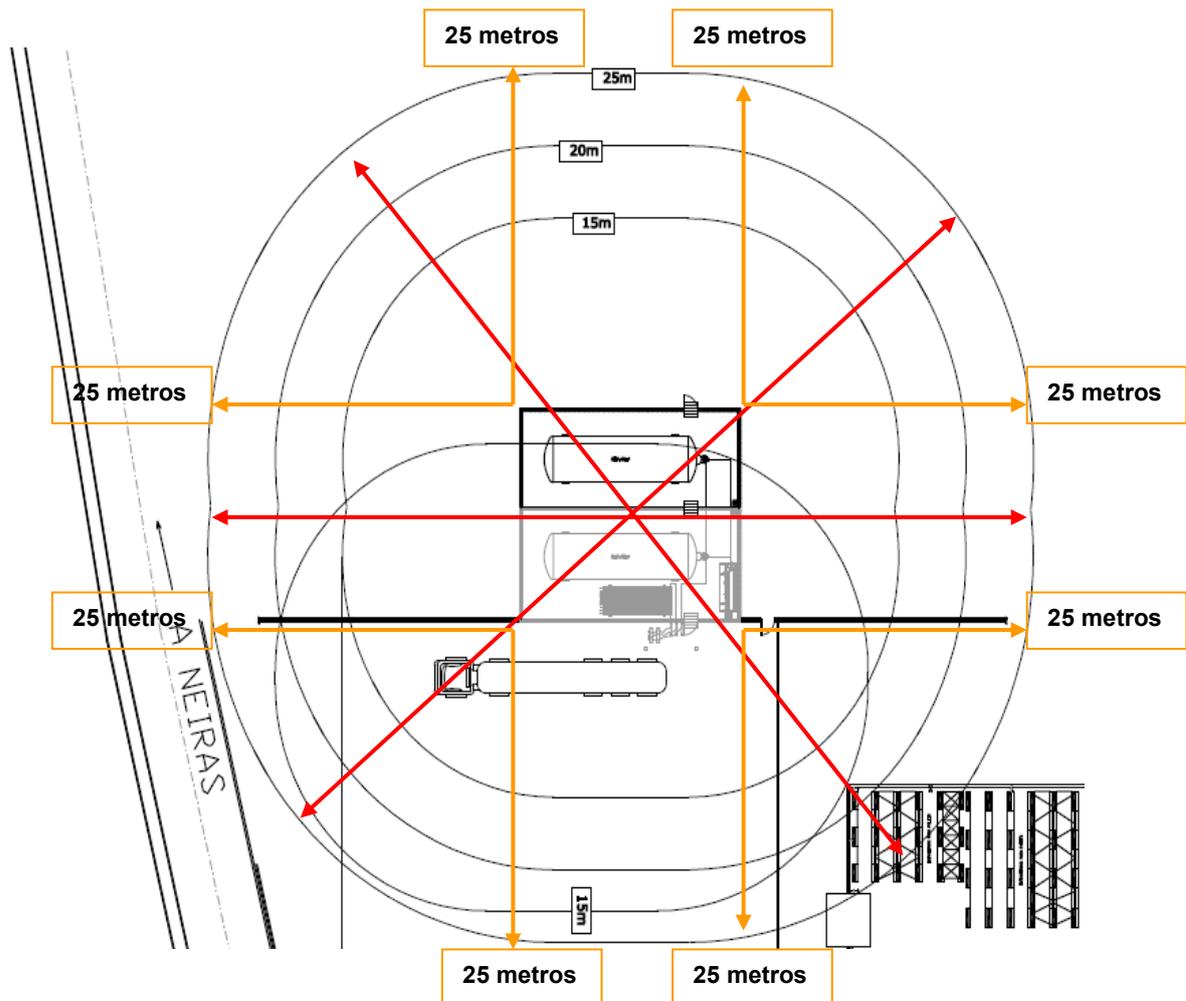


Figura 8.2. Zonas de seguridad para los depósitos de GNL y camión de descarga

Podemos observar en dicha figura como se establece una zona de seguridad límite de 25 metros alrededor del cubeto donde se ubican los dos depósitos. Para las operaciones de descarga la norma UNE 60210 estima una zona de seguridad concéntrica de 15 metros que queda incluida dentro de la zona de 25 metros de ambos depósitos. Estos valores no sólo son muy superiores a los obtenidos mediante la metodología cualitativa (ver resultados en la tabla 8.4), sino que también lo son respecto a los obtenidos mediante el empleo de la metodología cuantitativa.

Lo expuesto debe hacernos reflexionar sobre la importancia de realizar la extensión de zonas con criterio y rigor y siempre buscando el enfoque de mayor seguridad. Asimismo, cuando apliquemos la metodología CFD para este caso de estudio, vamos a poder apreciar como incluso la zona de 25 metros resulta corta considerando escapes múltiples.

8.1.2. Sala de calderas

El siguiente caso de estudio es la sala de calderas de vapor. Esta sala consiste en un recinto rectangular con superficie en planta de 99 m² (9m x 11m) y un volumen de 352 m³ que dispone de dos calderas de gas natural con quemador por aire forzado que producen 6000 kg/h de vapor que proporciona alimentación a la fábrica láctea. El emplazamiento dispone de dos entradas/salidas, la entrada principal dispone de una superficie de 2,64 m² (1,20m x 2,20m) y conduce al exterior. Se dispone de una puerta salida secundaria de la sección de calderas que conduce a una sala previa a la zona de compresores con las mismas dimensiones que la anterior.

Los circuitos de línea de quemador para ambas calderas son simétricos, la tubería principal (foto 8.5) proveniente de los depósitos de GNL (gas natural licuado), entra a la sala de calderas para alimentar el quemador de las mismas donde se dispone de válvula de corte manual (foto 8.6) y de ésta, al circuito de línea de los quemadores (foto 8.7).



Foto 8.5. Tubería gas Foto 8.6. Válvula de corte manual Foto 8.7. Línea de los quemadores

La conducción del gas pasa después de precalentarse a través de un circuito en serie (foto 8.7) compuesto por una válvula manual de corte, una válvula reductora de presión de gas, un filtro, una válvula reguladora de presión de gas y una válvula automática de corte. De ésta última válvula parten dos conducciones, la superior es la de la llama piloto y la inferior conduce a la entrada-alimentación del quemador (foto 8.8).

Identificación de las sustancias inflamables

Definidas las características generales de la sala, procedemos a identificar las sustancias inflamables. El combustible utilizado es gas natural licuado cuya composición en más de un 92% es metano, el resto del porcentaje se lo reparten el propano, el butano y el gas odorificante. Para simplificar los cálculos vamos a considerar que todo el gas es metano (CH₄) cuyas características se establecieron en la tabla 8.1.

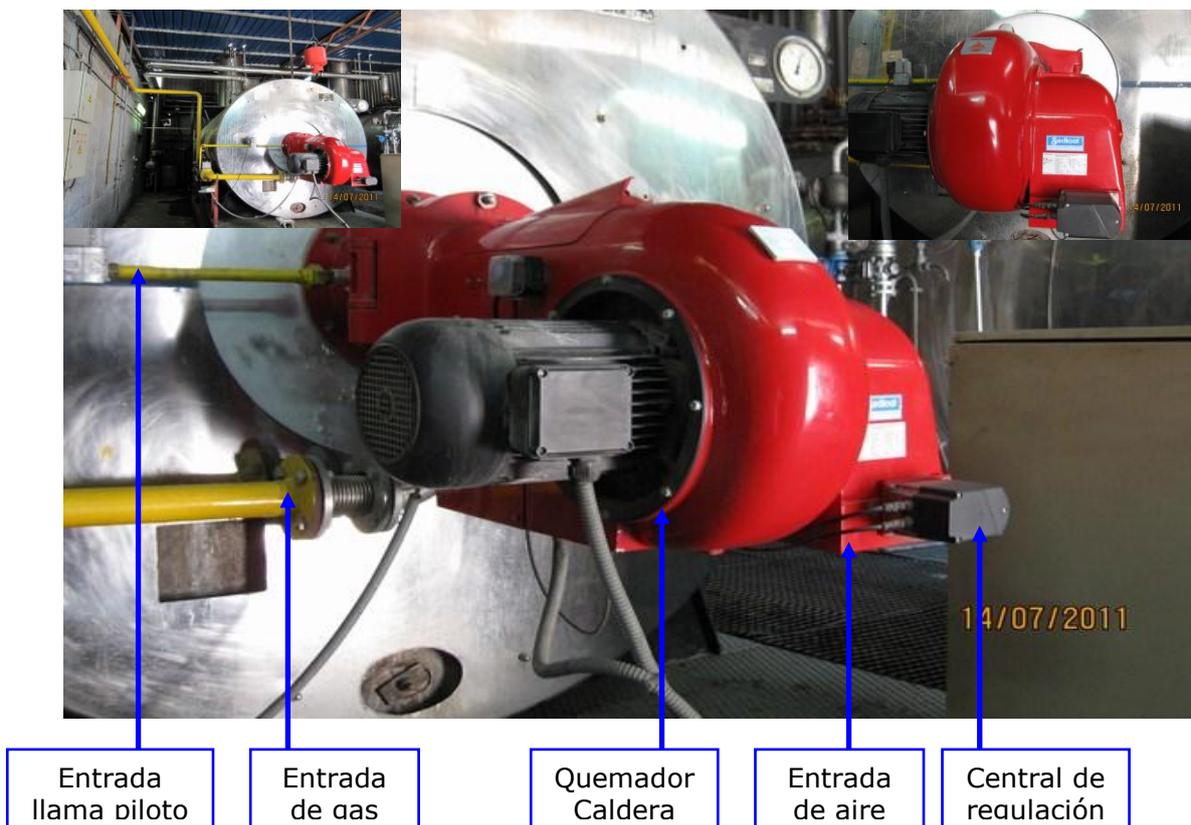


Foto 8.8. Disposición de las conducciones de llama piloto y quemador de una de las calderas

Fuentes de escape

Las posibles fuentes de escape son los distintos elementos de la línea que conducen al quemador: bridas, válvulas embridadas, roscas de instrumentación, filtro con bridas a ambos lados, etc.

Grados de escape

Los grados de escape existentes son de tipo primario y son: válvula de entrada de la línea exterior de gas y línea del quemador (válvula manual de corte, válvulas reguladoras de presión del gas, filtro, válvula automática de control de presión de gas y válvula automática de corte).



No existen grados continuos ni grados secundarios de escape.

Influencias de todos los escapes

Como tenemos 6 elementos en los cuales pueden aparecer escapes primarios, calculamos el caudal de aire fresco Q_{\min} para todos los escapes, se suman el de los 3 mayores (válvula manual, válvula reguladora de presión y filtro) para los cálculos posteriores.

Cálculo de la tasa de escape

Los valores tabulados para una temperatura de operación de 40 °C (caso más desfavorable) son:

- Válvula manual de corte (entrada conducción de gas): $2,08 \times 10^{-8}$ kg/s.
- Válvula manual de corte (línea de quemador): $2,08 \times 10^{-8}$ kg/s.
- Dispositivo de control de presión: $2,08 \times 10^{-8}$ kg/s.
- Válvula reguladora de presión: $5,20 \times 10^{-8}$ kg/s.
- Filtro de gas: $2,08 \times 10^{-8}$ kg/s.
- Válvula automática de corte de presión: $1,04 \times 10^{-8}$ kg/s.

Otra posibilidad que podríamos adoptar es considerar la válvula manual de corte de entrada de gas y obtener el valor global para los otros cinco elementos que constituyen el conjunto de la línea de quemador, es decir:

- Válvula manual de corte (entrada conducción de gas): $2,08 \times 10^{-8}$ kg/s.
- Quemador: $3,64 \times 10^{-8}$ kg/s.

Definición del grado y la disponibilidad

- Ventilación (tipo): natural.
- Grado: medio.
- Disponibilidad: alta.
- Ineficacia de la ventilación f_v : 4 (este valor se obtiene de las tablas para ambientes cerrados con ventilación natural o con ventilación artificial general).

Tipo de zona peligrosa

Teniendo en cuenta la tabla 5.13. (capítulo 5) los escapes primarios con un grado de ventilación medio y disponibilidad alta, dan lugar a una zona 1.



Extensión de la zona

A partir del valor Q_{\min} obtenido al sumar los valores mayores se aplica la expresión Ec. 8-15 considerando un factor de ventilación f igual a 4 y calculamos el volumen de la atmósfera explosiva V_z , que correspondería a una esfera cuyo radio es (Ec. 8-16):

$$V_z = \frac{f \cdot Q_{\min}}{C_o} \quad (\text{Ec.8 - 15}); \quad r = \sqrt[3]{\left[\frac{V_z}{(4/3 \cdot \pi)} \right]}, \quad r = \text{radio esfera} \quad (\text{Ec.8 - 16})$$

Los valores obtenidos se muestran en la tabla siguiente (tabla 8.5).

Escape	Tasa de escape G (kg/s)	Grado escape	Coef seg. k	Q_{\min} (m ³ /s)	Renovaciones	V_z (m ³)	Radio esfera en m
Válvula manual (entrada)	$2,08 \times 10^{-8}$	primario	0,25	$2,9 \times 10^{-6}$	$1,1 \times 10^{-4}$	0,11	0,30
Válvula manual línea quemador	$2,08 \times 10^{-8}$	primario	0,25	$2,9 \times 10^{-6}$	$1,1 \times 10^{-4}$	0,11	0,30
Válvula reguladora de presión	$5,20 \times 10^{-9}$	primario	0,25	7×10^{-7}	$1,1 \times 10^{-4}$	0,026	0,19
Dispositivo de control de presión	$2,08 \times 10^{-8}$	primario	0,25	$2,9 \times 10^{-6}$	$1,1 \times 10^{-4}$	0,11	0,30
Filtro	$2,08 \times 10^{-8}$	primario	0,25	$2,9 \times 10^{-6}$	$1,1 \times 10^{-4}$	0,11	0,30
Válvula automática	$1,04 \times 10^{-8}$	primario	0,25	$1,01 \times 10^{-6}$	$1,1 \times 10^{-4}$	0,036	0,20
Suma *		primario	0,25	$8,7 \times 10^{-6}$	$1,1 \times 10^{-4}$	0,33	0,43

Tabla 8.5. Valores obtenidos para la sala de calderas considerando los elementos de la línea del quemador por separado

Estos valores corresponden a la válvula manual de entrada y a una línea de una caldera. El circuito es simétrico y tendríamos los mismos valores para la otra línea del quemador ya que hay dos calderas. En vez de los cinco elementos independientes que componen la línea del quemador, podríamos calcular el escape para toda la línea del mismo cuya tasa de escape global es la que aparece en la tabla 8.6 junto con el resto de cálculos.

Escape	Tasa de escape G (kg/s)	Grado escape	Coef seg. k	Q_{\min} (m ³ /s)	Renovaciones	V_z (m ³)	Radio de la esfera en m
Quemador	$2,43 \times 10^{-8}$	primario	0,25	3×10^{-6}	$1,1 \times 10^{-4}$	0,11	0,30

Tabla 8.6. Valores para la sala de calderas considerando el quemador como un único elemento

En la tabla anterior podemos observar que el valor que obtenemos para el radio de la esfera considerando la línea del quemador en su conjunto, es inferior al valor obtenido considerando los elementos de la línea por separado. Por seguridad debemos tomar el valor obtenido en la tabla 5 de 0,43 metros que redondearíamos a 0,50 metros.



Al ser el metano un gas más ligero que el aire, adoptamos para las distancias verticales un valor doble que en el resto de las direcciones. Así, como resumen de la clasificación zonal tendríamos:

- Zona 1: 0,5 metros alrededor de los dispositivos de corte, filtros y regulación, debiendo tomar 1 metro en las distancias verticales por encima de los dispositivos.
- Zona 2: 0,5 metros alrededor de la zona 1 tomando 1 metro para las distancias verticales.

En las fotos 8.9 y 8.10 se representan de forma gráfica la disposición de las zonas de clasificación ATEX en los elementos estudiados.

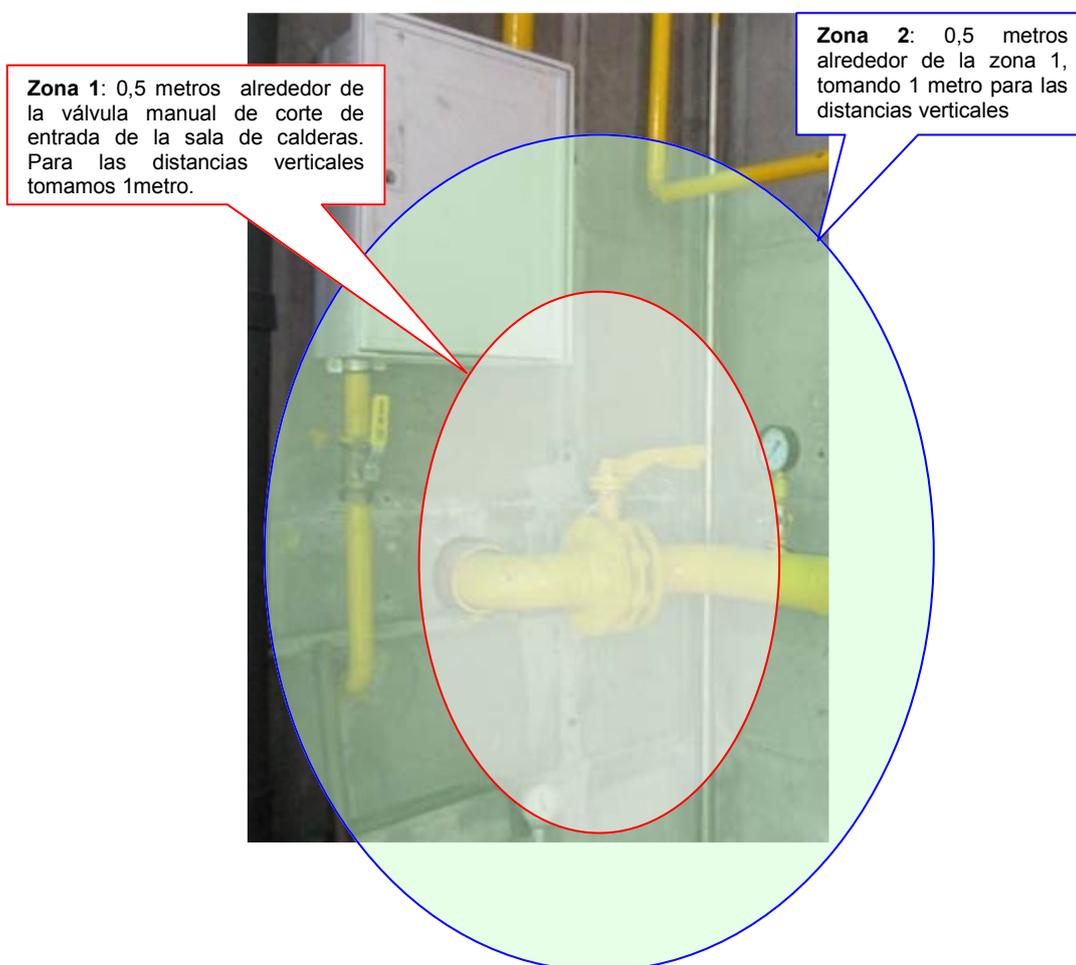


Foto 8.9. Representación zonal de la clasificación ATEX en la válvula de corte manual a la entrada de la sala de calderas

Como medida preventiva adicional es aconsejable el definir como zona 2 todo el volumen rodeando la caldera. En esta decisión también debemos tener en consideración las posibles fuentes de ignición que nos podamos encontrar en las zonas de estudio.

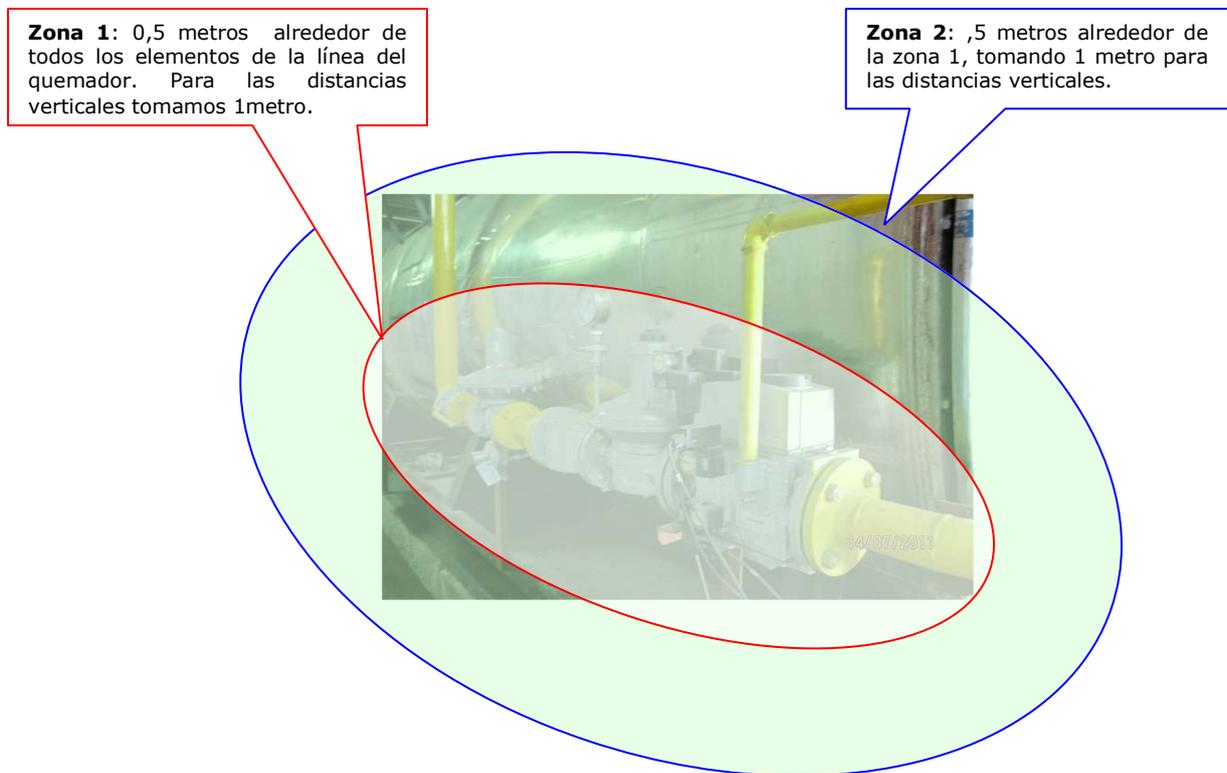


Foto 8.10. Zonas de la clasificación ATEX de la línea del quemador de una de las calderas



8.1.3. Zona de carga de baterías

Las características del gas que interviene en esta zona son:

Sustancia inflamable			LIE			Volatilidad		Densidad relativa respecto aire	T ^a autoingnición (°C)
Nº	Nombre	Composición	Pto inflam	kg/m ³	Vol%	Tensión vapor 20°C (kPa)	Pto. ebullición °C		
1	Hidrogeno	H ₂	-	0,0034	1,8	9413	80	0,07	560

Tabla 8.7. Características del gas hidrógeno presente durante la carga de baterías

La empresa EUROSERUM IBÉRICA, S.L. dispone de dos zonas de carga de baterías, una al lado de los depósitos de sosa y ácido próxima al taller de mantenimiento con ventilación natural y la otra en el interior de la cámara de congelado. Analizamos por separado cada una de ellas.

8.1.3.1 Zona de carga de baterías próxima a taller

En esta zona se dispone de tres cargadores ubicados sobre una plataforma tipo tramex de 2,70 metros de largo, 0,60 metros de alto y 0,60 metros de fondo (foto 8.12). Aquí descansan tres cargadores que proporcionan alimentación a las baterías:

- Una batería Tudor tipo 40-04 EPZS 620 de 620 Ah y peso 1529 kg.
- Una batería Tudor tipo 12-04 EPZS 460 s de 460 Ah y peso 361 kg.

La zona de carga presenta buena ventilación natural (foto 8.11) con uno de los laterales abiertos (las mediciones realizadas con el termohigrómetro Kestrel K3000 arrojan unos valores de velocidad del aire de entre 0,6 y 1,1 m/s -mediciones realizadas el 05/12/2011)



Fotos 8.11 y 8.12. (izq-dcha). Lateral abierto y vista de zona de carga de las carretillas y de los cargadores



Cálculo de distancia

Según la norma italiana “*Guida pratica alla classificazioni-13Ex zone di ricarica batterie muletti-2005*”, en el área de carga de baterías se obtiene una zona 1 dentro de la distancia calculada con la siguiente ecuación:

$$d_{(mm)} = 28,8 \times \sqrt[3]{I_{gas}} \sqrt[3]{C} \quad (\text{Ec.8 – 17})$$

Donde C es la capacidad total en Amperio hora de las baterías a recargar e I_{gas} vale aproximadamente 50.

Aplicando la fórmula anterior, obtenemos que la distancia para los distintos cargadores de baterías es de:

Nº cargador	TENSIÓN ALTERNA (V)	INTENSIDAD ALTERNA (A)	POTENCIA (KVA)	TENSIÓN CONTINUA (V)	INTENSIDAD CONTINUA (A)	CAPACIDAD (Ah)	DISTANCIA PELIGROSA
1	400	27	18,7	80	120	600	1,06
2	400	8,5	5,91	80	80	500	0,94
3	400	12	8,6	80	120	500	0,94

Tabla 8.8. Valores obtenidos para la zona de carga de carretillas aplicando la norma CEI 31-35 y la norma UNE EN 60079-10

Los resultados obtenidos para esta zona de carga de baterías según el procedimiento de clasificación para ambiente cerrados CEI 31-35 y la UNE 60079-10 son:

- El grado de ventilación en las áreas de carga de baterías es MEDIO con una disponibilidad de ventilación BUENA y con un grado de emisión PRIMARIO se obtiene una ZONA 1.
- Extensión de la zona: 1,20 metros alrededor de la batería que se está cargando. Al ser el hidrógeno un gas menos denso que el aire se extenderá esta distancia se considerará doble en dirección vertical a la fuente de escape, es decir, 2,40 metros.

8.1.3.2. Zona de carga en el interior de la cámara de congelado

En esta zona se dispone de un único cargador marca Hawker de 80V/80 A y 600 Ah (foto 8.13) que alimenta batería también Hawker y modelo 24-5PZS-750 HX con peso 1162 kg (foto 8.14) . Esta zona no dispone de ventilación natural, si bien es una zona no confinada ubicada en una intersección de dos pasillos de la cámara de congelado con anchos de 4 metros cada uno y longitud de 19,7 y 36,7 metros respectivamente. La altura de la cámara de 4,5 metros (fotos 8.15 y 8.16).



Foto 8.13. Cargador Hawker



Foto 8.14. Batería Hawker

Por la noche, que es el momento en que habitualmente tiene lugar la carga de baterías, las puertas permanecen cerradas, resultando la ventilación en las instalaciones baja.



Foto 8.15. Dimensiones zona de carga



Foto 8.16. Dimensiones de los pasillos

Nº cargador	TENSIÓN ALTERNA (V)	INTENSIDAD ALTERNA (A)	POTENCIA (KVA)	TENSIÓN CONTINUA (V)	INTENSIDAD CONTINUA (A)	CAPACIDAD (Ah)	DISTANCIA PELIGROSA
1	400	12	8,6	80	120	600	1,06

Tabla 8.9. Valores obtenidos en la zona de carga de carretillas aplicando la norma CEI 31-35 y la norma UNE EN 60079-10

Los resultados obtenidos para la zona de carga de baterías según el procedimiento de clasificación para ambiente cerrados CEI 31-35 y la UNE 60079-10 son:

- El grado de ventilación en las áreas de carga de baterías es BAJO con una disponibilidad de ventilación BUENA y con un grado de emisión PRIMARIO se obtiene una ZONA 1.
- Extensión de la zona: 1,2 metros alrededor de la batería que se está cargando en distancia horizontal y al ser el hidrógeno un gas menos denso que el aire se extenderá esta distancia al doble en sentido vertical a la fuente de escape.



8.1.3.3. Consideraciones para la zona de carga de baterías

Alrededor de las sustancias inflamables, al estar clasificado como ZONA 1, los equipos instalados y utilizados que estén dentro de esta zona (susceptibles de ser fuentes de ignición) (eléctricos y no eléctricos), deben cumplir lo especificado en el RD 400/96.

La instalación eléctrica debe de cumplir con la instrucción técnica ITC-BT-29 “Prescripciones particulares para las instalaciones eléctricas de los locales con riesgo de incendio o explosión”, instrucción que forma parte del marco normativo del Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión aprobado por RD 842/2002, de 2 de Agosto.

8.1.4. Zona de frío

Las características del gas que interviene en esta zona son las que se reflejan en la tabla siguiente (tabla 8.10).

Sustancia inflamable			LIE			Volatilidad		Densidad relativa respecto aire	T ^a autoignición (°C)
Nº	Nombre	Composición	Punto inflam	kg/m ³	Vol%	Tensión vapor 20°C (kPa)	Pto ebullición °C		
1	Amoniaco	NH3	-	0,106	15	869	33,4	0,60	630

Tabla 8.10. Características del gas amoniaco utilizado como refrigerante

La fábrica dispone de 4 balsas de frío de las cuáles, la zona de frío 1 y 4 son las de menor capacidad productiva. La mayor parte del “frío” que se produce en la fábrica proviene de las balsas 2 y 3 que son las que vamos a analizar. En la figura 8.3 se presenta de forma general una vista en planta de la zona de frío de la fábrica donde se incluyen la zona de frío 2 y 3 que vamos a estudiar con mayor detalle.

8.1.4.1. Zona de frío Balsa 2

Esta sala presenta tal y como puede verse en la figura 8.3. una geometría rectangular con una longitud de 11 metros, un ancho de 4,80 metros y una altura de 4 metros. Dentro de este recinto se ubican entre otros los dos compresores modelos CR 6 y CR 10, el depósito de amoniaco y la balsa de agua helada que consiste en un paralelepípedo con dimensiones 7 metros de largo, 2,65 metros de ancho y altura 2,15 metros (véase foto 8.17). En el interior de esta balsa se ubican dos circuitos serpentines (foto 8,20) por los cuales circula el gas y los retornos de agua.

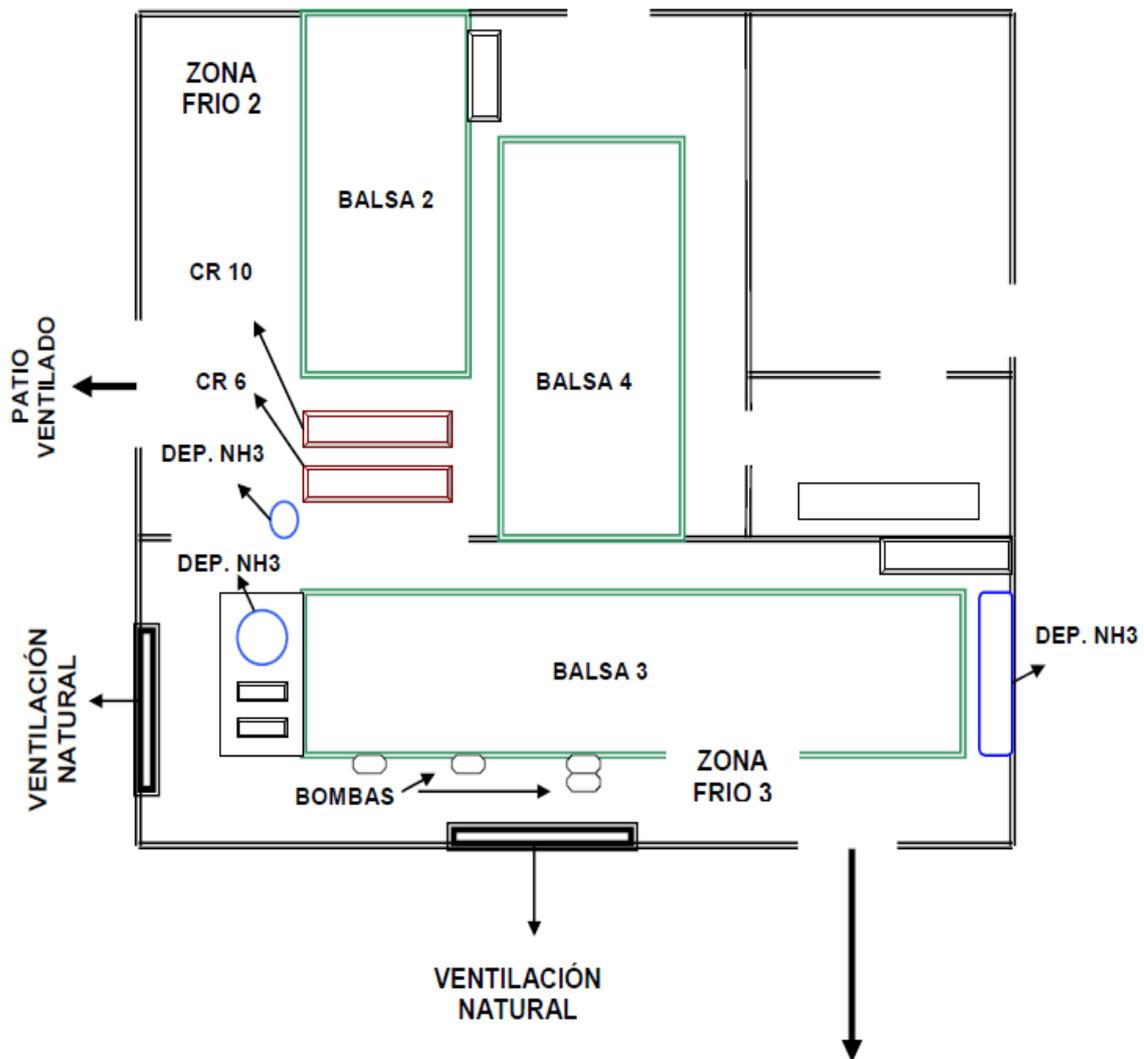


Figura 8.3. Vista en planta de parte de la zona de frío de la fábrica

El recinto de la balsa 2 dispone de una puerta (casi siempre cerrada) de dimensiones 2m x 1,40m que conduce a un patio ventilado próximo a la zona de carga de carretillas, al contrario que el de la balsa 3 no dispone de ventilación natural. Ambas zonas la 2 y la 3 se comunican también mediante una puerta. La zona 2 dispone de ventilación forzada compuesta por un ventilador (foto 8.18), ubicado a la izquierda de la puerta mencionada a una altura de 90 cm y con un diámetro 50 cm, n=1400 r.p.m. y caudal de ventilación 3500 m³/h.

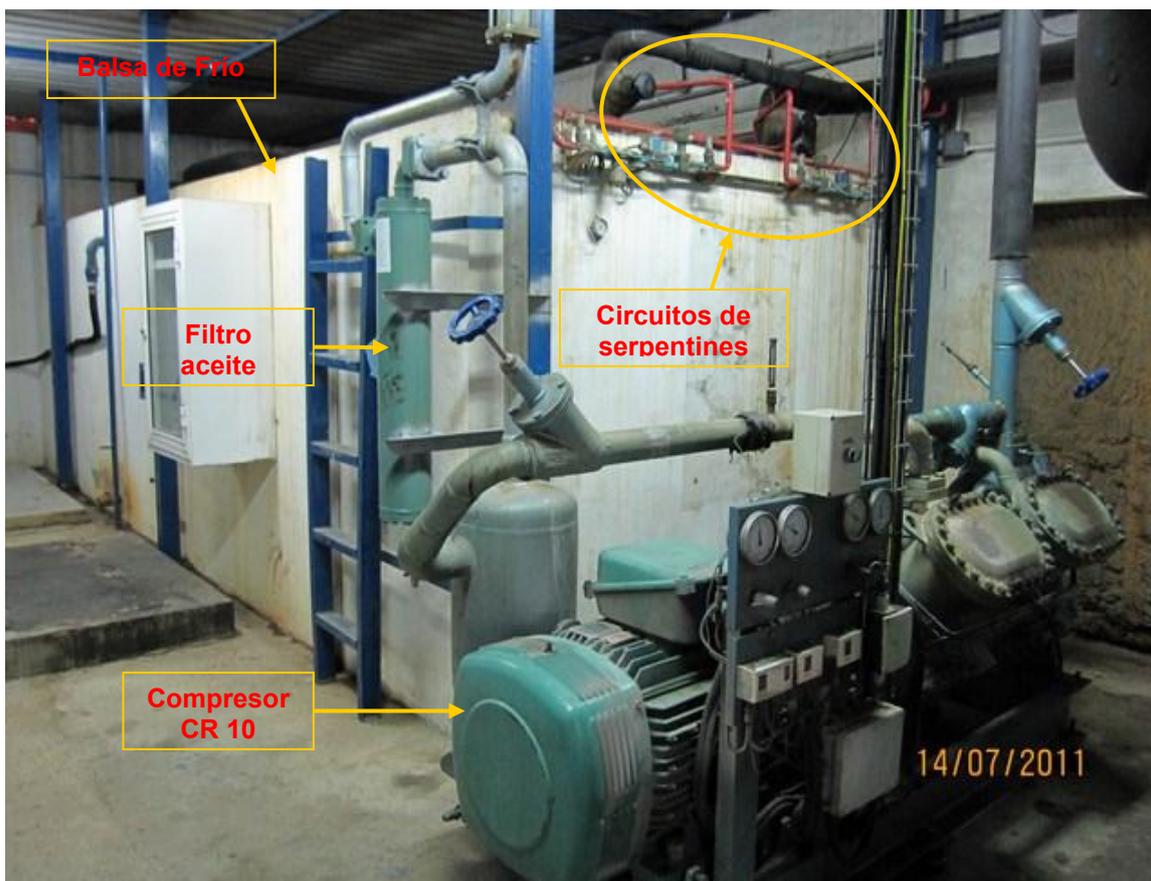


Foto 8.17. Zona de frío 2 y parte de los elementos de la misma



Foto 8.18. Ventilador zona de frío 2



Foto 8.19. Depósito NH3

La entrada en funcionamiento del ventilador está ligado a la puesta en marcha (en teoría) de la alarma de amoniaco ubicada en la propia sala al alcanzarse el LIE del amoniaco en dicha zona, es decir, un 15% volumen.

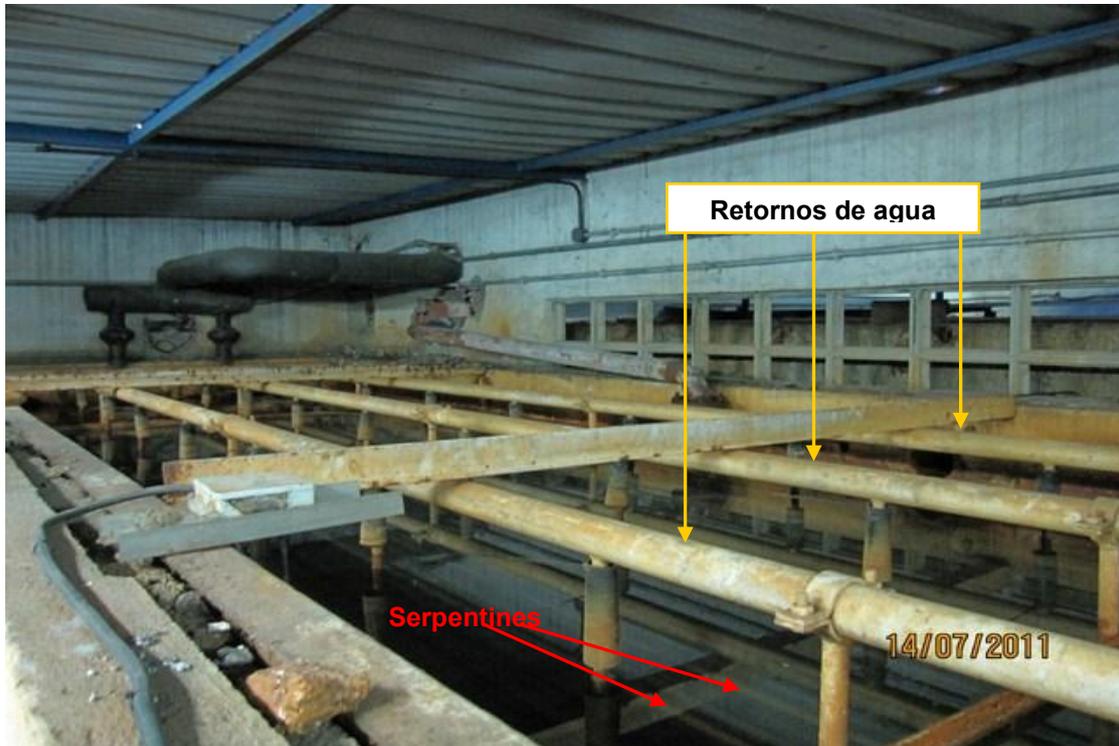


Foto 8.20. Vista de la balsa de agua helada 2 con las tuberías de retorno y los serpentines

8.1.4.2. Zona de frío Balsa 3

La geometría de esta sala es también rectangular con una longitud de 15 metros, un ancho de 5 metros y una altura de 4 metros. La balsa de amoniaco presenta unas dimensiones de 12,50 metros de largo, por 3 metros de ancho y 2,50 metros de altura (fotos 8.21, 8.22 y 8.23). En esta sala también se ubican diferentes bombas, dos depósitos de NH₃ -uno de 90 y otro de 250 litros-, etc. (fotos 8.24, 8.25, 8.26 y 8.27).



Fotos 8.21 y 8.22. Vistas de la balsa de agua helada en la zona de frío 3



Foto 8.23. Vista de la balsa Fotos 8.24 y 8.25. Serpentines de amoníaco y tuberías de retorno

La sala de frío 3 dispone de ventilación natural compuesta por dos aberturas rectangulares, una de dimensiones 3m x 0,80m y otra de 2,60m x 0,6m ubicadas en el tabique que comunica con el patio de carga de la carretilla (foto 8.28 y 8,29), y a una altura sobre el suelo de 45 cm la primera abertura y a 2 m sobre el suelo la segunda. La otra abertura presenta dimensiones de 1,80m x 0,75m y se encuentra ubicada en el tabique que comunica con el patio exterior trasero de la fábrica. Los caudales de ventilación para una velocidad de viento de 0,1 m/s (velocidad tomada con el termohigrómetro el pasado 14/07/2011) son respectivamente:

$$Q_1 v_{\min} = S_1 \cdot V_o = [3\text{m} \times 0,8\text{m}] \times 0,1 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 0,24 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$Q_2 v_{\min} = S_2 \cdot V_o = [2,60\text{m} \times 0,6\text{m}] \times 0,1 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 0,16 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$Q_3 v_{\min} = S_3 \cdot V_o = [1,8\text{m} \times 0,8\text{m}] \times 0,1 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 0,145 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$



Fotos 8.26 y 8.27. Depósitos de amoníaco zona de frío 3

Esta sala dispone también de dos ventiladores ubicados a los laterales de la abertura de ventilación natural de dimensiones 2m x 0,65m. Estos ventiladores presentan un diámetro de 45 cm, una potencia de 0,10 KW y n=1300 r.p.m.



Foto 8.28. Ventilación natural de la sala de frío 3

Al igual que para la balsa 2, el funcionamiento de los ventiladores está ligado a la puesta en marcha de la alarma de amoniaco (fotos 8.30 y 8.31) ubicada en la propia sala en caso de alcanzarse el LIE del amoniaco en dicha zona.



Foto 8.29. Ventilación natural

Fotos 8.30 y 8.31. Alarma balsa 3



8.1.4.3. Clasificación y extensión de la zona ATEX (Balsa 2 y Balsa 3)

Identificación de las sustancias inflamables

La sustancia es amoníaco y ya se han indicado sus características en la tabla 8.11.

Fuentes de escape

Las posibles fuentes de escape son múltiples (fotos 8.32 y 8.33): todos los tornillos del cuerpo que conforma el compresor donde se ubican los pistones, juntas y accesorios de tuberías, bridas, válvulas embridadas, roscas de instrumentación, filtro con bridas, etc.



Válvula de corte con tasa de escape: $5,6 \times 10^{-7}$ kg/s

CR 6: 3 bloques, 6 pistones.
 Cada bloque tiene 20 tuercas.
 Tasa de escape por bloque: $3,96 \times 10^{-7}$ kg/s
 Total bloques: $1,15 \times 10^{-6}$ kg/s ($60 \times 1,910^{-8}$) kg/s



CR 3: 4 bloques, 8 pistones.
 Cada bloque tiene 25 tuercas.
 Tasa de escape por bloque: $4,95 \times 10^{-7}$ kg/s
 Total bloques: $1,98 \times 10^{-6}$ kg/s
 ($100 \times 1,910^{-8}$) kg/s

Tasa de escape colector: $1,98 \times 10^{-7}$ kg/s
 ($10 \times 1,910^{-8}$) kg/s

Fotos 8.32 y 8.33 (arriba y abajo): Fuentes-Tasas escape para los compresores CR3-CR6 (B2)



Fotos 8.34 y 8.35. Compresor balsa 3

Grados de escape

Los grados de escape existentes son de tipo primario (es una realidad la presencia de olor del gas en el recinto de la balsa).

Cálculo de la tasa de escape

En este caso de estudio y tal como hemos visto en el punto de fuentes de escape y en las fotografías 8.32 y 8.33, el realizar el cálculo de todas las tasas de escape resulta muy laborioso. Es por ello, que en estas situaciones debemos buscar formas de clasificación globales como puede ser el uso de la metodología cualitativa, apoyándose con mediciones de equipos detectores de gases. Así, utilizando la metodología cualitativa, tendríamos los resultados que se muestran en la tabla 8.12 para las dos zonas de frío. Estos resultados están apoyados en las mediciones realizadas con el equipo de detección de gases dragüer Xam 7000 y que se recogen en la tabla siguiente (tabla 8.11).

Sala de frío 2			
Escape (zona)	Valor	Escape (zona)	Valor
Válvula principal CR10	35 ppm	Válvula principal CR 6	28 ppm
Cuerpo de pistones CR10	45 ppm	Cuerpo de pistones CR6	35 ppm
Circuito de conducción a serpentines	23 ppm	Válvula de purga del CR 6	43 ppm
Válvula de purga del CR 10	68 ppm		

Tabla 8.11. Valores de amoniaco obtenidos con el equipo de detección de gas Xam 7000

Esta zona dispone de dos compresores uno modelo CR 6 y otro modelo CR 10, el amoniaco comprimido se mezcla con el aceite y a la salida dispone de un decantador con filtro. Una vez separados el gas se conduce al circuito de serpentines de la balsa de agua helada.

CLASIFICACIÓN DE ZONAS (ZONA DE FRÍO –BALSA 2)

CLASIFICACIÓN DE ZONAS (ZONA DE FRÍO –BALSA 2)														
Fuentes de Escape			Sustancia inflamable				Ventilación			Emplazamiento peligroso				
N°	Descripción	Localización	Grado de escape	Nombre	Tª y P de operación		Estado	Tipo	Grado	Disponibilidad	Tipo de zona	Extensión zona (m)		Observaciones
												Vertical	Horizontal	
1	Fuga o derrame a través del compresor	Compresores	P	NH3	Amb	Amb	G	N	Medio	Mediocre	1	1	3	*Por encima fuente **Desde la fuente es
2	Fuga de vapores a través de válvula de seguridad	Válvula seguridad	P	NH3	Amb	Amb	G	N	Medio	Mediocre	1	3	3	*Por encima fuente **Desde la fuente es
3	Fugas de vapores a través de válvulas y bridas	Válvulas	P	NH3	Amb	Amb	G	N	Medio	Mediocre	1	3	3	*Por encima fuente **Desde la fuente es
4	Derrame o fuga en el suelo a través de bridas, uniones, etc.	Bridas y uniones	P	NH3	Amb	Amb	L	N	Medio	Mediocre	1	1	4	*Por encima fuente **Desde la fuente es
5	Accesorios de tubería e instrumentación	Tuberías y equipos	S	NH3	Amb	Amb	G	N	Medio	Mediocre	1	4	1,5	*Por encima fuente **Desde la fuente es

Tabla 8.12. Clasificación de zonas ATEX para la Balsa 2

CLASIFICACIÓN DE ZONAS (ZONA DE FRÍO –BALSA 3)

CLASIFICACIÓN DE ZONAS (ZONA DE FRÍO –BALSA 3)														
Fuentes de Escape		Sustancia inflamable					Ventilación			Emplazamiento peligroso				
	Descripción	Localización	Grado de escape	Nombre	Tª y P de operación		Estado	Tipo	Grado	Disponibilidad	Tipo de zona	Extensión zona (m)		Observaciones
												Vertical	Horizontal	
1	Fuga o derrame a través del compresor	Compresores	P	NH3	Amb	Amb	G	N	Medio	Buena	2	1	3	*Por encima fuente **Desde la fuente es
2	Fuga de vapores a través de válvula de seguridad	Válvula seguridad	P	NH3	Amb	Amb	G	N	Medio	Buena	2	3	3	*Por encima fuente **Desde la fuente es
3	Fugas de vapores a través de válvulas y bridas	Válvulas	P	NH3	Amb	Amb	G	N	Medio	Buena	2	3	3	*Por encima fuente **Desde la fuente es
4	Derrame o fuga en el suelo a través de bridas, uniones, etc.	Bridas y uniones	P	NH3	Amb	Amb	L	N	Medio	Buena	2	1	4	*Por encima fuente **Desde la fuente es

Tabla 8.13. Clasificación de zonas ATEX para la Balsa 3



Observando los valores de las tablas anteriores (tablas 8.12 y 8.13) tenemos que la balsa 2 podemos clasificarla toda ella como Zona 1 (existen extensiones verticales y horizontales de 4 metros sobre fuentes de escape), debido a que presenta una disponibilidad de ventilación mediocre.

Con relación a la balsa 3 esta se clasifica toda ella como Zona 2 por los motivos anteriormente expuestos. En este caso se clasifica como Zona 2 y no como Zona 1 por la disponibilidad de ventilación buena.



8.2. Metodología cuantitativa basada en la norma italiana CEI 31-35 (2001). Programa ProgEX

Esta metodología se ha definido en el capítulo 7 (en el punto 7.1.1.2.). Para su aplicación se utiliza un software cerrado en el cual se introducen los datos indicados anteriormente. El software los implementa y presenta en pantalla la clasificación de la zona con su extensión. Veamos los resultados obtenidos:

8.2.1. Depósitos de GNL

- Emisión de los venteos de GNL (figura 8.4).

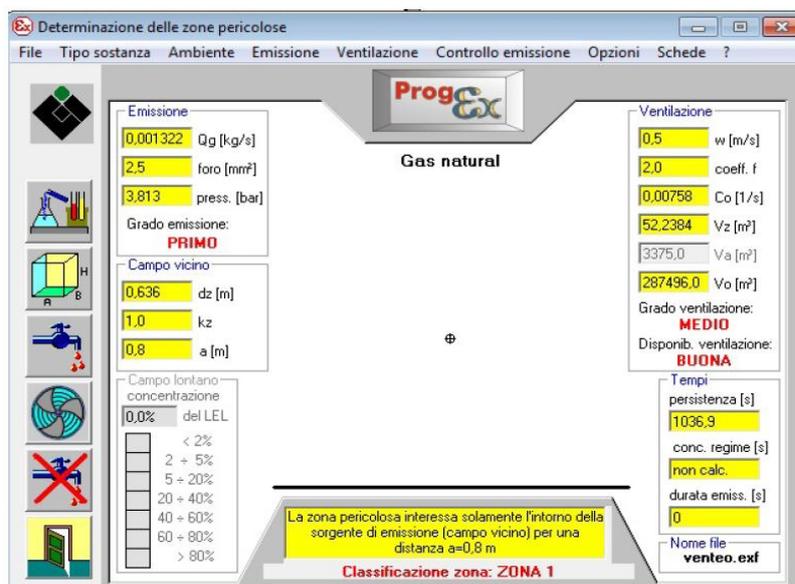


Figura 8.4. Clasificación y extensión de la zona mediante programa ProgEx (venteos)

- Fugas en válvulas y bridas de las tuberías de GNL (P= 3 BAR) -(figura 8.5).

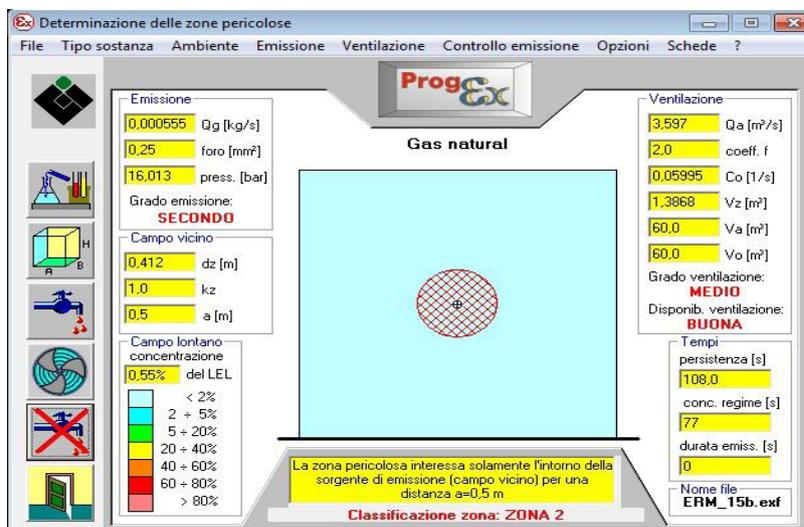


Figura 8.5. Clasificación y extensión de la zona mediante programa ProgEx (válvulas y bridas)



- Fugas en válvulas y bridas de las conducciones de gas natural (interior cubeto) - (figura 8.6).

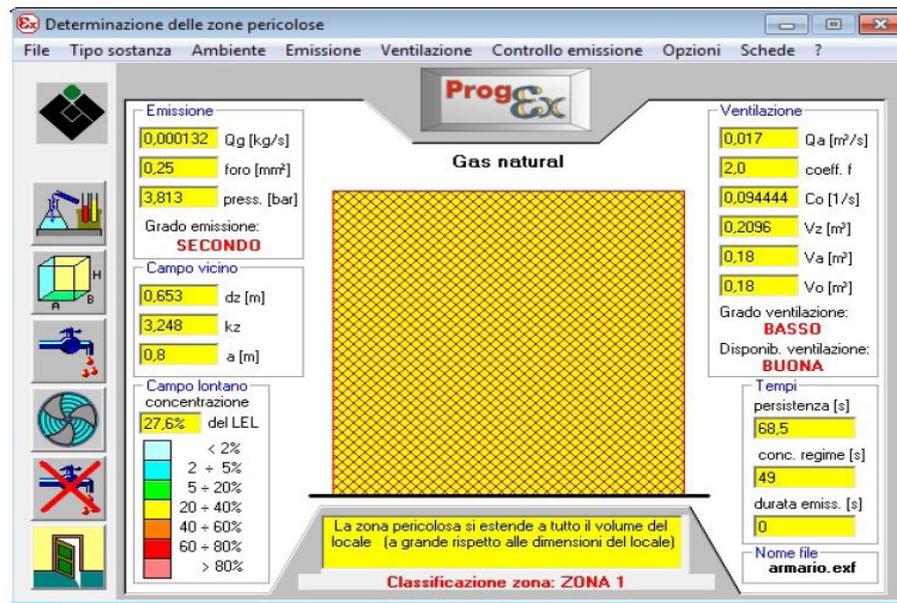


Figura 8.6. Clasificación y extensión de la zona mediante programa ProgEx (interior cubeto)

8.2.2. Sala de calderas

- Fugas en válvulas y bridas de las conducciones de gas natural en el interior de la sala de calderas (figura 8.7).

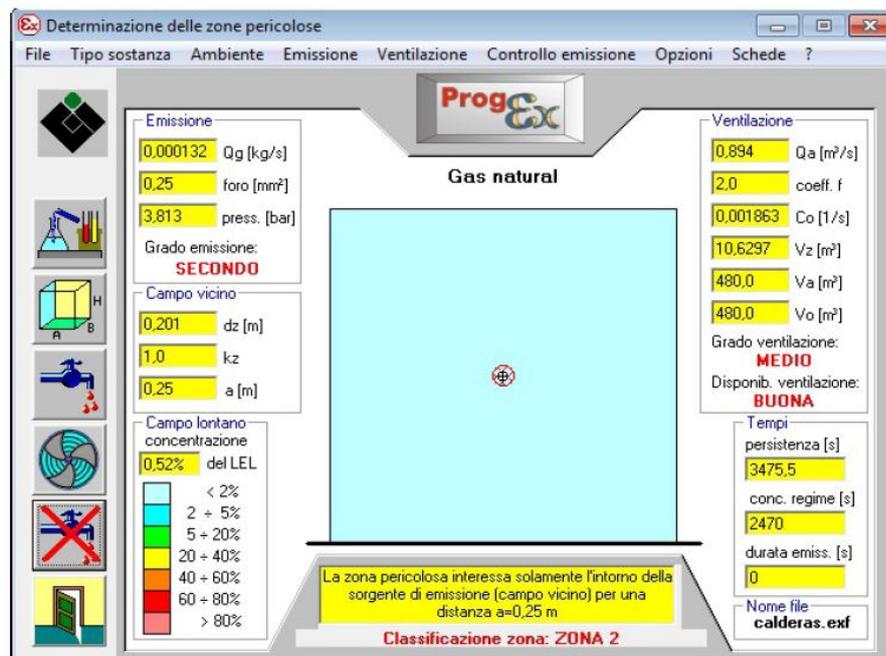


Figura 8.7. Clasificación y extensión de la zona mediante programa ProgEx (válvulas y bridas interior sala calderas)



- Fugas en válvulas y bridas de las conducciones de gas natural en el interior de la sala del generador de vapor (figura 8.8).

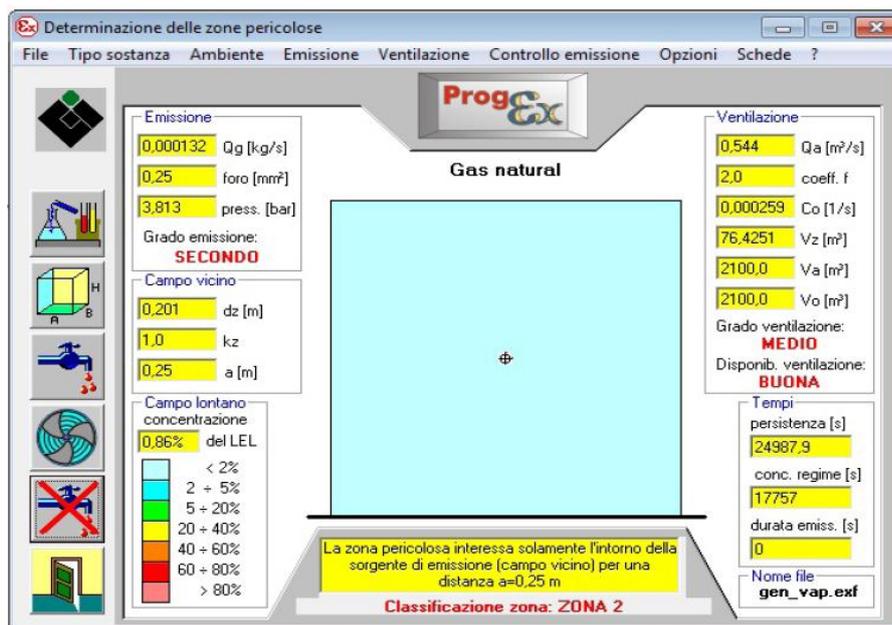


Figura 8.8. Clasificación y extensión de la zona mediante programa ProgEx (válvulas y bridas interior sala calderas)

8.2.3. Zona de carga de carretillas

- Emisiones de hidrógeno por los tapones de la batería emitidos durante el proceso de carga (figura 8.9).

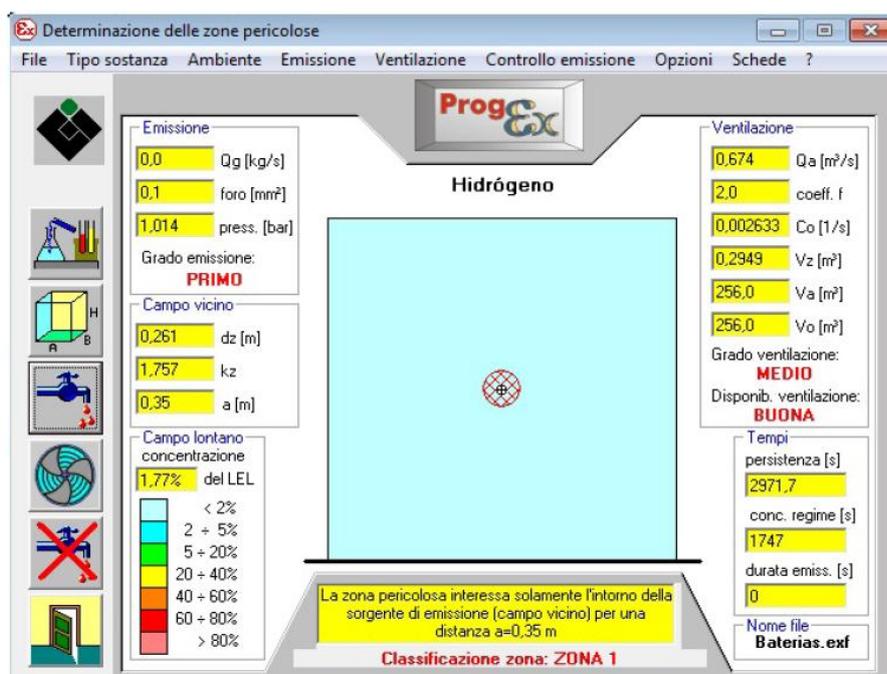


Figura 8.9. Clasificación y extensión de la zona mediante programa ProgEx (zona de carga de carretillas)



En este caso la zona se clasifica como Zona 1 y se debe considerar una distancia de 0,35 metros alrededor de cada tapón de la batería.

En la tabla siguiente (8.14) se recogen los resultados obtenidos con esta metodología.

Sala de frío 2			
Zona	Resultado	Zona	Resultado
Depósitos de GNL- Emisión de venteos	Esfera de 0,8 m de radio alrededor de los venteos	Sala de calderas-fugas en válvulas y bridas de las conducciones de gas en el interior de la sala	Esfera de 0,25 m de todas las fuentes de escape
Depósitos de GNL- Fugas en válvulas y bridas de tuberías	Esfera de 0,5 m de radio alrededor de válvulas y bridas	Sala de cargas de batería	Esfera de 0,35 m alrededor de las fuentes de escape
Depósitos de GNL- interior del cubeto	Zona 1 todo el recinto	Salas de frío	Zona 2 todo el recinto

Tabla 8.14. Tabla resumen de resultados con el programa ProgEx

8.3. Aplicación de la metodología CFD a las zonas de estudio. Programa FLUENT

En el siguiente apartado se muestran los resultados obtenidos en las zonas de estudio mediante la simulación con el programa FLUENT de CFD. Recordamos que las zonas objeto de estudio para gases y vapores son:

- DEPÓSITOS DE GNL.
- SALA DE CALDERAS.
- ZONA DE CARGA DE BATERÍAS.
- ZONA DE FRÍO.

8.3.1. Validación del programa FLUENT

Antes de proceder a realizar el estudio sobre la zonas definidas anteriormente, vamos a proceder a validar el programa FLUENT. Para ello, se presentan los resultados de varias simulaciones realizadas. Así, como otros métodos alternativos para comprobar la validez del software.

8.3.1.1. Simulación del proceso de combustión para una botella de gas butano de 0,5 kg.

Este primer experimento consistió en determinar el gradiente de temperaturas para una llama de un soplete alimentado con una botella de 0,5 kg de butano. Los elementos utilizados son la botella de gas de 0,5 kg, el cabezal del soplete, un termohigrómetro kestrel k3000 para comprobar la velocidad de escape del gas, la cámara termográfica FLIR E 60 y un flexómetro para medir de forma aproximada la llama emitida por el soplete (fotografías 8.34, 8.35, 8.36 y 8.37).



Foto 8.36. Elementos utilizados en el experimento (1-botella de 0,5 kg de butano, 2- cabezal de soplete para acoplar en la botella, 3-termohigrómetro kestrel k3000 para medir la velocidad de escape del gas, 4-cámara termográfica FLIR E60 y 5-flexómetro)



Fotos 8.37, 8.38 y 8.39. Elementos utilizados en el experimento y medida de la llama.

Así, ayudándonos de la ya comentada cámara termográfica FLIR E60 se procedió a obtener la imagen termográfica de la llama de este soplete y su correspondiente gradiente de temperaturas obteniendo la fotografía siguiente (foto 8.40).

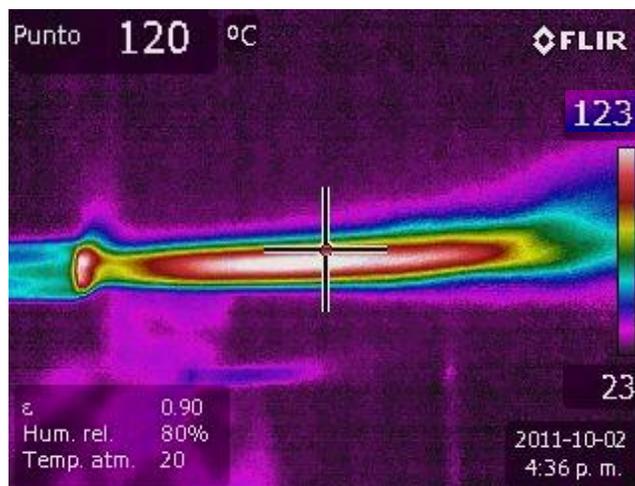


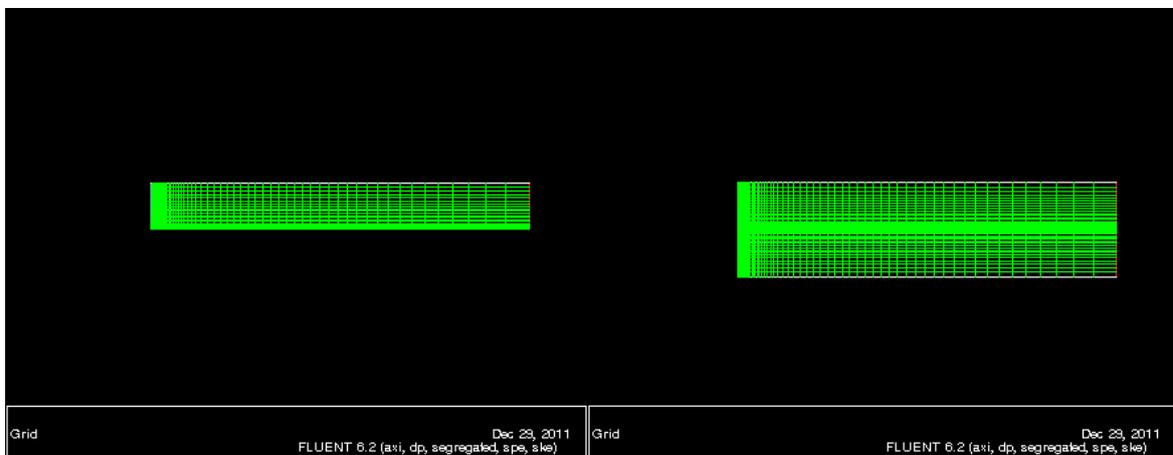
Foto 8.40. Imagen termográfica de la llama del soplete



Podemos observar en la fotografía anterior como la llama presenta distintas coloraciones indicativas de las diferentes temperaturas. Así, a la salida del soplete hay una zona “fría”, otra zona conocida como “dardo” que es la más brillante, la “zona reductora” que envuelve el dardo (zona de color rojo) y donde se alcanza la máxima temperatura y el “penacho” que constituye la envoltura de la llama siendo esta una zona oxidante.

Una vez obtenida la imagen termográfica procedemos a validar el programa FLUENT comparando el resultado de la simulación de la combustión de la llama con la imagen termográfica.

Primeramente construimos la malla considerando dimensiones reales de la boquilla del gas y de la medida de la llama de forma aproximada. Sobre esta geometría vamos desarrollar la simulación imponiendo sobre ellas las condiciones iniciales y de contorno. Por simplificación consideramos que la llama presenta simetría axial y dibujamos la mitad de la malla tal y como puede verse en la figura 8.10. Realizado esto podemos duplicar la malla realizando la simetría respecto al eje x mediante la opción de *display mirror* (figura 8.11).



Figuras 8.10 y 8.11. Malla realizada inicialmente y su duplicado

Definimos inicialmente el modelo que vamos a simular, seleccionando las ecuaciones de energía, el modelo de turbulencia k-ε y las especies que intervienen (en este caso butano y aire)

A continuación, sobre la geometría imponemos las condiciones de contorno: parte superior, inferior y derecha de la malla condición tipo *wall*, ya que el experimento lo realizamos en una sala con velocidad del aire prácticamente nula; la entrada del gas en



la geometría que simboliza la velocidad de escape del gas es *vinlet*. Para esta condición asignamos el valor de 16,5 m/s, velocidad medida con el termohigrómetro kestrel en la boquilla (este valor no presentó fluctuaciones significativas).

Seguidamente seleccionamos las condiciones iniciales, la influencia de la gravedad, temperatura, etc., el modelo de resolución (para este caso a primer orden es suficiente) con los criterios de convergencia y el número de iteraciones (en el caso de estudio de escape de hidrógeno en la cámara de congelado se detallarán todos los pasos a la hora de crear la simulación).

El resultado se muestra en pantalla, aquí se presenta en la figura siguiente (figura 8.12) en la cual se incluye la imagen termográfica para así poder comparar.

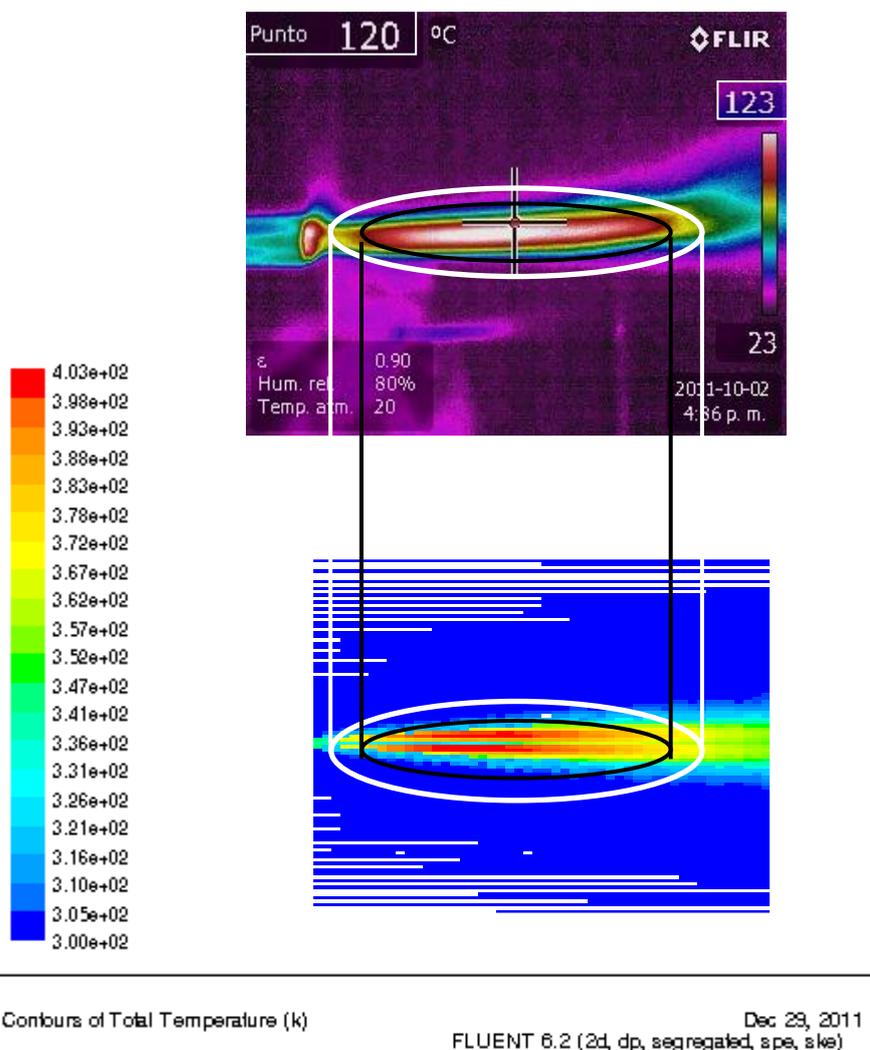


Figura 8.12. Simulación obtenida con FLUENT (figura inferior) e imagen termográfica (superior)



En la parte inferior de la figura podemos observar los contornos de temperatura en (K) de la llama, donde se puede apreciar que son muy similares a los obtenidos mediante termografía. Existen pequeñas diferencias de turbulencia en la envolvente de la llama obtenidos en la simulación; esto es debido a que hemos realizado una simetría axial de la malla imponiendo las mismas condiciones de contorno para ambas zonas (parte superior y parte inferior). Hay que pensar que aunque la ventilación es prácticamente nula en la sala, la altura de la llama a la mesa es del orden de 20 cm y de la parte superior al techo 2 m lo que genera esa diferencia de contorno y que lógicamente los gases tienden a subir.

La longitud de la llama presenta buena correlación con la imagen termográfica y con los valores reales medidos (8 cm aproximadamente). En la figura 8.13 se muestran los contornos de velocidad de la temperatura de la llama considerando la mitad del alcance de la misma. Podemos apreciar los distintos valores de temperatura de la llama relacionados con la escala ubicada a la izquierda de la misma. Los resultados coinciden con los valores de la imagen termográfica y complementan el resultado de la figura 8.12. Por último indicar que el efecto de duplicar la malla (simetría axial) hace que aparezca una línea blanca.

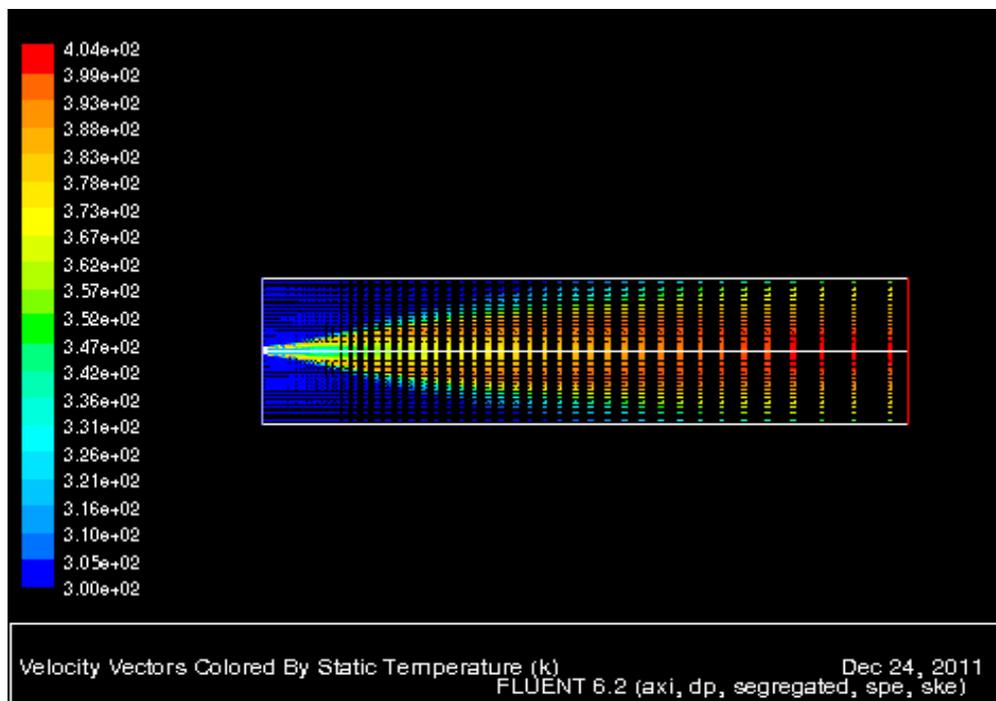


Figura 8.13. Vectores de velocidad para la temperatura de la llama



8.3.1.2. Simulación del proceso de combustión para una botella de gas propano de 35 kg.

El siguiente ejemplo de validación se realizó contando con la colaboración del sargento del Parque de Bomberos de Lugo (D. José Cedrón Pérez). En este caso, se procedió a realizar varias mediciones de velocidades de escape para una botella de gas propano de 35 kg. conectada a través de un dispositivo lanzallamas.

El dispositivo lanzallamas consiste en tres toberas dispuestas sobre un caballete y colocadas en disposición paralela separadas 21 cm entre sí (fotos 8.41 y 8.42). A ellas, se encuentra conectada una tubería de conexión de 2 cm de diámetro y conectada a la boquilla de la botella de propano. El paso del gas se regula mediante una válvula de accionamiento manual (foto 8.43). En el interior de la tobera y en su punto medio (es decir, a 15 cm) se encuentra el punto de salida de gas consistente en un orificio circular de diámetro 3 mm (fotos 8.44 y 8.45).



Foto 8.41. Caballete

Foto 8.42. Tubería de conexión

Foto 8.43. Válvula manual



Fotos 8.44 y 8.45. Orificio de escape de gas de diámetro 3mm en interior tobera

Para poder simular el proceso de combustión que tiene lugar, se procedió a realizar mediciones de velocidad de escape de gas (fotos 8.46, 8.47 y 8.48) con la llave de paso completamente abierta mediante un termohigrómetro testo 440 con antena extensible y rango de medición de 0,1 a 60 m/s.



Fotos 8.46, 8.47 y 8.48. Mediciones de escape de gas.

Los resultados obtenidos de velocidad de escape del gas de forma sostenida oscilaron entre los 38,2 m/s hasta los 40,2 m/s con el paso del gas abierto en su totalidad. También se obtuvo de forma puntual un valor máximo de 48,7 m/s en el momento de apertura de gas cuando la botella se encontraba llena, lógicamente a medida que se va consumiendo el gas la velocidad va disminuyendo. La velocidad medida con el paso del gas al mínimo de gas fue de 9,6 m/s.



Fotos 8.49 y 8.50. Valores de escape de velocidad de gas en m/s

También se realizaron mediciones de velocidad de viento en la zona que van a constituir condiciones de contorno. El siguiente paso ha sido hacer uso de la cámara termográfica para poder obtener el gradiente de temperaturas de la llama generada (foto 8.51).

Realizada esta primera parte del experimento, la siguiente consistió en generar el proceso de combustión con el programa FLUENT. Primeramente comenzamos creando la geometría con el programa GAMBIT e imponiendo sobre la malla las condiciones de



contorno. Guardada la malla, la exportamos como archivo *msh* para poder trabajar con el programa FLUENT. Mediante éste seleccionamos las ecuaciones de gobierno del estudio, a saber: ecuación de la energía, ecuación de turbulencia (modelo k- ϵ) y sustancias que intervienen.



Foto 8.51. Grabación del proceso de combustión mediante la técnica de la termografía

Hecho esto, se imponen los valores para las condiciones de operación considerando presión exterior atmosférica, efecto gravitacional y temperatura ambiente. Así, ya estamos en disposición de imponer las condiciones iniciales y de contorno (velocidad de escape, velocidad del viento exterior, etc.).

Por ultimo, seleccionamos la iteración de los residuos y fijamos los criterios de convergencia.

Así, ya podemos representar en pantalla la simulación para el proceso de combustión con las condiciones y suposiciones impuestas tal y como puede verse en la figura 8.14.

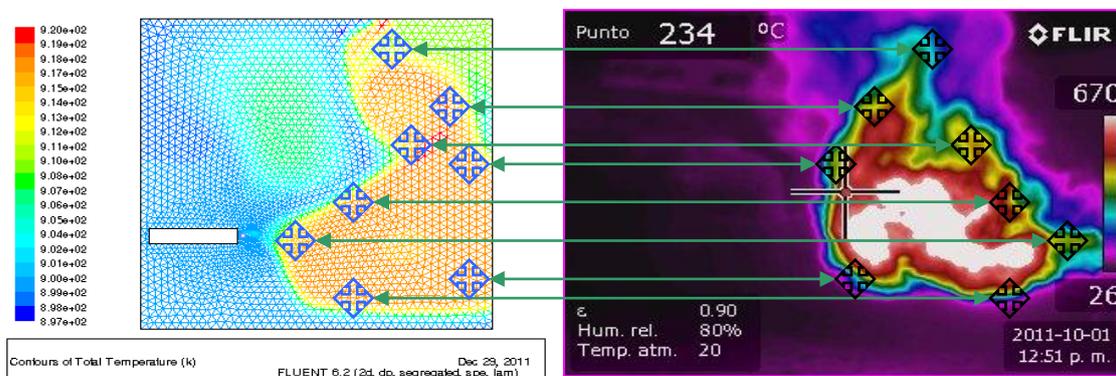


Figura 8.14. Simulación del proceso -FLUENT

Foto 8.52. Imagen termográfica



Comparando ambas imágenes podemos apreciar como la distribución de temperaturas es muy similar. La imagen termográfica (foto 8.52) presenta en el centro de la llama un color más brillante que corresponde a la máxima temperatura de la llama, la envoltente de esta llama (color rojo y rosado en la escala de temperaturas) presenta valores de temperatura muy elevados del orden de 600°C y que se corresponden con los obtenidos en la simulación.

Existen pequeñas diferencias en las turbulencias de la llama en el proceso de combustión obtenidos en la simulación respecto a la imagen termográfica, esto es debido a que hemos considerado por simplicidad una velocidad de escape de gas constante.

Para los instantes iniciales de generación de la llama y considerando que la velocidad de escape de gas presenta una disminución a medida que éste se consume, obtenemos la distribución de temperaturas de la figura 8.15. En ella, el color azul más intenso representa la temperatura ambiente (aprox. 300 K), la envoltente del penacho presenta colores turquesas que indican una temperaturas de entre 460 y 590 K y el dardo junto con su envoltente presenta valores de temperatura de entre 625 y 920 K. Estos valores son muy similares a los obtenidos mediante la técnica de termografía.

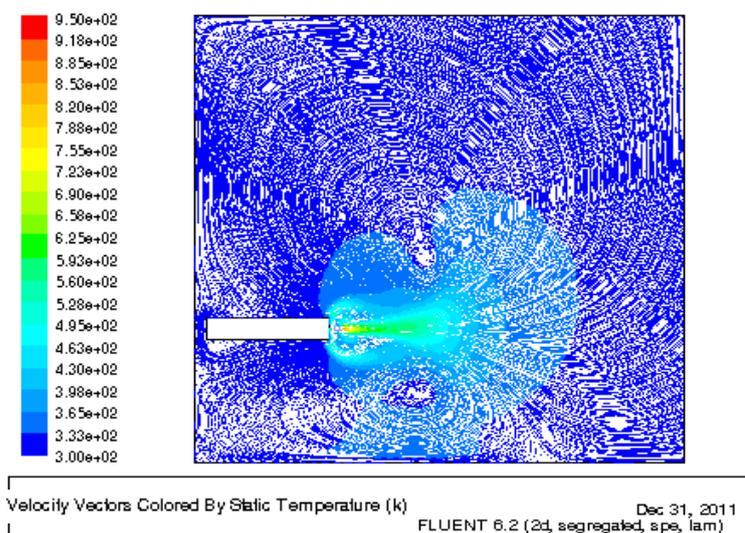


Figura 8.15. Distribución de vectores de temperatura en (K)

Por último, se representa el resultado de una simulación en 3D (figura 8.16) del proceso de combustión considerando como volumen de control un cubo que contiene la llama y sobre el que hemos impuesto condiciones de contorno tipo *wall* a excepción de la velocidad de entrada del gas (punto donde se encuentra una cruz). La fotografía de la

derecha (foto 8.53) representa la imagen termográfica con su correspondiente gradiente de temperaturas.

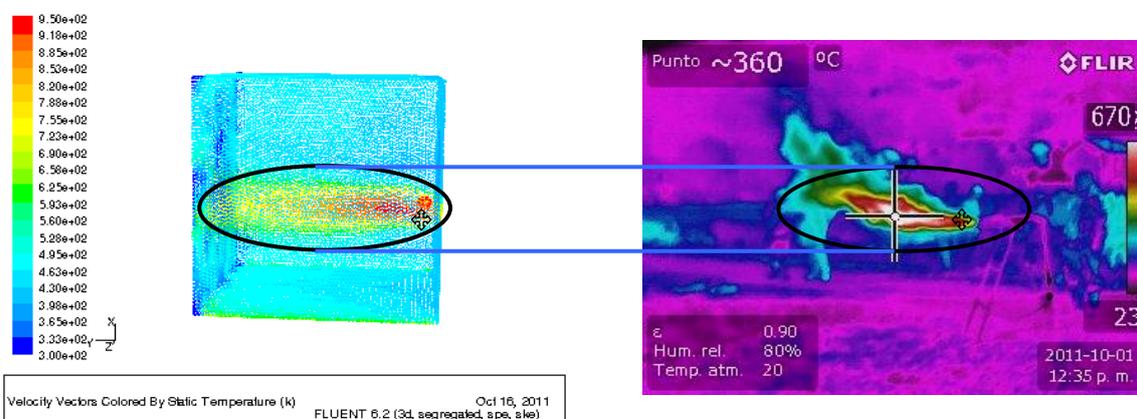


Figura 8.16. simulación en 3D de la combustión

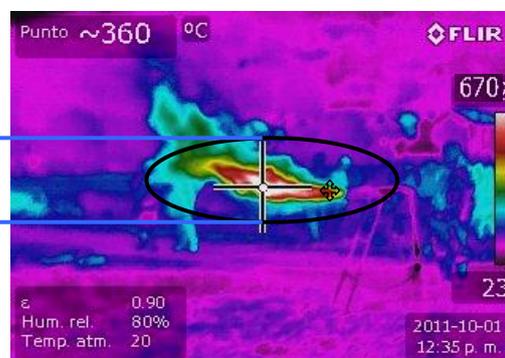


Foto 8.53. Imagen termográfica

Una vez realizado estos ejemplos y satisfecha la validez del programa de simulación (FLUENT) podemos proceder a realizar el estudio de los casos que nos ocupan en nuestra industria láctea.

8.3.2. Estudio de los depósitos de gas natural licuado

Como ya hemos descrito la fábrica dispone de dos depósitos de GNL de 60.000 litros de capacidad cada uno. Ambos depósitos se ubican en la parte posterior de la fábrica.

Para este caso se han agrupado las simulaciones en tres bloques con el objeto de establecer los límites de los posibles escapes de gas y poder compararlos con las zonas límites establecidas por la norma UNE 60.210 (ya que vimos que estos límites son los más restrictivos) y cuyo límite máximo es de 25 metros alrededor de la zona de almacenamiento -cubeto- tal y como hemos visto. Así, tenemos las consideraciones siguientes:

- Primeramente se ha estudiado por separado las fugas de escape de gas en las válvulas principales de los depósitos considerando zonas de estudio alrededor de 15 metros del recinto de los depósitos. Esta zona marca uno de los primeros límites que establece la norma UNE 60.210 con relación a las distancias de seguridad.
- En un segundo estudio se ha ampliado la zona de estudio hasta la zona límite que marca la norma y que son 25 metros alrededor del recinto de los depósitos. En este caso también se ha considerado que la fuga procedía de las válvulas de seguridad de ambos depósitos.



- Por último hemos estudiado lo que sucede de forma general en la fábrica considerando un escape de ambas válvulas, más un escape por cada tubería de alimentación en la descarga del camión (tres en total).

Nota: En todos los casos hemos considerado que la composición del gas es 100% metano, (el porcentaje supera el 92%) y así simplificar las simulaciones.

8.3.2.1. Estudio del escape de los depósitos en la zona de influencia de 15 metros

En este primer caso se ha procedido primeramente a definir la geometría, para ello se han dibujado ambos depósitos con sus geometrías reales, y sus válvulas de los mismos. En la figura 8.17 puede verse esta geometría así como la separación de los nodos que vamos a utilizar para efectuar el mallado. Cabe reseñar que en las zonas de escape se ha procedido a efectuar una segmentación en cinco nodos lo que nos va a permitir un mayor refinamiento de la malla en la zona de escape.

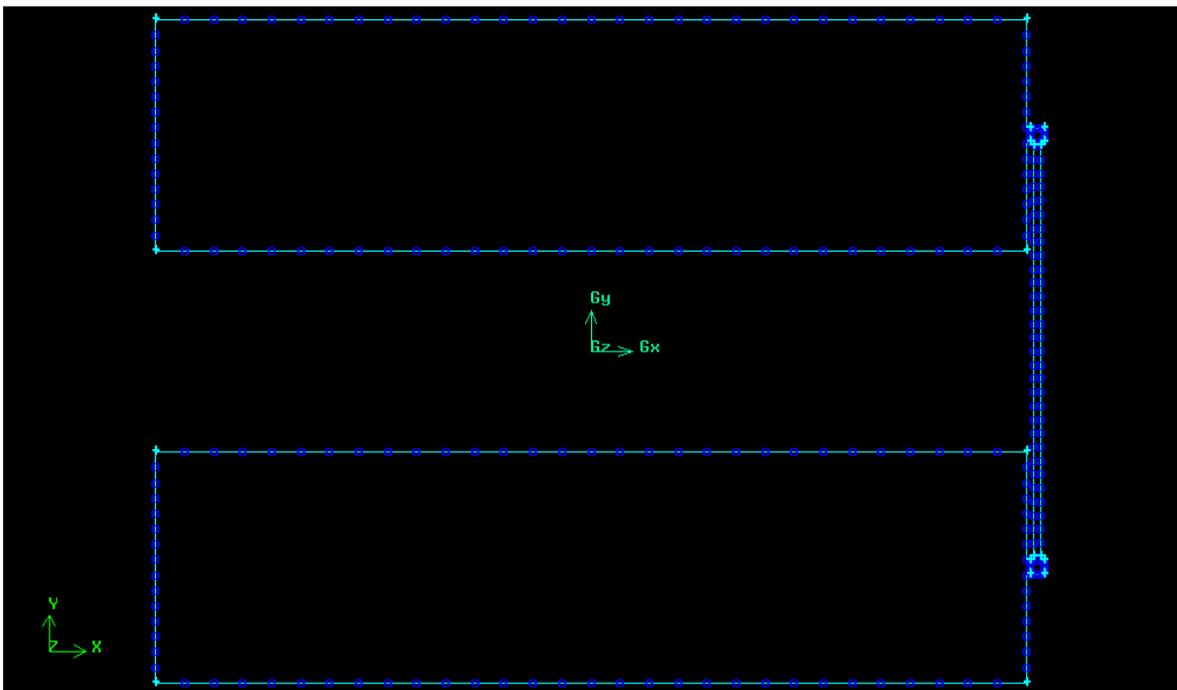


Figura. 8.17. Nodos de separación de los depósitos y de las válvulas de los mismos

En la figura siguiente (figura 8.18) puede apreciarse la compactación de la malla en la zona de las válvulas de ambos depósitos anteriormente expuesta. El refinado de la malla en esta zona va a permitir una mayor exactitud en las simulaciones.

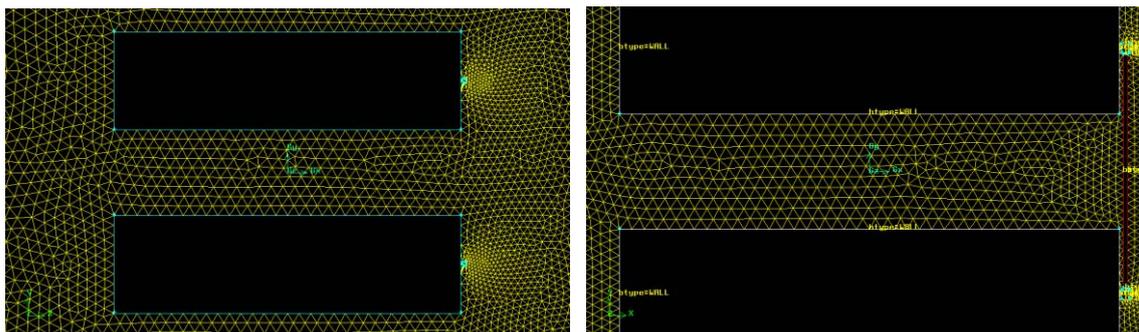


Figura 8.18. Refinado de la malla en las zonas de escape

Una vez realizada la malla debemos imponer las condiciones de contorno sobre la geometría realizada. El resultado es el que se muestra en la figura 8.19.

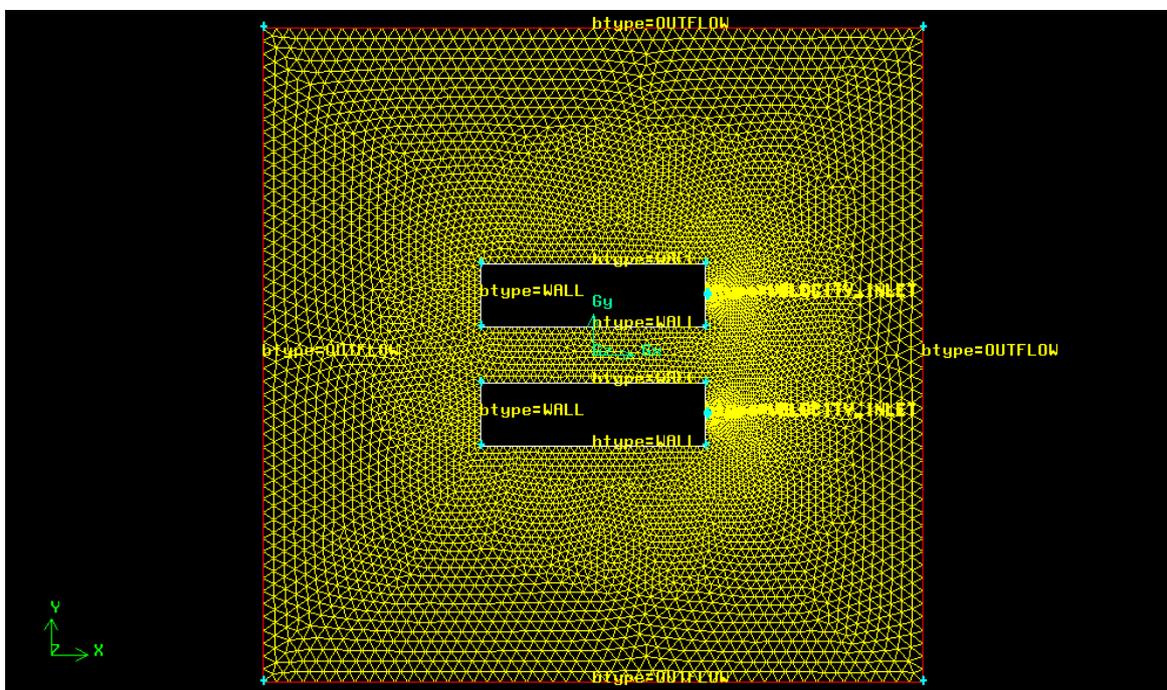


Figura 8.19. Mallado de la geometría y condiciones de contorno

En estas condiciones ya podemos importar la geometría como archivo *msh* y proceder a implementarla como el solver FLUENT.

Primeramente, vamos a estudiar la velocidad en m/s de ambos escapes. La simulación de la figura 8.20 representa la velocidad del escape en la superficie de control objeto de estudio (recordar que hemos definido los límites 15 metros alrededor del contorno de los depósitos siendo esta la primera línea de seguridad) que presenta como es lógico una mayor velocidad del gas en las zonas de escape, disminuyendo a medida que nos alejamos de la fuente.

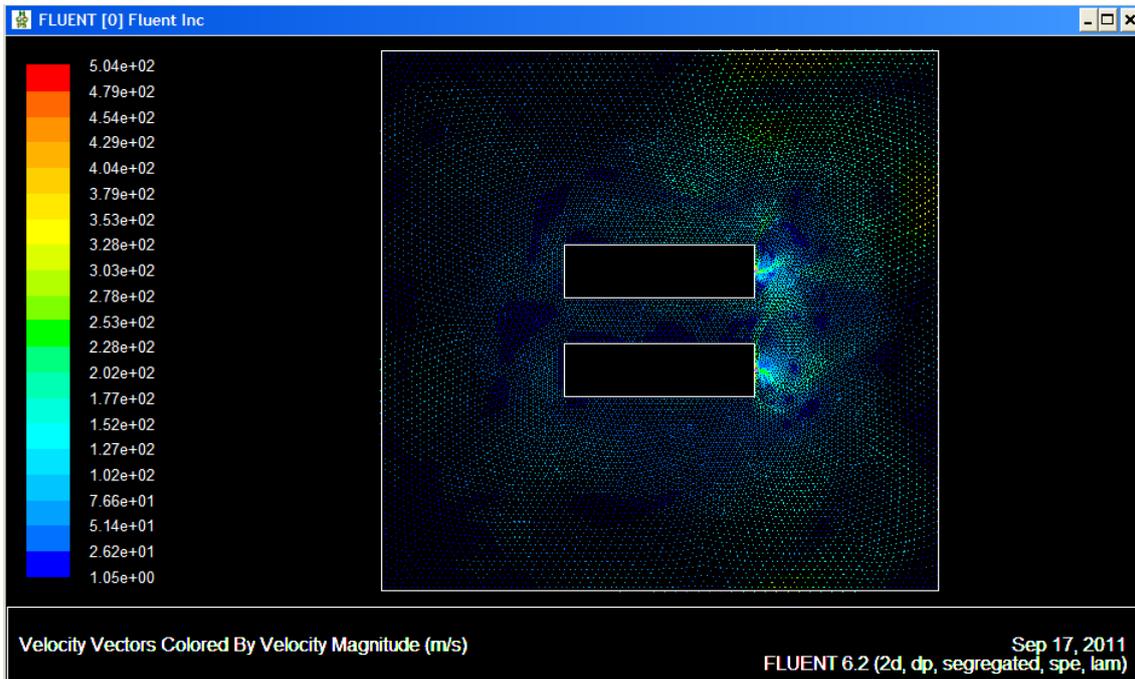


Figura 8.20. Vectores de velocidad para los escapes de gas

La siguiente simulación (figura 8.21) se representan las líneas de corriente para el escape de gas metano en los instantes iniciales del escape.

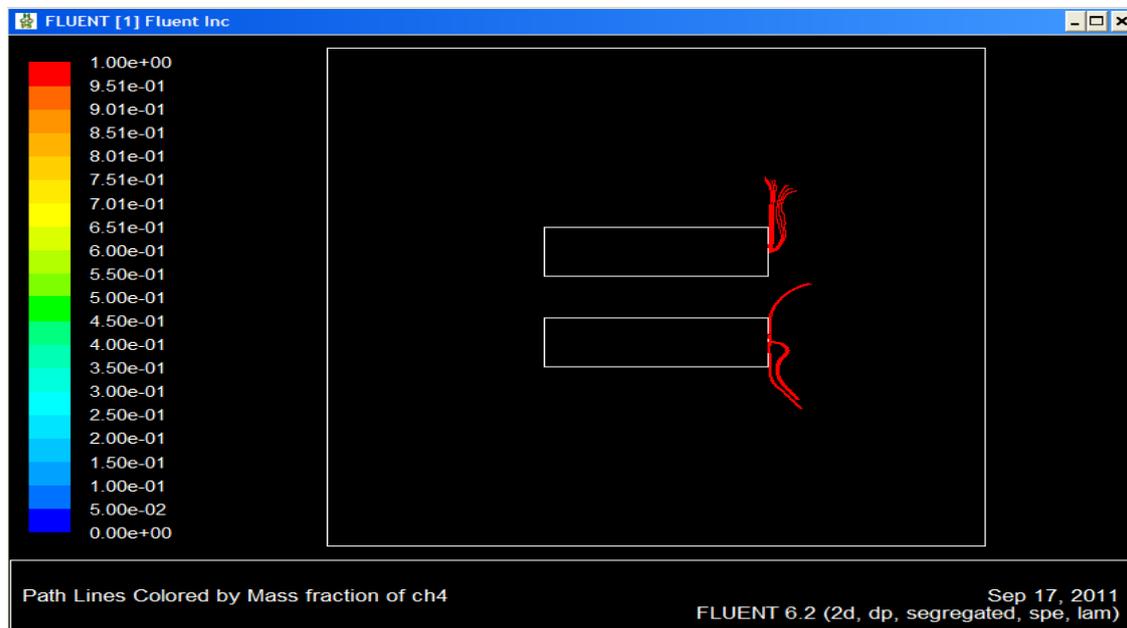


Figura 8.21. Vectores de velocidad para los escapes de gas

En la figura superior podemos fijarnos en el “itinerario” que describen las líneas de corriente en esta simulación. En el depósito superior las líneas de corriente se agrupan y tienden a subir (esto es así, debido a que hemos impuesto las condiciones de contorno



de velocidad del viento registradas en la visita realizada a la empresa el 14 de julio (-v=1 a 2 m/s-). Para el depósito inferior hemos tomado la condición de contorno de velocidad nula valor obtenido también con el termohigrómetro en puntos de la cara inferior del cubeto).

De la valoración de la nube de escape de gas metano (figura 8.22), podemos apreciar como de forma clara la suma de ambos escapes viola prácticamente la zona de seguridad de 15 metros establecida por la norma UNE 60210. La mayor concentración de metano (color rojo, naranja, amarillo) se dibuja mediante una geometría amorfa que se ubica en mayor medida junto a las zonas de escape y en la parte superior y posterior de ambos depósitos. No obstante, en prácticamente toda la superficie de control existen contornos del escape de gas.

También podemos simular el proceso inverso, es decir, determinar el aire (O₂, n₂ y otros gases) existente en la zona de estudio. El resultado que se obtiene es el que se presenta en la figura 8.23 que complementa lo anteriormente expuesto.

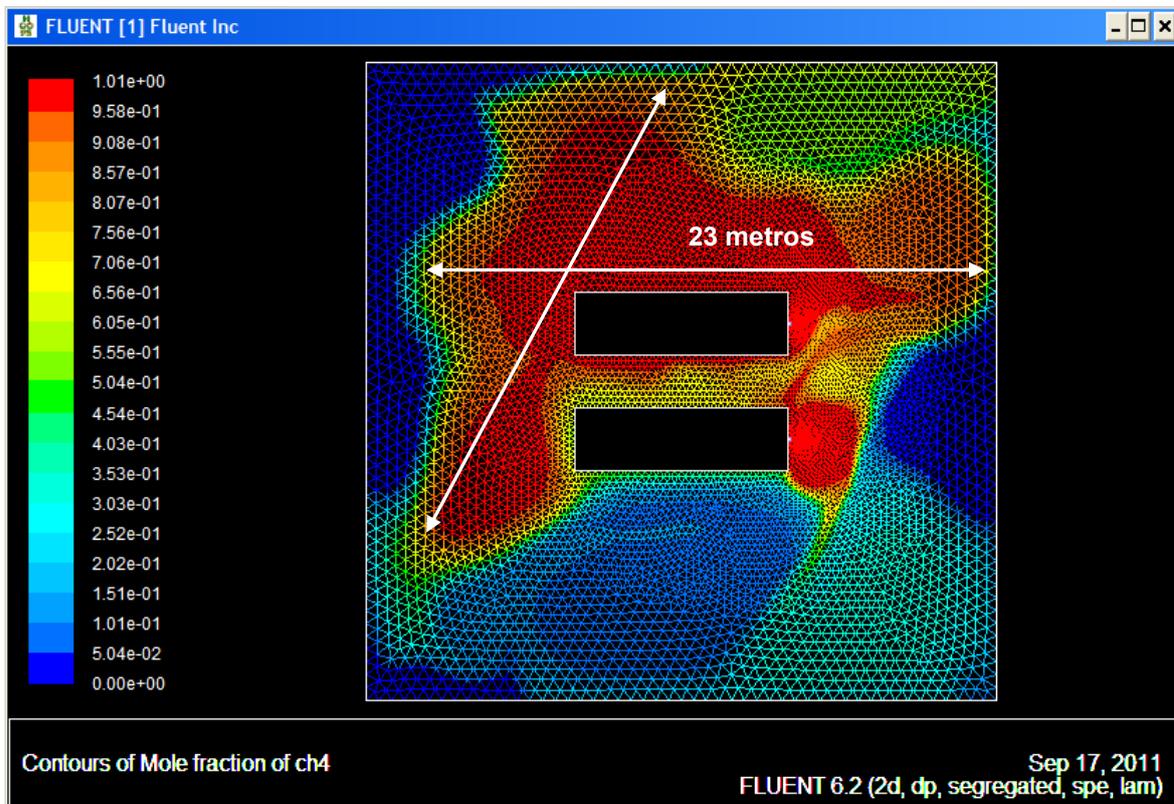


Figura 8.22. Contornos de fracción molar de metano en la zona de estudio

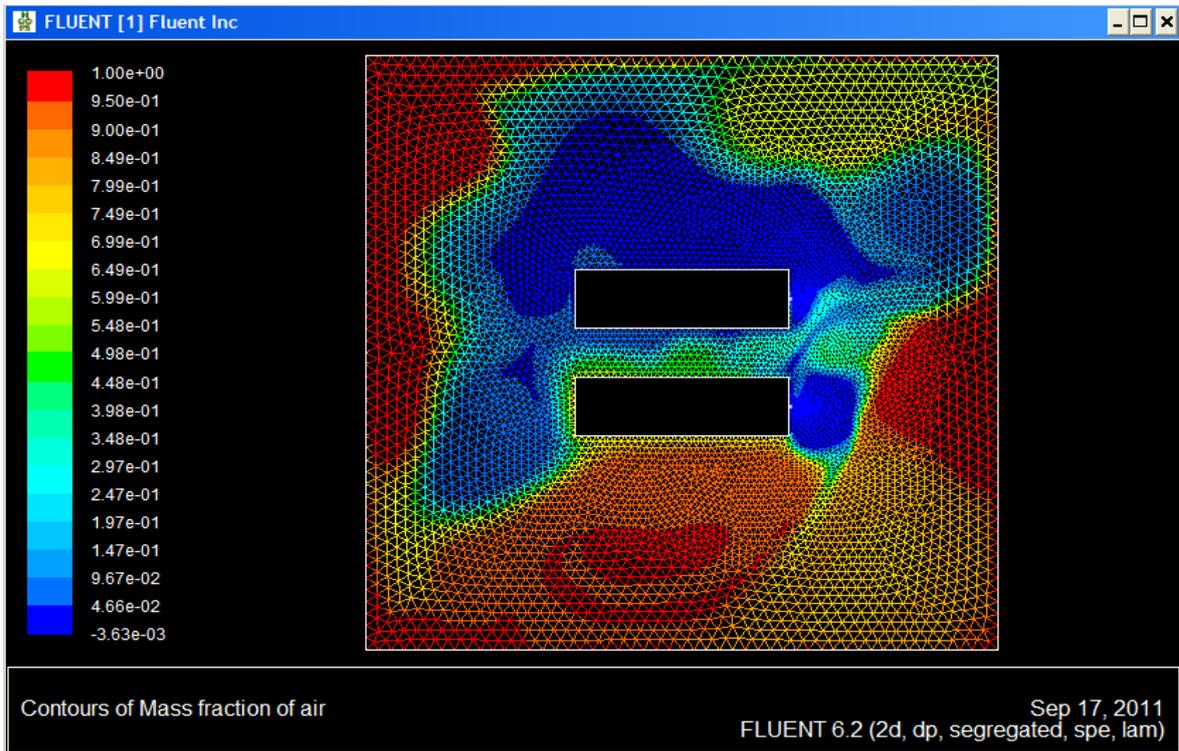


Figura 8.23. Contornos de fracción másica de aire en la zona de estudio

El número de iteraciones seleccionado para el estudio de este primer caso ha sido de 200 tal y como puede verse en la figura siguiente (figura 8.24).

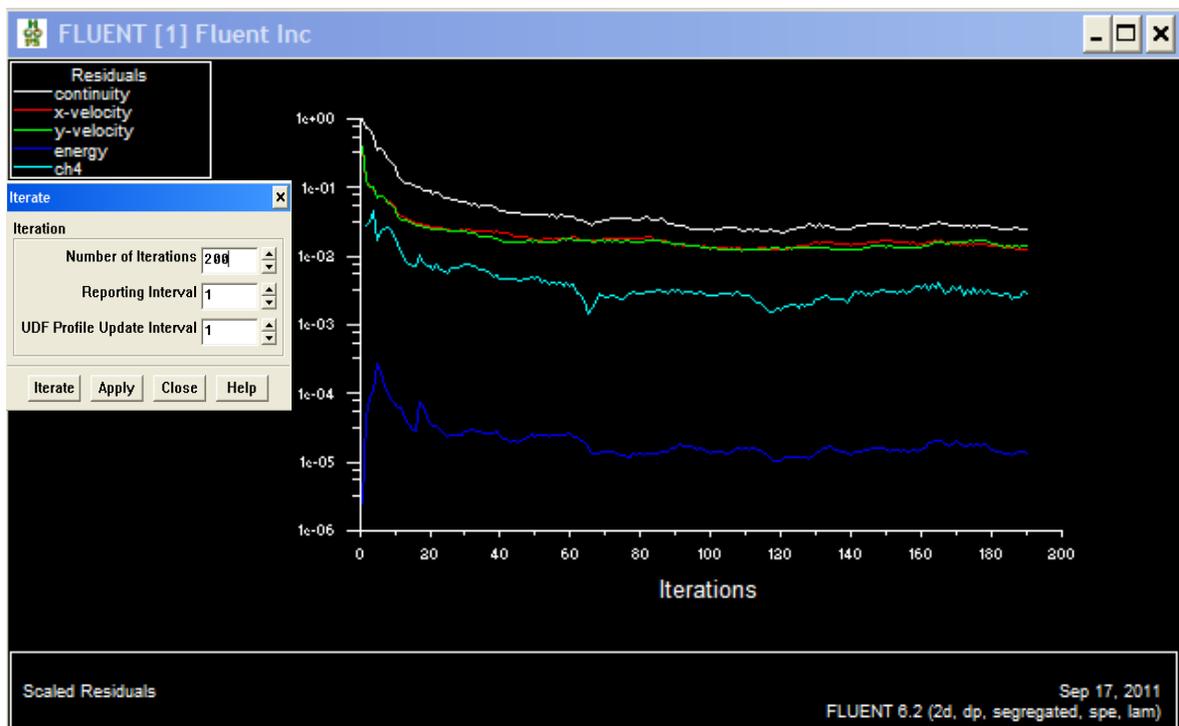


Figura 8.24. Gráfico de las iteraciones empleadas en la primera simulación



8.3.2.2 Estudio del escape de los depósitos en la zona de influencia de 25 metros

Este caso es similar al anterior, salvo que aquí se ha ampliado la zona de estudio hasta los 25 metros alrededor de la zona de almacenamiento de gas (figura 8.25).

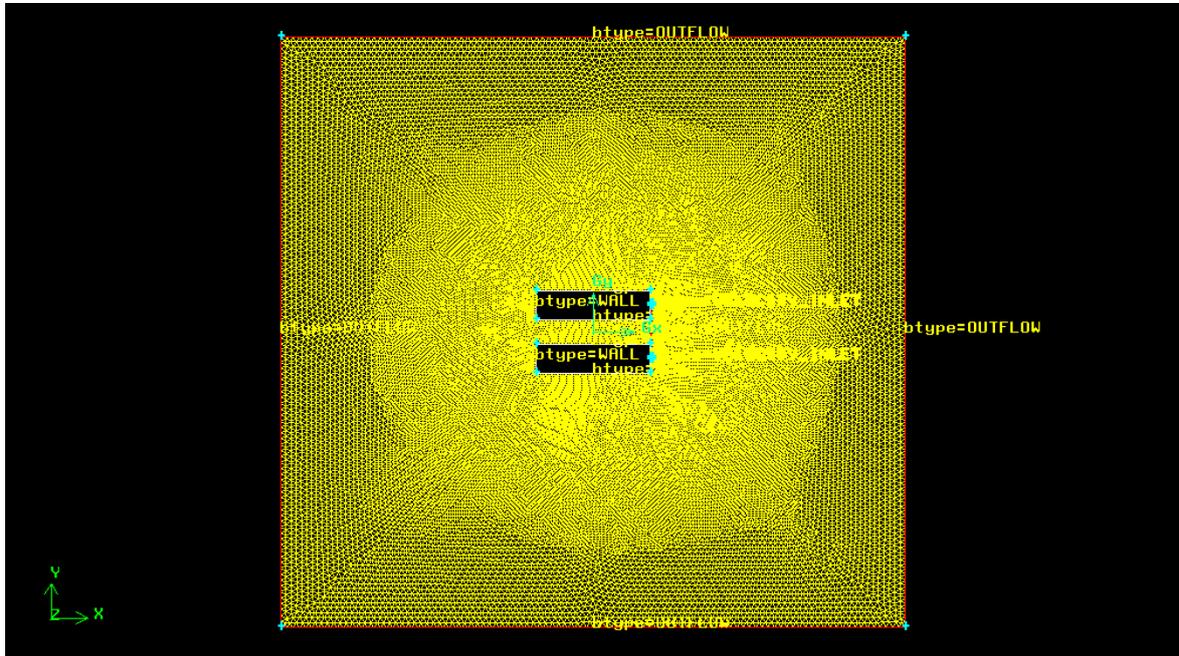


Figura 8.25. Geometría mallada y condiciones de contorno

La simulación de la figura 8.26 realizada con el programa FLUENT muestra el escape de gas metano (contornos de fracción másica) para ambos depósitos.

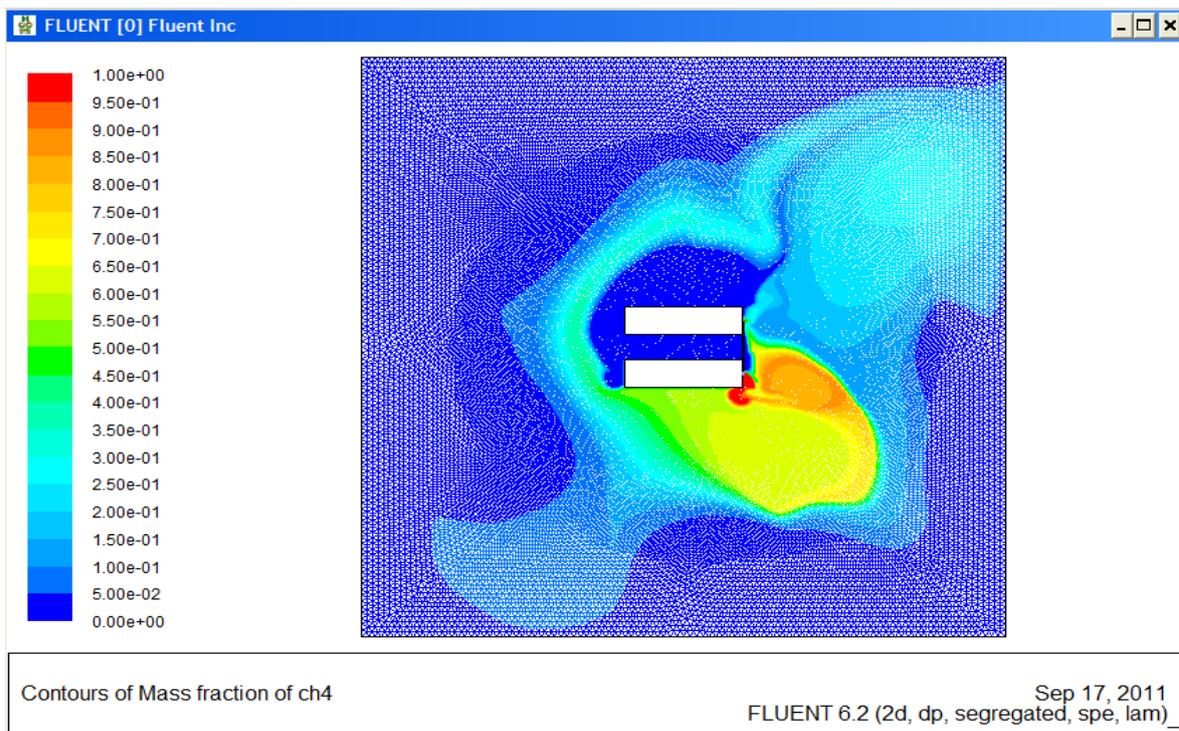


Figura 8.26. Contornos de fracción másica de metano



Se aprecia en la figura anterior (figura 8.26) como la mayor concentración de gas corresponde a las inmediaciones de la zona de escape, produciéndose una dispersión de la nube del escape de gas hacia la zona de almacenamiento de la fábrica y de las oficinas. También podemos observar como la nube de metano se extiende hacia las zonas límite que establece la norma UNE 60.210 y que son 25 metros alrededor de la zona de almacenamiento de ambos depósitos.

En la figura 8.27 se muestra la evolución de los contornos de fracción másica para el aire que viene a refrendar lo anteriormente expuesto.

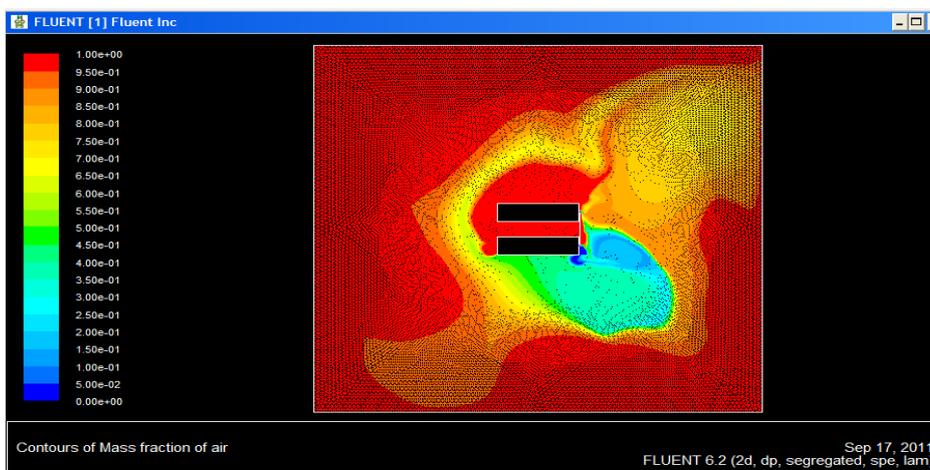


Figura 8.27. Contornos de fracción másica para el aire en la zona de estudio

Podemos obtener en la geometría del caso de estudio los valores de densidad tanto para el escape de gas como para el aire. El gas metano presenta una densidad relativa al aire de 0,68 y podemos ver que valores de este orden se corresponden con prácticamente los tres últimos colores azules de la escala de colores de la figura 8.28 indicando una mayor presencia del gas.

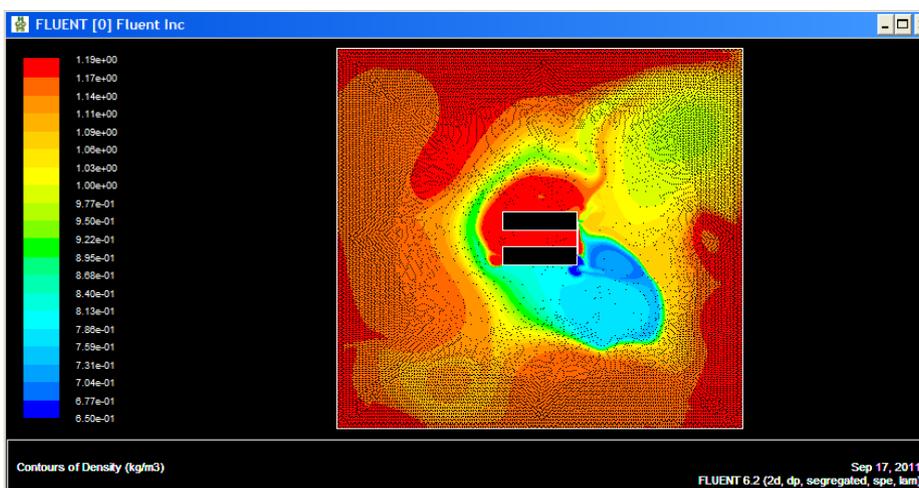


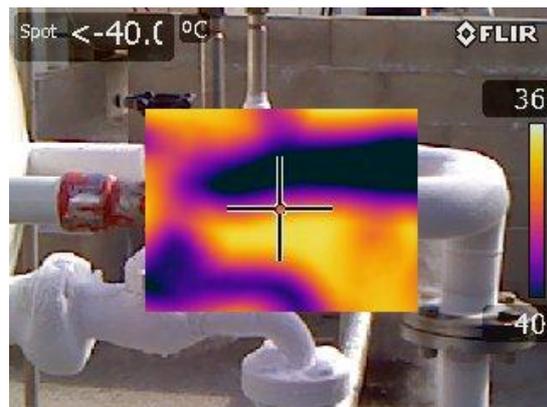
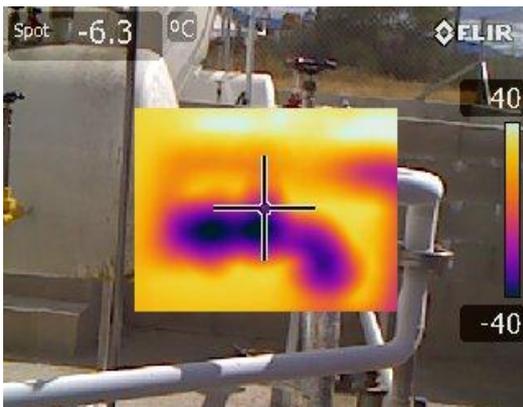
Figura 8.28. Contornos de densidad en Kg/m^3 en la zona de estudio

8.3.2.3. Estudio del escape en los depósitos y durante el proceso de descarga

Procedemos a continuación a estudiar un escape de mayores dimensiones considerando fugas en las tres mangueras durante el proceso de descarga (fotos 8.54 y 8.55) y en las válvulas principales de ambos depósitos (fotos 8.56 y 8.57).



Fotos 8.54 y 8.55. Mangueras de descarga de gas durante el proceso de descarga



Fotos 8.56 y 8.57. Válvulas principales de los depósitos de GNL

Este caso es de mayor complejidad y el objetivo del mismo es poder estudiar de una forma general como evolucionaría la nube de gas en el recinto de la fábrica para un escape quintuple.

Primeramente vamos a realizar la geometría de las zonas de estudio considerando los diferentes edificios y secciones de la fábrica. Así, en la figura siguiente (figura 8.29) se muestra la geometría mallada con el programa GAMBIT y la ubicación de los depósitos de gas, el camión de descarga y parte de los locales de oficinas y almacén de leche en polvo.

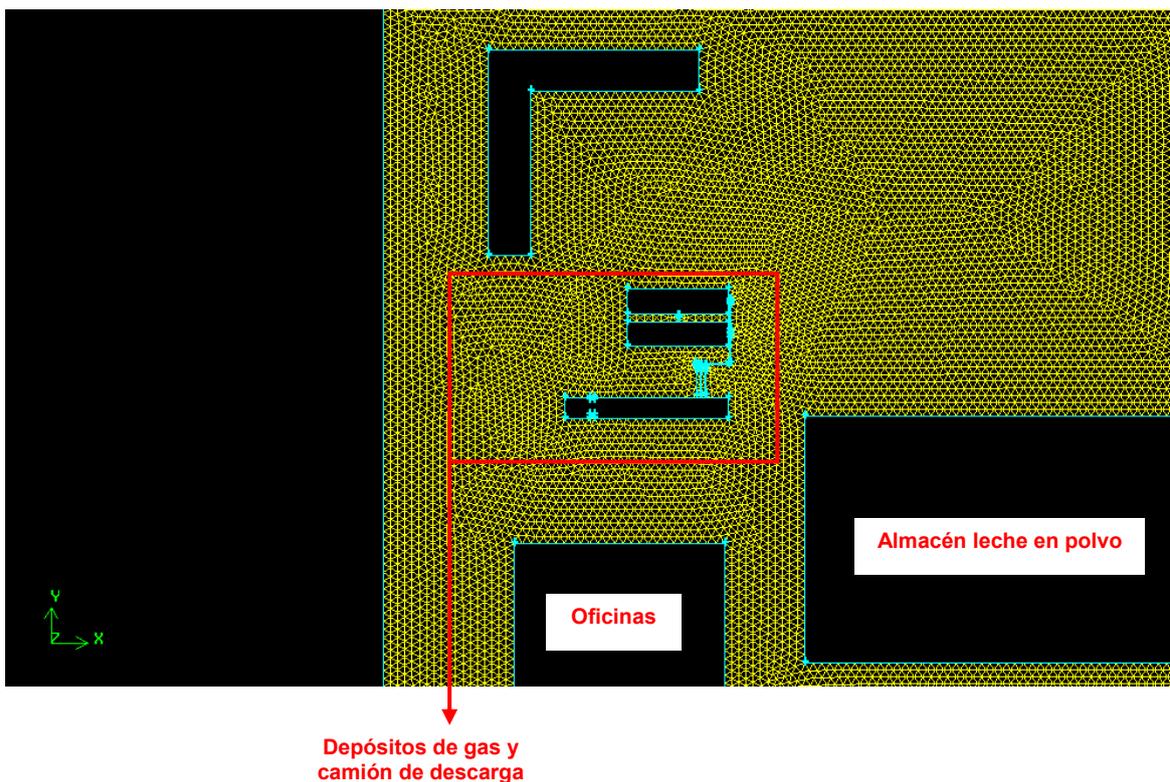


Figura 8.29. Ubicación en la geometría mallada de la zona de depósitos de GNL con camión de descarga, local de oficinas y almacén de leche en polvo

La ubicación ampliada de los dos depósitos con el camión efectuando la descarga es la que se representa a continuación (figura 8.30).

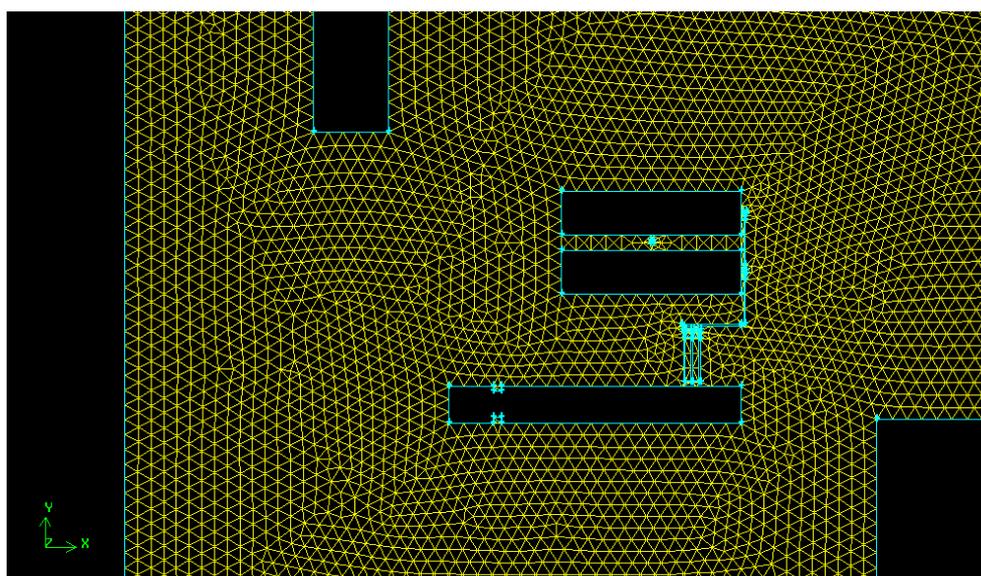


Figura 8.30. Vista superior de los depósitos, las mangueras y el camión de descarga

El conjunto de toda la instalación de la planta EUROSERUM IBÉRICA, S.L. con las diferentes secciones es el que se presenta en la figura 8.31. En el margen izquierdo de esta se ubican los dos depósitos de GNL y el camión de descarga tal y como vimos anteriormente.

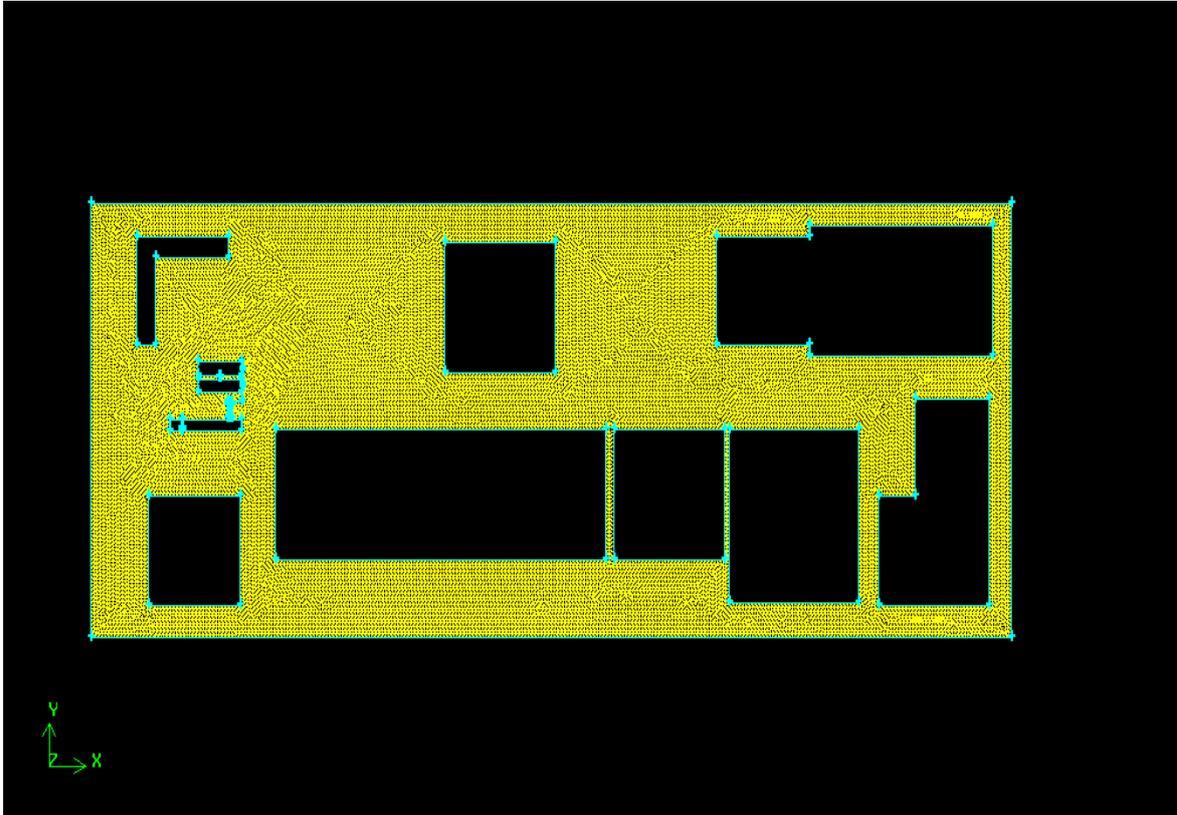


Figura 8.31. Vista superior de los depósitos, las mangueras y el camión de descarga

Una vez tenemos realizada la geometría mallada, procedemos a resolver las ecuaciones de gobierno con el FLUENT, obteniendo la simulación de la figura 8.32 para los contornos de fracción másica de metano. En la simulación, podemos observar como los valores más altos de la nube de gas se ordenan en las inmediaciones de ambos depósitos y en la zona de descarga del camión. Asimismo, podemos observar como el escape se extiende más allá de la zona de seguridad establecida por la norma UNE 60210 y como alcanza prácticamente a toda la fábrica donde el gas tiende a concentrarse en zonas con poca ventilación y entre locales de diferentes secciones. Este es un resultado importante que viene a poner de manifiesto el carácter más conservador de la metodología CFD. Existe una “zona de seguridad” de color azul pálido-oscuro en la parte superior del recinto de la fábrica debido a que es una zona venteadada con verja metálica enrejillada.

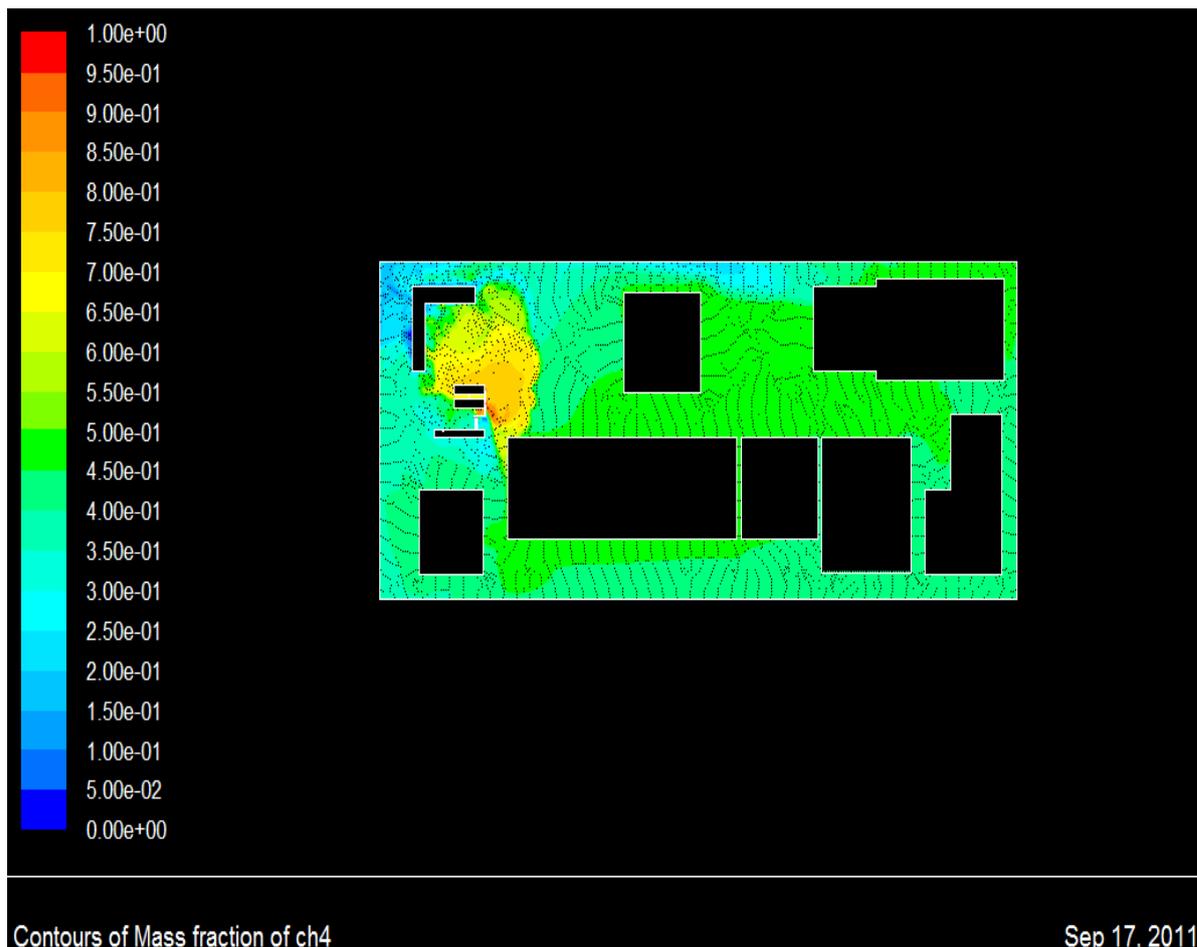


Figura 8.32. Vista superior del escape de gas metano en la fábrica

En el plotado en la dirección XY (figura 8.33) de la fracción másica del metano podemos observar como el escape de gas alcanza prácticamente todo el recinto de la fábrica. En el eje de abscisas se representa la posición en metros (alcance) del escape de gas y en el eje de ordenadas los valores del escape. La escala en metros comienza en 175 metros y alcanza hasta los 425 metros (en total 250 metros), el hecho de no empezar en 0 metros es por haber desplazado intencionadamente la geometría para mallar los poros de los escapes de gas.

El histograma de la simulación (figura 8.34) también nos ofrece información acerca del escape. Podemos ver como el 70% de la instalación presenta valores medios de concentración del escape de gas, existiendo un bajo porcentaje de aproximadamente el 2% donde la concentración de gas es casi del 100% y como prácticamente no existen zonas de ausencia de concentración de gas.

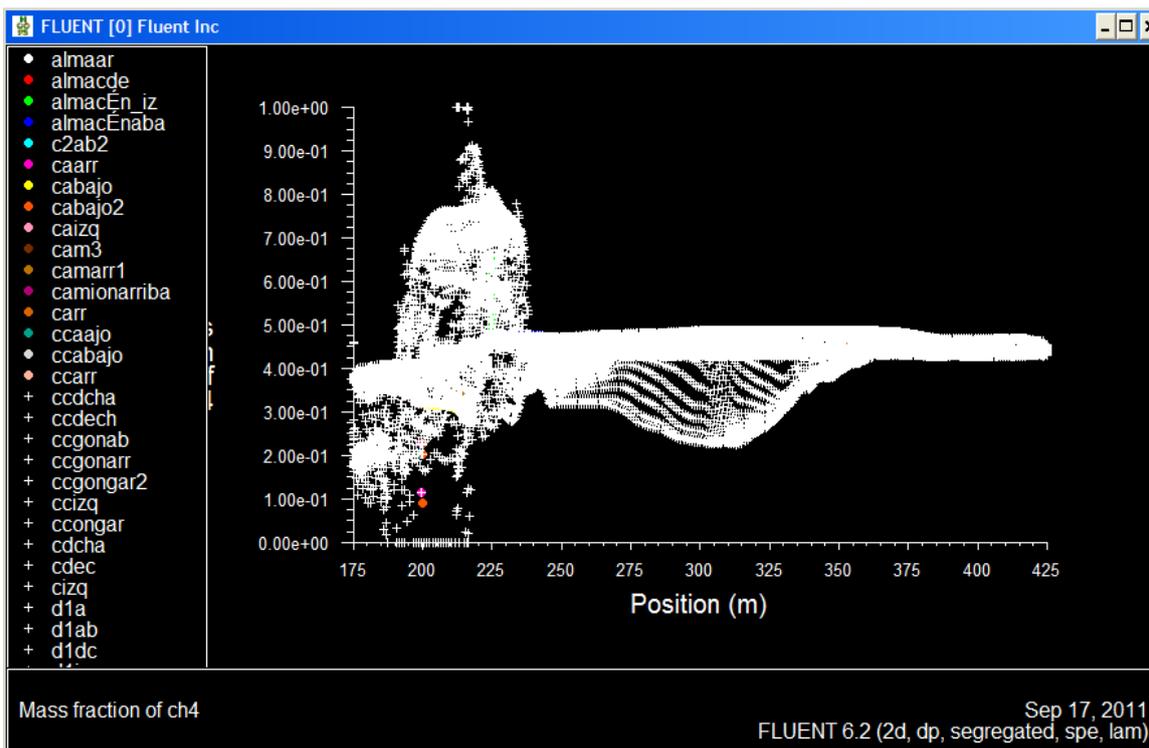


Figura 8.33. Distribución en metros según plano XY de la nube de metano

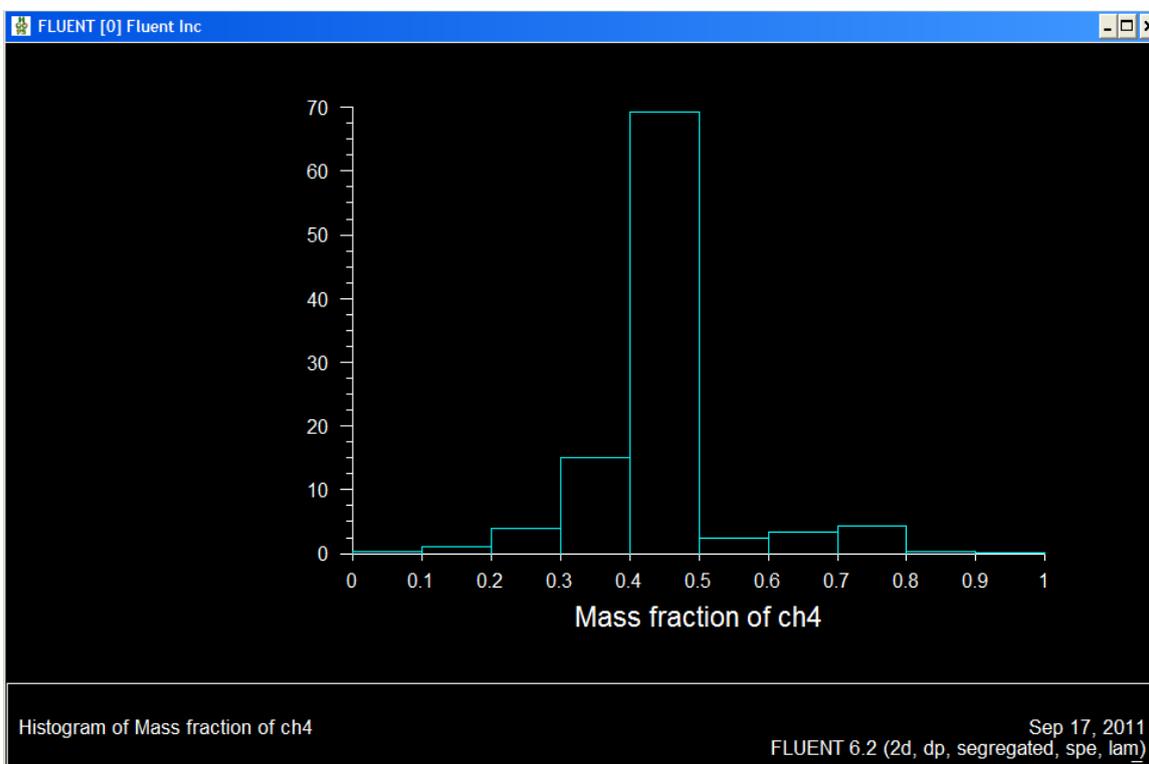


Figura 8.34. Histograma de fracción másica de CH4



8.3.3. Estudio del escape para la sala de calderas

Este caso difiere del anterior en que la instalación es un recinto cerrado de dimensiones 9,3m x 13,2m con una altura máxima de 7 metros en su parte más alta y de 4 metros en la parte baja. Presenta ventilación natural a través de dos rejillas que se ubican una en la puerta de entrada y otra en la puerta que comunica con una almacén donde se encuentra la balsa de agua helada 4. La superficie de ventilación es de 1m x 0,45m = 0,45 m², el caudal de ventilación para una velocidad medida con el termohigrómetro kestrel k3000 de 1 m/s es de 0,45 m³/s.

En una primera simulación hemos considerado un escape múltiple cuyo origen viene dado por cinco fugas. Una de ellas en un poro de 1 mm² y las otras cuatro (correspondientes a las líneas de ambos quemadores) de 2,5mm² cada una. El hecho de tomar esta medida de escape no es al azar, sino que viene motivada por datos bibliográficos recogidos en el manual práctico de Clasificación de zonas en atmósferas explosivas -CETIB, de autores Frances Escuer Ibars y Javier García Torrent-. Como ya hemos indicado uno de los poros corresponde a la válvula de entrada principal ubicada en el recinto (véase foto 8.6) y los otros cuatro se reparten dos por cada línea de los quemadores de las calderas 1 y 2. Así, en la válvula principal consideramos un escape de 1mm² y en cada línea de los quemadores tendríamos dos fugas una en la válvula reguladora de presión y otra en la válvula automática ambas de 2,5mm². En la figura siguiente (figura 8.19) se muestra el mallado realizado de la sala de calderas con las condiciones de contorno impuestas.

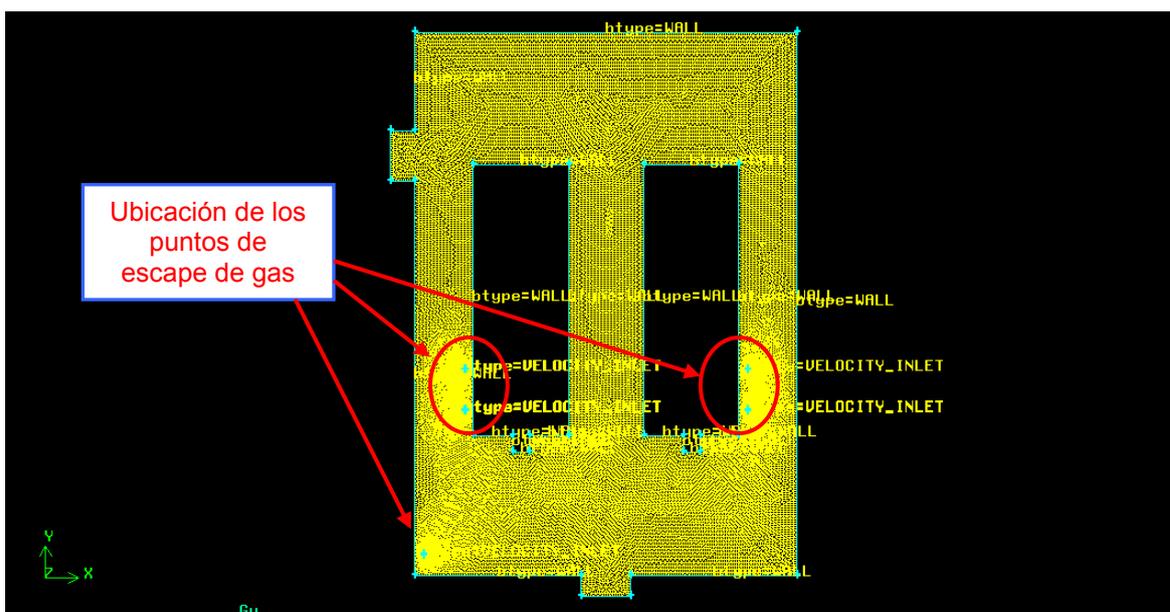


Figura 8.35. Mallado de la sala de calderas y puntos de escape



Nos queda ahora pues, el determinar con que velocidad se produce el escape de gas. Para ello primero vamos a determinar la tasa de escape de emisión en kg/s, utilizando la fórmula propuesta en el esquema de la figura 7.1. Así tenemos:

$$G = 3.95 \cdot a \cdot \left[M \frac{(P - 10^5)}{T} \right]^{0.5} \quad (\text{Ec.8-18})$$

Donde:

- G= caudal másico (kg/s)
- A=área transversal (m²)
- M=masa molecular (g/mol)
- P= presión origen en la fuga (Pa)
- T=temperatura (k).

Para el escape de tamaño de poro 2,5 mm tenemos:

$$G = 3.95 \cdot (0,0025)^2 \cdot \left[16 \frac{(183000 - 10000)}{293} \right]^{0.5} = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (\text{Ec.8-19})$$

Para el tamaño de emisión de poro 1mm el resultado es:

$$G = 3.95 \cdot (0,001)^2 \cdot \left[16 \frac{(183000 - 10000)}{293} \right]^{0.5} = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (\text{Ec.8-20})$$

Procedemos ahora a caracterizar nuestra fuente de escape atendiendo a las ecuaciones siguientes:

Condición Choquet o non Choquet si se cumple la inecuación siguiente.

$$\left[\frac{P_{\text{source}}}{P_{\text{amb}}} \right] < \left[\frac{k+1}{2} \right]^{K(K-1)^{-1}} \quad (\text{Ec.8-21})$$

$$\text{Entorno Choquet} \Rightarrow Q = C \cdot A \cdot \sqrt{k \cdot \rho \cdot P \cdot \left[\left(\frac{2}{k+1} \right)^{(K+1)(K-1)^{-1}} \right]} \quad (\text{Ec.8-22})$$

$$\text{Entorno Non Choquet} \Rightarrow Q = C \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot P \cdot \left(\frac{k}{k-1} \right) \left[\left(\frac{P_a}{P} \right)^{2K-1} - \left(\frac{P_a}{P} \right)^{(K+1)K^{-1}} \right]} \quad (\text{Ec.8-23})$$



con:

- Q= flujo másico (kg/s).
- C= coeficiente de descarga adimensional=0,72.
- A= área agujero de descarga (m²).
- k= c_p/c_v del gas.
- c_p= calor específico del gas a presión constante.
- ρ= densidad del gas real a P y T (kg/m³).
- P= presión absoluta agua arriba (Pa).
- P_a= presión absoluta del ambiente (Pa).
- R= constante ley universal gases=8,314KJ·mol⁻¹·K⁻¹.
- T= temperatura (K).

$$\text{Gas ideal} \Rightarrow C_p = C_v + R \quad (\text{Ec.8 - 24})$$

$$C_p = 35.552 \text{ KJ} \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (\text{Ec.8 - 25})$$

$$k = \frac{C_p}{C_v} = \frac{35,552}{27,238} = 1,305 \quad (\text{Ec.8 - 26})$$

$$\rho = \frac{P \cdot M}{R \cdot T} = \frac{1,83 \cdot 10^5 \cdot 16 \cdot 10^{-3}}{8,314 \cdot 298} = 1,182 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (\text{Ec.8 - 27})$$

$$\left[\frac{P}{1} \right] < \left[\frac{1,305 + 1}{2} \right]^{\left(\frac{1,305}{0,305} \right)} \Rightarrow P(\text{choquet - non choquet}) = 183000 \text{ Pa} \quad (\text{Ec.8 - 28})$$

En función de si nos encontramos con un régimen subsónico o sónico utilizaremos las ecuaciones (Ec. 8-22) y (Ec. 8-23).

En la ecuación (Ec. 8-28) tenemos que para la presión de velocidad Mach igual a uno es de 183000 Pa o aproximadamente 1,83 bar absolutos (en nuestro caso próximo a 2 bar). Buscamos también los valores de densidad, capacidad calorífica a presión constante, etc.

Establecidos ya en el entorno Choquet utilizamos la ecuación (Ec. 8-22). Así, tenemos para nuestro escape de 2,5 mm la tasa de escape siguiente:



$$Q = C \cdot (0,0025)^2 \cdot \sqrt{1,305 \cdot 1,182 \cdot 183000 \cdot \left[\left(\frac{2}{1,305+1} \right)^{(7,55)} \right]} = 1,59 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s} \quad (\text{Ec.8-29})$$

Si comparamos este resultado con el obtenido en la ecuación 8.19 ($1,7 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$) vemos que son valores próximos del mismo orden de magnitud.

Comprobamos a continuación si la velocidad de nuestro escape es sónica o subsónica, así

$$\frac{1,59 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}}{0,554 \text{ kg/m}^3} = 2,88 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \xrightarrow{\text{velocidad}} \frac{2,88 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{(0,0025)^2} = 461 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (\text{velocidad sónica})$$

Esta es la velocidad del escape de gas al fugarse por el poro. Comprobamos que nos encontramos en Mach:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma \cdot R \cdot T}{M}} = \sqrt{\frac{1,305 \cdot 8313 \cdot 298}{16,04}} = 449,55 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (\text{Ec.8-30})$$

$$M = \frac{V}{c} = \frac{461}{449,55} = 1,025 \text{ Mach} \quad (\text{Ec.8-31})$$

Vemos pues que se satisfacen las condiciones del entorno Choquet y que nuestro flujo es sónico.

Para el escape de 1 mm^2 considerado en la válvula principal de entrada en la sala de calderas, la tasa de escape es:

$$Q = C \cdot (0,001)^2 \cdot \sqrt{1,305 \cdot 1,182 \cdot 183000 \cdot \left[\left(\frac{2}{1,305+1} \right)^{(7,55)} \right]} = 2,78 \cdot 10^{-4} \text{ kg/s} \quad (\text{Ec.8-32})$$

valor de escape muy próximo al obtenido en Ec-8.20 ($2,6 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$) y que conlleva una velocidad de emisión de gas:

$$\frac{2,78 \cdot 10^{-4} \text{ kg/s}}{0,554 \text{ kg/m}^3} = 4,88 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \xrightarrow{\text{velocidad}} \frac{4,88 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{(0,001)^2} = 488 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (\text{velocidad sónica})$$

que lógicamente es sónico.



$$c = \sqrt{\frac{\gamma \cdot R \cdot T}{M}} = \sqrt{\frac{1,305 \cdot 8313 \cdot 298}{16,04}} = 449.55 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (\text{Ec.8 - 33})$$

$$M = \frac{V}{c} = \frac{488}{449,55} = 1,08 \text{ Mach} \quad (\text{Ec.8 - 34})$$

Es necesario el determinar estos valores de escape de gas, ya que estos van a ser condiciones de contorno que vamos a imponer sobre nuestra geometría de estudio al validarla con el programa FLUENT.

Este planteamiento que hemos desarrollado ha sido aplicado también para el caso de estudio anterior de los depósitos de gas natural.

Al igual que en el estudio anterior primeramente dibujamos nuestra geometría con el programa GAMBIT (ver figura 8.35) para luego aplicar el solver FLUENT. En una primera simulación se realizó un mallado menos denso de la geometría para economizar tiempo en los cálculos resultando la simulación en planta de la figura 8.36.

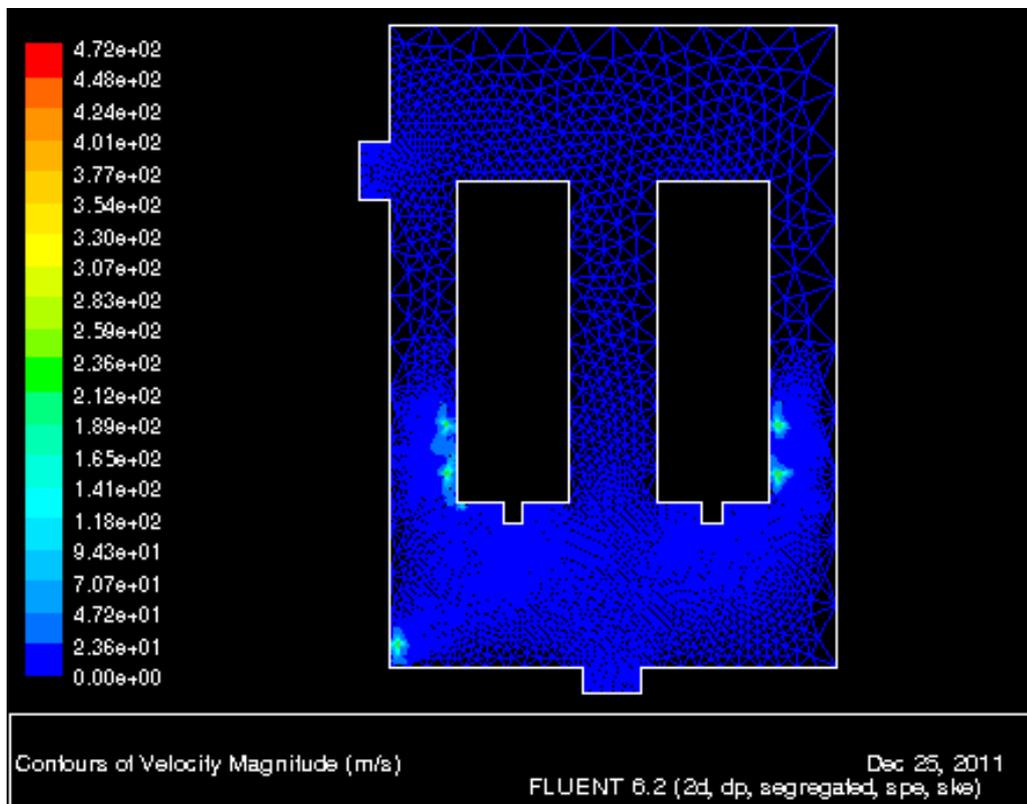


Figura 8.36. Contornos de velocidad en m/s del escape de gas metano



Podemos apreciar en la figura anterior como los mayores valores de velocidad se obtienen en las zonas de emisión disminuyendo a medida que nos alejamos de la fuente de escape. En estas zonas se producen los vórtices del flujo en forma de remolinos. También se puede observar como el gas tiende a “escapar” por la puerta principal de la sala de calderas donde se encuentra el enrejillado y como en la parte superior y parte derecha de la geometría donde el mallado es menos denso no se aprecian resultados significativos. Para solucionarlo, se refinó el mallado resultanto la geometría expuesta en figura 8.35, con una mayor compacticidad de malla en las fuentes de escape. Los resultados que hemos obtenido son los que se muestran en la figura 8.37.

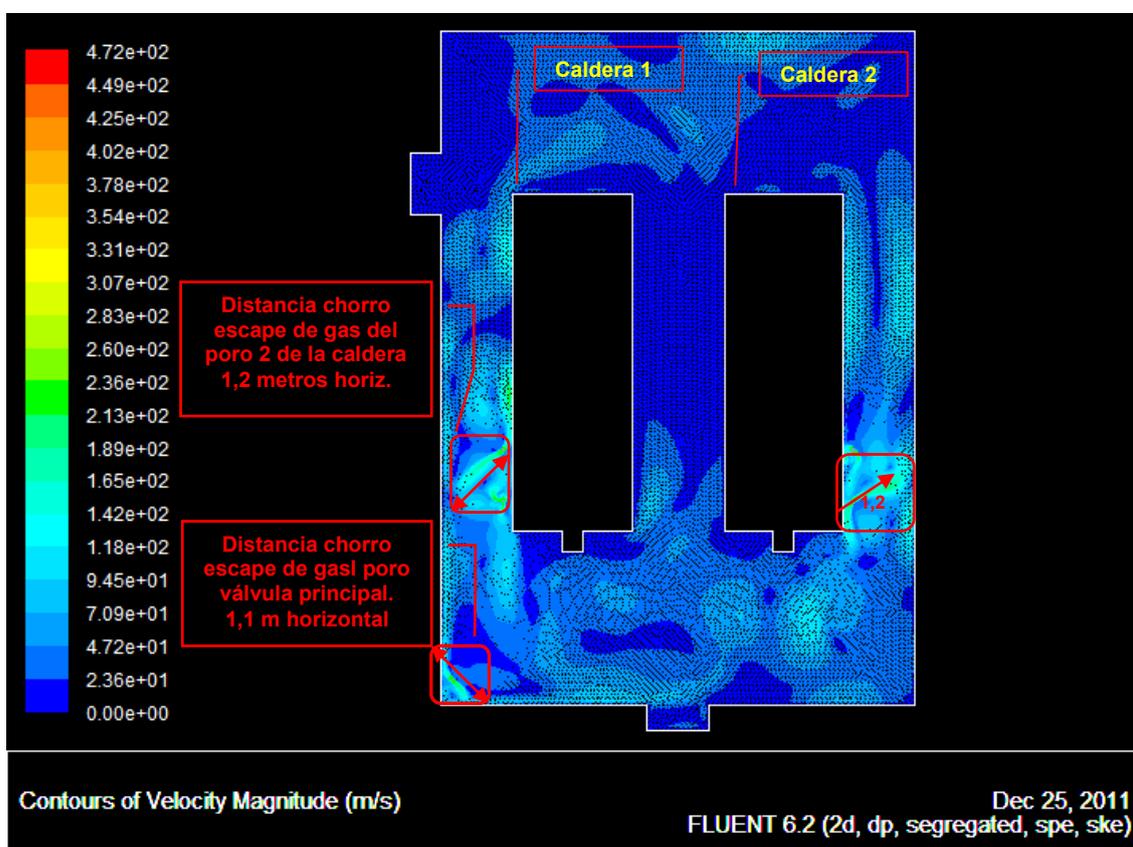


Figura 8.37. Contornos de velocidad en m/s del escape de gas sobre la geometría redefinida

En este caso de estudio se utilizó una aproximación a primer orden con 300 iteraciones y considerando las condiciones de contorno de velocidad de escape y caudal de ventilación. El resultado mejora respecto al obtenido en la figura 8.36 debido a la utilización de un mallado más compactado. Se puede observar como la el flujo se va distribuyendo a lo largo de toda la sala en diferentes concentraciones. Escalando la figura y tomando como referencia las dimensiones de la sala y de las calderas (6,60 metros de largo por 2,30 metros de diámetro) podemos determinar por ejemplo, los valores en



metros de los chorros principales de los escapes de los poros de la línea de quemador y de la válvula principal. Como se puede observar en la figura 8.37 vemos que los poros de la línea del quemador alcanzan una distancia de 1,20 metros que es el ancho del pasillo (distancia de la caldera al muro izquierdo). Para la válvula de entrada principal se obtiene una distancia del chorro de 1,1 metros. No obstante, el gas se extiende por prácticamente todo el recinto de la sala.

Si comparamos estos valores con los obtenidos en la tabla 8.5 utilizando la metodología cuantitativa podemos ver como estos últimos son menos restrictivos, ya que habíamos obtenido valores de diámetro de esfera de 1 metro para las distancias horizontales ampliándose al doble para las verticales. Este importante resultado viene confirmar el carácter más conservador de la dinámica de fluidos computacional.

Finalizamos el estudio en la sala de calderas realizando una simulación de un escape a través de siete elementos. Uno en la válvula principal de entrada y los otros seis repartidos en las líneas de los quemadores; tres por cada línea de calderas que afectan a la válvula de línea del quemador, a la válvula reguladora de presión y a la válvula automática previa a la entrada del quemador. Para estos tres elementos hemos considerado un tamaño del poro de $2,5 \text{ mm}^2$ y para la válvula principal de entrada de 1 mm^2 . Asimismo, se ha añadido a la geometría de la sala de calderas la sala contigua de zona de balsa de agua helada 1 a la que se accede por la puerta superior izquierda. Hemos considerado en la simulación que esta puerta está abierta siendo la velocidad de viento tomada de 1 m/s (valor medido con el termohigrómetro kestrel k3000) y la superficie de la puerta de $2,64 \text{ m}^2$ - $2,20\text{m} \times 1,20\text{m}$ - (misma dimensión que la puerta de entrada a la sala de calderas).

En la simulación realizada (ver figura 8.38) se presentan los contornos de la fracción másica de metano sobre las geometría definida. Se puede observar (no confundir el color azul del mallado con los colores más claros del escape) como existen valores de concentraciones distintos desde 0,1 a 0,35 (escala de azules) en la mayor parte de la geometría, los valores más elevados (escala verde y del amarillo al rojo anaranjado) corresponden lógicamente a las zonas de los escapes.

Vemos pues, que la situación que se nos plantea es una situación con riesgo elevado difícil de que se produzca pero no imposible.

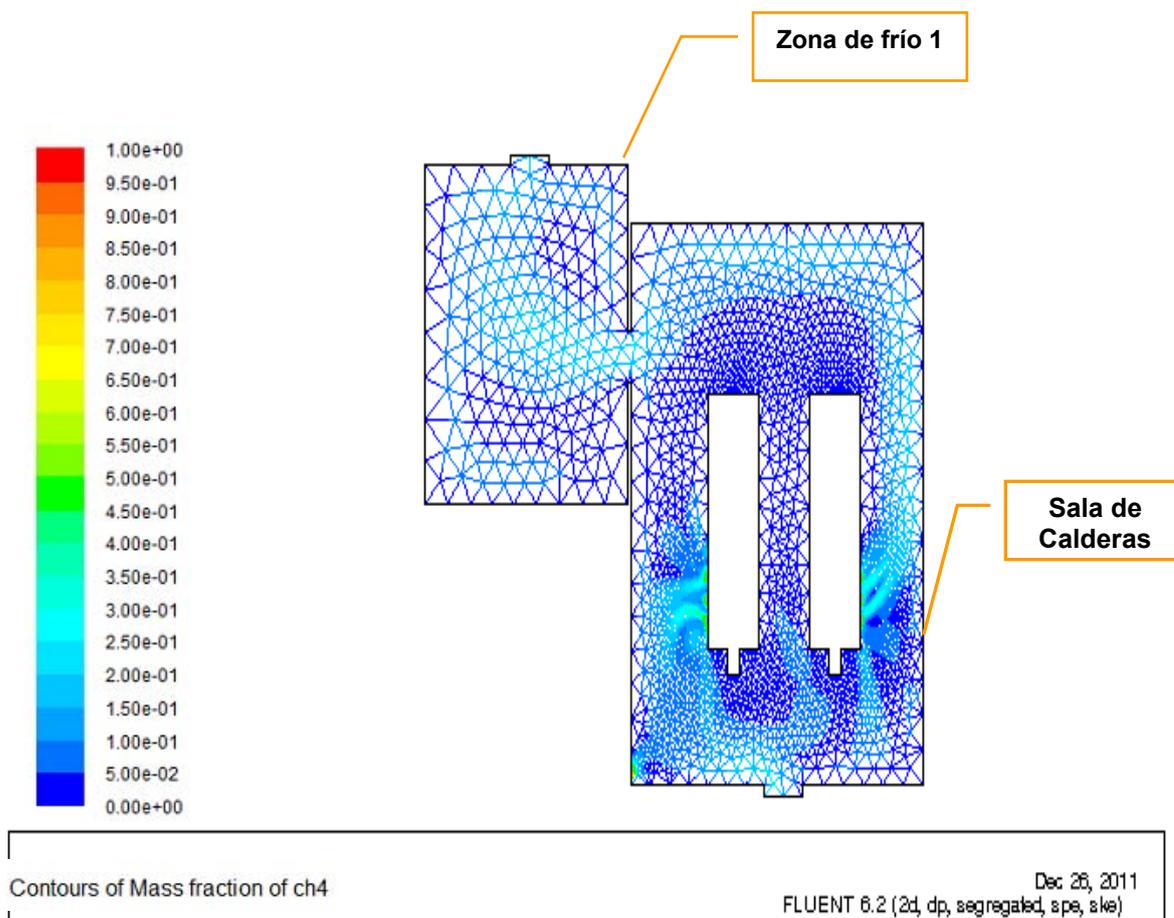


Figura 8.38. Contornos de fracción másica de metano en un suptuple escape en la sala de calderas y su distribución a la sala contigua

La figura 8.39 muestra los contornos de viscosidad turbulenta en kg/ms en la sala de calderas. Los remolinos de turbulencia (recordar que estamos en un caso de un flujo sónico) tienden a agruparse en las zonas de los escapes. Llama la atención la geometría que adquiere el flujo en la línea del quemador de la caldera 2, que en principio “huye” de arremolinar, esto es debido a que el gas emitido por los poros de esta zona tiende a “expandirse” hacia la parte posterior de la sala atraído por la ventilación de la sala contigua (aquí se ha tomado una velocidad inlet de 1m/s valor medido con el termohigrómetro). En la zona de la caldera 1 el gas tiende a remolinar formando los torbellinos o “calles de Von Karman”.

No obstante, un refinado óptimo de la malla proporcionaría resultados más aclaratorios para estos efectos.

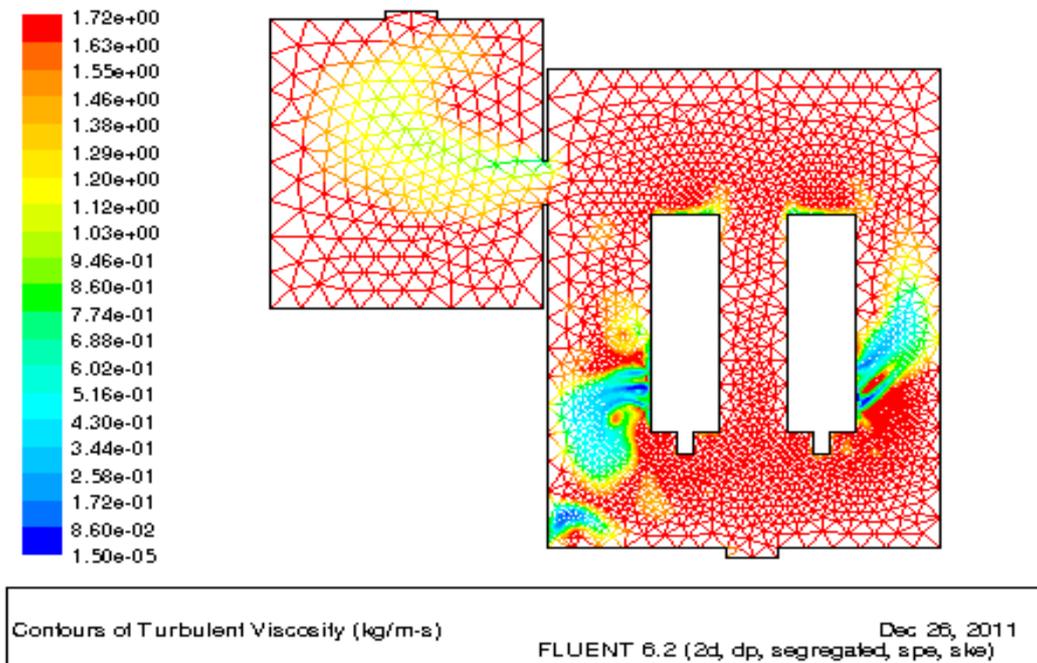


Figura 8.39. Contornos de viscosidad turbulenta (kg/ms) en la zona de estudio

Para finalizar este caso de estudio se presenta los vectores de velocidad de los escapes en las zonas de estudio (figura 8.40). Como podemos observar los valores de mayor magnitud se presentan en la zona de fugas disminuyendo a medida que nos alejamos de las fuentes.

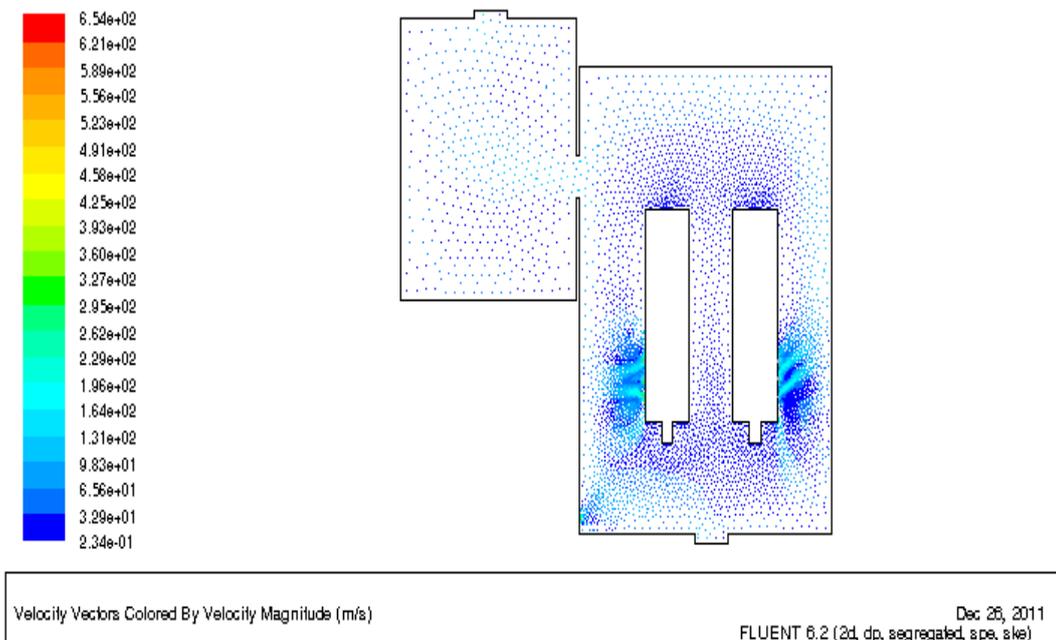


Figura 8.40. Vectores de velocidad en m/s de los escapes de gas metano (CH₄) en la sala de calderas de la empresa EUROSERUM IBÉRICA, S.L. obtenidos con FLUENT



8.3.4. Estudio del escape de hidrógeno en la zona de carga de baterías

Ya hemos apuntado que el hidrógeno que se desprende durante la carga de las baterías eléctricas es explosivo con un gran rango de explosividad del 4% (LIE) al 75% (LSE) y más ligero que el aire.

Anteriormente se ha visto en el punto 8.1.3. que en la empresa EUROSERUM IBÉRICA, S.L. existen dos zonas de carga de baterías, una próxima al taller mecánico con buena ventilación y natural y la otra en el interior de la cámara de congelado (figura 8.41). Sobre esta última vamos a realizar las simulaciones por ser el caso más desfavorable.

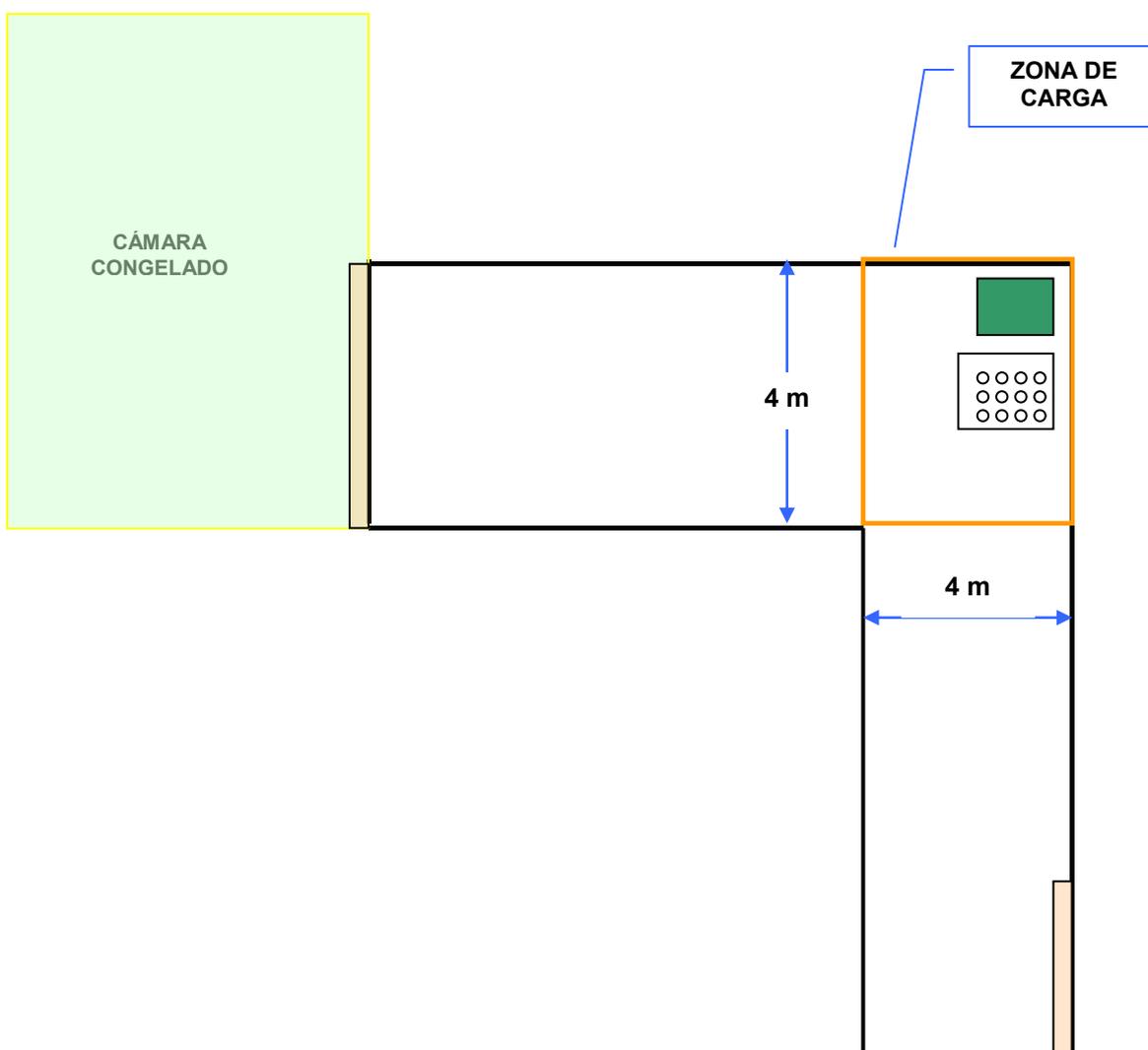


Figura 8.41. Disposición de la zona de carga de baterías en la cámara de congelado

En la figura anterior (figura 8.41) se muestra la disposición de la zona de carga en la intersección de los dos pasillos principales de la cámara de congelado. La superficie de estudio que vamos a considerar es la correspondiente a la cuadrícula de 4m x 4m, esto es así, ya que el representar los pasillos en la generación del mallado no nos va a aportar gran información. Los valores de velocidad de aire en los pasillos de la cámara estando las puertas cerradas son muy bajos entre 0,1 m/s - 0,2 m/s, siendo por tanto prácticamente nula la ventilación en la zona de estudio.

La batería objeto de estudio (HAWKER 400 V-600 Ah) tiene dimensiones 120cm x 45cm y presenta 24 tapones por los que fluye el gas distribuido en columnas de 4 y filas de 6. Cada tapón presenta tres aberturas de tipo rectangular: una de 6mm x 1,5mm (la más grande) y dos más de 4mm x 1,5mm (foto 8.58). Para simplificar el desarrollo del proceso de generación de la malla hemos considerado una única abertura por tapón (superficie 16 mm²) y una fila de cuatro poros de escape de 64 mm² (16mm x 4mm) cada uno.

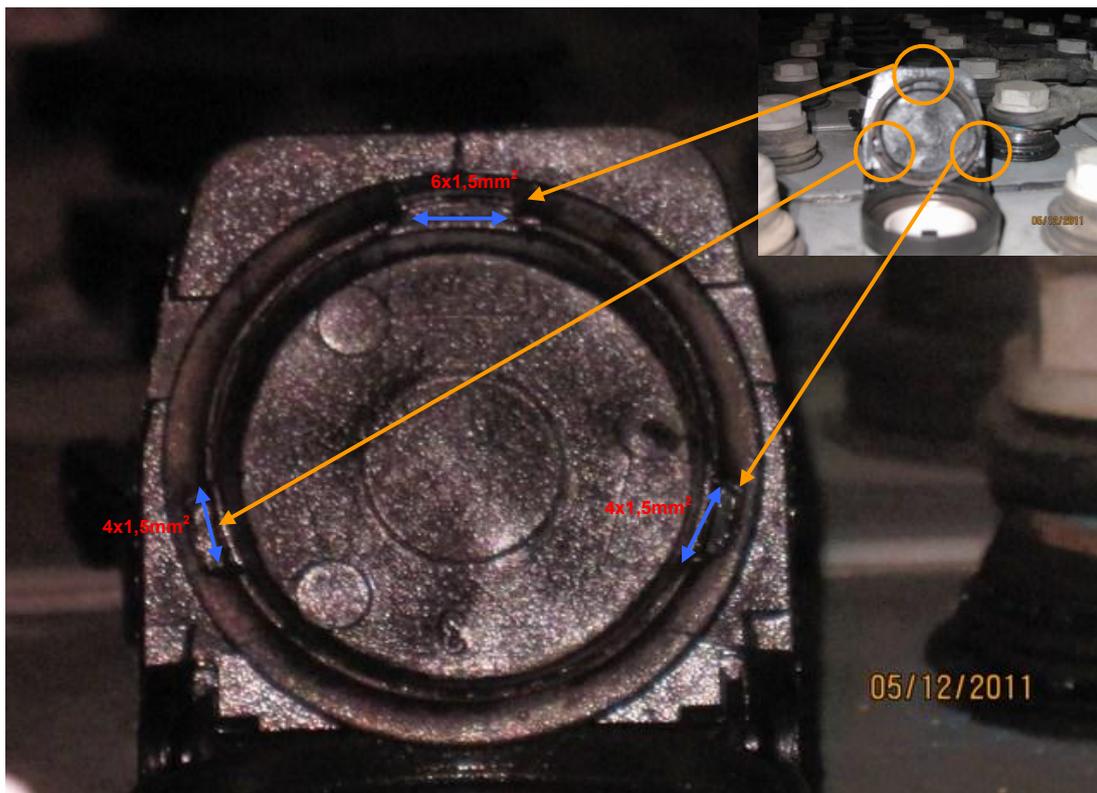


Foto 8.58. Dimensiones de los respiraderos del tapón de batería



La geometría confeccionada junto con las condiciones de contorno se presenta en la figura 8.42.

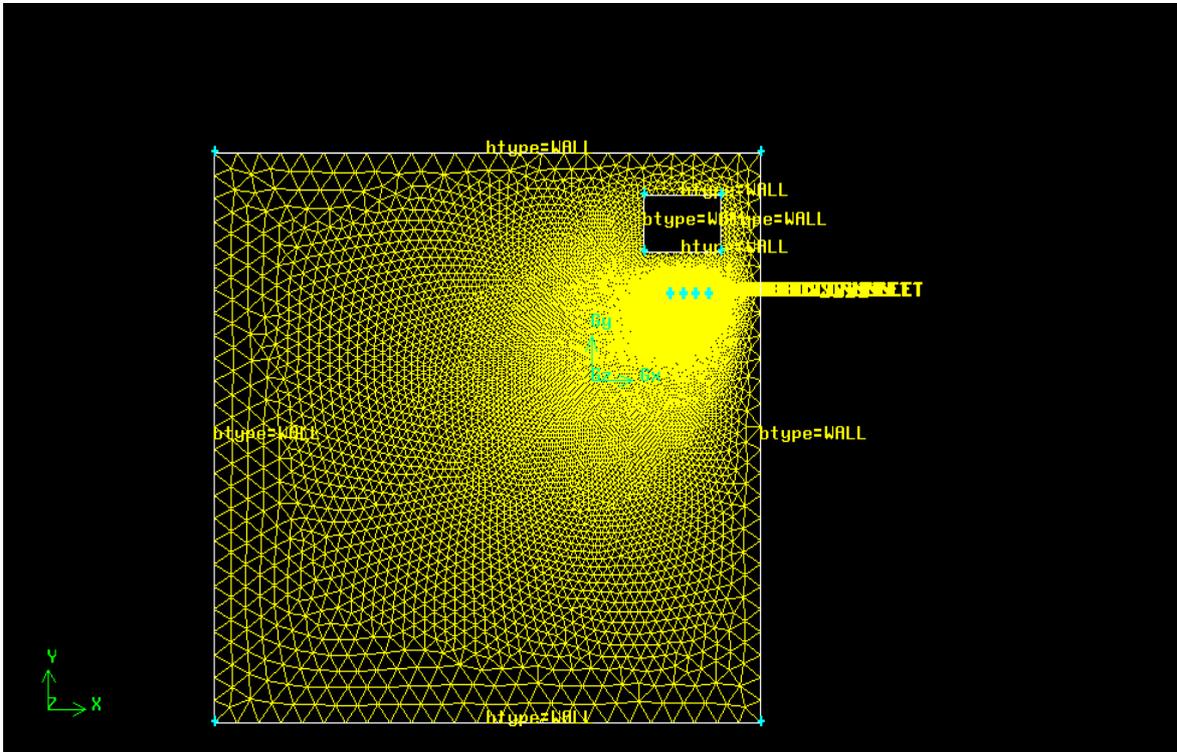


Figura 8.42. Geometría realizada con GAMBIT de la zona de carga de baterías

Una vez desarrollada la geometría la exportamos en la extensión *msh* para poder “correr” sobre ella el programa FLUENT.

Explicamos los pasos seguidos una vez exportada la geometría. Abrimos el programa FLUENT y comprobamos que la geometría está bien chequeándola (*check grid*), finalizado este paso definimos la dimensión de nuestro estudio y que en este caso es 2D. Seguidamente seleccionamos la opción *energy* para que el programa resuelva la ecuación de la energía y la viscosidad (capítulo 7). En este estudio vamos a emplear el modelo de turbulencia k-epsilon que tal como se indicó en el capítulo 7 es el modelo completo más sencillo de estudio de turbulencia (figura 8.43).

Finalizado este paso vemos cuáles son las “especies” que intervienen en nuestro caso que son hidrógeno y aire y que tenemos que añadir a través de la opción de *Species Model* y *Species Transport* (figuras 8.44 y 8.45).

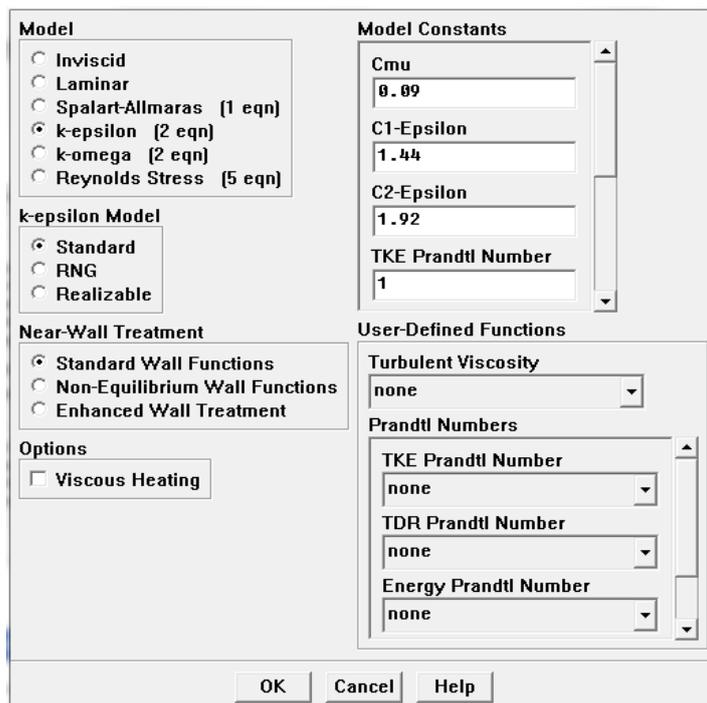
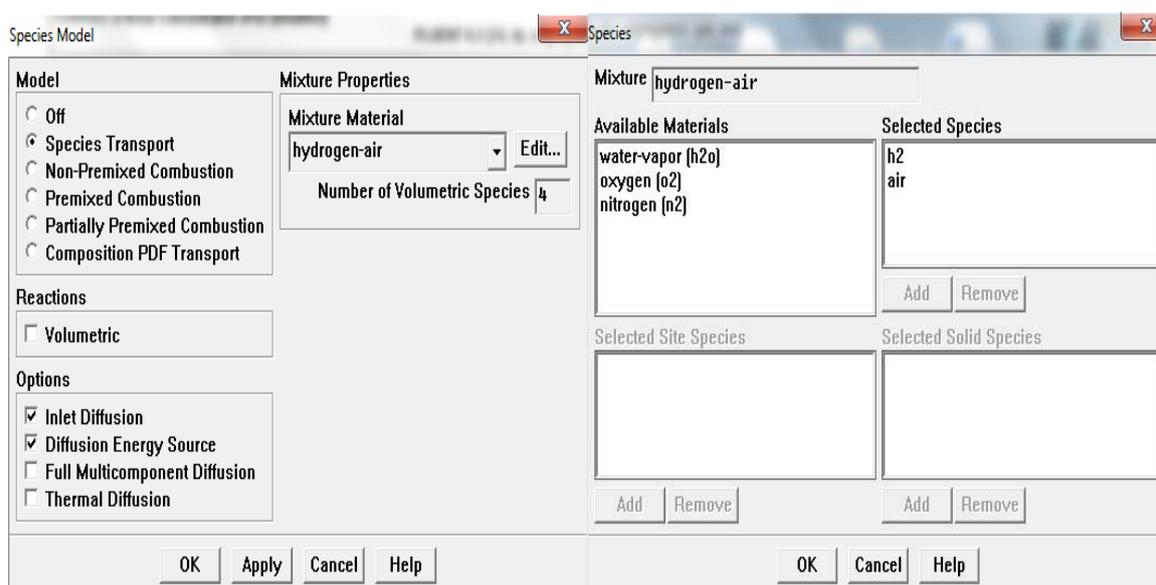
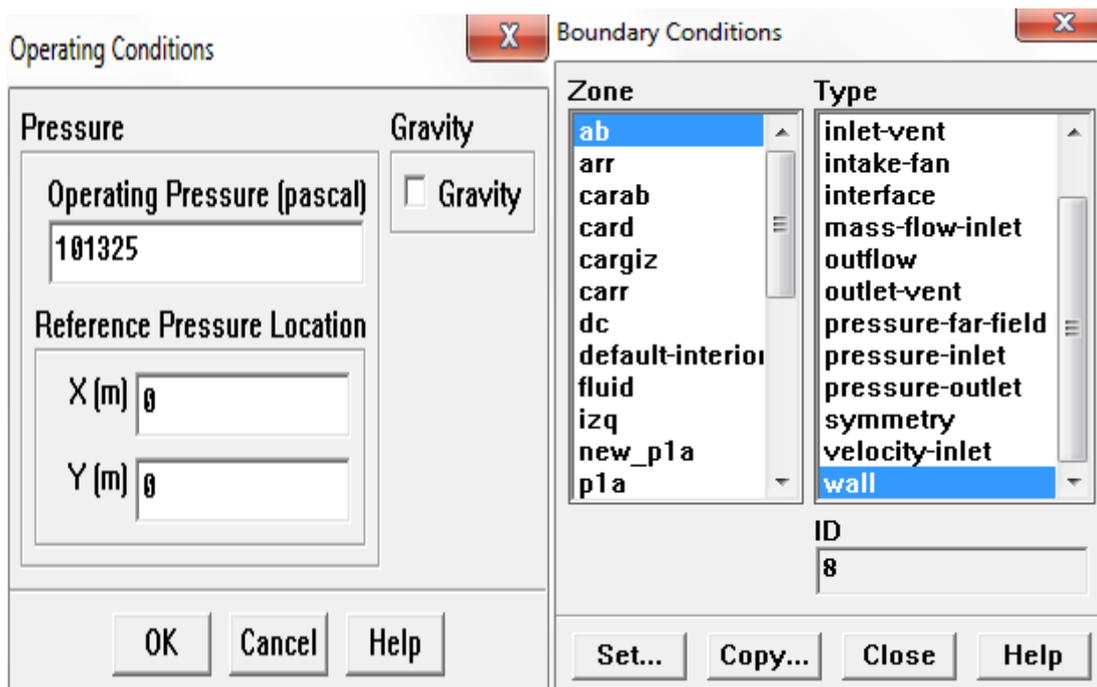


Figura 8.43. Selección del modelo de turbulencia en FLUENT



Figuras 8.44 y 8.45. Selección de los elementos que intervienen en nuestro estudio

A continuación, establecemos las condiciones de operación que intervienen en nuestro estudio (figura 8.41) e imponemos las condiciones de contorno con sus valores sobre la geometría (figura 8.42).



Figuras 8.46 y 8.47. Condiciones de operación y condiciones de contorno respectivamente

Una vez realizados los pasos anteriores seleccionamos los controles de solución que deseamos imponer con el grado de discretización, para nuestro caso hemos seleccionado una discretización de segundo orden que presenta mayor exactitud en la resolución de las ecuaciones de flujo (figura 8.48).

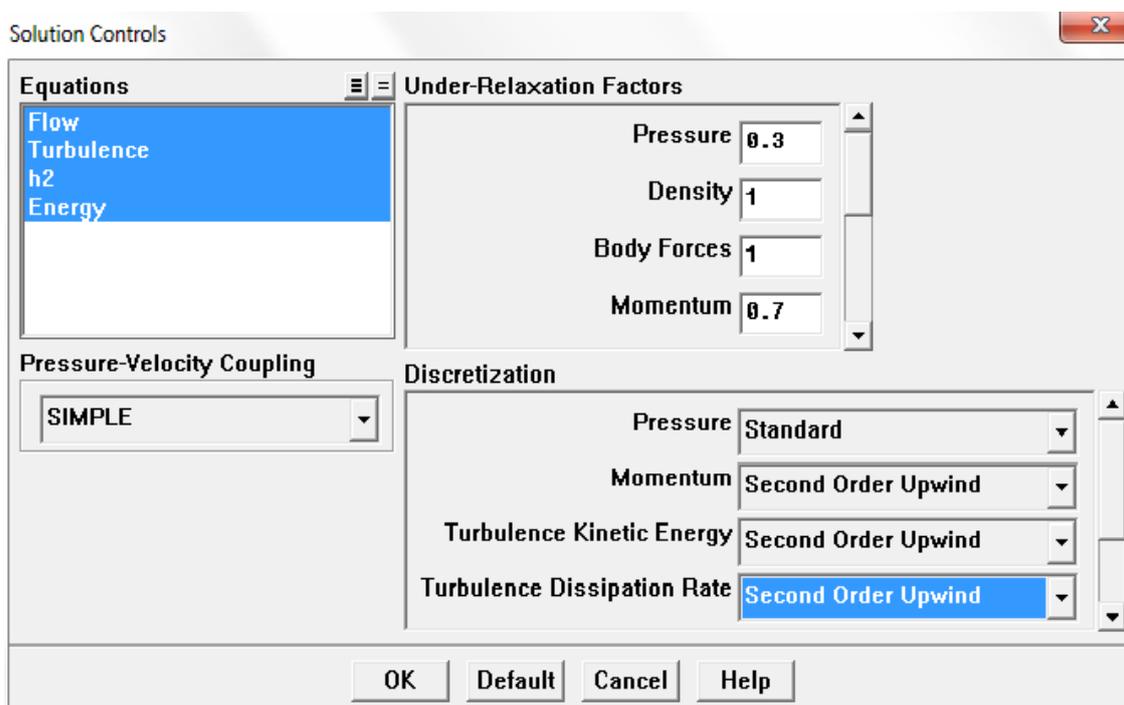


Figura 8.48. Selección de los controles de solución en FLUENT



Inicializamos a continuación la solución estableciendo los valores iniciales que intervienen en nuestro problema tal y como puede observarse en la figura 8.49.

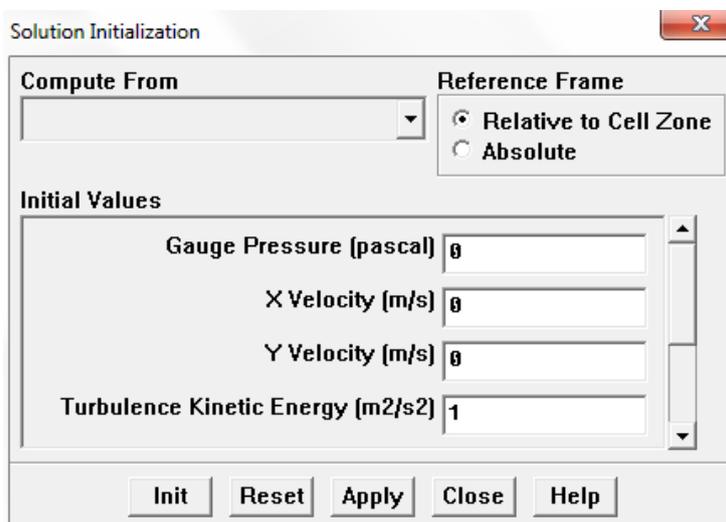
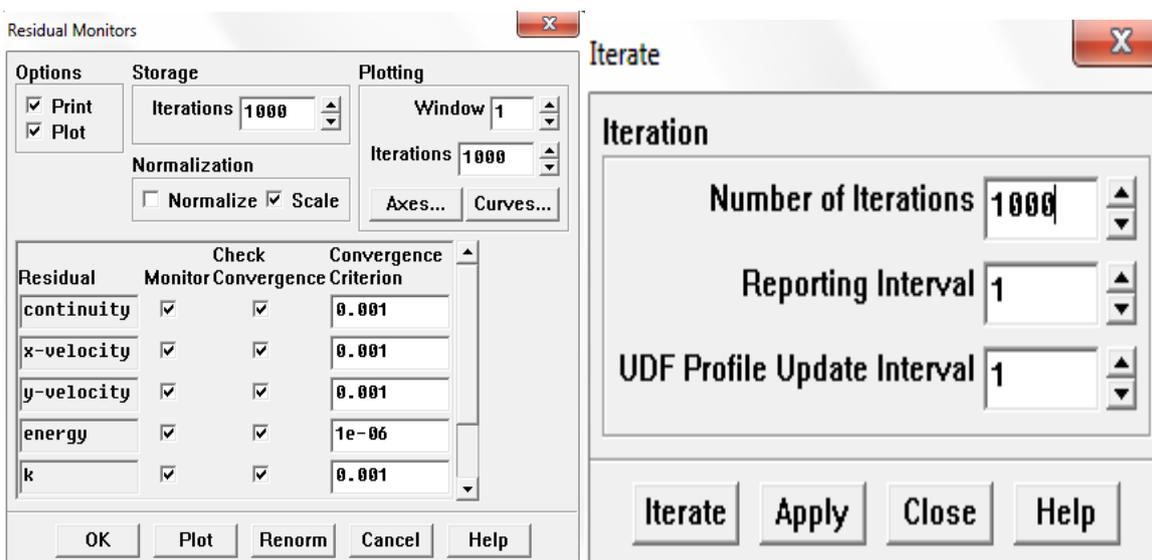


Figura 8.49. Selección de valores iniciales en nuestro estudio

Seguidamente, fijamos el número de iteraciones que estimamos necesario para asegurar la convergencia de las ecuaciones discretizadas que intervienen en nuestro problema y dejamos que el programa corra (figuras 8.50, 8.51 y 8.52).



Figuras 8.50 y 8.51. Selección del número de iteraciones y criterios de convergencia

La figura 8.52 muestra el proceso de iteración en pantalla y como se ha alcanzado la convergencia de nuestro problema en la iteración 135.

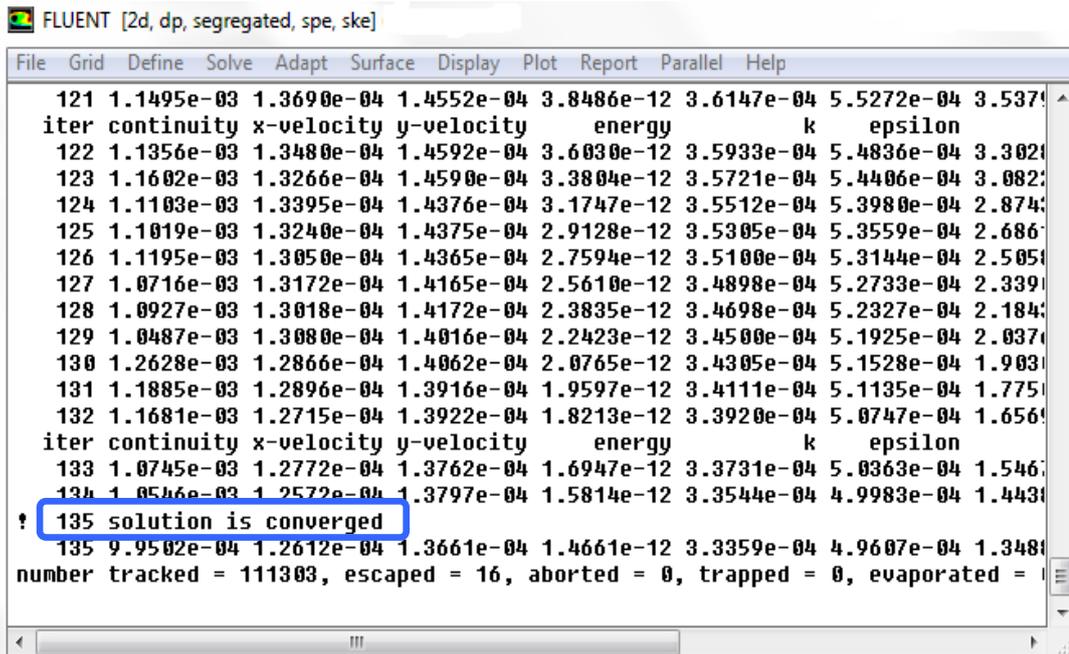


Figura 8.52. Iteraciones y proceso de convergencia

Concluido todo este proceso, se puede mostrar en pantalla los resultados obtenidos y graficar aquellos parámetros que nos interesen para nuestro estudio. Primeramente, representamos los vectores de velocidad del escape de hidrógeno (figura 8.53) lo cual ya nos da una idea de la extensión de la nube del gas. Lógicamente, los mayores valores de velocidad se presentan en las zonas de escape (tapones), disminuyendo a medida que nos alejamos de éste.

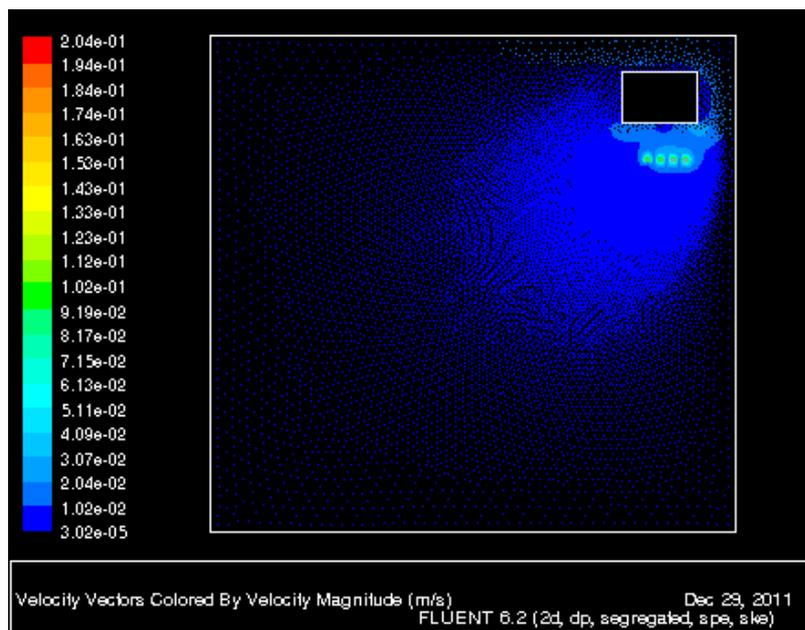


Figura 8.53. Velocidad en m/s para los escapes de gas y su distribución



La figura 8.54 presenta los valores de fracción másica del hidrógeno aportados por los cuatro escapes. En esta figura podemos ver como la nube tiende a desplazarse hacia la parte izquierda de la gráfica escapando del tabique derecho como era de esperar, el gas tiende a ocupar toda la superficie y más en este caso que la zona de estudio presenta ventilación casi nula.

Sobre la simulación podemos determinar la extensión de la “mancha” de hidrógeno en sentido horizontal (figura 8.54). Así, vemos que el escape presenta una geometría tipo elipsoidal cuyo eje mayor tiene 2,2 metros y el eje menor entre 1,9 y 2 metros.

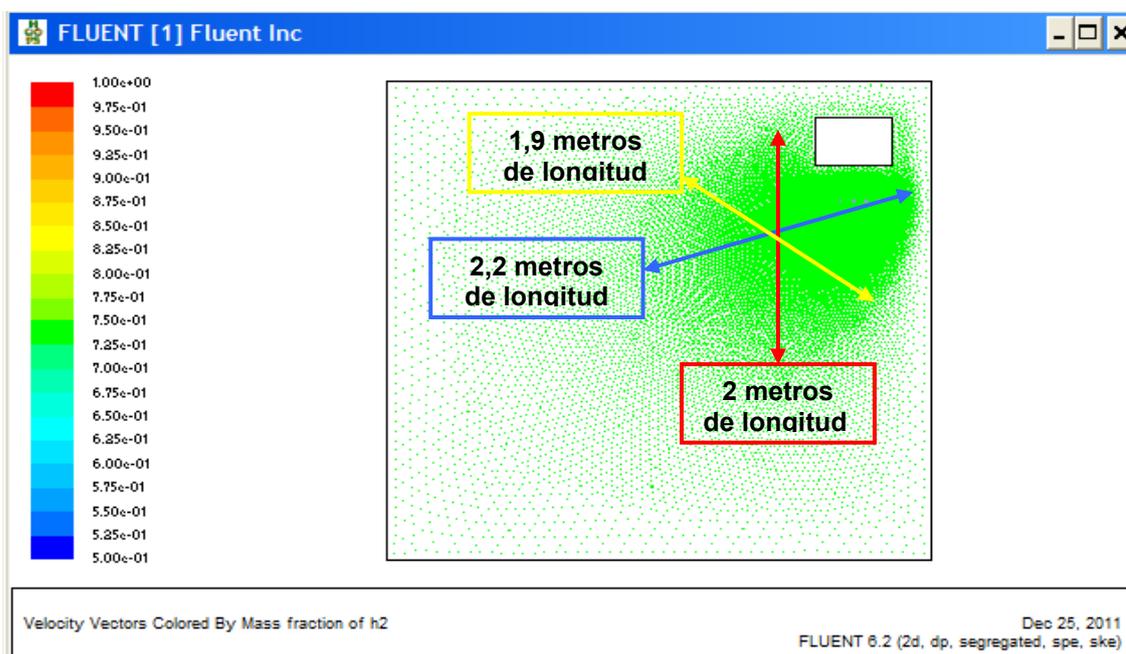


Figura 8.54. Distribución de la fracción másica de hidrógeno

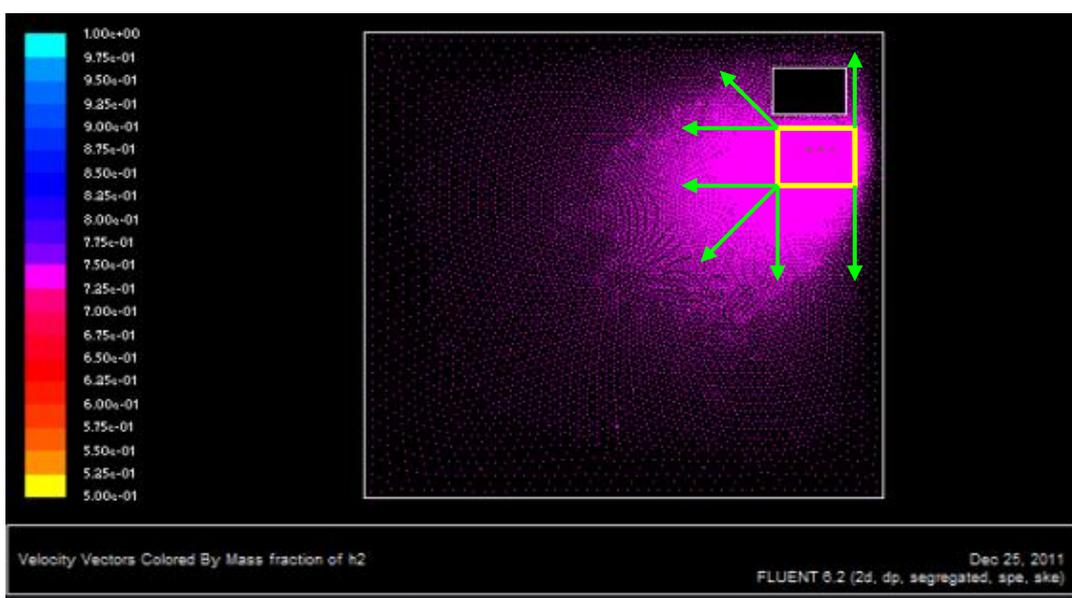
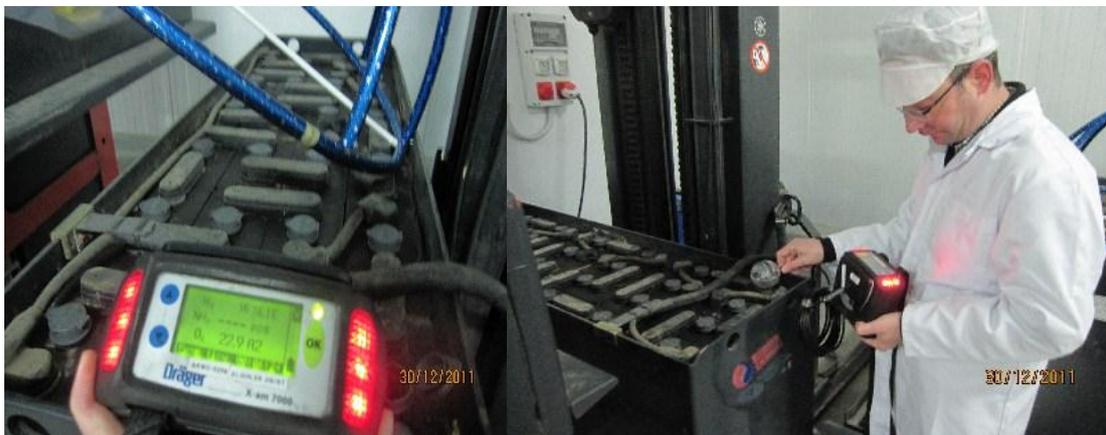


Figura 8.55. Distribución de la nube de hidrógeno alrededor de la batería



Superpongamos ahora la dimensión de la batería de cargas (recuadro amarillo) y sobre ella dibujemos las líneas de 1,2 metros (flechas verdes) alrededor de dicha batería tal y como se muestra en la figura 8.55. En ésta, podemos observar como la zona de seguridad horizontal de 1,2 metros alrededor de la batería (distancia que habíamos establecido en el punto 8.1.3 de forma analítica) para la zona de carga de baterías es sobrepasada en la simulación. Esto significa, que a la hora de realizar los cálculos tenemos que considerar la ubicación de la batería y su proximidad a paramentos verticales que pueden producir “dispersión” de la nube del gas en el sentido libre de la superficie de control. Lógicamente carece de sentido el considerar una distancia de seguridad de 1,2 metro alrededor de la batería si ésta presenta uno de sus lados pegados a una pared, tal y como es el caso.

En este caso de estudio hemos podido verificar con el explosímetro Xam 7000 de Dragüer los niveles de emisión de gas, comprobando que la alarma saltaba al sobrepasar el LIE para el hidrógeno durante el proceso de carga tal y como puede verse en las fotografías siguientes (fotos 8.59 y 8.60).



Fotos 8.59 y 8.60. Equipo dragüer con aviso de alarma por sobrepasar el LIE (16%) del H2

Llegados a este punto merece la pena comprobar un resultado, habíamos visto que la utilización del programa ProgEx para esta zona devolvía un volumen de atmósfera peligrosa alrededor de cada tapón de una esfera de 35 cm de radio. Para verificar si esto es cierto o no, se ha procedido a construir una semiesfera de plástico de 35 cm de radio a partir de aros, colocando el punto medio de la misma sobre cada tapón de carga para así poder medir sobre la misma los valores de hidrógeno (fotos 8.61 y 8.62).



Fotos 8.61 y 8.62. Mediciones de hidrógeno con el equipo dragüer sobre una esfera de 35 cm colocada sobre uno de los tapones de la batería

Se puede observar en las fotografías anteriores como la alarma del equipo se activa para las distancias de 0,35 metros sobre la semiesfera. Si ahora tomamos una distancia de 1,2 metros alrededor de la batería en sentido horizontal y de 2,4 metros en sentido vertical, como habíamos obtenido mediante la metodología analítica el resultado aunque mejora (disminuye %LIE), sigue siendo peligroso (superposición de tasas de escape) tal y como nos había anticipado la simulación.



Fotos 8.63, 8.64 y 8.65. Mediciones de hidrógeno con el equipo dragüer a una distancia de 1,2 metros en sentido horizontal y de 2,4 metros en sentido vertical

Comprobando a una distancia de 2 metros en sentido horizontal (fotos 8.63 y 8.64) el explosímetro no recoge valores preocupantes.



8.3.4.1. Simulación en 3D de un escape de hidrógeno

Se recoge a continuación los resultados obtenidos para una simulación en 3D para un escape de hidrógeno para esa misma batería en un recinto de 7 metros de largo por 3,5 metros de ancho y 4 metros de alto con ventilación natural ubicada en uno de los frontales de la sala (2,20m x 1,20m). La ventilación consiste en un enrejillado con aberturas horizontales de 15 cm al exterior.

En principio esta sala estaba proyectada para servir como sala de carga para todas las baterías de la fábrica y a solicitud de la empresa se pidió el valorar esta ubicación desde un punto de vista de la seguridad ATEX.

Como se viene explicando, lo primero que hemos hecho es geometrizar con el programa GAMBIT la sala en cuestión teniendo en cuenta las dimensiones reales e imponiendo las condiciones de contorno para escape y la ventilación teórica prevista. El resultado se recoge en las figuras 8.56, 8.57 y 8.58.

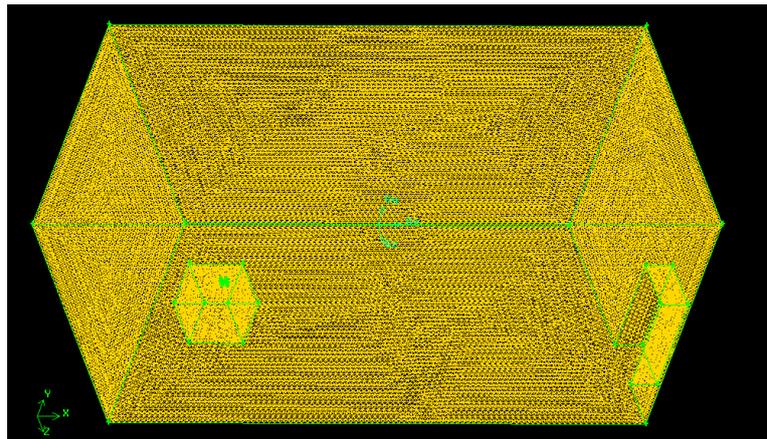


Figura 8.56. Mallado de una sala de cargas con puerta de ventilación

En la figura 8.57 se presenta un detalle del mallado realizado, donde se puede apreciar la superficie de la batería de carga. La figura a su derecha (figura 8.58) corresponde a la sala mallada con las condiciones de contorno impuestas.

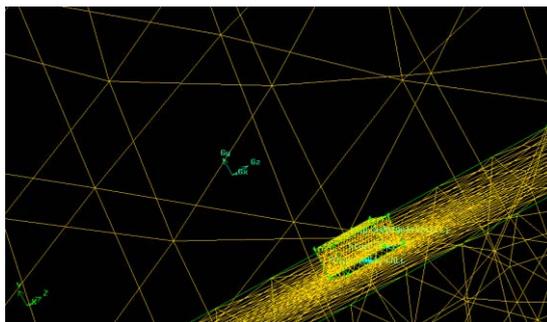


Figura 8.57. Detalle del mallado

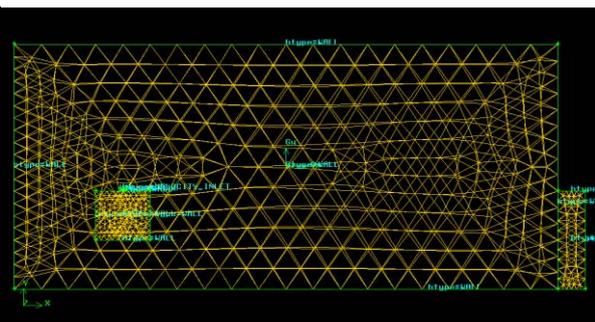


Figura 8.58. Geometría mallada y c.contorno



Resuelto el mallado resolvemos las ecuaciones pertinentes con el programa FLUENT tal y como hemos visto para el caso en 2D. Los resultados se muestran en pantalla y pueden verse en las figuras 8.59 y 8.60.

La figura 8.59 presenta los contornos de fracción másica de aire en la sala cuando se producen el escape de hidrógeno durante la carga, en este caso y por comodidad hemos considerado un único poro de escape que aglutina las dimensiones parciales de cada una de los tapones de superficie 256 mm^2 (en 2D teníamos una fila con 4 poros).

El hidrógeno como hemos dicho, es un gas más ligero que el aire que tiende a subir. La idea de presentar los contornos de aire es un proceso complementario ya que sólo hemos incluido de “especies” hidrógeno y aire (si hay uno no, hay el otro). Como se puede observar el aire en (bajas concentraciones) tiende a ubicarse en los paramentos verticales y en la puerta de ventilación. Se aprecia también, como en la parte posterior de la batería la concentración de aire es mayor. Por complementaridad el hidrógeno invade prácticamente toda la sala dándonos una idea de que la ventilación propuesta es insuficiente.

En este tipo de instalaciones resulta más adecuado el ubicar sobre los paramentos verticales y a una altura desde la mitad de del mismo hasta el techo enrejillados de ventilación por la propia tendencia del gas a subir.

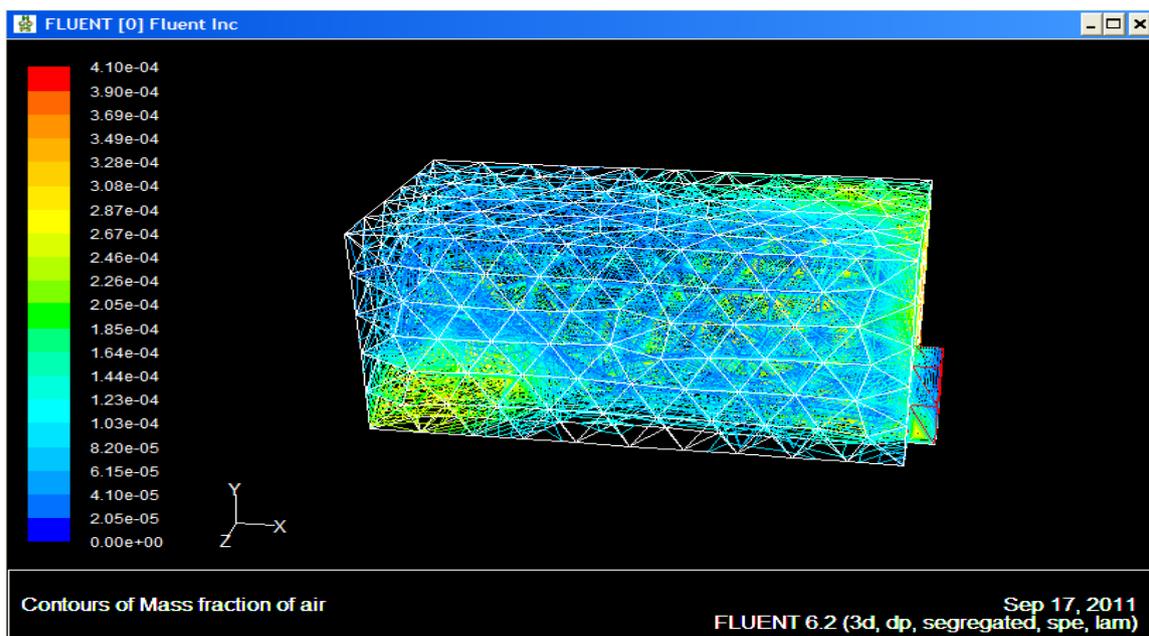


Figura 8.59. Contornos de aire en la sala de cargas cuando se produce el escape de hidrógeno



En la figura 8.60 se aprecia el mayor valor de concentración de hidrógeno en la zona del escape y como la nube del gas tiende a distribuirse por toda la sala de cargas y como es lógico, en la zona de ventilación (puerta) estos valores se reducen. No obstante como antes se apuntó la ventilación no es suficiente.

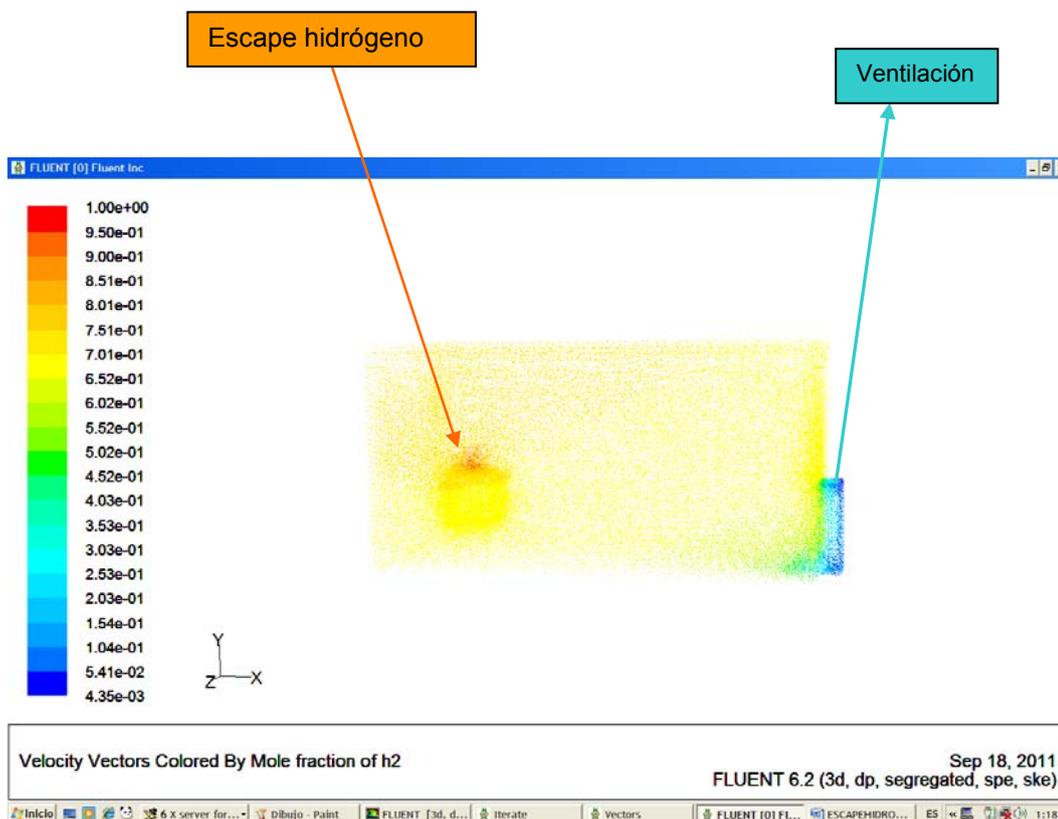


Figura 8.60. Vectores de fracción molar de hidrógeno

8.3.5. Estudio del escape de amoniaco en la sala de frío 2

Presentamos a continuación el caso del estudio de escape de gas amoniaco en la zona de frío 2. Esta sala presenta una forma rectangular de dimensiones 11m x 4,80m con una puerta de entrada opaca sin ventilación de dimensiones 2m x 1,40m que comunica con el patio exterior de una de las zonas de carga de baterías, dispone también una puerta de comunicación con la sala de frío 3.

De las cuatro zonas de agua fría que existen en la fábrica se ha decidido el estudiar esta ala por ser la de mayor riesgo. Esta sala presenta escasa ventilación tal y como se ha descrito en el apartado 8.1.4 y es frecuente la existencia de pequeños escapes de gas tal y como se ha podido apreciar y medir con el explosímetro Xam 7000.

Al igual que en los casos anteriores primeramente realizamos la geometría de la zona de estudio (figura 8.44), donde prescindimos de elementos superfluos que compliquen y consuman recursos durante la creación de la malla y obtención de resultados.

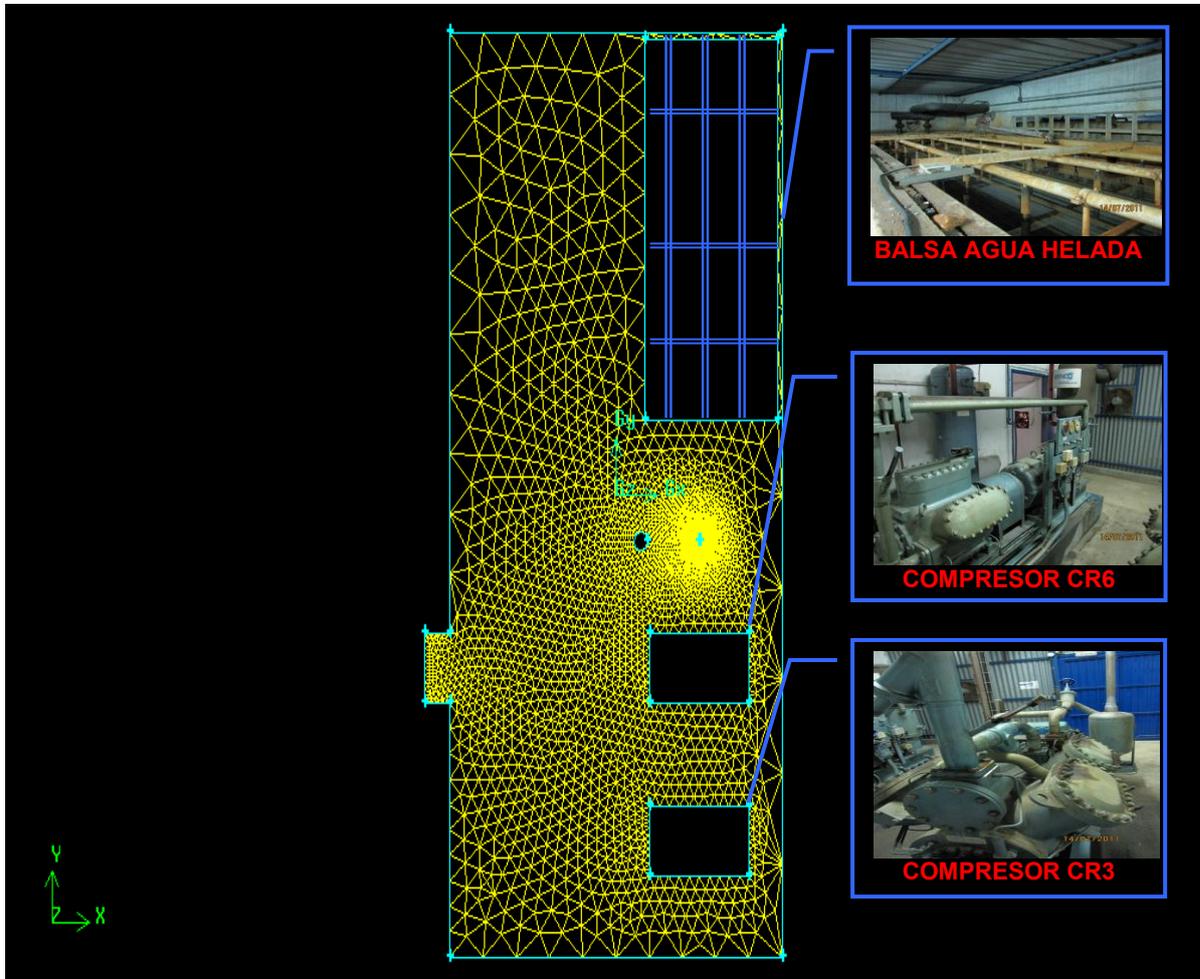


Figura 8.61. Malla generada con GAMBIT de la balsa de agua helada 2

Podemos observar como existen zonas de mallado poco denso, esto es debido a seleccionar por defecto el mallado tridimensional sin establecer la cuenta de intervalo en nodos. Corregimos esta situación generando una malla más compacta que nos va a proporcionar soluciones más satisfactorias. Sobre la malla imponemos las condiciones de contorno tal y como se representa en la figura 8.62.

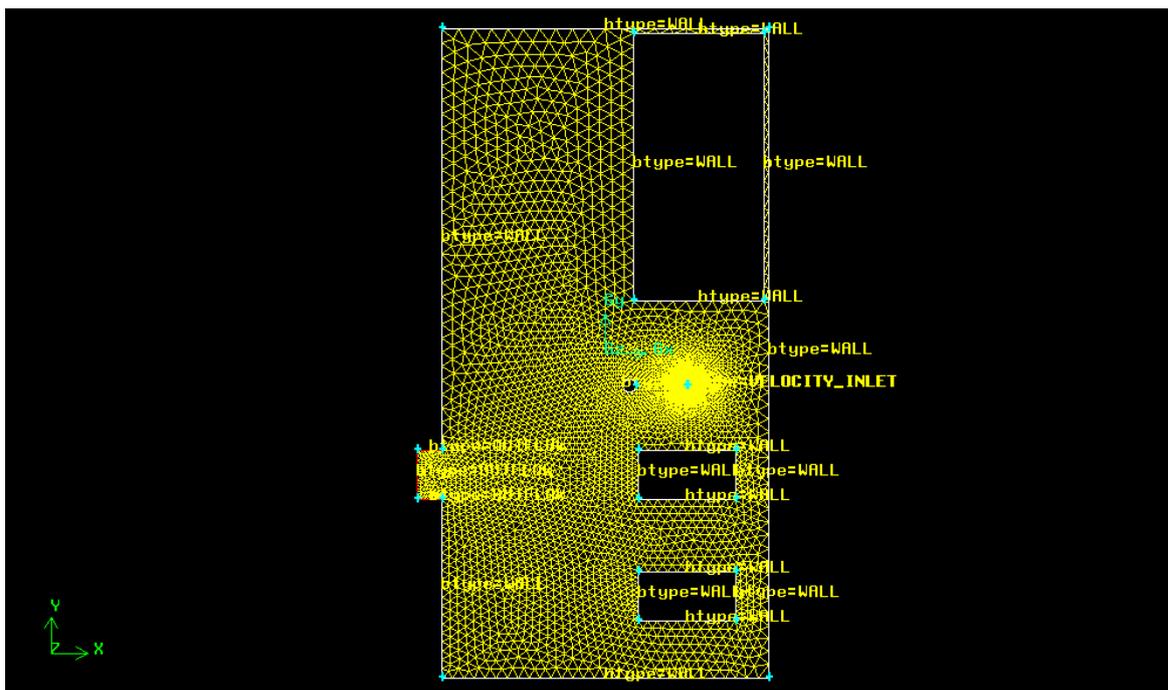


Figura 8.62. Malla refinada y condiciones de contorno sobre la misma

En este estudio vamos a considerar dos situaciones: una primera en la cual la fuga se produce a través de la emisión del amoniaco por un poro de 5 mm^2 en la válvula principal y la otra según la cual se añade al primer escape dos más de la misma dimensión, uno ubicado en el prensaestopas aguas arriba del decantador y el otro en el cuerpo del compresor CR6.

Como antes se ha indicado, en esta zona se producen con frecuencia pequeñas fugas de amoniaco debidas a escapes en elementos como los antes referenciados (bridas, válvulas, etc). En la visita realizada a las instalaciones el pasado día 05/12/2011 se pudo observar una fuga moderada en el compresor CR6 a través de la junta del segundo bloque donde se alojan los pistones. El poro presentaba unas dimensiones aproximadas de 4 mm^2 y la velocidad de emisión del amoniaco por el poro era de 39 m/s (valor el que vamos a utilizar para nuestra simulación). Indicar que la alarma no funcionó y tampoco el ventilador a ella conectado.

En las simulaciones vamos a considerar que el ventilador está parado y que tanto la puerta principal como la que comunica internamente con la balsa 3 están cerradas, siendo la única ventilación el hueco del ventilador.



a) Primer caso:

En la siguiente figura (figura 8.63) se presenta en planta la velocidad de escape de gas sobre el poro considerado de 5mm² en la válvula de corte obtenida con el programa FLUENT sobre la geometría de la figura 8.62. Podemos observar como la nube de amoniaco tiende a dirigirse principalmente hacia la zona del ventilador que comunica con el exterior al aire libre (el valor de velocidad medido de aire medido con el termohigrómetro kestrel k3000 es de 2 m/s).

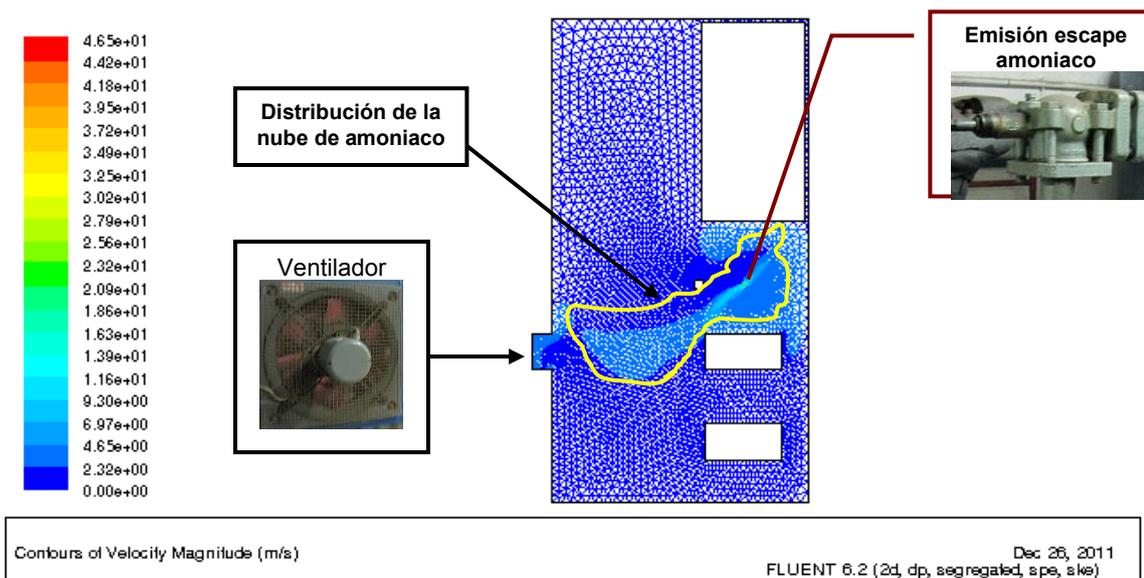


Figura 8.63. Velocidad de escape en m/s de la nube de amoniaco fugada

En la figura de la derecha (figura 8.64) se presenta la extensión en metros de la nube de gas desde el punto de emisión (circulo rojo) al extremo de la nube casi en la zona del ventilador. La mayor distancia en horizontal desde el punto de emisión es de 3,35 metros. Este valor es similar al obtenido en los resultados de la tabla 8.13 en la cual se reflejan los valores de extensión horizontal y vertical según la metodología cualitativa para fuga de vapores a través de válvula de seguridad y que establece una distancia de 3 metros desde la fuente.

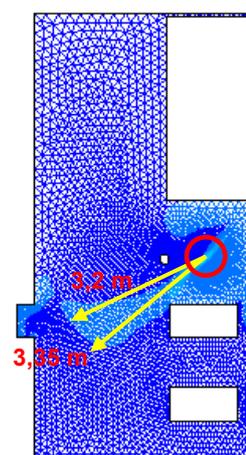


Figura 8.64

b) Segundo caso:

En este caso estudiamos la contribución de un escape triple debido a la emisión de amoniaco por fugas en la válvula de seguridad manual, prensaestopas y cuerpo del compresor CR10. Como podemos ver observar el gas tiende a ocupar todo el recinto de



la zona de frío 2 con concentraciones de gas que van desde 0,05% en adelante, alcanzándose puntos de casi el 100%. Aunque como se indica en determinadas fuentes el amoniaco es un gas que resulta difícil de inflamar debido a su elevado LIE (15%) vemos que no es imposible. Situaciones de desajuste y malfuncionamiento de determinados dispositivos pueden generar escenarios muy peligrosos. Resulta también especialmente preocupante el encontrarse con estudios de atmósferas explosivas en los cuales ateniéndose al elevado límite inferior de explosividad del amoniaco se desclasifican alegremente este tipo de zonas. Como se apuntó en el punto 8.1.3. al emplear la metodología cualitativa, esta zona debe ser considerada como una zona 1 debido también a su grado de disponibilidad de ventilación mediocre.

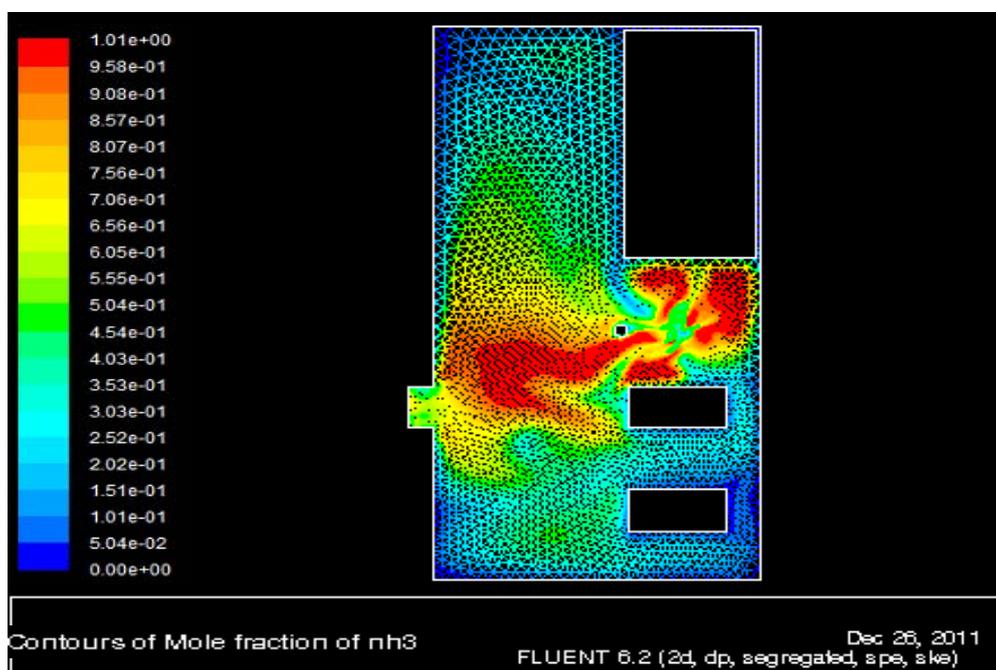


Figura 8.65. distribución de fracción molar de nh3 en la sala de frío 2

Al igual que en el caso anterior de estudio de batería de cargas se ha podido comprobar con el explosímetro dragüer Xam 7000 los niveles de amoniaco en la zona de frío 2 (la más peligrosa) encontrándonos con situaciones de riesgo que se manifiestan con concentraciones superiores al LIE del amoniaco (fotos 8.66, 8.67 y 8.68).



Fotos 8.66, 8.67 y 8.68. Mediciones de amoniaco con explosímetro en sala 2



8.3.6. Estudio de las atmósferas explosivas por polvo en la Torre de Leche en Polvo

El estudio detallado de los posibles “incidentes” que se podrían producir en el interior de la cámara de secado, ciclones, vibrofluidificador, etc., los posibles puntos de generación, la influencia de los fenómenos de turbulencia y la propagación a y entre equipos adyacentes sería material más que suficiente para realizar otra tesis. Por ello, en este apartado se realiza un estudio para dos posibles casos en el interior de la cámara de secado: un incendio en el atomizador de la cámara de secado y una explosión en el interior de la misma.

Primeramente hagamos un poco de historia y veamos que estudios importantes se han llevado a cabo para este tipo de instalaciones.

Los trabajos realizados hasta la fecha sobre “incidentes” en secaderos de leche en polvo son más bien escasos y se encuentran circunscritos prácticamente al estudio de la cámara de secado sin considerar de forma conjunta el resto de elementos de la instalación (ciclones, vibrofluidificador, ensacadora, etc.). Cabe destacar los siguientes:

En el año 1987 aparece publicado por la Association of British Preseverd bajo el título de **“PREVENTION OF FIRE AND EXPLOSION IN SPRAY DRYING PLANT”** un código de buenas prácticas para diseñadores, fabricantes y usuarios de este tipo de instalaciones. Este trabajo se articula en cinco partes diferenciadas:

- En la primera se presenta el problema de este tipo de instalaciones, así como los estándares de aplicación y la posición legal del Reino Unido.
- La segunda parte presenta las limitaciones del código, las características generales de los procesos y su descripción.
- Los riesgos y medidas preventivas para este tipo de instalaciones se recogen en la sección tercera. En esta parte se tratan de forma general los fuegos y explosiones, las fuentes de ignición, la detección e inertización y los requerimientos de operación.
- Seguidamente se presentan las diferentes opciones para minimizar el impacto de las explosiones por polvo: venteos, supresión, paneles de venteo y aislamiento. En esta parte se presentan como elemento a destacar la superficies de venteo necesarias para diferentes parámetros según la norma alemana VDI 3673 (Venting Pressure Release) of Dust Explosions) de 1979 y la norma americana NFPA 68 (National Fire Protection Association) Explosing Venting de 1978.



- La última parte está dedicada al control del fuego desde un punto de vista general, tanto desde un punto de vista de operación, como durante el montaje de los equipos para una instalación nueva.

El trabajo en cuestión constituye una buena aproximación al estudio de la problemática de este tipo de instalaciones y parece que tuvo su eco en otros países. Así, en 1993 se aprueba el **“CODE OF PRACTICE FOR THE PREVENTION, DETECTION AND CONTROL OF FIRE AND EXPLOSION IN NEW ZELAN DAIRY INDUSTRY SPRAY DRIYING PLANT”** publicado por el Servicio de Salud y Seguridad Ocupacional de Nueva Zelanda.

La estructura de esta publicación es semejante a la anteriormente descrita presentando cinco capítulos, alguno de ellos con título idéntico a los incluidos en el código anteriormente comentado. No obstante, la aproximación y el alcance difiere motivado lógicamente por los propios avances en los diseños y en el estudio de los mismos. En este código ya se introducen características de diferentes productos lácteos leche entera, desnatada, etc. y un mayor desglose de recomendaciones y requerimientos (capítulo 3 que equivale a la parte 3 de riesgos y prevención del código anterior). Así, se profundiza en la descripción de los diferentes elementos que constituyen una torre de secado y las medidas preventivas a tener en cuenta. Se presentan también diferentes anexos entre los cuales destacan el apéndice 2 relativo al tipo de operaciones de mantenimiento y frecuencia para estas instalaciones y el apéndice 3 dedicado a los permisos de trabajo.

En 1996 Francesco Tamanini presenta su trabajo **“VENT SIZING IN PARTIAL-VOLUME DEFLAGRATIONS AND ITS APLICATION TO THE CASE OF SPRAY DRYERS”** en el cual se estudian las diferencias entre las explosiones debidas a polvos de diferentes productos lácteos producidos en los secaderos y la influencia en el tamaño de venteo según la norma alemana VDI 3673 “Pressure release of dust explosions” de 1994 y la norma americana NFPA 68 “Guide for venting of deflagrations” también de 1994. El estudio aborda estos problemas mediante la descripción de un análisis de los resultados llevado a cabo con la ayuda de un modelo de deflagraciones desarrollado por Factory Mutual Research Corporation. Los resultados obtenidos presentan recomendaciones en relación a las directrices de diseño para fabricante, así como a la necesidad de seguir profundizando en los estudios.



Ya en el año 2004, se presentó en el “11th Simposio Internacional LOSS PREVENTION AND SAFETY PROMOTION IN THE PROCESS INDUSTRIES” el paper **“DUST EXPLOSION VENTING AND SUPPRESION OF CONVENTIONAL SPRAY DRYERS”** (Siwek, R.; Wingerden, van K.; Hansen, O.R.; Sutter, G; Kubainsky, Chr; Schwaretzbach, Chr.; Giger, G; Meili, R.) que recoge los resultados obtenidos de los experimentos realizados en un secador por aspersión de volumen 43,3 m³. Para llevar a cabo los experimentos se realizaron variaciones en los parámetros de: concentración de polvo de la nube con y sin capa de polvo, se utilizaron diferentes tipos de polvo (celulosa y almidón de maíz) y se varió la posición de la fuente de ignición. La herramienta computacional utilizada fue el software FLACS (Flame Acceleration Simulator).

Estos resultados se ampliaron por el propio K.van Wingerden en 2008 mediante la publicación del trabajo **“SIMULATION OF DUST EXPLOSIONS IN SPRAY DRYERS”**, haciendo uso del software específico DESC (Dust Explosion Simulation Computer) valorando tanto estructuras sin venteo como venteadas.

En 2008 se publica por THE FIRE PROTECTION RESEARCH FOUNDATION el trabajo **“EXPLOSION VENTIG DATA AND MODELING RESEARCH PROJECT”** preparado por Robert Zalosh y con el objetivo, de revisar la literatura internacional relativa a venteos de explosiones por polvo y presentar ejemplos de estudio comparativos entre la norma europea NFPA 68 y la norma europea EN 14491. Los resultados obtenidos permiten apreciar los diferentes criterios de ambas normas, obteniéndose valores más conservadores con la norma europea que con la americana, en especial para relaciones (de silos-recipientes) longitud/diámetro mayores a uno.

Por último, no podemos olvidarnos de los trabajos realizados por Scott G. David (GexCon As):

- **“CASE STUDY SUMMARY OF DRYER EXPLOSION AND VENTING DESING”** publicado en el 27 de octubre de 2010 por la American Institute of Chemical Engineers (AIChE) y que recoge el estudio de un caso real por parte de los ingenieros de GexCon de una explosión en un secador de recirculación de sólidos con configuración de anillo. La recreación del escenario y la simulación del proceso de explosión fue llevada a cabo con el programa DESC, concluyendo que el polvo encontrado en el secador no había contribuido al accidente.



- **“DUST OR GAS EXPLOSION: CASE STUDY OF DRYER AND DESING VENTING”**, trabajo presentado en el 6th Global Congress on Process Safety de la American Institute of Chemical Engineers (AIChE). Este trabajo desarrolla el anterior trabajo comentado, evaluándose diferentes escenarios de explosión del secador para atmósferas por polvo y para gas. La motivación del mismo parte de los resultados que se habían obtenido en el anterior trabajo a fin de estudiar la implicación de la atmósfera por polvo a la explosión y valorar los efectos del gas en el escenario.

Aunque en el capítulo 4 en el punto 4.3.6 ya se detalló de forma concisa el funcionamiento y los pormenores de la Torre de Leche en Polvo, se amplía a continuación la información reseñada en ese capítulo.

La sección de torre de leche en polvo se establece en un edificio cuadrangular de lados 20m x 20m y altura 25 metros.

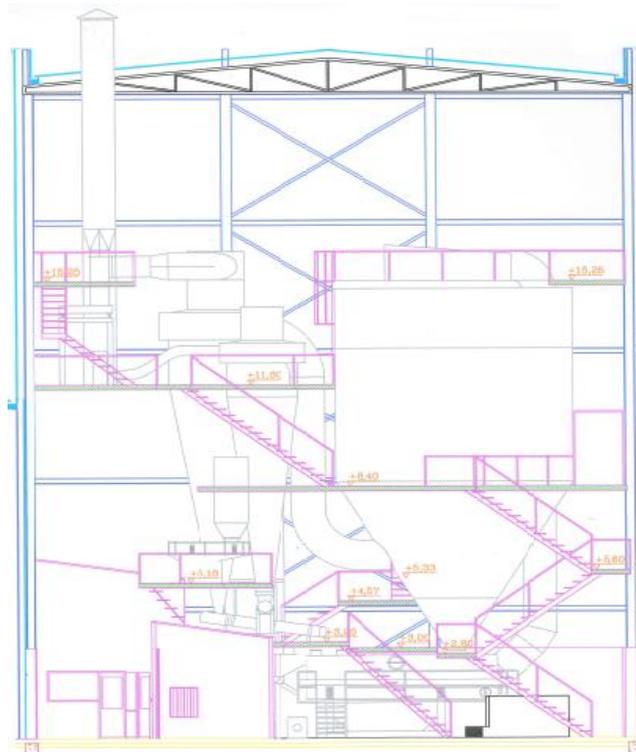


Figura 8.66. Sección de la torre de fabricación de leche en polvo

El edificio se ordena a diferentes alturas (figura 8.66): así en la cota 0,0 se dispone de los equipos indicados en la figura 8.67, en las cotas de 2,5 metros; 3,00 metros; 3,20 metros; 4,57 metros; 5,18 metros; 5,33 metros y 5,86 metros se dispone de los equipos que se muestran en la figura 8.68.

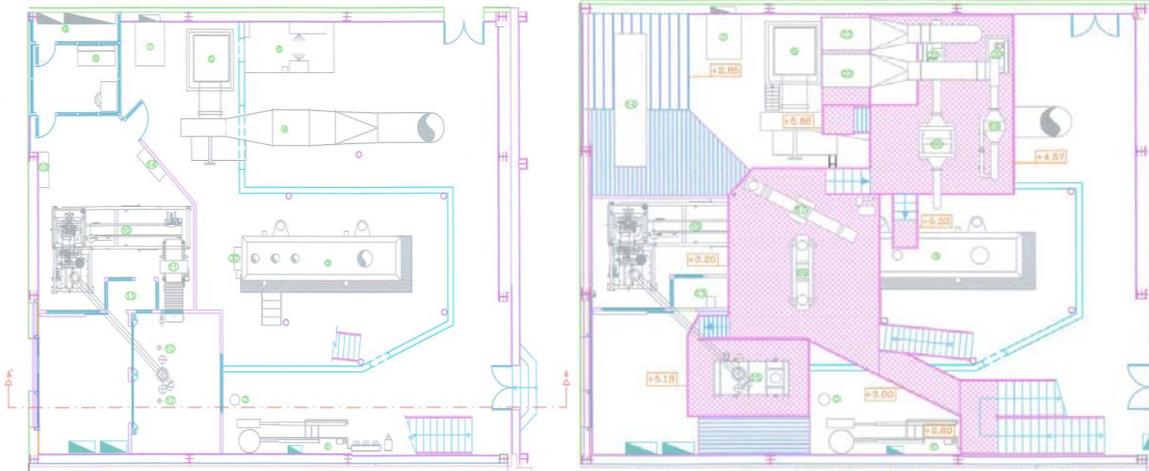


Figura 8.67. Planta torre leche en polvo 0 m. **Figura 8.68.** Planta torre leche en polvo.

Las plantas de la torre a 8,40 metros, 11,80 metros y 15,25 metros son las que se muestran en las figuras 8.69, 8.70 y 8.71 respectivamente.

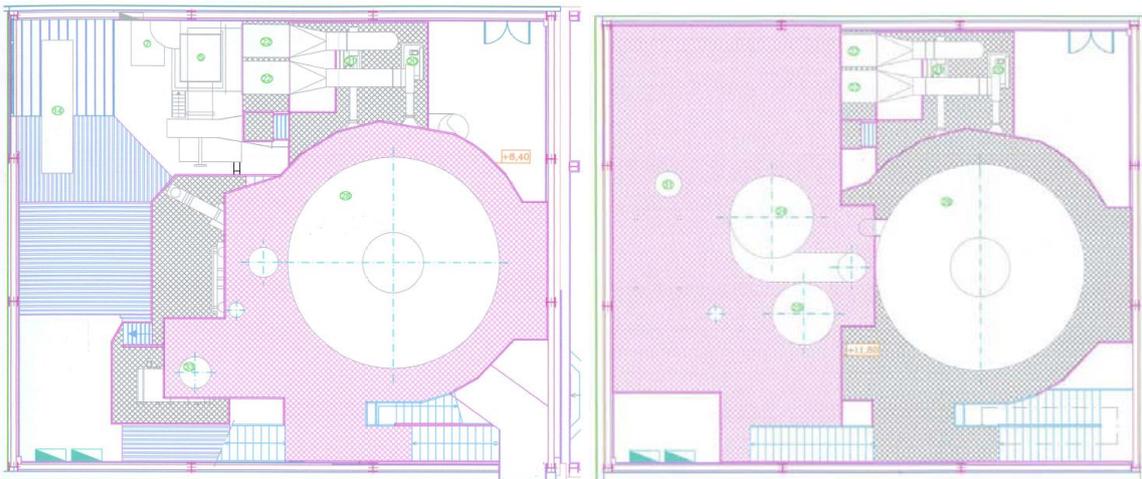


Figura 8.69. Planta torre leche en polvo 8,40m **Figura 8.70.** Planta torre leche en polvo 11,80m

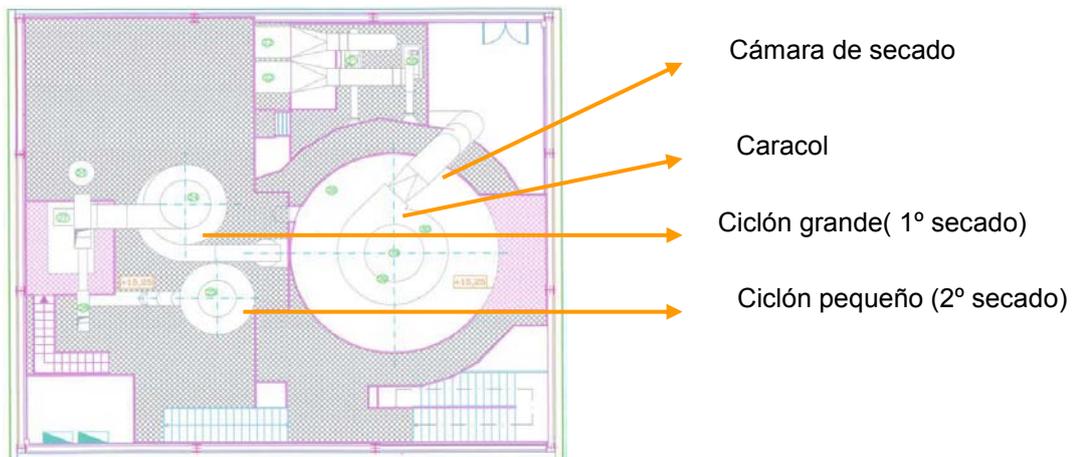


Figura 8.71. Planta torre leche en polvo 15,25 m

Los elementos sobre los que vamos a prestar nuestra atención lo constituyen la cámara de secado propiamente dicha con su puerta de alivio de presión, parte de los conductos a los dos ciclones y el sistema vibrofluidificador.

La cámara de secado está formada por un volumen cilíndrico-cónico. La parte cilíndrica presenta unas dimensiones de 7 metros de diámetro, por 6,5 metros de alto y la parte cónica presenta dimensiones de 5,5 metros de alto y diámetros de 7 y 0,5 metros respectivamente (figura 8.72). Cabe destacar que estas no son las dimensiones originales de la cámara, ya que a la parte cilíndrica se le aumentó un metro la altura para así “poder obtener mayor producción”. Este hecho constituye un handicap importante ya que la cámara de secado dispone de una puerta de alivio de presión que a priori estaba diseñada para liberar presiones para unas condiciones determinadas y en ellas influye el volumen de la misma.

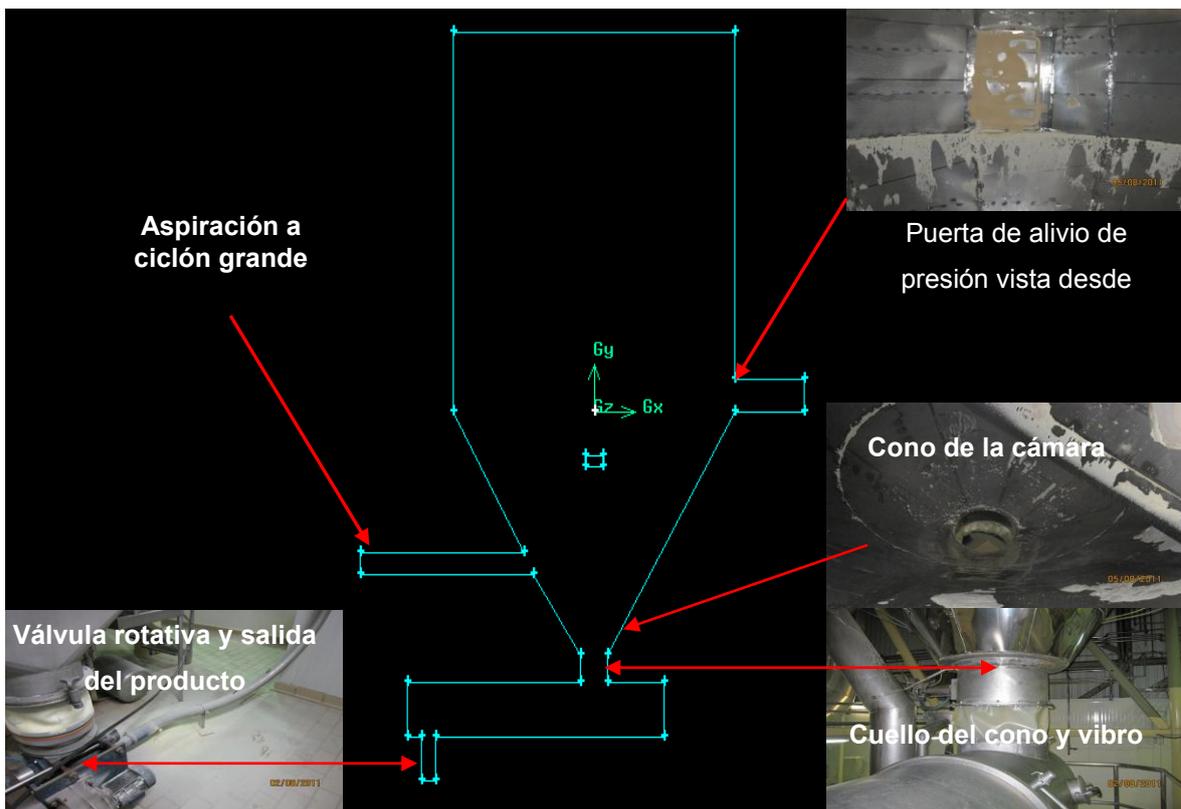


Figura 8.72. Cámara de secado y elementos principales

Como se ha indicado en el capítulo 4 la clasificación de la cámara de secado se considera como ZONA 20 debido a la complejidad de determinar el punto exacto de transformación de la leche en polvo. Asimismo, se ha determinado en el capítulo 6 las características del polvo que se produce en la planta de estudio encontrándonos con que



el polvo (suero o leche en polvo) presenta granulometrías iguales o inferiores a 200 μm casi en su totalidad, lo que entra de lleno en las características de polvo combustible.

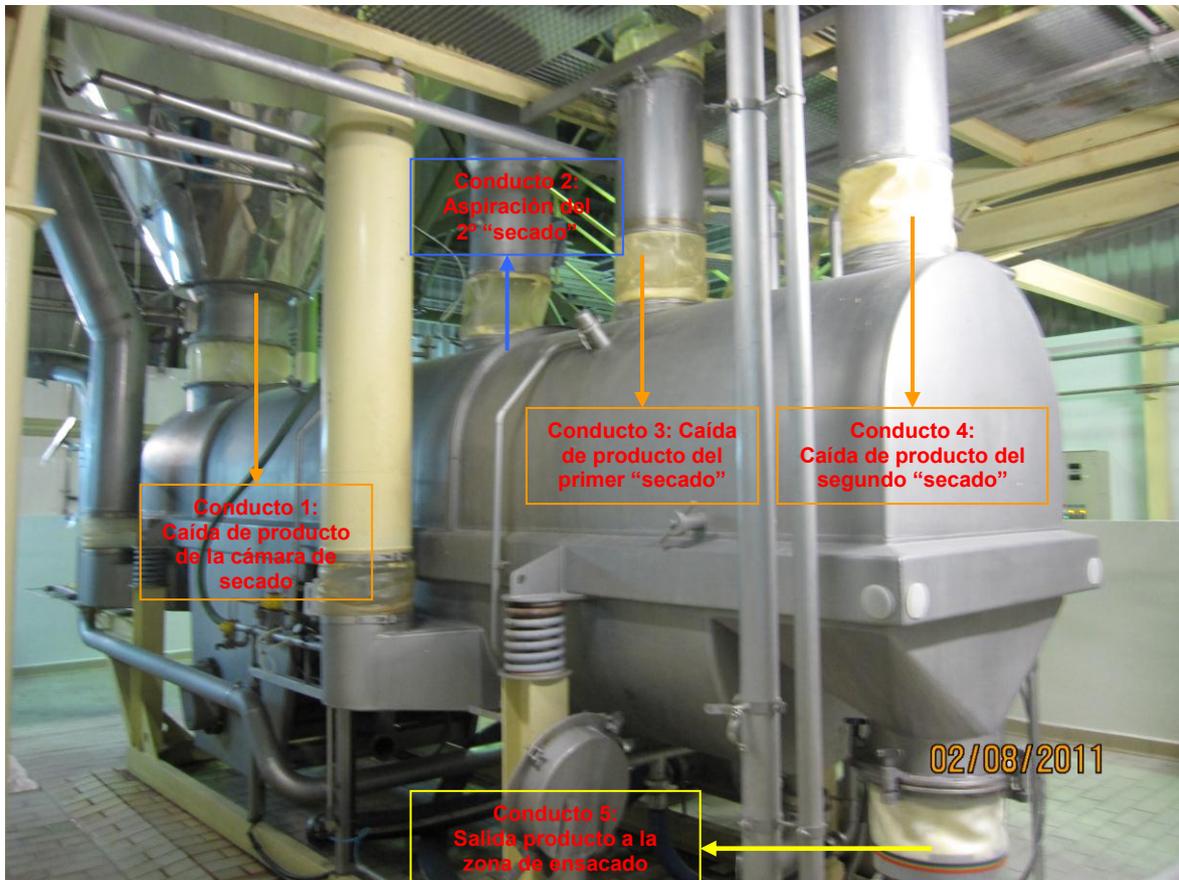
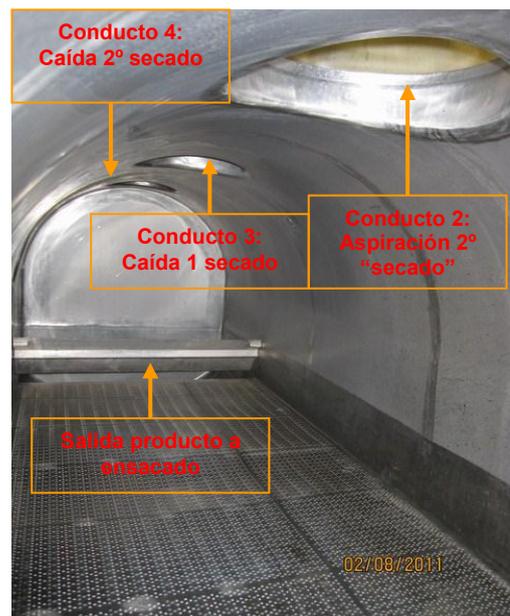


Foto 8.69. Sistema vibro y señalización de los procesos que tiene lugar



Fotos 8.70 y 8.71. Interior del sistema vibro



La mayor parte del producto “seco” (aproximadamente un 90%) se obtiene durante el proceso de la atomización cayendo directamente al vibro a través del conducto 1 (ver fotos 8.69 y 8.70), el 10% restante del producto se obtiene a través de dos procesos de secado (separación) conocidos como primer y segundo secado (foto 8.71). El 100% del producto sale a través del conducto 5 dirección a la zona de ensacado (fotos 8.69 y 8.70).

Antes de proceder a realizar las simulaciones es necesario determinar las condiciones bajo las que opera la cámara de secado y el vibro. Así, se ha procedido a medir las velocidades del aire dentro del vibro con un anemómetro de alta precisión. Los valores obtenidos son se presentan en la tabla 8.15.

Valores de velocidad, temperatura en el Vibro y presiones			
Zona	Velocidad m/s	Temperatura (K)	Presión (mbar)
Conducto 1	1,5	318	-2
Conducto 2	10,5 (velocidad de succión)	321	-48
Conducto 3	1,3	320	-210
Conducto 4	1,2	318	-5
Conducto 5	1,1	315	-1
Interior del vibro	0,9-1,1	311-15	-5

Tabla 8.15. Velocidades y temperaturas en el interior del vibro

Las magnitudes de velocidad y temperatura se han medido con un Anemómetro Termómetro Higrométrico Digital PACER modelo DA 40H de alta precisión y con sistema extensible para poder acceder a partes alejadas.



Fotos 8.72, 8.73 y 8.74. Mediciones en el interior del vibro

Las condiciones de temperatura en el interior de la cámara de secado y las presiones son las indicadas en la tabla siguiente (tabla 8.16).



Temperatura en el interior de la cámara de secado y presiones		
Zona	Temperatura (K)	Presión (mbar)
Entrada de aire en atomizador	469	100
Aspiración del primer secado	365	-5
Caída de producto (pico cámara)	321	-25

Tabla 8.16. Temperatura y presiones en el interior de la cámara de secado

En el estudio de atmósferas explosivas por polvo en la sección de la torre vamos a considerar dos posibles situaciones:

- 1) Una primera en la cual se produciría el comienzo de la combustión en la zona del atomizador de la cámara de secado.
- 2) Otro caso que sería ver como se produce una explosión en la zona intermedia del silo para una presión de 7,5 bar para así poder estudiar los mecanismos de propagación de la misma a los diferentes elementos.

8.3.6.1. Estudio del caso de inicio de incendio en el atomizador

El atomizador de la cámara de secado se encuentra ubicado en la parte superior de la cámara de secado en el punto medio del caracol (fotos 8.75 y 8.76). Consiste en una turbina (fotos 8.77, 8.78 y 8.79) que gira a 30.000 r.p.m. produciendo junto con la entrada de aire caliente en la parte superior de la cámara de secado a través del caracol el fenómeno de la atomización por dispersión de la leche o suero.



Fotos 8.75 y 8.76. Ubicación y colocación del atomizador en la cámara de secado

La leche o el suero se introduce a través de un pequeño embudo (foto 8.80) ubicado en la bandeja de la parte superior del atomizador. A través del cilindro del atomizador se conduce por tubería a la parte última de éste donde se ubica la turbina. Esta gira en sentido horario a 30.000 rpm, paralelamente a este proceso se introduce la corriente de



aire a 195 °C (aproximadamente) que entra por el caracol acoplándose al sentido de giro del atomizador y produciendo la atomización.



Fotos 8.77 y 8.78. Vista de la turbina del atomizador



Fotos 8.79 y 8.80. Atomizado (izq) y embudo de entrada de leche (derecha)

El objetivo de este primer caso es simular un incendio con una potencia de combustión de 5 MW en la zona del atomizador y estudiar como es la evolución del mismo en el interior. Para ello vamos a determinar la velocidad a la cual entran los humos en la superficie de control objeto de estudio. Fijamos las condiciones del incendio que queremos modelizar, las condiciones son:

- Potencia calorífica del incendio: 5 MW
- Temperatura de los gases calientes: 700 K.
- Concentración de CO₂ de los gases de combustión: 0.05.



Proceso de autocombustión en un atomizador de leche en polvo

Foto 8.81. Combustión en atomizador de leche en polvo

Con estos datos podemos determinar el caudal másico de los gases calientes. Para ello imponemos la condición de que:

$$\dot{W}_{\text{comb}} = \dot{m}_g C_p \Delta T \quad (\text{Ec.8 – 35})$$

donde \dot{W}_{comb} es la potencia liberada en la combustión (5 MW), \dot{m}_g es el caudal másico de gases que queremos determinar, C_p es la capacidad calorífica del aire (1005 KJ/kgK) y ΔT es la diferencia de temperatura entre los gases calientes y la temperatura de funcionamiento normal de la cámara en la zona del atomizador (700K-465K). Por lo tanto:

$$\dot{m}_g = \frac{\dot{W}_{\text{comb}}}{C_p \Delta T} = \frac{5 \cdot 10^6}{1005 \cdot (700 - 465)} = 21,17 \text{ kg/s} \quad (\text{Ec.8 – 36})$$

Por lo tanto, la densidad de los gases calientes la estimamos mediante la ley de gas ideal:

$$\frac{P}{\rho} = RT \quad (\text{Ec.8 – 37})$$

Así, tenemos que la densidad de los gases producidos es:

$$\frac{P}{\rho} = RT = \frac{101300}{287 \cdot 700} = 0,504 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (\text{Ec.8 – 38})$$

Por lo tanto el caudal volumétrico de gas que entra en el dominio (superficie de control) será:

$$\dot{Q}_g = \frac{\dot{m}_g}{\rho_g} = \frac{21,17}{0,504} = 42 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (\text{Ec.8 – 39})$$

La velocidad de entrada de los gases en el volumen de control, es decir, en la cámara de secado y en el vibro viene dada por:

$$V_g = \frac{\dot{Q}_g}{S_g} = \frac{42}{\pi \cdot (0,35) \cdot 0,15} = 190 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (\text{Ec.8 – 40})$$

Este va a ser el valor que vamos a introducir el campo *Velocity Magnitude*.



a) Caso A: geometría simplificada

Como ya hemos indicado la forma de proceder a la hora de realizar la simulación es primero el generar la geometría con el programa GAMBIT. Para ello, vamos a realizar una simplificación de la geometría considerando la cámara de secado con su puerta de alivio de presión, la conducción del primer secado al ciclón grande y la salida del producto terminado. Esta geometría puede verse en la figura siguiente (figura 8.73).

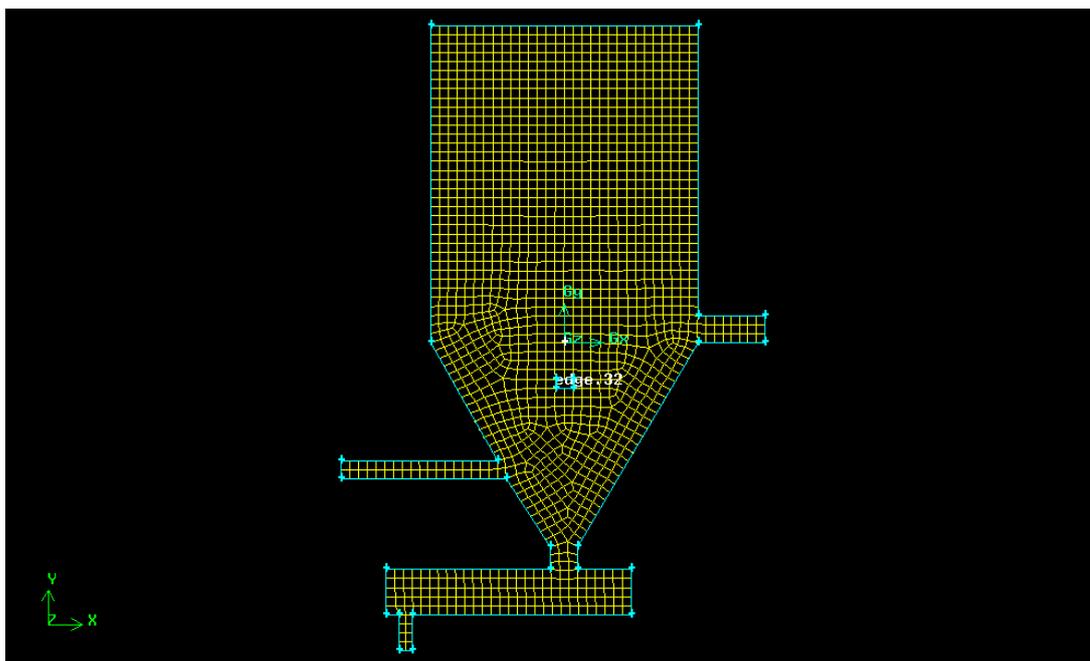


Figura 8.73. Generación de la geometría GAMBIT simplificada para el primer caso de estudio

Realizada la geometría e imponiendo las condiciones iniciales y de contorno. En el campo de discretización seleccionamos la opción de *Pressure a Body Force Weighted*, ya que ofrece mejor convergencia que el resto de posibilidades, cambiamos también el resto de parámetros de *Discretización a Second Order Upwind*. Además utilizamos como *Pressure-Velocity Coupling* el método *Simplec*.

Inicializamos y fijamos los criterios de convergencia. Mientras se resuelven las ecuaciones de forma iterativa, FLUENT va mostrando en pantalla un valor de residuo asociado a cada de ecuación de gobierno que está resolviendo. El residuo es una medida de lo bien que la solución actual cumple las ecuaciones de gobierno discretizadas. En este caso vamos a iterar la solución hasta que los valores de residuo se sitúen por debajo del valor umbral de 10^{-3} . En la figura 8.74 se muestran los residuos generados durante el proceso de convergencia del caso de estudio que nos ocupa, en esta figura se puede observar el proceso de linealidad y como los residuos se sitúan por debajo del valor umbral.

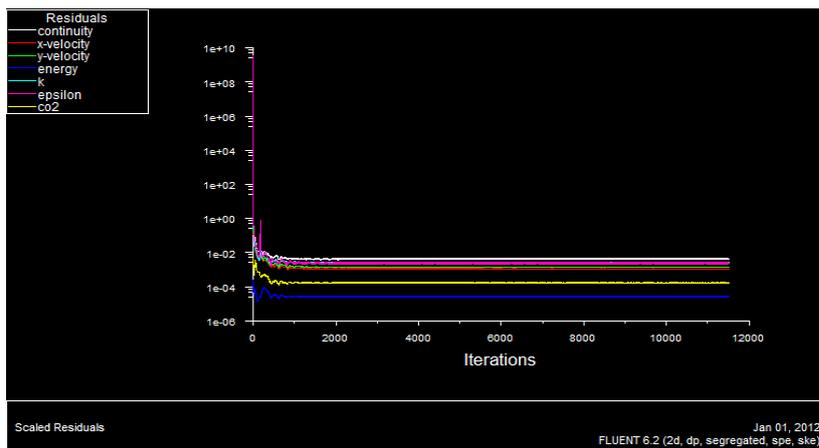


Figura 8.74. Residuos generados durante el proceso de convergencia

Finalizado el proceso podemos obtener por pantalla diferentes magnitudes de interés. Así, en la figura 8.75 se muestran los contornos de velocidad de propagación del incendio en el interior de la cámara de secado. Podemos observar como la combustión del producto en polvo se genera en la zona del atomizador tal y como habíamos especificado y como el incendio se propaga longitudinalmente produciendo un aumento de la temperatura y presión interiores a través de la cámara de secado hacia el vibro y las demás conducciones.

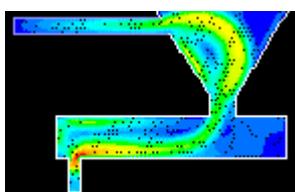
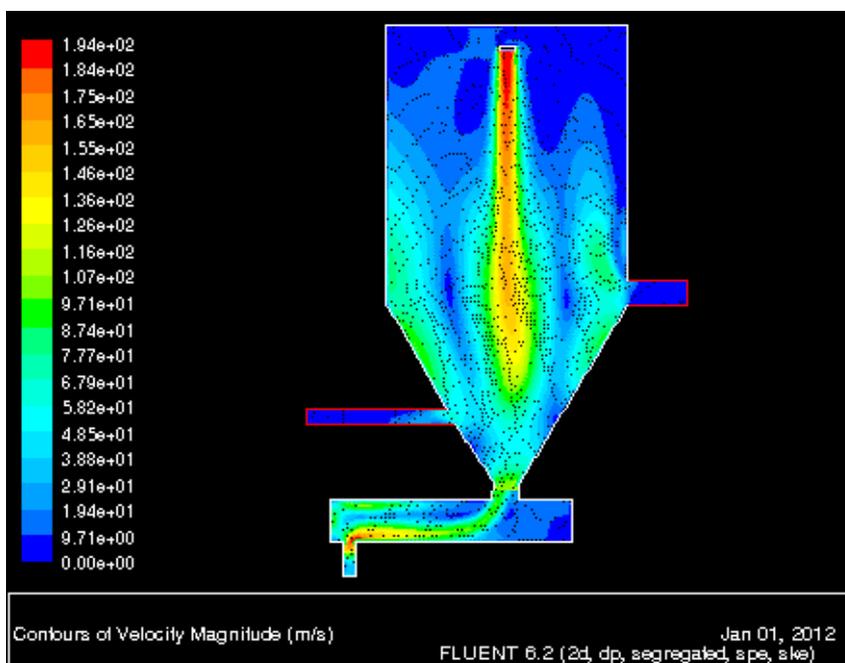


Figura 8.75. Contornos de velocidad de propagación del incendio dentro de la cámara de secado



En situación de normal funcionamiento de la cámara de secado, el campo de presiones se ordena en valores de presión negativa y baja magnitud en el interior de la misma y en el vibro (figura 8.76). Esta subpresión es necesaria para mantener el estado de atomización y para que se puedan suceder de forma automática los procesos de “primer y segundo secado”. Cuando se produce la combustión del suero o leche en polvo, la presión y temperatura aumenta en el interior de la cámara (figura 8.77) al ser insuficiente la superficie de la puerta de alivio para liberar la presión y gases generados, se producirá una sobrepresión en puntos del interior de la cámara rompiéndola y liberando la presión lo que produciría una explosión.

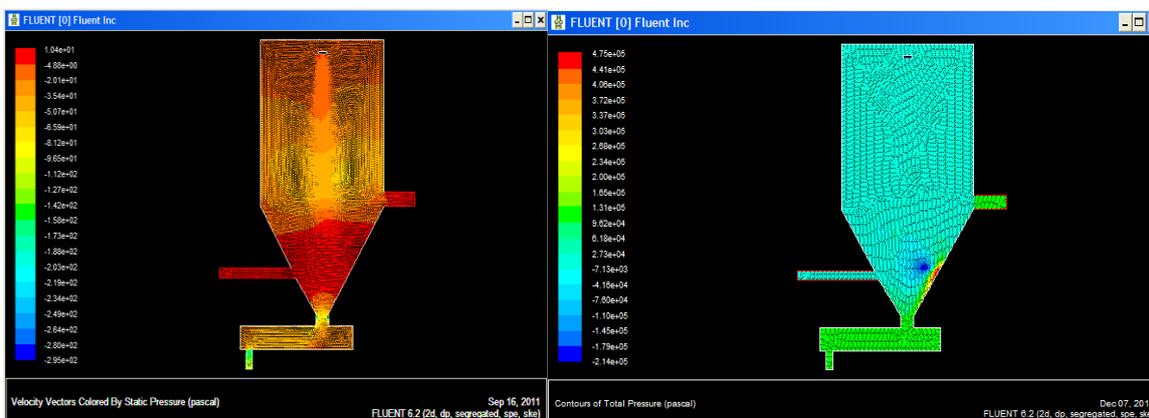


Figura 8.76 y 8.77. Presión (Pa) en interior de la cámara en funcionamiento normal (izq) y derecha sobrepresión producida en la parte interior derecha del cono como consecuencia de la combustión

En la figura 8.77 podemos observar como en la parte derecha del cono se produce un aumento de presión motivado por la concentración de gases, humos y calor en la geometría convergente. El ploteo del coeficiente de presión en la superficie del cono considerando el 0 en el inicio del comienzo de la parte cónica, nos proporciona la gráfica de la figura 8.78 donde podemos observar el aumento del coeficiente con la distancia.

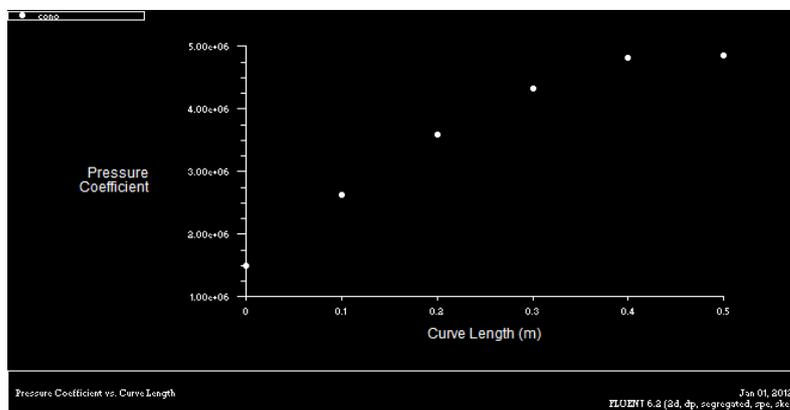


Figura 8.78. Coeficiente de presión en la superficie del cono



Este resultado lo podemos ampliar mostrando los valores de presión dinámica en (Pa) sobre cada uno de los elementos constitutivos de la geometría de la cámara de secado y vibro (figura 8.79) respecto a una simetría alrededor del eje y (punto 0). Podemos observar como la presión aumenta en la totalidad de la estructura, así uno de los elementos más afectados son los laterales de la cámara (es por ello, que en este tipo de instalaciones no se ubican paneles de venteo en la parte superior). La parte superior de la cámara presenta un máximo de presión en el punto central (donde se ubica el atomizador) disminuyendo a medida que nos alejamos del centro. Otro de los elementos más afectados es el que figura en la leyenda con el nombre de “caballo” y “caballo abajo”, este elemento es el conducto de aspiración interno para el primer secado. Como la puerta de alivio no es suficiente para liberar la sobrepresión, ésta se trasladaría por el mencionado conducto (que en condiciones normales de funcionamiento presenta una velocidad de aspiración de 16 m/s) propagando las ondas de presión al ciclón grande y de aquí al resto de instalación.

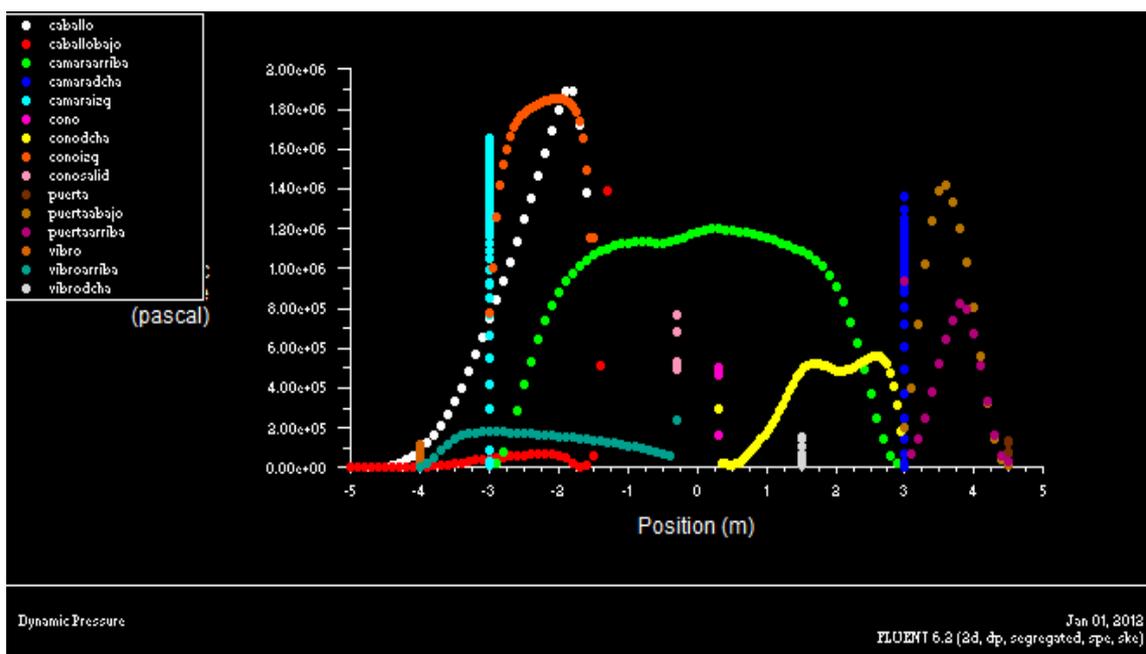


Figura 8.79. Valores de presión dinámica sobre los elementos de la cámara de secado

b) Caso B: geometría ampliada

Ampliamos ahora nuestro caso de estudio incorporando más elementos que conforman el vibro y la cámara de secado. Introducimos en la geometría los conductos de 2 al 4 con sus correspondientes condiciones de contorno tal y como puede verse en la geometría mallada de la figura 8.80.

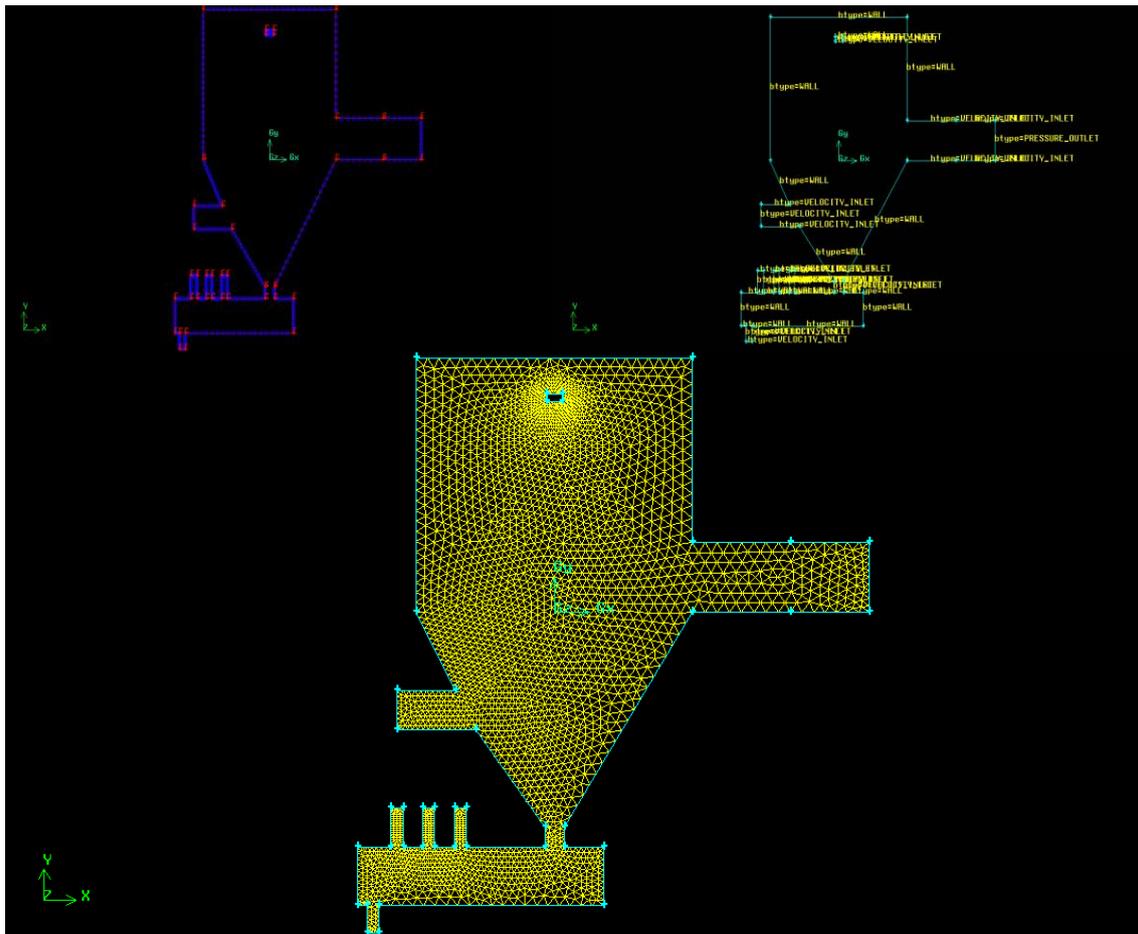


Figura 8.80. Ampliación de la geometría mallada y sus condiciones de contorno

Sobre esta geometría realizamos las mismas consideraciones de potencia de fuego, velocidad de salida de gases, etc., y fijamos los criterios de convergencia iterando la solución hasta que los valores de residuo se sitúen por debajo de 10^{-3} . Finalizado el proceso podemos obtener por pantalla los resultados de los parámetros que nos interesa analizar y al completar la geometría obtendremos resultados más reales.

El proceso de combustión genera un aumento de presión en el interior de la cámara de secado que posibilita la apertura de la puerta de alivio de presión (los fusibles rompen aproximadamente con una presión de 500-1000 Pa) por ello, inicialmente las llamas y su correspondiente campo de presión tenderán a seguir este itinerario desde la puerta de alivio de presión al exterior tal y como puede verse en la figura 8.81.

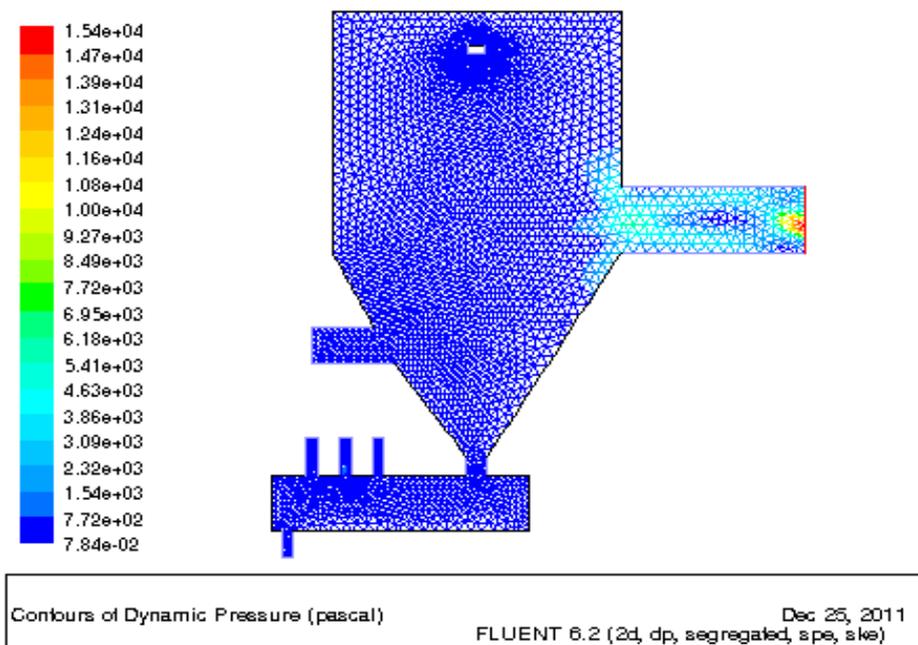
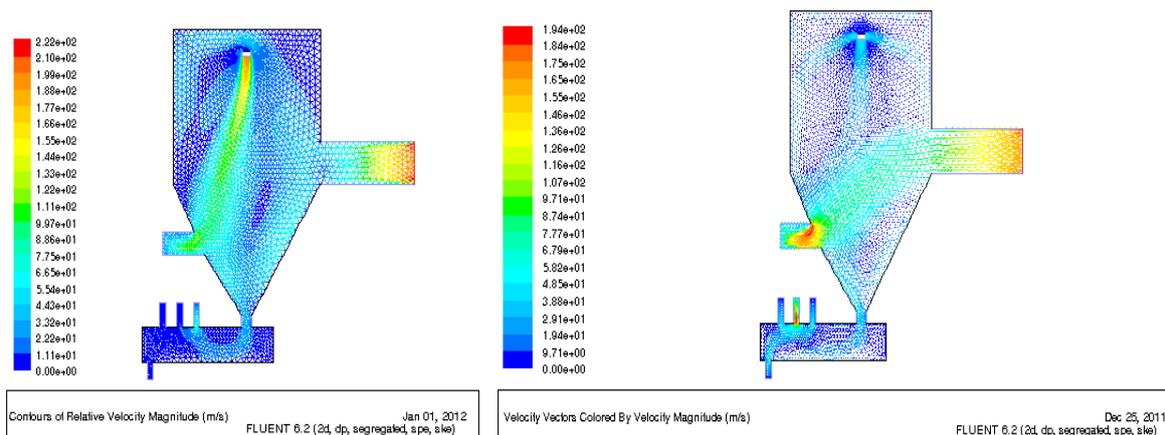


Figura 8.81. Contornos de presión dinámica en pascales

Al ser la superficie de alivio de presión insuficiente, las llamas tenderán a seguir dos caminos: la propia puerta de alivio y el conducto de aspiración al ciclón grande (figura 8.82). Puesto que el vibro está aspirando de la cámara de secado, las llamas también tenderán a dirigirse a través de este quipo y de aquí a la zona de ensacado y a los conductos de aspiración del ciclón pequeño y grande tal y como puede verse en la figura 8.83.



Figuras 8.82 y 8.83. Contornos y vectores de velocidad para del proceso de combustión



8.3.6.2. Estudio del caso de propagación de una explosión en el interior de la cámara de secado

Como hemos indicado el estudio detallado de las explosiones en el interior de una cámara de secado, los posibles puntos de generación de las mismas, la influencia de los fenómenos de turbulencia y la propagación a equipos adyacentes constituye un trabajo complejo que sería material más que suficiente para realizar otra tesis.

El objetivo que se plantea aquí es determinar de forma simplificada si la puerta de alivio de presión presenta las dimensiones correctas (por los motivos que anteriormente hemos descritos de modificación de la geometría de la cámara) y ver cuáles son las zonas más críticas de la instalación.

El estudio de las atmósferas explosivas en las cámaras de secado es un proceso complejo, así por citar alguna de las razones tenemos que la nube de polvo interior generada por el propio proceso de secado por aspersión no es homogénea. Esto guarda relación con lo expuesto en el capítulo 4, es decir, la concreción de la zona de cambio de partícula con cierta humedad a partícula “seca”. Existe una zona en la parte superior del cilindro de la cámara donde las partículas contienen tan cantidad de agua que en caso de quemarse el proceso sería lento. En la parte inferior de la cámara (inicio del cono hasta el vértice de la cámara) las partículas han perdido prácticamente toda la humedad, son partículas secas y la concentración existente en esta zona oscila entre los 60-150 g/m³ de producto. La intensidad de turbulencia para este tipo de instalaciones oscila entre 1-2,5 ms⁻¹.

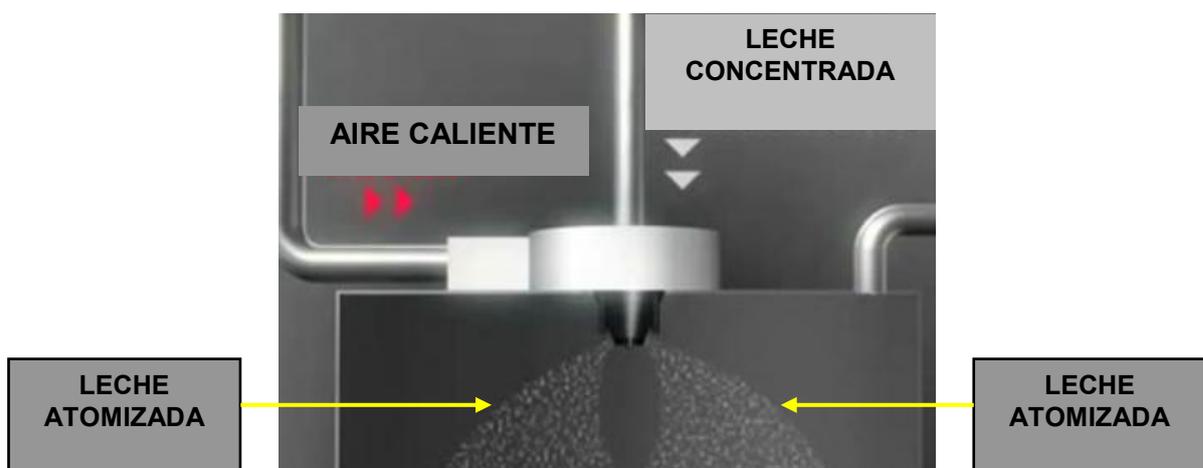


Figura 8.84. Proceso de secado por atomización



Los accidentes por explosión en secaderos tienen la mayor parte de su origen en la autoignición. Partículas asperjadas se quedan *pegadas* a partes de la instalación: atomizador (figura 8.85), parte superior de la cámara, etc. La temperatura en estas zonas es muy elevada superior a los 190 °C, comienza así un proceso de combustión latente del producto asperjado (figura 8.86) hasta que llega un momento que o bien puede producirse una combustión mantenida por un proceso de reacción en cadena (cuarto elemento del tetraedro del fuego) lo que podría conducir a una explosión, o el producto pegado se suelta de la zona y cae en la zona cónica. En esta zona el producto *enciende* una nube de polvo inflamable (figura 8.87) generando la explosión.

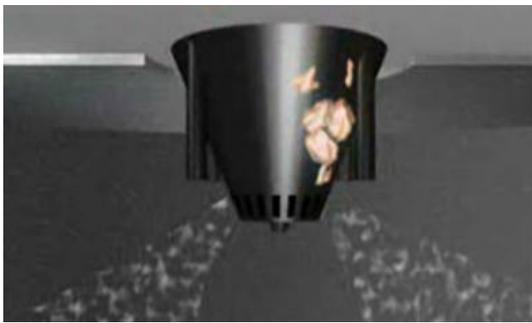


Figura 8.85. Partículas pegadas

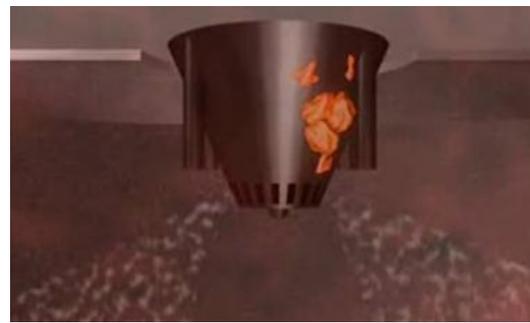


Figura 8.86. Combustión de las partículas

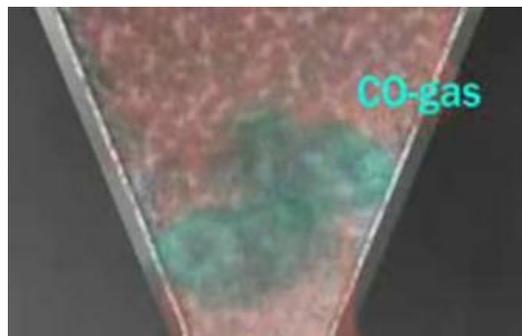


Figura 8.87. Combustión en el cono de la cámara de secado

La geometría que vamos a utilizar es muy similar a la utilizada en el caso anterior y es la indicada en la figura 8.88. En este caso debemos introducir la condición inicial de *presión inlet* en nuestra superficie de control. Esta condición la constituye una onda de presión de 7,5 bar; la elección de esta presión no se produce al azar sino a que es el valor máximo de la $P_{m\acute{a}x}$ (según datos bibliográficos) para el valor de la leche en polvo ($K_{m\acute{a}x}$ 102 bar m/s). Esta onda de presión vamos a ubicarla en dos puntos diferentes de la cámara de secado, el primero en el centro geométrico de la cámara, en el comienzo de la parte



cónica y el segundo en el cono debajo del conducto de aspiración para recuperación de finos a ciclón grande.

Sobre la geometría asignamos valores para condiciones iniciales y de contorno. La discretización la seleccionamos mediante *Pressure a Boy Force Weighted* a segundo orden. Los criterios de convergencia como en los casos anteriores se establecen para que los residuos se ubiquen por debajo del valor de 10^{-3} .

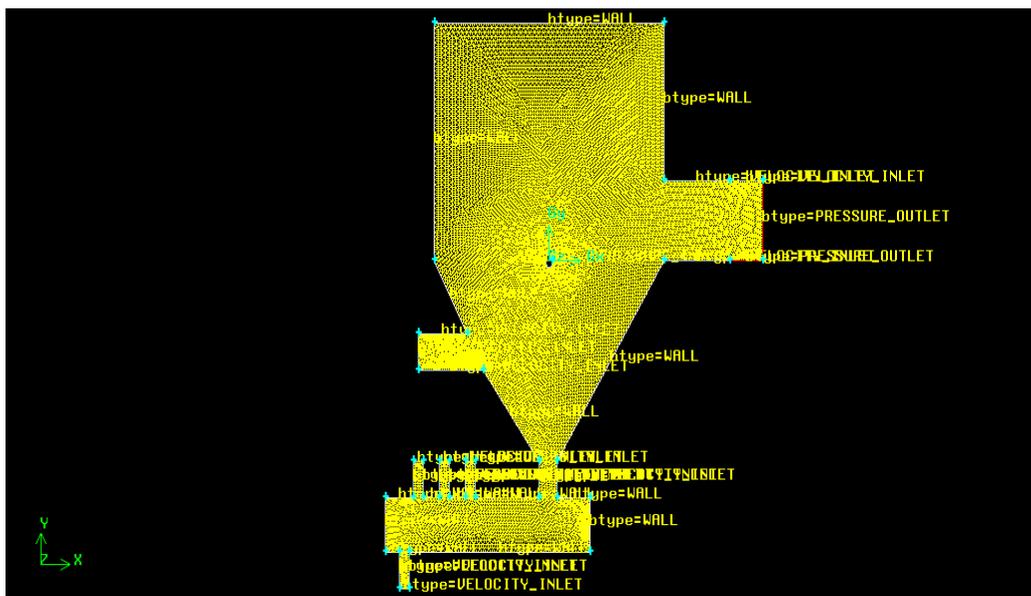


Figura 8.88. Geometría y condiciones de contorno utilizadas

Una vez finalizado el proceso seleccionamos los diferentes parámetros que queremos estudiar.

En la figura 8.89 se muestran los contornos de las ondas de presión dinámica en diversos instantes de la explosión y su propagación. La energía liberada por la explosión produce un incremento súbito y localizado de la presión, y un aumento de la temperatura en la zona donde se inicia la explosión, esto lógicamente genera una onda de choque que se propaga por todo el recinto (estamos dentro de un recinto cerrado) produciendo sobrepresiones elevadas. Éstas van a tender a aliviarse por la puerta de sobrepresión (la apertura de la puerta está tarada a menos de 0,1 bar (P_{stat})), pero como las dimensiones no son suficientes se van a transmitir por el recinto de la cámara y al resto de conducciones tal y como puede observarse en la figura siguiente (figura 8.89).

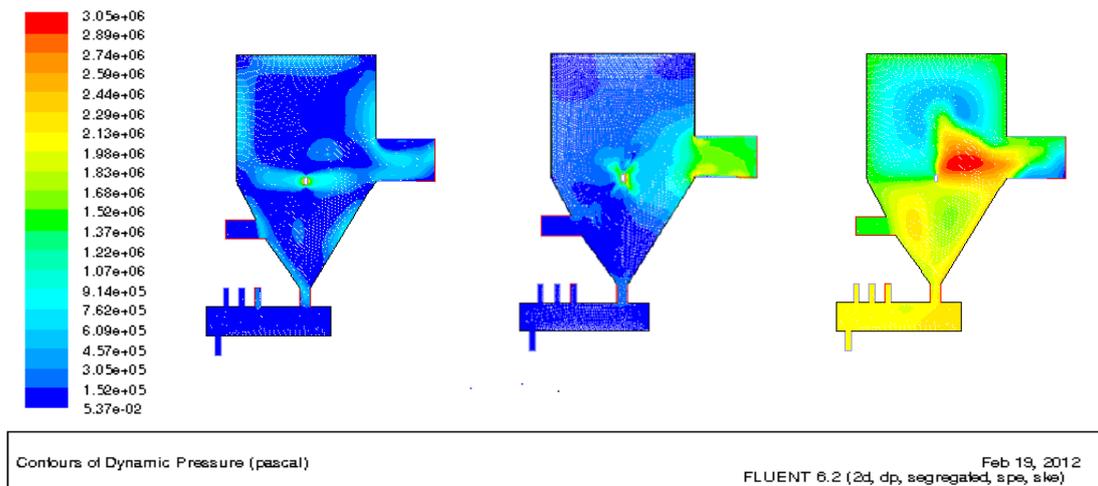


Figura 8.89. Contornos de presión dinámica y su propagación en la cámara

El histograma en % de la Presión Total en (Pa) se representa en la figura 8.90. En ella, podemos apreciar como aproximadamente el 87% del total de presiones presenta un valor positivo que se corresponde con la fase positiva de la curva de impulso de presión. El valor negativo se corresponde con los impulsos negativos de las oscilaciones de la onda de presión.

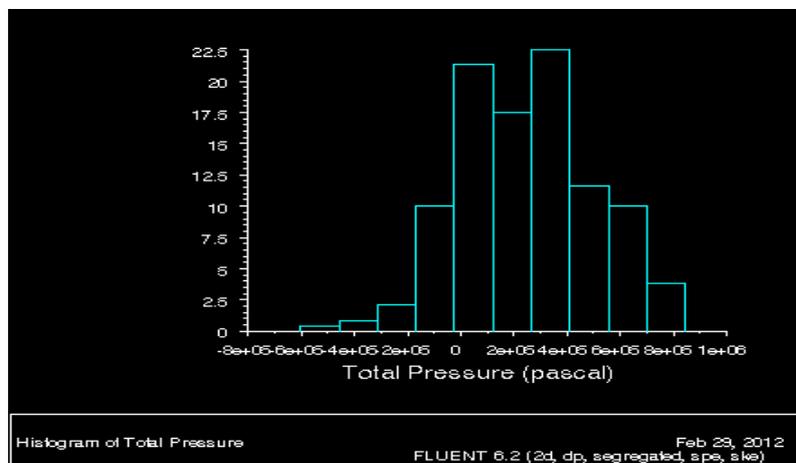


Figura 8.90. Histograma de Presión Total en (Pa)

La figura 8.91 representa la curva de presión dinámica en Pascales sobre el techo de la cámara. En esta figura podemos observar como el valor máximo ($3,4 \times 10^5$ Pa), se obtiene aproximadamente en el centro geométrico de la cámara de secado, en la zona donde se encuentra ubicado el atomizador y como la presión disminuye a medida que nos alejamos del centro. Como conclusión importante tenemos que el alivio de sobrepresiones (venteo) en la parte superior de la cámara de secado no es adecuado. Este es uno de los motivos principales por los cuales este tipo de instalaciones no los presentan en el techo



sino en los laterales. El venteo sería más efectivo justo en el centro, donde se ubica el elemento más importante de la cámara de secado que es el atomizador, lo cual no es factible.

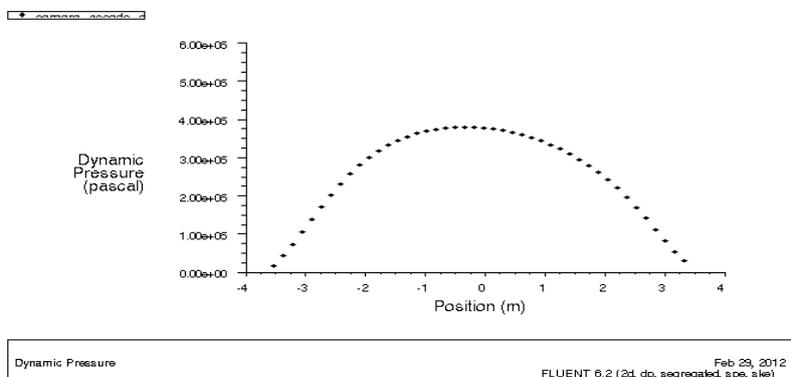


Figura 8.91. Curva de Presión Dinámica en (Pa) sobre el techo de la cámara

Por ello, la ubicación del venteo lateral en este tipo de equipos tiene como objetivo principal el aliviar las sobrepresiones y el proteger el conjunto del equipo atomizador con el caracol (la parte más costosa de la cámara de secado).

Las figuras 8.92 y 8.93 representan los valores de evolución de las ondas de presión dinámica a lo largo del pasillo de la puerta de alivio de presión. Como podemos observar se aprecia un impulso de presión motivado por el rápido crecimiento de la presión hasta alcanzar el valor pico que se corresponde con la presión máxima. Cuando se produce la liberación de los gases a través del venteo la presión comienza a descender (figura 8.93).

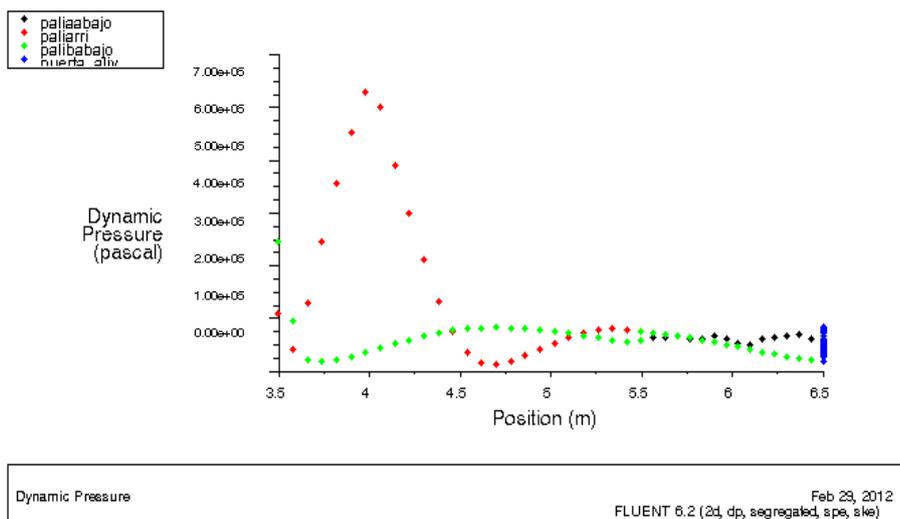


Figura 8.92. Curvas de Presión Dinámica en (Pa) a lo largo del pasillo de alivio de presión

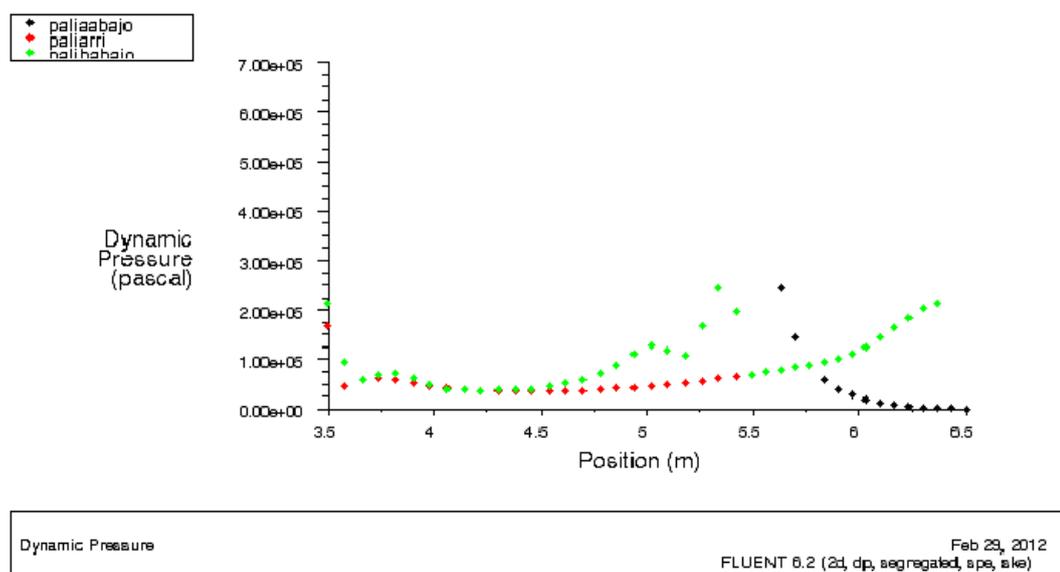


Figura 8.93. Curvas de Presión Dinámica en (Pa) a lo largo del pasillo de alivio de presión

En la figura siguiente (figura 8.94) se muestran los contornos de presión total en Pa en el momento inicial de producirse la explosión. Las curvas de presión se comportan a modo de isobaras y tienden a distribuirse por la totalidad del recinto alcanzado el conductor de aspiración al ciclón grande y el vibro. Es decir, la explosión se propagará por el conjunto de la instalación de la torre de secado afectando al vibro (figura 8. 95 y 8.96).

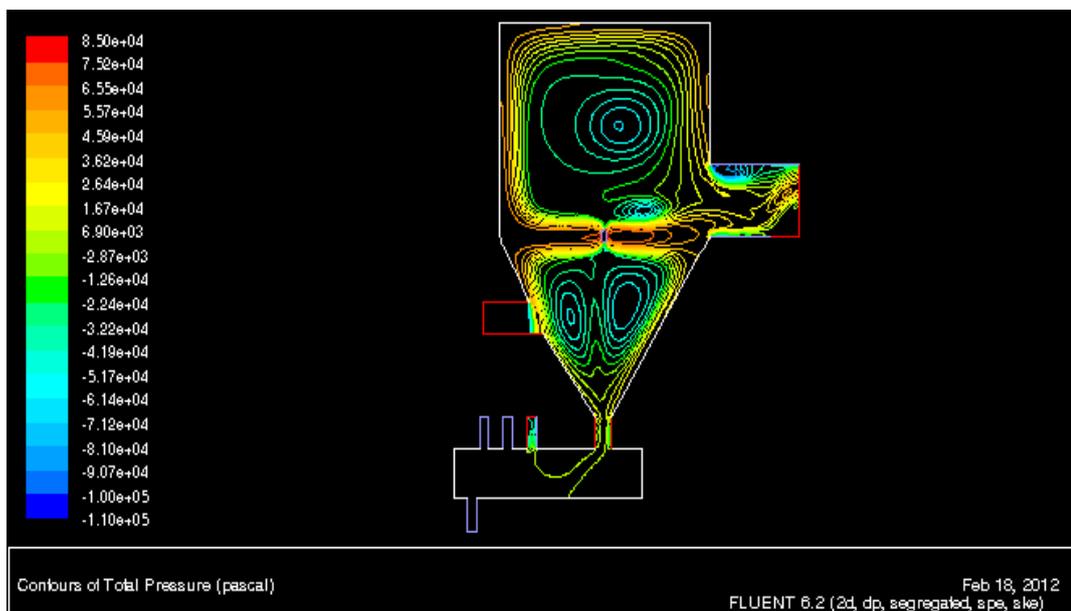
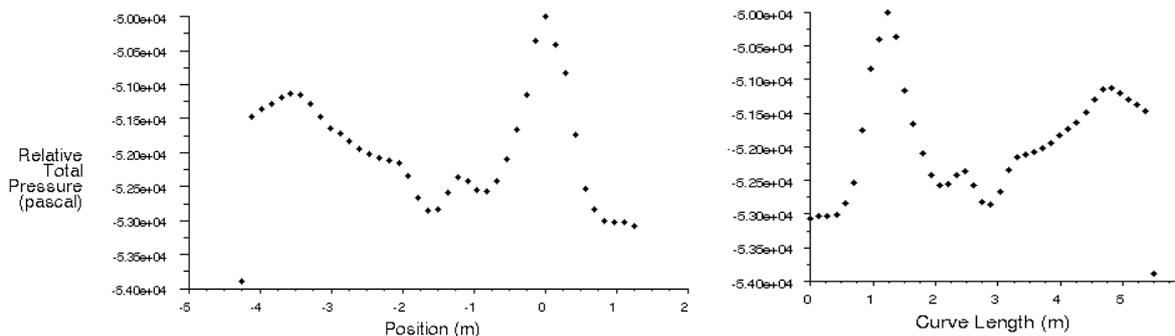


Figura 8.94. Contorno de Presión total (Pa) en el interior de la cámara de secado



Relative Total Pressure Feb 29, 2012
 FLUENT 6.2 (2d, dp, segregated, spe, ske)

Figuras 8.95 y 8.96. Curvas de Presión total relativa en (Pa) en el interior del vibrofluidificador

Previamente a que la puerta de alivio de presión se abra, en el interior de la cámara de secado donde se está desarrollando la explosión equivale a un recinto que contiene un fluido a muy alta presión. Cuando la puerta se abre (rotura de los fusibles tarados), existe una diferencia de presiones; la presión interior de la cámara de secado y la exterior del ambiente, que obliga al fluido a salir de la cámara liberándose la energía almacenada en forma de ondas de presión que ponen en movimiento el fluido (y cualquier elemento que se pueda desprender, propulsándolos como un proyectil). A la par de que se produce el venteo, interiormente se sigue desarrollando la combustión interna, existiendo por lo tanto dos procesos que compiten entre sí: la combustión de la nube de leche en polvo que sigue generando calor e incrementando la temperatura, y el flujo de gases hacia el exterior, que reduce lógicamente la presión. Es por este motivo, que sí la combustión sigue generando suficiente energía, es posible pues, que una vez la puerta de alivio de presión se ha abierto, la presión puede volver a aumentar.

En el exterior de la cámara de secado venteada se produce un incremento de presión, que se va disipando con la distancia, si en los gases expulsados hay todavía combustible no quemado se producirá una explosión externa cuando la llama alcanza a éste. Este proceso conlleva a que la presión máxima exterior no se alcanza justo en el punto más cercano del venteo, sino a una cierta distancia, según se contempla en la metodología de cálculo para presiones externas a los venteos de la norma europea EN 14491 (2006) como vamos a ver en el punto siguiente.

La figura siguiente (figura 8.97) muestra el proceso de propagación de la explosión desde el cono de la cámara de secado, también en este caso podemos apreciar como las ondas de presión van a tomar caminos supletorios además del venteo.

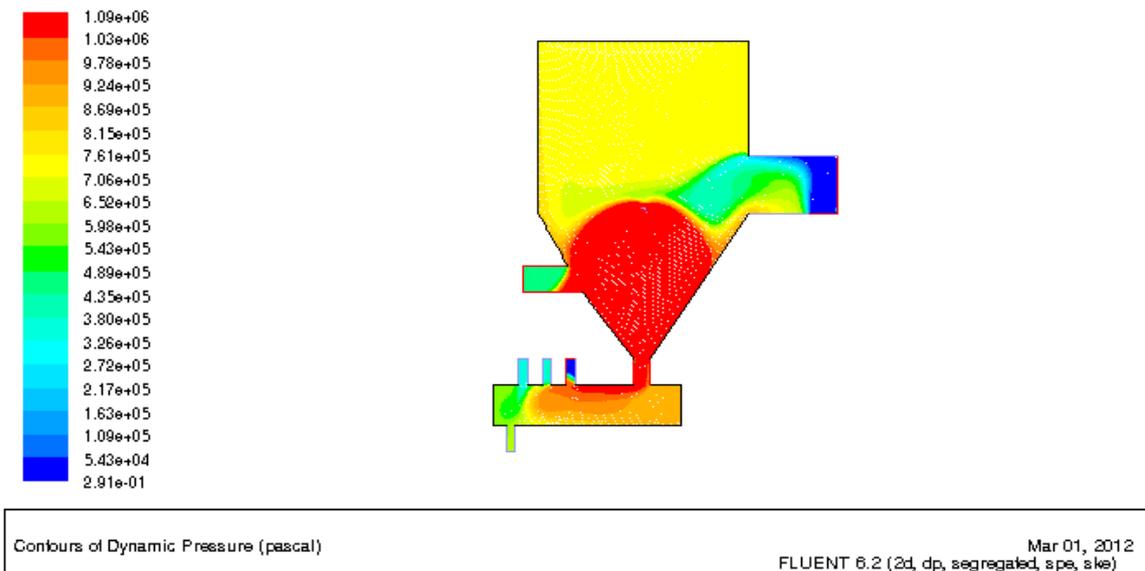


Figura 8.97. Contornos de Presión dinámica en (Pa) para una explosión generada en el cono de la cámara de secado

Los incendios y explosiones durante el proceso de atomización no son imposibles y de hecho se producen “incidentes” con relativa frecuencia. Como ya habíamos comentado tanto la nube y/o la capa de leche/suero son combustibles y en nube además explosivo. Una de las condiciones de contorno establecidas para realizar las simulaciones es la de la temperatura de aspiración del conducto al ciclón grande desde el interior de la cámara. Esta temperatura además de ser facilitada en display por sensores se ha podido medir utilizando la cámara termográfica como puede verse en la fotografía 8.82.

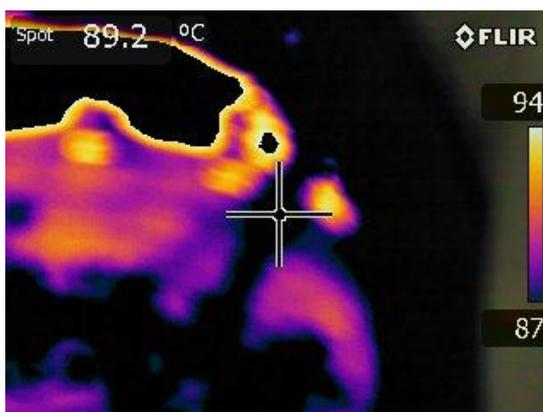


Foto 8.82 Imagen termográfica del conducto de aspiración al ciclón grande



Foto 8.83. Conducto de aspiración

La fotografía 8.83 se corresponde con el conducto de aspiración que va del interior de la cámara de secado al ciclón grande. Esta fotografía fue tomada en los primeros minutos después del lavado de la torre de leche en polvo en el inicio de la atomización. La



existencia de esta zona quemada constituye un riesgo y viene a confirmar que los procesos de combustión son posibles.

Otra de las posibles situaciones de riesgo que nos podemos encontrar es el atasco de la cámara de secado (fotos 8.84, 8.85 y 8.86) lo que provocaría un aumento interno de la presión con las consiguientes consecuencias.



Fotos 8.84, 8.85 y 8.86. Cámara y vibro atascado

8.3.6.3. Determinación del área de venteo necesaria para el alivio de presión en la cámara de secado

Teniendo en cuenta los trabajos realizados por Tascon, A. y Aguado, P., vamos a determinar las diferentes áreas de venteo para la cámara de secado (considerándolo como un único elemento aislado) de la empresa Euroserum Ibérica, S.L., y en base a:

- Tres productos de posible elaboración como son: suero en polvo, leche en polvo con 35% de materia grasa y leche entera. Cada uno de ellos con una K_{St} y $P_{máx}$ diferentes.
- Diferentes valores del parámetro de presión reducida P_{red} e índice de venteo L/D.
- Las diferentes consideraciones tanto de la norma americana NFPA 68 "Guide for Venting of Deflagrations" como de la norma europea EN 14491 (2006) "Sistemas de protección por venteo de explosiones de polvo".

Como hemos visto a través de los resultados presentados en el punto anterior, la puerta de alivio de presión de la cámara no presenta suficiente superficie de venteo para aliviar las sobrepresiones internas que se generarían por explosión. Esto se produce en parte por dos razones:

- a) La primera de las razones viene motivada por la escasez de normativa de aplicación con relación a las atmósferas explosivas en el momento de instalación de la cámara de secado. La ídem se compró de segunda mano a



una empresa francesa y se montó en el año 1996 en la fábrica (en esas fechas no existía normativa ATEX derivada de directiva europea y las referencias legislativas estaban basadas exclusivamente en la norma americana NFPA 68 “Guide for venting of deflagrations” National Fire Protection Association, Quincy, Massachusets (1994) y la norma alemana VDI 3673 “Pressure release of dust explosions”, Verein Deutscher Ingenieriu, 1994 Edition). Originalmente la cámara presentaba dos venteos (de muy dudoso diseño) tipo puerta de alivio en su parte superior próximos al caracol que contiene el atomizador, posteriormente este sistema de venteo se cambió por la puerta lateral que actualmente posee.

- b) La segunda razón la constituye el aumento en un metro en altura de la geometría del cilindro (aumentando la correspondiente relación longitud/diámetro -L/D) de la cámara en el momento de montaje, modificando las condiciones de operación y de seguridad (la puerta instalada estaba diseñada para un aliviar un volumen determinado).

Se desconoce con exactitud el año de fabricación de la cámara de secado aunque se estima que fue entre 1978 y 1981 y teniendo en cuenta que la norma alemana VDI 3673 “Pressure venting of dust explosions” hizo su aparición en 1979, no parece que el fabricante hubiera tenido en cuenta sus recomendaciones. Posteriormente, la norma alemana fue asumida por la norma americana NFPA 68 en su versión de 1988 para paulatinamente sufrir modificaciones y mejoras (se añadieron resultados de ensayos y evidencias, etc.), hasta llegar a la última versión del año 2002. Actualmente, esta norma está derogada ya que ha sido publicada la norma europea EN 14491 que asume la misma fórmula de cálculo de venteos (a excepción de las relaciones longitud/diámetro (L/D) para recintos de sección no circular.

Veamos que es un sistema de venteo y los diferentes parámetros de las explosiones.

8.3.6.3.1. Sistemas de venteo

La protección más habitual de un silo es el venteo de explosiones ya sean paneles o puertas de venteo. Estos elementos tienen como objetivo el aliviar las sobrepresiones internas que se puedan producir. Cuando se produce la apertura del dispositivo de venteo, al exterior sale tanto material quemado como no quemado. Así, la mayor parte de la explosión tiene lugar en un área abierta (aunque a veces no por ello segura) y no en el interior del equipo donde se ha iniciado.



El sistema de venteo es un método de protección basado en la apertura de unos paramentos débiles en las paredes o techo del volumen a proteger, de tal forma que al alcanzar un valor de presión de apertura fijada (P_{stat}) se abre disipando al exterior la explosión. Las sobrepresiones residuales que se alcanzasen el interior del recinto debido a la explosión son denominadas presión reducida de explosión (P_{red}). Una explosión que tenga lugar en un recipiente cerrado se desarrolla conforme a la curva (a) de la figura 8.98. En ausencia de venteo, la presión alcanza un valor máximo ($P_{máx}$) que puede ser igual o mayor de 10 bar. Esta presión suele ser superior a la que pueden soportar la mayoría de las instalaciones. Cuando se abre el venteo (si es que se han instalado), la presión máxima queda reducida a un valor inferior llamado presión reducida de explosión (P_{red}). La línea discontinua de la gráfica representa la resistencia del recipiente.

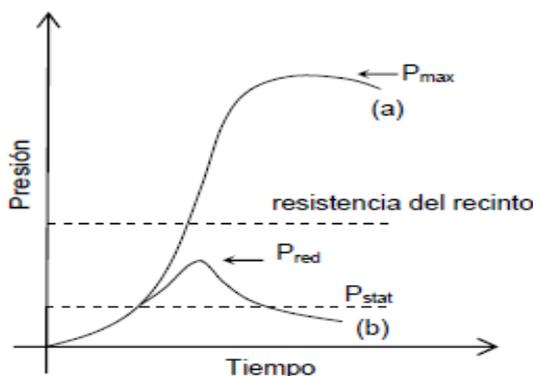


Figura 8.98. Presiones en el interior de un recinto: presión máxima ($P_{máx}$), presión reducida de explosión debida a venteos (P_{red}) y presión de activación del venteo (P_{stat}). Barton (2002)

Es importante diseñar correctamente los venteos de tal manera que los valores de P_{red} alcanzados no superen la resistencia del recipiente ya que se podrían producir deformaciones y daños de consideración. Lógicamente a mayor área de venteo menor P_{red} .

La norma europea EN 14491 (2006) establece las siguientes definiciones para las tres presiones implicadas son:

- Presión de activación estática o presión de apertura del venteo (P_{stat}): es la sobrepresión que consigue activar un elemento de venteo cuando se aplica un aumento de presión lentamente (≤ 0.1 bar/min).
- Presión reducida de explosión (P_{red}): valor máximo de sobrepresión generado por la explosión de una atmósfera explosiva en un recipiente, protegido por un dispositivo de alivio de presión (venteo) o de supresión de la explosión.



- Presión máxima de explosión ($P_{m\acute{a}x}$): máxima sobrepresión producida en un recipiente cerrado durante la explosión de una atmósfera explosiva y determinada en condiciones específicas de ensayo.

8.3.6.3.2. Dispositivos de venteo

Conforme a con la norma UNE-EN 14797 (2007) *Dispositivos de venteo de explosiones* se muestran en la tabla 8.17. los diversos tipos de dispositivos de venteo de la explosión.

Dispositivos de venteo con elementos reutilizables	Dispositivos que requieren su recolocación manual o sustitución del elementos de retención
	Dispositivos que vuelven a cerrarse automáticamente
Dispositivos de venteo sin llama	
Dispositivos de venteo con elementos no reutilizables	

Tabla 8.17. Sistemas (tipos) de venteo de explosiones

Los dispositivos de venteo más utilizados actualmente son las puertas de explosión (foto 8.87) y los paneles de venteo (figura 8.99).



Foto 8.87. Puerta de explosión **Figura 8.99.** Panel venteo BRS (Adix)

Los paneles de venteo si son de forma circular se conocen como discos de ruptura (figura 8.100 y fotos 8.88 y 8.89).



Figura 8.100 y fotos 8.88 y 8.89. Paneles de venteo circulares (Adix y Fike Ibérica)



Las puertas de explosión son elementos reutilizables que pueden volver a cerrarse de forma automática después de haber venteado (no obstante, en nuestro caso esta posibilidad no existe al disponer de fusibles de ruptura). Presentan el inconveniente de tener mayor masa por unidad de superficie. Asimismo, en algunos casos precisan rompedores de vacío, a fin de evitar que aparezcan presiones negativas en el interior del recipiente debido al enfriamiento de los gases allí contenidos una vez que la puerta ha vuelto a cerrarse y como es lógico precisan mantenimiento.

La ventaja de este sistema de venteo es que son reutilizables, permitiendo fijar de forma precisa la presión de apertura; además si la puerta vuelve a cerrarse después del venteo ésta evita la salida de más material combustible así como la entrada de oxígeno al interior del recinto.

Los paneles de venteo contra explosiones son membranas con una baja presión de estallido, que se encuentran dispuestas en láminas normalmente de acero inoxidable (aunque pueden utilizarse otros materiales como polímeros, aluminio, etc.) combinadas con otras capas de plástico conformando el panel. Existen paneles de venteo fabricados en cerámica o uretano que proporcionan aislamiento térmico evitando pérdidas de calor. Los paneles suelen presentar protección frente a las inclemencias meteorológicas y condiciones higiénicas para su uso en diferentes aplicaciones: alimentaria, sanitaria, etc., son fáciles de instalar y precisan poco mantenimiento.

La Directiva comunitaria ATEX 94/9/EC (1994) obliga a que estos sistemas de protección cumplan con unos requerimientos mínimos de seguridad, deben estar marcados (CE) y certificados.

No obstante, anteriormente a esta directiva la legislación relativa a estos sistemas era prácticamente nula y muchos de los sistemas de venteo se diseñaban y fabricaban *in situ*. Este hecho constituye una grave inconveniente, ya que por ejemplo la mayor parte de las cámaras de secado instaladas en España son anteriores a la directiva (es frecuente encontrarse con cámaras de secado fabricadas en la década de los 70 y de los 80, o incluso antes), con sistemas de alivio de presión dimensionados y diseñados de forma dudosa.



En el proceso de alivio de presión para un sistema de venteo influyen:

a) Presión de apertura:

La presión de estallido o *presión de activación estática* (P_{stat}) es la sobrepresión que consigue activar el venteo cuando se aplica un aumento de presión lentamente es decir, de forma estática. Si el incremento de presión fuera dinámico, caso de una explosión, la presión de activación podría ser más alta; este efecto ya está incorporado en las fórmulas de cálculo de las normas de venteo.

b) Masa por unidad de área (masa específica):

Para minimizar la inercia del dispositivo de venteo y así reducir el tiempo de apertura total del dispositivo debe ser lo más pequeña posible. Si es de un valor elevado puede afectar al desarrollo del venteo.

Actualmente las normas de venteo contemplan distintas correcciones para dispositivos de mayor masa específica.

c) Eficiencia:

La eficiencia de venteo se determina mediante ensayo, comparando los resultados del dispositivo en cuestión y los resultados de ensayo usando un dispositivo equivalente (igual área geométrica, forma y presión de activación estática) con masa específica $\leq 0.5 \text{ kg/m}^2$ y es la relación entre el área efectiva de venteo y el área geométrica real de la abertura.

La masa y el diseño del dispositivo de venteo (goznes, bisagras, muelles, etc.) pueden influir en su eficiencia. La eficiencia del 100% se asigna a paneles y discos de ruptura, usados de forma habitual en los ensayos de explosión los cuales son tomados como referencia para las normas de cálculo.

8.3.6.3.3. Normas para el dimensionamiento de venteos de explosión.

Describimos a continuación los métodos de cálculo correspondientes a la norma europea EN 14491 (2006) y la norma americana NFPA 68 (2007). Ambas son las normas de uso más extendido para el dimensionamiento de venteos en todo el mundo, pero como veremos con diferencias importantes.



a) Norma europea EN 14491

Esta norma forma parte de una serie que incluye la UNE-EN 14460 (2006) *Equipos resistentes a las explosiones*, la UNE-EN 14797 (2007): *Dispositivos de venteo de explosiones* y la UNE-EN 15089: *Sistemas de aislamiento de explosión* para evitar la transferencia de explosiones a otros equipos comunicados entre sí. Estas tres normas juntas en “teoría” cubren todos los aspectos sobre el venteo de explosiones de polvo.

La norma europea EN 14491 (2006): *Dust explosion venting protective systems* abarca el dimensionamiento del venteo de recipientes y edificios, efectos de llama y de presión fuera del recipiente venteado, fuerzas de retroceso y la influencia de los conductos de venteo y por lo tanto especifica los requisitos básicos de diseño para la selección de los sistemas de protección por venteo de explosiones de polvo.

La norma deja fuera de su ámbito de aplicación los incendios, las detonaciones y las reacciones químicas exotérmicas fuera de control (explosiones *runaway*).

La estructura de la norma europea EN 14491 se fundamenta en la norma alemana VDI 3673 (2002), ambas utilizan la misma fórmula para el cálculo de los venteos en recipientes aislados observándose algunos matices en el ámbito de aplicación. Sin embargo como ya indicó Tascón, A (2010) la norma europea expresa que la fórmula de cálculo está diseñada para el caso de un “recipiente completamente lleno de una nube de polvo turbulenta de concentración óptima de polvo”.

El enfoque flexible de la norma EN 14491 permite la utilización de áreas de venteo distintas de las obtenidas usando la fórmula general propuesta y teniendo en cuenta las condiciones reales del equipo que se quiere proteger, no obstante esto obliga a tener datos de ensayos en equipos reales lo cual no es fácil habida cuenta del coste económico de los mismos. Así, la norma aclara de forma fehaciente en su punto 5.3. lo siguiente:

“En condiciones de turbulencia moderada y baja, y en las condiciones donde lo habitual son las mezclas no homogéneas de combustible-aire o de bajas concentraciones de polvo, la norma europea sobrevalora el peligro de explosión. En dichas circunstancias, puede utilizarse un área de venteo reducida, pero debe basarse en datos experimentales o publicados obtenidos de pruebas de venteo de explosión representativas.”



En el mismo punto se contempla también las situaciones siguientes:

“En condiciones de turbulencia particularmente severa (por ejemplo recipientes con turbulencias inducidas por obstrucciones) existe la posibilidad de que la intensidad de la explosión sea infravalorada.”

“...En dichas circunstancias específicas el incremento de área de venteo debe basarse en datos publicados o experimentales que han sido obtenidos en pruebas de venteo de explosión representativas.”

Estos párrafos extraídos de la norma vienen a confirmar que tanto la intensidad de turbulencia como la concentración de polvo en el interior del equipo presentan gran influencia en el desarrollo de las explosiones. Así, los experimentos realizados en el silo noruego de 500 m³ en Noruega (año 1984) para explosiones venteadas y de tipo “*turbulent jet*” (alta turbulencia generada por inyección de polvo prolongada y mantenidas aún cuando se produce la ignición) han demostrado que incluso aplicando las recomendaciones más conservadoras de las normas no constituirían el caso más desfavorable.

Para recipientes aislados (aquellos donde se han tomado las medidas apropiadas de aislamiento de explosión para prevenir la propagación de la llama entre recipientes) la fórmula de cálculo general propuesta por la norma EN 14491 es:

- Para sobrepresión de $0.1 \leq P_{red} < 1.5$ bar

$$A = B \left(1 + C \cdot \log \left(\frac{L}{D} \right) \right) \quad (\text{Ec.8 – 41})$$

- Para sobrepresión de $1.5 \leq P_{red} \leq 2.0$ bar

$$A=B$$

$$B = \left\{ 3.264 \cdot 10^{-5} \cdot P_{m\acute{a}x} \cdot K_{st} \cdot P_{red}^{-0,569} + 0.27(P_{sat} - 0.1) \cdot P_{red}^{-0,5} \right\} \cdot V^{0.753} \quad (\text{Ec.8 – 42})$$

$$C = (-4.305 \cdot \log P_{red} + 0,758) \quad (\text{Ec.8 – 43})$$

donde: A es el área geométrica de venteo (m²), P_{stat} la presión de activación estática o de estallido (bar), $P_{m\acute{a}x}$ la presión máxima de explosión (bar), P_{red} la presión reducida de explosión (bar), K_{St} la constante de explosión del polvo (bar.m/s), V el volumen del



recipiente (m^3), L/D es la relación entre longitud y diámetro del recipiente y no tiene dimensiones.

El área de venteo total que se debe instalar (A'), deberá tener en cuenta la eficiencia (E_f) del dispositivo de venteo en caso de que sea inferior a 1:

$$A' = \frac{A}{E_f} \quad (\text{Ec.8 - 44})$$

La norma EN 14491 en su Anexo A presenta ejemplos de cálculo de la relación L/D para varias geometrías y disposiciones de los venteos. L es la máxima dimensión del recipiente (longitud, altura), aunque en un sentido más estricto, L se corresponde con la longitud que va a recorrer la explosión desde el punto de ignición más alejado posible hasta los venteos. En silos planos si los paneles de venteo se ubican en el techo (ya que los paneles deben de estar por encima del nivel máximo de material) la longitud L es la altura de silo.

En la tabla siguiente (tabla 8.18) se muestran los límites de validez de las fórmulas de cálculo de la norma EN 14491.

Parámetro	EN 14491
Volumen del recipiente	$0,1 \leq V \leq 1000 \text{ m}^3$
Presión de activación estática del dispositivo de venteo (P_{stat})	$0,1 \leq P_{\text{stat}} \leq 1 \text{ bar}$ para $P_{\text{stat}} < 0,1$, usar $P_{\text{stat}} = 1 \text{ bar}$
Presión reducida de explosión (P_{red})	$P_{\text{stat}} \leq P_{\text{red}} \leq 2 \text{ bar}$, se recomienda $P_{\text{red}} \geq 0,12 \text{ bar}$
Presión máxima de explosión (P_{max})	$5 \leq P_{\text{max}} \leq 10 \text{ bar}$ para valores de K_{st} de $10 \text{ bar ms}^{-1} \leq K_{\text{st}} \leq 300 \text{ bar ms}^{-1}$ $5 \leq P_{\text{max}} \leq 12 \text{ bar}$ para valores de K_{st} de $300 \text{ bar ms}^{-1} \leq K_{\text{st}} \leq 800 \text{ bar ms}^{-1}$
Relación longitud/diámetro (L/D)	$1 \leq L/D \leq 20$
Turbulencia	
Condiciones atmosféricas	Presión atmosférica entre 80 y 110 Kpa, temperatura entre -20°C y 60°C , humedad relativa entre 5% y 85% en volumen contenido de oxígeno $20,9 \pm 0,2\%$ en volumen
Otras condiciones	Sin conductos de venteo, eficiencia de venteo=1 (dispositivos sin inercia) recipiente aislado

Tabla 8.18. Rangos de validez de la fórmula propuesta en la norma EN 14491

b) Norma americana NFPA 68

La norma NFPA 68 engloba tanto el venteo de explosiones de polvo como el de explosiones de gas, lo cual constituye una diferencia con las normas europeas, en las cuales se ha optado por separar explosiones de polvo y de gas. La edición de la norma utilizada en esta tesis es la 2007 y presenta modificaciones respecto a la anterior del año



2002: cambia de *guide* a *standard*, modifica las fórmulas de cálculo para las áreas de venteo, las correcciones para venteos de baja y alta inercia, el volumen parcial de la nube de polvo, conductos de venteo y la presión inicial elevada.

El cumplimiento de los estándares de la norma NFPA 68 se articula en base a las dos configuraciones de diseño siguientes:

- a) **diseño prescriptivo** (*prescriptive-based design*), diseño basado en el cumplimiento estricto de los requisitos de la norma) o
- b) **diseño prestacional** (*performance-based design*), diseño basado en satisfacer de forma analítica y técnicamente justificada los niveles de seguridad exigidos por la norma).

Este último es mucho más restrictivo y sólo puede ser realizado por personal con la cualificación establecida por la autoridad correspondiente, partiendo de un análisis de riesgos. La metodología empleada en el diseño y los datos obtenidos deben ser documentados y mantenidos durante toda la vida del equipo protegido.

Ambos estándares deben asegurar tanto la seguridad para las personas como para la propiedad. Así, el diseño debe limitar los daños al recinto venteado, debe evitarse la ignición a propiedades adyacentes, debe evitarse daño por la onda expansiva, daños por proyectiles, etc.

La norma establece dos tipos de fórmulas a utilizar en función de la relación L/D. Así tenemos dos posibilidades:

- Para $L/D \leq 2$

$$A_v = A_{v0} = 1 \cdot 10^{-4} \left(1 + 1.54 \cdot P_{stat}^{4/3}\right) \cdot K_{st} \cdot V^{3/4} \cdot \sqrt{\frac{P_{m\acute{a}x}}{P_{red}} - 1} \quad (\text{Ec.8 - 45})$$

- Para $2 < L/D \leq 8$

$$A_v = A_{v1} = A_{v0} \left[1 + 0.6 \cdot \left(\frac{L}{D} - 2\right)^{0.75} \cdot \exp(-0.95 \cdot P_{red}^2) \right] \quad (\text{Ec.8 - 46})$$

donde: A_v el área de venteo (m^2), A_{v0} es el área de venteo mínima cuando no hay que aplicar corrección por esbeltez (m^2), A_{v1} es el área de venteo corregida cuando la esbeltez es $L/D > 2$ (m^2), V el volumen del recipiente (m^3), $P_{m\acute{a}x}$ la presión máxima de



explosión (bar), P_{red} la presión reducida de explosión (bar), L/D es la relación entre longitud y diámetro del recipiente (adimensional), P_{stat} la presión de activación estática (bar), K_{St} la constante de explosión del polvo (bar.m/s) el valor de presión de activación estática (P_{stat}) a considerar en los cálculos es el valor nominal.

La superficie obtenida A_{v0} debe ser posteriormente corregido obteniéndose sucesivas áreas de venteo, A_{vi} en los siguientes supuestos:

- Incremento del área calculada cuando la relación longitud/diámetro > 2 - A_{v1} -.
- Incremento del área en caso de alta turbulencia (velocidad del aire dentro del equipo > 20 m/s) o venteo de edificios (se supone que las explosiones en edificios son en muchos casos secundarias, con turbulencia alta) - A_{v2} -.
- Se incrementa el área en el caso de venteos con inercia (si $M_T \leq$ masa del panel de venteo ≤ 40 kg/m²). M_T es el umbral límite de masa específica y se calcula a 40 kg/m².

$$M_T = \left[6,67 \cdot P_{red}^{0,2} \cdot n^{0,3} \cdot \left(\frac{V}{K_{St}^{0,5}} \right) \right]^{1,67} \quad (\text{Ec.8 - 47})$$

Si las masas son superiores a 40 kg/m² debe utilizarse el método contemplado en el Anexo G de la norma obteniéndose un área A_{v3} .

- Se reduce el área de venteo cuando el máximo tamaño de la nube de polvo dentro del recinto, para el peor escenario posible, esté limitada por diseño o por medidas de limpieza. Para silos la norma establece que se utilizará el volumen total - A_{v4} -.

Si se van a instalar conductos de venteo, se incrementa el área (A_{vf}).

Debemos recordar que la explosión tiene lugar aunque se instalen sistemas de venteo. El venteo no es un método de prevención, es decir, la explosión no es evitada. Por tanto, se desarrolla una sobrepresión interna, llamada presión reducida (P_{red}), que actuará sobre todos los elementos del recinto dentro del cual se desencadene el proceso.

En la tabla siguiente (tabla 8.19) se recogen los rangos de validez de las fórmulas de calculo contempladas en la NFPA 86.



Parámetro	EN 14491
Volumen del recipiente (V)	$0,1 \leq V \leq 10000 \text{ m}^3$
Presión de activación estática del dispositivo de venteo (P_{stat})	$P_{\text{stat}} \leq 0,75 \text{ bar}$
Presión reducida de explosión (P_{red})	
Presión máxima de explosión (P_{max})	$5 \leq P_{\text{máx}} \leq 12 \text{ bar}$ para valores de Kst de $10 \text{ bar ms}^{-1} \leq K_{\text{st}} \leq 800 \text{ bar ms}^{-1}$
Relación longitud/diámetro (L/D)	$L/D \leq 8$ (para silos con alimentación en la parte superior) Área de venteo \leq área de la sección transversal del equipo
Turbulencia	Velocidad axial media y velocidad tangencial media del aire $< 20 \text{ m/s}$
Condiciones atmosféricas	Presión inicial de 1 bar absoluto $\pm 0,2 \text{ bar}$
Otras condiciones	Sin condiciones de venteo Inercia del panel $\leq 40 \text{ Kg/m}^2$ (y $\leq M_T$ or masa límite calculada según ecuación 8.2.7.2. NFPA 68) Recipiente aislado

Tabla 8.19. Límites de validez de la fórmula propuesta en la norma NFPA 86

8.3.6.3.4. Consideraciones de los parámetros de las explosiones y efectos sobre los venteos

Cuando se produce una explosión venteadada aparecen efectos secundarios tanto en la geometría donde se ha producido la explosión como fuera de la misma. Algunos de estos efectos son tan peligrosos como la propia explosión y deben de ser tenidos en cuenta. Así tenemos:

- **Efectos de llama:** las llamas se propagan a través de los venteos y posibles canalizaciones desencadenando incendios y nuevas explosiones, pueden alcanzar valores de longitud de más de 50 metros. Para estimar la longitud de la llama externa al venteo se utilizan las ecuaciones:

$$L_F = 10 \cdot V^{0,33} \quad [\text{venteos descargahorizontal}] \quad (\text{Ec.8 – 48})$$

$$L_F = 8 \cdot V^{0,33} \quad [\text{venteos descargavertical}] \quad (\text{Ec.8 – 49})$$

donde:

- L_F es la longitud de la llama en metros (m).
- V_F es el volumen del recipiente en metros cúbicos (m^3).



Estas ecuaciones son válidas para los límites contemplados en la tabla siguiente (tabla 8.20).

Parámetro	EN 14491
Volumen del recipiente	$0,1 \leq V \leq 1000 \text{ m}^3$
Presión de activación estática del dispositivo de venteo (P_{stat})	$0,1 \leq P_{stat} \leq 1 \text{ bar}$
Sobrepresión máxima reducida de explosión ($P_{red,m\acute{a}x}$)	$0,1 \leq P_{red,m\acute{a}x} \leq 2 \text{ bar}$
Presión máxima de explosión ($P_{m\acute{a}x}$)	$5 \text{ bar} \leq P_{m\acute{a}x} \leq 10 \text{ bar}$
Relación longitud/diámetro (L/D)	$L/D < 2$
Valor de K_{St}	$10 \text{ bar ms}^{-1} \leq K_{St} \leq 300 \text{ bar ms}^{-1}$
Relación longitud/diámetro (L/D)	$L/D < 2$

Tabla 8.20. Límites de validez de las fórmulas (Ec. 8.48 y 8.49)

En la práctica la longitud de la llama no es esperable que exceda de los 60 metros, incluso para volúmenes grandes, y esta longitud debe ser considerada como el límite superior de toda estimación de L_F .

Para polvos con valores de $K_{St} \leq 200 \text{ bar ms}^{-1}$ como los que nos ocupan, una estimación de la anchura de la llama tanto para el venteo vertical como el horizontal viene dada por:

$$w_F \approx 1,3 \cdot [10V]^{0,33} \quad (\text{Ec.8-50})$$

donde:

- W_F es el ancho de la llama, en metros (m).
- V es el volumen del recipiente en metros cúbicos (m^3).

- **Efectos de presión:** del venteo de una explosión dentro de una planta y de la explosión de la nube de polvo en el área exterior al venteo pueden surgir efectos exteriores de presión y de explosión.

Para determinar el pico de presión máximo externo al venteo de la inflamación de mezclas polvo/aire en un recipiente compacto puede utilizarse la expresión.

$$P_{ext} = 0,2 \times P_{red,m\acute{a}x} \times A^{0,1} \times V^{0,18} \quad (\text{Ec.8-51})$$

donde:

- P_{ext} , es la sobrepresión máxima externa, en bar (bar).
- $P_{red,m\acute{a}x}$, es la sobrepresión máxima reducida de explosión en bar.
- A es el área de venteo geométrica, en m^2 .
- V es el volumen del recipiente en m^3 .



La sobrepresión máxima externa P_{ext} puede esperarse a una distancia

$$R_s = 0,25 \times L_F \quad (\text{Ec.8} - 52)$$

donde:

- L_F es la longitud de la llama en metros calculada según (Ec. 8.48 y Ec. 8-49)
- A mayores distancias r ($r > R_s$) del venteo, la presión externa p_R decrece según:

$$p_R = \frac{1,24 \cdot \left[\frac{1,13 \cdot A^{0,5}}{r} \right]^{1,35}}{\left[1 + \left(\frac{\alpha}{56} \right)^2 \right]} \times p_{\text{red,máx}} \quad (\text{Ec.8} - 53)$$

y:

- r es la distancia al área de venteo en m.
- A es área de venteo en m^2

Con:

- $\alpha = 0^\circ$ significa frente al área de venteo.
- $\alpha = 90^\circ$ significa lateral al área de venteo.
- $\alpha = 180^\circ$ significa lateral al área de venteo.

Estas ecuaciones presentan los rangos de validez recogidos en la tabla 8.21.

Parámetro	EN 14491
Volumen del recipiente	$0,1 \leq V \leq 250 \text{ m}^3$
Presión de activación estática del dispositivo de venteo (P_{stat})	$P_{\text{stat}} \leq 0,1$
Sobrepresión máxima reducida de explosión ($P_{\text{red,máx}}$)	$0,1 \leq P_{\text{red,máx}} \leq 1 \text{ bar}$
Presión máxima de explosión ($P_{\text{máx}}$)	$P_{\text{máx}} \leq 9 \text{ bar}$
Relación longitud/diámetro (L/D)	$L/D < 2$
Valor de K_{St}	$10 \text{ bar ms}^{-1} \leq K_{St} \leq 300 \text{ bar ms}^{-1}$
Distancia desde el área de venteo	$r > R_s$
P_R	$0,2 \text{ bar} \leq p_R \leq 1,0 \text{ bar}$
α	$0^\circ \text{ a } 180^\circ$
Relación longitud/diámetro (L/D)	$L/D < 2$

Tabla 8.21. Límites de validez de las fórmulas (Ec. 8.51, 8.52 y 8.53)

En un equipo venteado amén de considerar la presión máxima desarrollada en el interior del equipo venteado (P_{red}), debemos tener en cuenta también la curva presión-tiempo (Figura 8.101).

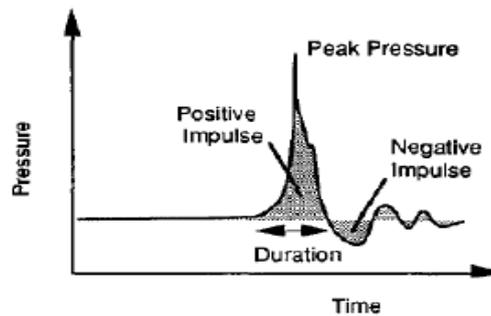


Figura 8.101. Curva de presión-tiempo (Bjerketved et al)

El impulso de presión viene dado por la integral de presión a lo largo del tiempo y caracteriza la curva de presión tiempo. La respuesta dinámica de la estructura va a depender de la presión máxima aplicada, la velocidad de incremento de presión (dP/dt) y la duración de la fase positiva de la curva. No obstante, a veces también es necesario tener en cuenta la fase negativa.

En la figura 8.101 podemos observar que la presión relativa parte del valor cero y, cuando la llama comienza a acelerarse, la presión crece rápidamente hasta alcanzar el pico de la presión máxima. Cuando los gases son liberados a través de las aperturas de venteo, la presión comienza a descender. Como resultado de la propia inercia del venteo de los gases de combustión, la presión puede llegar a descender por debajo de la presión atmosférica (impulso negativo).

Posteriormente la presión vuelve a aumentar y continúa oscilando a lo largo del tiempo (oscilaciones sobre amortiguadas) tendiendo a equilibrarse finalmente con la presión atmosférica.

La carga generada sobre una estructura como resultado de la interacción de ésta con la onda de sobrepresión es debida a dos efectos: la difracción y el desplazamiento. Al entrar en contacto la onda de sobrepresión con el objeto, la energía de la onda se transmite a este último generándose una onda reflejada. Las propiedades mecánicas y geometrías de la estructura expuesta a la explosión van a influir notablemente en la respuesta de ésta a la sobrepresión.

El parámetro utilizado para medir la rapidez de respuesta es el periodo natural de vibración. El daño potencial ocasionado a la estructura va a estar en función de la rapidez con que la estructura responda a la carga dinámica. Así, si la duración del pulso de presión es grande en comparación con el período natural de vibración, la carga puede ser



considerada fundamentalmente estática. Para pulsos de duración inferior al período natural de vibración, el daño que reciba la estructura va a depender del impulso.

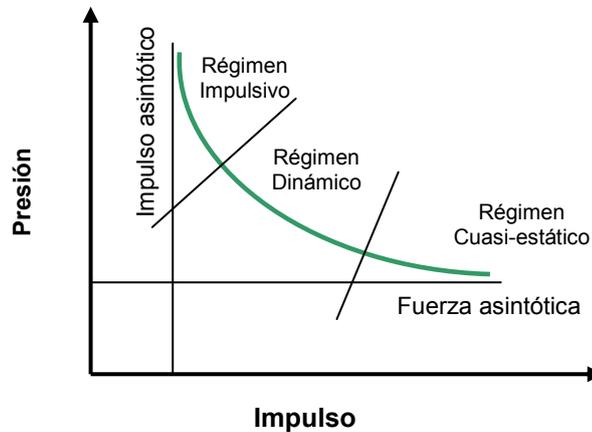


Figura 8.102. Curva presión-impulso

Combinaciones diferentes de impulso y presión pueden ocasionar el mismo nivel de daño en una estructura. La figura 8.102 muestra las diferentes combinaciones de impulso y presión que para una estructura dada producirían el mismo daño sobre la misma.

Las fuerzas de retroceso implicadas en una explosión venteadada y cuya evolución a lo largo del tiempo está relacionada con el flujo de gases al exterior juegan un papel importante a la hora de confeccionar el diseño de protección de silos mediante venteos.

➤ *Fuerzas de retroceso según norma EN 14491*

Se calculan mediante la aplicación de la ecuación:

$$F_{R,max} = 119 \cdot A \cdot P_{red,max} \quad (\text{Ec.8 - 54})$$

donde $F_{R,max}$ es la máxima fuerza de retroceso (kN), 119 es el conocido como coeficiente dinámico, A el área geométrica de venteo (m^2) y P_{red} la presión reducida de explosión (bar).

Este procedimiento de cálculo es similar al utilizado en la norma americana NFPA 68 y considera la fuerza de retroceso aplicada en el centro geométrico del venteo.



La duración de las fuerzas de retroceso se determinan mediante la ecuación:

$$t_R = (10^{-4}) \cdot \frac{K_{St} \cdot V}{A \cdot p_{red,max}} \quad (\text{Ec.8 – 55})$$

donde t_R es la duración del pulso (s), K_{St} la constante de explosión del polvo (bar.m/s), V el volumen del recinto (m^3), A el área geométrica de venteo (m^2) y P_{red} la presión reducida de explosión (bar).

$$F_{Rmax} = 0,52 \cdot 119 \cdot A \cdot P_{red,max} \quad (\text{Ec.8 – 56})$$

El impulso total que experimenta la estructura debido a las fuerzas de retroceso puede aproximarse a un impulso rectangular fuerza-tiempo, cuya altura es F_R y el tiempo es t_R :

$$I_R = F_R \cdot t_R \quad (\text{Ec.8 – 57})$$

siendo I_R el impulso en kN.s.

➤ *Fuerzas de retroceso según norma americana NFPA 68*

La norma NFPA 68 (2007) propone la fórmula siguiente para el cálculo de la fuerza de retroceso:

$$F_{Rmax} = 120 \cdot A_v \cdot P_{red} \quad (\text{Ec.8 – 58})$$

siendo $F_{R,max}$ la máxima fuerza de retroceso (kN), A_v el área calculada de venteo (m^2) y P_{red} la presión reducida de explosión (bar).

Como podemos observar esta fórmula es idéntica a la de la norma EN 14491 (con un *factor de carga dinámica* igual a 120 en vez de 119) y como en ésta, la reacción total se aplicará en el centro geométrico del venteo. A diferencia de la norma europea, aquí se permite explícitamente no calcular las fuerzas de retroceso cuando se presentan simultáneamente las siguientes condiciones:

- Los venteos se sitúan en posiciones opuestas.
- Los venteos son del tipo diafragma de ruptura (paneles y discos de ruptura)
- La presión de estallido $P_{stat} \leq 0.1$ bar
- El área de todos los paneles de venteo es la misma.



La duración de las fuerzas de retroceso se calcula mediante la fórmula:

$$t_R = 4,3 \cdot 10^{-3} \left[\frac{P_{\max}}{P_{\text{red}}} \right]^{0,5} \cdot \left[\frac{V}{A_v} \right] \quad (\text{Ec.8 – 59})$$

siendo t_R la duración del pulso de presión (s), P_{\max} la presión máxima de explosión (bar), P_{red} la presión reducida de explosión (bar), V el volumen del recinto (m^3) y A_v el área requerida de venteo (m^2).

El impulso total que experimenta la estructura durante el venteo se calcula de la misma manera que para la EN 14491

$$F_{R_{\max}} = 0,52 \cdot F_{R_{\max}} \quad (\text{Ec.8 – 60})$$

$$I_R = F_R \cdot t_R \quad (\text{Ec.8 – 61})$$

siendo I_R el impulso en kN.s.

8.3.6.3.5. Resultados del dimensionamiento de venteos de explosión según las normas EN14491 y NFPA 68 para la cámara de secado

A continuación pasamos a analizar las superficies de venteo necesarias para el caso que nos ocupa de la cámara de secado de la empresa EUROSERUM IBÉRICA,S.L. teniendo en cuenta diferentes productos lácteos que se pueden producir y las normas analizadas (NFPA 68 y EN 14491).

En primer lugar representamos el área de venteo en (m^2) en función del parámetro de P_{red} (bar) para los productos de suero en polvo, leche en polvo (35% materia grasa) y leche entera según la norma EN 14491 (figura 8.103). La elección de estos tres productos no se realiza al azar, son productos que actualmente se producen o se han producido en la fábrica y que presentan diferentes peculiaridades. Las características de P_{\max} y K_{St} de estos productos son:

Parámetros	Suero en polvo	Leche en polvo (35% m.g.)	Leche entera
K_{St} bar m/s	41	102	141
P_{\max}	7,4	7,7	7,9

Tabla 8.22. Parámetros K_{St} y P_{\max} para los productos: suero en polvo, leche en polvo (35% m.g. y leche entera)



El área de venteo necesaria según las normas Europea EN 14491 y americana NFPA 68 depende de las características de la explosividad del polvo: la constante de explosividad del polvo (K_{St}) y la presión máxima ($p_{m\acute{a}x}$).

El valor de P_{stat} de activación de la puerta de alivio que vamos a considerar es el de 0,1 bar (el mínimo que contempla la norma y aplicable a nuestro caso) y los valores de P_{red} son los que figuran en el eje de abscisas de la gráfica. El valor máximo de cálculo es de 2 bar y el mínimo de 0,1 bar próximo a 0,12 que es el valor mínimo que recomienda la norma.

En la gráfica de la figura 8.103 podemos apreciar como los distintos productos requieren superficies de venteo de diferentes valores en especial para los valores de P_{red} (bar) inferiores a 1 bar. Esto viene a reflejar la distinta peligrosidad de los productos granulométricos. La leche entera por su contenido en materia grasa es el producto lácteo más peligroso ya que presenta un valor de velocidad de reacción (K_{St}) de 141 bar m/s; este valor es próximo al valor para el lignito (K_{St} de 130 a 160 bar m/s en función de la zona de ubicación) y un poco por debajo del almidón de maíz (164 bar m/s). Así, para un valor de P_{red} medio de 0,5 bar, el área de venteo necesaria para cubrir el riesgo de la totalidad de los productos lácteos que se obtienen sería de casi 6 m², es decir, **el doble** de la superficie disponible actualmente.

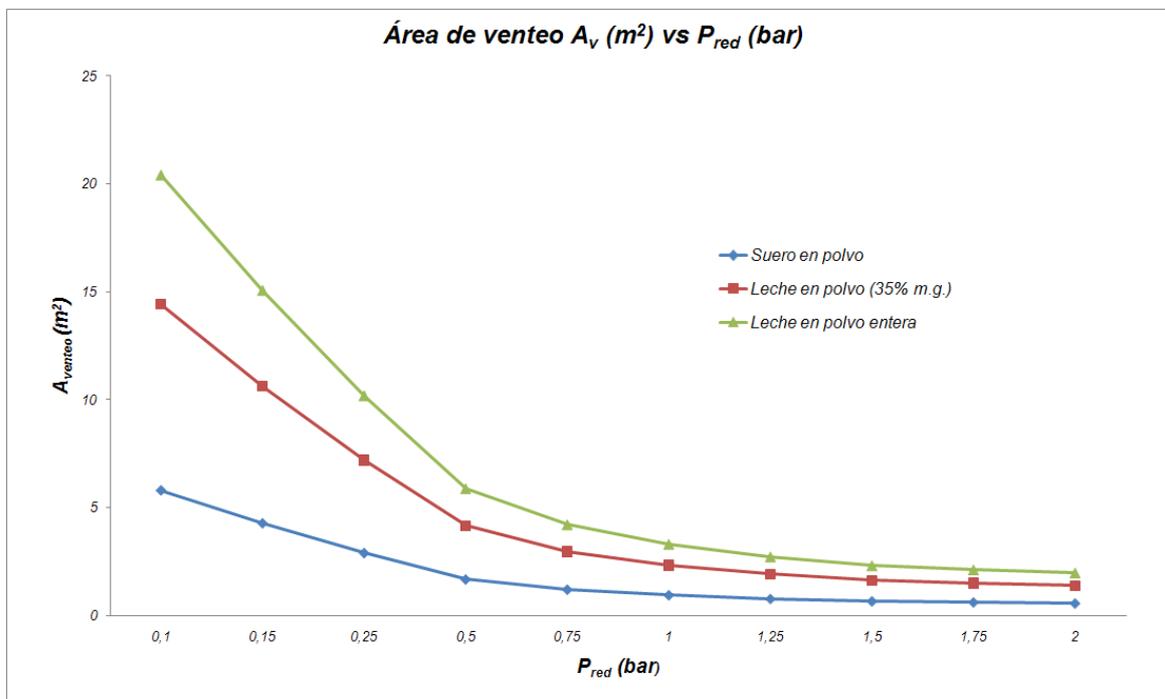


Figura 8.103. Curva A_{venteo} (m²) vs P_{red} para los productos de suero en polvo, leche en polvo (35% m.g.) y leche en polvo entera

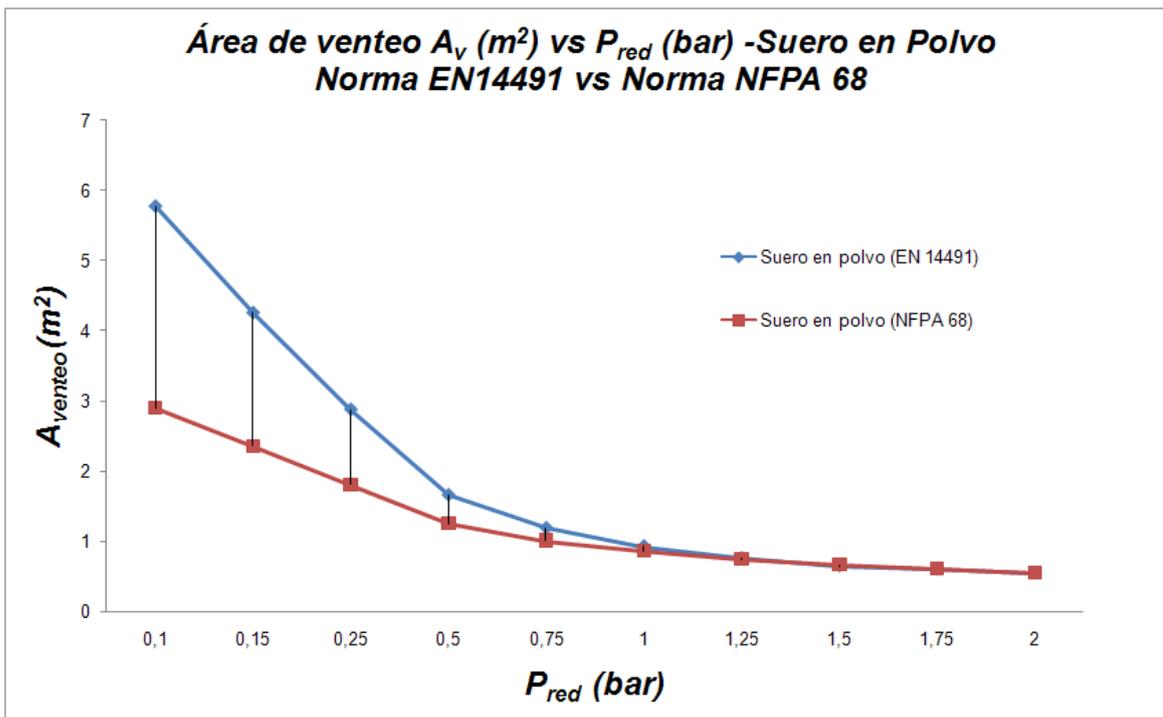


Figura 8.104. Curva A_{vente} (m²) vs P_{red} para el producto de suero en polvo, según las normas EN 14491 y la NFPA 68

En la figura 8.104 se muestran los valores de superficie de venteo respecto a distintas P_{red} para el producto de *suero en polvo* y teniendo en cuenta las dos metodologías de referencia actuales la Norma europea EN 14491 y la Norma americana NFPA 68. Llama la atención la disparidad de ambas normas en especial para valores de P_{red} inferiores a 0,75 bar. El área de venteo para valores de P_{red} de 0,15 a 0,1 bar necesario según la norma Europea se duplica respecto a la norma NFPA 86, esto viene a refrendar el carácter más laxo de la norma americana respecto a la europea. Para un valor fijado de P_{red} 0,25 bar la norma europea arroja un valor de venteo de 2,88 m² por 1,80 m² que contempla la norma americana. En valores de P_{red} de 1 a 2 bar ambas metodologías convergen ofreciendo valores muy próximos para las superficies de venteo.

Los resultados para la leche en polvo con 35% m.g. del área de venteo vs P_{red} para ambas normas se muestran en la figura 8.105. En este caso podemos apreciar una mayor correspondencia de los valores de venteo en especial para los valores de P_{red} de 0,25 bar a 2 bar donde la norma europea se sitúa aproximadamente un 10% por debajo del valor de la norma americana. Este valor de 0,25 bar marca el punto de inflexión que invierte la tendencia de la norma europea de mayor venteo a las presiones reducidas de 0,1 a 0,25 bar. En el límite del valor mínimo de 0,12 bar de P_{red} se observa una mayor disonancia correspondiéndole a la norma europea un valor de 14,39 m² por los 11,75 m²



de la americana, es decir, 2,26 m² más de superficie de venteo, estos valores se acrecientan al acercarse al límite de 0,1 bar.

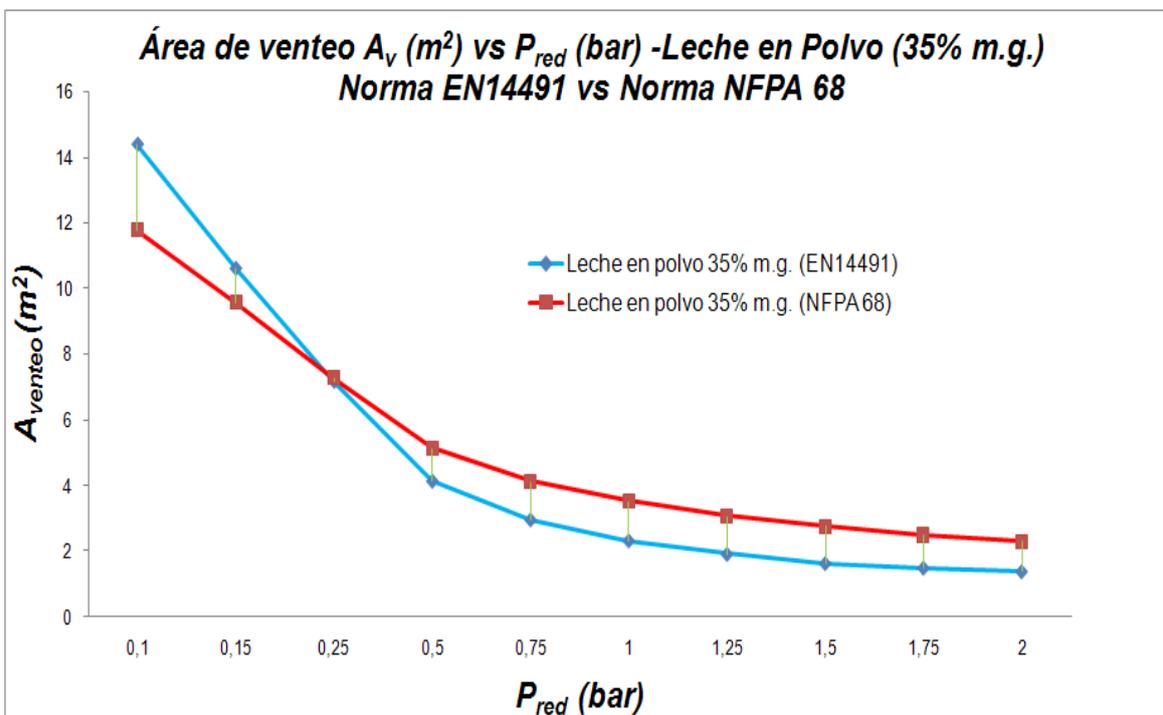


Figura 8.105. Curva A_{venteo} (m²) vs P_{red} para el producto de leche en polvo 35% m.g. según las normas EN 14491 y la NFPA 68

La figura 8.106 presenta los resultados de superficie de venteo respecto a la P_{red} para la leche entera (el producto más peligroso). Aquí observamos un comportamiento entre ambas metodologías similar al producto de suero en polvo. Para valores de P_{red} de 1 a 2 bar ambas curvas convergen de forma asintótica con el eje de abscisas no presentando discrepancias significativas en la superficie de venteo (aproximadamente una diferencia menor de un 5% entre ambas). La disparidad surge a la hora de considerar valores reducidos de P_{red} . Así, para un valor fijo de 0,75 bar la norma europea establece una superficie de venteo de 4,19 m² por 3,63 m² que fija la americana; esta diferencia se acentúa conforme bajamos los valores de P_{red} . El valor de P_{red} de 0,15 bar lleva asociado una superficie de venteo “europea” de 15,05 m² por los 8,48 m² del valor “americano”, es decir, aproximadamente un 45% menos. Para el valor de 0,1 bar la diferencia es casi del **doble 20,40 m² por 10,42 m²**, resulta pues, que es más barato proteger mediante venteos un silo americano que uno europeo para valores de P_{red} reducidos.

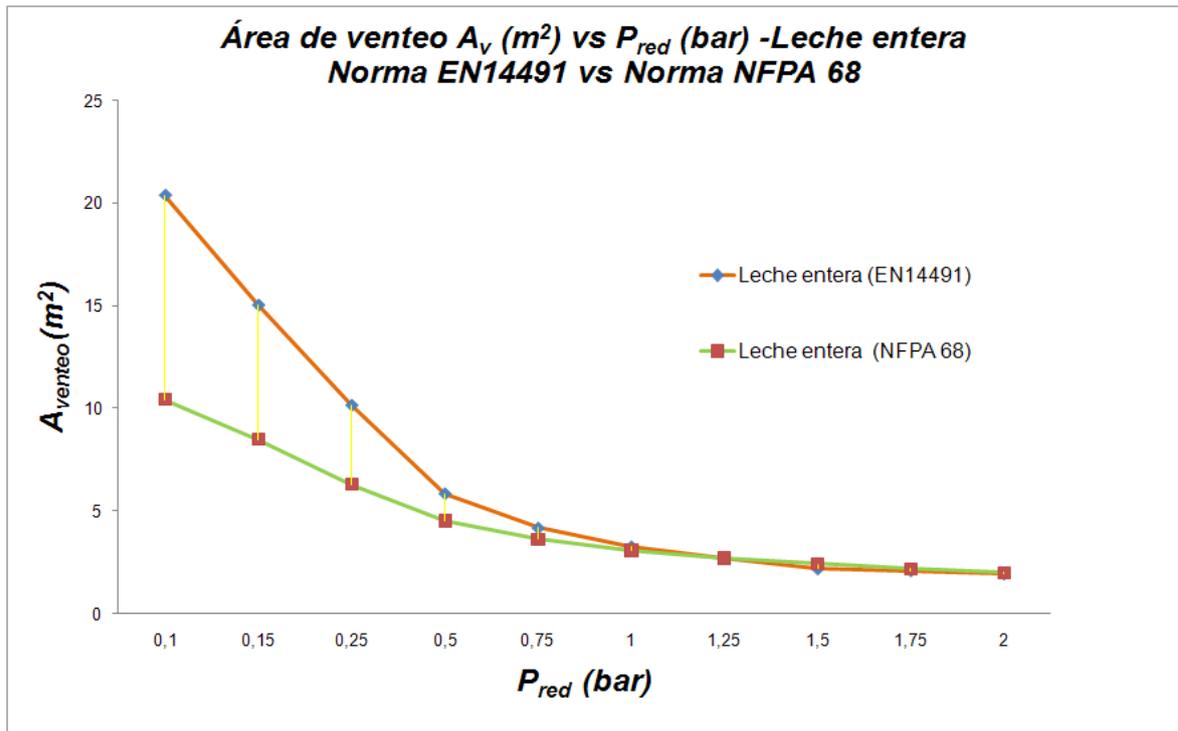


Figura 8.106. Curva A_{venteo} (m²) vs P_{red} para el producto de leche entera según las normas EN 14491 y la NFPA 68

A continuación vamos a comparar gráficamente la relación longitud/diámetro (L/D) para los diversos productos considerados. La relación L/D es necesaria también para determinar la superficie de los venteos y su relación es H_{eff}/D_{eff} . Este parámetro presenta gran influencia en el desarrollo de las explosiones. Cuanto más alargado sea el recipiente considerado donde tiene lugar la explosión, la aceleración y velocidades de propagación son mayores.

La norma EN 14491 establece para el cálculo de la altura efectiva H_{eff} la suma de la altura total del cilindro más un tercio de la altura de la tolva. El volumen efectivo V_{eff} se corresponde también con la suma del volumen total del cilindro y la suma del tercio superior de la tolva.

$$H_{eff} = \frac{1}{3}H_{cono} + H_{cilindro} \quad (\text{Ec.8 - 62})$$

$$V_{eff} = \frac{1}{3}V_{cono} + V_{cilindro} \quad (\text{Ec.8 - 63})$$

$$A_{eff} = \frac{V_{eff}}{H_{eff}}; \quad D_{eff} = \left[\frac{4 \cdot A_{eff}}{\pi} \right]^{0,5} \rightarrow \frac{L}{D} = \frac{H_{eff}}{D_{eff}} \quad (\text{Ecs.8 - 64, 8 - 65 y 8 - 66})$$



En nuestra cámara de secado la relación L/D que obtenemos con las geometrías actuales es $\frac{L}{D} \approx 1,51$. Como indicamos la cámara de secado no presenta las dimensiones originales ya que se le aumentó en un 1 metro la altura del cilindro “para mejorar la producción”, así la relación L/D original sería $\frac{L}{D} \approx 1,38$.

Hagamos pues, un juicio de valor de lo que supuso en superficie de venteo el incrementar la longitud del cilindro y representemos los índices de venteo para los productos que hemos considerado: suero en polvo, leche en polvo 35% m.g. y leche entera. Los resultados son los que se recogen en la figura 8.107 donde en línea discontinua se representan las áreas de venteo vs p_{red} para la relación L/D = 1,38 (original) y en trazo continuo las correspondientes a L/D=1,51 (modificada y existente acualmente) para los distintos productos.

Para valores de P_{red} de 1 a 2 bar, prácticamente no existe diferencias entre ambas relaciones. Pero para valores de P_{red} inferiores a 1 bar estas diferencias son significativas, incrementándose a medida que la presión baja de 0,5 bar. Así si analizamos los diferentes productos tenemos que:

Con relación al producto de *suero en polvo* y una P_{red} 0,1 bar la diferencia es de casi un 28% más de superficie de venteo (5,78 por 4,54 m²) necesaria para la relación actual L/D=1,51. Considerando una P_{red} de 0,15 bar el incremento de superficie es de un 27% más (4,26 por 3,38 m²), para una P_{red} de 0,25 bar el incremento es del 21% aproximadamente (2,88 por 2,32 m²) y para la P_{red} de 0,5 bar el incremento es de un 22% (1,37 por 1,66 m²) siempre a mayores para el índice de venteo L/D=1,51 respecto al original de fábrica de 1,38. Para las P_{red} de 0,75 y 1 bar los porcentajes también aumentaron en casi un 20%, 1,66 por 1,37 m² y 1,19 por 1 m² respectivamente.

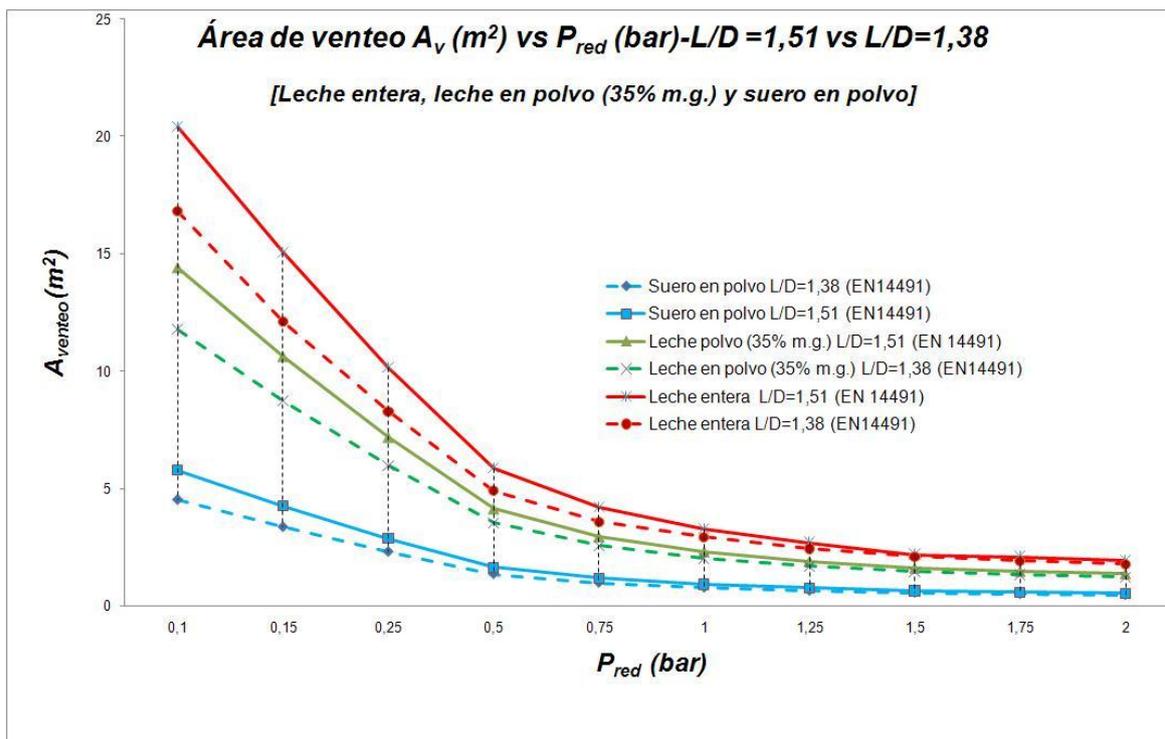


Figura 8.107. A_{venteo} (m^2) vs P_{red} para los productos: suero en polvo, leche en polvo y leche entera considerando $L/D=1,51$ y $L/D=1,38$ según norma EN 14491

Si consideramos el producto *leche en polvo con 35% de materia grasa* obtenemos para la relación aumentada $L/D=1,51$ (respecto a $L/D=1,38$) y para una P_{red} 0,1 bar una diferencia de casi un 23% más (14,39 por 11,78 m^2) de superficie de venteo, si tomamos una P_{red} de 0,15 bar el incremento de superficie es de casi un 21% más (10,61 por 8,75 m^2), para la P_{red} de 0,25 bar el incremento es de casi el 20% (7,17 por 6,00 m^2) y para la P_{red} de 0,5 bar el incremento casi un 17% (4,16 por 3,55 m^2). Estos porcentajes también son similares para las P_{red} de 0,75 y 1 bar. Es decir, para este producto la superficie de venteo necesaria se incrementó de media un 20% aproximadamente.

En el caso de la *leche entera* el incremento fue aproximadamente de un 24% para las P_{red} de 0,25; 0,15 y 0,1 bar (20,7 por 16,79 m^2 , 15,1 por 12,1 m^2 y 10,17 por 8,29 m^2 respectivamente) y de casi un 20% para las P_{red} de 0,5 y 1 bar (5,86 por 4,9 m^2 y 4,21 por 3,57 m^2). Es decir, al aumentar la altura de la cámara hemos aumentando los riesgos.

Estos resultados se muestran en los gráficos direccionales siguientes (figura 8.108, 8.109 y 8.110) en los cuales se representan las diferentes áreas de venteos para los tres productos lácteos considerando las relaciones $L/D=1,38$ y $L/D=1,51$ y para las P_{red} de: 0,1, 0,15, 0,25, 0,5, 0,75, 1, 1,25, 1,5, 1,75 y 2 bar respectivamente.

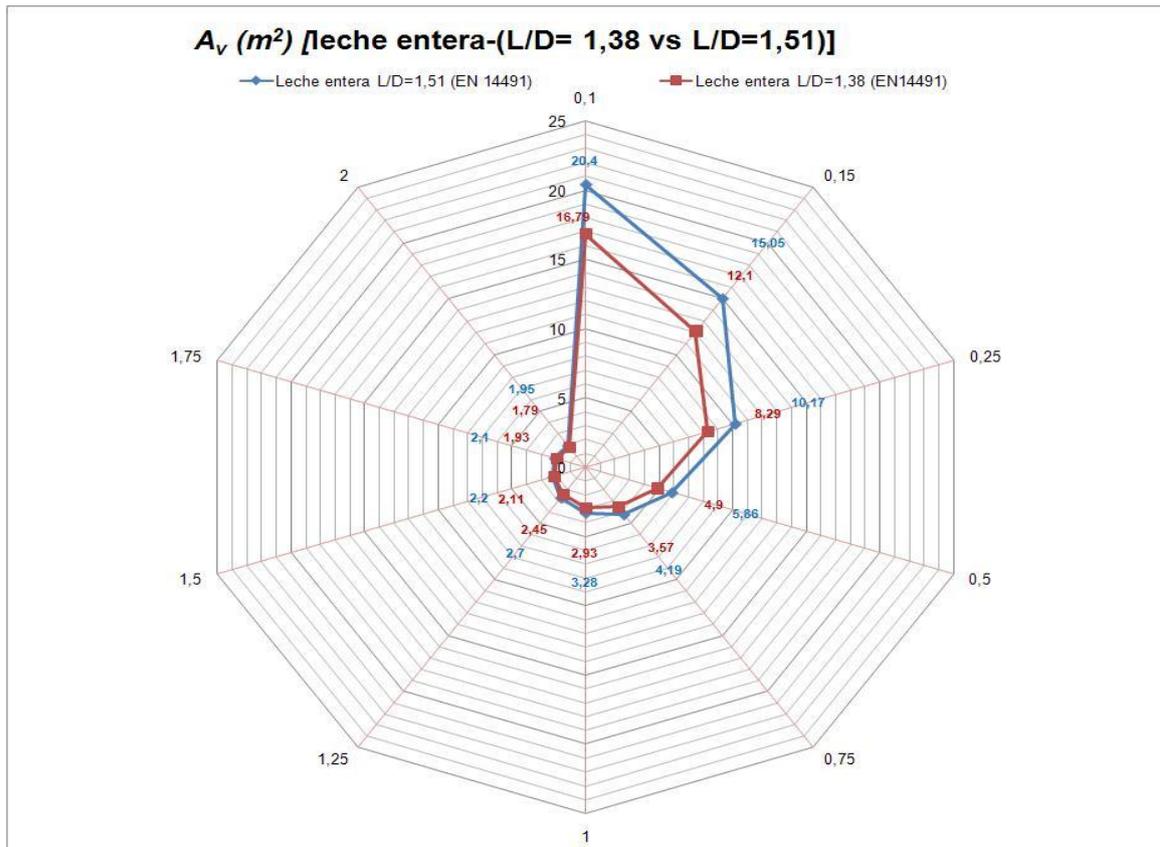


Figura 8.108. $A_{venteo} (m^2)$ vs P_{red} para la leche entera L/D= 1,51 vs L/D=1,38. Norma EN 14491

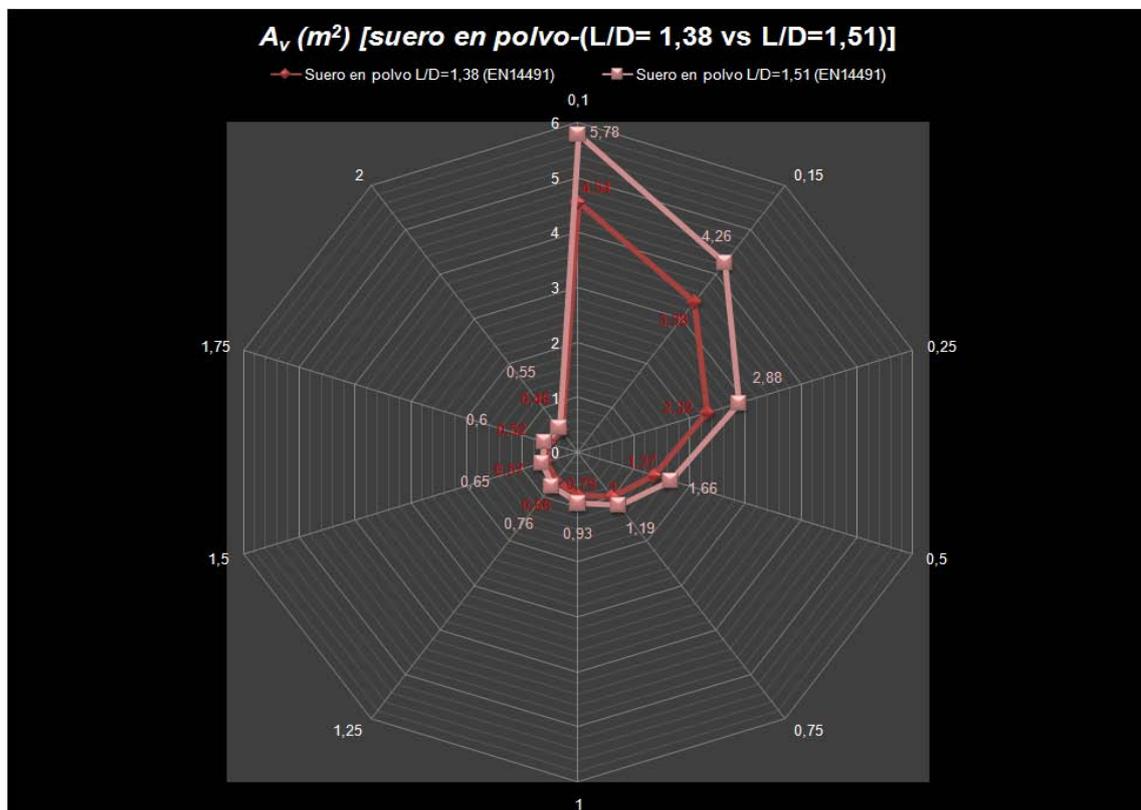


Figura 8.109. $A_{venteo} (m^2)$ vs P_{red} producto suero en polvo L/D= 1,51 vs L/D=1,38. Norma EN 14491

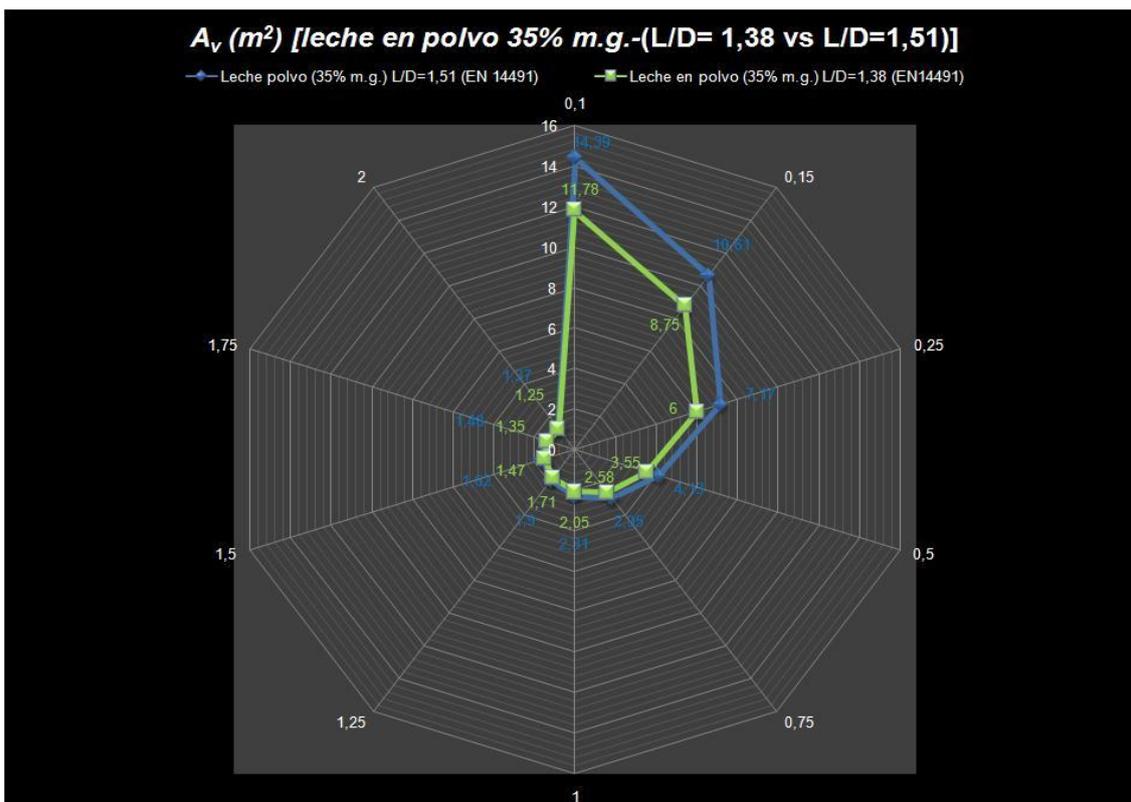


Figura 8.110. A_{venteo} (m²) vs P_{red} leche en polvo 35% L/D= 1,51 vs L/D=1,38. Norma EN 14491

Representemos ahora los resultados para las áreas de venteo mínimas según la norma europea EN 14491 y la norma americana NFPA 68 en función del cociente L/D con valores de L/D=1, L/D=1,5, L/D=2, L/D=2,5 y L/D=3 para los tres productos lácteos y considerando una $P_{red}=0,12$ bar tal y como se recoge en la gráfica de la figura 8.111.

Los resultados obtenidos según la norma NFPA 68 (líneas roja, verde y azul a trazos discontinuos) se pueden asimilar a líneas rectas para los valores de L/D=1, L/D=1,5 y L/D=2, aquí presenta un cambio de pendiente motivado por la corrección que introduce la norma en el cálculo del área de venteo (véase Ec. 8-40).

Como podemos observar las áreas de venteo calculadas siguiendo la norma europea son siempre mayores que las calculadas según la norma americana NFPA a excepción de los casos en los cuales L/D=1. Las diferencias entre ambas normas crecen a medida que lo hace la relación L/D y según se reduce la P_{red} . Para valores de L/D=1,5 en adelante la norma europea EN 14491 duplica en valor a la norma americana NFPA 68. Así, tal y como había indicado Tascón, A. (2010) en el caso de silos esbeltos las superficies de venteo pueden llegar a valores próximos a 30 m². Si tenemos en cuenta que el área de la sección transversal de un silo con diámetro 7 metros (como el caso que nos ocupa) es de



38,4 metros, es obvio que en determinadas situaciones de diseño resultaría muy difícil por no decir imposible proteger un silo mediante la norma europea.

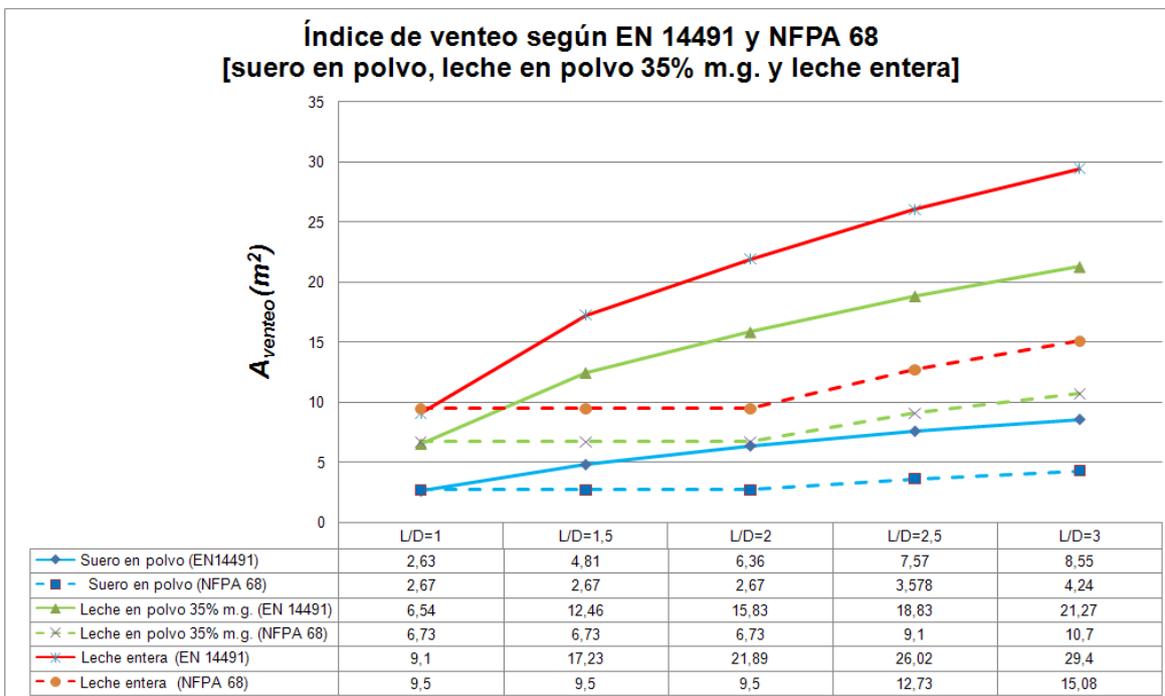


Figura 8.111. A_{venteado} (m^2) vs L/D para los productos: suero en polvo, leche en polvo y leche entera según norma EN 14491 y NFPA 68. $P_{\text{red}}=0,12$ bar

También resulta obvio que los costes de protección por volumen de almacenamiento van a ser siempre muy inferiores si se utiliza la norma americana respecto a la europea.

Resulta paradójico pues las diferencias tan grandes que existen entre ambas normas, en especial para relaciones de L/D=1,5 en adelante. El cálculo de las fórmulas utilizadas presentan ajustes diferentes en ambas normas y parece entreverse que la norma europea presenta una filosofía de protección mayor para los volúmenes más pequeños: ciclones, depósitos, filtros de mangas, cámara de secado, etc. que para volúmenes grandes ($> 1000 m^3$) en los cuales la norma americana NFPA 68 presenta mejor ajuste. Sin embargo no es lógico que esta norma no incluya correcciones para las áreas de venteo con relaciones inferiores a L/D=2, pues hemos visto que un cambio en la geometría de la cámara de secado de un metro en la altura del cilindro repercute en un aumento de aproximadamente un 20% en la superficie de venteo.

Las cámaras de secado chequeadas (tres en total considerando la de la empresa EUROSERUM IBÉRICA, S.L.) en la provincia de Lugo arrojaron áreas de venteo dispares, siendo la existente en la empresa CAPSA la que presentó mayor área de



venteo (aproximadamente 6 m² asociadas a dos puertas de alivio de presión). Esta cámara fue renovada en el año 2000 y presenta una relación L/D=1,30. Ambas cámaras han sido fabricadas por NIRO (empresa ubicada en Dinamarca), lo que a priori indica que debería haber sido diseñada empleando la normativa europea. Si entramos con esta relación L/D=1,30 y la superficie de venteo de 6 m² en la gráfica de la figura 8.111 podemos observar que los productos “seguros de fabricar” serían *suero en polvo* y *leche en polvo*, pero no *leche entera*. Parece pues, que el fabricante ha utilizado la normativa NFPA 68 para el diseño de las superficies de venteo. Comentar que en esta fábrica han tenido varios incidentes en la cámara de secado, el más grave produjo la proyección de una de las puertas de alivio a más de 20 metros. Otros incidentes menores produjeron pequeñas combustiones internas con activación del sistema contra incendios en la cámara.

Es necesario pues, que se revisen tanto la norma europea como la americana y que se desarrollen diferentes fórmulas considerando pequeños y grandes volúmenes, de tal manera que el diseñar una cámara de secado o un silo con ambas normas arroje resultados similares de superficie de venteo.

8.3.6.3.6 Resultados del dimensionamiento de venteos de explosión aplicando el software LPG Vent1.06

La determinación del área de venteo con este software LPGVent1.06 basado en la norma europea EN 14491 la realizamos a través de los pasos siguientes:

- 1º Definimos la geometría de estudio introduciendo las dimensiones de la misma.
- 2º. Seleccionamos el producto que almacena o procesa (tabla 8.23).
- 3º Obtenemos en pantalla los resultados obtenidos y las tablas complementarias (figura 8.112 y tabla 8.24).

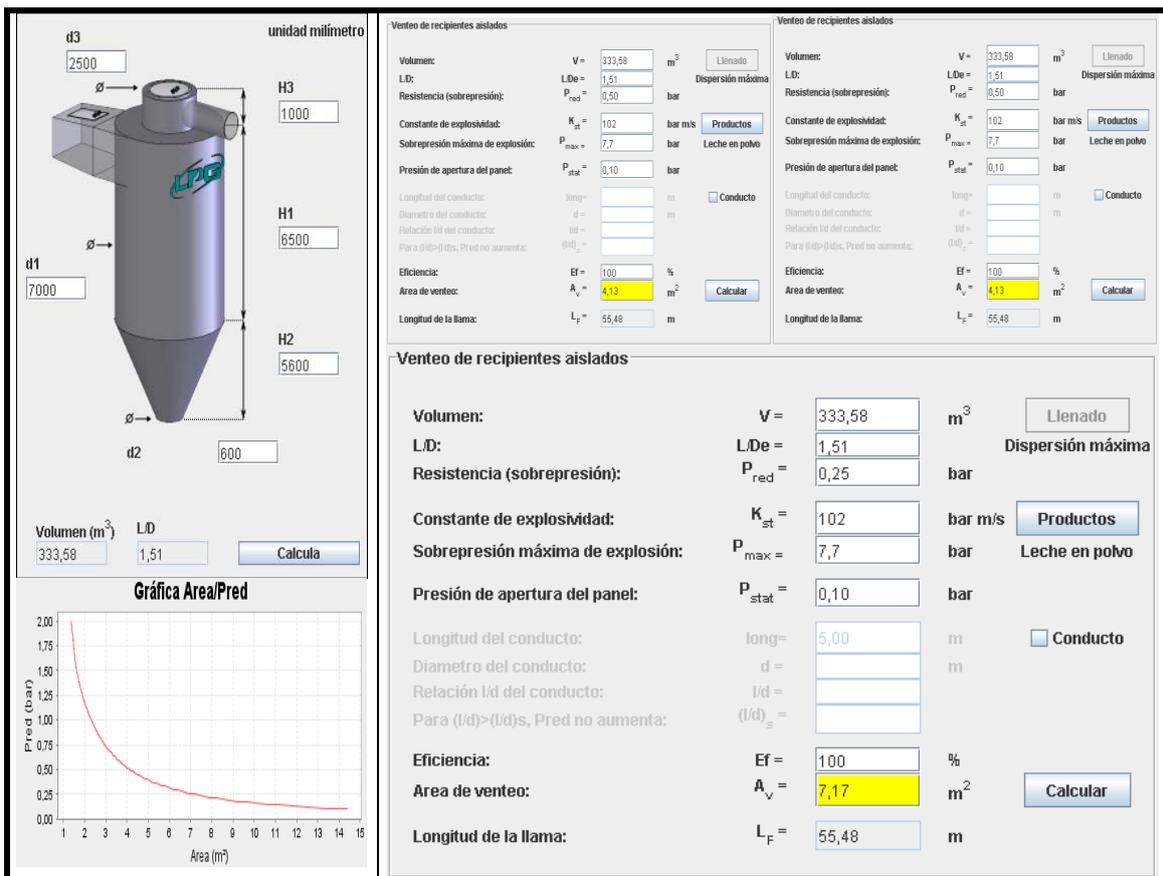


Figura 8.112. Resultados obtenidos con el programa LPG vent (diversos parámetros)

Nombre	Tamaño de partícula (µ)	TMI c (°C)	TMI n (°C)	LIE (g/m³)	EMI (mJ)	CLO (%)	Kmax	Pmax
Proteína animal	17	>400	540	125	--	--	38	8,3
Proteína de leche	195	>400	450	15	>10	--	55	7,6
Proteína de soja	69	>400	>450	30	>1.000	--	70	8,3
Pulpa de madera	20	325	480	60	>1.000	--	107	9,1
Residuo madera de conglomerado	81	320	490	30	--	--	156	9,2
Resina epoxi	32	funde	490	15	9	--	237	9,3
Salvado	600	330	410	30	1000	--	21	5,1
Semola de patata	24	310	490	15	>100	--	80	7,6
Soja	95	290	450	250	--	--	53	8,5
Suero de Leche	105	>400	410	125	>1.000	--	41	7,4
Tabaco	52	270	500	250	>1.000	--	70	7,2
Tartrato	20	290	450	40	>100	--	110	7,0

Tabla 8.23. Selección de productos utilizados

La tabla siguiente (tabla 8.24) recoge los resultados obtenidos para los parámetros de interés en la cámara de secado considerando el producto de leche en polvo y leche entera para diferentes P_{red} .



CÁMARA DE SECADO EUROSERUM IBÉRICA ($V=333,6 \text{ m}^3$, Relación $L/D=1,51$, $P_{\text{stat}}=0,1 \text{ bar}$)*						
Producto leche en polvo ($K_{St}= 102 \text{ bar m/s}$, Presión máxima: $P_{\text{máx}} 7.7 \text{ bar}$)						
Parámetros	Presión reducida de explosión (bar)					
	$P_{\text{red}}=0,1$	$P_{\text{red}}=0,15$	$P_{\text{red}}=0,25$	$P_{\text{red}}=0,5$	$P_{\text{red}}=0,75$	$P_{\text{red}}=1$
Eficiencia del venteo: Ef %	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Área de venteo: A_v (m ²)	14,39	10,61	7,17	4,13	2,95	2,31
Fuerza máx . retroceso: $Fr_{\text{máx}}$ (KN)	171,21	189,38	213,24	245,80	263,69	275,17
Duración del pulso: Tr (ms)	2364,99	2137,97	1898,80	1647,30	1535,51	1471,43
Impulso total: Ir (kN · s)	210,55	210,55	210,55	210,55	210,55	210,55
Long. llama venteo horiz.: L_{fh} (m)	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00
Long. llama venteo vertical: L_{fv} (m)	55,48	55,48	55,48	55,48	55,48	55,48
Ancho de la llama: W_f (m)	19,42	19,42	19,42	19,42	19,42	19,42
Sobrepresión externa: P_{ext} (bar)	74,30	108,11	173,25	327,93	475,68	618,89
Distancia horizontal sobrep.: R_{sh} (m)	17,34	17,34	17,34	17,34	17,34	17,34
Distancia vertical sobrep.: R_{sv} (m)	13,87	13,87	13,87	13,87	13,87	13,87
Producto leche entera ($K_{St}= 141 \text{ bar m/s}$, Presión máxima: $P_{\text{máx}} 7.9 \text{ bar}$)						
Eficiencia del venteo: Ef %	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Área de venteo: A_v (m ²)	20,40	15,05	10,17	5,86	4,19	3,28
Fuerza máx . retroceso: $Fr_{\text{máx}}$ (KN)	242,81	268,60	302,43	348,60	373,98	390,27
Duración del pulso: Tr (ms)	2305,12	2083,85	1850,73	1605,59	1496,64	1434,18
Impulso total: Ir (kN · s)	291,05	291,05	291,05	291,05	291,05	291,05
Long. llama venteo horiz.: L_{fh} (m)	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00
Long. llama venteo vertical: L_{fv} (m)	55,48	55,48	55,48	55,48	55,48	55,48
Ancho de la llama: W_f (m)	19,42	19,42	19,42	19,42	19,42	19,42
Sobrepresión externa: P_{ext} (bar)	76,94	111,95	179,42	339,59	492,60	640,90
Distancia horizontal sobrep.: R_{sh} (m)	17,34	17,34	17,34	17,34	17,34	17,34
Distancia vertical sobrep.: R_{sv} (m)	13,87	13,87	13,87	13,87	13,87	13,87

* V =volumen, Relación L/D =Longitud/diámetro, P_{stat} = presión de activación de la puerta de alivio.

Tabla 8.24. Magnitud de los parámetros de interés para el producto de leche en polvo y leche entera, varias P_{red} : 0.1, 0.15, 0.25, 0.5, 0.75 y 1 bar.



8.3.6.4. consideraciones al estudio de la geometría en 3D de la cámara de secado

En los casos de estudio de la cámara de secado hemos realizado todas las simulaciones en 2D. El hecho de establecerlo de esta así viene motivado por la economía a la hora de realizar los cálculos. No obstante, se presenta en este apartado los pasos para realizar la simulación en 3D y algunos resultados. Al igual que en los casos de estudio anteriores y que ya hemos visto, primeramente realizamos la geometría con las dimensiones reales para luego mallarla e imponer las condiciones de contorno e iniciales tal y como puede verse en las figuras siguientes (figuras 8.113 a 8.118).

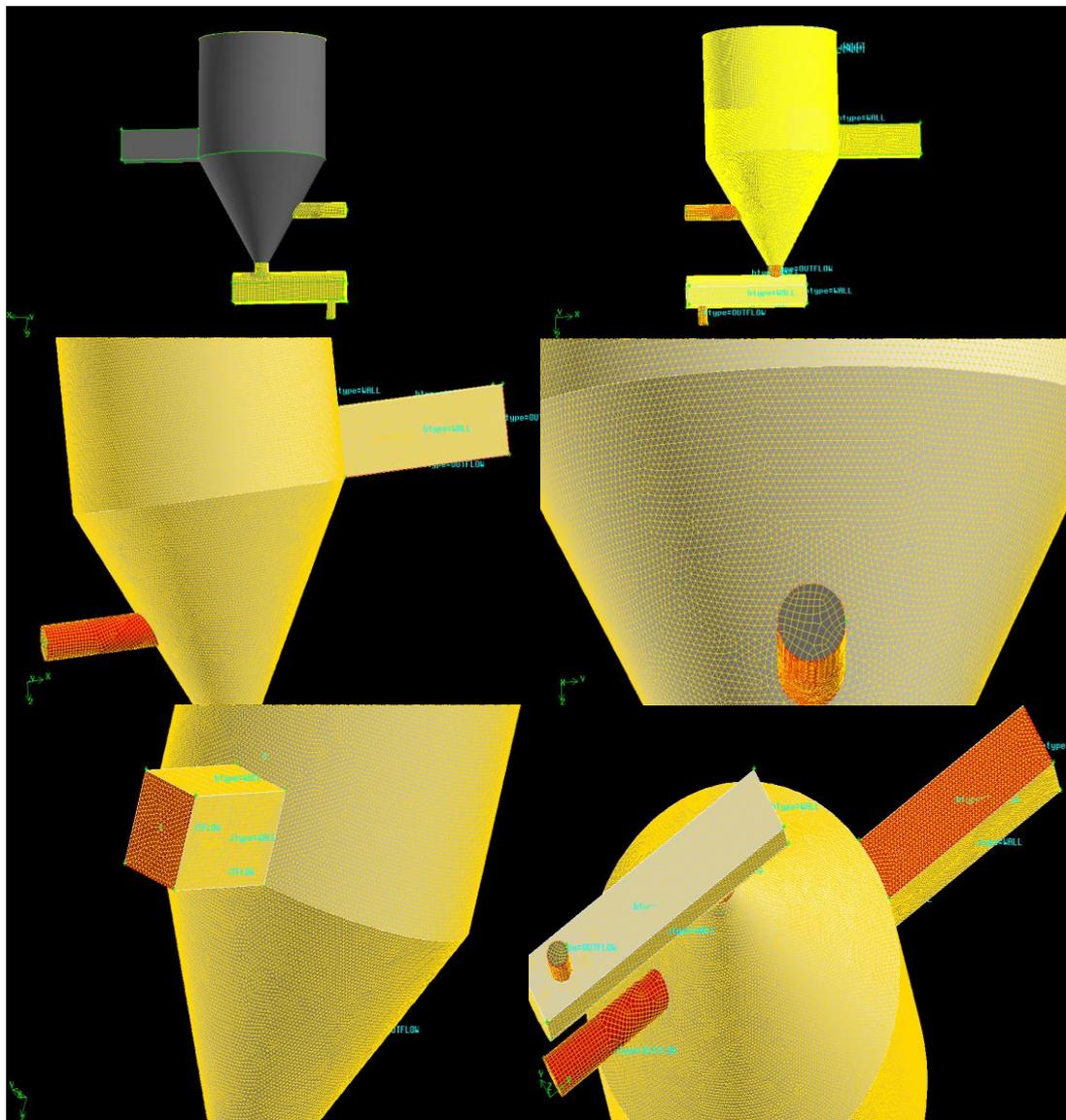


Figura 8.113 a 8.118. Determinación de la geometría en 3D de la cámara de secado.



Finalizado el proceso de generación de la geometría la exportamos para luego poder trabajar con el programa FLUENT tal y como hemos venido explicando a lo largo de los casos de estudio. En las figuras siguientes se muestran los resultados de dos simulaciones realizadas en 3D.

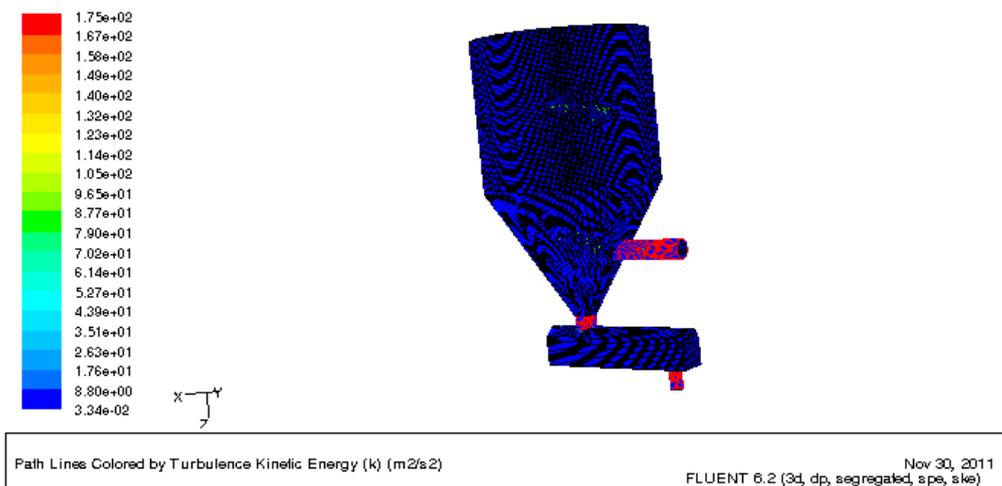


Figura 8.119. Líneas de corriente para la energía cinética turbulenta

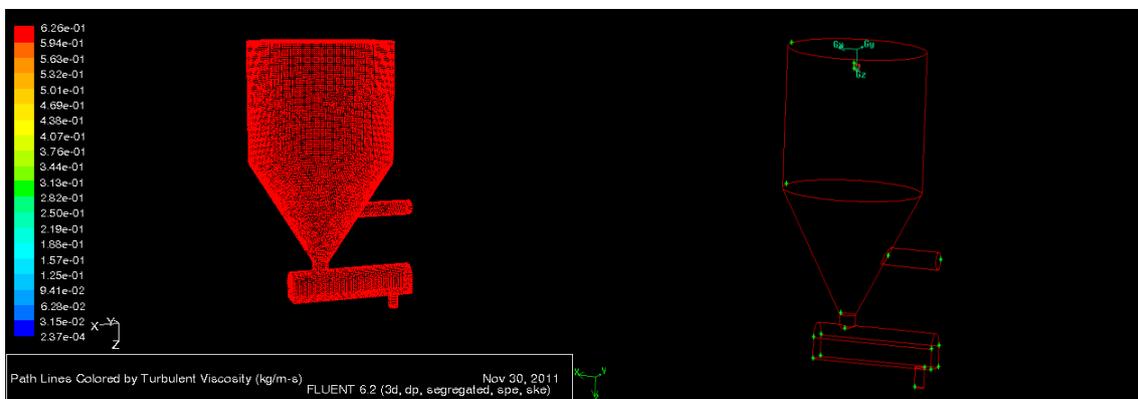
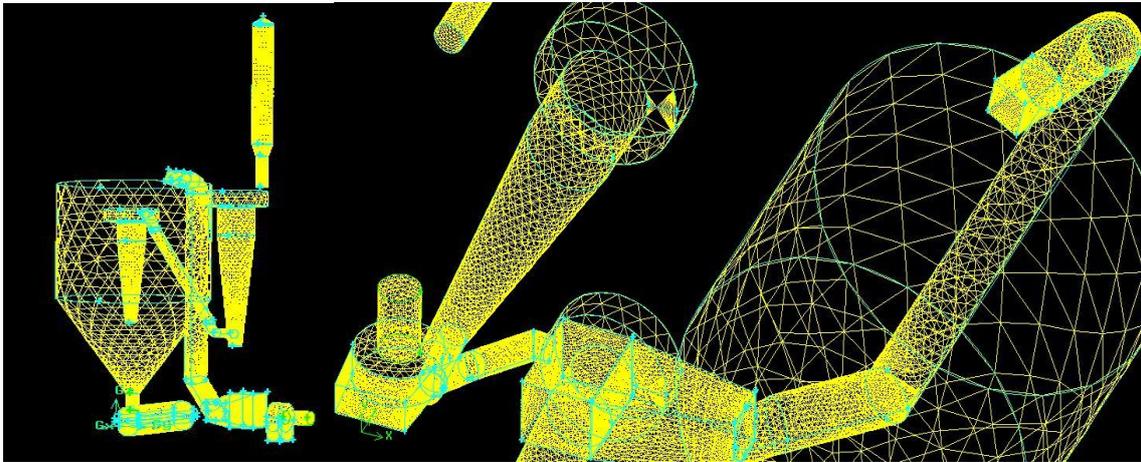


Figura 8.120. Viscosidad turbulenta

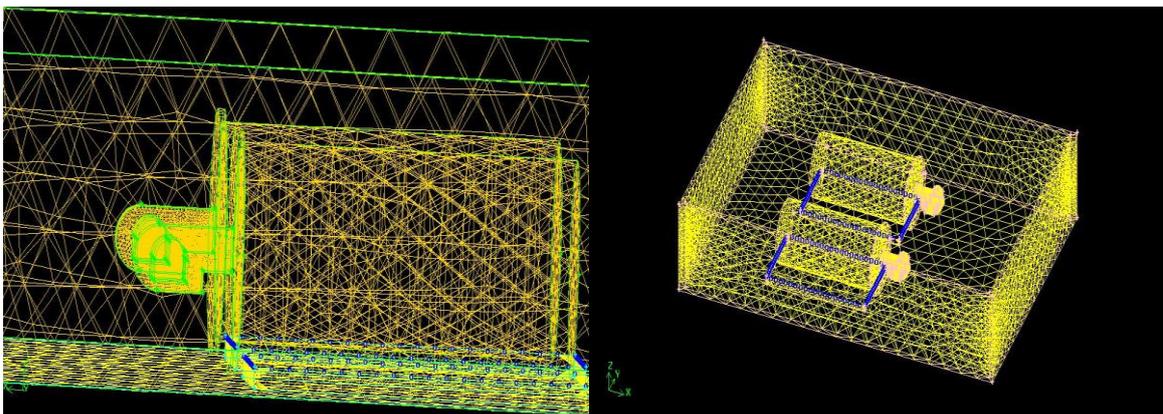
Figura 8.121. Geometría de la cámara turbulenta

La elección entre realizar un estudio considerando una geometría en 2D ó 3D vendrá motivado primeramente por el equipo hardware de que se dispone, la realización de geometrías complejas en 3D (véanse las figuras 8.122 y 8.123) motiva procesos de iteración con FLUENT de varias horas con tiempos de presentación de resultados por pantalla largos. Para casos sencillos (figuras 8.124 y 8.125) se pueden realizar simulaciones en 3D sin grandes consumos, pero en aquellos casos en los cuales el mallado presenta multitud de detalles con diferentes condiciones los procesos se hacen

muy largos y los resultados que a veces se obtienen no aportan mucha más información que para una geometría 2D.



Figuras 8.122 y 8.123. Mallado en 3D de la torre de leche en polvo



Figuras 8.124 y 8.125. Mallado en 3D de las calderas

8.4. Determinación de las fuentes de ignición en las zonas de estudio mediante la termografía

Para finalizar este capítulo se presentan los resultados obtenidos con la técnica de la termografía mediante la cámara de infrarrojos FLIR E60 de las fuentes de ignición por superficies calientes en aquellas partes de la instalación con mayor riesgo, a saber:

- ❑ **Sala de calderas.**
- ❑ **Sala de frío 2.**
- ❑ **Torre de leche en polvo.**

8.4.1. Termografía de superficies en la Sala de Calderas

La sala de calderas ha sido renovada durante el año 2011 donde se ha procedido al cambio del combustible de los generadores de vapor pasando del fuel oil al gas natural licuado. Este cambio ha conllevado la instalación de nuevos generadores de vapor con quemadores de gas, así como de los equipos e instalaciones necesarios: calentadores pequeños de gas, válvulas de seguridad, de corte, reductoras y manuales, etc. No obstante hay partes de la instalación que se han conservado y que presentan riesgos como son el colector de salida de vapor, válvulas reductoras de presión, captadores de condensado, etc., y otros equipos sin riesgo significativo: el colector de purgas, los depósitos de aportación y descalcificador, etc.

El colector de vapor salida (foto 8.90) recibe el vapor procedente de los conductos de salida (foto 8.91) de ambas calderas donde internamente es calentado a una temperatura de aproximadamente 200°C en el hogar de las mismas (foto 8.92).

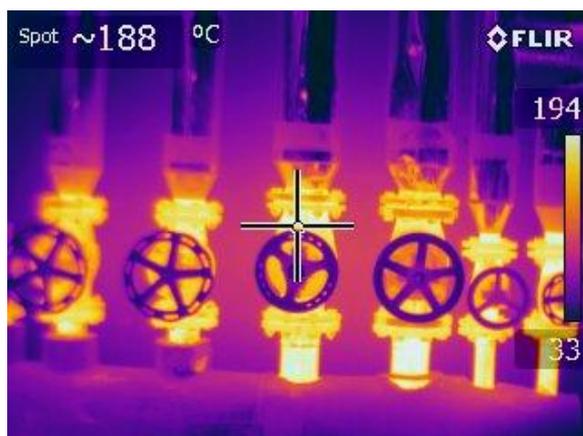


Foto 8.90. Colector de salida de vapor



Foto 8.91. Salida vapor Caldera 1

El colector consiste en un tubo horizontal desde el cual se distribuye el vapor necesario para las diferentes secciones de la fábrica: torre, producción, concentrador, torre, etc., la distribución de temperaturas de superficie es la que se muestra en la foto 8.90, donde podemos apreciar que los rangos de temperatura de los elementos más calientes se encuentran entre los 180°C y los 194°C. La distribución de temperaturas de la junta de acople del cuerpo de la caldera con el conducto de salida de vapor se muestra en la foto 8.91, en dicha junta las temperaturas alcanzan vapores de hasta 160°C.

El circuito de estación reguladora de vapor dispone de una serie de elementos de corte como la válvula de corte (foto 8.93), válvulas reductoras de salida (foto 8.94), válvula

reguladoras de purga de condensados, etc. La distribución de temperaturas para estos elementos oscilan entre los 180 °C y los 190 °C.

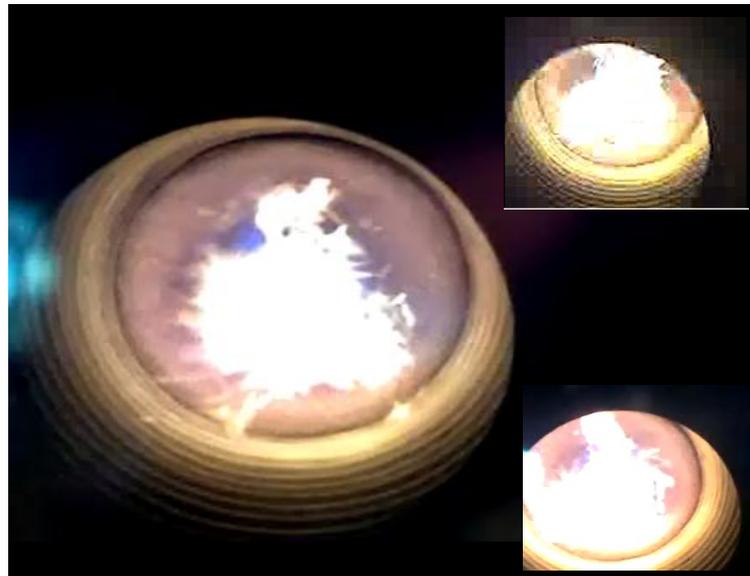


Foto 8.92. Proceso de combustión en el interior de la caldera

Estos elementos que hemos ido referenciando son los que presentan mayor valor de temperatura en superficie, aunque existen otras partes de la instalación con valores elevados: elementos de control de las calderas, válvulas de control, válvulas de retención, aportación de agua de caldera, etc. (fotos 8.95, 8.96 y 8.97) que producirían situaciones de grave riesgo en caso de fuga de escape de gas.

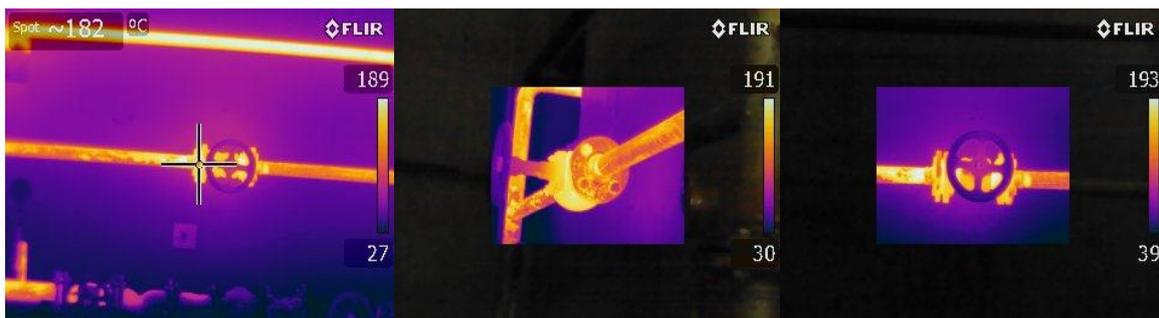


Foto 8.93. Válvula de corte

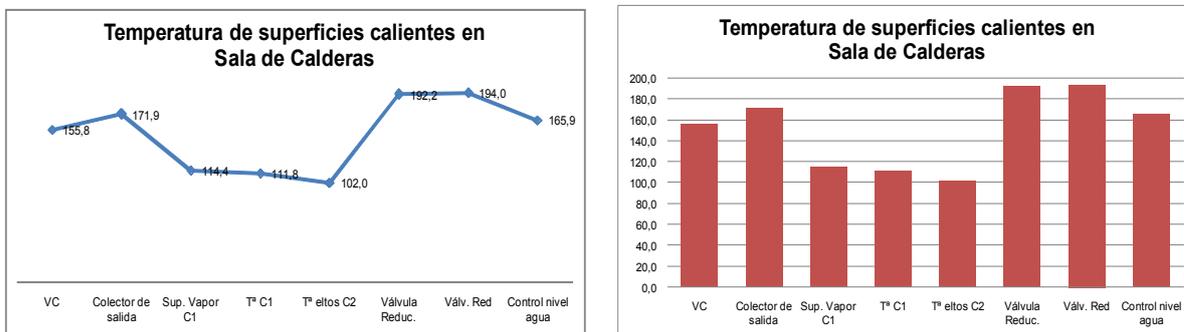
Fotos 8.94. y 8.95. Válvula reductora de presión de vapor



Foto 8.96. Tª cuerpo C1

Foto 8.97. Tª eltos. control C2

La distribución de temperaturas en °C de los elementos con mayor temperatura superficial que hemos ido comentando se recogen en las figuras 8.126 y 8.127.



Figuras 8.126 y 8.127. Temperatura de superficies calientes en la sala de calderas

8.4.2. Termografía de superficies calientes en la Zona de Frío 2

Cuando realizamos las simulaciones vimos que esta era una zona de bastante riesgo motivada por fugas “continuas” en elementos de la instalación, así como la escasez de ventilación de la sala. Esta situación de riesgo se ve aumentada por la presencia de elementos que se encuentran sin calorifugar y que presentan valores elevados de temperatura en superficie. Así, en las imágenes termográficas (8.98 a 8.102) y por este orden se representan las distribuciones de temperatura de los equipos y elementos: Compresor CR10 (bloques 3 y 4 y válvula de corte), Válvula de corte manual del CR10 y decantador de aceite, filtro de aceite del decantador, salida de amoniaco a circuitos serpentines y cuerpo del bloque del compresor CR6.



Foto 8.98. Tª superficial CR10

Foto 8.99. Tª superficial Válvula manual

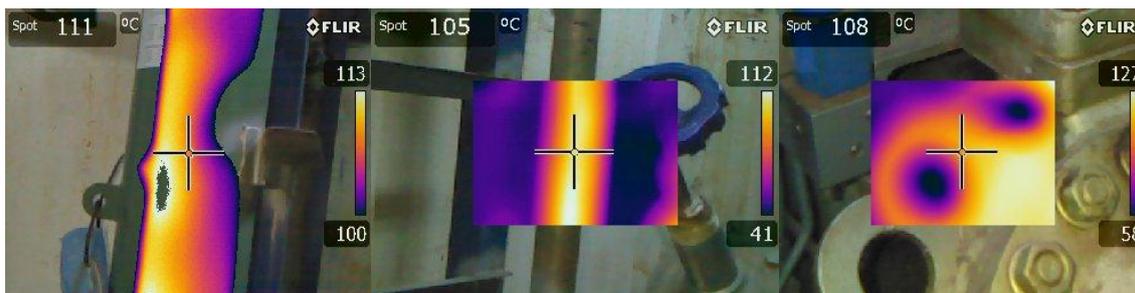


Foto 8.100. Filtro decantador

Foto 8.101. Salida nh3

Foto 8.102. Tª Cuerpo CR6

La figura siguiente muestra los valores máximos de temperatura superficial en los elementos anteriormente comentados. En ella, podemos observar como existen elementos que presentan temperaturas en superficie del orden de 120°C como son el bloque del compresor CR10, CR6, válvulas de corte manual; y otros elementos como el filtro del decantador y tubería de conducción de amoníaco a los circuitos serpentines donde la temperatura alcanzan aproximadamente los 110°C.

Estos valores son muy elevados teniendo en cuenta el tipo de instalación de que se trata, lo que debería conllevar actuaciones inmediatas del tipo de calorifugación de superficies.

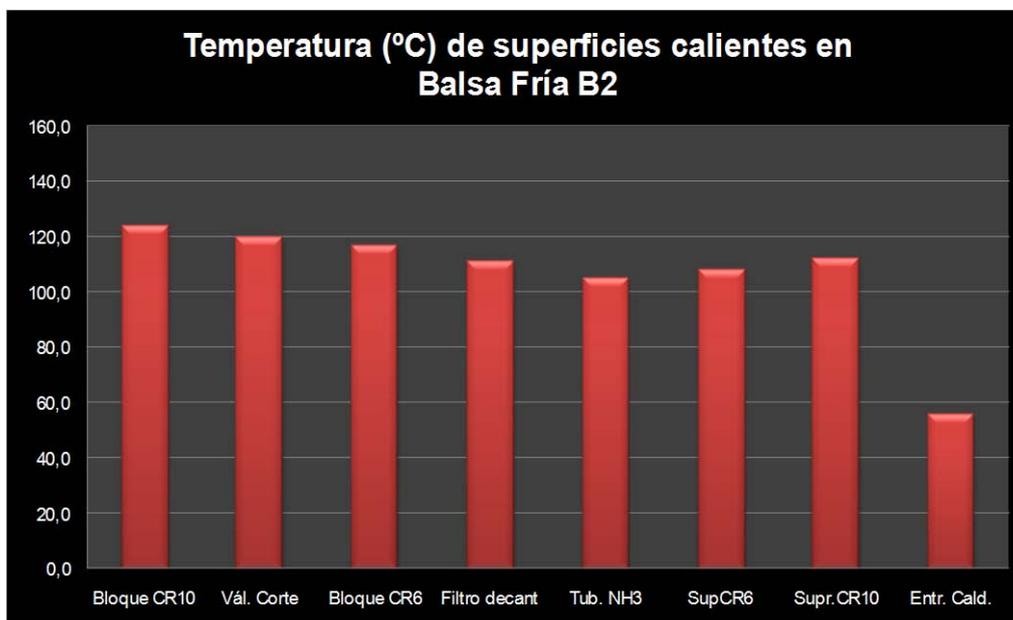


Figura 8.128. Temperatura de superficies calientes en la balsa de agua helada 2

8.4.3. Termografía de superficies calientes en la Torre de Leche en Polvo

La torre de leche en polvo constituye una instalación de gran riesgo a la cual debe prestársela mucha atención. Como hemos visto la leche y suero en polvo presentan propiedades de polvo combustibles para los tamaños de partícula que se manejan, lo que en contacto con una fuente de ignición podría ocasionar un grave accidente.

Las imágenes siguientes (fotografías 8.103 a 8.111) muestran la distribución de temperaturas en superficie de aquellos elementos “más calientes” que se han encontrado en la instalación de torre de leche en polvo.



Foto 8.103. Entrada aire cal.

Foto 8.104. Válvula Corte

Foto 8.105. Purga condensado



Foto 8.106. Cir. Aire Caliente

Foto 8.107. Vál. aire caliente

Foto 8.108. Colector batería cal.



Foto 8.109. V.corte (batería)

Foto 8.110. Batería aire cal.

Foto 8.111. Llave gnal. de vapor



Como se ha indicado en el capítulo 6 la leche y el suero en polvo son sustancias combustibles cuya temperatura mínima de inflamación en nube es de 280°C para la leche y de 395°C para el suero. Teniendo en cuenta el coeficiente de seguridad que se especifica en la norma UNE EN 1127-1 los equipos de manejo de combustible no deben sobrepasar los 190°C de temperatura superficial. Si cotejamos este valor con los obtenidos mediante la termografía de superficies calientes y que se muestran en la figura 8.129, observamos que hay elementos que no sólo son fuentes potenciales sino que son peligros reales. Es una realidad que en la zona de salida de producto hacia la zona de ensacado, así como en otras partes de la instalación es frecuente la presencia de polvo (de leche o suero según proceso) en capa; bastaría con poner este polvo en suspensión para que se alcanzase alguno de los elementos calientes lo que podría producir una explosión.

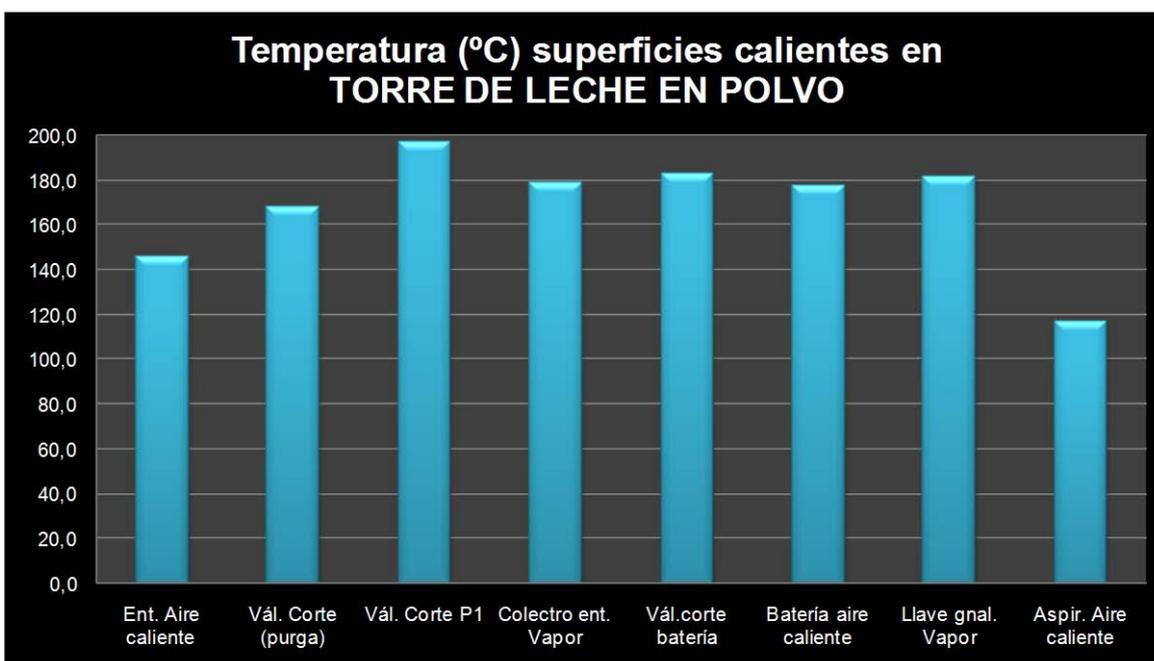


Figura 8.129. Temperatura de superficies calientes en la sección de Torre de Leche en Polvo

Tanto para este caso de estudio como para los dos anteriores (sala de calderas y zona de frío 2) se hace necesario revisar e instalar elementos de calorifugado en los equipos y elementos vistos.



CAPITULO 9. APLICACIÓN DE LOS NUEVOS PROCEDIMIENTOS PROPUESTOS A UNA INDUSTRIA DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS

En este capítulo vamos a aplicar las metodologías propuestas a una industria de tratamiento de residuos cuyo plano de cotas e instalaciones principales se muestra en la figura siguiente (figura 9.1).

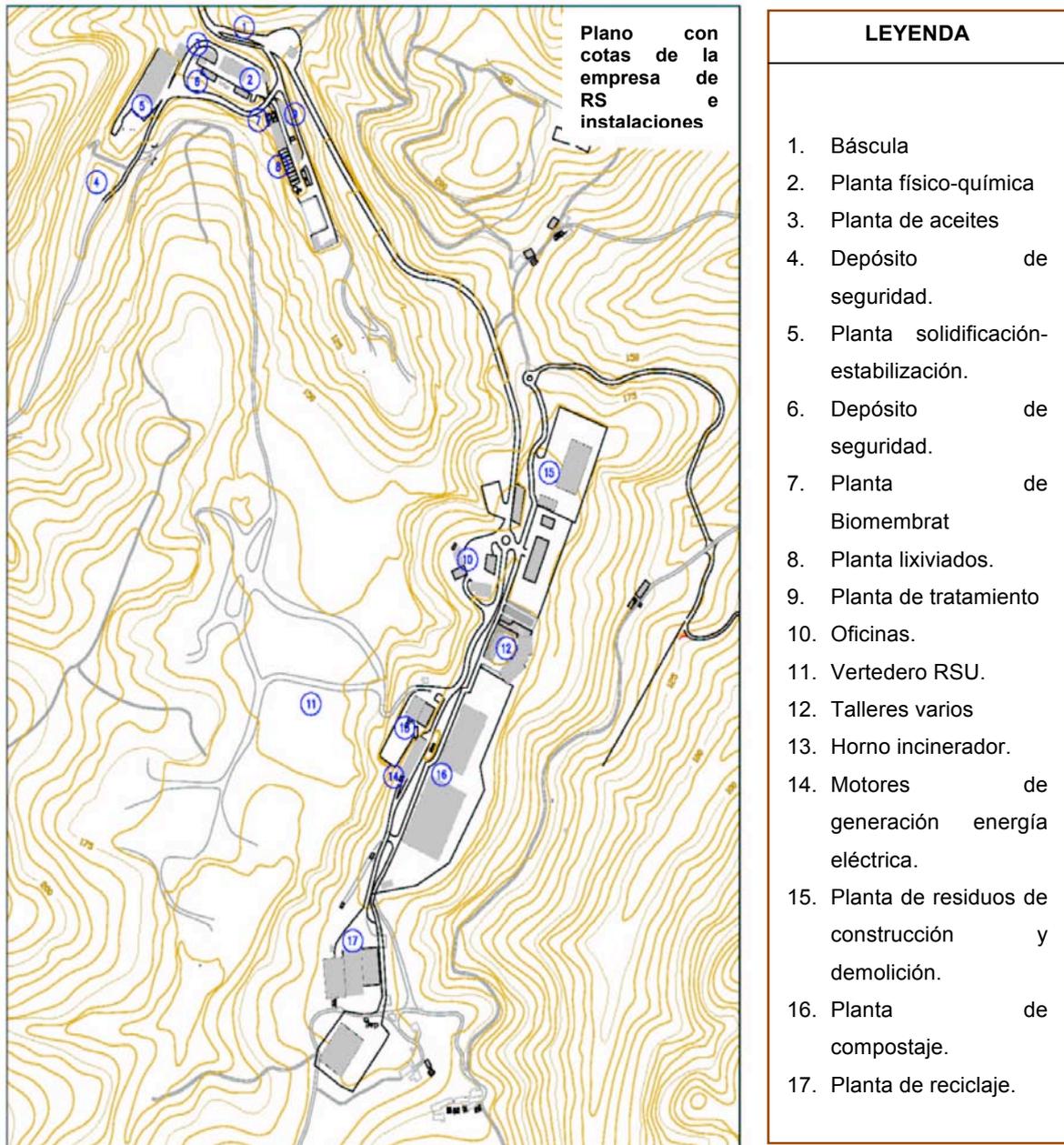


Figura 9.1. Plano de la empresa e instalaciones principales



9.1. Descripción de los procesos y actividades

A continuación se describen de forma breve las características fundamentales de las instalaciones que son objeto de análisis así como algunos datos relevantes de cara a la protección contra explosiones. habiendo contado con la colaboración e información facilitada por mi compañero de trabajo José Luís Lucas Sánchez.

Descripción de las instalaciones

- **Captación de biogas: Estaciones de regulación y medida**

El vertedero central cuenta con un depósito controlado de residuos urbanos (RSU) en activo que lleva recibiendo este tipo de basuras desde el año 1987. La gestión de dicho depósito es de tipo anaerobio, con tapado continuo de los residuos mediante tierras de sellado.

En este depósito, como en todos los de tipo anaerobio en los que se vierte materia orgánica, se genera un gas denominado biogas. La composición fundamental de este biogas de vertedero es el metano -CH₄- (en torno al 50%) y el dióxido de carbono -CO₂- (habitualmente en torno a 45%).

Es por su contenido en metano por lo que el biogas se puede emplear como combustible para los equipos de valorización (grupos generadores, quemadores del horno de incineración, etc.), pero también este compuesto es el que da al biogas su carácter “peligroso”. Esto es, por su contenido medio en metano el biogas es combustible pero también puede crear mezclas explosivas al mezclarse con el aire, por lo que es necesario dotar a la instalación de biogas de una serie de elementos de seguridad.

Otros compuestos minoritarios (ácido sulfhídrico -H₂S-, amoníaco -NH₃-, etc.) también pueden influir sobre la peligrosidad de un biogas de vertedero aunque en el caso del vertedero de estudio no se alcanzan niveles de importancia, según la información disponible.

Inicialmente pensado para limitar el impacto del biogas generado en el depósito y posteriormente para aprovechar dicho recurso, se instaló una planta de captación y valorización de biogas.

Podemos considerar los siguientes elementos principales en esta planta:

- Los pozos de captación de biogas, situados en la propia celda de vertido de residuos, realizados en la masa de vertido y encargados de “captar” la mayor proporción posible



de biogas. Estos pozos se van recreciendo (subiendo en altura) según aumenta la altura de vertido y también se van construyendo nuevos pozos en zonas de nueva explotación. Estos pozos tienen una parte enterrada en el residuo mientras que su cabeza está al aire libre (foto 9.1).

- Las líneas de conducción de biogas que conducen el biogas desde los pozos hasta las estaciones de regulación y medida (ERM), y desde allí a las centrales de extracción y posteriormente a los puntos de valorización. Se trata de conducciones de polietileno de alta densidad de diferentes diámetros. La mayor parte de las tuberías se tienden al aire libre y conducen el gas en depresión, aunque existen conducciones (de mayor diámetro) que llevan el gas a presión (baja o media) y cuyo tendido es parcialmente enterrado.



Foto 9.1. Pozo de captación y tubería de recogida de gas

El objetivo del sistema de recolección del gas es extraer activamente el gas generado en los desechos del vertedero y transferirlo por medio de un sistema de tuberías a un único punto, donde se utiliza o se destruye. El sistema instalado en el campo debe operar bajo presión negativa (justo debajo de la presión atmosférica) para recolectar el mayor volumen del gas generado en el vertedero, pero sin succión excesiva que pueda conducir a una introducción no deseada de aire en los depósitos de desechos.

Recolectar menos gas del que se está generando puede conducir a emisiones a través del sistema de cobertura (cubierta, sello lateral y de fondo) del vertedero o a migración subterránea del gas. La sobre extracción del gas (tratar de recolectar más gas del que se está generando) y lleva consigo efectos adversos como la introducción del aire en el desecho. Esto viene seguido de un aumento en la temperatura del desecho que en la mayoría de los casos da como resultado incendios subterráneos. Por lo tanto,

balancear el campo del gas (es decir, balancear el sistema para extraer el biogás) es el aspecto más importante de la operación del sistema de recolección del gas de vertedero. El balanceo correcto exige comprender los principios del diseño, construcción y operación de la recolección del gas, capacitación adecuada y experiencia.

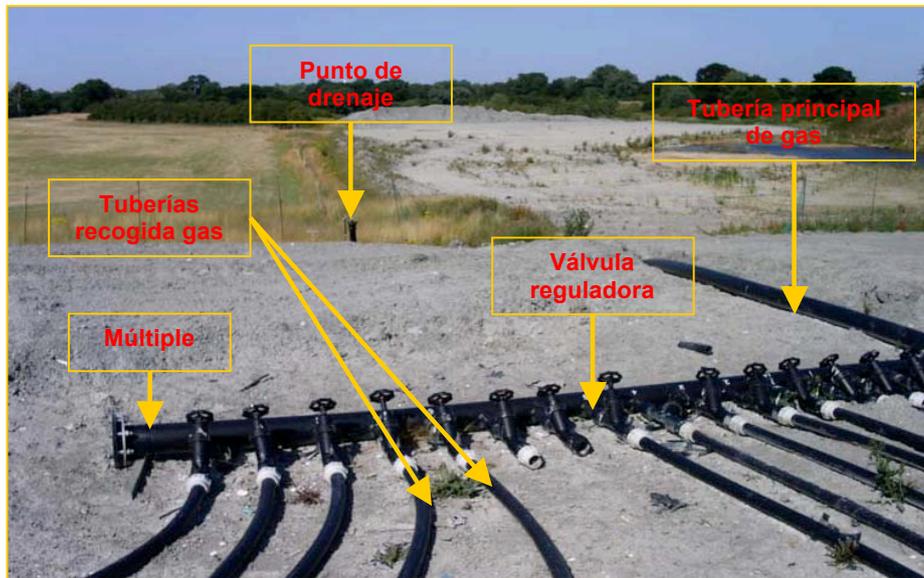


Foto 9.2. Sistema de recogida de biogás

El sistema de recolección de gas (foto 9.2) se compone de:

- Pozos de gas perforados.
- Cabezales de pozos que consisten en un codo de polietileno de alta densidad que conectan la membrana del pozo con la tubería de recolección de gas.
- Tubos de recolección del gas que van desde los cabezales de pozos hasta los múltiples.
- Múltiples de distribución con conexiones a los tubos de recolección de gas por medio de válvulas reguladoras y conectadas a la tubería principal de gas. Los múltiples cuentan con drenajes automáticos para eliminar el condensado.
- Tubería principal de gas que conecta los múltiples con las ERM, con las antorchas de gas.
- Las estaciones de regulación y medida (foto 9.3), donde se controla el biogás captado en los diferentes pozos o grupos de pozos, ajustando los parámetros de captación. En funcionamiento normal el gas que circula por estas estaciones está en depresión (valores de 0 a -100 mbar aproximadamente) aunque pueden presentarse presiones positivas de gas en casos particulares como las paradas totales o parciales de



captación en las líneas (por el efecto de la presión ejercida por el biogas del vertedero).



Foto 9.3. Estación de Regulación y Medida (ERM)

Las Estaciones de Regulación y Medida (ERM) se identifican por números. En la actualidad existen las siguientes: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10.

- Las centrales de extracción, dotadas de las soplantes que generan la depresión necesaria en las conducciones previas así como en estaciones y pozos, dando la presión suficiente en el lado de aspiración. Por ello en estas centrales habrá conducciones en depresión y conducciones en presión (baja o media).
- Las antorchas (fotos 9.4. y 9.5.) para quemar el excedente de biogas, tanto pequeños caudales durante la máxima valorización de biogas como para caudales mayores durante momentos de paradas en alguno de los grupos.

En el lado de presión negativa de la planta, el gas fluye desde la tubería principal de gas por la válvula reguladora y dispositivo elevador de presión hacia el soplador o abanico. El abanico eleva la presión del gas y lo empuja por la tubería hacia la línea de gas del mechero principal y la línea del mechero piloto, y ambos están equipados con parallamas y válvula de acción rápida de cerrado. El mechero principal y el piloto están ubicados dentro de la chimenea que también contiene el encendedor, el detector de llamas y la el termo-cople (foto 9.4). Las celosías de ventilación de aire localizadas en la chimenea regulan la cantidad de aire necesario para la combustión del gas. La cantidad del flujo de aire se puede regular o aislar por medio de una válvula manual.

Las antorchas están equipadas con:

- Sistema de encendido automático.
- Control del flujo.

- Detección de llamas/dispositivo de control.
- Válvulas de cierre de acción de alta velocidad controladas por las señales de los dispositivos de monitoreo.
- Cojinete y conexiones anti-vibración para evitar la desconexión de los tubos y del equipo durante la operación normal.
- Analizador continuo de la entrada de gas con alarmas de bajo metano y alto oxígeno, conectado al panel de control.

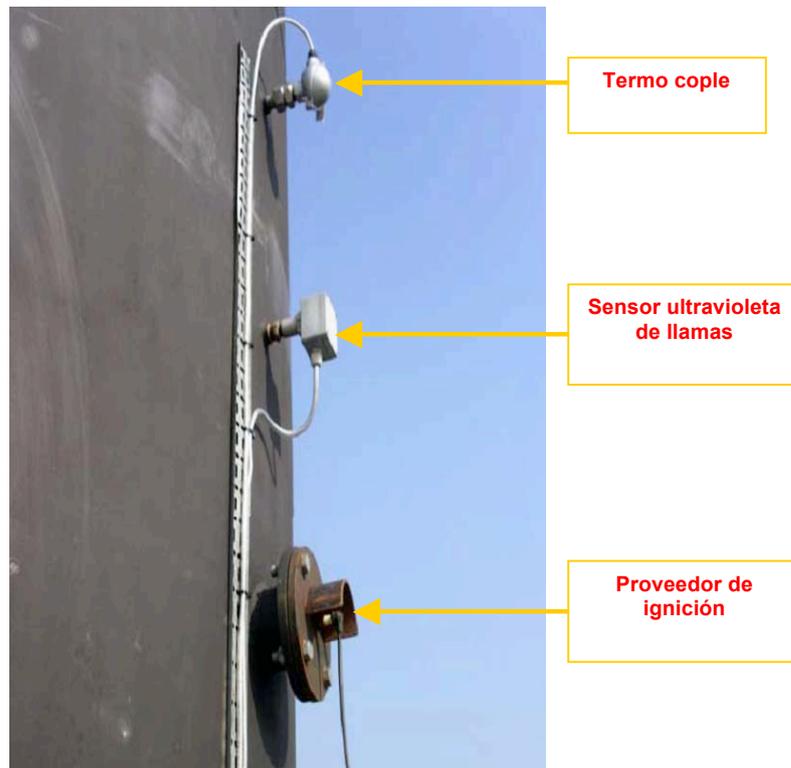


Foto 9.4. Larguero de la antorcha

Las medidas de protección contra explosiones incluyen la prevención de crear atmósferas potencialmente explosivas que penetren el sistema del gas. Esto se logra manteniendo el sistema de recolección de gas en condiciones máximas con concentraciones de gas muy por encima del nivel del límite superior de inflamabilidad (LSI). Las revisiones del campo de gas se llevan a cabo diariamente. El sistema de análisis continuo de gas instalado en la antorcha también evita que gas de mala calidad fluya en el sistema y la advierte al operador o cierra la planta. En la planta se realizan inspecciones regulares de conformidad con el programa de mantenimiento a fin de garantizar la correcta operación de todos los elementos de la planta y para evitar escapes de gas y filtraciones de aire en el sistema.

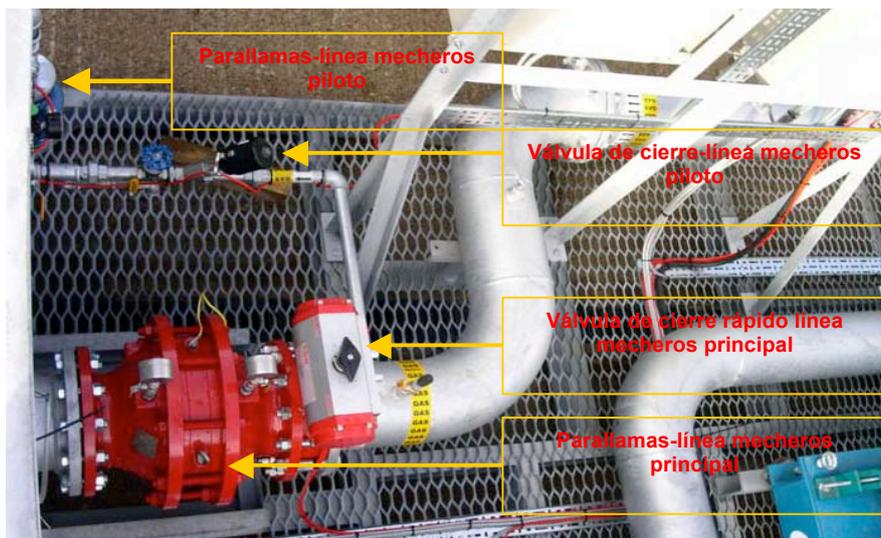


Foto 9.5. Base de la antorcha con los elementos de seguridad

- Las centrales de control de captación y regulación de biogás, supervisan el funcionamiento de toda la planta y permiten a los operadores conocer y variar los parámetros de trabajo establecidos, siempre siguiendo los necesarios criterios de seguridad. Estas centrales se consideran zonas seguras, siempre y cuando se cumplan las condiciones previstas para ello. Asimismo, son elementos vitales para el funcionamiento de la planta y por ello también para el correcto mantenimiento de seguridad en las instalaciones (condición necesaria aunque no suficiente ya que debe de complementarse con otros elementos y tareas de seguridad).
- Las unidades de análisis del biogás, con los que se determina el contenido en metano y oxígeno del biogás disponible en distintos puntos (líneas de entrada de las estaciones, colectores principales, puntos de valorización, etc.).
- Elementos de aprovechamiento del biogás: grupos generadores, caldera y horno de incineración de residuos hospitalarios.
- Demás elementos auxiliares necesarios: equipos de aire comprimido, etc.

Los caudales de trabajo de la planta son importantes, con valores que dependen de cada elemento (ERM, antorchas, etc.). Así, se puede considerar que las ERM trasiegan caudales que pueden alcanzar y superar los 800 Kg/h, dependiendo del tipo de estación (nº de entradas, etc.). Las centrales de extracción montan soplantes de 600 kg/h y 2.000 kg/h. Las antorchas instaladas tienen caudales de trabajo de 2.000 y 1.600 kg/h respectivamente, mientras que en los grupos generadores se pueden consumir en torno a los 3.250 Nm³/h de biogás.



En lo relativo a las presiones de los gases hemos indicado anteriormente que parte del tendido está habitualmente en depresión (valores habituales de la presión relativa entre -150 mbar y 0 bar), concretamente en pozos, líneas, ERM y conducciones entre estaciones y central de extracción; mientras que a partir de las soplantes el biogas estará a presión (positiva), con valores habituales entre 0 y 200 mbar.

En lo referente a la temperatura del gas, los valores normales de trabajo se encuentran en un rango entre 25°C (en caso de invierno) y 60 °C, siendo menor cerca de los pozos y mayor a la salida de las soplantes.



Foto 9.6. Vista panorámica del sistema de captación



Foto 9.7. Vista panorámica de una estación de regulación y medida

- **Red de consumo de biogas**

Se instaló una planta de captación y valorización de biogas que inicialmente estaba pensada para limitar el impacto del biogas generado en el depósito y posteriormente para aprovechar dicho recurso. La primera planta de este tipo se instaló a finales de los años 80 y posteriormente se fue ampliando, tanto la parte de captación como la de combustión y valorización.

El aprovechamiento del biogas se realiza en varios tipos de instalaciones:

- Con grupos generadores formados por motores de combustión interna y alternador para generación de energía eléctrica que se vierte a la red eléctrica general. Se dispone en una nave central con 8 motores con una potencia total instalada de unos 7.000 kW.
- Mediante un grupo generador para generación de energía eléctrica que se destina a autoconsumo de las propias instalaciones. Este motor situado en la planta de tratamiento de lixiviados tiene una potencia instalada aproximada de medio megavatio.



- Con dos hornos, uno de tipo estático y otro rotativo, para la incineración de residuos hospitalarios, empleando el biogas como combustible.

Los excedentes de estas instalaciones son enviadas a las dos antorchas existentes para su combustión controlada.

Como ya se ha indicado las centrales de control de captación, regulación y valorización de biogas constituyen elementos vitales para el correcto funcionamiento de la planta y para el mantenimiento de seguridad del conjunto de las instalaciones.

Los caudales de trabajo de estas instalaciones son importantes, con valores que dependen de cada tipo de equipo. Así se puede considerar que los grupos generadores pueden consumir en torno a los 3200 Kg/h de biogas.

En lo relativo a las presiones del gas, a partir de las soplantes el biogas presenta presión (positiva), con valores habituales entre 0 y 200 mbar. El biogas que circula por estas conducciones está por tanto en baja o media presión. Caso especial es el gas que se comprime para introducirlo en la precámara de los motores de combustión, que puede llegar hasta los 3,5 bar.



Foto 9.8. Motor de generación de energía eléctrica



Foto 9.9. Antorcha de combustión



- **Almacenamiento de Metanol para tratamiento de Lixiviados**

Los lixiviados procedentes del depósito de seguridad de residuos sólidos urbanos (RSU), y del depósito de seguridad de residuos industriales orgánicos son almacenados, previo a su tratamiento, en una balsa de homogeneización. Los lixiviados se envían por bombeo hacia la planta de tratamiento. En esta instalación son depurados mediante un proceso biológico de nitrificación/desnitrificación, seguido de una ultrafiltración.

El sistema trabaja a presión, alcanzándose 2,5 bar en los reactores, entre 4,5 y 9,5 bar en las calles de ultrafiltración, 3,5 bar en el colector de lodos de las calles, y entre 6 y 7 bar en el calderín de los compresores. En la planta existen controles de seguridad ante eventuales subidas de presión como son válvulas de regulación, parada automática de la instalación y presostatos.

El proceso se realiza a una temperatura entre 37-40 °C y necesita el aporte de los siguientes reactivos:

- Metanol: (o materia orgánica fácilmente asimilable). La planta posee un depósito enterrado de 30 m³ de capacidad. El metanol se receptiona en cubas que se descargan en dicho depósito, esta instalación dispone de toma de tierra para conectar a la cuba. Las bombas de aporte de metanol al proceso desde el tanque son de tipo Ex. Está provista la colocación de dispositivos antidetonantes en el llenado, venteo y aspiración.
- Antiespumante: La planta tiene un contenedor de 600 litros y dos bombas de aporte. El consumo habitual es de unos 250 litros al mes. El llenado del contenedor se realiza mediante trasiego con bomba automática. Este producto es irritante y sus derrames originan superficies muy deslizantes.
- Ácido fosfórico concentrado: La planta prevé un posible aporte de fosfórico para mantener una relación C-P-N adecuada para el tratamiento biológico. Para ello posee un contenedor de 600 litros y una bomba dosificadora.

Para el correcto funcionamiento de la instalación se realizan varias operaciones de control y mantenimiento:

- Sistema de ultrafiltración: los lodos biológicos se separan de la fase líquida mediante un sistema de ultrafiltración que consta de 5 calles con 10 módulos de UF cada una. Es necesario un lavado periódico de dichas calles para mantener un adecuado



rendimiento de las mismas. Para ello se utilizan detergentes ácidos, alcalinos e hipoclorito, que son aportados manualmente al tanque de lavado.

- Filtros de entrada de lixiviado: la instalación posee un filtro previo a la entrada de lixiviado a las bombas. Éste se encuentra sumergido en la balsa de homogeneización de lixiviados. Una vez al año se procede a su limpieza. Además, dentro del edificio existen otros 2 filtros con cuchillas que se deben limpiar mensualmente.
- Purga de lodos: Es necesario purgar unos 25 m³ de lodos diariamente. Esta purga se realiza a través de una manguera hacia una cuba que se encuentra en el exterior de la planta.
- Verificación visual y anotación de los contadores, niveles: Diariamente se rellena un estadillo con la información más relevante de la planta. Para ello, es necesario inspeccionar cada uno de sus componentes: panel de mandos, bombas de entrada de lixiviado y nivel de balsa, bombas y calles de UF, compresores de aire, filtros, niveles de reactivos, cubeto de seguridad, tanque de espumas, reactores, intercambiador de calor y balsa de permeado.

La instalación posee de sistemas automáticos de regulación de la presión, sistema de detección de humos y aumento de la temperatura en caso de incendio.



Foto 9.10. Tanques de almacenamiento de metanol

Existen dos tanques independientes para el almacenamiento de Metanol, uno de 35 m³ y otro de 50 m³ debidamente certificados al respecto, cada uno de ellos consta de una estación de bombeo de metanol hacia la planta de tratamiento biológico. Las dos impulsiones se unen en un colector común.



La zona de descarga está debidamente señalizada y se dispone de procedimiento de descargas.

- **Nave de clasificación de disolventes**

La nave de clasificación de disolventes se encuentra situada en la Planta de Solidificación-Estabilización en el Area de Residuos Peligrosos. La nave se compone de una estructura metálica con techo semiabierta y ventilada.

En esta nave se clasifican y almacenan diferentes tipos de disolventes en bidones de 200 litros. Los más habituales son disolventes no halogenados. Se procede al tratamiento de unas 225 toneladas al año. Por término medio en la nave están almacenadas unas 30 toneladas al mismo tiempo. Estos disolventes se clasifican en:

- Disolventes para pinturas.

Se trata de mezclas de disolventes con composiciones variadas, si bien habitualmente puede contener proporciones predominantes de Benceno, Tolueno y/o Xileno. Se almacenan unas 10 Tn/año.

- BRENNTSOLVAP.

Se trata de una mezcla de disolventes orgánicos con Xileno y Metilisobutilcetona como principales componentes peligrosos. Se almacenan unas 100 Tn/año.

- Dimetilacetamida (DMA).

La Dimetilacetamida, uno de los derivados de las Metilaminas, se emplea como disolvente de fibras acrílicas y en síntesis muy específicas de química fina y farmacia. Se almacenan unas 15 Tn/año.

Además se almacenan unas 24 Tn/año de diversas mezclas de disolventes y acetonas

Los bidones se almacenan cerrados si bien se realizan labores de trasvase manual. Este trasvase manual se efectúa con una bomba manual con marcado EX.

- **Equipos característicos**

En este apartado se describen instalaciones y equipos de apoyo que forman parte de plantas de tratamiento o de otras instalaciones como pueden ser los talleres mecánicos o las casetas de regulación del biogas.



Instalaciones para el almacenamiento de botellas de gases

Se refiere a casetas de almacenamiento de botellones de gases necesarios para determinados procesos productivos. Estas casetas se encuentran distribuidas por las distintas instalaciones y se relacionan a continuación:

- Taller de calderería.
- Estación de regulación y medida 1.
- Estación de regulación y medida 2.
- Estación de regulación y medida 3.
- Laboratorio.
- Planta de tratamiento térmico.



Foto 9.11. Almacenamiento de botellones de gases

Dado que el almacenamiento de botellas de gases (foto 9.11) está regulado por normativa vigente más específica, solamente se tienen en cuenta potenciales atmósferas explosivas que pudieran formarse como consecuencia de escapes en las válvulas.

Planta de tratamiento térmico: Tolva de almacenamiento de harinas cárnicas

La alimentación de harinas cárnicas al horno rotatorio, situado en la Planta de tratamiento térmico, se realiza mediante el basculamiento de las mismas sobre una tolva (foto 9.12) y su posterior traslado al horno mediante un tornillo sinfín.



Foto 9.12. Vista de la tolva de harinas cárnicas



Las harinas llegan en camiones que basculan el contenido en el interior de la tolva una vez que ha sido abierta. La tolva de harinas cárnicas funciona de manera discreta en el tiempo, es decir, se pone en funcionamiento solamente cuando llegan harinas cárnicas para ser tratadas. El resto del tiempo la tolva permanece cerrada y parada.

Planta de tratamiento térmico: Almacenamiento de carbón activo

Dentro de la sala de aditivos, en la planta de tratamiento térmico se encuentra se realiza el almacenamiento y dosificación de carbón activo, necesario para el sistema de tratamiento de los gases procedentes de la combustión.

El almacenamiento se realiza mediante sacos cerrados situados sobre palets de madera (Foto 9.13). La dosificación (foto 9.13) se realiza manualmente tres veces al día aproximadamente (una vez por turno) sobre un depósito con tapa.



Foto 9.13. Almacenamiento de carbón activo



Foto 9.14. Sistema de dosificación de carbón

En la sala existen cuadros eléctricos y mangueras eléctricas pertenecientes a la Planta de Tratamiento Térmico.

Taller mecánico: Cargador de baterías

En el taller mecánico de manera eventual se utiliza un equipo de carga de baterías para recargar las baterías de los vehículos de la empresa. La carga se realiza directamente en el propio vehículo. Habitualmente los portones del talle se encuentran abiertos. Además se dispone de ventilación forzada mediante tres ventiladores situados en el paramento que se encuentra al frente de los portones.



9.2. Identificación de las sustancias utilizadas

Una condición necesaria, aunque no suficiente, para que se produzca una explosión, es la presencia de sustancias inflamables en el proceso productivo.

Las sustancias inflamables pueden estar presentes de forma evidente como materia prima o auxiliar del proceso, o de manea no tan obvia, como residuo, producto intermedio o acabado, o generadas como consecuencia de un mal funcionamiento de la instalación.

Es necesario identificar las sustancias peligrosas que puedan estar presentes en la instalación y en el proceso, ya que sus características determinarán en gran medida las acciones a adoptar en adelante para garantizar los niveles de seguridad adecuados.

Desde el punto de vista del tipo de sustancias peligrosas se puede distinguir entre:

- Gases, vapores y nieblas.
- Polvos inflamables

El listado de las sustancias inflamables utilizadas se muestra en la tabla 9.1.

SUSTANCIAS INFLAMABLES UTILIZADAS								
Sustancia inflamable		Punto inflamabilidad (°C)	LIE		Volatilidad		Densidad relativa del gas o vapor respecto al aire	T ^a ignici. (°C)
Nombre	Composición		kg/m ³	vol. %	Tensión de vapor a 20 °C kPa	Punto de ebullición °C		
Red de consumo de biogas								
Metano	CH ₄	-°	0,033	5	-	-	0,55	535
Almacenamiento de Metanol para tratamiento de Lixiviados Biomembrat								
Metanol	CH ₃ OH	12		6	12,3	65	1,1	385
Nave de clasificación de disolventes								
Disolventes para pinturas	Contiene Benceno, Tolueno, Xileno	<0		0.6	>aire	>25	0.87	v
BRENNT SOLV AP	Contiene Xileno y Metilisobutilcetona	14	-	-	-	-	-	-
Dimetilacetamida	N,N-Dimetilacetamida	63	-	1.8	2.66	166	0.945	335
Mezclas	Nafta (petróleo)	57	-	0.6	0.4	180	0.80	>200
Surtidor de combustible								
Gasoil	C ₉ -C ₂₆	>55	-	0.6	<0.3	151	<aire	250
instalaciones para el almacenamiento de botellas de gases								
Hidrogeno	H ₂		-	4		-253	0.07	560



Acetileno	C2H2	-	-	2.4	-	-84	0.9	325
Propano	C3H8	-	-	2.2	-	-42.1	1.5	470
Oxígeno	O2	-	-	-	-	-183	1.1	-
Planta de tratamiento térmico: Tolva de almacenamiento de harinas cárnicas								
Harinas cárnicas	-	-	-	-	-	-	-	-
Planta de tratamiento térmico: Almacenamiento de carbón activo								
Carbón activo	-	-	0.06	-	-	-	-	-
Taller mecánico: Cargador de baterías								
Hidrógeno	H2	-	-	4	-	-	0.07	560

Tabla 9.1. Sustancias inflamables utilizadas en la Planta de RSU

9.3. Clasificación de zonas

La metodología que vamos a utilizar para clasificar las zonas de riesgo de este caso de estudio van a ser las indicadas en los capítulos 7 y 8, haciendo especial hincapié en la metodología cualitativa según norma UNE 60079 -10 por resultar de más fácil aplicación teniendo en cuenta los datos disponibles.

Retomamos la tabla siguiente (tabla 9.2) para clasificación de zonas vista en el capítulo 5 en la cual intervienen como vimos el grado de escape y el grado y disponibilidad de ventilación.

Grado de escape	VENTILACIÓN						
	Grado						
	Alto			Medio			Bajo
	Disponibilidad						
	Muy buena	Buena	Mediocre	Muy buena	Buena	Mediocre	Muy buena, buena o mediocre
Continuo	No peligrosa	Zona 2	Zona 1	Zona 0	Zona 0 + Zona 2	Zona 0 + Zona 1	Zona 0
Primario	No peligrosa	Zona 2	Zona 2	Zona 1	Zona 1 + Zona 2	Zona 1 + Zona 2	Zona 1 ó Zona 0 (*)
Secundario	No peligrosa	No peligrosa	Zona 2	Zona 2	Zona 2	Zona 2	Zona 1 ó Zona 0 (*)

Tabla 9.2. Tabla clasificación zonal ATEX

Notas:

"+" significa "rodeada por".

(*) será zona 0 si la ventilación es tan débil y el escape es tal que prácticamente la atmósfera explosiva esté presente de manera permanente, es decir, es una situación próxima a la de ausencia de ventilación.



9.3.1. Extensión de zonas

La extensión de la zona depende fundamentalmente de factores físicos y químicos inherentes a las propiedades intrínsecas de la sustancia inflamable, al propio proceso de funcionamiento de la instalación y también a sus características constructivas.

Entre los factores que se han tenido muy presentes a la hora de cuantificar la extensión de las zonas destacan:

- **Cuantía del escape de gas.** La extensión de la zona aumenta al hacerlo la cuantía del escape, la cual depende de la geometría de la fuente de escape, de la velocidad de escape, de su concentración, etc.
- **Límite inferior de explosividad (LIE).** Para un volumen de escape dado, la extensión de la zona aumenta cuanto más bajo sea el LIE.
- **Densidad relativa del gas.** La extensión de la zona a nivel del suelo aumenta con una densidad del gas superior a la del aire (especial atención a pozos, arquetas o depresiones) y la extensión vertical a partir del escape se incrementa con una densidad inferior a la del aire (peligro en los falsos techos).
- **Ventilación.** Con un aumento de la ventilación, la extensión de la zona clasificada se reducirá. Así, es importante intentar que se eliminen ó reduzcan los obstáculos que impiden la ventilación, pues aumentan la extensión de la zona. Sin embargo, ciertas barreras constructivas (paredes, techos,...) pueden ayudar a limitarla.

Listado de fuentes de escape y clasificación de zonas

A continuación se relacionan las fuentes de escape y la clasificación de zonas de las siguientes instalaciones:

- Captación de biogás: estaciones de regulación y medida.
 - Estación de regulación y medida 1 (ERM 1).
 - Estación de regulación y medida 2 (ERM 2).
 - Estación de regulación y medida 3 (ERM 3).
 - Estación de regulación y medida 4 (ERM 4).
 - Estación de regulación y medida 5 (ERM 5).
 - Estación de regulación y medida 6 (ERM 6).
 - Estación de regulación y medida 7 (ERM 7).
 - Estación de regulación y medida 8 (ERM 8).
 - Estación de regulación y medida 9 (ERM 9).
 - Estación de regulación y medida 10 (ERM 10).



- Red de consumo de biogas.
 - Antorcha de alta temperatura.
 - Antorcha llama libre.
 - Sala motores red.
 - Sala compresores biogas.
 - Sala enfriador biogas.
 - Sala hornos de incineración.
- Almacenamiento de Metanol para tratamiento de Lixiviados.
- Nave de clasificación de disolventes.
- Instalaciones para el almacenamiento de botellas de gases.
- Planta de tratamiento térmico: Tolva de harinas cárnicas.
- Planta de tratamiento térmico: almacenamiento de carbón activo.

Procedemos seguidamente a realizar la clasificación zonal de las siguientes instalaciones representativas de la planta de tratamiento y que son:

- Estación de regulación y medida 1 (ERM 1).
- Antorcha de alta temperatura
- Tanques de Metanol
- Instalación de almacenamiento de botellas de gases.
- Planta de tratamiento térmico: almacenamiento de carbón activo.

Para efectuar la clasificación ATEX de las secciones anteriores vamos a hacer uso de la metodología cualitativa según norma UNE 60079-10. Posteriormente aplicaremos la metodología del programa ProgEx y el método CFD con el programa FLUENT a la Estación de Regulación de Medida y así poder comparar.



9.4. Metodología cualitativa según norma UNE 60079-10

9.4.1. Estación de Regulación y Medida 1 (ERM 1)

La instalación ha sido comentada anteriormente, aquí simplemente describimos los elementos de la instalación que vamos a analizar y que son:

- Válvulas de regulación de las líneas de entrada y colector principal.
- Bridas de unión de tuberías en los tramos del colector principal.
- Puntos de toma de muestras distribuidos por toda la ERM.
- Bridas de unión de tuberías en la arqueta de salida del colector.

Los resultados de aplicar la metodología cualitativa se recogen en la tabla 9.3. Gráficamente se representa la clasificación zonal para la ERM en la figura siguiente (figura 9.2).

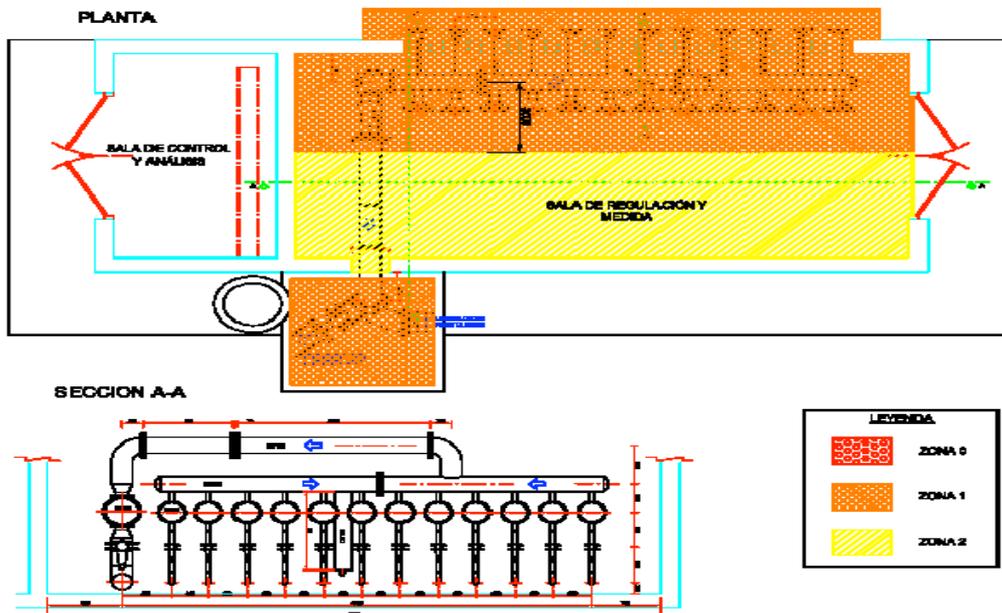


Figura 9.2. Clasificación zonal ATEX de la ERM 1

Teniendo en cuenta esta metodología con los resultados que se recogen en la tabla 9.3, se clasificaría como Zona 1 tanto la arqueta de salida del colector como el colector principal y bridas de unión de las tuberías unidas al mismo. El resto de la sala de ERM quedaría clasificada como Zona 2.

9.4.2. Antorcha de Alta Temperatura

Los elementos estudiados y los resultados de la clasificación se recogen en la tabla 9.4. Se han analizado los sellos de las válvulas de regulación pertenecientes a los tramos del colector de gas de entrada, las bridas de unión de tuberías para dicho colector y la arqueta de salida, también la salida de gas a la atmósfera en la parte superior de la cámara de combustión y el interior de dicha cámara donde se produce la mezcla en la antorcha.

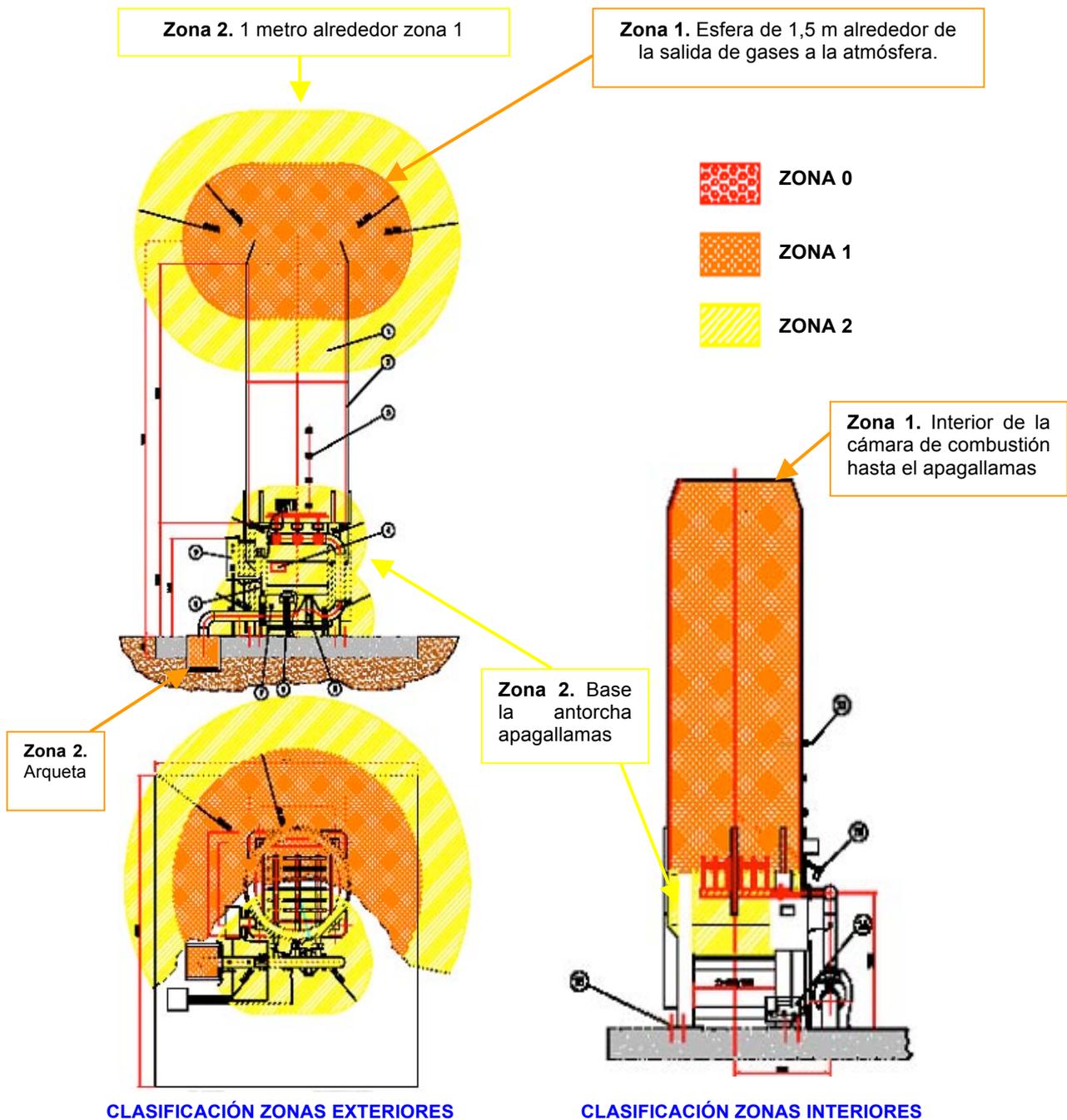


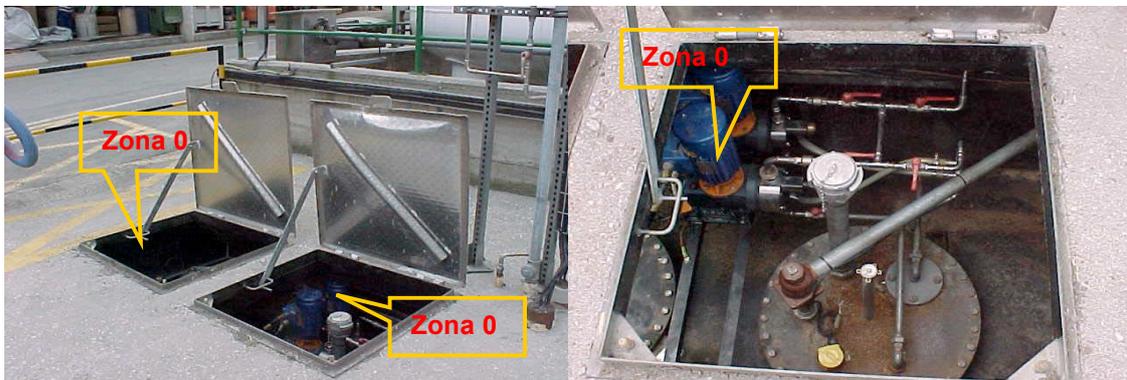
Figura 9.3. Clasificación ATEX para la antorcha de alta temperatura



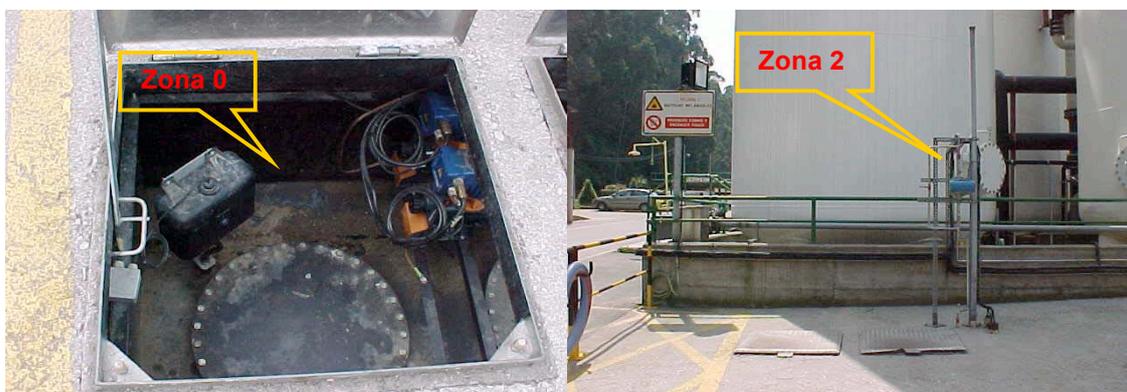
De forma gráfica se recoge la clasificación zonal en la figura anterior (figura 9.3). En ella, se puede apreciar como se clasifican las diferentes partes de la antorcha. La salida de gas a la atmósfera se clasifica como Zona 1 en un entorno de una esfera de 1,5 metros y una esfera de 1 metro alrededor de esta zona; el interior de la cámara de combustión es clasificado como Zona 1 hasta el apagallamas y desde éste hasta la base de la antorcha se clasifica como Zona 2. También le corresponde a la arqueta la clasificación Zona 1.

9.4.3. TANQUE DE METANOL

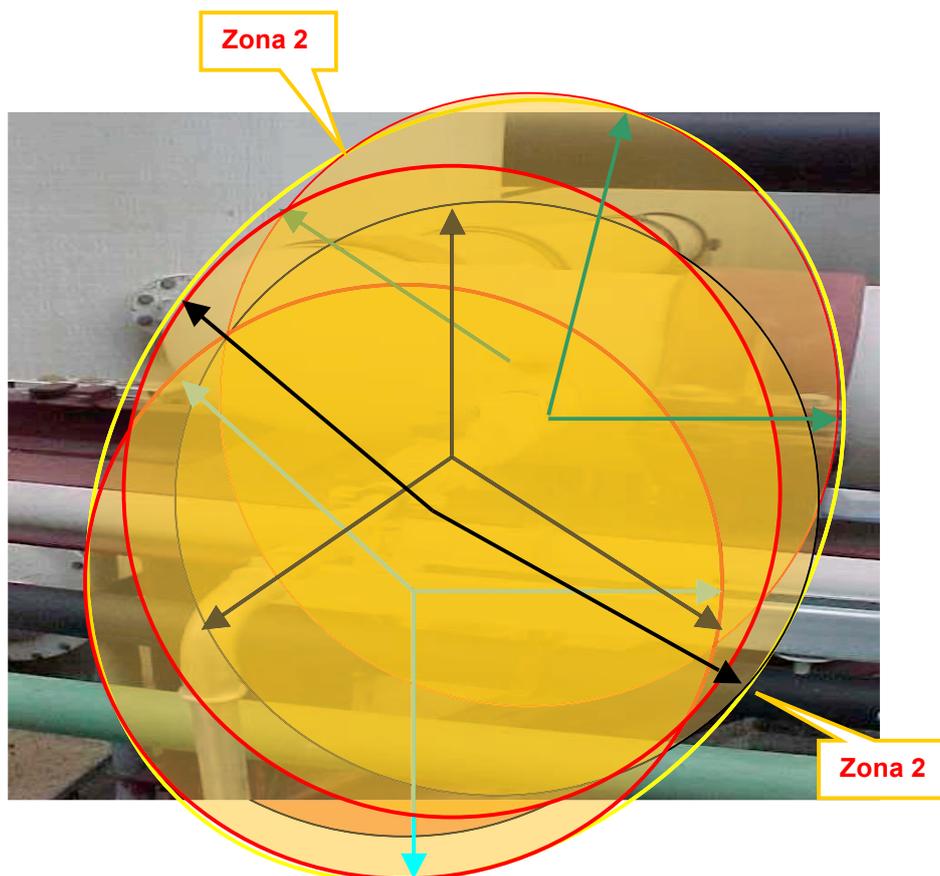
Se representa gráficamente en las fotos siguientes (fotos 9.15 a 9.18) la clasificación zonal para el tanque de metanol (véase también tabla 9.5). Los elementos estudiados son: el interior del depósitos subterráneo (Zona 0), la arqueta de depósitos subterráneo (Zona 0) que comprende, los dispositivos de sobrepresión y sobrellenado y las bombas de alimentación. Como Zonas 2 se clasifican las tuberías de alimentación desde las bombas hasta el antirretorno y la propia válvula de ídem.



Fotos 9.15. y 9.16. Clasificación de las arquetas del depósito subterráneo



Fotos 9.17. y 9.18. Vista arqueta derecha y exterior tanque de metanol



Fotos 9.19. Clasificación de la Zona 2 (esfera de 1,5 metros)

9.4.4. CLASIFICACIÓN DE BOTELLONES DE GAS

Se dispone de zonas de almacenamiento de botellas de gases de acetileno, propano y otros gases. Estas botellas se encuentran ubicadas en dos emplazamientos con buena ventilación. Las principales fugas pueden venir motivadas por escapes en las válvulas.



Para este emplazamiento (tal y como se recoge en la tabla 9.6) tenemos la siguiente clasificación:

- Zona 0: No.
- Zona 1: No.
- Zona 2: Espacio interior y exterior del almacén con una distancia de 2,3 metros en todas las direcciones abarcando todas las botellas y extendiéndose a ambos lados a partir de las botellas a ambos lados de la fila de botellas

9.4.5. ALMACENAMIENTO DE CARBÓN

La clasificación zonal se recoge en la tabla 9.7 y en la foto 9.22. Las zonas clasificadas como Zona 20 son el interior de la tolva, el interior de las tuberías y el interior del mezclador. El emplazamiento en su conjunto se clasifica como Zona 21 motivado por las operaciones manuales de descarga que se realizan.

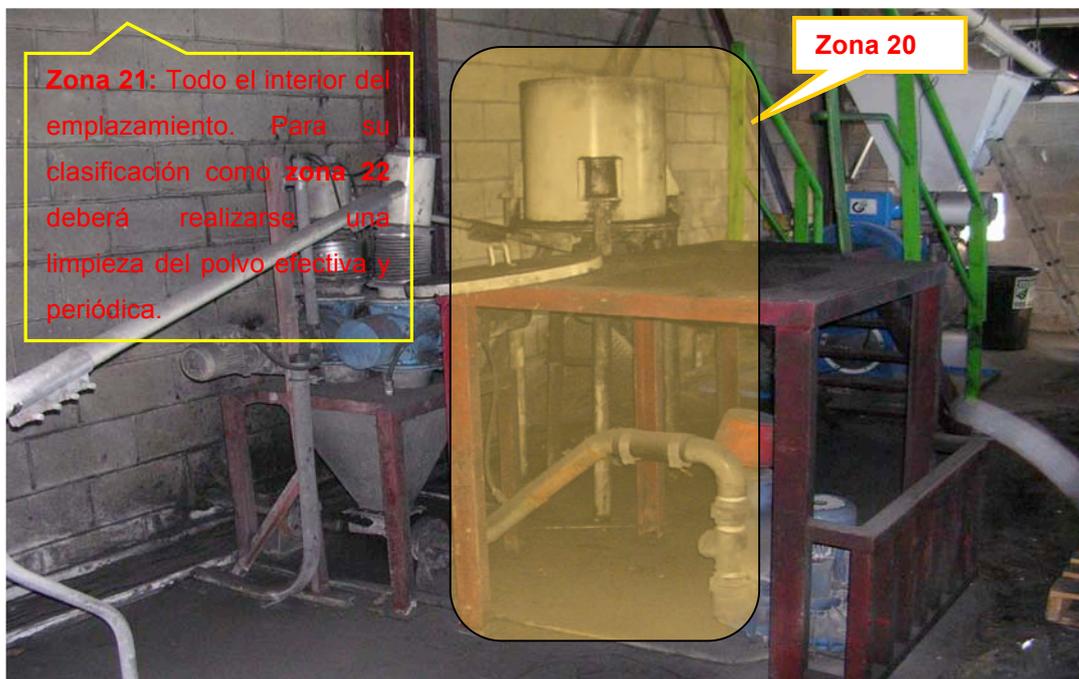


Foto 9.22. Clasificación ATEX para la zona de almacenamiento de carbón

En las tablas siguientes (tablas 9.3 a 9.6) se recogen los resultados de la clasificación de zonas ATEX para las instalaciones estudiadas según la metodología cualitativa.

CLASIFICACIÓN DE ZONAS (ERM1)														
Fuentes de Escape			Sustancia inflamable				Ventilación			Emplazamiento peligroso				
Nº	Descripción	Localización	Grado de escape	Nombre	Tª y P de operación		Estado	Tipo	Grado	Disponibilidad	Tipo de zona	Extensión zona (m)		Observaciones
												Vertical -	Horizontal	
1	Sello de las válvulas de regulación	Líneas de entrada y colector	S	Gas	25	-5/1	G	N	Baja	Mediocre	1	1	1	Se toma un radio esférico de 1 m
2	Bridas de unión de tuberías	Tramos de colector pcpal	S	Gas	25	-5/1	G	N	Baja	Mediocre	1	1	1	Se toma un radio esférico de 1 m
3	Puntos de toma de muestra	En toda la ERM	S	Gas	25	-5/1	G	N	Baja	Mediocre	1	1	1	Se toma un radio esférico de 1 m
4	Bridas de unión de tuberías	Arqueta de salida del colector	S	Gas	25	-5/1	G	N	Baja	No	1	-	-	La extensión es toda la arqueta

Tabla 9.3. Clasificación de zonas ATEX para la ERM

CLASIFICACIÓN DE ZONAS (ANTORCHA DE ALTA TEMPERATURA)

CLASIFICACIÓN DE ZONAS (ANTORCHA DE ALTA TEMPERATURA)														
Fuentes de Escape			Sustancia inflamable					Ventilación			Emplazamiento peligroso			
Nº	Descripción	Localización	Grado de escape	Nombre	Tª y P de operación		Estado	Tipo	Grado	Disponibilidad	Tipo de zona	Extensión zona (m)		Observaciones
												Vertical -	Horizontal	
1	Sello de las válvulas de regulación	Tramos del colector de entrada	S	Gas	25	7	G	N	Media	Buena	2	1	1	Se toma un radio esférico de 1 m
2	Bridas de unión de tuberías	Tramos de colector entrada	S	Gas	25	7	G	N	Media	Buena	2	1	1	Se toma un radio esférico de 1 m
3	Bridas de unión de tuberías	Arqueta de salida del colector	S	Gas	25	7	G	N	Baja	No	1	*	*	La extensión es toda la arqueta
4	Salida de gas a la atmósfera	Parte superior cámara combustión	P	Gas	25	0	G	N	Media	Buena	1-2	1,5-2,5	1,5-2,5	Esfera de 1,5m (zona 1) y anillo de radio 1 a su alrededor (zona 2)
5	Mezcla explosiva en antorcha	Interior de la cámara de combustión	P	Gas	25	0	G	N	NO	No	1-2	**	**	Todo el interior de la cámara combustión hasta el apagallamas

Tabla 9.4. Clasificación de zonas ATEX para la Antorcha de alta temperatura

CLASIFICACIÓN DE ZONAS (TANQUE DE METANOL)

Fuentes de Escape		Sustancia inflamable						Ventilación			Emplazamiento peligroso			
Nº	Descripción	Localización	Grado de escape	Nombre	Tª y P de operación		Estado	Tipo	Grado	Disponibilidad	Tipo de zona	Extensión zona (m)		Observaciones
												Vertical -	Horizontal	
1	Superficie del líquido	Interior depósito subterráneo	C	Metanol	-	-	L	N	Media	Normal	0	-	-	
2	Dispositivos de sobrepresión	Arqueta de depósito subterráneo	P	Metanol	-	-	L	N	Baja	Normal	0	-	-	
3	Dispositivos de sobrellenado	Arqueta de depósito subterráneo	P	Metanol	-	-	L	N	Baja	Normal	0	-	-	
4	Bombas de alimentación	Arqueta de depósito subterráneo	P	Metanol	-	-	L	N	Baja	Normal	0	-	-	
5	Tuberías de alimentación	Desde bombas hasta antirretorno	P	Metanol	-	-	L	N	Media	Normal	2	1,5	1,5	Se toma un radio esférico de 1, 5m
6	Válvula antirretorno	Antes del colector	S	Metanol	-	-	L	N	Media	Normal	2	1,5	1,5	Se toma un radio esférico de 1.5 m

Tabla 9.5. Clasificación de zonas ATEX para los tanques de Metanol

CLASIFICACIÓN DE ZONAS (BOTELLAS DE GAS)														
Fuentes de Escape			Sustancia inflamable				Ventilación			Emplazamiento peligroso				
Nº	Descripción	Localización	Grado de escape	Nombre	Tª y P de operación		Estado	Tipo	Grado	Disponibilidad	Tipo de zona	Extensión zona (m) Vertical - Horizontal		Observaciones
1	Fugas en las válvulas	Botellones de gas	S		-	-	G	N	Media	Alta	2	2,3	2,3	Espacio interior de la caseta. Espacio exterior con una distancia de 2,3 m en todas las direcciones

Tabla 9.6. Clasificación de zonas ATEX para las Botellas de gas

CLASIFICACIÓN DE ZONAS (ALMACENAMIENTO CARBÓN)

CLASIFICACIÓN DE ZONAS (ALMACENAMIENTO CARBÓN)														
Fuentes de Escape			Sustancia inflamable				Ventilación			Emplazamiento peligroso				
Nº	Descripción	Localización	Grado de escape	Nombre	Tª y P de operación		Estado	Tipo	Grado	Disponibilidad	Tipo de zona	Extensión zona (m) Vertical - Horizontal		Observaciones
1	Superficie del polvo	Interior de la tolva	C	Carbón	Amb	-	S	N	Media	Normal	20	-	-	Todo el interior de la tolva
2	Superficie del polvo	Interior de las tuberías	C	Carbón	Amb	-	S	N	Media	Normal	20	-	-	Todo el interior de las tuberías
3	Superficie del polvo	Interior del mezclador	C	Carbón	Amb	-	S	N	Media	Normal	20	-	-	Todo el interior del mezclador
4	Pequeñas cantidades de polvo	Descarga de sacos en la tolva	P	Carbón	Amb	-	S	N	Media	Normal	21	1	1	1m alrededor de la tolva de descarga y hasta el suelo
5	Pequeñas cantidades de polvo	Fugas de los sacos	S	Carbón	Amb	-	S	N	Media	Normal	21	-	-	Todo el interior del emplazamiento

Tabla 9.7. Clasificación de zonas ATEX para la zona de almacenamiento de carbón



Hemos aplicado la metodología cualitativa basada en la norma UNE 60079-10 a los casos de estudio: ERM1, antorcha de alta temperatura, tanques de metanol, almacenamiento de botellas de gases y planta de tratamiento térmico: almacenamiento de carbón activo. Podemos observar que para estos constituye una herramienta de aplicación cómoda y rápida para clasificar zonas ATEX. A continuación, vamos a utilizar la metodología basada en la norma italiana CEI-95 mediante la aplicación del programa ProgEx y la metodología CFD para clasificar la **ERM1** y así poder comparar con los resultados obtenidos anteriormente.

9.5. Metodología según norma CEI-95. Programa ProgEx

9.5.1. Estación de Regulación y Medida1 (ERM 1)

Para esta zona obtenemos las gráficas (figura 9.4 y figura 9.5). La primera de ellas pertenece a los resultados obtenidos para la arqueta de la ERM1. En este caso utilizando el programa ProgEx obtenemos una clasificación zona 1 para toda la arqueta. Este resultado coincide los valores obtenidos en la tabla 9.3 y que se representaron en la figura 9.2.

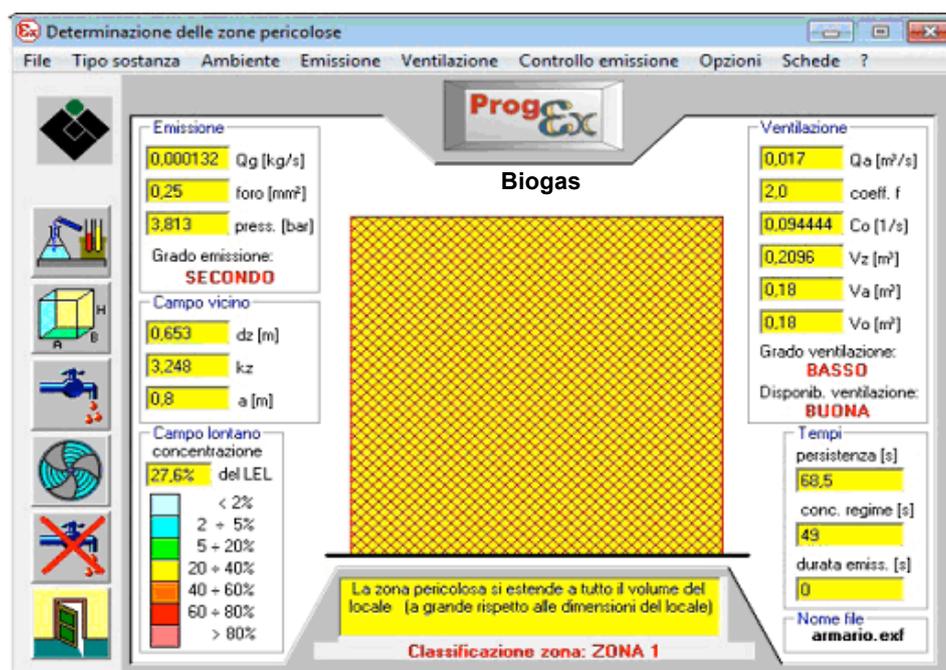


Figura 9.4. Clasificación zonal ATEX mediante ProgEx para arqueta ERM1

La figura siguiente (9.5) representa los valores obtenidos para las válvulas y bridas de la ERM1. Para este caso obtenemos una zona de riesgo (esfera) de 0,8 metros de radio alrededor de las fuentes de escape. Este valor es ligeramente inferior al obtenido al



aplicar la metodología cualitativa (esfera de 1m de radio), siendo esta metodología menos conservadora.

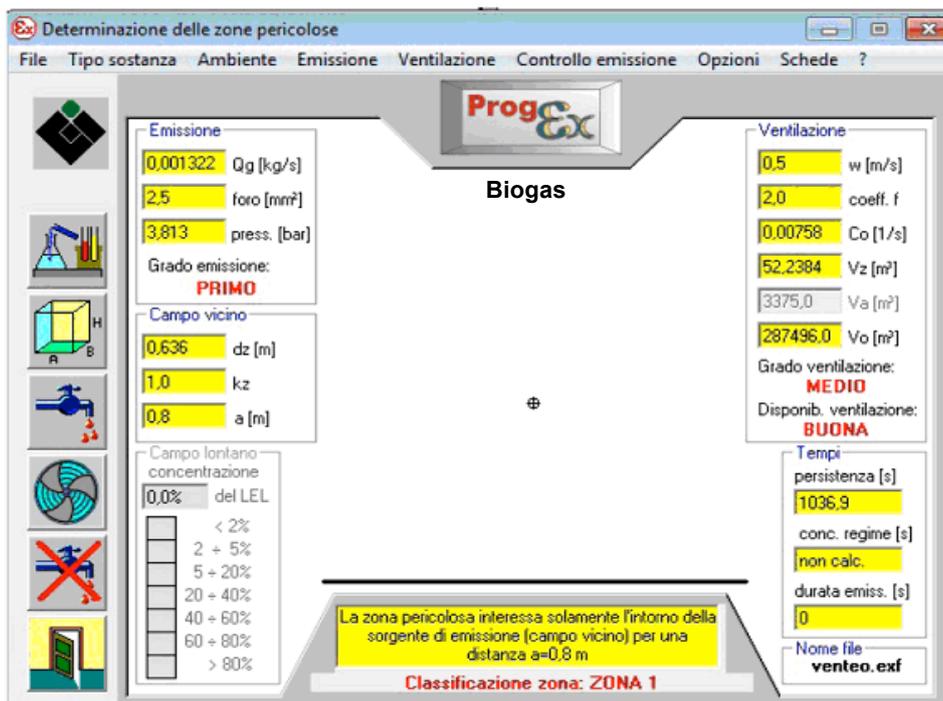


Figura 9.5. Clasificación zonal ATEX mediante ProgEx para bridas y válvulas ERM1

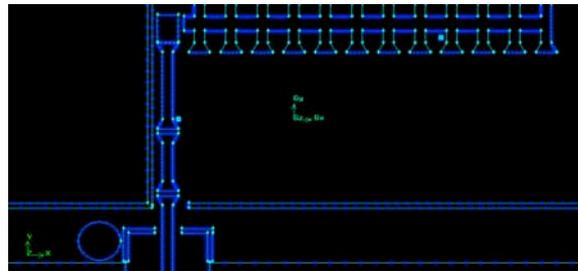
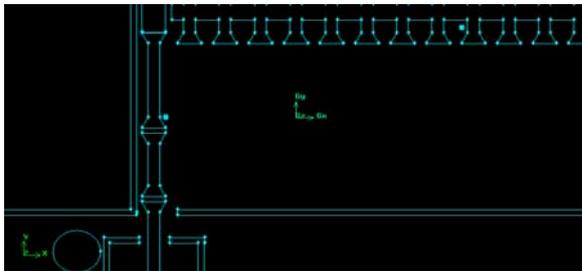
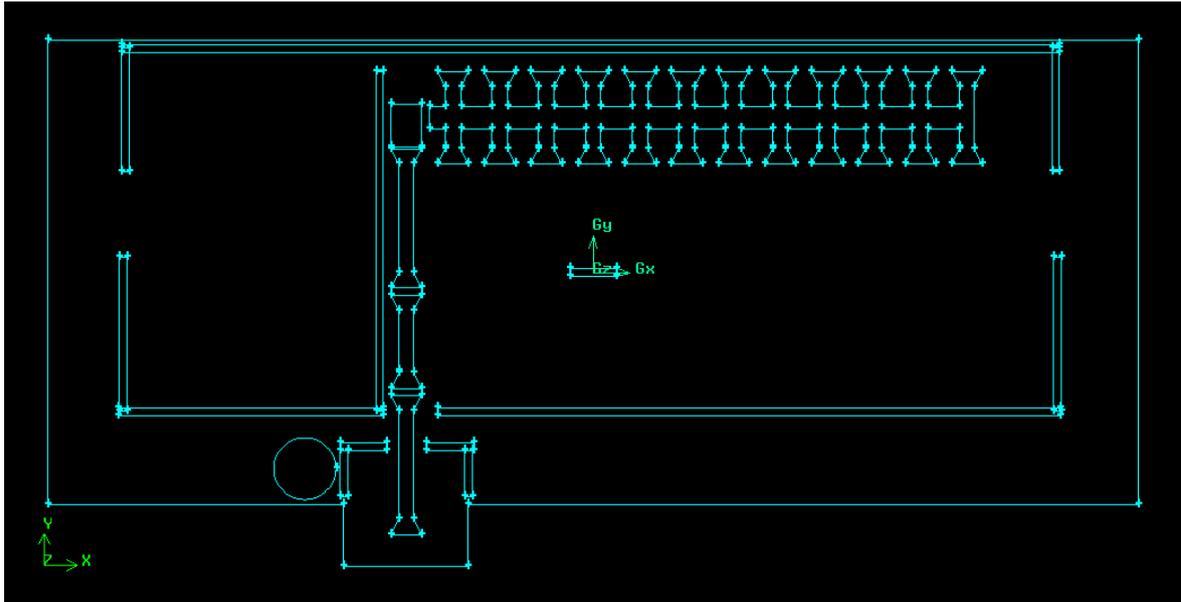
9.6. Metodología CFD. Programa FLUENT

La metodología CFD ha sido explicada en el capítulo 7 aplicándola con éxito a casos de prácticos de una industria láctea (capítulo 8) mediante el programa GAMBIT-FLUENT. El primero permite realizar la geometría (preprocesado) y el segundo es el solver que permite resolver sobre la geometría confeccionada las ecuaciones discretizadas de energía, viscosidad, etc.

9.6.1. Estación de Regulación y Medida1 (ERM 1)

En este punto se presentan los resultados de la aplicación de esta metodología al recinto de la estación de regulación y medida 1 (ERM1).

Como hemos venido explicando en los capítulos 7 y 8, primeramente realizamos la geometría con el programa GAMBIT. En un primer momento optamos por realizar la geometría contemplando no sólo las dimensiones reales sino la mayor parte de los elementos que pertenecen a la instalación tal y como se puede ver en las figuras 9.6, 9.7 y 9.8.



Figuras 9.6, 9.7 y 9.8. Geometría de la sala de ERM1 (arriba) y detalles de los elementos, colector, tuberías, etc. (abajo) de dicha sala

Realizada la geometría vamos a proceder al mallado de la misma, para ello seleccionamos el equiespaciado de los nodos (figura 9.9.) fijando valores más elevados en las zonas que deseamos que la simulación presente más detalle.

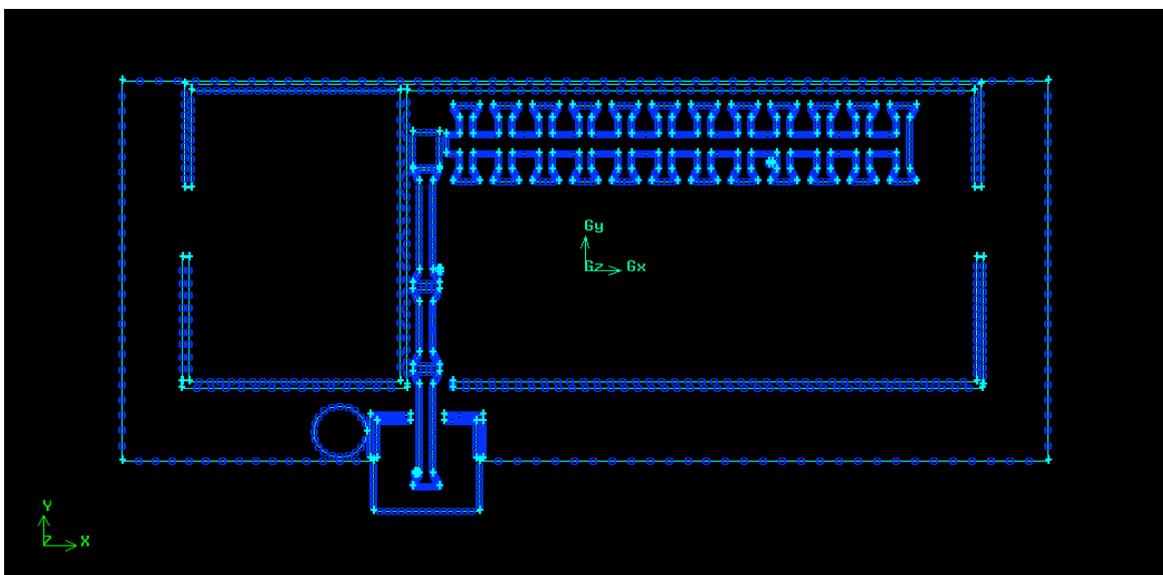


Figura 9.9. Disposición de los nodos en la geometría



Finalizado el proceso anterior, podemos proceder a generar el mallado de la geometría seleccionando en este caso para el mallado de las caras los elementos triangulares y el tipo *pave*. Esto nos da como resultado la malla de la figura siguiente (figura 9.10).

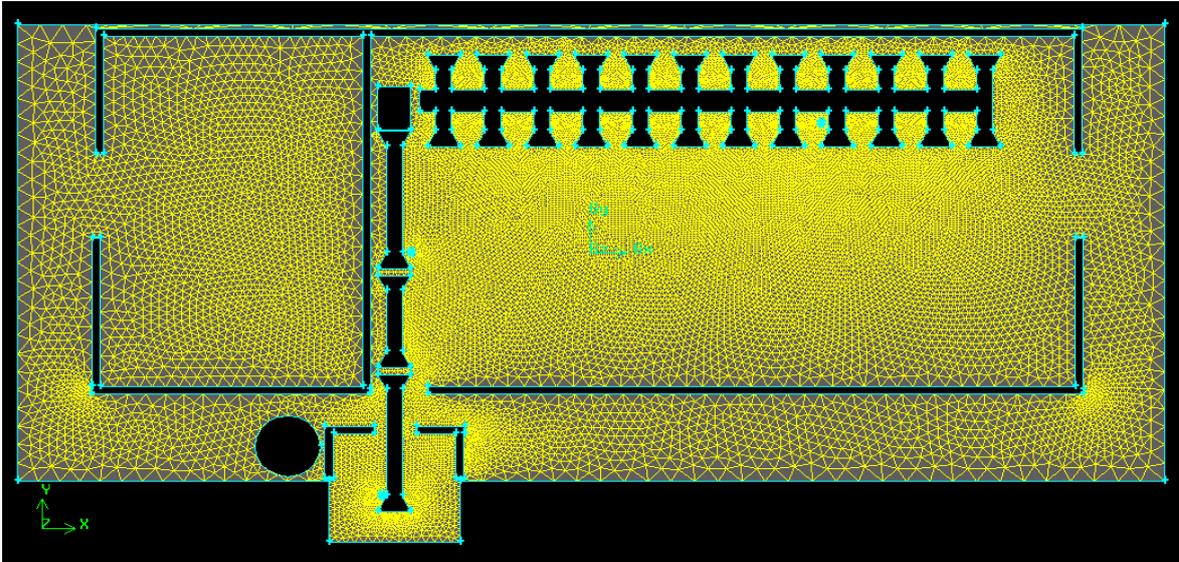


Figura 9.10. Mallado de la geometría de la ERM1

Si nos fijamos en la figura 9.10. la geometría presenta demasiados elementos que hacen que los procesos de iteración se desarrollen de forma lenta, alargándose en el tiempo. Para solucionarlo, vamos a “aligerar” la geometría eliminando aquellas partes que no nos van a aportar información (figura 9.11).

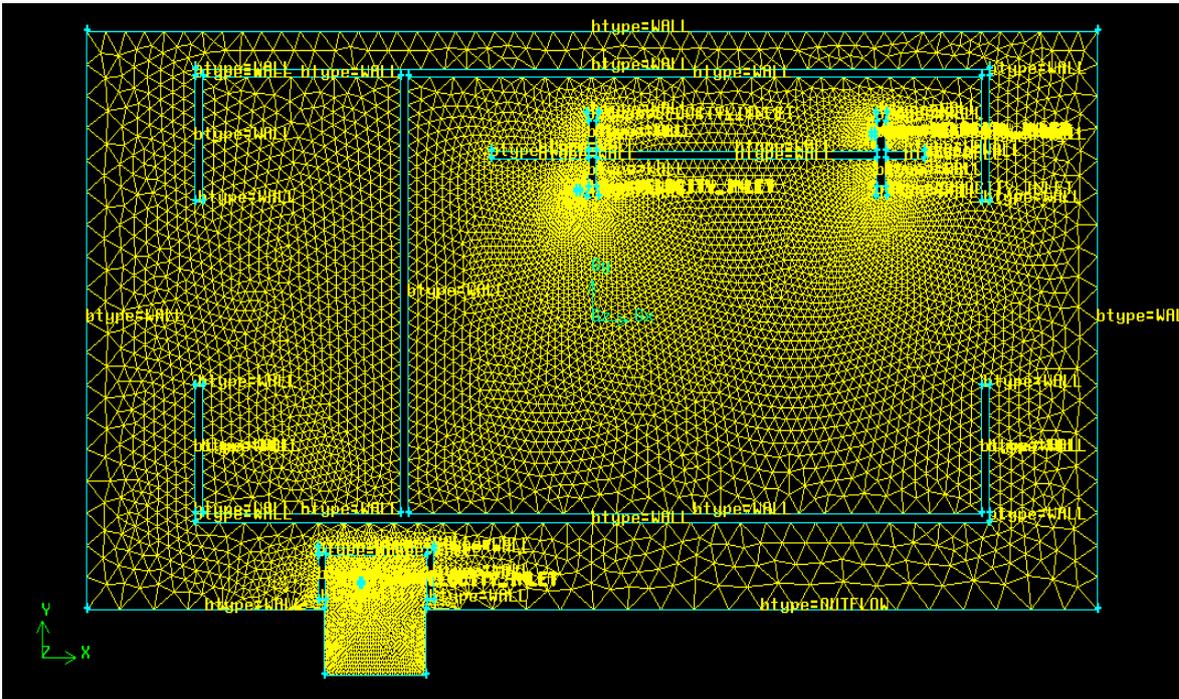


Figura 9.11. Mallado de la nueva geometría de la ERM1



Reducimos el número de tuberías del colector (figura 9.11) y sobre éstas vamos a establecer dos fugas debidas a la emisión por dos poros de $2,5 \text{ mm}^2$ y otro más en la arqueta de salida del colector (los poros constituyen condiciones del tipo *velocity inlet* de entrada de gas en la superficie de control). El frente de la malla presenta la condición *outflow* ya que en esta zona se ubica la ventilación natural compuesta por un enrejillado.

Finalizado este proceso exportamos la malla como archivo *msh* para poder trabajar con el programa FLUENT. Como ya hemos indicado en otros casos de estudio primero comprobamos que la malla no presenta problemas y a continuación seleccionamos las ecuaciones que intervienen en nuestro estudio: ecuación de la energía, términos de viscosidad, especies, etc.. Introducimos a continuación las condiciones de contorno (considerando un flujo sónico de la velocidad de escape del gas) y definimos el orden de discretización de las ecuaciones y las correspondientes iteraciones con la convergencia de los residuos. Como podemos observar en la figura 9.12. los valores los residuos se mantienen por debajo del umbral 10^{-3} para las ecuaciones seleccionadas.

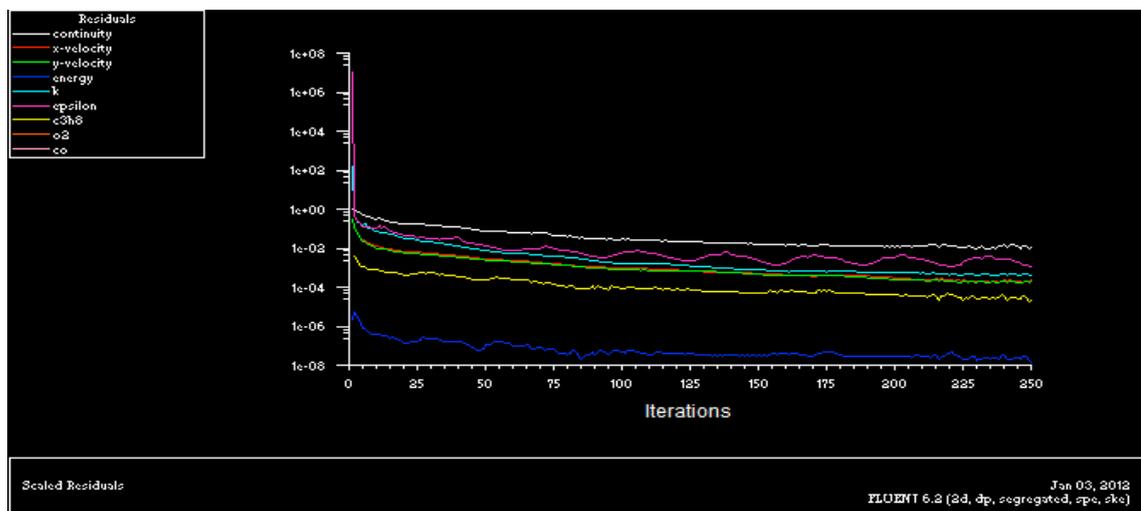


Figura 9.12. Residuos de la convergencia de las ecuaciones

“Corrido el programa”, podemos mostrar por pantalla los parámetros que más nos interesan. Así, la figura 9.13 se muestran los contornos de velocidad de escape de gas por los poros considerados. Se observa como la velocidad es mayor en las inmediaciones de los puntos de emisión disminuyendo a medida que nos alejamos de la fuente. También podemos observar como la nube de gas se distribuye por la sala de la ERM y por la abertura de la puerta hacia el frente de la sala donde se encuentran la ventilación natural. En la arqueta los gases tienden a confinarse ya que esta zona presenta ventilación nula.

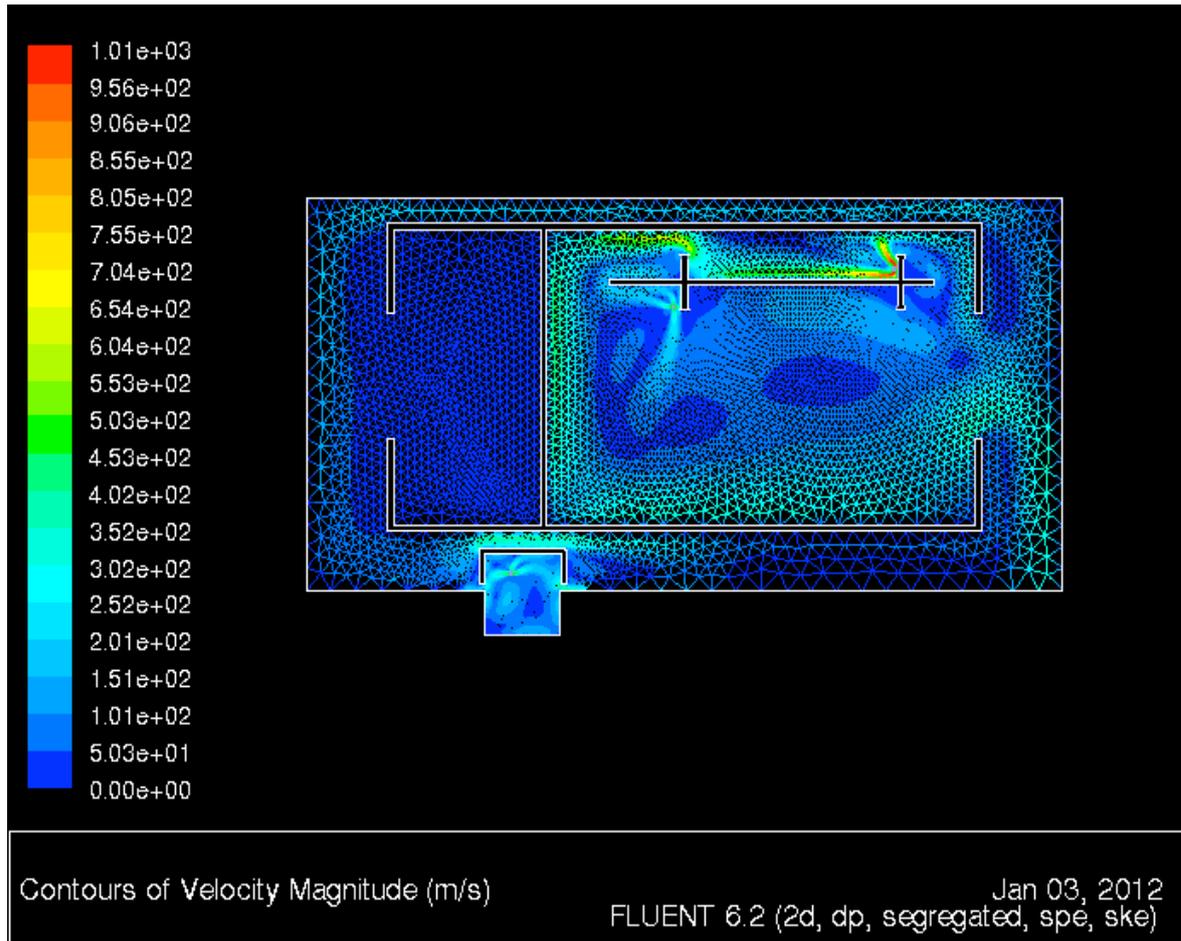


Figura 9.13. Contorno de velocidad (m/s) para los escapes de gas

La figura 9.14 muestra los contornos de fracción molar del gas en la sala debidos a los escapes considerados. Como podemos observar el gas tiende a ocupar (con valores superiores al LIE) todo el recinto de la sala donde se encuentra el colector. Las concentraciones mayores se ubican en los puntos próximos a las zonas de emisión y en el centro de la sala donde el gas tiende a arremolinarse. Parte de la nube también se dispersa hacia la ventilación natural aunque no en el grado deseado. En la arqueta el gas se encuentra confinado y busca salida por pequeños orificios y poros. En el resto de la sala los valores no son significativos.

Este resultado es coherente con los que se han obtenido mediante el empleo de la metodología cualitativa y el programa ProgEx, concluyendo que la metodología CFD es una herramienta válida y precisa que permite simular multitud de comportamiento fluidodinámicos.

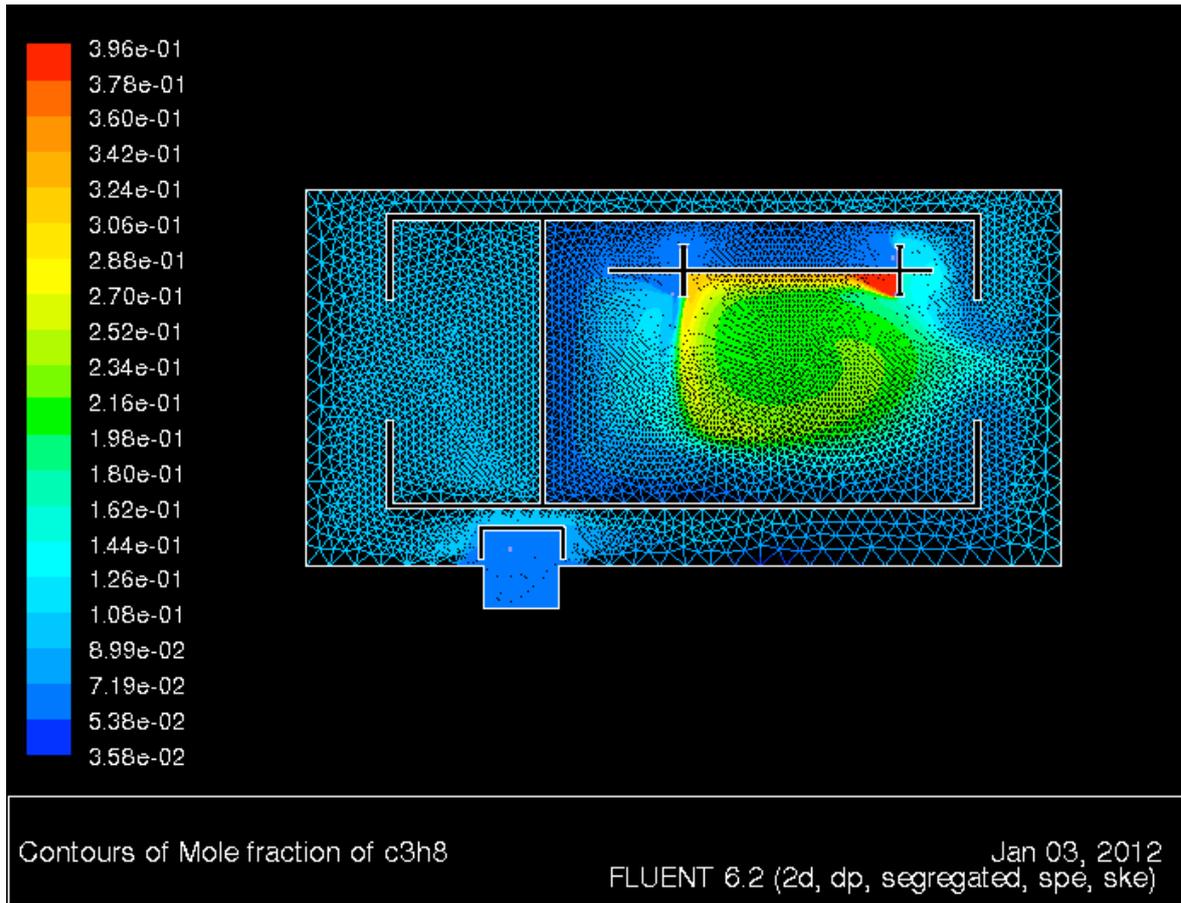


Figura 9.14. Fracción molar en % en la sala de ERM.

Si ahora representamos en un histograma el % de concentración molar de gas que se genera durante los escapes (figura 9.15) y teniendo en cuenta que el LIE se sitúa en torno al 5% y el LSE alrededor de un 17% podemos hacernos una idea de la peligrosidad de estas situaciones.

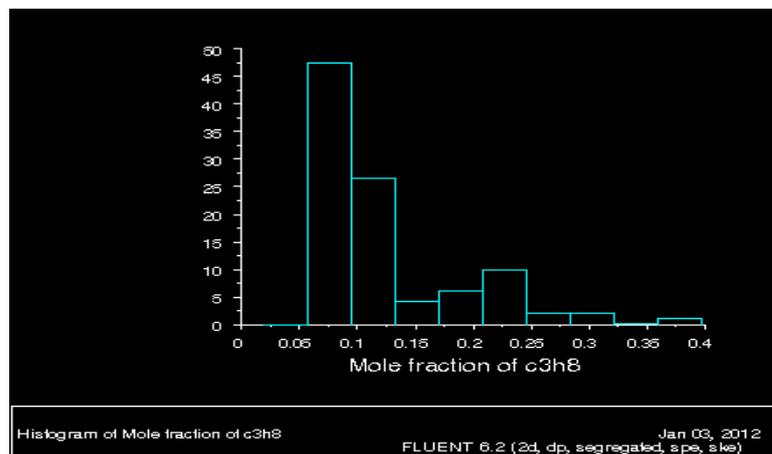


Figura 9.15. Histograma Fracción molar en % en la sala de ERM



CAPITULO 10. ANÁLISIS DE LOS PROCESOS EN FUNCIÓN DE LOS PROCEDIMIENTOS EMPLEADOS. VENTAJAS E INCONVENIENTE

10.1. Análisis de las zonas clasificadas según metodología norma UNE 60079-10

En este caso analizamos las dos metodologías que han sido aplicadas a diferentes casos de estudios:

- a) Metodología cualitativa para gases, vapores, nieblas y sustancias pulverulentas.
- b) Metodología cuantitativa

La metodología cualitativa presenta grandes ventajas como es la aplicación casi inmediata a zonas de estudio. Como ya se ha indicado esta metodología se basa en aplicar los resultados de casos prácticos de gases fugados a través de elementos y equipos de referencia a las zonas que se pretenden clasificar. No obstante, no es una metodología de concreción ya que para muchas situaciones no existen casos de referencia para realizar la clasificación de emplazamientos peligrosos.

El ejemplo lo hemos tenido en el estudio de la clasificación de la zona de carga de baterías. La extensión de la zona ATEX para estas instalaciones está vinculada al hidrógeno que “fuga” a través de los tapones de las baterías durante la carga, y depende el gas fugado de parámetros propios del elemento de carga como la capacidad total en amperios horas, etc. Cada batería presenta características diferentes de capacidad, intensidad, etc., no pudiendo extrapolarse el resultado de una emisión en concreto para todas las zonas de carga.

En relación a las zonas debidas a productos pulverulentos, la aplicación de esta metodología resulta cómoda y factible para elementos sencillos como pequeñas tolvas de descarga o zonas reducidas de almacenamiento de material pulvurulento, como el ejemplo de aplicación realizado en el punto 9.4.5. para la zona de almacenamiento de carbón de la planta de tratamiento de residuos. Por el contrario, cuando se trata de clasificar zonas complejas como la cámara de secado de leche en polvo estudiada esta metodología no ofrece garantías.

Como corolario al respecto de esta metodología podemos indicar que es una metodología válida para aquellas zonas e instalaciones en las cuales los elementos que intervienen, es decir, las fuentes de escape son debidas a equipos muy estudiados y habituales en instalaciones: válvulas, bridas, uniones, etc., Hay que tener en cuenta además que la



extensión de las zonas y la forma de las mismas varía según diferentes condiciones específicas como son: presión, temperaturas, etc, de cada equipo en la instalación. Esta situación debe ser tomada en cuenta para cada caso particular.

La metodología cuantitativa es más exacta, con ella y teniendo en cuenta el esquema que se propuso en el capítulo 7 en el punto 7.1.1.1. se pueden determinar de forma bastante exacta la extensión de las zonas peligrosas.

Esta metodología se aplicó a los casos de estudio de los depósitos de gas natural, sala de calderas y zona de carga de baterías obteniendo buenos resultados. Pero no se aplicó al ejemplo de la zona de la Balsa de Agua Helada nº 2, debido a que es una metodología muy tediosa para la cual hay que calcular las tasas de escape de todos los elementos y equipos susceptibles de fugar, considerando presiones de servicio, características de los gases utilizados, etc. Para estos casos resulta más factible utilizar metodologías más globales como la cualitativa, y por otro lado, el resultado que hubiéramos obtenido no iba a diferir del ofrecido por la metodología cualitativa puesto que toda la sala de frío es una zona de riesgo.

Con relación a las tasas de escape y siendo escrupulosos deben calcularse individualmente para todos los aparatos y equipos en función de la temperatura de operación y presión de gas, y no hacer uso indiscriminado de tablas indicativas de pérdidas ya que éstas, presentan valores de fuga para los elementos más usuales y para condiciones ambientales concretas de presión y de temperatura.

Comentar que la aplicación de la metodología cuantitativa y de la metodología cualitativa a los depósitos de gas natural presentaron resultados similares, aunque más conservadores con la primera.

10.2. Análisis de las zonas clasificadas según metodología ProgEx para gases vapores y nieblas

Esta metodología se basa en norma italiana CEI 31-35 tal y como se ha expuesto en el capítulo 7 (punto 7.1.1.2). El programa utilizado es de fácil aplicación, introducidos los datos ambientales, las características de las sustancias peligrosas, fuentes de escape, ventilación y el grado de ventilación, el programa genera una imagen sencilla con la clasificación de zonas (Zona 0, Zona 1 y Zona 2) y la extensión de la zona peligrosa considerando una esfera de radio m metros en la cual tiene alcance la fuente de escape.



Al utilizar esta metodología que hemos aplicado a los depósitos de gas natural, sala de calderas, zona de carga de baterías y balsa de agua helada 2 hemos obtenido los resultados indicados en la tabla siguiente (tabla 10.1).

TABLA RESUMEN METODOLOGÍA PROGEX			
Zona	Resultado	Zona	Resultado
Depósitos de GNL- Emisión de venteos	Esfera de 0,8 m de radio alrededor de los venteos	Sala de calderas-fugas en válvulas y bridas de las conducciones de gas en el interior de la sala de calderas	Esfera de 0,25 m de todas las fuentes de escape
Depósitos de GNL- Fugas en válvulas y bridas de tuberías de GNL	Esfera de 0,5 m de radio alrededor de válvulas y bridas	Sala de cargas de batería	Esfera de 0,35 m alrededor de las fuentes de escape (tapones)
Depósitos de GNL- Interior del cubeto	Zona 1 todo el recinto	Salas de frío	Zona 2 todo el recinto

Tabla 10.1. Tabla resumen de resultados con metodología ProgEx

Estos resultados presentan discrepancias con los obtenidos según la norma UNE 60079-10. Así, la zona de carga de baterías clasificada con la metodología cuantitativa según la norma UNE indica una distancia de seguridad horizontal alrededor de 1,2 metros de la batería siendo el doble para distancias verticales. Si ahora comparamos estos valores con los obtenidos mediante el programa ProgEx vemos que hay una diferencia significativa. Esta metodología establece una zona de riesgo que constituye una esfera de radio 35 cm alrededor de cada tapón.

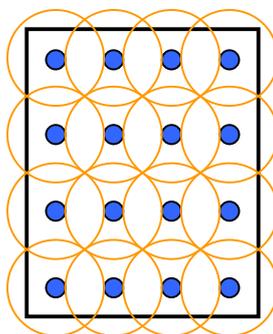


Figura 10.1. Superposición de esferas en la batería de cargas al aplicar la metodología ProgEx

No obstante, este resultado hay que matizarlo, los tapones de las baterías se ordenan en filas y columnas de 4 separados 20 cm entre sí y a 10 cm de los bordes de las baterías. Si ubicamos las esferas de 35 cm sobre los tapones (figura 10.1) podemos observar como



se superponen zonas de riesgo de esfera. Estas zonas deben descontarse y sumarse hacia los extremos de los laterales de la batería; al hacerlo la zona de riesgo se extiende 1,40 metros alrededor de la batería lo que está más en consonancia con los resultados obtenidos según la metodología cuantitativa. Referente a la distancia vertical (que el programa no establece que tomemos el doble debido a que el hidrógeno es un gas más ligero que el aire), debe establecerse el criterio de considerar el doble que para las distancias horizontales.

Este mismo resultado también es de aplicación a los depósitos de gas natural (donde también se produce superposición de estas zonas de riesgo) y en menor medida para la sala de calderas.

10.3. Análisis de las zonas clasificadas según metodología CFD. Programa GAMBIT-FLUENT

La dinámica de fluidos computacional es una herramienta muy poderosa que permite predecir comportamientos de los fluidos en determinados regímenes y bajo diferentes condiciones. Tanto en el capítulo 8 como en el 9 hemos aplicado esta metodología a varios casos de estudio: depósitos de gas natural, sala de calderas, zona de carga de baterías, balsa de agua helada, torre de leche en polvo y a la estación de regulación y medida de la planta de tratamiento de residuos.

Los resultados obtenidos son buenos y presentan un carácter más conservador (con lo que esto implica) respecto a las otras metodologías. Alguno de estos resultados hemos podido corroborarlos como en el caso de estudio del escape de hidrógeno en la zona de carga de baterías de la cámara de congelado, donde ayudándonos de un equipo de detección de gas se pudo establecer el alcance de la nube de hidrógeno y comprobar que éste presenta grandes semejanzas con los obtenidos en las simulaciones.

Comparando los resultados obtenidos en las simulaciones con respecto a las otras metodologías se establecen las siguientes consideraciones:

- En la zona de depósitos de gas natural, los resultados son mucho más conservadores que respecto a la metodología cuantitativa.
- Un escape de las tres mangueras durante la descarga y en las válvulas de seguridad de los dos depósitos provocaría que el gas se expandiera por toda la fábrica.



- Se presenta una contradicción entre dos normas UNE. La norma UNE 60210 de plantas satélites de GNL, donde se establece en su apartado D las distancias de seguridad en función del tipo de riesgo y que son como mínimo 15 metros y como máximo 45 metros en función del tipo de instalación próxima (para nuestro caso 25 metros alrededor de los dos depósitos y descarga de camión), y la norma UNE 60079-10, al realizar los cálculos de forma analítica la máxima distancia tiene lugar para la descarga (tabla 8.3) y corresponde a una esfera de 7.5 metros.

Comentar que un escape de gas acaecido en uno de los depósitos en diciembre de 2010 en la empresa EUROSERUM IBÉRICA, S.L. motivó la evacuación de todo el personal, llegando el gas hasta las oficinas que se encuentran ubicadas a una distancia en línea recta de los depósitos de 38 metros.

Hay que reseñar que diferentes instalaciones darán como resultado la aplicación de una o varias metodologías, adecuándose unas más que otras a los diferentes procesos. En muchos casos conviene disponer de equipos de medición para corroborar los resultados o clasificar nuevas zonas que no habíamos tenido presente. Sirva de ejemplo comentar que durante la descarga de GNL en la planta el pasado día 30/12/2011 se pudieron tomar medidas (fotos 10.1 y 10.2) con el detector de gases dragüer Xam 7000 en toda la instalación y que durante el proceso inicial de descarga en los racores de conexión de las mangueras con las bocas del camión se produjeron escapes de gas metano que hicieron saltar la alarma del equipo alcanzado valores del 49% LIE a una distancia de más de 3 metros (foto 10.3)



Fotos 10.1 y 10.2. Mediciones de gas realizadas durante la descarga



Foto 10.3. Valor recogido por el explosímetro para el metano

Como podemos ver las zonas estudiadas presentan riesgos reales que no deben ser menospreciados. Diferenciar que zona es más peligrosa desde el punto de vista de las atmósferas explosivas es difícil y no deben ser tomadas a la ligera.



CAPITULO 11. EQUIPOS UTILIZADOS

Hemos indicado en diversos capítulos algunos de los equipos utilizados en la elaboración de esta tesis, pasamos a continuación a enumerar y describir la totalidad de los mismos:

11.1. Hardware

- Ordenador HEWLETT PACKARD DV6-3182/I7. El ordenador cuenta con un procesador Intel Core i7 de 4 núcleos, 16 Gb de RAM y sistema operativo de 64 bits. La unidad cuenta con lector-grabador de DVD y CD, lector de diferentes tipos de tarjetas de memorias y varios puertos USB. Esta unidad fue utilizada para calcular los modelos de GAMBIT-FLUENT.

11.2. Software

- Programa GAMBIT versión 2.230, distribuido por ANSYS. Este programa constituye el mallador y permite crear geometrías de todo tipo bien sean en 2D ó 3D.
- Programa FLUENT versión 6.2.16 distribuido también por ANSYS. FLUENT constituye el solver y complementa al programa GAMBIT permitiendo resolver sobre las geometrías malladas generadas las ecuaciones de gobierno discretizadas sobre las superficies y/o volúmenes.
- Programa ProgEx. Software para la clasificación de zonas peligrosas con riesgo de explosión según la Norma CEI EN 60079-10 (CEI 31-30) y al Guía CEI 31-35.
- Programa LPG VENT distribuido por la empresa del mismo nombre y que permite el cálculo de las superficies de venteo sobre silos .
- Sistema operativo Windows 7 para poder utilizar otros programas necesarios para la realización de la tesis (procesadores de texto, hojas de cálculo, programas de dibujo, etc.).
- Microsoft Office Word 2007, procesador de textos.
- Microsoft Office Excel 2007, que ha permitido la realización de gran número de las tablas y gráficas presentadas en esta tesis.
- AutoCAD 2011 que ha sido utilizado para la realización de algunas geometrías de los modelos simulados con FLUENT.

11.3. Equipos de detección de gas.

Se han utilizados varios equipos de detección de gas cada uno de ellos con sus características.



11.3.1. Equipo MSA modelo Orion^{plus}

Este equipo es un aparato de lectura directa con diferentes sensores para la determinación de los gases en las zonas de estudio. Los sensores utilizados en este equipo han sido el del metano, sulfuro de hidrógeno, monóxido de carbono y oxígeno. Las características de este equipo han sido detalladas de forma concisa en el capítulo 5 de esta tesis.

11.3.2. Equipo Dragüer Xam 7000

Constituye también un equipo de lectura directa que permite la detección simultánea y continua de hasta cinco gases. Se ha dispuesto de forma simultánea de dos equipos Xam 7000, uno con los sensores: amoníaco, hidrógeno, metano y oxígeno y el otro con los sensores de: amoníaco, metano y oxígeno. Esto ha permitido comparar valores medidos con el equipo MSA.

El equipo Xam 7000 también ha sido descrito en el capítulo 5 de esta tesis.

11.4. Cámara termográfica FLIR E60 y pistola THERMOFIX LÁSER

Estos dos equipos se han presentado en el capítulo 3 de la tesis, detallándose las características de la cámara termográfica y de la técnica de la termografía en el capítulo 7. El uso de estos dos equipos permite determinar fuentes de ignición por superficies calientes, malfuncionamiento, etc.

11.5. Equipo de medición Láser BOSCH

Se ha utilizado también un equipo de medición láser de distancias y superficies para medir y comprobar longitudes que han sido utilizadas en diferentes momentos de la tesis. El equipo presenta un alcance de hasta 50 metros.

11.6. Equipos de medición de condiciones termohigrométricas

Se han utilizado diferentes modelos de termohigrómetros:

- Termohigrómetro KESTREL K3000 con molinete de lectura directa: velocidad de aire (0,3 a 40 m/s), temperatura (-29 a 78 °C), porcentaje humedad (5-95%)
- Anemómetro Termómetro Higrométrico Dígital Pacer modelo DA 40H. Es un equipo de lectura directa con características: velocidad aire (0,01 a 35 mps), temperatura (-95°C a 200°C) y humedad relativa (5,0 a 95%).

- Anemómetro de sonda tipo molinete testo term modelo 440. Aparato también de lectura directa con rango de medición de 0,1 a 50 m/s y que cuenta con dos sondas: una de conducto de salida y otras telescópica.



Foto 11.1. Equipos utilizados (1. Termohigrómetro Kestrel K 3000, 2 Anemómetro de sonda tipo molinete testo term modelo 440, 3 Anemómetro Termómetro Higrométrico Digital Pacer modelo DA 40H, 4 y 5 Explosímetro dragüer Xam 7000, 6 Explosímetro Orion, 7 Botella de gas butano de 0,5 kg, 8. Botella minigas Botella Minigas 100 Rothenberg Industrial de 150 ml (30% butano y 70% propano)

11.7. Botellas de gas

- Botella popular de butano de 0,5 kg, presión máxima 15 Bar y dispositivo soplete.
- Botella Minigas 100 Rothenberg Industrial de 150 ml (30% butano y 70% propano).
- Botella de gas propano de 35 kg.

11.8. Normativa

- Norma UNE 60079-10-1. Clasificación de emplazamientos Atmósferas explosivas gaseosas.
- Norma UNE 60079-10-2. Clasificación de emplazamientos Atmósferas explosivas de polvo.



- Norma UNE 60079-10. Clasificación de emplazamientos peligrosos. Material eléctrico para atmósferas de gas explosivas.
- Norma UNE 60079-11. Atmósferas explosivas. Protección del equipo por seguridad intrínseca “i”.
- Norma UNE 60079-14. Material eléctrico para atmósferas de gas explosivas. Instalaciones eléctricas en emplazamientos peligrosos.
- Norma UNE-EN-14373. Sistema de supresión de explosiones.
- Norma UNE-EN- 14491. Sistemas de protección por venteo de explosiones de polvo.
- Norma UNE-EN 60210. Plantas satélite de gas natural licuado (GNL).
- Norma americana de la National Fire Protection Association sobre protección de explosiones de gas y polvo mediante venteo. Se utilizó la versión NFPA 68, 2007.
- Norma alemana de venteo de explosiones de polvo (VDI 3673, 2002).

Nota: En el apartado de bibliografía se referencian éstas y otras normas utilizadas.



CAPITULO 12. CONCLUSIONES

Inicialmente nos planteamos como objetivo principal para esta tesis profundizar en el estudio de las atmósferas explosivas de forma general tanto para gases, vapores o nieblas como para polvos. Este objetivo se planteó ante la dificultad que existe en ocasiones para clasificar y determinar con exactitud extensiones de zonas ATEX.

Para llevar a cabo este objetivo se realizó primeramente un estudio detallado de los antecedentes, recopilando normativa y legislación de aplicación sobre atmósferas explosivas.

El siguiente objetivo propuesto fue el realizar un análisis de los accidentes producidos en la industria relacionados con las atmósferas explosivas. Para cumplirlo, se ha hecho uso de diferentes bases de datos pudiendo obtener un análisis de accidentalidad por atmósferas ATEX completo en función de diferentes parámetros: fuentes de ignición, número de heridos, muertos provocados, etc.

Realizado el análisis, el siguiente paso fue estudiar diferentes metodologías para clasificar emplazamientos por atmósferas ATEX por gases, vapores o nieblas y sustancias pulverulentas y proponer la aplicación de la metodología de la dinámica de fluidos computacional (CFD) al estudio de estas atmósferas. Las metodologías desarrolladas y propuestas han sido la metodología cuantitativa, la cualitativa, la metodología del programa ProgEx y la aplicación de la CFD mediante el programa GAMBIT-FLUENT. Estas metodologías diferentes han sido aplicadas con éxito a los casos prácticos planteados: industrial láctea y planta de tratamiento de residuos.

Al profundizar en el estudio de atmósferas ATEX hemos podido observar la importancia de la detección precoz de puntos calientes. Por ello, y aunque en un principio no figuraba como objetivo de esta tesis, se ha llevado a cabo la aplicación de la técnica de la termografía a fuentes de ignición al caso práctico de la industria láctea presentando resultados satisfactorios.

Las conclusiones que se pueden extraer a partir de todos los trabajos realizados en esta tesis se exponen a continuación siguiendo el orden empleado para el desarrollo de los mismos. Por último, se presentan las líneas de investigación que a mi juicio deberían



ser seguidas para continuar los trabajos presentados y que por limitaciones de tiempo, espacio y objetivos propios de la tesis, han debido aplazarse.

12.1. Conclusiones de la aplicación de las metodologías cuantitativa y cualitativa según norma UNE 60079-10, metodología con programa ProgEx y metodología CFD-FLUENT a los Depósitos de GNL.

a) Metodología cuantitativa y cualitativa según norma UNE 60079-10.

Aunque ambas metodologías (la cuantitativa y la cualitativa) derivan de la norma UNE 60079 presentan disparidades que se traducen en los resultados obtenidos. Así, la metodología cualitativa se basa en predicciones reales y datos publicados sobre las fugas de los gases y líquidos inflamables. Es una metodología que presenta gran comodidad y facilidad de aplicación a los casos estudiados pero tiene el inconveniente de precisar de un gran conocimiento del comportamiento de los gases y líquidos y de cómo pueden fugar por las diversas fuentes de escape.

La metodología cuantitativa basada también en la norma UNE 60079-10, aporta gran exactitud en los volúmenes de atmósferas explosivas a diluir y por lo tanto en los radios de las esferas peligrosas sobre las fuentes de escape. Presenta el inconveniente de los cálculos, especialmente en aquellas instalaciones con multitud de fuentes de escape. Esto puede conllevar a error al no valorar la totalidad de las mismas, es decir, errores en el sumatorio de todas las tasas de escape y por lo tanto errores en los volúmenes y radios peligrosos sobre las fuentes de escape.

La aplicación de estas dos metodologías condujeron a los resultados siguientes:

Los resultados obtenidos con la metodología cuantitativa fueron de forma general un poco más conservadores que los obtenidos mediante la metodología cualitativa. En los venteos de descarga, la zona peligrosa comprende una geometría esférica de radio 7,5 metros según la metodología cuantitativa, por los 4 metros en sentido vertical y 4,5 metros en sentido horizontal que proporcionó la metodología cualitativa. La discrepancia en este resultado radica en la propia tasa de escape del elemento considerado, situación que la metodología cualitativa no discrimina.

El resto de elementos estudiados presentaron valores similares en la aplicación de ambas metodologías. A saber:



- Los venteos de cisterna ofrecieron 6,5 metros de radio de esfera según la metodología cuantitativa y 6,5 metros tanto en distancia horizontal como vertical según la cualitativa.
- La línea de gas proporcionó un resultado de radio de esfera de 1,9 metros según la metodología cuantitativa por los 2 metros (sentido horizontal y vertical) de la metodología cualitativa.

No obstante, ambas metodologías presentan el inconveniente de no precisar de forma clara el efecto aditivo de los diferentes volúmenes de gas como contribución a las diversas fuentes de escape. La propia norma UNE 60079-10-1: Clasificación de emplazamientos “Atmósferas explosivas gaseosas” informa de que los cálculos analíticos proporcionan una base simplificada, no debiendo considerarse como un único método de valoración. Asimismo, recomienda modelos computerizados que pueden ser apropiados en determinadas situaciones.

El volumen teórico V_z que se obtiene mediante la metodología cuantitativa da una indicación de la envolvente inflamable desde la fuente de escape, pero esta envolvente normalmente no equivaldrá al volumen del emplazamiento peligroso. La forma del volumen teórico va a estar influenciada por las condiciones de ventilación y más en un caso como este donde los depósitos están en el exterior. Por otra parte, se necesita establecer la posición del volumen teórico respecto a la fuente de escape. Ésta dependerá esencialmente de la dirección de ventilación, tendiendo a desplazarse el volumen teórico y la flotabilidad del gas en la dirección del viento.

Por lo tanto, el volumen del emplazamiento peligroso desde una fuente de escape dada, generalmente será varias o incluso muchas veces mayor que el volumen hipotético V_z . Este hecho se acrecienta en las instalaciones exteriores donde las condiciones climáticas van a jugar un papel muy importante en la valoración.

Así, en instalaciones en el exterior la tasa de dispersión del gas o vapor en la atmósfera se incrementa con la velocidad del viento, pero se requiere una velocidad mínima de 2-3 m/s para iniciar una difusión por turbulencias; por debajo de estos valores el gas o vapor forma capas y la distancia hasta alcanzar un valor de dilución se incrementa significativamente. En las áreas de las plantas protegidas por grandes recipientes o por estructuras, la velocidad del movimiento del aire puede ser sustancialmente inferior a la del viento; no obstante, la obstrucción del movimiento del



aire por los elementos del equipamiento tiende a mantener la turbulencia incluso con vientos de baja velocidad.

La velocidad de viento utilizada para el cálculo del volumen teórico, según la norma UNE 60070-10-1 considera una “aproximación prudente” el utilizar como número de renovaciones de aire $C=0,03s^{-1}$, (valor teórico suponiendo una velocidad de viento de 0,5 m/s para un cubo teórico de 15 m de lado al aire libre). Esta velocidad de viento de 0,5 m/s es la que se considera apropiada para determinar la tasa a la cual la ventilación exterior diluye un escape inflamable, a pesar de que la propia norma reconoce que la tendencia del gas a formar capas puede **comprometer** el cálculo.

En el estudio de este caso (depósitos de GNL) se nos presentó además una dificultad añadida derivada de la existencia de una norma UNE específica para estas instalaciones, la norma UNE 60210. Plantas de gas natural licuado (GNL). Así, en su punto 5.3. de distancias de seguridad respecto a otros lugares y para el caso que nos afecta, esta norma establece una zona de exclusión de 25 metros alrededor del cubeto-recinto de los dos depósitos y que englobaría las propias operaciones de descarga. Este valor de distancia horizontal (debemos considerar como mínimo la misma distancia vertical aunque la norma no lo especifica) excede con mucho los resultados obtenidos con la norma UNE 60079-10, aunque a tenor de los resultados obtenidos en la tesis son más reales.

No parece lógico pues, que existan estas diferencias tan significativas entre ambas normas. Ello invita a revisar las normas de aplicación para estos casos debiendo aclararse las zonas de riesgos y especificar el orden de prevalencia de las normas.

b) Metodología con el programa ProgEx.

Los resultados obtenidos con este programa basado en la metodología italiana CEI 31-35 (metodología similar a la cuantitativa propuesta por la norma UNE 60079-10) presentaron un carácter poco conservador para este caso de estudio. La propia zona de almacenamiento-cubeto se clasifica en su conjunto como una Zona 1 en su totalidad, las válvulas y bridas resultan una Zona 2 con volumen de exclusión determinado por la esfera de 0,5 m a su alrededor y los venteos tanto de cisterna como de mangueras son clasificados como Zona 1 y radio de esfera de 0,8 metros. El problema de este tipo de programas (y también del uso de la aplicación de la metodología anterior) consiste en el nulo tratamiento que se establece al solape de



zonas y extensión de los volúmenes superpuestos originados por las diferentes fugas. Para estos casos, cuando existe solapamiento de zonas creadas por fuentes de escape adyacentes y con clasificación diferentes, debe aplicarse la clasificación de mayor riesgo en la zona de escape, obligando a consultar y aplicar tablas (si las hay) que contemplen estas situaciones. En el caso de la extensión de zonas es más complejo y normalmente estas situaciones deben resolverse con los métodos computacionales.

c) Metodología CFD. Programa GAMBIT-FLUENT

Como la propia norma UNE 60069-10 reconoce, la valoración de la extensión V_z de las atmósferas explosivas por gases, vapores y/o nieblas al aire libre se debería hacer basándose en la disposición y características de los emplazamientos, haciéndose uso de un modelo apropiado y cita textualmente el análisis computacional de dinámica de fluidos (CFD).

La metodología CFD presenta la posibilidad de estudiar las situaciones de riesgo desde un punto de vista más real, considerando los fenómenos de turbulencias y las situaciones reales: obstáculos, condiciones de ventilación, etc.

La aplicación de la metodología CFD con el programa FLUENT proporcionó valores más conservadores que los ofrecidos por las normas referenciadas pero también más reales.

Primeramente se estudió un escape doble de ambos depósitos (considerando un entorno *choquet* de régimen sónico) e imponiendo las condiciones iniciales y de contorno encontrados en días de visita a la empresa. Los resultados para este caso superaron los valores obtenidos mediante la metodología cuantitativa, cualitativa y el programa ProgEx. El propio recinto de ambos depósitos quedó sobrepasado por el escape de gas, midiéndose distancias horizontales de la nube de gas metano con concentración por encima del LIE de 23 metros y adoptando la nube formas más reales (no esféricas –circunferencias plano XY 2D-), motivadas por los fenómenos de turbulencia y las diferentes condiciones de contorno impuestas, condiciones que las metodologías anteriores no pueden estudiar.

El siguiente caso de estudio fue el considerar un escape quíntuple procedente de los dos depósitos y de las tres mangueras utilizadas en la descarga del gas (hecho poco



probable pero no imposible). En este supuesto la nube de gas se extendió por prácticamente toda la fábrica, encontrándose extensiones horizontales por encima del LIE del gas metano de más de 40 metros. Estos valores incluso sobrepasan las distancias de seguridad recogidas en la norma UNE 60210 que establecía como zonas de distancia de seguridad para los dos depósitos y el camión de descarga, 25 metros alrededor del almacenamiento fijo.

Podríamos pensar que esta situación está sobrevalorada y que la metodología es demasiado conservadora. No obstante como ya hemos indicado en diciembre del año 2010 se produjo un escape en la válvula de seguridad del depósito uno, en este caso el escape de gas se extendió hasta la zona de oficinas ubicada a casi 40 metros en línea recta del recinto de los depósitos y por diversas zonas de la fábrica obligando a activar el plan de emergencia y desalojando la fábrica.

12.2. Conclusiones de la aplicación de la metodología cuantitativa según norma UNE 60079-10, metodología con programa ProgEx y de la aplicación de la metodología CFD-FLUENT a la Sala de Calderas

a) Metodología cuantitativa según norma UNE 60079-10.

La aplicación de la metodología cuantitativa a la sala de calderas proporcionó dos resultados diferentes motivados por la elección de las tasas de escape de los elementos que fugan en la línea de quemador de las calderas.

Primeramente estudiamos la válvula manual de entrada en la sala de calderas que obtuvo un radio de esfera de 30 cm alrededor de la fuente de escape.

Por otro lado, analizamos la línea del quemador considerando por separado las tasas de escape de cada uno de los cinco elementos que la componen y obteniendo los volúmenes correspondientes para cada uno de ellos. Esto dio como resultado un radio de esfera de 0,43 metros para cada uno de ellos. El segundo resultado menos conservador se obtuvo considerando la tasa de escape global del quemador, en este caso el resultado obtenido fue de 0,3 metros alrededor del mismo.

El valor adoptado fue de 0,5 metros (por seguridad) alrededor de los dispositivos de corte, filtros, válvulas, etc. para las distancias horizontales y el doble, es decir, 1 metro



para las verticales por ser el gas metano más ligero que el aire. La zona quedó clasificada como Zona 1.

Como ya hemos indicado la metodología cuantitativa presenta deficiencias. Una de ellas consiste en el escaso tratamiento de la metodología a la superposición de los volúmenes de zona peligrosa. Por ejemplo, si sobre cada uno de los cinco elementos que conforman la línea del quemador se impone una distancia horizontal de 0,5 metros de radio y la distancia adyacente entre cada dos de ellos es del orden de 0,4 metros, tendríamos la mayor parte de los volúmenes superpuestos y no una extensión horizontal global para la propia línea.

Es por ello, que en las instalaciones en las cuáles existen numerosos elementos con tasas de escape diferentes deben aplicarse metodologías más generales para poder clasificar y determinar la extensión de los volúmenes explosivos.

b) Metodología con el programa ProgEx

Los resultados obtenidos con este programa arrojaron valores menos seguros que los obtenidos con la metodología cuantitativa. En este caso la distancia peligrosa quedó definida alrededor de 0,25 m sobre cada uno de los elementos de escape: válvulas, bridas, conducciones, etc., es decir, un valor próximo a los 0,3 metros comentados anteriormente al valorar de forma conjunta la línea del quemador.

c) Metodología CFD. Programa GAMBIT-FLUENT

En este caso se recrearon dos situaciones:

- Una primera compuesta por cinco escapes, dos por cada línea del quemador más uno en la válvula principal y
- Otra en la que se consideró siete posibles escapes, tres por cada línea de quemadores y uno para la válvula principal de entrada.

Los escapes en ambos casos son debidos a flujo sónico impuesto por la condición *Choquet*.

Los resultados obtenidos difirieron de los presentados por las dos metodologías anteriores (cuantitativa y programa ProgEx). Para la primera de las situaciones contempladas se obtuvieron distancias horizontales de aproximadamente 0,6 metros alrededor de las fuentes de escape ocupando en puntos el ancho de 1,2 metros del



pasillo de las líneas de quemadores y con una distribución más real de la nube de gas en la que se reflejan los fenómenos de turbulencia. El segundo de los supuestos simulados que contemplaba siete elementos de fuga obtuvo valores en distancias parecidos (0,8 metros) alrededor de las fuentes de escape, reflejándose además la distribución de la nube de gas por prácticamente todo el recinto de la sala de calderas y su propagación a la sala adyacente de frío número 1. Resultados que las metodologías comentadas anteriormente para el estudio de la sala de calderas no reflejan.

12.3. Conclusiones de la comparativa de la aplicación de las normas italiana CEI 31-35 a la zona de carga de baterías, metodología ProgEx y metodología CFD-FLUENT.

a) Metodología cuantitativa según norma italiana CEI 31-35

La norma italiana utilizada ofreció una distancia horizontal de 1,2 metros alrededor de la batería que se está cargando y una distancia vertical de 2,4 metros (el doble) por ser el hidrógeno un gas menos denso que el aire. Esta zona quedó clasificada como Zona 1.

b) Metodología con programa ProgEx.

Los resultados obtenidos en el programa ofrecieron una distancia de seguridad de 0,35 metros alrededor de las fuentes de escape y una clasificación de Zona 1. Si consideramos que cada tapón de la batería es un elemento por el que fuga el gas, como presenta 16 tapones dispuestos en filas y columnas de 4 y separados entre sí a 20 cm y 10 cm respecto al borde de la batería, obtendríamos la ya mencionada superposición de volúmenes sobre todos los tapones lo cual no es real. Separando las circunferencias superpuestas de las esferas teóricas obtendríamos alrededor de la batería una distancia de 110 cm (1,1 m) muy próximo al resultado obtenido anteriormente.

c) Metodología CFD. Programa GAMBIT-FLUENT

La aplicación de la metodología CFD con el programa FLUENT para este supuesto ofreció resultados diferentes a los anteriormente obtenidos. No en cuanto a la magnitud de los mismos, pues la longitud horizontal de la nube de hidrógeno osciló entre los 2,2 y 1,9 metros, pero sí en la posición de la misma (dispersión) desplazada en mayor parte fuera de la superficie de la batería hacía la zona libre de carga. Ya habíamos apuntado que es preciso considerar los posibles obstáculos y barreras



(objeto de fenómenos de turbulencia) que pueden figurar en las zonas de estudio, algo que sólo se puede realizar con los programas computacionales.

12.4. Conclusiones de la comparativa de la aplicación de la metodología cualitativa según la norma UNE 60079, la metodología ProgEx y la metodología CFD-FLUENT a la Zona de Frío (Balsa de agua helada 2)

a) Metodología cualitativa según norma UNE 60079-10.

En esta zona de estudio se optó por utilizar la metodología cualitativa en vez de la cuantitativa habida cuenta de los múltiples elementos que pueden fugar en esta zona, y considerando que para los elementos de estudiados de aplicación en la literatura para poder extrapolar a nuestra instalación de referencia. Los resultados obtenidos fueron las extensiones horizontales-verticales siguientes: compresor (3m-1m), válvulas de seguridad (3m-3m), válvulas y bridas (3m-3m) y tuberías (1,5m-4m).

Teniendo en cuenta la superficie de la sala toda ella es una zona clasificada (Zona 1), pues resulta imposible con esta metodología separar las zonas no extensibles por las fuentes de escape.

b) Metodología según programa ProgEx.

Los resultados obtenidos con este programa clasificaron todo el recinto de la sala como zona de riesgo.

c) Metodología CFD. Programa FLUENT

En este apartado se escenificaron dos supuestos: el primero correspondiente a un escape de gas amoníaco por un poro en uno de los compresores (CR6) y el segundo el correspondiente a la contribución de un escape motivado por la fuga de tres elementos (válvula, tubería y compresor CR10).

El primer supuesto arrojó una distancia de extensión horizontal del escape del compresor en dirección hacia la posición del ventilador de 3,5 metros. Este valor es un poco más conservador respecto al obtenido con la metodología cualitativa para este equipo que fue de 3 metros. No obstante, esta metodología no permite predecir la direccionabilidad de los escapes, como hace la CFD.



El segundo supuesto ofreció como resultado la extensión de la nube de amoníaco por prácticamente todo el recinto de superficie a excepción de zonas concretas: parte posterior de los compresores, fondo de la balsa, etc., con diferentes concentraciones (muchas por encima del 15% del LIE) donde las mayores se extendieron a la zona centro de la sala y en especial hacia el hueco del ventilador que comunica con el exterior.

12.5. Conclusiones de la comparativa de la aplicación de la metodología cualitativa según la norma UNE 60079-10, la metodología ProgEx y la metodología CFD-FLUENT a la ERM de la planta de tratamientos de residuos sólidos

a) Metodología cualitativa según norma UNE 60079-10

Se aplicó la metodología cualitativa a una de las estaciones de regulación y medida (ERM1), tomando en cuenta datos bibliográficos y ejemplos de la propia norma. Así, las extensiones de la zona peligrosas fueron las siguientes: 1 metro (horizontal-vertical) en los elementos siguientes: sello de las válvulas de regulación (líneas de entrada y colector), bridas de unión de tuberías (colector), puntos de toma de muestra (ERM), resultando una clasificación Zona 1 para toda la sala.

b) Metodología según programa ProgEx.

El programa dio como resultado una zona peligrosa con radio de esfera de 0,8 metros alrededor de todos los puntos de emisión de la sala (Zona 1). Por los motivos anteriormente expuestos en los ejemplos anteriores al no precisar superposición de volúmenes toda la sala (habida cuenta de las dimensiones) debe considerarse como Zona 1, al igual que la arqueta de salida de colector.

c) Metodología CFD. Programa FLUENT

En este apartado se recrearon tres fugas: dos en el colector y otra más en la arqueta. Las condiciones consideradas fueron de flujo sónico incluyendo las condiciones iniciales y de contorno encontradas en la visita. Las simulaciones dieron como resultado la extensión de la nube de gas por prácticamente todo el recinto con concentraciones diferentes en función de la posición frontal de la ventilación.

En este caso de estudio las tres metodologías presentan resultados parecidos, aunque como es lógico son más precisos los obtenidos con la metodología CFD.



12.6. Conclusiones de la utilización de los equipos de detección de gas: Orion^{PLUS} y Dragüer Xam 7000 a la clasificación y extensión de las zonas ATEX.

La determinación de la extensión de una zona ATEX puede variar considerablemente en función de múltiples factores: modificaciones en los procesos productivos, diversidad y cambios en los equipos y materiales utilizados, etc. Asimismo, para poder desclasificar una zona también resulta necesario “medir”.

La utilización de equipos de medición cualitativo o semicualitativo (tubos colorimétricos) no son adecuados para la determinación de la extensión de zonas. Para ello deben utilizarse explosímetros con los sensores específicos para los gases a determinar como son los utilizados.

El empleo de los equipos mencionados (Orion^{PLUS} y Dragüer Xam 7000) ha permitido el desclasificar una zona teóricamente peligrosa como la EDAR de la planta junto con la balsas de aireación y la línea de tratamiento de fangos. Los resultados obtenidos (1% LIE) con estos equipos se encontraban muy por debajo del LIE del metano.

La estrategia de muestreo utilizada se ha establecido a partir del foco de emisión. Como la atmósfera explosiva ocupa un volumen en el espacio, se han fijado de forma radial en los tres ejes del espacio los puntos de medición a distancias determinadas, de tal manera que nos permitiera conocer el decrecimiento de las concentraciones del gas inflamable a medida que nos separamos del/los focos emisores. Esto nos ha permitido conocer de forma bastante aproximada la extensión de la atmósfera explosiva.

Así, los resultados de las mediciones efectuadas en la balsa de agua helada 2 para un escape en el purgador del compresor CR6, arrojaron extensiones de zonas del orden de los valores obtenidos con la metodología CFD, es decir, aproximadamente 3,5 metros en la misma dirección y ocupando en sentido vertical el total de la altura de la sala en la dirección principal del escape.

Las mediciones realizadas en la sala de cargas de batería condujeron también a resultados muy similares a los obtenidos con la metodología computacional tanto en la dirección del escape como en la extensión horizontal (2,2 metros) y vertical (3,8 metros sobre la batería de carga).



Las mediciones deben llevarse a cabo como es lógico en las situaciones más desfavorables que se puedan presentar en la zona de estudio. Es decir, en el periodo de máxima emisión que pueda producirse en condiciones normales de trabajo. Debe medirse inicialmente para el establecimiento de las zonas, y posteriormente siempre que se lleven a cabo modificaciones en las condiciones iniciales que llevaron a cabo dicha determinación. También deben realizarse mediciones periódicas en función de las características concretas de las zonas clasificadas con el fin de controlar el mantenimiento de los límites de zona inicialmente establecidos.

12.7. Conclusiones de la aplicación de la norma UNE EN 60079-10-2 de Clasificación de emplazamientos por atmósferas peligrosas de polvo (metodología cualitativa) para la Torre de Leche en Polvo de la industria láctea y Almacenamiento de Carbón en la Planta de tratamientos de RSU.

En el desarrollo de esta tesis vimos la clasificación de zonas ATEX para las atmósferas por polvo (Zonas 20, 21 y 22), vinculadas a la presencia de polvo con grados de escape continuo, primario y secundario, respectivamente.

La clasificación zonal de la Torre de leche en polvo dio como resultados al aplicar la norma UNE 6007910-2, los siguientes:

- El interior de la cámara de secado en su conjunto es todo una zona 20, motivado como ya hemos indicado en el punto 4 de esta tesis por la gran dificultad que entraña el determinar el punto exacto de transformación del líquido en polvo (a grosso modo se estima que el primer tercio superior de la parte cilíndrica de la cámara de secado sería una Zona 21 y el resto zona 20). Es frecuente el encontrar clasificaciones diferenciadas Zona 21 el atomizador, Zona 20 la cámara de secado sin mucha justificación.
- La zona de ensacado arrojó las siguientes clasificaciones:
 - Zona 20: la zona de llenado de big-bags, interior de las tolvas, interior de los sinfines, interior de las pesadoras y de los tubos de descarga.
 - Zona 21: zona contigua de la boca de llenado por la propia dispersión de la nube mínima de polvo que se genera.
 - Zona 22: alrededor de las máquinas de llenado. Si bien en el resto de la instalación y conjunto de equipos no definidos debe ser considerado también como zona 22.



El almacenamiento de carbón en la planta de residuos sólidos conllevó una clasificación zonal tipo 20 para el interior de la tolva, interior de tuberías e interior del mezclador y una clasificación 21 para el resto del emplazamiento pudiendo clasificarse como zona 22 mejorando la limpieza en la zona.

Se considera de interés resaltar las siguientes reflexiones sobre la norma.

La clasificación zonal entraña con frecuencia problemas, quizás no para las zonas 20 (interiores de conductos, tuberías), pero sí para las zonas clasificadas como 21 (que pueden evolucionar a zonas 22) y que condicionan la evaluación de la conformidad del material existente. Las capas de polvo conducen a zonas 21 cuando éstas pueden ser puestas en suspensión durante el funcionamiento “normal” de la instalación. Por otra parte, resulta prácticamente imposible indicar o predecir, el espesor máximo de una capa de polvo que no se puede sobrepasar y que condicionaría la clasificación zonal. La onda expansiva generada por la explosión primaria (por ejemplo interior de un ciclón-zona 20)) pondría en suspensión el polvo acumulado (zona 21/22?). La llama de la explosión primaria causaría entonces la ignición de la fuente de polvo generada por la onda expansiva, causando una explosión secundaria (quizás más peligrosa que la primaria).

La propia norma UNE incluso se permite el generar incertidumbre sobre, a priori, la clara clasificación zonal 20:

“Ciertos silos pueden llenarse o vaciarse raramente. El interior puede clasificarse como zona 21. Los equipos en el interior del silo puede ser que sólo se utilicen cuando el silo se está vaciando o llenando. La evaluación de las fuentes de ignición debería tener en cuenta que probablemente la nube de polvo esté presente cuando los equipos estén en funcionamiento”

El llenado o vaciado de silos genera nubes de polvo que en función del material almacenado (K_{St} elevada, etc.) genera situaciones extremadamente peligrosas como hemos visto en el estudio de la cámara de secado.

La confusión no queda ahí, pues la norma también esgrime lo siguiente:

“En el caso poco frecuente de la ruptura de un gran contenedor de polvo puede formar una capa espesa. Si cualquier capa espesa que se haya formado por este



motivo se elimina rápidamente o si los equipos están aislados, es posible que no sea necesario clasificar el emplazamiento como zona 22. Se espera que esta contingencia se identifique y se registre en el estudio junto con el procedimiento de intervención apropiado”.

Muchos productos pulvígenos son combustibles con temperatura de ignición tanto de nube como de capa bajas. En caso de rotura de un silo con material pulvígeno explosivo, no sólo se va a formar capa gruesa sino que dependiendo de donde tenga lugar la rotura del silo se va a generar por la propia gravedad de la caída del material almacenado una nube de polvo con menor temperatura de ignición que en capa. Bastaría con una fuente de ignición con temperatura apropiada para generar una situación “problemática”

La extensión de una zona por atmósferas explosivas de polvo, se define según la norma como: *“la distancia en cualquier dirección desde el borde de una fuente de escape de polvo hasta el punto en donde el riesgo asociado a esta zona se considera como inexistente. Las atmósferas explosivas de polvo debidas a una nube de polvo deben considerarse inexistentes, si la concentración de polvo es, con un margen de seguridad apropiado, inferior a la mínima concentración de polvo necesaria para que una atmósfera de polvo exista. Se debería tener en consideración el hecho de que el polvo fino puede elevarse desde una fuente de escape por el movimiento de aire dentro de un edificio. Cuando en la clasificación se presenten pequeños emplazamientos no peligrosos entre emplazamientos peligrosos, la clasificación debería extenderse a todo el espacio”.*

Para determinar la apropiada extensión de la zona es necesario tener en cuenta las condiciones que conducen al escape en la fuente de escape. En los emplazamientos al aire libre los límites de las zonas clasificadas pueden alterarse debido a los efectos meteorológicos: viento, lluvia, etc. La extensión de un emplazamiento originado por una fuente de escape de grado secundario depende de diversos parámetros del polvo: tamaño partícula, humedad producto, constante de reacción K_{St} , etc.

Es decir, ciertas situaciones van a requerir de metodologías complementarias que permitan analizar con más detalle el riesgo de equipos e instalaciones. En ocasiones podrán utilizarse los resultados obtenidos de ensayos si es que existen, pero en otros muchos casos las herramientas que se deben utilizar son las de tipo computacional.



12.8. Conclusiones de la comparativa de las normas de venteo para el dimensionamiento de los venteos para alivio de presión en las cámaras de secado.

Como ya hemos indicado los dos métodos más usuales para el dimensionamiento de los venteos son la norma americana NFPA 68 y la norma europea EN 14491. Las fórmulas utilizadas por ambas normas son de tipo empírico y utilizan los siguientes parámetros: constante característica del polvo, presión máxima de explosión, volumen del recipiente, relación L/D (altura/diámetro), presión estática de activación del dispositivo, presión reducida de presión que puede aguantar el depósito o recipiente.

Los resultados obtenidos con ambas metodologías fueron diferentes. La sistemática de comparación entre ambas normativas ha sido el considerar diferentes productos lácteos de obtención (suero en polvo, leche en polvo con 35% de materia grasa y leche entera) y el estudiar para cada uno de ellos el área necesaria de venteo en función de la p_{red} y la relación L/D:

- Independientemente de la metodología utilizada las dimensiones de la puerta de alivio de presión de la cámara de secado no son suficientes, en especial cuando se atomizan productos de elevada K_{St} como la leche entera. Parece “menospreciarse” de forma general el riesgo en las cámaras de secado aduciéndose que la nube de polvo no es homogénea. Sin embargo los incidentes con estos equipos no son aislados, produciéndose incendios con relativa frecuencia. No obstante estos hechos muchas veces son silenciados (en especial los que se producen en los turnos de noche) por los propios operarios.
- Los valores que hemos obtenido de superficie de venteo para las cámaras de secado con relación $1 \leq L/D \leq 3$ (cámaras de secado poco esbeltas) y valor $0,1 \text{ bar} \leq P_{red} \leq 2 \text{ bar}$ son mayores aplicando la norma EN 14491 respecto a la norma NFPA 68 y en especial para valores de P_{red} inferiores a 0,75 bar y relaciones L/D mayores de 1. Hay una excepción la correspondiente al caso de $L/D=1$ donde ambas normas presentan valores muy similares.
- Las diferencias entre la norma EN 14491 y la americana NFPA son considerables, sobre todo cuanto menor es la P_{red} . Para valores de P_{red} de 0,1 a 0,25 bar el área de venteo necesaria según la norma europea EN 14491 duplica los valores de la norma americana NFPA 68.



- Los recipientes con relaciones L/D que precisan menor área de venteo varían también según la normativa aplicada. Ambas normas confieren un tratamiento distinto al cálculo de la superficie. Así, según la norma americana NFPA 68 (la menos exigente) la relación L/D que precisa menor área de venteo tiene lugar en cámaras de secado-silos que presentan poca esbeltez $1 \leq L/D \leq 2$, si utilizamos la norma europea EN 14491 la relación es L/D=1.
- El considerar puertas de alivio de presión o paneles de venteo con presiones de activación (P_{stat}) muy bajas (inferiores a 0,1 bar) no produce reducciones en las superficies de venteo. Esto es así, ya que la norma europea EN 14491 fija el valor mínimo en 0,1 bar.
- Los productos lácteos que se vayan a obtener y/o tratar condicionan de forma significativa el área de venteo para protegerlos. Altas relaciones de L/D (2, 2.5 y 3) conllevan diferencias muy significativas con valores de hasta casi un 400% (aumento de la superficie de venteo) al procesar productos lácteos con severidad de explosión alta (como es la leche entera que tiene un alto porcentaje en grasa y K_{St} 141 bar m/s respecto a otros productos como el suero en polvo con K_{St} 41 bar m/s).
- Para productos con alta K_{St} como la leche entera, se hace muy difícil el proteger las cámaras de secado mediante la norma europea (en muchos casos sería casi imposible instalar todo el área de venteo que la norma exige ya que podría llegar a ser mayor que la propia sección del equipo a proteger) y parece más factible hacerlo aplicando la norma americana. No obstante, prácticamente no existen valores publicados para estos casos, y el justificar de manera correcta una menor área de venteo no debe tomarse a la ligera. Para ello, deberían realizarse ensayos experimentales (muy costosos) y la utilización de herramientas de simulación ya que los datos de los ensayos no son fácilmente extrapolables (cambios en las geometrías, condiciones de contorno e iniciales, etc.).

12.9. Conclusiones de la aplicación de la dinámica de fluidos computacional en el desarrollo de la tesis. Programa GAMBIT-FLUENT

- La dinámica de fluidos computacional es una herramienta muy poderosa que permite recrear con gran fidelidad situaciones reales de comportamiento del flujo de fluidos.



- Mediante el código CFD-GAMBIT-FLUENT se recrearon diferentes escenarios reales con sus correspondientes condiciones iniciales de contorno.
- Los modelos creados y simulados han permitido obtener resultados coherentes que siguen unas tendencias adecuadas para diversas situaciones: varias fuentes de escape, velocidades de escape sónicas o subsónicas, recipientes con venteos, varios grados de turbulencia, etc.
- Los resultados obtenidos con el programa FLUENT-GAMBIT se compararon con los valores de las metodologías de referencia: norma UNE 60079-10 y norma CEI 31-35.
- Los resultados obtenidos con las simulaciones muestran tendencias similares a los obtenidos con las normas reflejadas (en especial para recintos cerrados con poca ventilación) pero desde un punto de vista más real prediciendo la evolución de los escapes y explosiones y con un carácter más conservador.
- La CFD es una herramienta muy útil para planificar ensayos reales de explosión y para poder extrapolar los resultados a otras situaciones.
- Los modelos permiten obtener mucha información y podemos fijar varias condiciones iniciales con un coste reducido.

No obstante la metodología CFD presenta varias complicaciones como son:

- Dificultad de manejo del software que incluye la recreación del escenario primero y la interpretación por último de los resultados.
- Necesidad de un hardware muy potente que economice los tiempos de cálculo.

12.10. Conclusiones de la aplicación de la termografía a la determinación de fuentes de ignición

- La termografía es una de las herramientas de diagnóstico más valiosas en el mantenimiento preventivo. Los equipos termográficos son fáciles de usar y los resultados fácilmente analizables.



- La inspección de superficies calientes es inmediata presentado resultados de la distribución de temperatura en tiempo real de elementos y equipos potencialmente peligrosos.
- Permite detectar zonas recalentadas que pueden provocar incendios en distintos elementos y detectar riesgos de incendios por excesiva proximidad a zonas de salida de gases.
- La aplicación de esta técnica al caso práctico de la industria láctea permitió determinar instalaciones críticas con equipos generadores de situaciones de riesgo grave como son:
 - Torre de leche en polvo: presencia de cuerpos con temperaturas en superficie próximas a los 200°C en la zonas de: colector de vapor, válvulas de corte en batería, purga y llave general de vapor.
 - Sala de calderas: Temperaturas de superficie caliente, también próximas a los 200°C en varios elementos: colector de vapor de salida a fábrica, válvulas de corte y reductoras de presión.
 - Balsa de agua helada 2: Elementos con temperatura en superficie superiores a 125°C: bloque de los compresores CR6 y CR 10 y válvula de corte principal.

12.11. Conclusiones finales sobre los trabajos realizados

Lo anteriormente expuesto puede resumirse en las siguientes conclusiones:

- Los procesos productivos de transformación láctea y de residuos generan gran variedad de atmósferas explosivas con situaciones de riesgo importantes que son preciso controlar.
- Dentro del control del riesgo por atmósferas explosivas el paso más importante es lograr una correcta clasificación y extensión de las zonas, bien sean para atmósferas por vapores, gases o nieblas y/o por polvos combustibles.
- La norma UNE 60079-10 permite dos metodologías de valoración y clasificación de zonas ATEX, la cuantitativa y cualitativa.
 - **La metodología cualitativa** se articula en bases a experimentos y predicciones reales sobre las fugas de gases y líquidos. Su fuerte radica en la sencillez de aplicación a casos concretos de la industria de los cuales se dispone de información, es decir, se conocen los valores de las distancias horizontales y



verticales de las fugas a través de los elementos estudiados. El gran inconveniente de esta metodología radica es que no se dispone de información sobre todos los elementos que pueden fugar, tampoco se pueden extrapolar los resultados obtenidos a todos los casos de forma general.

- **La metodología cuantitativa** permite predecir con exactitud volúmenes de atmósferas explosivas y por ende el radio de la geometría (esférica) que acompaña a la fuente de escape. Presenta el gran inconveniente de los múltiples cálculos a realizar, lo que puede incurrir en errores a la hora de valorar la totalidad de las tasas de escape.

El análisis de las zonas de estudio de la industria láctea y planta de RSU con estas dos metodologías, condujo a resultados similares aunque menos conservadores a la hora de utilizar la metodología cualitativa, por las razones anteriormente expuestas.

- La metodología mediante el programa progEx presenta similitudes con la cuantitativa, basándose en la norma italiana CEI 31-35.
- Los resultados obtenidos con la metodología del programa ProgEx a los diversos casos de estudios fueron similares a los obtenidos con la metodología cualitativa.
- Los resultados obtenidos mediante el empleo de las metodologías según norma UNE 60079-10 (cuantitativa y cualitativa) y mediante el programa ProgEx presentan buena correspondencia en general para espacios cerrados no excesivamente venteados.
- Se ha propuesto la aplicación de la dinámica de fluidos computacional (CFD) a los casos de estudios mediante la utilización del programa GAMBIT-FLUENT.
- Los resultados obtenidos con el programa FLUENT son más reales en especial en el caso de estudio de los depósitos de GNL por ser una zona abierta, donde el programa permite estudiar fenómenos de turbulencia, barreras, diversas condiciones iniciales y de contorno, etc.
- La metodología mediante el programa FLUENT es más conservadora que las metodologías cuantitativa, cualitativa y programa ProgEx.



- Las normas de referencia utilizadas para el diseño de venteos para alivios de sobrepresiones son la norma europea UNE EN 144491 y la norma americana NFPA 68.
- Las superficies de venteo para recipientes obtenidas mediante la aplicación de una u otra norma presentan grandes diferencias. La norma europea UNE EN 14491 es más restrictiva que su homóloga americana por el propio tratamiento en las fórmulas de cálculo.
- Los productos pulverulentos más peligrosos son aquellos que presentan elevadas velocidades de reacción y menor tamaño de partículas. Su peligrosidad conlleva mayor tamaño de superficie de alivio de presión en el volumen que los contiene.
- A la hora de realizar una correcta clasificación ATEX puede no bastar la aplicación de una única metodología, habrá casos sencillos ya estudiados en los cuales podamos hacer uso de estudios realizados y serán de buena aplicación metodologías cualitativas. Para casos más complejos la metodología cuantitativa ofrece buenos resultados que podemos acompañar con aplicación de programas sencillos, etc. La metodología CFD permite el recrear todos los escenarios posibles con diferentes situaciones con un carácter más conservador; esta metodología es de aplicación a casos concretos que se quieran estudiar con sumo detalle.
- En muchos de los casos que se nos puedan presentar es necesario el ayudarse de instrumentos de medición y detección de gases como explosímetros para, en los casos más favorables poder desclasificar zonas y en aquellos casos, en los cuales no sea posible, ayudar a concretar y definir la extensión de las mismas.
- La termografía permite estudiar de forma real y precisa la distribución de temperaturas de cuerpos calientes generadores de incendios y /o explosiones.
- Por último, es conveniente el revisar la normativa vigente en relación a atmósferas explosivas así como las normas UNE de aplicación al estudio de atmósferas explosivas en busca de una mayor unificación.



12.12 Propuestas de futuras líneas de investigación

Los trabajos realizados en la presente tesis han proporcionado información útil sobre la clasificación y extensión de zonas ATEX ya sean debidas a gases, vapores o nieblas como a polvos arrojando luz sobre algunas de las incertidumbres que existen actualmente. Sin embargo, se han advertido varios aspectos que deberían ser investigados con más profundidad en el futuro.

1. Estudiar con más detalle los modelos de simulación realizados en esta tesis, analizando la variación de la velocidad y las concentraciones de productos de explosión.
2. Realizar simulaciones en 3D para ver el volumen global de las atmósferas ATEX debidas a gases, vapores y nieblas y su geometría.
3. Analizar con el programa FLUENT la sección de torre de leche en polvo de manera más consia y global considerando todos los elementos y equipos que intervienen en la misma, influencia de los ciclones, evolución de una explosión hacia la zona de ensacado, etc.
4. Análisis estructural dinámico de la cámara de secado teniendo en cuenta la interacción entre fluido y estructura para así poder conocer el efecto de la variación de la presión a lo largo del tiempo, el efecto de las subpresiones y conocer de manera más exacta los puntos críticos de la instalación.
5. Estudiar el desarrollo de las explosiones en la sección de torre de leche con el programa DESC (Dust Explosion Simulation Code) en colaboración con el Departamento de Ingeniería y Ciencias Agrarias de la Universidad de León.



APÉNDICE I. METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DEL RIESGO DE EXPLOSIÓN

Se presenta en este apéndice una metodología para la evaluación de riesgo de explosión bien por atmósferas explosivas por gases, vapores o nieblas o por polvos combustibles.

La valoración del riesgo de explosión presenta múltiples dificultades que puede resumirse en los siguientes puntos:

- Variedad de atmósferas explosivas posibles.
- Dificultad para identificar algunas de estas atmósferas producidas por combinaciones o reacciones poco conocidas.
- Gran variedad de los posibles focos de ignición.
- Cada tipo de atmósfera y cada foco tienen un método diferente para su cuantificación precisa.

De forma esquemática el proceso de evaluación se recoge en la figura I.1.

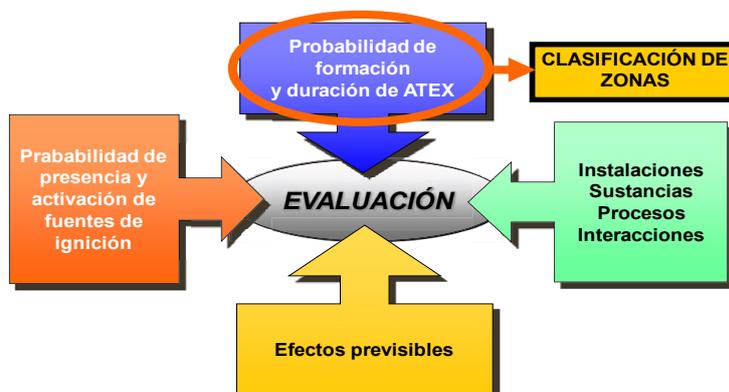


Figura I.1. Proceso de evaluación ATEX

La evaluación de las instalaciones se realiza teniendo en cuenta todos los modos de operación, es decir:

- Condiciones de operación normal.
- Operaciones de mantenimiento.
- Paradas y puestas en marcha.
- Condiciones anómalas y de fallos previsibles.



I.1. CRITERIOS DE VALORACIÓN

El proceso adoptado para la valoración completa de los riesgos derivados de la formación de atmósferas explosivas (ATEX) está basado en lo establecido en el R.D. 681/2003, en la “Guía de buenas prácticas para la aplicación de la Directiva 1999/92/CE” y en la Norma UNE-EN 1127-1: 1997, Atmósferas explosivas. Prevención y protección contra explosión. Parte 1: Conceptos básicos y metodología.

De una forma esquemática el proceso de valoración sería el recogido en el diagrama de la figura I.2.

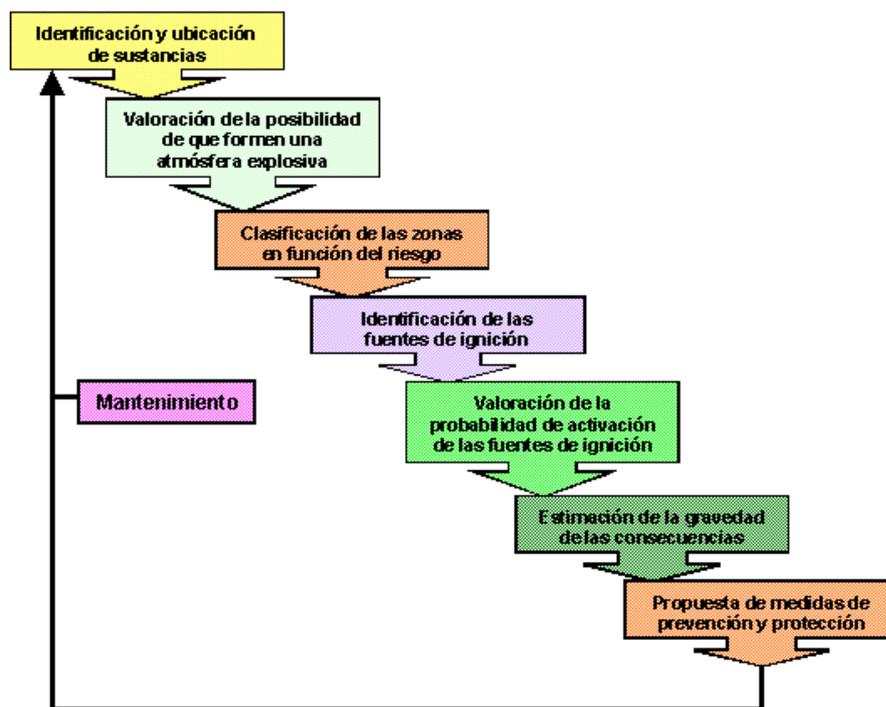


Figura I.2. Valoración de formación de atmósferas explosivas (ATEX)

Para la evaluación del riesgo de explosión se sigue el siguiente procedimiento:

- Determinación de la **probabilidad de que se produzca una explosión**, considerando la probabilidad de coexistencia de una atmósfera explosiva y una fuente de ignición efectiva.
- Estimación del **Nivel de Riesgo de Explosión**, considerando la probabilidad de que se produzca una explosión, junto con las consecuencias que de la misma se derivarían.



Esto nos conduce a considerar tres variables:

1. El tipo de Zona, según la clasificación del Anexo I del R.D. 681/2003 y que se recoge en la tabla I.1.

GASES, VAPORES O NIEBLAS	POLVOS	ATMÓSFERA EXPLOSIVA
ZONA 0	ZONA 20	PRESENTE DE MODO PERMANENTE, O POR UN PERIODO DE TIEMPO PROLONGADO O CON FRECUENCIA
ZONA 1	ZONA 21	PROBABLE LA FORMACIÓN OCASIONAL
ZONA 2	ZONA 22	NO ES PROBABLE EN CONDICIONES NORMALES DE EXPLOTACIÓN, EN CASO DE FORMARSE SÓLO PERMANECE DURANTE BREVES PERIODOS DE TIEMPO

Tabla I.1. Clasificación de la zona ATEX

2. La Probabilidad de que aparezca una fuente de ignición (F.I.), utilizando para ello la escala que propone la norma UNE-EN 1127-1, en su apartado 5.3. y que establece que dicha probabilidad puede ser:
 - Constantemente o frecuentemente.
 - En circunstancias raras.
 - En circunstancias muy raras.
3. La Gravedad de las consecuencias (G.C.), basándose en métodos empíricos que permitan estimar la potencia de la explosión y combinarla con las características del entorno.

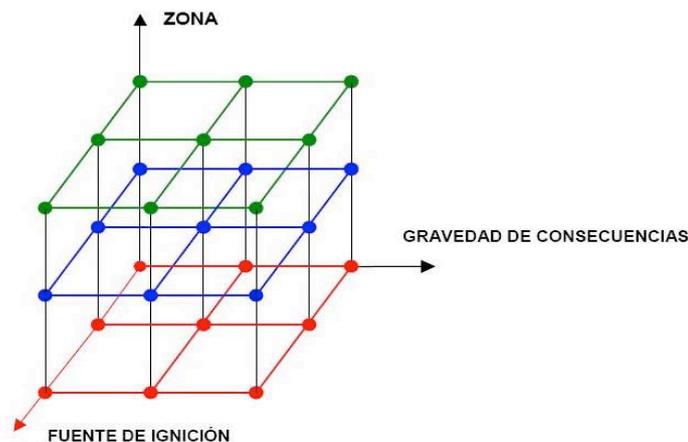


Figura I.3. Matriz tridimensional que relaciona la zona, la fuente de ignición y la gravedad



La combinación simultánea de estas tres variables daría lugar a una matriz tridimensional (figura I.3), en la que, si cada variable tuviera 3 niveles, se obtendrían 27 resultados posibles, lo cual resultaría de muy difícil aplicación.

Por todo ello, es más lógico y fácil de aplicar si se realiza la valoración en dos etapas:

I.1.1. Identificación de la zona

Aquí, como hemos visto tenemos que diferenciar entre zonas debidas a polvo combustible y zonas debidas a gases, vapores o nieblas y así tenemos:

I.1.1.1. Zonas debidas a polvo combustible

En el caso de ATEX de polvo el proceso de clasificación implica:

A.- Determinar la presencia de sustancias inflamables

Consiste en identificar las sustancias peligrosas presentes y sus parámetros de seguridad

- a) Temperatura mínima de ignición en capa (TMlc).
- b) Temperatura mínima de ignición en nube (TMIn).
- c) Concentración mínima explosiva (CME).
- d) Presión máxima de explosión (PME).

B.- Determinar las fuentes y grado de escape

Cualquier equipo, envase, depósito, etc., que contenga una sustancia inflamable deberá considerarse como una fuente potencial de escape.

Grado de escape:

- Continuo: Escape de forma continua ó durante largos periodos.
- Primario: Escape de forma periódica u ocasionalmente durante el funcionamiento normal.
- Secundario: Escape que no se prevé en funcionamiento normal y si se produce es de forma infrecuente y en periodos de corta duración.

C.- Estudiar la influencia de las capas de polvo

En el caso del polvo combustible además de las fuentes de escape desde los equipos deben considerarse también las capas de polvo, ya que constituyen un riesgo latente de formación de atmósferas explosivas en caso de que sean puestas en suspensión.



Las capas de polvo formadas en el exterior de los equipos deben controlarse a fin de que no alcancen espesores peligrosos.

Un depósito de polvo de espesor < 1 mm repartido de manera homogénea por toda la superficie de una estancia basta para llenar completamente la misma con una mezcla explosiva de polvo/aire en caso de arremolinarse.

Las operaciones de limpieza y mantenimiento, así como la posibilidad de emplear procedimientos inadecuados que contribuyan a poner en suspensión las capas de polvo deben considerarse a la hora de valorar éste aspecto.

D.- Determinar el tipo de zona

El tipo de zona que se genera depende, principalmente, de 2 parámetros, tal y como se recoge en la tabla I.2, y que son:

- a) El grado del escape.
- b) La presencia de capas de polvo.

TABLA DE DETERMINACIÓN DE ZONAS			
GRADO DE ESCAPE	NUBE DE POLVO	CAPAS DE POLVO DE ESPESOR CONTROLABLE	
		PERTURBACIONES FRECUENTES	PERTURBACIONES OCASIONALES
Continuo	ZONA 20	ZONA 21	ZONA 22
Primario	ZONA 21	ZONA 21	ZONA 22
Secundario	ZONA 22	ZONA 21	ZONA 22

Tabla I.2. Tabla de determinación de zonas en caso de atmósfera de polvo

E.- Determinar la extensión de la zona

Para ello deben tenerse en cuenta: Tamaño de partícula, contenido de humedad de la mezcla, proceso de trabajo, presencia de capas de polvo, etc.

El procedimiento para determinar la clasificación y extensión de las zonas generadas por polvo combustible viene establecido en la norma **UNE-EN 61241-10**.



EJEMPLOS DE EMPLAZAMIENTOS (POLVO COMBUSTIBLE)	
ZONA 20	Estas condiciones suelen darse únicamente en el interior de depósitos, recipientes, tuberías, aparatos, etc.
ZONA 21	Se incluyen aquí, entre otras, las áreas situadas en el entorno inmediato de puestos de trasiego, llenado y/o vaciado de polvo, así como zonas en las que se forman capas de polvo y en las que, en condiciones normales de explotación, ocasionalmente se forman concentraciones explosivas de polvo inflamable mezclado con aire.
ZONA 22	Se incluyen aquí, entre otras: las áreas en torno a instalaciones que contienen polvo, cuando puedan producirse fugas de polvo por puntos no estancos que formen depósitos de polvo en cantidades peligrosas.

Tabla I.3. Ejemplos de emplazamientos (polvo combustible)

En la figura I.4 y en las fotos I.1 y I.2 por cortesía de EUROSERUM IBÉRICA, S.L., pueden verse ejemplos de clasificación zonal de atmósferas por polvo.

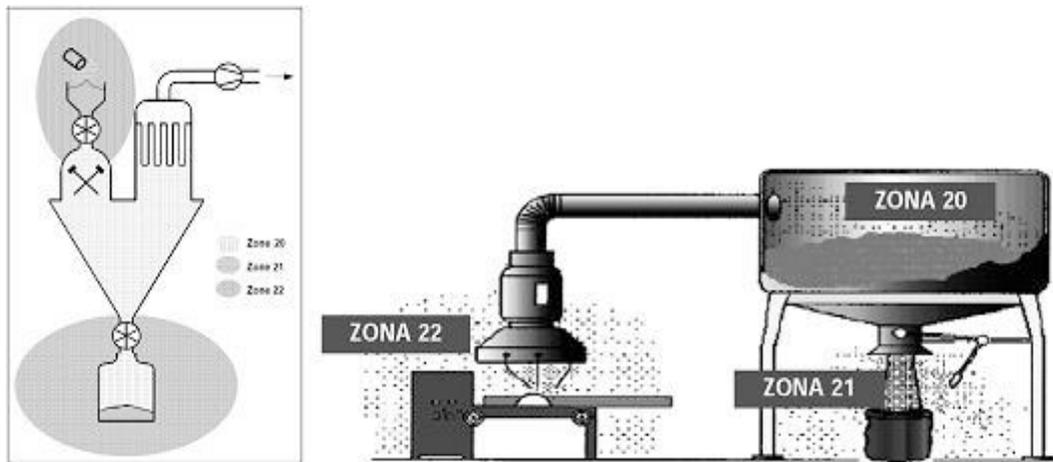


Figura I.4. Clasificación zonal de un proceso de pulverización de carbón

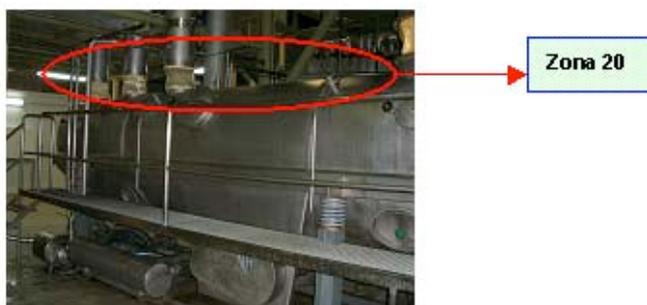


Foto I.1. Equipo vibratorio del sistema de torre de leche en polvo clasificado como ZONA 20



Foto I. 2. Zona de envasado de leche en polvo clasificada como ZONA 21

I.1.1.2. Zonas debidas a gases, vapores o nieblas

En el caso de los gases la situación es más complicada, por lo que es necesario aplicar una metodología derivada de los criterios contenidos en la ITC-BT 29 del REBT que hace referencia a la norma UNE-EN 60079-10: Material eléctrico para atmósferas de gas explosivas -Parte 10: Clasificación de emplazamientos peligrosos

Esta metodología está basada en la ITC-BT 29 del REBT y más concretamente en la norma UNE EN 60079-10:1996 donde se recoge la clasificación de emplazamientos peligrosos.

En este caso el proceso de clasificación implica:

A.- Determinar la presencia de sustancias inflamables

Consiste en identificar las sustancias peligrosas presentes y sus parámetros de seguridad, a saber:

- a) Temperatura mínima de inflamación.
- b) Límites de explosividad (LIE y LSE).

Para las mezclas de varios gases o vapores, se pueden estimar los límites de explosividad aplicando la regla de Le Chatelier, siempre y cuando se conozcan los límites de explosividad de los componentes.

Siendo c_i la concentración de cada componente combustible sobre el volumen total de combustibles, el límite inferior de explosividad (LIE) de la mezcla viene dado por:



$$LIE \equiv \frac{100\% \text{ v/v}}{c_1 \cdot (LIE_1)^{-1} + c_2 \cdot (LIE_2)^{-1} + c_3 \cdot (LIE_3)^{-1} + \dots + c_i \cdot (LIE_i)^{-1}} (\%vol) \quad (\text{Ec.I-1})$$

Y el límite superior de explosividad (LSE), viene dado por:

$$LSE \equiv \frac{100\% \text{ v/v}}{c_1 \cdot (LSE_1)^{-1} + c_2 \cdot (LSE_2)^{-1} + c_3 \cdot (LSE_3)^{-1} + \dots + c_i \cdot (LSE_i)^{-1}} (\%vol) \quad (\text{Ec.I-2})$$

- c) Densidad relativa del gas respecto al aire.
- d) Energía mínima de inflamación (EMI).

B.- Determinar las fuentes y grado de escape

Cualquier equipo, envase, depósito, etc., que contenga una sustancia inflamable deberá considerarse como una fuente potencial de escape.

Grado de escape (Frecuencia y duración), y que puede ser:

- Grado continuo: de forma continua o, presumiblemente, por largos periodos: Esta situación puede asimilarse a una Zona 0.
- Grado Primario: Presumiblemente de forma periódica u ocasionalmente durante el funcionamiento normal. Esta situación se asimila a una Zona 1.
- Grado secundario: No se prevé en funcionamiento normal y, si se produce, es probable que ocurra infrecuentemente y en periodos de corta duración. Esta situación puede asimilarse a una Zona 2.

C.- Determinar el tipo de zona

El Tipo de zona depende del grado de escape y de la ventilación.

- La ventilación natural será a menudo suficiente para asegurar la dispersión de la ATEX. También puede ser eficaz en interiores, cuando existen aberturas suficientes.
- En los casos de ventilación artificial, para que ésta sea eficaz, hay que tener en cuenta diferentes factores:



- Debe controlarse.
 - Se debe considerar la clasificación de los alrededores del punto de descarga.
 - El aire debe tomarse de una zona no peligrosa.
 - Hay que prever la densidad de los gases para saber dónde tenderán a acumularse.
 - También hay que tener en cuenta que la densidad varía con la temperatura.
 - Los obstáculos pueden reducir el movimiento del aire.
- La eficacia de la ventilación dependerá del grado, de la disponibilidad de la misma. Hay tres grados de ventilación:
 - Alta (fuerte): Cuando es capaz de reducir de forma instantánea la concentración en la fuente de escape, obteniéndose una concentración inferior al LIE.
 - Media: Es capaz de controlar la dispersión, manteniendo una situación estable, donde la concentración más allá de una zona confinada es inferior al LIE, mientras el escape se está produciendo y cuando este cesa, la ATEX no persiste excesivamente.
 - Baja (débil): Es la que no puede controlar la concentración mientras el escape está efectivo y cuando este ha cesado es incapaz de evitar la permanencia de una ATEX excesiva.

También se consideran tres grados de disponibilidad:

- Muy buena: la ventilación existe de forma prácticamente permanente.
- Buena: Se espera que exista ventilación durante el funcionamiento normal. Se permite que existan interrupciones siempre que sean poco frecuentes y por periodos cortos.
- Mediocre: La ventilación no cumple los criterios de las dos clases anteriores, pero no se espera que haya interrupciones prolongadas.

En función de las consideraciones anteriores, se puede determinar el tipo de zona mediante la tabla ya vista en el capítulo 5 de la tesis y referenciada como tabla I.4.



TABLA DE DETERMINACIÓN DE ZONAS							
GRADO DE ESCAPE	VENTILACIÓN						
	Grado de ventilación						
	Alto			Medio			Bajo
	Disponibilidad de ventilación						
	Muy buena	Buena	Mediocre	Muy buena	Buena	Mediocre	Muy buena, buena o mediocre
Continuo	No peligrosa	Zona 2	Zona 1	Zona 0	Zona 0 + Zona 2	Zona 0 + Zona 1	Zona 0
Primario	No peligrosa	Zona 2	Zona 2	Zona 1	Zona 1 + Zona 2	Zona 1 + Zona 2	Zona 1 ó Zona 0 (*)
Secundario	No peligrosa	No peligrosa	Zona 2	Zona 2	Zona 2	Zona 2	Zona 1 ó Zona 0 (*)

Notas:

“+” significa “rodeada por”.

(*) será zona 0 si la ventilación es tan débil y el escape es tal que prácticamente la atmósfera explosiva esté presente de manera permanente, es decir, es una situación próxima a la de ausencia de ventilación.

Tabla I.4. Tabla de determinación de zonas debidas a gases, vapores o nieblas

D.- Determinar la extensión de la zona

Para ello deben tenerse en cuenta parámetros como: cuantía del escape de gas, límite inferior de explosividad, densidad relativa del gas, influencia de la ventilación, etc.

En la figura I.5 y en la foto I.3, se presentan ejemplos de clasificación por zonas.

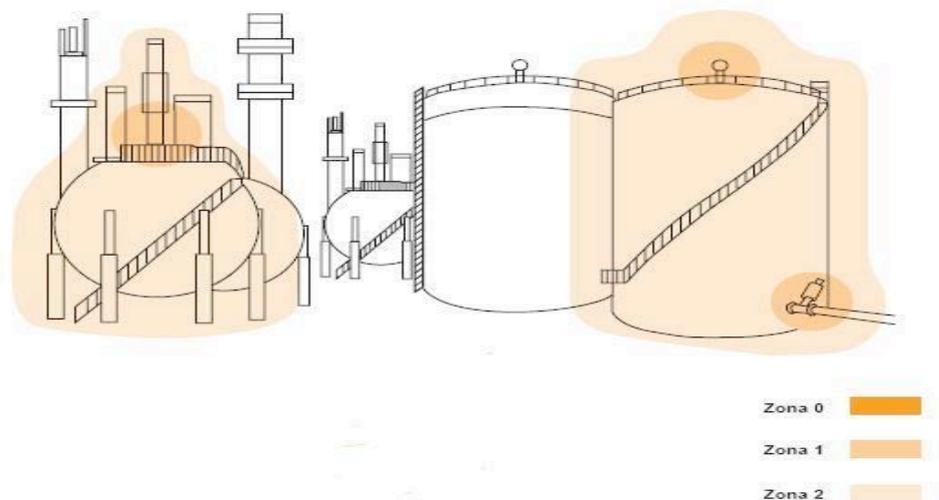


Figura I.5. Clasificación por zonas de depósitos de combustible

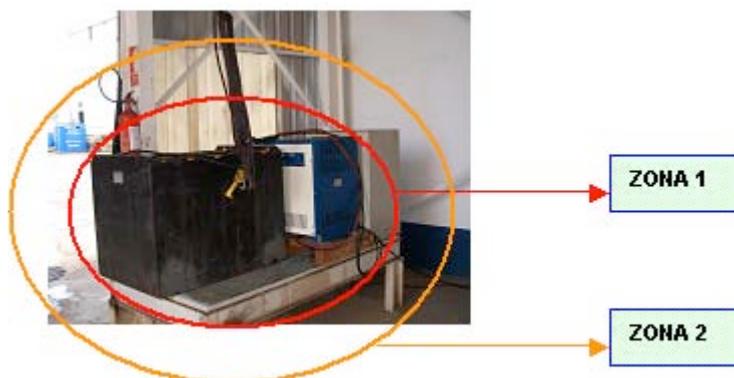


Foto I.3. Clasificación por zonas del emplazamiento del cargador de baterías de carretillas

I.1.2. Probabilidad de que se materialice el riesgo

Identificada la zona se debe establecer la probabilidad de que se materialice el riesgo, es decir que pueda llegar a producirse la explosión. Para ello se combina el tipo de zona con la probabilidad de aparición de una fuente de ignición.

- **Probabilidad de aparición de fuentes de ignición**

La norma europea EN 1127-1 establece trece tipos de fuentes de ignición efectivas a considerar para la evaluación del riesgo en atmósferas explosivas (tabla I.5).

Código	Descripción
S	Superficies calientes
G	Llamas y gases calientes (incluyendo partículas calientes)
CH	Chispas de origen mecánico
E	Material eléctrico
CC	Corrientes eléctricas parásitas, protección contra corrosión catódica
EE	Electricidad estática
R	Rayo
CE	Campos electromagnéticos (ondas de 10^4 a $3 \cdot 10^{12}$ Hz.)
RE	Radiación electromagnética (ondas de $3 \cdot 10^{11}$ a $3 \cdot 10^{15}$ Hz.)
RI	Radiación ionizante
U	Ultrasonidos
C	Compresión adiabática, ondas de choque, gases circulantes
RQ	Reacción química exotérmica, incluyendo la autoignición de polvos

Tabla I.5. Tipos de fuentes de ignición



Para cada una de las instalaciones objeto de estudio, debe analizarse la posibilidad de existencia de las fuentes de ignición relacionadas. Para establecer una jerarquía de riesgo para cada una de las fuentes de ignición consideradas, la norma europea EN 1127-1 determina la necesidad de clasificar dichas fuentes de ignición, de acuerdo con la probabilidad que éstas aparezcan de forma efectiva.

Persiguiendo este objetivo, en cada caso concreto y para cada una de las fuentes de ignición que se considere pueda coexistir con la atmósfera explosiva, se estimará una probabilidad de presencia. Dicha probabilidad se estimará considerando lo observado durante la/s visita/s al centro de trabajo y la información facilitada por la empresa. Así mismo, para estimar la probabilidad de las fuentes de ignición se tendrá en cuenta, por una parte, la capacidad de dichas fuentes para provocar efectivamente la ignición de la atmósfera explosiva y, por otra, la posibilidad de que éstas aparezcan en funcionamiento normal, disfunción o disfunción rara. Así, las fuentes de ignición se valorarán de acuerdo a lo establecido en la siguiente tabla I.6.

PROBABILIDAD DE FUENTES DE IGNICIÓN	
Nivel de probabilidad	Descripción
ALTA	Fuente de ignición que es muy probable que se produzca
MEDIA	Fuente de ignición que es probable que se produzca
BAJA	Fuente de ignición que es poco probable que se produzca
NULA	Fuente de ignición inexistente

Tabla I.6. Tipos de fuentes de ignición

En el caso que distintos focos de ignición den lugar a diferentes probabilidades de activación de la atmósfera explosiva, se considerará siempre la que sea más restrictiva.

En la siguiente tabla (tabla I.7) se indican las diferentes fuentes de ignición y la causa o causas más frecuentes que las originan.



TABLA DE CAUSAS DE FUENTES DE IGNICIÓN		
TIPO FUENTE IGNICIÓN	CÓDIGO	CAUSA
Superficies calientes	S	Superficies calientes fácilmente reconocibles, tales como calentadores eléctricos, radiadores, cabinas de secado, tuberías de vapor, metal fundido, procesos en caliente, piezas de maquinaria, frenos y embragues a fricción (tanto de vehículos como de unidades de proceso), bujías y cojinetes dañados, materiales humeantes, soldaduras recientes, etc.
Llamas y gases calientes (incluyendo partículas calientes)	G	Llamas desnudas (sopletes de soldadura, calentadores, encendedores, etc.). Gases de combustión (motores de combustión interna, vehículos, etc.).
Chispas de origen mecánico	CH	Al golpear herramientas metálicas entre sí, con otros metales, con hormigón, etc. Choques en los que están implicados metales ligeros (como aluminio y magnesio) y sus aleaciones. Como consecuencia de procesos de fricción, rozamiento, etc.
Material eléctrico	E	Equipos eléctricos en malas condiciones o inadecuados al emplazamiento, apagado y encendido de circuitos, etc.
Corrientes eléctricas parásitas, corrosión catódica	CC	Fallos en las instalaciones eléctricas, corrientes de retorno en instalaciones generadoras de potencia, como trenes eléctricos y grandes instalaciones de soldadura, efectos de inducción (cerca de instalaciones eléctricas con corrientes elevadas o transmisiones de radiofrecuencia elevadas). Como consecuencia de procesos de fricción, rozamiento y/o falta de continuidad eléctrica entre elementos conductores que se pueden cargar. Uso de ropa no antiestática.
Electricidad estática	EE	Circulación de fluido por una tubería, transmisiones de correas, transporte neumático de materiales pulverulentos, etc. Como consecuencia de procesos de fricción y/o falta de continuidad eléctrica entre elementos conductores que se pueden cargar. Uso de ropa no antiestática.
Rayo	R	Descarga de rayos por tormenta con aparato eléctrico. Corrientes transitorias asociadas a la descarga del rayo que originan calentamientos, descargas y chispas. Tormentas con ausencia de rayos pueden inducir tensiones importantes en aparatos y equipos de protección.
Ondas electromagnéticas de radiofrecuencia, de 10^4 a 3×10^{12} Hz	CE	Todos los sistemas que producen y utilizan energías eléctricas de alta frecuencia o sistemas de radiofrecuencia (emisoras de radio, generadores RF médicos o industriales para calentamiento, secado, endurecimiento, soldeo, oxicorte, teléfonos móviles, etc.).
Ondas electromagnéticas, de 3×10^{11} a 3×10^{15} Hz	RE	Radiación entre el infrarrojo y el ultravioleta cuando se concentra. Convergencia de la radiación solar, radiación láser, etc.
Radiación ionizante	RI	Medidores de espesores, contadores de partículas y gammagrafías, etc.
Ultrasonidos	U	Medidores de caudal. En líquidos sometidos a ultrasonidos se forman cavidades que al colapsar producen altas temperaturas.
Compresión adiabática y ondas de choque	C	La compresión adiabática tiene lugar sin intercambio de calor con el exterior, elevando la temperatura, como por ejemplo, escapes de gas a través de orificios, apertura rápida de grifos y la subsiguiente compresión (manorreductor cerrado, válvula cerrada, soplete obturado, etc.).
Reacciones exotérmicas incluyendo la autoignición de polvos	RQ	Reacción de sustancias en función de sus propiedades.

Tabla I.7. Causas de fuentes de ignición

El diagrama que establece la probabilidad de explosión se recoge en la figura I.6 y la matriz de combinación ésta con el tipo de zona es la recogida en la tabla I.8.

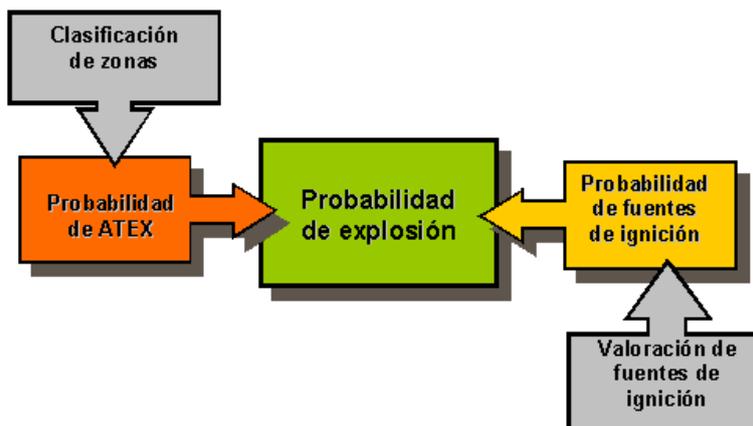


Figura I.6. Diagrama de bloques que relaciona estable la probabilidad de explosión con la clasificación de zonas y la probabilidad de fuentes de ignición

		aparición de la Fuente de Ignición		
		MUY RARO	RARO	CONSTANTE
Clasificación de la Zona	2/22 (no es probable que se forme una ATEX o lo hará durante periodos breves)	IMPROBABLE	BASTANTE PROBABLE	BASTANTE PROBABLE
	1/21 (es probable que se forme una ATEX, pero de manera ocasional)	BASTANTE PROBABLE	BASTANTE PROBABLE	PROBABLE
	0/20 (la ATEX está presente permanentemente o por tiempo prolongado)	BASTANTE PROBABLE	PROBABLE	INEVITABLE

Tabla I.8. Matriz de probabilidad que combina la clasificación zonal y la aparición de una fuente de ignición

I.1.3. Gravedad de las consecuencias

En tercer lugar debe estimarse la gravedad de las consecuencias, la cual será función de la potencia intrínseca de la propia atmósfera explosiva y de las características del entorno en el que se produce la explosión, y aquí tenemos que diferenciar entre potencia de atmósfera explosiva por polvo y potencia de atmósfera explosiva por gases y vapores



I.1.3.1. Potencia de la atmósfera explosiva por polvo. Método de carbón de Pittsburgh

En el caso del polvo existe un método empírico conocido, desarrollado por el U.S. Bureau of Mines, que utiliza como patrón para comparación los resultados de las pruebas realizadas con carbón de Pittsburgh. Este método define cuatro tipos de explosión, identificados como “Débil”, “Moderado”, “Fuerte” y “Muy Fuerte”, en función de distintas magnitudes directamente relacionadas con el producto que genera la ATEX, y para ello tenemos que estudiar:

- Gravedad de la explosión

$$G_e \equiv \frac{P_{\max} \cdot V_{\max}}{P_{\max p} \cdot V_{\max p}} \quad (\text{Ec.I-3})$$

- P_{\max} = Presión máxima de la explosión del polvo considerado en lib/pulg² (1 libra/pulg²=0.068 kg/cm²).
- $P_{\max p}$ = Presión máxima de la presión del polvo patrón (carbón de Pittsburg) en lib/pulg² (1 libra/pulg²=0.068 kg/cm²).
- V_{\max} = Velocidad máxima del incremento de presión del polvo considerado en lib/pulg² x seg (1 libra/pul² x seg. = 0,068 kg/cm² x seg).
- $V_{\max p}$ = Velocidad máxima del incremento de presión del polvo patrón (carbón de Pittsburg) en lib/pulg² x seg (1 libra/pul² x seg. = 0,068 kg/cm² x seg).

- Sensibilidad de ignición

$$S_i \equiv \frac{T_{ip} \cdot E_{mp} \cdot C_{mp}}{T_i \cdot E_m \cdot C_m} \quad (\text{Ec.I-4})$$

- T_{ip} = Temperatura de ignición del polvo patrón (carbón de Pittsburg) en °C.
- T_i = Temperatura de ignición del polvo considerado en °C.
- E_{mp} = Energía mínima necesaria para la ignición del polvo patrón (carbón de Pittsburg) en Mj.
- E_m = Energía mínima necesaria para la ignición del polvo considerado en mJ.
- C_{mp} = Concentración mínima del polvo patrón (carbón de Pittsburg) en gr de polvo por litro de mezcla.
- C_m = Concentración mínima del polvo considerado (L.I.E.) en gramos de polvo por litro de mezcla.

- Índice de explosividad

$$I_e \equiv G_e \cdot S_i \quad (\text{Ec.I-5})$$



En función de los tres valores anteriores se propone la tabla de peligrosidad de las explosiones, de acuerdo con la siguiente escala (tabla I.9):

Tipo de explosión	S_i	G_e	I_e
Débil	< 0,2	< 0,5	< 0,1
Moderado	0,2 ÷ 1	0,5 ÷ 1	0,1 ÷ 1
Fuerte	1 ÷ 5	1 ÷ 2	1 ÷ 10
Muy Fuerte	> 5	> 2	> 10

Tabla I.9. Tipos de explosiones según el método de Pittsburg

I.1.3.1.1. Valores para diferentes productos pulverulentos

En la tabla I.10 a modo de ejemplo se presenta valores correspondientes a diferentes productos. Estos valores cumplen las siguientes condiciones:

- Las características de los polvos son función de la concentración y granulometría a que se verifican los ensayos. Las características de los polvos que se adjuntan corresponden a una concentración de 0,5 gramos-litro y una granulometría tal que el diámetro máximo de las partículas es igual o inferior a 74 micras.
- En las publicaciones originales se pueden encontrar otros valores para diferentes concentraciones y granulometría, así como las características explosivas de otros polvos.
- En la columna "Not" pueden aparecer las siguientes claves:
 - (a) Combustión posible en presencia de CO_2
 - (b) Polvo no explosivo pero sí combustible.
- Unidades de las diferentes magnitudes: Corresponden a las expresadas en las fórmulas anteriores.
- C_{mo} = Concentración mínima de oxígeno, en % en volumen, para que sea posible la explosión. Los supraíndices 1 y 2 indican que el gas inerte utilizado para disminuir la proporción de aire es CO_2 ó N_2 respectivamente.
- aire es CO_2 ó N_2 respectivamente.
- P_{max} , es la presión máxima de explosión en lib/pulg².
- V_{max} , es la velocidad máxima de aumento de la presión en libra/pulg² x seg.
- T_i , es la temperatura de ignición en °C.
- E_m , energía mínima necesaria para la ignición del polvo considerado en mJ.
- C_m = Concentración mínima del polvo considerado (L.I.E.) en gramos de polvo por litro de mezcla.



NATURALEZA DEL POLVO	T _i Nube	T _i Lecho	C _m	E _m	P _{max}	V _{máx}	C _{mo}	Not
Acero	450	--	--	--	--	--	--	-
Acetato de aluminio	560	640	--	--	59	950	--	-
Acetato de berilio	620	--	0.080	100	87	2200	15 ¹	-
Acetato de celulosa	340	--	0.035	20	114	6500	5 ²	-
Acetato de sodio	590	--	0.030	35	90	4600	--	-
Acido acetil salicílico (Aspirina)	550	funde	0.015	16	87	7700	--	-
Acido adípico	550	--	0.035	60	95	4000	--	-
Acido antranílico	580	--	0.030	35	84	6500	--	-
Acido azelaico	610	--	0.025	25	76	4700	--	-
Acido benzoico	600	funde	0.011	12	95	10300	--	-
Acido 3.5 dinitrobenzoico	460	--	0.050	45	139	4300	--	-
Acido estearico	290	--	--	25	80	8500	--	-
Acido ftálico	650	funde	--	--	62	--	--	-
Acido fumarico	520	--	0.085	35	103	3000	--	-
Acido isoftálico	700	--	0.035	25	78	3100	--	-
Acido monocloroacético	620	--	--	--	--	--	--	-
Acido parahidroxibenzoico	620	--	0.040	--	37	--	--	-
Acido paratercbutil benzoico	560	--	0.020	25	88	6500	--	-
Acido salicílico	590	--	0.025	--	84	6800	--	-
Acido sebáico	--	--	--	--	74	400	--	-
Acido sorbico	440	460	0.020	15	106	>10000	5 ²	-
Acido terftálico	680	--	0.050	20	84	8000	--	-
Acrílico, monómero	220	--	0.045	20	104	16000	--	-
Ajo	360	--	0.010	240	57	1300	--	-
Aleaciones (ver componentes)								
Alfalfa	460	200	0.100	320	88	1100	--	-
Algodón, borra	470	--	0.050	25	94	6000	--	-
Algodón, harina de semillas	530	200	0.055	80	89	2200	--	-
Algodón, linters	520	--	0.500	1920	73	400	5	-
Almendra, cascara	440	200	0.065	80	101	1400	--	-
Almidones (ver productos origen)								
Aluminio (polvo de amolado)	610	320	0.045	10	127	>20000	--	-
Aluminio atomizado	650	760	0.045	50	84	>20000	--	-
Aluminio-cobalto (60-40), aleación	950	570	0.180	100	78	8500	--	-
Aluminio-cobre (50-50), aleación	--	830	0.100	100	68	2600	--	-
Aluminio-hierro, aleación	550	450	--	--	36	300	--	-
Aluminio-litio (15% Li), aleación	470	400	0.100	140	96	3700	--	-
Aluminio-magnesio, aleación	430	480	0.020	80	86	10000	--	-
Aluminio-niquel (58-42), aleación	950	540	0.190	80	79	10000	--	-
Aluminio-silicio (12% Si), aleación	670	--	0.040	60	74	7500	--	-
Anhidrido ftálico	605	funde	0.015	15	72	4200	11	-
Anhidrido isatoico	700	--	0.035	25	80	4900	--	-
Antimonio	420	330	0.420	1920	28	300	--	-
Antraceno	505	funde	--	--	68	700	--	-
Arroz	440	240	0.050	50	105	2700	--	-
Asfalto de petróleo	510	500	0.025	25	94	4600	--	-
Azúcar	370	400	0.045	30	109	5000	--	-
Azúfre	190	220	0.035	15	78	4700	--	-
Benzoato de sodio	560	680	0.050	80	91	3700	--	-
Bis (2-hidroxi-5clorofenil) metano	570	--	0.040	60.	70	2000	13 ¹	-
Boro	470	400	0.100	60	90	2400	--	-
Bronce 8aleación cobre-zinc)	370	190	1	--	44	1300	--	-
Cacahuete, cascara	460	210	0.045	50	116	8000	--	-
Cacao	470	370	0.040	30	69	3000	--	-



Cacao industrial (12% m. grasas)	510	240	0.075	100	53	1200	--	-
Cadmio	570	250	--	4000	7	100	--	-
Café	360	270	0.085	160	38	150	10 ¹	-
Café, instantaneo	410	350	0.280	--	68	500	--	-
Cañamo, borra	440	220	0.040	35	103	10000	--	-
Caprolactama	430	--	0.070	60	79	1700	8	-
Carbón activado	660	270	0.100	--	92	1700	--	-
Carbón de Pittsburgh	610	180	0.055	60	83	2300	--	-
Carbón vegetal	530	180	0.140	20	100	1800	--	-
Caucho endurecido	350	--	0.025	50	80	3800	13	-
Cebada (ver malta)								
Celulosa	410	300	0.045	40	117	8000	--	-
Centeno, harina	410	325	--	--	35	--	--	-
Cloroamina-T	540	150	--	--	7	150	--	-
Cobalto	760	370	--	--	--	--	--	-
Coco, piel	470	220	0.035	60	115	4200	--	-
Cok	750	430	--	--	--	--	--	-
Cok, petroleo (13% volatiles)	670	--	1	--	36	200	--	-
Colofonia D.K.	390	--	0.015	10	87	12000	--	-
Corcho	460	210	0.035	35	96	7500	--	-
Cromo	580	400	0.230	140	56	5000	--	-
Dextrina	410	440	0.050	40	99	9000	--	-
Dextrosa monohidratada	350	--	--	--	--	--	--	-
2.2 Dicloro propionato de sodio	500	--	0.260	220	68	500	--	-
Difenil	630	--	0.015	20	82	3700	--	-
4.4. difenil disulfonil azida	590	140	0.065	30	143	5500	--	-
Difenil ol propano (Bisfenos A)	570	--	0.012	11	81	11800	5 ²	-
Dimetil ditio carbamato ferrico	280	150	0.055	25	86	6300	--	-
3.5. dinitrobenzoamida	500	fundes	0.040	45	163	3500	--	-
Dinitrotoluenamida	500	--	0.050	15	153	>10000	--	-
Epoxi, resina.	490	--	0.015	9	94	8500	--	-
Esparto	--	--	--	--	94	7300	--	-
Estaño	630	430	0.190	80	48	1700	--	-
Estearato de aluminio	400	380	0.015	10	86	>10000	--	-
Estearato de calcio	400	--	0.025	15	97	>10000	--	-
Estearato de zinc	315	fundes	0.020	10	80	>10000	--	-
Etil celulosa	340	330	0.025	15	112	7000	--	-
Etil, hidroxietil celulosa	390	--	0.020	30	94	2200	--	-
P-fenilén diamina	620	--	0.025	30	94	11000	--	-
Fenol-formaldehido, resina.	450	--	0.015	10	107	6500	--	-
Fenol-furfural, resina	530	--	0.025	10	88	8500	--	-
Fentiazina	540	--	0.030	--	56	3000	--	-
Ferrocianuro	390	210	1.500	--	17	100	--	-
Ferrocianuro ferrico	370	--	--	--	82	1000	--	-
Ferrocianuro ferroso	380	190	0.400	--	--	--	--	-
Ferrocromo	790	670	2	--	--	--	--	-
Ferromanganeso	450	290	0.130	80	62	5000	--	-
Ferrosilicio (45% Si)	640	--	--	--	--	--	--	-
Ferrosilicio (90% Si)	--	980	0.240	1280	113	3500	--	-
Ferrovandio	440	400	1.300	400	--	--	--	-
Fitosterol	330	fundes	0.0.25	10	76	>10000	--	-
Fosforo rojo	360	305	--	--	--	--	--	-
Ftalamina	630	--	0.030	50	89	4800	--	-
Ftalato de dialilo	480	--	0.030	20	90	8500	--	-
Ftalodinitrilo	>700	fundes	--	--	43	--	--	-



Gelatina seca	620	480	<0.5	--	78	1200	--	-
Gilsonita	580	500	0.020	25	78	4500	--	-
Goma arabiga	500	260	0.060	100	117	3000	--	-
Goma de manila (copal)	360	390	0.030	30	89	6000	--	-
Goma laca	400	--	0.020	10	73	3600	9	-
Grafito	730	580	--	--	--	--	--	-
Granos mezclados (maiz,avena)	430	230	0.055	30	115	5500	--	-
Hidroxietil celulosa	410	--	0.025	40	106	2600	--	-
Hidroxil propil celulosa	400	--	0.020	30	96	2900	--	-
Hiduro de titanio	480	540	0.070	60	121	12000	3	-
Hidruro de torio	260	20	0.080	3	81	12000	--	-
Hidruro de uranio	20	20	0.060	5	74	9000	--	-
Hidruro de zirconio	350	270	0.085	60	90	9500	3	-
Hierro	430	240	--	--	--	--	--	-
Hierro carbonilo	420	230	01050	100	47	8000	--	-
Hierro, piritas	380	280	1	8200	5	100	--	-
Hueso, harina	490	230	--	--	11	100	--	-
Hulla 8% volátiles	730	--	--	--	--	--	--	-
Hulla 12% volátiles	670	240	--	--	--	--	--	-
Hulla 25% volátiles	605	210	0.120	120	62	400	--	-
Hulla 37% volátiles	610	170	0.055	60	90	2300	--	-
Hulla 43% volátiles	575	180	0.050	50	92	2000	--	-
Jabón	430	600	0.085	100	77	2800	--	-
Lactalbumina	570	240	0.040	50	97	3500	--	-
Leche	440	--	--	--	--	--	--	-
Leche azucarada	450	funde	--	--	31	--	--	-
Leche desnatada	490	200	0.050	50	95	2300	--	-
Levadura	520	260	0.050	50	123	3500	--	-
Licopodio	480	310	0.025	40	75	3100	9	-
Lignina	450	--	0.040	20	102	5000	7	-
Lignito	450	200	0.030	30	94	8000	--	-
Limón, piel	500	330	0.060	100	51	1200	--	-
Madera, corteza	450	250	0.020	60	103	7500	--	-
Madera, serrín	430	--	0.050	20	94	8500	7	-
Magnesio	560	430	0.030	40	116	15000	--	-
Maíz	400	250	0.055	40	95	6000	--	-
Maíz, almidón	390	--	0.040	30	145	9500	--	-
Maíz, dextrina	410	390	0.040	40	124	7000	--	-
Maíz, mazorca	450	240	0.045	45	127	3700	--	-
Maíz, cebada	400	250	0.055	35	95	4400	--	-
Manganeso	460	240	0.123	305	53	4900	--	-
Melamina-formaldehido, resina	410	--	0.020	50	93	1800	--	-
1 metil amina antraquinon	830	funde	0.055	50	71	3300	--	-
Metil celulosa	360	340	0.030	20	133	6000	--	-
Metionina D.L.	370	360	0.025	35	119	5700	7	-
Molibdeno	720	360	--	--	--	--	--	-
Naftaleno	575	funde	--	--	87	--	--	-
B-Naftol	670	--	--	--	--	--	--	-
Naftol amarillo	415	395	--	--	--	--	--	-
Nilón	500	430	0.030	20	95	4000	6	-
Nitrocelulosa	--	--	--	30	>256	>20900	--	-
Nitrofurfural semicarbazona	240	--	--	--	>143	8600	--	-
Nitropiridona	430	funde	0.045	35	111	>10000	--	-
Orujo, harina	470	285	--	--	--	--	--	-
Pan	450	--	--	--	--	--	--	-



Papel	440	270	0.055	60	96	3600	--	-
Paraformaldehido	410	--	0.040	20	133	13000	--	-
Patata, almidón	430	--	--	--	--	--	--	-
Patata seca	450	--	--	--	97	1000	--	-
Pectina	410	200	0.075	35	132	8000	--	-
pentaeritrol	450	--	0.030	10	90	9500	7	-
Pentasulfuro de fosforo	280	270	0.050	15	64	>10000	--	-
Peroxido de benzoilo	--	--	--	21	--	--	--	-
Peroxido de cicloexanona	--	--	--	21	84	5600	--	-
Peroxido de laurilo	--	--	--	12	90	6400	--	-
Pez	710	--	0.035	20	88	6000	--	-
Poliacetel	440	--	0.35	20	113	4100	--	-
Poliacetato de vinilo	450	--	0.040	160	69	1000	11	-
Poliacrilamida	410	240	0.040	30	85	2500	--	-
Poliacrilonitrilo	500	460	0.025	20	89	11000	--	-
Poliálcohol vinílico	450	funde	--	--	78	--	--	-
Polibutirato de vinilo	390	--	0.020	10	84	2000	5	-
Policarbonato	710	--	0.025	25	96	4700	--	-
Policloruro de vinildieno	670	--	--	--	--	--	--	(b)
Poliétileno	390	--	0.020	10	80	7500	--	-
Poliestireno	500	500	0.020	15	100	7000	--	-
Poliformaldehido (resina acetal)	440	--	0.035	20	89	4100	--	-
Poliisobutil metacrilato	500	280	0.020	40	74	2800	--	-
Polimetacrilato	450	290	0.045	100	97	1800	--	-
Polimetacrilato de metilo	440	--	0.020	15	101	1800	7	-
Plioxietileno	350	--	0.030	30	106	2100	5	-
Plipropileno	420	--	0.020	30	76	5000	--	-
Politereftalato de etileno	500	--	0.040	35	98	5500	--	-
Poliuretano, espuma	510	440	0.030	20	87	3700	--	-
Poliuretano, espuma ignífuga	550	390	0.025	15	96	3700	--	-
Propionato cálcico	530	--	--	--	90	1900	--	-
Propionato de celulosa	460	--	0.025	60	105	4700	--	-
Sacarosa	420	funde	0.045	40	86	5500	--	-
Salicilanilina	610	funde	0.040	20	73	4800	--	-
Salicílico, ácido	590	--	0.025	--	84	6800	--	-
Sebacico, ácido	--	--	--	--	74	400	--	-
Secobarbitato sódico	520	--	0.100	960	76	800	--	-
Silicio	no	760	0.1	80	94	13000	--	-
Siliciuro de calcio	540	540	0.060	150	86	20000	--	-
Soja, harina	550	340	0.060	100	94	800	9	-
Soja, proteína	540	--	0.050	60	98	6500	9	-
Sorbato de potasio	380	180	0.120	60	79	9500	--	-
Sorbato de sodio	400	140	0.050	30	87	6500	--	-
L. sorbosa	370	--	0.065	80	76	4700	--	-
Tántalo	630	300	0.200	120	50	2600	--	-
Tartrato de hidrazina	570	--	0.175	460	30	200	--	-
Terftalato de dimetilo	500	--	0.040	35	91	5500	--	-
Tiosulfato de sodio	510	330	--	--	11	<100	--	-
Tiourea	420	funde	--	--	29	100	--	-
Titanio	375	290	0.045	15	85	11000	--	(a)
Torio	270	280	0.075	5	79	5500	--	-
Triacetato de celulosa	390	--	0.035	30	107	4300	--	-
Trigo, almidón	430	--	0.045	25	100	6500	--	-
Trigo, almidón tratado (Cl de atilo)	420	220	0.045	20	82	8500	--	-
Trigo, grano	420	290	--	--	43	--	--	-



Trigo, harina	380	360	0.050	50	109	3700	--	-
Trinitrotolueno	--	--	0.070	75	63	2100	--	-
Trioxano	480	--	0.143	--	85	600	--	-
Tripropionato de celulosa	460	--	0.025	45	88	4000	--	-
Turba	420	295	--	--	--	--	--	-
Turba, esfaquea	460	240	0.045	50	104	2200	--	-
Uranio	20	100	0.060	45	69	5000	--	-
Urea	900	no	se	inflam.			--	(b)
Urea formaldehido, resina	430	--	0.020	34	110	1600	--	-
Urea formaldehido polvo molienda	460	--	0.085	80	89	3600	9	-
Vanadio	500	490	0.220	60	57	1000	10	-
Vitamina B.1 Monohidratada	380	190	0.035	35	120	9000	--	-
Vitamina C.	460	280	0.070	60	88	4800	--	-
Zinc	680	460	0.500	960	70	1800	--	-
Zicornio	20	220	0.045	5	75	11000	--	(a)

Tabla I.10. Valores de productos según el método de Pittsburg

Nota: estos valores son representativos de ensayos realizados para diversas muestras, en ocasiones será necesario ensayar el material en la esfera de 20 litros.

I.1.3.2. Potencia de la atmósfera explosiva por gases y vapores. Método empírico

En el caso de gases y vapores, debido a la dispersión de métodos existentes, así como la complejidad de la mayoría de ellos, se opta por utilizar un método empírico basado en las estimaciones realizadas para determinar el tipo de zona.

Las variables que habría que relacionar serían el tipo de gas o vapor y, por tanto, su peligrosidad, así como la cantidad que puede formar la ATEX. Esta segunda variable resulta muy difícil de cuantificar y la metodología consiste en lo siguiente:

Dado que para determinar el tipo de zona se tienen en cuenta el “Grado de escape” y la “Ventilación de la zona” quiere ello decir que lo que se está determinando en realidad es la cantidad de gas que quedará y que dará lugar a la ATEX. Por tanto, con este método se vincula de forma directa el tipo de zona con la cantidad de ATEX.

El método consiste en la identificación de las sustancias inflamables, en sus distintos grados y combinarlo con el tipo de zona que se haya determinado según el método lo explicado en el punto I.1.1.2. En cuanto a la peligrosidad del agente químico, se utilizan las frases R de los productos químicos en cuestión.

La clasificación de las sustancias, según Orden PRE/2317/2002 (que establece los criterios generales de clasificación y etiquetado de sustancias y preparados peligrosos) es el siguiente en lo referente a sus propiedades fisicoquímicas:



Comburentes

Las sustancias y preparados se clasificarán como comburentes y se les asignará el símbolo «O» y la indicación de peligro «comburente» en función de los resultados de los ensayos a que se refiere el anexo V de la citada orden. Es obligatoria la inclusión de una frase de riesgo; su selección se basará en los resultados de los ensayos, teniendo en cuenta lo siguiente:

R7 Puede provocar incendios

- Peróxidos orgánicos con propiedades inflamables incluso aunque no estén en contacto con otros materiales combustibles.

R8 Peligro de fuego en contacto con materias combustibles

- otras sustancias y preparados comburentes como los peróxidos inorgánicos, que pueden provocar incendios o aumentar el riesgo de inflamabilidad al entrar en contacto con materiales combustibles.

R9 Peligro de explosión al mezclar con materias combustibles

- otras sustancias y preparados como los peróxidos inorgánicos, que se hacen explosivos al mezclarse con materiales combustibles como, por ejemplo, ciertos cloratos.

Fácilmente inflamables

Las sustancias y preparados se clasificarán como fácilmente inflamables y se les asignará el símbolo «F» y la indicación de peligro «fácilmente inflamable», en función de los resultados de los ensayos a que se refiere el anexo V. Se les asignarán las frases de riesgo según los criterios siguientes:

R11 Fácilmente inflamable

- Sustancias y preparados sólidos susceptibles de inflamarse fácilmente después de un breve contacto con una fuente de ignición y que continúan ardiendo o consumiéndose después de la eliminación de dicha fuente.
- Sustancias y preparados líquidos cuyo punto de inflamación sea inferior a 21 °C, pero que no sean extremadamente inflamables.

R15 Reacciona con el agua liberando gases extremadamente inflamables

- Sustancias y preparados que, en contacto con agua o aire húmedo, desprenden gases extremadamente inflamables en cantidades peligrosas a razón de un 1/kg/h.



R17 Se inflama espontáneamente en contacto con el aire

- Sustancias y preparados susceptibles de calentarse y, finalmente, de inflamarse en contacto con el aire a temperatura ambiente sin aporte de energía.

Inflamables

Las sustancias y preparados se clasificarán como inflamables en función de los resultados de los ensayos a que se refiere el anexo V. La frase de riesgo se asignará según los criterios siguientes:

R10 Inflamable

- Sustancias y preparados líquidos cuyo punto de inflamación sea igual o superior a 21 °C, e inferior o igual a 55 °C.

No obstante, en la práctica se ha demostrado que los preparados que tengan un punto de inflamación igual o superior a 21 °C e inferior o igual a 55 °C no tendrán que clasificarse como inflamables si el preparado no puede, en ningún caso, favorecer la combustión y si, además, no existe ningún riesgo para las personas que los manipulen ni para otras personas.

Extremadamente inflamables

Las sustancias y preparados se clasificarán como extremadamente inflamables y se les asignará el símbolo «F+» y la indicación de peligro «extremadamente inflamable», en función de los resultados de los ensayos a que se refiere el anexo V de la orden. Se seleccionará la frase de riesgo según los criterios siguientes:

R12 Extremadamente inflamable

- Sustancias y preparados líquidos cuyo punto de inflamación sea inferior a 0 °C y su punto de ebullición (o en el intervalo de ebullición, la temperatura inicial de ebullición) sea inferior o igual a 35 °C.

Sustancias y preparados gaseosos que sean inflamables en contacto con el aire a temperatura y presión normales.



Otras propiedades fisicoquímicas

Se asignarán frases complementarias de riesgo a las sustancias y preparados clasificados de conformidad con los puntos 2.2.1 a 2.2.5 o de conformidad con los capítulos 3, 4 y 5 que se citan a continuación, aplicando los criterios siguientes (sobre la base de la experiencia adquirida en la aplicación del anexo I):

R1 Explosivo en estado seco

- Sustancias y preparados explosivos comercializados en solución o en forma húmeda como, por ejemplo, la nitrocelulosa con más del 12,6% de nitrógeno.

R2 Riesgo de explosión por choque, fricción, fuego u otras fuentes de ignición

R3 Alto riesgo de explosión por choque, fricción, fuego u otras fuentes de ignición

R4 Forma compuestos metálicos explosivos muy sensibles

- Sustancias y preparados que puedan originar derivados metálicos explosivos sensibles como, por ejemplo, el ácido pícrico y el ácido estroncio.

R5 Peligro de explosión en caso de calentamiento

- Sustancias y preparados inestables al calor, no clasificados como explosivos como, por ejemplo, el ácido perclórico >50%.

R6 Peligro de explosión, en contacto o sin contacto con el aire

- Sustancias y preparados inestables a temperatura ambiente como, por ejemplo, el acetileno.

R7 Puede provocar incendios

- Sustancias y preparados reactivos como, por ejemplo, el flúor y el hidrosulfito de sodio.

R14 Reacciona violentamente con el agua

- Sustancias y preparados que reaccionan violentamente con el agua como, por ejemplo, el cloruro de acetilo, los metales alcalinos y el tetracloruro de titanio.

R16 Puede explosionar en mezcla con sustancias comburentes

- Sustancias y preparados que reaccionan de forma explosiva en presencia de agentes comburentes como, por ejemplo, el fósforo rojo.

R18 Al usarlo, pueden formarse mezclas aire/vapor explosivas/inflamables

- Sustancias y preparados no clasificados como inflamables pero que contienen compuestos volátiles inflamables en el aire.



R19 Puede formar peróxidos explosivos

- Sustancias y preparados que puedan formar peróxidos explosivos durante su almacenamiento como, por ejemplo el éter dietílico y el 1,4-dioxano.

R30 Puede inflamarse fácilmente al usarlo

- Preparados no clasificados como inflamables pero que pueden convertirse en inflamables por pérdida de componentes volátiles no inflamables.

R44 Riesgo de explosión al calentarlo en ambiente confinado

- Se aplica a las sustancias y preparados que no se han clasificado como explosivos según el punto I.1.2.1 de la citada orden, pero que, no obstante, en la práctica, pueden adquirir propiedades explosivas si se calientan en un recipiente cerrado.

De este modo, la determinación de la potencia de la ATEX se realizará mediante la tabla I.11-1 y I.11-2 que relacionan las magnitudes de la sustancia detectada con el tipo de producto (Frasas R) y la Zona (0, 1 ó 2).

		CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO (Frasas R)					
		Genéricos		Productos especiales	Comburentes		
		R2	R3	R4, R5, R6, R14, R16, R18; R19, R30	R7	R8	R9
ZONA	2	Débil	Moderada	Moderada	Débil	Débil	Moderada
	1	Moderada	Fuerte	Fuerte	Moderada	Moderada	Fuerte
	0	Fuerte	Muy fuerte	Muy fuerte	Fuerte	Fuerte	Muy fuerte

Tabla I.11-1. Potencia de la explosión para gases, vapores y nieblas que relaciona las características del producto y la zona clasificada

		CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO (Frasas R)				
		Extremad. Inflamable	Fácilmente inflamables			Inflamable
		R12	R11	R15	R17	R10
ZONA	2	Moderada	Débil	Débil	Moderada	Débil
	1	Fuerte	Moderada	Moderada	Fuerte	Moderada
	0	Muy fuerte	Fuerte	Fuerte	Muy fuerte	Fuerte

Tabla I.11-2. Potencia de la explosión para gases, vapores y nieblas que relaciona las características del producto y la zona clasificada

I.1.4. Condiciones del entorno. Condiciones de control y uso.

Amén de considerar la potencia de la explosión, deben tenerse en cuenta las características del entorno y el nivel de control existente, en función de los equipos y de



las instalaciones. Para combinar las dos variables indicadas se utiliza la matriz siguiente (tabla I.12).

		Condiciones del entorno - Nivel de control			
		ALTO	MEDIO	BAJO	MUY BAJO
Potencia del producto	DÉBIL	DAÑOS MUY LEVES	DAÑOS MUY LEVES	DAÑOS LEVES	DAÑOS GRAVES
	MODERADO	DAÑOS MUY LEVES	DAÑOS LEVES	DAÑOS GRAVES	DAÑOS MUY GRAVES
	FUERTE	DAÑOS LEVES	DAÑOS GRAVES	DAÑOS MUY GRAVES	DAÑOS MUY GRAVES
	MUY FUERTE	DAÑOS GRAVES	DAÑOS MUY GRAVES	DAÑOS MUY GRAVES	DAÑOS MUY GRAVES

Tabla I.12. Condiciones del entorno-nivel de control y el potencial del producto

I.1.5. Valoración global

Una vez establecida la probabilidad de que se produzca la explosión y estimada la gravedad de sus consecuencias, se procederá a valorar el conjunto de la situación, aplicando la siguiente matriz (tabla I.13).

		PROBABILIDAD DE EXPLOSIÓN			
		IMPROBABLE	BASTANTE PROBABLE	PROBABLE	INEVITABLE
GRAVEDAD DE LAS CONSECUENCIAS	DAÑOS MUY LEVES Daños materiales reparables sin necesidad de parar el proceso. Pequeñas lesiones que sólo requieren atención de botiquín.	IRRELEVANTE	MUY BAJO	BAJO	MEDIO
	DAÑOS LEVES Daños materiales reparables, implican parar el proceso. Lesiones que requieren atención primaria e, incluso, ILT corta.	MUY BAJO	BAJO	MEDIO	ALTO
	DAÑOS GRAVES Destrucción parcial de sistema con posibilidades de reparación compleja y costosa. Lesiones graves que pueden llegar a producir incapacidades permanentes.	BAJO	MEDIO	ALTO	MUY ALTO
	DAÑOS MUY GRAVES Destrucción total del sistema, con difícil renovación. Un muerto o más	MEDIO	ALTO	MUY ALTO	EXTREMADAMENTE ALTO

Tabla I.13. Valoración global, probabilidad explosión-gravedad consecuencias



APÉNDICE II. ESTIMACIÓN DE LAS DIMENSIONES DE ORIFICIOS. FUGAS DE LÍQUIDOS Y VALORES DE TASAS DE ESCAPE

Tomando como referencia el Manual Práctico de “Clasificación de zonas en Atmósferas Explosiva” (CETIB) cuyos autores son Francesc Escuer Ibars y Javier Garcia Torrent se presentan a continuación una estimación de las dimensiones de orificios, fugas de líquidos y valores de tasas de escape de componentes y equipos característicos.

II. 1. ESTIMACIÓN DE LAS DIMENSIONES DE ORIFICIOS

La estimación de las dimensiones de los orificios que se presentan en caso de fallo de componentes de la instalación es de difícil valoración.

Las dimensiones que se muestran a continuación son estimaciones, no obstante, a pesar de ello son útiles para hacer valoraciones de escapes. En algún caso se da una sola dimensión, en otros casos más de una.

Las fuentes de emisión consideradas son:

- Bridas.
- Válvulas.
- Válvulas de seguridad, discos de seguridad y juntas hidráulicas.
- Bombas centrífugas.
- Compresores alternativos.
- Compresores centrífugos.
- Conexiones de pequeñas dimensiones.
- Puntos de drenaje y de toma de muestras.

Para las juntas de estanqueidad sobre los ejes, el área puede definirse tomando un orificio anular. Como norma general este intersticio es considerado proporcional al cuadrado del diámetro.

a) Bridas

Para definir las dimensiones del orificio de emisión, se considera el desgaste de la junta. El orificio en la práctica industrial, se define considerando las dimensiones de la arandela, el tipo y el espesor de la junta.



Los principales tipos de bridas que tenemos son aquellas con:

- junta de fibra comprimida: $2,5 \text{ mm}^2$ normalmente y hasta 1 mm de espesor multiplicado por la longitud a lo largo de toda la sección de junta en un fallo grave.
- junta en espiral: $0,25 \text{ mm}^2$ normalmente y hasta $0,05 \text{ mm}$ de espesor multiplicado por la longitud a lo largo de toda la sección de la junta en un fallo grave.
- junta en anillo metal sobre metal: $0,1 \text{ mm}^2$ y hasta $0,5 \text{ mm}^2$ en un fallo grave.

b) Válvulas

Para definir las dimensiones de orificio de emisión, se considera la emisión por el vástago. En la práctica industrial, el área del orificio de escape por el vástago, se puede considerar:

- $0,25 \text{ mm}^2$ para válvulas de uso general sobre tuberías de diámetro \leq a 150 mm ;
- $2,5 \text{ mm}^2$ para válvulas de uso general sobre tuberías de diámetro $>$ a 150 mm para válvulas con servicio peligroso sobre tuberías de cualquier diámetro.

c) Válvulas de seguridad, discos de seguridad y juntas hidráulicas

Las válvulas de seguridad, los discos de seguridad y las juntas hidráulicas son dispositivos de seguridad adecuados para evitar la superación de la presión nominal durante el funcionamiento ordinario de la instalación para la protección de recipientes y tuberías.

En los casos en que se puedan excluir de forma razonada las anomalías de operación (errores de maniobra, aportes de calor, etc.) la apertura de las válvulas de seguridad, la rotura de los discos de seguridad y la superación de la presión de las juntas hidráulicas se pueden considerar irrelevantes a fines de la clasificación de los lugares en objeto.

Cuando no puedan ser excluidas tales anomalías, deben ser consideradas escapes de grado secundario, sólo si la valoración de la probabilidad de presencia de atmósfera explosiva debida a su apertura es inferior a 10^{-5} en un año.

En ausencia de informaciones más precisas, los escapes posibles deben ser considerados generalmente de grado primario y tomar un área del orificio de:

- para las válvulas de seguridad sin junta entre asiento y obturador, 1 mm^2 con presión del sistema de contención muy baja, $0,25 \text{ mm}^2$ con presión del sistema de contención muy alta, variable entre 1 mm^2 y $0,25 \text{ mm}^2$ para presiones intermedias.



- para las válvulas de seguridad con junta entre asiento y obturador o cuando esté insertado sobre la tubería de descarga de la válvula de seguridad un sistema de sifón con líquido que permita revelar eventuales fugas, $0,25 \text{ mm}^2$.
- para las juntas hidráulicas el área del orificio debe valorarse caso por caso siendo los sistemas muy diferentes entre ellos.

d) Bombas centrifugas con juntas mecánicas de estanquidad

Para definir las dimensiones del orificio de emisión, se considera la emisión por la junta. La rotura de una junta mecánica puede ser debida a:

- instalación defectuosa
- rotura o agrietado (por ingreso de cuerpos extraños, vibraciones, etc.),

El área del orificio (para instalación defectuosa) de emisión está generalmente definida, con relación al diámetro del eje, mediante la ecuación siguiente:

$$A = \pi \cdot l \cdot d \quad (\text{Ec.II-1})$$

con:

- A = área del orificio anular de emisión, en mm^2 ;
- l = altura del intersticio (espesor del orificio anular), en mm;
- d = diámetro del árbol, en mm.

Cuando sobre la junta se instala una abrazadera para el control del flujo de salida, el área del orificio puede reducirse en un factor variable entre 3 y 5.

Para una bomba, con eje de diámetro $d = 25 \text{ mm}$, el área del orificio puede tomarse como:

- 25 mm^2 con junta mecánica sin la abrazadera de control del flujo en salida.
- 5 mm^2 con junta mecánica provista de abrazadera de control del flujo en salida.

Para bombas con eje de otras dimensiones, el área del orificio puede ser proporcional al diámetro.

e) Compresores alternativos

Para definir las dimensiones del orificio de emisión, se consideran tanto las emisiones por las juntas, como las emisiones por otros puntos de las válvulas.

Para los diferentes puntos de posible emisión, el área del orificio tiende a estar en el intervalo entre 1 y 5 mm^2 , por lo que generalmente se puede tomar el valor de $2,5 \text{ mm}^2$.



f) Compresores centrífugos

Para definir las dimensiones del orificio de emisión, se considera la emisión por las juntas.

La rotura de una junta puede ser debida a:

- instalación defectuosa.
- rotura o agrietado (por ingreso de cuerpos extraños, vibraciones, etc.).

Para un compresor con eje de diámetro $d=150$ mm el área del orificio se puede tomar como se indica a continuación:

Por instalación defectuosa:

- 250 mm^2 con junta de laberinto.
- 50 mm^2 con junta de anillo flotante.

Para compresores con eje de otras dimensiones el área del orificio puede ser proporcional al diámetro.

Por rotura o agrietado:

- 5 mm^2 con junta de laberinto.
- 1 mm^2 con junta de anillo flotante.

Para compresores con eje de otras dimensiones el área del orificio puede ser proporcional al diámetro.

g) Conexiones de pequeñas dimensiones

Son ejemplos típicos de conexiones de pequeñas dimensiones las conexiones para la unión de la instrumentación de proceso.

Normalmente, el fallo empieza con un orificio pequeño y, sólo si no se interviene, alcanza las dimensiones de la rotura completa del tubo. Por tanto, cuando la rotura completa se considera improbable porque está prevista una intervención oportuna o por otros motivos válidos, pueden considerarse orificios más pequeños entre $0,1$ y 1 mm^2 y tomando un valor medio de $0,25 \text{ mm}^2$.



h) Puntos de drenaje y de toma de muestras

Los puntos de drenaje están constituidos generalmente por válvulas (manuales o de cierre automático) y pueden ser: de dosis predeterminadas, de circuito cerrado y de circuito abierto.

Para los puntos de drenaje y para los puntos de toma de muestras se considera generalmente la fuga de la válvula de interceptación. La fuga puede ser excluida cuando se prevea doble válvula de interceptación, una válvula más una junta ciega o un tapón, o para tomamuestras de dosis determinadas cuando la cantidad sacada es de pocos cm³.

Para los puntos de toma de muestras en circuito cerrado, generalmente pueden no considerarse los escapes durante la toma de muestras; para los puntos de toma de muestras en circuito abierto en cambio, dichos escapes se deben considerar en general (escapes de grado primario).

En los casos en los que no pueda ser excluida de forma razonable la posibilidad de que la válvula de drenaje o de toma de muestras sea dejada o se quede abierta, para definir las dimensiones del orificio se considera la válvula completamente abierta.

Nota: El diámetro típico de escape de los puntos de toma de muestras es 20 mm. El diámetro típico de los puntos de drenaje varía generalmente entre 15, 25, 40 y 50 mm.

Para la fuga se pueden considerar orificios más pequeños; aproximadamente 1/10 del diámetro anteriormente indicado.

II. 2. FUGAS DE LÍQUIDOS A TRAVÉS DE ORIFICIOS

II.2.1. Fugas de líquidos a temperatura inferior a su punto de ebullición

Los pasos a seguir para determinar las fugas de líquidos cuya temperatura sea inferior a su punto de ebullición son:

a) Determinamos el caudal másico del escape en kg/s, utilizando:

$$G = 1,13 \cdot a \cdot [\sigma_1 (P - 10^5)]^{0,5} \quad (\text{Ec.II-2})$$

con :

a= área transversal en m².

σ_1 = densidad del líquido en kg/m³, en condiciones atmosféricas.



P= presión en Nm^{-2} .

b) La velocidad de escape del líquido v, se calcula mediante:

$$v = 1,13 \cdot [(P - 10^5) / \sigma_l]^{0,5} \quad (\text{Ec.II-3})$$

c) Calculamos la distancia d en m, hasta donde llega el chorro del líquido valorando:

c.1) Si el chorro del líquido sale formando un ángulo por encima de la horizontal

$$d = \sqrt{\frac{2 \cdot v^2 \cdot h}{g}} \quad (\text{Ec.II-4})$$

con :

v= velocidad de escape del líquido en ms^{-1} .

h= altura en metros.

g= aceleración de la gravedad ms^{-2} .

c.2) Si el chorro del líquido sale por debajo de la horizontal formando un ángulo α por debajo de la horizontal, tenemos que:

$$d = v \cdot \cos \alpha \cdot (\sqrt{v \cdot \text{sen} \alpha - 2gh} - v \cdot \text{sen} \alpha) / g \quad (\text{Ec.II-5})$$

d) el caudal másico de vapor G_{vap} en kg/s que se produce en la evaporación del líquido del charco se calcula tal y como vimos en la figura 7.1 del capítulo 7 mediante:

$$G_{\text{vap}} = \frac{2 \cdot 10^{-3} \cdot A \cdot p_v \cdot M}{R^{0,2}} \quad (\text{Ec.II-6})$$

siendo :

A= área del charco en m^2 .

P_v = presión de vapor del líquido expresada como fracción de la presión atmosférica.

M= masa molecular de la sustancia emitida en g/mol.

R= número de Reynolds del líquido.

e) La velocidad de vaporización o caudal de escape en volumen Q en m^3/s se determina con la fórmula:

$$Q = \frac{8,2 \cdot A \cdot K_g \cdot p_v \cdot T}{10^2} \quad (\text{Ec.II-7})$$



donde T es la temperatura en K, K_g es el coeficiente de transferencia de masa y que está relacionado con el número de Reynolds (R) mediante la expresión siguiente:

$$K_g = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{R^{0,2}} \quad (\text{Ec.II-8})$$

Esta expresión es válida para una velocidad del viento de 2 ms^{-1} y una viscosidad cinemática del aire de $1,5 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Si desconocemos la presión de vapor p_v , la podemos estimar a partir de la temperatura de ebullición del líquido y la temperatura ambiente mediante la tabla siguiente (tabla II.1)

PRESIÓN DE VAPOR (fracción de la presión atmosférica)					
T ^a de ebullición del líquido (°C)	T _{amb} =32°C	T _{amb} =40°C	T _{amb} =60°C	T _{amb} =80°C	T _{amb} =100°C
35	0,96	1	1	1	1
40	0,76	1	1	1	1
50	0,65	0,72	1	1	1
60	0,38	0,56	1	1	1
70	0,26	0,42	0,72	1	1
80	0,18	0,30	0,56	1	1
90	0,13	0,20	0,42	0,72	1
100	0,092	0,14	0,30	0,56	1
110	0,062	0,10	0,20	0,42	0,72
120	0,042	0,072	0,14	0,30	0,56
130	0,028	0,058	0,10	0,20	0,42
140	0,018	0,027	0,072	0,14	0,30
150	0,010	0,018	0,058	0,10	0,20

Tabla II.1. Estimación de la presión de vapor

f) Se determina el área del charco formado A (m^2) haciendo uso de la expresión:

$$A = 5,65 \cdot 10^2 \cdot a \cdot [\sigma_1 \cdot (P - 10^5)]^{0,5} \cdot R^{0,2} \cdot \Delta p \cdot M \quad (\text{Ec.II-9})$$

donde a es el área del orificio de la fuga en m^2 , R el número de Reynolds que puede obtenerse a partir del tamaño del charco mediante el empleo del abaco de la figura II.1.

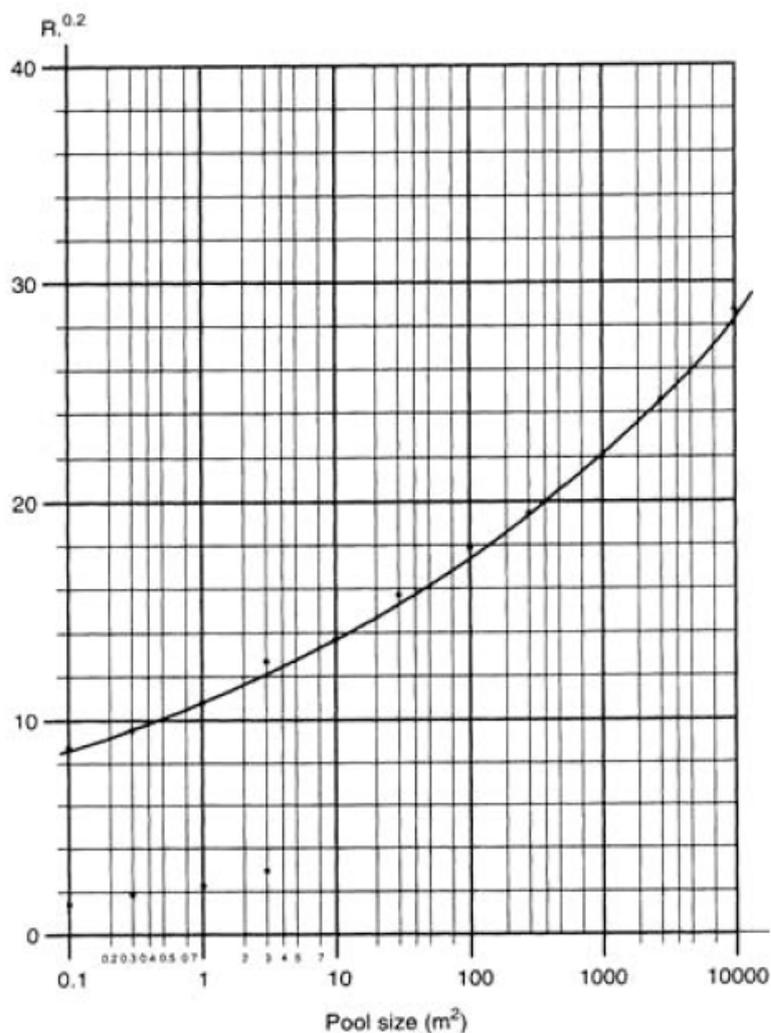


Figura II.1. Gráfica para determinar $R^{0,2}$

g) Determinamos por último, la extensión en metros del escape:

$$X = \left[(5,8 \cdot A \cdot \Delta_p / 10^2) \cdot LIE \cdot g \cdot R^{0,2} \right]^{1,14} \quad (\text{Ec.II-10})$$

El área peligrosa va a ser la que va desde el punto donde se genera el escape hasta el centro del charco en horizontal (d), más el radio del charco (r), más la extensión del propio charco (X) alrededor y por encima de éste, tal y como puede verse en la figura siguiente (figura II.2).

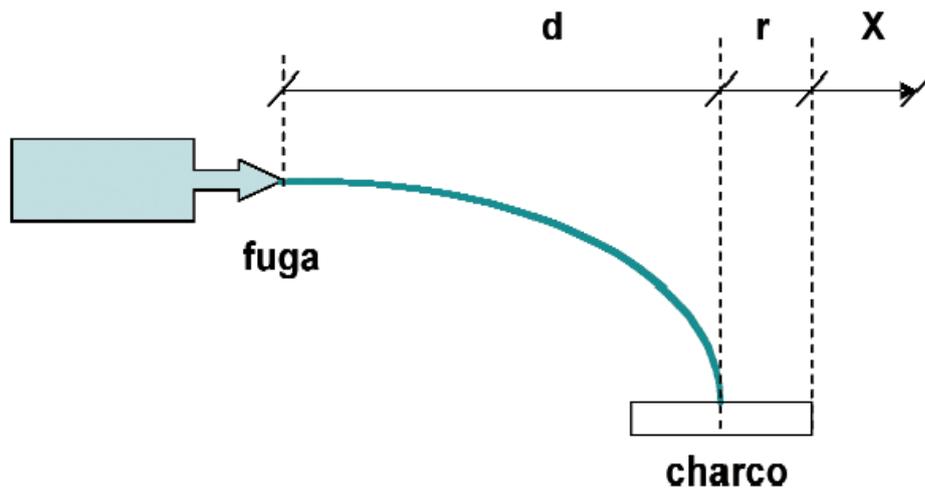


Figura II.2. Determinación del área peligrosad para una fuga de líquidos (CETIB)

II.2.2. Fugas de líquidos a temperatura superior a su punto de ebullición

Los pasos a seguir en este supuesto son:

- a) Calculamos la fracción de la masa que sale por la fuga en forma de vapor, M_g :

$$M_g = \frac{(T_l - T_c) \cdot C_l}{L} \quad (\text{Ec. II-11})$$

con :

T_l = temperatura del líquido que escape en K.

T_c = temperatura que proporciona una presión P_c .

P_c = 0,55x presión de vapor, en kg/m^2 .

C_l = capacidad calorífica del líquido en $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$.

L = calor latente de vaporización, en kJ kg^{-1} .

- b) Calculamos la fracción de líquido que se evapora en la mezcla saliente M_{vap} :

$$M_{\text{vap}} = 1 - [(T_l - T_b)/L] \cdot C_l \quad (\text{Ec. II-12})$$

donde T_b es la temperatura de ebullición del líquido en K.

- c) Determinamos la densidad de la mezcla gas/líquido σ_m , en kg/m^3 a partir de la densidad de vapor σ_v y la densidad de líquido σ_l , mediante la expresión:

$$\sigma_m = 1 / [(M_g/\sigma_v) + [(1-M_g)/\sigma_l]] \quad (\text{Ec. II-13})$$



d) el caudal másico de la mezcla que se emite por el escape G, en kg/s se determina:

$$G = 0,8 \cdot A \cdot [2 \cdot \sigma_m \cdot (P_i - P_c)]^{0,75} \quad (\text{Ec.II - 14})$$

siendo P_i la presión a la cual se encontraba el líquido confinado en kg/ m².

e) el caudal másico de vapor G_{vap} en kg/s junto a la fuga a presión atmosférica se determina con:

$$G_{\text{vap}} = [(T_i - T_b)/\gamma] \cdot C_i \quad (\text{Ec.II - 15})$$

donde γ es la relación entre los calores específicos c_p/c_v (1,4 para la mayoría de los gases).

f) La extensión debida al vapor viene dada por:

$$X = 2,10 \cdot 10^3 \cdot \left[(G/LIE^2 \cdot M^{1,5} \cdot T^{0,5}) \right]^{0,5} \quad (\text{Ec.II - 16})$$

que se multiplica por un coeficiente de 1,5 si el escape está a menos de 1,5 m del suelo.

g) Para el líquido restante, se considera que se formará un charco a una distancia d, si el chorro de líquido sale formando un ángulo por encima de la horizontal:

$$d = \sqrt{\frac{2 \cdot v^2 \cdot h}{g}} \quad (\text{Ec.II - 17})$$

h) Si el chorro sale por debajo de la horizontal y forma un ángulo α por debajo de la horizontal, tenemos que:

$$d = v \cdot \cos\alpha \cdot (\sqrt{v \cdot \text{sen}\alpha - 2gh} - v \cdot \text{sen}\alpha)/g \quad (\text{Ec.II - 18})$$

i) La vaporización se producirá en cuanto se ponga en contacto con el suelo, podemos determinar la extensión con la fórmula:

$$X = 10,8 \cdot [G \cdot T/LIE \cdot M]^{0,5} \quad (\text{Ec.II - 19})$$

que se multiplica por 1,5 si el escape está a menos de 1,5 m del suelo.



II. 3. TASAS DE ESCAPES EN EQUIPOS (escapes estructurales)

En la tabla II.2. se muestran los caudales de escape, éstos están basados en datos estadísticos y pueden ser útiles en la industria para hacer valoraciones de emisión. En aquellos casos en que la instalación esté bien mantenida, o se utilicen componentes con bajas pérdidas, los componentes fungibles sean sustituidos respetando las indicaciones del fabricante y, en cualquier caso, con una periodicidad tal que asegure el mantenimiento en el tiempo de las condiciones previstas, es razonable considerar que las emisiones estructurales puedan ser incluso inferiores a aquellas indicadas en la tabla II.2.

COMPONENTES	TIPOS DE SUSTANCIAS	ESCAPES ESTRUCTURALES kg/s
Conexiones (con juntas o fileteadas), accesorios de tuberías	Gas	$1,9 \cdot 10^{-8}$
	Productos petrolíferos ligeros (1)	$2,1 \cdot 10^{-9}$
	Productos petrolíferos pesados (2)	$5,2 \cdot 10^{-10}$
	Gas y/o productos petrolíferos en plataforma marina (offshore)	$3,0 \cdot 10^{-9}$
Válvulas manuales y automáticas (excluidas las válvulas de seguridad y de salida a la atmósfera)	Gas	$5,6 \cdot 10^{-7}$
	Productos petrolíferos ligeros (1)	$1,0 \cdot 10^{-7}$
	Productos petrolíferos pesados (2)	$1,0 \cdot 10^{-9}$
	Gas y/o productos petrolíferos en plataforma marina (offshore)	$1,1 \cdot 10^{-7}$
Venteos, drenajes, purgas y tomamuestras interceptados por válvulas (excluidas las válvulas de seguridad y de salida a la atmósfera)	Gas	$5,6 \cdot 10^{-9}$
	Productos petrolíferos ligeros (1)	$1,8 \cdot 10^{-7}$
	Productos petrolíferos pesados (2)	$5,0 \cdot 10^{-9}$
	Gas y/o productos petrolíferos en plataforma marina (offshore)	$5,1 \cdot 10^{-9}$
Venteos de válvulas de seguridad cerradas (tabla II.3), válvulas de salida a la atmósfera cerradas, juntas de combas y compresores, escotillas, bocas de hombre, brazos de carga y todos los demás componentes	Gas	$1,5 \cdot 10^{-6}$
	Productos petrolíferos ligeros (1)	$5,2 \cdot 10^{-7}$
	Productos petrolíferos pesados (2)	$3,0 \cdot 10^{-9}$
	Gas y/o productos petrolíferos en plataforma marina (offshore)	$5,4 \cdot 10^{-7}$

(1) Productos con densidad inferior a 934 kg/m^3 a $15 \text{ }^\circ\text{C}$
 (2) Productos con densidad superior a 934 kg/m^3 a $15 \text{ }^\circ\text{C}$

Tabla II.2. Escapes característicos de algunos componentes

La tabla II.3 presenta las pérdidas máximas admisibles para las válvulas de seguridad en instalaciones relativas al gas con junta de metal sobre metal, según norma API 527: 07-1991. Estas pérdidas pueden ser utilizadas para definir las emisiones estructurales considerando que con el tiempo pueden aumentar dependiendo de la influencia externa y de las condiciones del caso en cuestión.



VÁLVULA DE SEGURIDAD	PRESIÓN NOMINAL MPa	JUNTA EXTERNA Pérdidas máximas admisibles kg/s
Válvulas con orificio de descarga de diámetro $\leq 7,8$ mm	0,103 – 6,896	$1,4 \cdot 10^{-7}$
	10,3	$2,2 \cdot 10^{-7}$
	13,0	$2,8 \cdot 10^{-7}$
	17,2 – 41,4	$3,6 \cdot 10^{-7}$
Válvulas con orificio de descarga de diámetro $> 7,8$ mm	0,103 – 6,896	$7,1 \cdot 10^{-8}$
	10,3	$1,1 \cdot 10^{-7}$
	13,0	$1,4 \cdot 10^{-7}$
	17,2 – 41,4	$1,8 \cdot 10^{-7}$
	20,7	$2,2 \cdot 10^{-7}$
	27,6	$2,8 \cdot 10^{-7}$
	38,5	$3,6 \cdot 10^{-7}$
41,4	$3,6 \cdot 10^{-7}$	

Tabla II.3. Pérdidas máximas admisibles en válvulas de seguridad

PÉRDIDAS MÁXIMAS INICIALES EN APARATOS ALIMENTADOS POR GAS (20°C)			
Tipos de aparatos	Condiciones ambientales Pa= 101325Pa, Ta=20°C	JUNTA EXTERNA Pérdida máxima inicial	
		Metano kg/s	GLP kg/s
	Descripción		
Aparatos de utilización de combustibles gaseosos. Para dispositivos de interceptación, regulación y seguridad	Dispositivos multifuncionales DN hasta 10 mm	$1,1 \cdot 10^{-8}$	$3,06 \cdot 10^{-8}$
	DN de 10 mm hasta 80 mm	$2,2 \cdot 10^{-8}$	$6,11 \cdot 10^{-8}$
Aparatos de utilización de combustibles gaseosos. Dispositivos automáticos de interceptación y/o regulación. Válvulas automáticas	DN hasta 10 mm	$3,7 \cdot 10^{-9}$	$1,02 \cdot 10^{-8}$
	DN de 10 mm hasta 25 mm	$7,4 \cdot 10^{-8}$	$2,04 \cdot 10^{-8}$
	DN de 25 mm hasta 80 mm	$1,1 \cdot 10^{-8}$	$3,06 \cdot 10^{-8}$
	DN de 80 mm hasta 150 mm	$1,9 \cdot 10^{-8}$	$5,09 \cdot 10^{-8}$
	DN de más de 150 mm	$2,8 \cdot 10^{-8}$	$7,64 \cdot 10^{-8}$
Aparatos de utilización de combustibles gaseosos	DN hasta 10 mm	$3,7 \cdot 10^{-9}$	$1,02 \cdot 10^{-8}$
	DN de 10 mm hasta 25 mm	$7,4 \cdot 10^{-8}$	$2,04 \cdot 10^{-8}$
	DN de 25 mm hasta 80 mm	$1,1 \cdot 10^{-8}$	$3,06 \cdot 10^{-8}$
Quemadores de gas con aire soplado (1)	Potencia térmica ≤ 100 kW	$1,3 \cdot 10^{-8}$	$3,57 \cdot 10^{-8}$
	Potencia térmica ≤ 350 kW	$2,6 \cdot 10^{-8}$	$7,13 \cdot 10^{-8}$
	Potencia térmica ≤ 1000 kW	$3,9 \cdot 10^{-8}$	$1,07 \cdot 10^{-7}$
	Potencia térmica > 2000 kW	$5,2 \cdot 10^{-8}$	$1,43 \cdot 10^{-7}$
Generadores de aire caliente a gas con quemador de aire soplado	Potencia térmica ≤ 100 kW	$1,3 \cdot 10^{-8}$	$3,57 \cdot 10^{-8}$
	Potencia térmica ≤ 350 kW	$2,6 \cdot 10^{-8}$	$7,13 \cdot 10^{-8}$
	Potencia térmica ≤ 1000 kW	$3,9 \cdot 10^{-8}$	$1,07 \cdot 10^{-7}$
Reguladores de presión para aparatos alimentados con gas canalizado	Reguladores individuales	$5,6 \cdot 10^{-9}$	$1,53 \cdot 10^{-8}$
	Reguladores múltiples	$1,1 \cdot 10^{-8}$	$3,06 \cdot 10^{-8}$
	Pérdida por el venteo en caso de dañado de la membrana	$9,3 \cdot 10^{-8}$	$2,55 \cdot 10^{-5}$
Calderas de agua, de recalentamiento centralizado, a gas con quemador atmosférico y caudal térmico nominal ≤ 70 kW	Fuga total del circuito de gas	$2,6 \cdot 10^{-8}$	$7,13 \cdot 10^{-8}$

(1) Pérdida sobre la línea de gas del quemador y de los aparatos de seguridad y regulación allí colocados

Tabla II.4. Pérdidas máximas iniciales en aparatos de gas (20°C)



PÉRDIDAS MÁXIMAS INICIALES EN APARATOS ALIMENTADOS POR GAS (40°C)			
Tipos de aparatos	Condiciones ambientales Pa= 101325Pa, Ta=20°C	JUNTA EXTERNA Pérdida máxima inicial	
		Metano kg/s	GLP kg/s
	Descripción		
Aparatos de utilización de combustibles gaseosos. Para dispositivos de interceptación, regulación y seguridad	Dispositivos multifuncionales DN hasta 10 mm	$1,04 \cdot 10^{-8}$	$2,86 \cdot 10^{-8}$
	DN de 10 mm hasta 80 mm	$2,08 \cdot 10^{-8}$	$5,72 \cdot 10^{-8}$
Aparatos de utilización de combustibles gaseosos. Dispositivos automáticos de interceptación y/o regulación. Válvulas automáticas	DN hasta 10 mm	$3,47 \cdot 10^{-9}$	$9,54 \cdot 10^{-9}$
	DN de 10 mm hasta 25 mm	$6,94 \cdot 10^{-9}$	$1,91 \cdot 10^{-8}$
	DN de 25 mm hasta 80 mm	$1,04 \cdot 10^{-8}$	$2,86 \cdot 10^{-8}$
	DN de 80 mm hasta 150 mm	$1,73 \cdot 10^{-8}$	$4,77 \cdot 10^{-8}$
	DN de más de 150 mm	$2,60 \cdot 10^{-8}$	$7,15 \cdot 10^{-8}$
Aparatos de utilización de combustibles gaseosos	DN hasta 10 mm	$3,47 \cdot 10^{-9}$	$9,54 \cdot 10^{-9}$
	DN de 10 mm hasta 25 mm	$6,94 \cdot 10^{-9}$	$1,91 \cdot 10^{-8}$
	DN de 25 mm hasta 80 mm	$1,04 \cdot 10^{-8}$	$2,86 \cdot 10^{-8}$
Quemadores de gas con aire soplado (1)	Potencia térmica ≤ 100 kW	$1,21 \cdot 10^{-8}$	$3,34 \cdot 10^{-8}$
	Potencia térmica ≤ 350 kW	$2,43 \cdot 10^{-8}$	$6,68 \cdot 10^{-8}$
	Potencia térmica ≤ 1000 kW	$3,64 \cdot 10^{-8}$	$1,00 \cdot 10^{-7}$
	Potencia térmica > 2000 kW	$4,86 \cdot 10^{-8}$	$1,34 \cdot 10^{-7}$
Generadores de aire caliente a gas con quemador de aire soplado	Potencia térmica ≤ 100 kW	$1,21 \cdot 10^{-8}$	$3,34 \cdot 10^{-8}$
	Potencia térmica ≤ 350 kW	$2,43 \cdot 10^{-8}$	$6,68 \cdot 10^{-8}$
	Potencia térmica ≤ 1000 kW	$3,64 \cdot 10^{-8}$	$1,00 \cdot 10^{-7}$
Reguladores de presión para aparatos alimentados con gas canalizado	Reguladores individuales	$5,20 \cdot 10^{-9}$	$1,43 \cdot 10^{-8}$
	Reguladores múltiples	$1,04 \cdot 10^{-8}$	$2,86 \cdot 10^{-8}$
	Pérdida por el venteo en caso de dañado de la membrana	$8,67 \cdot 10^{-8}$	$2,38 \cdot 10^{-5}$
Calderas de agua, de recalentamiento centralizado, a gas con quemador atmosférico y caudal térmico nominal ≤ 70 kW	Fuga total del circuito de gas	$2,43 \cdot 10^{-8}$	$6,68 \cdot 10^{-8}$

(1) Pérdida sobre la línea de gas del quemador y de los aparatos de seguridad y regulación allí colocados

Tabla II.5. Pérdidas máximas iniciales en aparatos de gas (40°C)

Las tablas anteriores (tablas II.4 y II.5) muestran de forma indicativa los caudales de pérdidas máximas iniciales en la junta externade los diferentes componentes en lugares de la instalación de aparatos alimentados por gas. Estas pérdidas pueden ser utilizadas para definir los escapes estructurales teniendo en cuenta que pasado el tiempo pueden aumentar dependiendo de las influencias externas, etc.



BIBLIOGRAFÍA

- Abbasi, T. y Abbasi, S.A. (2007). Dust explosions—Cases, causes, consequences, and control. *Journal of Hazardous Materials* 140, pp. 7-44.
- Amyotte, P.R. y Pegg, M.J. (1989). Lycopodium dust explosions in a Hartmann bomb: effects of turbulence. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 2, pp. 87-94.
- Arntzen, B.J. (1998). *Modelling of turbulence and combustion for simulation of gas explosions in complex geometries*. Thesis. Division of applied mechanics, thermodynamics and fluid dynamics, The Norwegian University of Science and Technology, NTNU, Trondheim, Noruega.
- ASSOCIATION OF BRITISH PRESERVERD (1987). Prevention on fire and explosion in spray drying plant. A code of practice for designers, manufacturers, suppliers and users. London, UK.
- ASTM E1226-88 (1988). Standard test method for pressure and rate of pressure rise for combustible dust. Annual Book of ASTM Standards, vol. 14.02. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.
- ATEX 1999/92/EC (1999). Directive 1999/92/EC (Atex 137) on minimum requirements for improving the safety and health protection of workers potentially at risk from explosive atmospheres
- ATEX 94/9/EC (1994). Directive 94/9/EC (Atex 100a) on the approximation of the laws of the member states concerning equipment and protective systems intended for use in potentially explosive atmospheres.
- Ayuga, F. (2008). *Some unresolved problems in the design of steel cylindrical silos*. En "Structures and granular solids: from scientific principles to engineering applications". International Conference, The Royal Society of Edinburgh.
- Barrero, A. y Pérez-Saborid M. (2005). *Fundamentos y aplicaciones de la mecánica de fluidos*. McGraw-Hill/Interamericana de España, Madrid.
- Bartknecht, W. (1971). Brenngas-und staubexplosionen. Forschungsbericht F45. Koblenz: Bundesinstitut für Arbeitsschutz.
- Barton, J. (2002). *Dust explosion prevention and protection: a practical guide*. Institution of Chemical Engineers, IChemE. Rugby, UK.
- Beck, H. y Jeske, A (1982). *Dokumentation Staubexplosionen. Analyse und Einzelfalldarstellung*. BIA Report 4/82. Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitssicherheit. St. Augustin, Alemania.
- BIA (1997). *Combustion and explosion characteristics of dusts*. BIA-Report 14/97. Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitssicherheit. Publicado por HVBG, Sankt Augustin, Alemania.



- Bianchi, J. H. y Sheppard, T. (1987). A comparison of a visco-plastic finite-element model with slip-line field and upper-bound solutions for non-hardening material subjected to plane strain and axisymmetric extrusion. *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 29, No.1, pp 61-81.
- Bielert, U. y Sichel, M. (2001). *Numerische simulation von staubexplosionen in pneumatischen saug-flug-förderanlagen VDI-Berichte*. Düsseldorf, Germany: VDI-Verlag GmbH (pp. 449–472).
- Bjerketvedt, D., Bakke, J.R. y Wingerden, K. van (1997). Gas Explosion Handbook. *Journal of Hazardous Materials* 52, pp.1-150.
- Blair, A.S. (2007). Dust explosion incidents and regulations in the United States. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 20, pp. 523-529.
- Blockley, D. (2005). *New Dictionary of Civil Engineering*. Penguin, Londres.
- Boussinesq, J. (1868). Mémoire sur l'influence des frottements dans les mouvements réguliers des fluids. *J. Math Oures Appl.* 13, p. 377.
- Bradley, D., Chen, Z. y Swithenbank, J. R. (1988). Burning rates in turbulent fine dust–air explosions. *XXII Symposium (International) on Combustion*, pp. 1767-1775.
- Bray, K.N.C. (1990). Studies of the turbulent burning velocity. *Proceedings of the Royal Society of London A*, 431, pp. 315-335.
- Bosch, R (2006). *Metodología de análisis sobre la protección de los riesgos derivados de atmósferas explosivas. Caso Práctico*. Proyecto. ETSIIB (UPC)
- Cashdollar, K.L (2000). Overview of dust explosibility characteristics. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 13, pp. 183-199.
- Dahoe, A.E. (2000). *Dust explosions: A study of flame propagation*. Ph.D. thesis. Delft University of Technology, Delft, Holanda.
- Dahoe, A.E. (2001). On the decay of turbulence in the 20-liter explosion sphere. *Flow, Turbulence and Combustion* 67, pp. 159–184.
- Dahoe, A.E., Hanjalic, K. y Scarlett, B. (2002). Determination of the laminar burning velocity and the Markstein length of powder-air flames. *Powder Technology*, 122, pp. 222-238.
- Dahoe, A.E., Zevenbergen, J.F., Lemkowitz, S.M. y Scarlett, B. (1996). Dust explosions in spherical vessels: The role of flame thickness in the validity of the cube-root law. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 9(1), pp. 33-44.
- Davies, J.T. (1972). *Turbulence phenomena*. Academic Press, New York.
- Deng, X., Zang, T., Dang J. y Xie, L. (1993). Maize dust explosion in the 94.4 m³ experimental silo for venting of deflagrations in low strength silos. *Proc. 5th Int. Coll. Dust Explosions*, Pultusk, Warsaw, Poland, 19-22 April 1993, pp 403-411.



- DIN-Fachbericht 140 (2005). Design of silos for dust explosions. Beuth-Verlag GmbH, Berlin.
- Donat, C. (1971). Auswahl und bemessung von druckentlastungseinrichtungen für staubexplosionen. Staub-reinhalt. *Luft* 31, pp. 154-160.
- Dorsett, H.G., Jacobson, M, Nagy, J, et al. (1960). Laboratory equipment and test procedures for evaluating explosibility of dusts. Report Inv. 5424. U.S. Bureau of Mines.
- Dorsett, H.G. y Nagy, J. (1968). Dust explosibility of chemicals, drugs, dyes and pesticides. Report Inv. 7132. U.S. Bureau of Mines.
- Eckhoff, R.K. (1984). Use of $(dP/dt)_{max}$ from closed-bomb tests for predicting violence of accidental dust explosions in industrial plants. *Fire Safety Journal*, 8, pp. 159-168.
- Eckhoff, R.K. (1990). Sizing of dust explosion vents in the process industries. Advances made during the 1980s. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 3, pp. 268-279.
- Eckhoff, R. K. (1993a). Dust explosion research. State-of-the-art and outstanding problems. *Journal of Hazardous Material*, 35, pp. 103-117.
- Eckhoff, R.K. (1993b). Influence of initial and explosion-induced turbulence on dust explosions in large vented silo cells. *Safety Science*, 16, pp. 511-525.
- Eckhoff, R.K. (2003). *Dust Explosions in the Process Industries*, 3rd Edition, Gulf Professional Publishing, Amsterdam, The Netherlands.
- Eckhoff, R.K. (2008). Understanding dust explosions. The role of powder science and technology. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 22, pp. 105-116.
- Eckhoff, R. K. y Fuhre, K. (1984). Dust explosion experiments in a vented 500 m³ silo cell. *Journal of Occupational Accidents* 6, pp. 229-240.
- Eckhoff, R. K., Fuhre, K. y Pedersen, G. H. (1987). Dust explosions experiments in a vented 236 m³ silo cell. *Journal of Occupational Accidents* 9, pp. 161-175.
- Eckhoff, R. K., Alfert, F., Fuhre, K. y Pedersen, G. H. (1988). Maize starch explosions in a 236 m³ experimental silo with vents in the silo wall. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 1, pp. 16-24.
- Eibl, J., Nars, T., Leuckel, W., Höchst, S. (2000). Experimentelle Studien an einer Versuchs- Siloanlage zur Druckentlastung von Staubexplosionen. Abschlussbericht des SFB 219 C5, Wiley-VCH.
- EN 14491 (2006). Dust explosion venting protective systems. CEN.
- Faber, M. (1991). Recoil forces of vented explosions in technical installations. *Europex Newsletter*, diciembre 1991, pp. 2-3.
- Faraday, M. y Lyell, C. (1845). Report on the subject of the explosion at the Haswell Collieries, and on the means of preventing similar accidents. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 26, pp. 16-35.



- Field, P. (1984). Dust explosion protection - a comparative study of selected methods for sizing explosion relief vents. *Journal of Hazardous Materials*, 8, pp. 223-238.
- FLUENT 6.3.(2007). Tutorial Notes. ANSYS
- Fraser, R., Pack, C.J. y Santavicca, D.A. (1986). An LDV system for turbulence length scale measurements. *Experiments in Fluids* 4, pp. 150-152.
- Früchtel, G., Hassel, E.P. y Janicka, J. (1996). Turbulent length scales in a swirling flame. *Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion*, pp. 195-202.
- GAMBIT 2.3. (2007). Tutorial Notes. ANSYS
- García, J. (2003a). El fenómeno de la explosión. En: J. García Torrent (Editor), *Seguridad industrial en atmósferas explosivas*. Laboratorio Oficial J.M. Madariaga, Madrid.
- García, J. (2003b). Explosiones de polvos y fibras combustibles. En: J. García Torrent (Editor), *Seguridad industrial en atmósferas explosivas*. Laboratorio Oficial J.M. Madariaga, Madrid.
- García, J. (2003c). Dispositivos y sistemas de venteo de la explosión. En: J. García Torrent (Editor), *Seguridad industrial en atmósferas explosivas*. Laboratorio Oficial J.M. Madariaga, Madrid.
- Hansen, O.R., Storvik, I., Wingerden, K. van (1999). Validation of CFD-models for gas explosions, where FLACS is used as example; model description and experiences and recommendations for model evaluation. *Proceedings European Meeting on Chemical Industry and Environment III*, pp. 365-382, Polonia.
- Hartmann, I., Nagy, J. y Brown, H.R. (1943). Inflammability and explosibility of metal powders. Report Inv. 3722, U.S. Bureau of Mines.
- Hattwig, M. y Hensel, W. (1993). Applicability of the new VDI-guideline 3673 to silos of rectangular geometry. *Proc. 5th Int. Coll. Dust Explosions*, Pultusk, Warsaw, Poland 19-22 April 1993, pp 71-81.
- Hauert, F. y Vogl, A. (1995). *Measurement of dust cloud characteristics in industrial plants*. Final technical report, PL 910695. FSA, Mannheim, Alemania.
- Hauert, F., Vogl, A. y Radant, S. (1996). Dust cloud characterization and its influence on the pressure-time-history in silos. *Process Safety Progress* Vol.15 No. 3, pp. 178-184.
- Hinze, J.O. (1975). *Turbulence*. 2ª edición, McGraw-Hill, New York.
- Hjertager, B.H. (1982). Simulation of transient compressible turbulent reactive flows. *Combustion science and technology* 27, pp. 159-170.
- Hjertager, B.H. (1984). Influence of turbulence on gas explosions. *Journal of Hazardous Materials* 9, pp. 315-346.



- Hjertager, B.H. (1986). Three-dimensional modeling of flow, heat transfer and combustion. En: *Handbook of heat and mass transfer*. Houston, Gulf Publishing Company, pp. 1303-1350.
- Hjertager, B. H., Fuhre, K., y Bjoerkhaug, M. (1988). Gas explosion experiments in 1:33 and 1:5 scale offshore separator and compressor modules using stoichiometric homogeneous fuel/air mixtures. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 1, pp. 197-220.
- Hjertager, B.H. (1993). Computer modelling of turbulent gas explosions in complex 2D and 3D geometries. *Journal of Hazardous Materials*, 34, pp. 173-197.
- Höchst, S. y Leuckel, W. (1998). On the effect of venting large vessels with mass inert panels. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 11 (2), pp. 89-97.
- Hong, C.W. y Tarng, S.D. (1998). Direct measurement and computational analysis of turbulence length scales of a motored engine. *Experimental Thermal and Fluid Science* 16, pp. 277-285.
- HSE (1992). *The effects of simplification of the explosion pressure-time history*. Offshore Technology Information OTI 92-599, Health and Safety Executive. HMSO Books, Londres.
- ISSA (2007). FSA: fire and explosion protection. En CD: *Practical Assistance for the preparation of an explosion protection document*. International Social Security Association.
- Jacobson, M., Cooper, A.R. y Nagy, J. (1964). Explosibility of metal powders. Report Inv. 6516. U.S. Bureau of Mines.
- Jacobson, M., Nagy, J., Cooper, A.R., et al (1961). Explosibility of agricultural dusts. Report Inv. 5753. U.S. Bureau of Mines.
- Jacobson, M., Nagy, J. y Cooper, A.R. (1962). Explosibility of dusts used in the plastic industry. Report Inv. 5971. U.S. Bureau of Mines.
- Jeske, A y Beck, H. (1989). Evaluation of dust explosions in the Federal Republic of Germany, *EuropEx Newsletter*, no. 9, pp. 2-4.
- Johnson , N.L. (1996). The Legacy and Future of CFD at Los Alamos. LA-UR-96-1426. Fluid Dynamics Group, T-3. Theoretical Division. Los Alamos National Laboratory. Publicado en: *Proceedings of the 1996 Canadian CFD Conference*, Ottawa, Canadá.
- Kauffman, C.W. (1982). Agricultural dust explosions in grain handling facilities, en: J.H.S. Lee y C.M. Guirao (Eds.), *Fuel-air Explosions*. University of Waterloo Press, Waterloo, Ontario, Canada, pp. 305-347.
- Kidde (2003). Catálogo comercial. Distribuido por Puncernau & Asociados.
- Kjaldman, L. (1992). Numerical flow simulation of dust deflagrations. *Powder Technology*, 71, pp. 163-169.



- Kolmogorov, A.N. (1941). Dissipation of energy in isotropic turbulence. *Dokl. Akad. Nauk. SSSR* 32, pp. 19-21.
- Korobeinikov, V. P., Semenov, I. V., Klemens, R., Wolanski, P., y Kosinski, P. (2002). Modelling of flow and combustion behind shock waves propagating along dust layers in long ducts.
- OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH SERVICE (1993). Approved code of practice for the prevention, detection and control of fire and explosion in New Zealand dairy industry spray drying plant. Wellington, New Zealand.
- Kosinski, P., Klemens, R., y Wolanski, P. (2002). Potential of mathematical modelling in largescale dust explosions. In I. Sochet, Paper presented at 4 international symposium on hazards, prevention and mitigation of industrial explosions, Bourges, France, Oct. 21–25, 2002. *J. Phys. IV France-Proceedings*, 125–132.
- Krause, U. (1993). A two-dimensional model for the numerical simulation of explosions in vented vessels. *Proc. 5th Int. Coll. Dust Explosions*, Pultusk, Warsaw, Poland, 19-22 April 1993, pp. 421-430.
- Launder, B.E. y Spalding, D.P. (1974). The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3(2), pp. 269–289.
- Ledin, H. S. (2002). *A review of the state-of-the-art in gas explosion modelling*. Report HSL/2002/02. Fire and Explosion Group. Health & Safety Laboratory, Harpur Hill, Buxton.
- Loret, B. y Luong, M.P. (1982). A double deformation mechanism model for sand. *Proceedings of the Fourth International Conference in Numerical Methods in Geotechnics*, Edmonton.
- Lunn, G. (1992). *Dust Explosion Prevention and Protection. Part 1: Venting*, 3rd ed. Institution of Chemical Engineers, Rugby, UK.
- Martín, J (2005). *Clasificación y análisis de los métodos disponibles para la aplicación de la directiva ATEX*. Proyecto ETSIIB (UPC).
- Matsuda, T. (1993). Dust explosion incidents in Japan. *Proceedings of the Second IUPAC Workshop on Safety in Chemical Production*, Yokohama, p. 256.
- Mercer, D.B., Amyotte, P.R., Dupuis, D.J., Pegg, M.J., Dahoe, A., *et al.* (2001). The influence of injector design on the decay of pre-ignition turbulence in a spherical explosion chamber. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 14, pp. 269-282.
- Morozzo, C. (1795). Relation d'une violente détonation arrivée a Turin le 14 décembre 1785 dans un magasin de farine. *Repertoire des Arts et Metiers*, 2, pp. 478.
- Nagy, J., Conn, J.W. y Verakis, H.C. (1969). Explosion development in a spherical vessel. Report Inv. 7279, U.S. Bureau of Mines
- Nagy, J., Seiter, E.C., Conn, J.W. y Verakis, H.C. (1971). Explosion development in closed vessels. Report Inv. 7507, U.S. Bureau of Mines.



- Nasr, T. (2004). Dust explosions in silos from the perspective of a civil engineer. *ZKG International*, Vol. 57, pp. 54-62.
- Nomura, S. y Tanaka, T. (1980). Prediction of maximum rate of pressure rise due to dust explosion in closed spherical and non-spherical vessels. *Industrial Engineering Chemical Process Design and Development* 19, pp. 451-459.
- NFPA (1957). *Report of important dust explosions*. National Fire Protection Association, Quincy, MA, USA.
- NFPA 68. (2002). Guide for Venting of Deflagrations, 2002 edition. National Fire Protection Association, Quincy, MA, USA.
- NFPA 68 (2007). Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting, 2007 edition. National Fire Protection Association, Quincy, MA, USA.
- NTP 29: *Instalaciones de recogida de polvos combustibles*. Control del riesgo de explosión. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
- NTP 223: *Trabajos en recintos confinados*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
- NTP 369: *Atmósferas explosivas: instalaciones eléctricas*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
- NTP 370: *Atmósferas potencial explosivas: clasificación de emplazamientos de clase*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
- NTP 427: *Paramentos débiles para el venteo de explosiones (I)*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
- NTP 428: *Paramentos débiles para el venteo de explosiones (II)*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
- NTP 567: *Protección frente a cargas electrostáticas*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
- NTP 827: *Electricidad estática en polvos combustibles (I): características de las descargas electrostáticas*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
- NTP 828: *Electricidad estática en polvos combustibles (II): medidas de seguridad*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
- Paper presented at fourth international symposium on hazards, prevention and mitigation of industrial explosions, Bourges, France, Oct. 21–25, 2002. *J. Phys. IV France-Proceedings*, 113–119.
- Patankar, S.V. (1980). *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Taylor & Francis.
- Pérez, C.(2005). *Clasificación de emplazamientos peligrosos para atmósferas explosivas de gases y polvos combustibles*. Proyecto ETSIIB (UPC).



- Popat, N.R., Catlin, C.A., Arntzen, B.J., Lindstedt, R.P., Hjertager, B.H., Solberg, T., *et al.* (1996). Investigation to improve the accuracy of computational fluid dynamic based explosion models. *Journal of Hazardous Materials*, 45, pp. 1-25.
- Pritchard, D. K. (1989). A review of methods for predicting blast damage from vapour cloud explosions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 2, pp. 187-193.
- Proust, Ch., Accorsi, A. y Dupont, L. (2007). Measuring the violence of dust explosions with the “20 l sphere” and with the standard “ISO 1m³ vessel”. Systematic comparison and analysis of the discrepancies. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 20, pp. 599–606.
- Pu, Y.K., Jarosinski, J., Johnson, V.G. y Kauffman, C.W. (1990). Turbulence effects on dust explosions in the 20-liter spherical vessel. *Proceedings of the Twenty-Third Symposium (International) on Combustion*. The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, pp. 843–849.
- Radandt, S. (1985). Staubexplosionen in Silos. Untersuchungsergebnisse, Teil 13. Symposium No. 14, Berufsgenossenschaft Nahrungmittel und Gaststätten, Mannheim, Germany.
- Radandt, S. (1989). Einfluss van Betriebsparametern auf Explosionsabläufe in Silozellen. *VDIBerichte* No. 701. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, Germany.
- Ramírez, A., García-Torrent, J. y Aguado, P.J. (2009). Determination of parameters used to prevent ignition of stored materials and to protect against explosions in food industries. *Journal of Hazardous Materials* 168, pp. 115-120.
- Real Decreto 400/1996. Aparatos y sistemas de protección para uso en atmósferas potencialmente explosivas.
- Real Decreto 681/2003. Protección de la salud y seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de la presencia de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo.
- Richardson, L.F. (1920). The supply of energy from and to atmospheric eddies. *Proc. R. Soc. A*, 97, pp. 354-373.
- Rose, M., Roth, P., Frolov, S.M. y Neuhaus, M.G. (1999). Modelling of turbulent gas/particle combustion by a Lagrangian PDF method. *Comb. Sci. Tech.*, 149, pp. 95-113.
- Schaerli, A. (2005). Obituary: In memory of Wolfgang Bartknecht (1925-2005). *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 18, v-vi.
- Schoeff, R.W. (1995). *U.S. Grain Dust Explosion Statistics*. Dept. of Grain Science & Industry. Kansas State University. Accesible: http://www.oznet.ksu.edu/historicpublications/Dust_Exp.htm.
- Schoeff, R.W. (2005). *U.S. Agricultural Dust Explosion Statistics*. Dept. of Grain Science & Industry. Kansas State University. Accesible: http://www.oznet.ksu.edu/historicpublications/Dust_Exp.htm.



- Scott, G. D. (2010). Dust or gas explosion: Case Study of Dryer Explosion and Design Venting. *American Institute of Chemical Engineers*. San Antonio, Texas.
- Schumann, S., Rastogi, A.K. y Friehmelt, V. (1996). Druckentlastung von Staubexplosionen: Experimente und Modellierung der Wirkung. *VDI-Berichte 1272*, pp. 619-631.
- Siwek, R. (1994). New revised VDI-Guideline 3673. *28th Annual Loss Prevention Symposium*, Atlanta, Georgia, pp. 17-21.
- Siwek, R. (1988). Reliable determination of safety characteristics in 20 litre apparatus. *Proceedings of the Conference on Flammable Dust Explosions*, St. Louis, USA.
- Siwek, R. (1989a). Druckentlastung von Staubexplosionen beim pneumatischen Befüllen von Behältern. *VDI-Berichte 701*, Verein Deutscher Ingenieure, Dusseldorf.
- Siwek, R. (1989b). Dust explosion venting for dusts pneumatically conveyed into vessels. *Plant/Operations Progress* 8, 129-140.
- Siwek, R. (2004). Dust explosion venting and suppression of conventional spray dryers. *Internacional Symposium Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries*, Praha.
- Skjold, T. (2003). *Selected aspects of turbulence and combustion in 20-litre explosion vessels*. Cand. Scient. Thesis. Department of Physics, University of Bergen, Noruega.
- Skjold, T. (2007). Review of the DESC project. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 20, pp. 291-302.
- Skjold, T., Arntzen, B.J., Hansen, O.R., Taraldset, O.J., Storvik, I.E. y Eckhoff, R.F. (2005). Simulating dust explosions with the first version of DESC. *Process Safety and Environmental Protection*, 83(B2), pp. 151-160.
- Skjold, T., Arntzen, B.J., Storvik, I.E. y Eckhoff, R.K. (2006). Simulation of dust explosions in complex geometries with experimental input from standardized tests. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 19, pp. 210-217.
- Smirnov, N. N., Nikitin, V. F. y Legros, J. C. (2000). Ignition and combustion of turbulized dust/air mixtures. *Combustion and Flame*, 123, pp. 46-67.
- Smith, D.L.O. y Lohnes, R.A. (1986). Frictional properties and stress-strain relationships for use in the finite element analysis of grain silos. *Journal of Powders and Bulk Solids*. Vol. 6, No. 3, pp 4-10.
- Strehlow, R.A. y Baker, W.E. (1976). The characterization and evaluation of accidental explosions. *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 2, pp. 27-60.
- Tamanini, F. (1995). An improved correlation of experimental data on the effects of ducts in vented dust explosions. *Proc. 8th Int. Symp. Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries*, Vol 1, Antwerp.
- Tamanini, F. (1996a). Modeling of panel inertia effects in vented dust explosions. *Process Safety Progress*, 15 (4), pp. 247-257.



- Tamanini, F. (1996b). Vent sizing in partial-volume deflagrations and its application to the case of spray dryers. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 9 (5), pp. 339-350.
- Tamanini, F. (1998a). Disclosure of FMRC method for panel inertia effects in dust explosions. *FMRC research*, julio 30.
- Tamanini, F. (1998b). The use of models in the development of explosion protection guidelines. *Proc. 9th Int. Symposium Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries*, Barcelona, España.
- Tamanini, F. y Chaffee, J.L. (1992). Turbulent vented gas explosions with and without acoustically induced instabilities. *Proc. 24th Int. Symp. on Combustion*, pp. 1845-51. The Combustion Institute.
- Tamanini, F. y Ural, E.A. (1992). FMRC studies of parameters affecting the propagation of dust explosions. *Powder Technology*, 71, pp. 135-151.
- Tamanini, F. y Valiulis, J. (1996). Improved guidelines for the sizing of vents in dust explosions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 9 (1), pp. 105-118.
- Tamanini, F. y Valiulis, J. (1998). *Dust explosion vent sizing technology implemented by Factory Mutual Loss Prevention Consultants worldwide*. 1st Internet Conference on Process Safety, enero, 27-29.
- Tascon, A. (2010). *Aplicación de la dinámica de fluidos computacional al estudio de las explosiones en silos y su protección mediante venteos*. Tesis Doctoral. Departamento de ingeniería y ciencias agrarias. Universidad de León.
- Task Group NFPA 68 (1999). *Impulse task force report to the Committee on Explosion Protection Systems*.
- Thom, A. (1933). The Flow Past Circular Cylinders at Low Speeds. *Proc. Royal Society*, A141, pp. 651-666, London.
- Tu, J., Yeoh, G.J. y Liu, Ch. (2008). *Computational Fluid Dynamics. A practical approach*. Butterworth-Heinemann, Burlington, MA, USA.
- UNE EN 1991-1-2 (2004) Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-2: Acciones generales. Acciones en estructuras expuestas al fuego. AENOR, Madrid.
- UNE-EN 13237 (2003). Atmósferas potencialmente explosivas. Términos y definiciones para equipos y sistemas de protección destinados a utilizarse en atmósferas potencialmente explosivas. AENOR, Madrid.
- UNE-EN 13821 (2003). Atmósferas potencialmente explosivas. Prevención y protección contra la explosión. Determinación de la energía mínima de inflamación de las mezclas polvo/aire. AENOR, Madrid.
- UNE-EN 14034-1 (2005). Determinación de las características de explosión de nubes de polvo. Parte 1: Determinación de la presión máxima de explosión pm_{ax} de nubes de polvo. AENOR, Madrid.



- UNE-EN 14034-2 (2006). Determinación de las características de explosión de nubes de polvo. Parte 2: Determinación de la velocidad máxima de aumento de presión (dp/dt)_{máx} de nubes de polvo. AENOR, Madrid.
- UNE-EN 14034-3 (2006). Determinación de las características de explosión de nubes de polvo. Parte 3: Determinación del límite inferior de explosividad LIE de nubes de polvo. AENOR, Madrid.
- UNE-EN 14034-4 (2005). Determinación de las características de explosión de nubes de polvo. Parte 4: Determinación de la concentración límite de oxígeno CLO de nubes de polvo. AENOR, Madrid.
- UNE-EN 14460 (2006). Equipos resistentes a las explosiones. AENOR, Madrid.
- UNE-EN 14491 (2006). Sistemas de protección por venteo de explosiones de polvo. AENOR, Madrid.
- UNE-EN 14797 (2007). Dispositivos de venteo de explosiones. AENOR, Madrid.
- UNE-EN 15089 (2009). Sistemas de aislamiento de explosión. AENOR, Madrid.
- UNE-EN 26184-1 (1993). Sistemas de protección contra explosiones. Parte 1: determinación de los índices de explosión de los polvos combustibles en el aire (ISO 6184-1:1985). AENOR, Madrid.
- UNE-EN 50281-2-1 (1999). Aparatos eléctricos destinados a ser utilizados en presencia de polvos combustibles. Parte 2-1: Métodos de ensayo. Métodos para determinar la temperatura mínima de inflamación del polvo. AENOR, Madrid.
- UNE-EN 60079-10-1(2009). Clasificación de emplazamientos Atmósferas explosivas gaseosas. AENOR, Madrid.
- UNE-EN 60079-10-2 (2009). Clasificación de emplazamientos Atmósferas explosivas de polvo. AENOR, Madrid.
- UNE 61241-10 (2009). Material eléctrico para uso en presencia de polvos. AENOR, Madrid.
- UNE-EN 60079-10 (2006). Clasificación de emplazamientos peligrosos. Material eléctrico para atmósferas de gas explosivas. AENOR, Madrid.
- UNE 60079-11. Atmósferas explosivas. Protección del equipo por seguridad intrínseca "i". AENOR, Madrid.
- UNE-EN 60079-14 (2006). Material eléctrico para atmósferas de gas explosivas. Instalaciones eléctricas en emplazamientos peligrosos. AENOR, Madrid.
- UNE-EN 60210 (2011). Plantas satélite de gas natural licuado (GNL). AENOR, Madrid.



- Ural, E.A. (1989). Simplified analytical model of vented explosions. Appendix C en FMRC Report J.I. 0Q2E2.RK, Tamanini y Chafee, *Large scale vented dust explosions, effect of turbulence on explosion severity*. Factory Mutual Research Corporation.
- Ural, E.A. (1993). A simplified method for predicting the effect of ducts connected to explosion vents. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 6 (1), pp. 3-10.
- Ural, E.A. (2001). A simplified development of a unified dust explosion vent sizing formula. *Proc. 35th Annual Loss Prevention Symp.*, American Institute of Chemical Engineers, Houston, Texas.
- Ural, E.A. (2005). Dust explosion venting through ducts. *Proc. 39th Annual Loss Prevention Symp.*, American Institute of Chemical Engineers, Atlanta, Georgia.
- Wel, P.G.J. van der (1993). *Ignition and propagation of dust explosions*. Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, Delft, Holanda.
- Villanueva Muñoz, J.L. (1981). Polvos combustibles. España
- VDI 3673 (2002). Pressure venting of dust explosions. Verein Deutscher Ingenieure. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf.
- Wingerden, K. van (1993). Prediction of pressure and flame effects in the direct surroundings of installations protected by dust explosion venting. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 6, nº 4, pp. 241-249.
- Wingerden, K. van (1996). Simulation of dust explosions using a CFD-code. *Proceedings of the 7th International Colloquium on Dust Explosions*, Bergen, Noruega.
- Wingerden, K. van, Hansen, Pederese, G., Davis, S. (2010). Application of a short cur risk analysis methodology for analyzing dust explosions hazards. *AICHE 6th Global Congress on Process Safety*, San Antonio Texas, USA.
- Zalosh, R.G. (2006). New dust explosion venting design requirements for turbulent operating conditions. Presentado en *6th International Symposium on the Prevention and Mitigation of Industrial Explosions*, Halifax, Nueva Escocia.
- Zalosh, R.G. (2007). New dust explosion venting desing requirements for turbulent operating conditions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 20, pp. 530-535.
- Zalosh, R.G. (2008). Explosion ventig data and modeling research projetc.The Fire Protection Research Foundation. Massachusetts. USA.