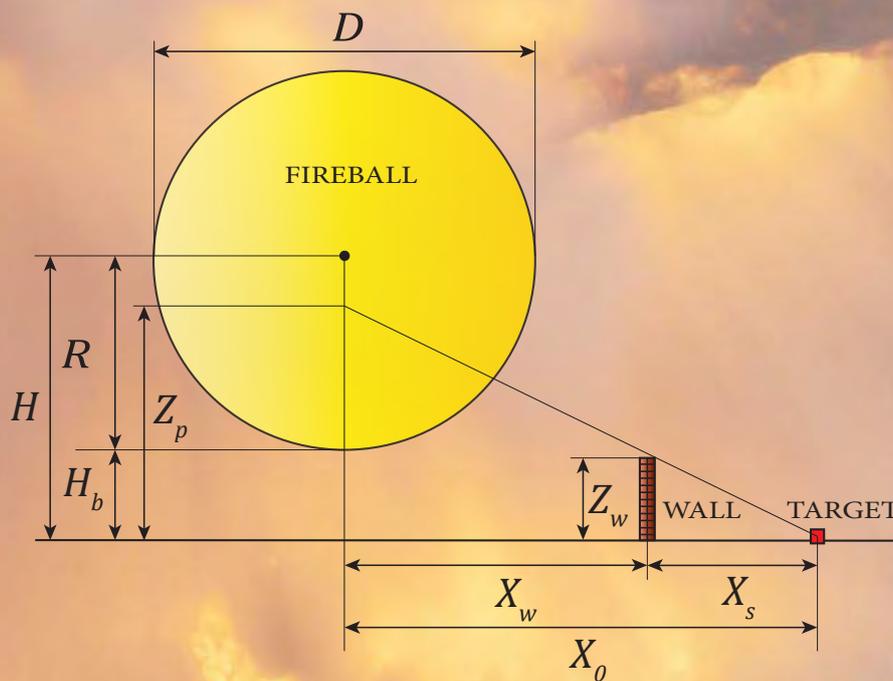




Contribución al desarrollo de factores de configuración de bolas de fuego con presencia de obstáculos



Juan Manuel Bonilla Martínez

Barcelona, 2017



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Contribución al desarrollo de factores de configuración de bolas de fuego con presencia de obstáculos

Juan Manuel Bonilla Martínez

ADVERTIMENT La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del repositori institucional UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) i el repositori cooperatiu TDX (<http://www.tdx.cat/>) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual **únicament per a usos privats** emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei UPCommons o TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a UPCommons (*framing*). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del repositorio institucional UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) y el repositorio cooperativo TDR (<http://www.tdx.cat/?locale-attribute=es>) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual **únicamente para usos privados enmarcados** en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio UPCommons. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a UPCommons (*framing*). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the institutional repository UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) and the cooperative repository TDX (<http://www.tdx.cat/?locale-attribute=en>) has been authorized by the titular of the intellectual property rights **only for private uses** placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading nor availability from a site foreign to the UPCommons service. Introducing its content in a window or frame foreign to the UPCommons service is not authorized (*framing*). These rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.

CONTRIBUCIÓN AL DESARROLLO DE FACTORES DE CONFIGURACIÓN DE BOLAS DE FUEGO CON PRESENCIA DE OBSTÁCULOS

Juan Manuel Bonilla Martínez

Ingeniero Químico

Memoria presentada para obtener el título de
Doctor por la Universitat Politècnica de Catalunya

Dirigida por:

Dra. Eulàlia Planas Cuchi

Dr. Juan Antonio Vilchez Sánchez

Departamento de Ingeniería Química
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Barcelona
Universitat Politècnica de Catalunya
Barcelona, 2017



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Dedicatoria

*A mis padres,
que con su ejemplo de esfuerzo y sacrificio
me enseñaron el camino para
alcanzar mis sueños*

Motivación

El desarrollo de este trabajo parte de la firme convicción personal de realizar una tesis doctoral, con el fin de introducirme en el campo de la investigación básica y aplicada en el ámbito académico. El objetivo estaba marcado en mi horizonte próximo.

Sin embargo, hace unos años, gran parte de mi tiempo lo dedicaba a la investigación de la explosión de una cisterna de gas natural licuado en Zarzalico (Murcia), junto a dos compañeros. Curiosamente, los encuentros que se producirían tras este accidente serían el embrión de esta tesis.

Eulàlia Planas, investigadora de reconocido prestigio internacional, se interesó por este accidente y establecimos contacto para el intercambio de información, determinar sus causas y estimar cuantitativamente sus efectos. Eulàlia había participado en la investigación del accidente de Tivissa, que guarda cierta similitud con el de Zarzalico.

Algo parecido ocurrió con Juan Antonio Vílchez, también destacado investigador y director técnico de la consultora de seguridad industrial TIPS. Esta empresa desarrollaba desde hace tiempo estudios y proyectos para el sector del gas natural, y el accidente suscitó (como no podía ser de otra forma) un enorme interés por parte de Juan Antonio.

A partir de este momento, comenzamos a coincidir en jornadas, cursos y reuniones relacionadas con el accidente y en un determinado momento planteé la posibilidad de realizar la tesis en el Centro de Estudios del Riesgo Tecnológico (CERTEC). Juan Antonio ha sido profesor asociado del CERTEC durante un largo periodo y dirigido varias tesis doctorales.

Mi situación personal para afrontar un reto de la magnitud de una tesis doctoral es particular, ya que resido en Murcia, mi disponibilidad es part-time y en ese tiempo libre debo atender el cuidado de mis hijas menores y otros menesteres. A pesar del hándicap tiempo-distancia, en septiembre de 2013 formalicé la matrícula de doctorado en el programa de ingeniería de procesos químicos. Solo faltaba concretar un aspecto nada baladí: sobre qué trataría la tesis.

Yo manejaba algunas ideas para la tesis en el ámbito del riesgo tecnológico, cuando Juan Antonio me propuso dos temas totalmente distintos: el primero estaba relacionado con el riesgo químico y el territorio en la Región de Murcia; el otro es el que da título a esta tesis.

A pesar de que fui advertido de que la temática de gestión me resultaría más llevadera e incluso más asequible, me decanté por la bola de fuego. Después, con el tiempo, tengo que reconocer que me acordé muchas veces de aquel sabio consejo.

Esta tesis requiere de la aplicación de técnicas matemáticas y métodos numéricos. En general, el cálculo de factores de configuración es muy tedioso y de gran complejidad matemática. A pesar de ello, me aventuré a realizar esta tesis fundamentalmente porque el tema me resultó atractivo e innovador.

La primera vez que Juan Antonio me habló del efecto sombra, indicó la necesidad de disponer de herramientas para evitar el sobredimensionamiento en el cálculo de consecuencias de accidentes con bolas de fuego. En sus visitas al Valle de Escombreras (Cartagena), la orografía y configuración del polígono le hicieron pensar sobre este asunto. ¿Qué intensidad de radiación térmica llegaría realmente a la ciudad de Cartagena, si pudiéramos considerar el efecto sombra que ejerce la colina? “*Nadie lo ha resuelto*”-me comentó.

Por tanto, esta tesis tiene como motivación principal la resolución un problema de ingeniería no planteado hasta el momento, de gran interés práctico. Los factores de configuración obtenidos son utilizados para la modelización matemática y predicción de consecuencias de accidentes graves en el ámbito de la Seguridad Industrial.

Agradecimientos

A pesar de que esta página se encuentra entre las primeras, es la última que escribo. Ahora que he llegado al final del intenso carrusel emocional que he experimentado como doctorando, tengo una extraña sensación. El esfuerzo personal que he tenido que realizar durante estos cuatro años para desarrollar este trabajo ha sido excepcional, pero sin la inestimable contribución de algunas personas, esta tesis no sería negro sobre blanco.

En primer lugar quiero agradecer a mi directora Eulàlia Planas la oportunidad que me brindó de hacer la tesis en el CERTEC y su dedicación y entrega a la misma. Esta tesis se ha enriquecido con sus conocimientos, planteamientos, criterio y rigurosidad.

Igualmente, quiero agradecer a Juan Antonio Vilchez, co-director de esta tesis, el afecto con el que me ha tratado durante todo este periodo, su disposición y su gran accesibilidad. Su orientación inicial y enfoque conceptual de la tesis fue magnífico. Le agradezco todos los comentarios, propuestas, aportaciones y el tiempo que ha dedicado a resolver mis dudas. He aprendido mucho de él y del rigor y excelencia técnica que propaga.

Otra persona fundamental en esta tesis es Miguel Muñoz. La contribución y asistencia técnica de Miguel para el cálculo de factores es impagable. Los algoritmos y herramientas de cálculo Matlab que me facilitó han sido imprescindibles, algo por lo que le estoy muy agradecido.

En el transcurso de la investigación he tenido la oportunidad de conocer a otros investigadores, pero hay uno que es especial. A José María Cabeza Lainez, Catedrático de Composición Arquitectónica de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla le conocí cuando intentaba encontrar una solución analítica al problema. Hojeando bibliografía, leí en uno de sus artículos que había dedicado más de dos años de su carrera investigadora a resolver analíticamente el factor de configuración entre rectángulos paralelos y perpendiculares. Leer aquello, y sobre todo conocer a José María me permitió tomar conciencia de la magnitud del problema que trataba de resolver. José María es un científico con un talento sublime para la física matemática y la geometría, que ha dedicado gran parte de su amplia carrera al cálculo de factores. Su participación ha sido determinante para desarrollar el método semi-analítico y en el plano personal ha supuesto un gran soporte moral. ありがとう、友よ。

Agradezco también a todos los familiares, amigos, compañeros y conocidos que de una forma u otra se han interesado y me han apoyado en mi devenir doctoral. Gracias por estar ahí.

Y dejo para el final el reconocimiento más merecido. Corresponde a las personas más importantes en mi vida. Gracias a la generosidad de mi mujer Rosa he podido sacar adelante este bonito propósito. Ella ha sabido escucharme, comprenderme y animarme en los momentos difíciles. También ha cubierto cualquier ausencia y me ha facilitado el disponer de tiempo para poder dedicárselo a este trabajo. Mis hijas Nhoa y Mar han sido un gran estímulo y fuente de motivación para no rendirme. Espero que dentro de poco puedan entender el significado de la palabra tesis por la que no paran de preguntarme.

Resumen

El incendio es el fenómeno más frecuente que caracteriza a los accidentes graves que tienen lugar tanto en establecimientos industriales como en el transporte de mercancías peligrosas por carretera y ferrocarril. La formación de una bola de fuego, aislada o como parte de una BLEVE, se caracteriza por la emisión de una intensa radiación térmica, capaz de causar daños letales e irreversibles a personas situadas a una distancia significativa. A pesar de que el conocimiento acerca de este tipo de accidente ha mejorado de forma sustancial, se siguen produciendo eventualmente, por lo que es necesario desarrollar propuestas encaminadas a reducir los efectos de sus consecuencias.

Esta tesis tiene como objetivo principal el desarrollo de nuevos factores de configuración entre una bola de fuego y un receptor vulnerable, considerando el efecto sombra que ejerce una tercera superficie interpuesta entre ambos. Este planteamiento define un escenario de gran utilidad práctica, como es la implantación de barreras físicas, no consideradas hasta el momento para la predicción de las consecuencias de accidentes graves con bolas de fuego sobre su entorno próximo. No se han encontrado en la bibliografía factores de configuración para la hipótesis planteada, por lo que será en esta tesis la primera vez que se publiquen, para dos casos particulares: bola de fuego a ras de suelo y elevada.

Se ha desarrollado un método matemático propio para determinar el factor de configuración en las condiciones descritas anteriormente, que proporciona unos resultados de gran precisión, con reducido tiempo de ejecución y coste computacional. También se han obtenido ecuaciones matemáticas, a través de un método semi-analítico, que permiten realizar una aproximación aceptable de dichos factores.

Los resultados de esta investigación han permitido desarrollar un nuevo modelo matemático de bola de fuego dinámica considerando el efecto sombra, cuya principal novedad es que el régimen transitorio de la bola de fuego evoluciona a través de diferentes regiones en las que la visibilidad relativa puede ser nula, parcial y total.

Se establecen criterios de diseño de barreras físicas para limitar los efectos de la radiación térmica, conocimiento que hasta el momento se limitaba a muros diseñados para resistir la onda de choque y el hipotético impacto de fragmentos. Pueden integrarse en metodologías de análisis del riesgo relacionadas con la planificación del uso del suelo.

En síntesis, esta tesis proporciona conocimientos y herramientas sobre un efecto no considerado hasta el momento.

Abstract

Fire is the most common phenomenon that characterizes major accidents that take place in both industrial establishments and in the transport of dangerous goods by road and rail. The formation of a fireball, with or without a BLEVE, is characterized by the strong emission of thermal radiation, capable of causing lethal damage and irreversible injuries to people located at a significant distance. Although the knowledge about this type of accident has improved substantially, are still occurring eventually, so it is necessary to develop proposals aimed at reducing the effects of their consequences.

This thesis has as main objective the development of new configuration factors between a fireball and a vulnerable target, considering the shadow effect of a third surface interposed between them. This approach defines a scenario of great practical utility, such as it is the implementation of physical barriers, not considered so far for the prediction of the consequences of major accidents of fireballs over their surroundings. In the literature review, no references has been found related with the raised hypothesis, so it will be in this research the first time they are published, for two particular cases: aboveground and elevated fireball.

A novel mathematical method has been developed to determine the configuration factor under the conditions described above, which provides accurate results with reduced execution time and computational cost. Moreover, mathematical equations have been derived, through a semi-analytical method, that allow an acceptable approximation of these factors.

The results of this research have allowed the development of a new mathematical model of dynamic fireball considering the shadow effect, whose main novelty is that the transitory regime of the fireball evolves through different regions in which the relative visibility can be total, partial and null.

Physical barrier design criteria are established to limit the effects of thermal radiation, which until now was limited to walls designed to withstand the shock wave and the hypothetical impact of fragments. It can be integrated into risk analysis methodologies related to land use planning.

In summary, this thesis provides knowledge and tools on an effect not considered so far.

Tabla de contenidos

Capítulo 1. Introducción.....	27
1.1. El fenómeno BLEVE.....	27
1.1.1. Mecanismo de una BLEVE.....	28
1.1.2. Efectos de una BLEVE.....	30
1.2. Radiación térmica.....	33
1.2.1. Naturaleza de la radiación térmica.....	33
1.2.2. Espectro electromagnético.....	35
1.2.3. Interacción con la materia.....	36
1.2.4. Conceptos fundamentales en radiación térmica.....	37
1.2.5. Intensidad de radiación.....	41
1.3. Factor de configuración.....	42
1.3.1. Historia.....	42
1.3.2. Formulación matemática.....	43
1.4. Objetivos.....	46
Capítulo 2. Antecedentes.....	49
2.1. Factor de configuración de bolas de fuego.....	49
2.2. Métodos para la determinación del factor de configuración.....	55
2.2.1. Métodos analíticos.....	56
2.2.2. Métodos numéricos.....	64
2.2.3. Otros métodos.....	74
2.3. Factores de configuración disponibles.....	77
2.4. Modelado del efecto sombra.....	77
2.4.1. Algoritmos ray-tracing.....	84
2.5. Conclusiones.....	86
Capítulo 3. Planteamiento geométrico.....	87
3.1. Introducción.....	87
3.2. Proceso de formación y desarrollo de una bola de fuego.....	87
3.2.1. Crecimiento.....	88

3.2.2. Combustión constante.....	88
3.2.3. Consunción.....	88
3.2.4. Modelización.....	89
3.3. Nuevo enfoque con presencia de obstáculos.....	91
3.3.1. Bola de fuego a ras de suelo.....	92
3.3.2. Bola de fuego elevada.....	93
3.3.3. Analogía geométrica.....	94
Capítulo 4. Resolución matemática.....	97
4.1. Introducción.....	98
4.2. Soluciones analíticas para los casos extremos.....	99
4.2.1. Bola de fuego totalmente visible.....	99
4.2.2. Bola de fuego totalmente oculta.....	107
4.3. Soluciones analíticas para casos de ocultación parcial.....	113
4.3.1. Bola de fuego a ras de suelo.....	122
4.3.2. Bola de fuego elevada.....	127
4.4. Método semi-analítico para cálculo del factor de configuración con efecto sombra.....	140
4.4.1. Bola de fuego a ras de suelo.....	140
4.4.2. Bola de fuego elevada.....	146
Capítulo 5. Aplicaciones prácticas.....	153
5.1. Modelo dinámico de bola de fuego considerando el efecto sombra.....	153
5.1.1. Planteamiento.....	155
5.1.2. Casuística.....	157
5.2. Zonas de planificación. Curvas de vulnerabilidad.....	167
5.2.1. Funciones Probit.....	168
5.2.2. Intensidad de radiación térmica.....	169
5.2.3. Dosis de radiación térmica.....	170
5.3. Protección de elementos vulnerables.....	172
5.4. Propuestas de diseño de barreras.....	176
5.4.1. Introducción.....	176
5.4.2. Planificación del uso del suelo.....	177
5.4.3. Barreras de seguridad y protección.....	183
5.4.5. Normativa sobre distancias de seguridad.....	186
5.4.5. Caso de estudio.....	188

Capítulo 6. Conclusiones.....199

Nomenclatura.....203

Bibliografía.....207

Anexos

Anexo A. Deducción matemática de la ecuación del factor de configuración.....225

Anexo B. Catálogo de factores de configuración plano-esfera.....233

Anexo C. Curvas de vulnerabilidad de bolas de fuego con efecto sombra.....249

Lista de Figuras

- Figura 1.1. Dinámica de formación de una bola de fuego.
- Figura 1.2. Espectro electromagnético.
- Figura 1.3. Distribución espectral de la radiación.
- Figura 1.4. Radiación reflejada, transmitida y absorbida.
- Figura 1.5. Ángulo sólido.
- Figura 1.6. Factor de configuración entre dos superficies.
- Figura 1.7. Orientación relativa entre superficies.
- Figura 2.1. Geometría utilizada para el cálculo del factor de configuración.
- Figura 2.2. Curvas de riesgo individual para incendios de charco con y sin muro barrera.
- Figura 2.3. Orientación entre una bola de fuego y un receptor.
- Figura 2.4. Esquema para el cálculo de bola de fuego sobre receptor horizontal.
- Figura 2.5. Esquema para el cálculo de bola de fuego sobre receptor vertical.
- Figura 2.6. Integración sobre el contorno de una superficie.
- Figura 2.7. Método de la esfera interna.
- Figura 2.8. Analogía de Nusselt.
- Figura 2.9. Elementos con idéntica proyección sobre la hemisfera.
- Figura 2.10. Influencia de la orientación geométrica sobre el factor de configuración.
- Figura 2.11. Vectores utilizados en la proyección.
- Figura 2.12. Orientación espacial entre los elementos de superficie.
- Figura 2.13. Discretización del método del hemicubo.
- Figura 2.14. Obtención del factor de configuración con el método del hemicubo.
- Figura 2.15. Error de proximidad en el método del hemicubo.
- Figura 2.16. Error de visibilidad en el método del hemicubo.
- Figura 2.17. Error de “aliasing” en el método del hemicubo.
- Figura 2.18. Trazado de rayos en el método de Monte Carlo.
- Figura 2.19. Tipos de sombra entre dos superficies.
- Figura 2.20. Ilustración del método de trazado de rayos.
- Figura 2.21. Proyección de la sombra sobre la superficie receptora.
- Figura 3.1. Dinámica de formación de una bola de fuego.
- Figura 3.2. Enfoque geométrico clásico de la bola de fuego.
- Figura 3.3. Nuevo enfoque de la bola de fuego, incluyendo un muro.
- Figura 3.4. Esquema de una bola de fuego a ras de suelo con la presencia de un muro.
- Figura 3.5. Esquema de una bola de fuego elevada con la presencia de un muro.
- Figura 3.6. Esquema bidimensional del efecto sombra.

- Figura 3.7. Esquema tridimensional del efecto sombra.
- Figura 4.1. Esquema para la formulación matemática del factor de configuración.
- Figura 4.2. Configuración geométrica que proporciona el máximo factor de configuración.
- Figura 4.3. Transferencia radiante de bola de fuego elevada respecto a receptor vertical.
- Figura 4.4. Factor de configuración vertical de una bola de fuego para distintas alturas.
- Figura 4.5. Asíntota del factor de configuración vertical para receptores alejados.
- Figura 4.6. Transferencia radiante de bola de fuego elevada respecto a receptor horizontal.
- Figura 4.7. Factor de configuración horizontal de una bola de fuego para distintas alturas.
- Figura 4.8. Inversión de los factores de configuración vertical y horizontal.
- Figura 4.9. Transferencia radiante de bola de fuego a ras de suelo respecto a receptor vertical.
- Figura 4.10. Transferencia radiante de bola de fuego a ras de suelo respecto a receptor horizontal.
- Figura 4.11. Geometría para determinación del factor máximo de bola de fuego elevada.
- Figura 4.12. Factor de configuración máximo teórico para distintas elevaciones de la bola.
- Figura 4.13. Factores máximo, vertical y horizontal para bola de fuego a ras de suelo.
- Figura 4.14. Factores vertical y horizontal para bola de fuego a distintas alturas.
- Figura 4.15. Geometría que proporciona visibilidad nula.
- Figura 4.16. Esquema para la determinación analítica de Z_s .
- Figura 4.17. Visibilidad nula de una bola de fuego a ras de suelo.
- Figura 4.18. Visibilidad nula de una semiesfera en tierra.
- Figura 4.19. Visibilidad nula de una bola elevada con $H=X_0$ ó $H_d=X_d$.
- Figura 4.20. Representación de Z_{sd} .
- Figura 4.21. Representación del factor de sombra para $H_d=1$.
- Figura 4.22. Descomposición de la superficie en elementos triangulares.
- Figura 4.23. Algoritmo para cálculo del factor de bola de fuego con efecto sombra.
- Figura 4.24. Trazado de rayos entre bola de fuego y receptor horizontal.
- Figura 4.25. Algoritmo "ray tracing" de Badouel.
- Figura 4.26. Escenario para la determinación numérica del factor de bola a ras de suelo.
- Figura 4.27. Factores para bola de fuego a ras de suelo para distintos bloqueos. ($N_e=2500$).
- Figura 4.28. Relación entre factor máximo para bola a ras de suelo con y sin presencia de muro.
- Figura 4.29. Escenario para determinación numérica del factor de bola elevada.
- Figura 4.30. Factor de visibilidad completa para distintas alturas.
- Figura 4.31. Geometría que proporciona visibilidad completa.
- Figura 4.32. Factor máximo de bola elevada ($H_d=0,75$) para distintos bloqueos.
- Figura 4.33. Factor máximo de bola elevada ($H_d=1$) para distintos bloqueos.
- Figura 4.34. Factor máximo de bola elevada ($H_d=1,25$) para distintos bloqueos.
- Figura 4.35. Geometría que proporciona idéntica visibilidad.
- Figura 4.36. Inversión del factor de configuración.
- Figura 4.37. Esquema geométrico de bola en tierra para el cálculo semi-analítico.
- Figura 4.38. Intersección de bola de fuego a ras de suelo por un plano de corte.
- Figura 4.39. Sustracción de triángulos sobre la elipse para bola a ras de suelo.
- Figura 4.40. Intersección de bola de fuego elevada por un plano de corte.

- Figura 4.41. Sustracción de dos círculos sobre la elipse resultante de la intersección.
- Figura 4.42. Geometría utilizada para la determinación de la coordenada de la base de la elipse.
- Figura 4.43. Planteamiento geométrico para determinación factor de un círculo elevado.
- Figura 5.1. Variación de diámetro, poder emisivo y altura en función del tiempo.
- Figura 5.2. Condiciones de visibilidad relativa en función del tiempo.
- Figura 5.3. Algoritmo del modelo dinámico de bola de fuego con obstáculos.
- Figura 5.4. Tabla de tiempos con distintas condiciones de visibilidad.
- Figura 5.5. Evolución del tamaño y altura de la bola de fuego con el tiempo.
- Figura 5.6. Intensidad en función del tiempo con presencia de muro.
- Figura 5.7. Letalidad para bola en tierra ($H_d=0,5$) con efecto sombra ($M=100 Tn$).
- Figura 5.8. Intensidad para bola a ras de suelo con efecto sombra ($M=20 Tn$).
- Figura 5.9. Dosis térmica para bola en tierra ($H_d=0,5$) con efecto sombra ($M=100 Tn$).
- Figura 5.10. Distintas geometrías del muro proporcionan visibilidad incompleta.
- Figura 5.11. Factor geométrico del muro para distintas alturas de la bola.
- Figura 5.12. Factor geométrico del muro bajo distintas condiciones de visibilidad ($H_d=1$).
- Figura 5.13. Philadelphia: riesgo químico y territorio.
- Figura 5.14. Vista actual del Camping de los Alfaques.
- Figura 5.15. Estación de Viarregio y entorno urbano.
- Figura 5.16. Puerto de Rotterdam.
- Figura 5.17. Refinería de Santa Cruz de Tenerife.
- Figura 5.18. Transporte ferroviario de LPG.
- Figura 5.19. BLEVE de vagón cisterna de LPG en la estación de Murcia.
- Figura 5.20. Reordenación de la zona del vulnerable B4.
- Figura 5.21. Predimensionamiento de la barrera del vulnerable B1.
- Figura 5.22. Integración arquitectónica de la barrera en el entorno de la estación.
- Figura A1. Geometría para el intercambio de energía entre dos elementos diferenciales.
- Figura A2. Geometría del intercambio de energía entre un elemento diferencial y un área finita.
- Figura A3. Geometría para el intercambio de energía entre dos áreas finitas.
- Figura B1. Representación geométrica del factor F1.
- Figura B2. Representación geométrica del factor F2.
- Figura B3. Representación geométrica del factor F3.
- Figura B4. Representación geométrica del factor F4.
- Figura B5. Representación geométrica del factor F5.
- Figura B6. Representación geométrica del factor F6.
- Figura B7. Representación geométrica del factor F7.
- Figura B8. Representación geométrica del factor F8.
- Figura B9. Representación geométrica del factor F9.
- Figura B10. Representación geométrica del factor F10.
- Figura B11. Representación geométrica del factor F11.
- Figura B12. Representación geométrica del factor F12.
- Figura B13. Representación geométrica del factor F13.

- Figura B14. Representación geométrica del factor F14.
- Figura C1. Letalidad bola a ras de suelo. M=20 Tn.
- Figura C2. Vulnerabilidad a las quemaduras de primer grado bola a ras de suelo. M=20 Tn.
- Figura C3. Vulnerabilidad a las quemaduras de segundo grado bola a ras de suelo. M=20 Tn.
- Figura C4. Letalidad para una bola de fuego elevada. M=20 Tn.
- Figura C5. Vulnerabilidad a las quemaduras de primer grado bola elevada. M=20 Tn.
- Figura C6. Vulnerabilidad a las quemaduras de segundo grado bola elevada. M=20 Tn.
- Figura C7. Letalidad para una bola de fuego a ras de suelo. M=50 Tn.
- Figura C8. Vulnerabilidad a las quemaduras de primer grado bola a ras de suelo. M=50 Tn.
- Figura C9. Vulnerabilidad a las quemaduras de segundo grado bola a ras de suelo. M=50 Tn.
- Figura C10. Letalidad para una bola de fuego elevada. M=50 Tn.
- Figura C11. Vulnerabilidad a las quemaduras de primer grado bola elevada. M=50 Tn.
- Figura C12. Vulnerabilidad a las quemaduras de segundo grado bola elevada. M=50 Tn.
- Figura C13. Letalidad para una bola de fuego a ras de suelo. M=100 Tn.
- Figura C14. Vulnerabilidad a las quemaduras de primer grado bola a ras de suelo. M=100 Tn.
- Figura C15. Vulnerabilidad a las quemaduras de segundo grado bola a ras de suelo. M=100 Tn.
- Figura C16. Letalidad para una bola de fuego elevada. M=100 Tn.
- Figura C17. Vulnerabilidad a las quemaduras de primer grado bola elevada. M=100 Tn.
- Figura C18. Vulnerabilidad a las quemaduras de segundo grado bola elevada. M=100 Tn.
- Figura C19. Letalidad para una bola de fuego a ras de suelo. M=450 Tn.
- Figura C20. Vulnerabilidad a las quemaduras de primer grado bola a ras de suelo. M=450 Tn.
- Figura C21. Vulnerabilidad a las quemaduras de segundo grado bola a ras de suelo. M=450 Tn.
- Figura C22. Letalidad para una bola de fuego elevada. M=450 Tn.
- Figura C23. Vulnerabilidad a las quemaduras de primer grado bola elevada. M=450 Tn.
- Figura C24. Vulnerabilidad a las quemaduras de segundo grado bola elevada. M=450 Tn.

Lista de tablas

- Tabla 1.1. Expresiones matemáticas del factor de configuración.
- Tabla 2.1. Factores de configuración propuestos para una bola de fuego.
- Tabla 3.1. Ecuaciones para determinar la altura de la bola de fuego.
- Tabla 4.1. Error relativo proporcionado por el método numérico.
- Tabla 4.2. Factores verticales, F_v^w , para bola a ras de suelo.
- Tabla 4.3. Factores horizontales, F_h^w , para bola a ras de suelo.
- Tabla 4.4. Visibilidad relativa en función de Z_d .
- Tabla 4.5. Factores verticales, F_v^w , para bolas de fuego elevadas ($H_d=0,75$).
- Tabla 4.6. Factores horizontales, F_h^w , para bolas de fuego elevadas ($H_d=0,75$).
- Tabla 4.7. Factores verticales, F_v^w , para bolas de fuego elevadas ($H_d=1$).
- Tabla 4.8. Factores horizontales, F_h^w , para bolas de fuego elevadas ($H_d=1$).
- Tabla 4.9. Factores verticales, F_v^w , para bolas de fuego elevadas ($H_d=1,25$).
- Tabla 4.10. Factores horizontales, F_h^w , para bolas de fuego elevadas ($H_d=1,25$).
- Tabla 4.11. Factores verticales, $F_{v,\Delta}^w$ para una bola de fuego a ras de suelo.
- Tabla 4.12. Factores horizontales, $F_{h,\Delta}^w$ para una bola de fuego a ras de suelo.
- Tabla 4.13. Error de los factores verticales respecto al resultado numérico.
- Tabla 4.14. Error de los factores horizontales respecto al resultado numérico.
- Tabla 4.15. Factores verticales, $F_{v,o}^w$ para una bola de fuego elevada ($H_d=1$).
- Tabla 4.16. Factores horizontales, $F_{h,o}^w$ para una bola de fuego elevada ($H_d=1$).
- Tabla 4.17. Error del factor $F_{v,o}^w$ para bola elevada ($H_d=1$).
- Tabla 4.18. Error del factor $F_{h,o}^w$ para bola elevada ($H_d=1$).
- Tabla 5.1. Valores considerados en el caso práctico.
- Tabla 5.2. Resultados para el caso práctico del modelo dinámico.
- Tabla 5.3. Modelos Probit utilizados.
- Tabla 5.4. Comparación del modelo dinámico con el estático (con y sin efecto sombra).
- Tabla 5.5. Intensidad y tiempo equivalentes a dosis térmica de $250 \text{ (kW}\cdot\text{m}^{-2})^{4/3}\cdot\text{s}$.
- Tabla 5.6. Intensidad y tiempo equivalentes a una dosis térmica de $115 \text{ (kW}\cdot\text{m}^{-2})^{4/3}\cdot\text{s}$.
- Tabla 5.7. Franjas de seguridad.
- Tabla 5.8. Reducción de distancias por instalación de barreras físicas.
- Tabla 5.9. Condiciones exigidas a la barrera física.
- Tabla 5.10. Radiación recibida en cada punto.
- Tabla 5.11. Efecto sombra que cumple el criterio de intensidad de radiación.
- Tabla 5.12. Alturas de las barreras para distintas separaciones del receptor.
- Tabla 5.13. Resumen de parámetros de las barreras propuestas.
- Tabla 5.14. Altura de las barreras para la proyección de fragmentos.

Acrónimos

2D	2 Dimensiones
3D	3 Dimensiones
ADR	Agreement on Dangerous Goods by Road https://www.unece.org/trans/danger/publi/adr/adr_e.html
ARIA	Analyse, Recherche et Information sur les Accidents http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/
ASME	American Society of Mechanical Engineers http://www.asme.org
BLCBE	Boiling Liquid Compressed Bubble Explosion
BLEVE	Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion
CCPS	Center for Chemical Process Safety. American Institute of Chemical Engineers http://www.aisi.org/ccps
CTE	Código Técnico de la Edificación https://www.codigotecnico.org/
EHE	Instrucción Española del Hormigón Estructural
ESA	European Space Agency http://www.esa.int/
FACTS	Failure and Accidents Technical information System http://www.factsonline.nl/
LNG	Liquefied Natural Gas
LPG	Liquefied Petroleum Gas
NASA	National Aeronautics and Space Administration https://www.nasa.gov/
MHIDAS	Major Hazard Incident Data Service
PBMR	Pebble Bed Modular Reactor-PBMR
RID	International Regulations Concerning the Carriage of Dangerous Goods by Rail
SFPE	Society of Fire Protection Engineers http://www.sfpe.org
TNO	Netherlands Organisation for Applied Scientific Research http://www.tno.nl/
UVCE	Unconfined Vapor Cloud Explosion

1 INTRODUCCIÓN

“La luz es algo como las gotas de lluvia —cada pequeño pedacito de luz se denomina fotón— y si la luz es de un único color, todas las «gotas de lluvia» tienen el mismo tamaño”

Richard Feynman

1.1. El fenómeno BLEVE

Las explosiones BLEVE han venido ocurriendo en la industria de procesos y el transporte desde principios del siglo XX cuando comenzaron a funcionar las primeras plantas de licuefacción a escala industrial. El LPG fue producido originalmente en 1910 por el Dr. Walter Snelling, apareciendo los primeros productos comerciales en 1912 y la primera planta comercial en 1920. Así, la patente inicial para la licuefacción de gas natural fue concedida a Godfrey Cabot en 1914, aunque la primera planta comercial fue construida en 1941 en Cleveland, Ohio. No fue sin embargo hasta mediados de siglo cuando empezó a producirse el aumento del comercio y el desarrollo del sector.

La estadística sobre accidentes con explosiones tipo BLEVE pone de manifiesto la relativa frecuencia con que se produce este tipo de fenómeno y que suelen implicar un importante número de víctimas mortales, como se aprecia en las recopilaciones realizadas por (Prugh, 1991a; Prugh, 1991b; Lees, 1996) en el período 1926-1986 y (Abassi, 2007) en el periodo 1926-2004. Esta evidencia se debe en gran parte a la notable presencia de gases licuados en la industria, como sugiere (Casal et al., 2001), el transporte y el sector de la energía.

El concepto de explosión BLEVE fue acuñado por primera vez en 1957 por tres ingenieros de Factory Mutual, en el transcurso de la investigación de una explosión en un reactor químico. Desde entonces hasta ahora el término BLEVE se ha consolidado en el ámbito de la seguridad industrial, adquiriendo su propia identidad.

Las definiciones han ido evolucionando debido a las contribuciones de los distintos especialistas (Reid, 1976; Walls, 1978; Walls, 1979; Marshall, 1987, Venart et al., 1993b, Peterson, 2002). Sin embargo, a día de hoy existen importantes discrepancias relativas tanto al concepto como al mecanismo de la explo-

sión (Abassi et al., 2007). Esto pone de relieve la complejidad que subyace de este tipo de explosión, sobre la que siguen realizando investigaciones que permitan conocer mejor su génesis. De acuerdo al glosario de términos del CCPS (Center for Chemical Process Safety, 2017), se define BLEVE como:

“Un tipo de transición rápida de fase en la que un líquido almacenado por encima de su punto de ebullición atmosférico se despresuriza rápidamente, provocando una transición casi instantánea líquido-vapor con la correspondiente liberación de energía. Una BLEVE suele ir acompañada de una gran bola de fuego si la sustancia involucrada es un líquido inflamable, ya que un escenario frecuente de BLEVE es un incendio incidiendo sobre la fase gaseosa de un recipiente presurizado. Sin embargo, no es necesaria la presencia de un líquido inflamable para que tenga lugar una explosión BLEVE”. En la tesis de (Hemmatian, 2016) se citan diversas definiciones, proponiendo la siguiente definición como la más general y correcta, ya que en la práctica es ampliamente aceptada:

“BLEVE es la explosión de un recipiente que contiene un líquido (o líquido más vapor) a una temperatura significativamente por encima de su temperatura de ebullición a presión atmosférica”.

1.1.1. Mecanismo de una BLEVE

El fenómeno BLEVE ha sido estudiado por distintos autores. La teoría presentada por (Reid, 1976; Reid, 1979), establece que la despresurización de un líquido que se encuentra a una temperatura por encima de su temperatura límite de sobrecalentamiento da lugar a una BLEVE. Su argumentación se basa en la nucleación homogénea que tiene lugar al superar ese umbral para explicar la gran energía que acompaña a este tipo de explosiones.

Sin embargo, más tarde otros autores como (Prugh, 1991a; Prugh, 1991b) descartan la teoría de Reid y afirman que pueden producirse BLEVEs por debajo de la temperatura límite de sobrecalentamiento, aspecto que fue confirmado mediante ensayos por (Birk et al., 1993; Birk et al., 1994). Una nueva teoría surgió por parte de (Venart et al., 1993a) denominada Boiling Liquid Compressed Bubble Explosion (BLCBE), que se basa en el proceso de re-presurización ejercido sobre las burbujas mientras estas crecen, almacenando energía en su interior que es liberada súbitamente cuando el recipiente se desintegra.

En el trabajo realizado por (Abassi et al., 2007), se realiza un minucioso análisis acerca de los fundamentos teóricos del fenómeno BLEVE, basada en estudios y observaciones de distintos autores (Reid, 1979; McDevitt et al., 1990; Prugh, 1991b; Leslie et al., 1991; Venart et al., 1993a; Birk et al., 1994; Birk, 1996; Lees, 1996; Casal, 2008). En base a dichas contribuciones, se establece la secuencia clásica de una BLEVE, que de forma resumida se concreta en las siguientes etapas (esta tesis se centra exclusivamente en sustancias inflamables):

1. *Un recipiente que contiene gas licuado falla debido a determinadas acciones a las que está sometido (incendio, impacto, corrosión, fatiga, sobrellenado, sobrepresión, etc).*

2. *Se produce una despresurización instantánea. Esta disminución de presión implica que el líquido se encontrará a una temperatura superior a la de equilibrio en las nuevas condiciones de presión. Si se da la circunstancia de que la temperatura del líquido en ese instante es próxima o superior a su temperatura límite de sobrecalentamiento, se produce una vaporización súbita de la masa del líquido, que deviene en una explosión como consecuencia del gran incremento de volumen y de la expansión de los vapores comprimidos en el espacio de cabeza.*
3. *Rotura del recipiente. La gran liberación de energía produce el colapso del recipiente y una potente onda de presión, proyectando fragmentos a una gran distancia.*
4. *La sustancia involucrada es proyectada violentamente en todas direcciones, entrando en contacto con el aire e inflamándose en caso de encontrar una fuente de ignición, ya que es frecuente que el fenómeno BLEVE sea inducido por un fuego externo (Prugh, 1991; Abassi et al., 2007).*

Solo una fracción de la sustancia liberada consigue participar en la combustión, debido a la dispersión del combustible como consecuencia de la explosión, las dificultades de penetración del aire en la columna de convección y la recirculación de gases quemados por el vórtice toroidal (remolino en forma de toroide generado por la turbulenta elevación de la masa de gases, véase la Figura 1.1).

La ignición del combustible inyectado en la atmósfera contribuye a una rápida expansión de los productos de combustión y del aire succionado, alcanzando un volumen muy superior al de la sustancia inflamable y favoreciendo su ascenso. El escape produce una nube rica constituida por una mezcla bifásica, incluyendo finas gotitas de aerosol, que arde difusivamente en forma de bola de fuego. La radiación térmica favorece más aún la vaporización y calienta la mezcla en combustión.

Algunos autores (Gayle et al., 1965; Petersen et al., 1977; Hasegawa et al., 1978; Lihou et al., 1982; Gostintsev et al., 1982; Prugh, 1994; Surzhikov, 1997; Makhviladze et al., 1999a; Makhviladze et al., 1999b; Roberts et al., 2000; CCPS, 2010) han estudiado el proceso de formación y la dinámica de bolas de fuego, incluyendo su tamaño, duración, elevación, variación de temperatura y su campo de concentraciones y velocidades, entre otros parámetros.

En su fase inicial se caracteriza por la silueta típica de hongo y cuando se desarrolla completamente la combustión adquiere forma de bola. Un modelo ampliamente aceptado para el cálculo de consecuencias considera a la esfera como figura geométrica representativa de la bola de fuego, hipótesis que tiene una gran importancia en esta tesis y forma parte de su fundamento central. En la Figura 1.1 se ilustra un esquema del proceso de formación de una bola de fuego.

Esta bola de fuego provoca la emisión de una gran cantidad de radiación térmica, que supone una severa amenaza para el entorno más cercano. Los flujos de radiación térmica pueden desencadenar daños y focos secundarios de ignición a distancias superiores al tamaño de la bola de fuego (Roberts et al., 2000).

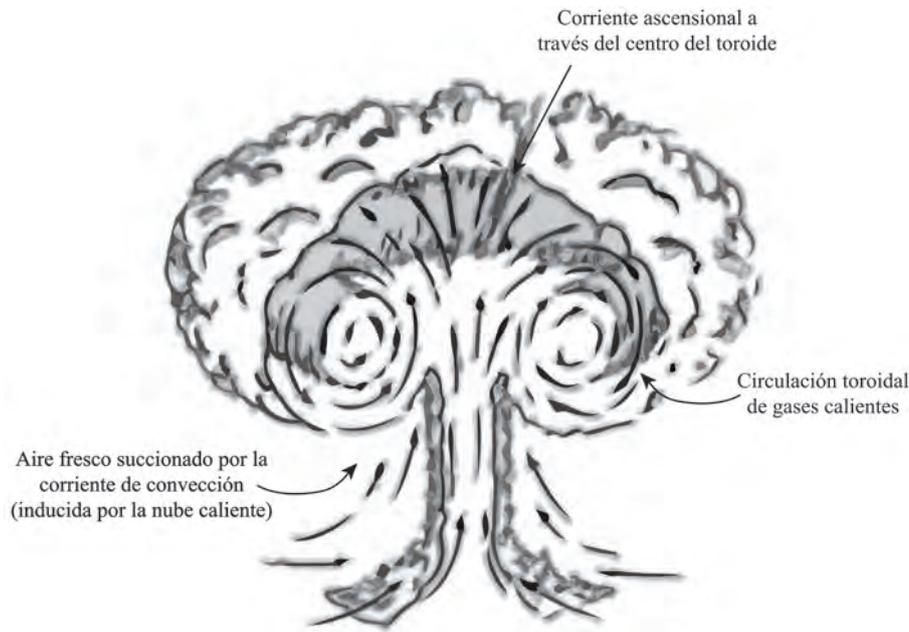


Figura 1.1. Dinámica de formación de una bola de fuego. Fuente: Elaboración propia.

1.1.2. Efectos de una BLEVE

Los efectos de las explosiones tipo BLEVE son fundamentalmente: sobrepresión generada por una onda de choque, proyección de fragmentos y radiación térmica. En los distintos eventos BLEVE que han tenido lugar, sus consecuencias han quedado marcadas sobre el terreno y han permitido extraer información y acumular conocimiento para comprender mejor su comportamiento. A pesar de ello, se requiere investigación aplicada para poder registrar con rigor científico la evolución de las distintas variables de interés en seguridad industrial. Se han realizado ensayos de explosiones BLEVE a pequeña, media y gran escala con gases licuados almacenados en recipientes, entre los que destacan los trabajos de (Schulz-Forberg, 1984; Droste et al., 1988; Johnson et al., 1991; Kielec et al., 1997; Stawcyk, 2003; Birk et al., 2006; Birk et al., 2007). En base a ello, se describe a continuación el conocimiento disponible sobre los efectos anteriormente citados.

Sobrepresión. La sobrepresión es el efecto que menos compromete la seguridad de las personas, en espacios abiertos (no confinados) y para una misma distancia. Una gran parte de la energía de la sobrepresión se disipa en la deformación del recipiente, impulsión de fragmentos y otras pérdidas. Cuando el recipiente pierde su integridad, la energía interna almacenada se transforma en energía cinética. El registro típico de presiones muestra un primer pico correspondiente a la expansión del vapor comprimido, seguido por la ebullición instantánea del líquido, y finalmente con un cierto retraso se produce la combustión de la bola de fuego con la propagación del frente de llama. Otros ensayos realizados por (Birk et al., 2007), parecen indicar que el contenido de energía de la fase líquida no contribuye a las sobrepresiones en el campo cercano, de modo que la expansión del líquido

produce una sobrepresión local por efecto de la presión dinámica, pero no parece producir una onda de choque. Como indica (Laboureur et al., 2015), la sobrepresión producida por una explosión BLEVE requiere todavía de un mejor entendimiento y modelado del fenómeno. La mayor parte de datos experimentales sugieren que la sobrepresión generada por una explosión BLEVE es relativamente pequeña, no siendo por tanto el efecto limitante para la integridad de las personas.

A gran escala destaca el ensayo de (Balke et al., 1999), donde se registró una sobrepresión de 44 mbar a 100 metros y 33 mbar a 150 metros en la explosión de un vagón cisterna de 45,36 m³ que contenía propano con un grado de llenado del 22%. En un estadio inferior, se encuentran los ensayos de (Johnson et al., 1991; Birk et al., 2007), que registraron una sobrepresión de 15 mbar a 170 metros, realizadas con tanques de propano ASME (American Society of Mechanical Engineers) de 2 m³, con un grado de llenado del 65%.

Estos niveles se encuentran muy por debajo de los valores umbrales capaces de producir daños severos a los humanos, como la rotura de tímpano (>350 mbar) o daño pulmonar (>2000 mbar), si bien pueden ser suficientes para hacer caer a una persona (70-90 mbar). Se estima que son necesarios 2600 mbar para un 50% de mortalidad y 3500 mbar para un 99% de mortalidad (Fischer et al., 1995).

Proyección de fragmentos. La proyección de fragmentos es el efecto con un mayor alcance y poder destructivo, si bien su direccionalidad sigue un patrón completamente irregular debido al elevado número de variables que modelan su comportamiento. Pueden ocasionar también un efecto dominó sobre otros elementos vulnerables, situados a gran distancia del escenario origen, siendo una de las causas principales de efecto dominó en la industria de procesos (Khan et al., 1998; Hemmatian, 2016).

Los resultados de los análisis con recipientes cilíndricos horizontales evidencian que el número de fragmentos es fuertemente dependiente del patrón de fractura (Gubinelli et al., 2009), siendo la rotura dúctil el mecanismo preponderante en BLEVEs.

Existen fragmentos primarios, procedentes del tanque propiamente dicho, así como fragmentos secundarios ocasionados por la brusca aceleración a la que se ven sometidos los objetos que se encuentran a una distancia próxima de los recipientes. En base a las recopilaciones estadísticas realizadas por (Mébarki et al., 2009), el número de fragmentos suele ser generalmente inferior a 5.

Cuanto más caliente y más presión almacene el tanque, más energía disponible para la expansión y más lejos llegarán los proyectiles. La velocidad inicial de salida suele encontrarse en el rango de 100-200 m/s. Los datos empíricos parecen demostrar que ciertas direcciones están favorecidas, si bien la proyección de fragmentos no deja de ser un fenómeno probabilístico, donde todas las direcciones son posibles. De todas formas, la ubicación final y el alcance de los fragmentos están influenciados enormemente por el entorno orográfico y las características mecánicas y geométricas del recipiente.

Según los estudios realizados, se observa que la distribución horizontal de fragmentos en la dirección frontal y trasera está favorecida frente a la perpendicular o transversal, en parte por la mecánica de la fractura circunferencial en los fondos. A 45° a derecha e izquierda de la parte frontal y trasera del recipiente se acumula el 60% de probabilidad de caída, mientras que la dirección perpendicular se acumula el 40% (Holden et al., 1985; Holden et al., 1988). Otros autores (Mébarki et al., 2009) han propuesto otra distribución que acumula las mismas probabilidades (60/40) pero dentro de un ángulo de 30°, ya que el mayor porcentaje de fragmentos situados en los 45°, estaban dentro de 30°.

En todo caso, ninguna dirección debe considerarse segura, ya que la distribución de fragmentos es un fenómeno aleatorio. También debe comentarse que no son registros válidos para todo tipo de recipientes. Son observaciones generales para distintos productos y tipos de recipientes, tanto industriales como de transporte. En cuanto a distancias, se ha observado que un 70% de los fragmentos no sobrepasa los 200 metros, si bien explosiones como la de San Juanico (México) en 1984 (Pietersen et al., 1988) evidencian distancias muy superiores. Concretamente, 25 fragmentos de más de 10 Tn procedentes de cuatro esferas se encontraron en el rango comprendido 100-890 metros. Por otra parte, 15 tanques cilíndricos de 20 Tn fueron proyectados por encima de los 100 m, uno de los cuales fue encontrado a 1200 m. Por este motivo, las zonas de alerta para la población no deben subestimarse.

La radiación térmica es la esencia nuclear de esta tesis, por lo que sus fundamentos teóricos se abordarán en el siguiente apartado. Cuando se produce una explosión BLEVE, la gran cantidad de energía almacenada se libera formando principalmente un fino aerosol que es inyectado en la atmósfera, así como charcos en las inmediaciones del recipiente y materia propulsada junto con los fragmentos. La ignición de esa gran masa inflamable forma una bola de fuego cuya magnitud depende de la cantidad de materia existente el tanque en el momento de la explosión, la presión de rotura y el sobrecalentamiento acumulado por la sustancia antes de la fractura del recipiente. Hay que puntualizar que no toda la masa participa en la bola de fuego, debido a las pérdidas de materia inflamable que no contribuyen a la combustión; se estima que como máximo contribuye una fracción del 35-40% (Casal et al., 2001). La liberación de la energía térmica se produce en menos de 30 segundos, produciendo una intensa radiación térmica.

Como amenaza para las personas, la radiación térmica es el efecto que tiende a dominar la evaluación del riesgo en las proximidades de una explosión BLEVE. Por ello, en términos de muerte potencial, la radiación térmica procedente de una bola de fuego es con diferencia el mayor peligro para las personas que se encuentran en las inmediaciones del recipiente a presión. La elevada temperatura y la toxicidad de los productos de la combustión generados pueden producir quemaduras de distinto grado y el bloqueo de las vías respiratorias. Distintos accidentes graves como el de 1978 en los Alfaques (Arturson, 1981) y el de San Juanico en 1984 (Pietersen et al., 1988) son ejemplos de lo destructivo que puede llegar a ser el fenómeno BLEVE.

La temperatura del aire circundante se eleva considerablemente y puede causar daños severos en el tracto respiratorio como consecuencia de la inhalación espontánea.

Por otra parte, la ropa puede inflamarse, fundirse o carbonizarse, agravando la situación. El tracto respiratorio humano es capaz de tolerar una temperatura del aire máxima de 203°C, pero a partir de 150°C predomina el dolor procedente de la quemadura de la piel, en menos de 5 minutos de exposición. Por encima de 140°C, existen serias dificultades para respirar.

1.2. Radiación térmica

La historia sobre la caracterización teórica de la radiación térmica es relativamente reciente, a pesar de que el hombre ha convivido durante mucho tiempo con ella. Es un fenómeno conceptualmente complejo y ciertamente abstracto, que no pudo ser comprendido hasta que se desarrolló instrumentación para poder contrastar las hipótesis (termómetros, bolómetros, radiómetros, pirómetros, espectroscopios) y se vincularon distintos fenómenos físicos que hasta entonces consideraban independientes (teoría electromagnética de James Clerk Maxwell).

De acuerdo con (Evans et al., 1985), las primeras referencias a experimentos con calor radiante aparecen en publicaciones italianas, inglesas, francesas y alemanas en el periodo comprendido entre 1570-1770. Sin embargo, la historia del calor radiante invisible data de los tiempos de Francis Bacon (Cornell, 1936), que fue probablemente el primero en ser consciente de su existencia. Los primeros estudios científicos acerca de la radiación térmica comenzaron con los experimentos ópticos de Giovanni Battista della Porta a finales del siglo XVI (Ring et al., 1984).

Sus experimentos fueron repetidos y objeto de investigación por otros científicos como Rumford y Davy, extendiéndose hasta comienzos del siglo XIX. Esta experimentación proporcionó un considerable conocimiento en las propiedades de la radiación térmica que culminó con los trabajos de Pictet y sus colegas De Saussure y Prevost, que establecieron en 1790 en Génova el concepto de que todos los cuerpos irradian calor. Cuanto mayor es la temperatura, mayor es la radiación, de tal manera que cuando dos cuerpos a diferentes temperaturas se encuentran a la vista el uno del otro, el más caliente cederá calor al más frío hasta que alcancen la misma temperatura. Este resultado, conocido como la Teoría del Intercambio Calorífico de Prevost, fue el punto de partida de la moderna teoría de la radiación térmica desarrollada fundamentalmente en el siglo XIX por Maxwell en el plano teórico y complementada experimentalmente por Hertz, siendo ampliada a principios del siglo XX con la Ley de Planck. Una perspectiva histórica más detallada sobre los desarrollos en transferencia de calor por radiación se encuentra disponible en (Viskanta, 2014).

1.2.1. Naturaleza de la radiación térmica

La termodinámica clásica establece tres mecanismos fundamentales de transmisión de calor: conducción, convección y radiación. Esta tesis se centra fundamentalmente en modelar los efectos del calor radiante procedente de una bola de fuego. Todas las sustancias sólidas, líquidas y gaseosas por encima del cero absoluto emiten continuamente de forma espontánea radiación en virtud del movimiento molecular y la agitación atómica asociada con la energía interna de la materia. Asimismo, son capaces de absorber dicha energía bajo determinadas condiciones.

Los mecanismos de emisión de radiación térmica están relacionados con los cambios en la energía de los electrones y en las energías rotacionales y vibracionales de las moléculas que constituyen la materia. La radiación térmica es radiación electromagnética emitida por partículas de la materia a medida que experimentan transiciones de estado en su energía interna, como resultado de su temperatura. Esta radiación puede tener un origen natural o bien generarse de forma artificial, existiendo distintos mecanismos para su emisión.

Desde un punto de vista físico, las ondas electromagnéticas se pueden asimilar a un conjunto de partículas sin masa que se propagan a la velocidad de la luz, transportando una cantidad de energía inversamente proporcional a la longitud de onda de su onda asociada. La radiación térmica es, por tanto, un mecanismo de transferencia de calor que transporta la energía por medio de ondas electromagnéticas. La radiación térmica cumple la segunda ley de la termodinámica, de tal forma que, en ausencia de trabajo, la energía interna es radiada espontáneamente desde los cuerpos con mayor nivel de temperatura a los de menor temperatura. El ejemplo más representativo de esta evidencia es la radiación procedente del sol, que constituye un manantial de energía procedente de la fusión nuclear del hidrógeno, siendo transportada a través del vacío espacial hasta la tierra.

Esta transferencia de energía radiante es desde el punto de vista termodinámico un flujo de calor, ya que la fuerza impulsora procede exclusivamente de la diferencia de temperatura y además, transporta entropía. En situaciones de equilibrio térmico, los procesos de emisión y absorción tendrán lugar, si bien la radiación neta será nula.

La naturaleza del mecanismo físico de propagación de la radiación térmica no está completamente determinado, aunque existen teorías aceptadas por la comunidad científica que intentan dar respuesta al proceso de propagación. De acuerdo a la teoría electromagnética de Maxwell, la radiación se considera constituida por ondas electromagnéticas, mientras que el concepto establecido por Planck considera la radiación como fotones, o cuantos de energía, liberados desde moléculas o electrones excitados térmicamente.

Ambos conceptos se han utilizado para describir la emisión y propagación de la radiación, si bien describen solo en parte la naturaleza de la radiación. A pesar de ello son considerados a día de hoy modelos complementarios. Para el rango de temperaturas habituales en la práctica de la ingeniería, la mayor parte de la energía térmica emitida por un cuerpo se encuentra en longitudes de onda comprendidas entre 0,1-100 μm , motivo por el cual a este rango se le denomina radiación térmica. La propagación de la energía radiante puede abordarse desde dos puntos de vista, la teoría clásica de ondas electromagnéticas o la mecánica cuántica.

La visión clásica de la interacción entre radiación y materia proporciona, en muchos casos, ecuaciones similares a las obtenidas por vía de la mecánica cuántica. Con unas pocas excepciones, la radiación térmica puede ser tratada en base al concepto clásico de transporte de energía por ondas electromagnéticas.

La verdadera naturaleza de la energía electromagnética (fotones o cuantos) no suele ser determinante para el estudio de problemas de ingeniería. En esta tesis, se aplicará la teoría de ondas electromagnéticas porque tiene mayor utilidad para los cálculos de ingeniería. La radiación térmica, a diferencia de la conducción y la convección, presenta dos características únicas:

1. Un factor determinante en las aplicaciones de la radiación térmica está influenciado en la forma en la que la emisión de energía radiante depende de la temperatura. En la transferencia de calor por conducción y convección, la fuerza impulsora del transporte de energía es la diferencia de temperaturas elevada a la primera potencia, mientras que en radiación, depende de la diferencia de temperatura absoluta entre los dos cuerpos, elevado a la cuarta potencia. Por este motivo, es evidente que su importancia se acrecienta en sistemas con elevados niveles de temperatura.
2. Una segunda característica de la transferencia radiante es que no se necesita la presencia de un medio material entre dos puntos para que el intercambio radiante tenga lugar. La radiación puede progresar a través del vacío. En estas condiciones, es el único mecanismo de transferencia de calor presente, y además el más rápido.

1.2.2. Espectro electromagnético

La naturaleza ondulatoria de la radiación electromagnética permite caracterizarla por su longitud de onda (o frecuencia). No todas las ondas electromagnéticas tienen el mismo comportamiento en el medio de propagación, la misma procedencia o la misma forma de interacción con la materia. Se denomina espectro electromagnético a la distribución energética del conjunto de las ondas electromagnéticas, que se divide convencionalmente en segmentos o bandas de frecuencia. La división actual se ha realizado en función de diversos criterios, y en todo caso no es exacta, produciéndose en ocasiones solapamientos en las bandas, pudiendo una frecuencia quedar incluida en dos rangos.

Todas las ondas electromagnéticas transportan energía, y lo hacen, en el vacío, a la velocidad de la luz. La velocidad a la que viajan a través de otro medio dependerá del índice de refracción del mismo (1 para gases, 1,5 para el vidrio y 1,33 para el agua). Las ondas electromagnéticas están caracterizadas por su frecuencia o por su longitud de onda, magnitudes inversamente proporcionales:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (\text{Ec.1.1})$$

En esta ecuación se definen las siguientes variables:

λ :	Longitud de onda	(m)
c :	Velocidad de propagación de la luz en el vacío:	($\sim 2,99 \cdot 10^8$ m/s)
ν :	Frecuencia	(Hz o s^{-1})

La energía que transporta una onda es inversamente proporcional a su longitud de onda, de forma que longitudes de onda pequeñas (frecuencias altas) implican mayor energía que longitudes de onda mayores (frecuencias menores).

El espectro electromagnético se extiende continuamente desde longitudes de onda muy pequeñas hasta aquellas que tienen miles de metros en longitud de onda. La representación gráfica del espectro electromagnético puede observarse en la Figura 1.2. Virtualmente, no existen límites superiores o inferiores. Así, el límite teórico inferior del espectro electromagnético es 0, ya que no existen frecuencias negativas, y el teórico superior es infinito.

Con los medios técnicos actuales, se han detectado frecuencias electromagnéticas inferiores a 30 Hz y superiores a $2,9 \cdot 10^{27}$ Hz. Aunque formalmente el espectro es infinito y continuo, se cree que la longitud de onda electromagnética más pequeña posible es la longitud de Planck ($L_p \approx 1,616252 \cdot 10^{-35}$ m).

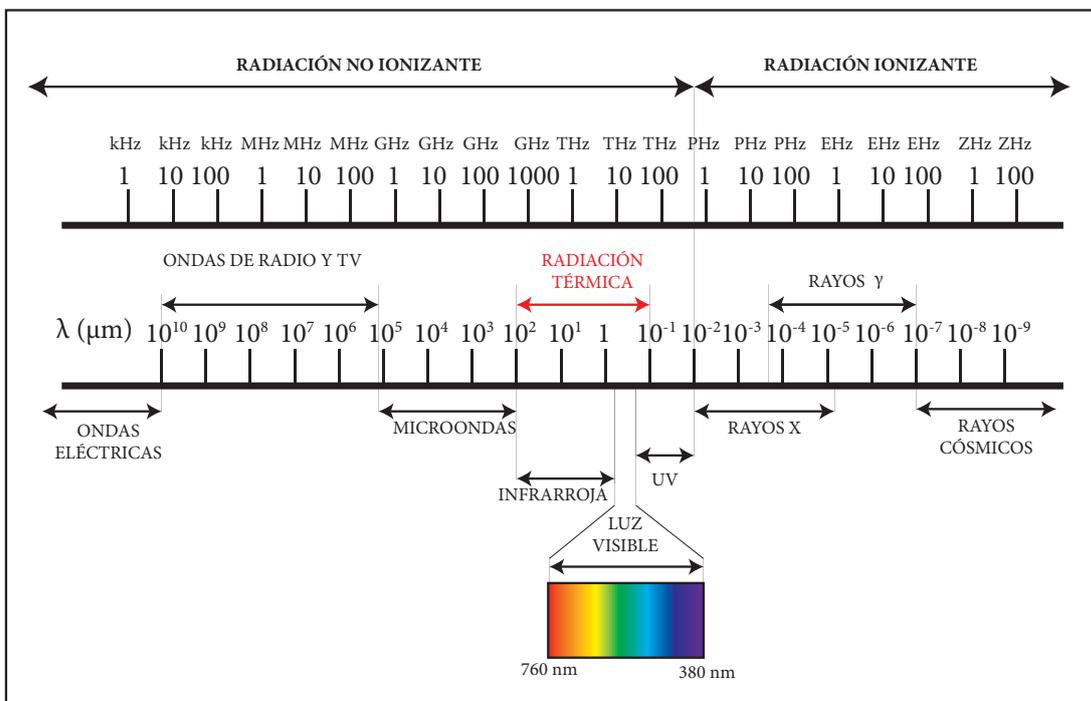


Figura 1.2. Espectro electromagnético. Fuente: Elaboración propia.

1.2.3. Interacción con la materia

El transporte radiante procedente de la combustión de una bola de fuego depende principalmente de la emisividad, la temperatura y la dimensión de las llamas. Existen otros factores como la mezcla combustible-comburente, la pureza del combustible, el flujo de combustible, etc. Existen dos contribuciones predominantes a la radiación, que son la radiación procedente de los gases de combustión (dióxido de carbono y vapor de agua) y de las partículas incandescentes de hollín producto de la combustión incompleta (Ludwig et al., 1973; Buckius et al., 1977; Lee et al., 1981).

Según la ley de desplazamiento de Wien, a las temperaturas de llama de los combustibles gaseosos más habituales, la máxima emisión tiende a situarse en el infrarrojo cercano entre 1 y 2 micras. En esta región, el vapor de agua H_2O tiene bandas vibracionales a 1,8, 2,7 y 6,3 μm y bandas rotacionales desde 10 μm hasta aproximadamente 100 μm . El CO_2 emite a 2,8, 4,3 y 15 μm . Otras bandas de interés son CO a 2,3 y 4,5 μm , NO a 2,6 y 5,2 μm y las bandas vibracionales de OH que cubren el área del infrarrojo cercano hasta aproximadamente 4 μm .

Ninguna de las moléculas que forman productos estables de combustión, como H_2O , CO_2 , CO , O_2 , N_2 poseen niveles de energía electrónicos para emitir radiación apreciable en las regiones visibles o ultravioletas del espectro. El único producto de combustión que emite en esta zona es el radical hidroxilo OH , sobre los 300 nm y otros radicales inestables que se generan en el frente de reacción como son CH , C_2 , HCO , NH , NH_2 .

Las partículas de hollín pueden emitir tanto en la región visible como en el infrarrojo, y esta emisión puede ser el doble o el triple del calor radiado respecto a los productos de combustión no luminosos como CO_2 , CO y H_2O (Howell et al., 2015).

Esta radiación emitida por el fuego es absorbida por la atmósfera. Para calcular el calor radiante recibido por un receptor situado a una cierta distancia es importante conocer las características de emisión de la bola de fuego, así como las características de absorción de la atmósfera, la longitud de la trayectoria a través de ésta y la fracción de energía que le llega al receptor en virtud de su geometría.

1.2.4. Conceptos fundamentales en radiación térmica

Para el estudio de la radiación térmica resulta imprescindible introducir el concepto de cuerpo negro, que representa un modelo ideal sobre el que se apoya la teoría del transporte radiante. Un cuerpo negro es un cuerpo que absorbe toda la radiación incidente para todas las longitudes de onda y ángulos de incidencia. Asimismo, un cuerpo negro emite energía radiante uniformemente en todas direcciones por unidad de área normal a la dirección de emisión.

El cuerpo negro es un emisor difuso, porque tiene la propiedad de emitir radiación independientemente de la dirección. En la naturaleza, solo unos pocos materiales como el carbón negro, el carburo de silicio, el platino negro, el oro negro y algunas pinturas especialmente formuladas se aproximan al cuerpo negro.

Debido a estas propiedades, a una determinada temperatura y en cualquier intervalo de longitud de onda, ninguna superficie puede emitir mayor energía que un cuerpo negro. La radiación del cuerpo negro fue determinada teóricamente por la mecánica cuántica y ha sido verificada experimentalmente. La distribución de energía radiante emitida por un cuerpo negro a una determinada temperatura por unidad de tiempo, unidad de área y unidad de longitud de onda fue determinada por Max Planck en 1901, basándose en la teoría cuántica. Es conocida como la Ley de Planck y viene determinada por la siguiente ecuación:

$$E_{b\lambda}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left(e^{\left(\frac{C_2}{\lambda T} \right)} - 1 \right)} \quad (\text{Ec.1.2})$$

Las variables y coeficientes de la ecuación son:

$E_{b,\lambda}$	Distribución espectral del flujo de radiación (cuerpo negro)	(W/m ²)
C_1 :	Primera constante de radiación	$C_1=2\pi hc^2=3,742 \cdot 10^{-16}$ (W/m ²)
C_2 :	Segunda constante de radiación	$C_2=hc/k=1,439 \cdot 10^{-2}$ (m·K)
λ :	Longitud de onda	(m)
c :	Velocidad de propagación de la luz	$c \sim 2,99 \cdot 10^8$ (m/s)
h :	Constante de Planck	$h=6,63 \cdot 10^{-34}$ (J·s)
k :	Constante de Boltzmann	$k=1,3806504 \cdot 10^{-23}$ (J/K)
T :	Temperatura absoluta	(K)

La variación cuantitativa del poder emisor con la longitud de onda, para distintas temperaturas se muestra en la Figura 1.3, de la que se puede extraer la siguiente información:

- 1) La radiación emitida es una función continua de la longitud de onda.
- 2) Para una longitud de onda fija, la cantidad de radiación emitida aumenta con la temperatura.
- 3) Conforme aumenta la temperatura, la curva se desplaza hacia regiones de menor longitud de onda.

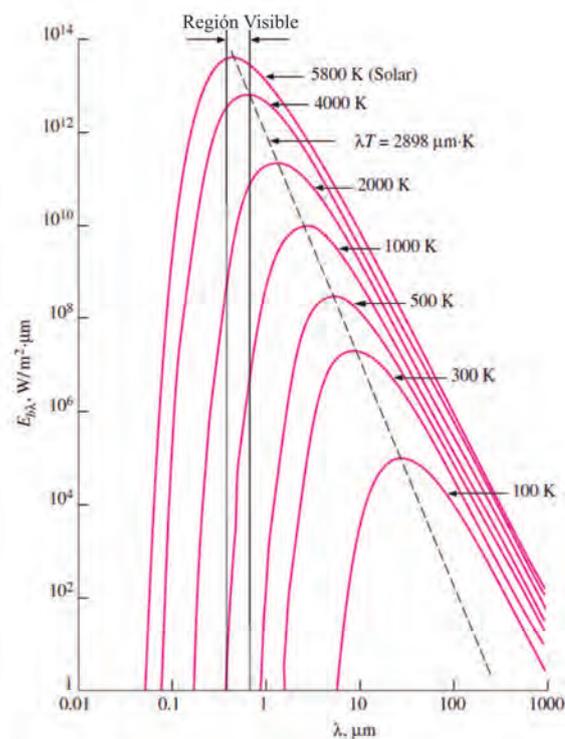


Figura 1.3. Distribución espectral de la radiación. Fuente: Elaboración propia.

Considerando una temperatura de llama de 2000°C, la fracción de radiación emitida que cae en el rango visible del espectro electromagnético, es tan solo del 0,68%. El resto de radiación, prácticamente toda, corresponde al infrarrojo en forma de calor radiante. A 2500°C, temperatura muy similar a la temperatura de llama del hidrógeno en mezcla con el aire, la fracción de radiación emitida como luz visible sería tan solo del 5%.

En 1894, Willy Wien determinó mediante métodos de la termodinámica clásica, que existe una relación inversamente proporcional entre la longitud de onda correspondiente a la máxima potencia de emisión del cuerpo negro y su temperatura. Esta correspondencia se conoce como Ley de desplazamiento de Wien y puede deducirse mediante diferenciación para obtener el máximo absoluto de la función de Planck:

$$(\lambda T)_{max} = 2897,8 (\mu m \cdot K) \quad (\text{Ec.1.3})$$

Si adoptamos el valor de 5778 K (~5504 °C) como temperatura del sol, el pico de la radiación solar tiene lugar en:

$$\lambda = \frac{2879,8}{5778} = 0,50 (\mu m) \quad (\text{Ec.1.4})$$

Este valor corresponde a la mitad de la banda visible del espectro. Para una temperatura de 1727 K (~2000°C), el pico de radiación de una hipotética bola de fuego de propano, considerando comportamiento de cuerpo negro, tendría lugar en:

$$\lambda = \frac{2879,8}{1727} = 1,67 (\mu m) \quad (\text{Ec.1.5})$$

Este otro valor pertenece al infrarrojo cercano.

Para estos valores de longitud de onda se alcanza el máximo valor del poder emisivo del cuerpo negro. Para obtener el poder emisivo total del cuerpo negro es necesario integrar la ecuación de Planck para todas las longitudes de onda comprendidas en el intervalo $[0, +\infty]$.

$$E_{b,0 \rightarrow \lambda}(\lambda, T) = \int_0^{\lambda} E_{b\lambda}(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad (\text{Ec.1.6})$$

El coeficiente σ equivale a:

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4; \text{ denominada constante de Stefan-Boltzmann.}$$

Esta expresión es conocida como la Ley de Stefan-Boltzmann, y fue establecida en 1878 estudiando las curvas experimentales del espectro de la radiación del cuerpo negro. Esta ley nos indica la gran influencia de la temperatura en la radiación emitida por un cuerpo negro. Al duplicar la temperatura de la superficie, la potencia emisiva es 16 veces mayor.

Sin embargo, en un cuerpo real, no toda la energía incidente es absorbida, como puede contemplarse en la Figura 1.4. Según el primer principio de la termodinámica, la cantidad total de energía en un sistema cerrado permanece constante, de forma que:

$$E_i = E_a + E_r + E_t \quad (\text{Ec.1.7})$$

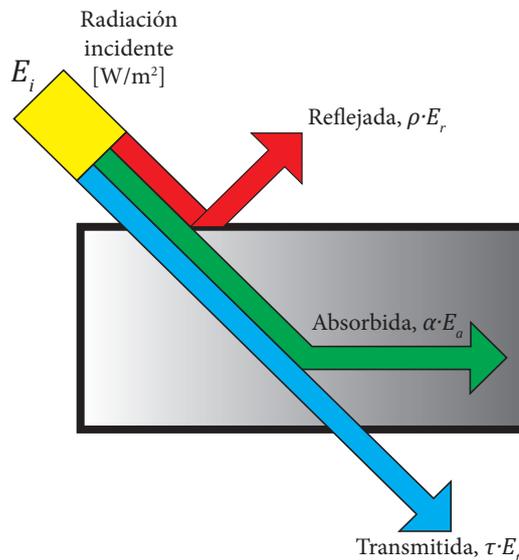


Figura 1.4. Radiación reflejada, transmitida y absorbida. Fuente: Elaboración propia.

Los términos de la ecuación se corresponden con:

E_a es la energía absorbida.

E_r es la energía reflejada.

E_t es la energía transmitida.

Si ahora dividimos la ecuación anterior por la energía incidente (E):

$$1 = \frac{E_a}{E_i} + \frac{E_r}{E_i} + \frac{E_t}{E_i} = \alpha + \rho + \tau \quad (\text{Ec.1.8})$$

Los términos del segundo miembro de la ecuación se corresponden con:

$\alpha = E_a/E_i$ = fracción de la radiación que es absorbida, poder absorbente o absorptividad.

$\rho = E_r/E_i$ = fracción de la radiación que se refleja, poder reflexivo o reflectividad.

$\tau = E_t/E_i$ = fracción de la radiación que se transmite, poder transmisivo o transmisividad.

Esta ecuación es una simplificación, ya que no considera la dependencia existente entre los coeficientes y la longitud de onda. Como casos límite tenemos los siguientes:

Si $\rho = \tau = 0$ entonces $\alpha = 1$ tenemos un cuerpo negro.

Si $\alpha=0=\rho$	entonces	$\tau=1$	tenemos un cuerpo transparente.
Si $\alpha=0=\tau$	entonces	$\rho=1$	tenemos un cuerpo blanco.
Si $\tau=0$	entonces	$\alpha+\rho=1$	tenemos un cuerpo opaco.

Por ejemplo, el vidrio, ciertos materiales plásticos y algunos minerales, así como los gases, tienen una transmisividad muy alta y consecuentemente, baja reflectividad y absorptividad. En el caso del aire (seco), las radiaciones térmicas lo atraviesan como si fuera el vacío, verificándose que $\tau=1$.

1.2.5. Intensidad de radiación

Los electrones, átomos y moléculas que constituyen la materia emiten continuamente radiación térmica si se encuentran por encima de la temperatura del cero absoluto, en virtud de su energía interna. Sabemos que un cuerpo negro emite uniformemente radiación desde toda su superficie en todas las direcciones del espacio. Por tanto, podría caracterizarse por su poder emisor (cantidad de energía radiante emitida por unidad de superficie y tiempo), ya que este sería el mismo en cualquier dirección del espacio. Sin embargo, los cuerpos reales emiten radiación de forma no uniforme, existiendo una variación direccional, que se define en términos de intensidad.

La intensidad de radiación total es una variable necesaria para el estudio de transferencia radiante. Es la relación entre la potencia radiada en una determinada dirección por unidad de superficie normal a dicha dirección y por unidad de ángulo sólido centrado en esa dirección, para todas las longitudes de onda (Howell et al., 2015).

El área proyectada es el área a través de la que pasa la energía y que se proyecta de forma ortogonal a la dirección de la radiación. El ángulo sólido elemental está centrado sobre la trayectoria que sigue la radiación y tiene su origen en dA , como se representa en la Figura 1.5:

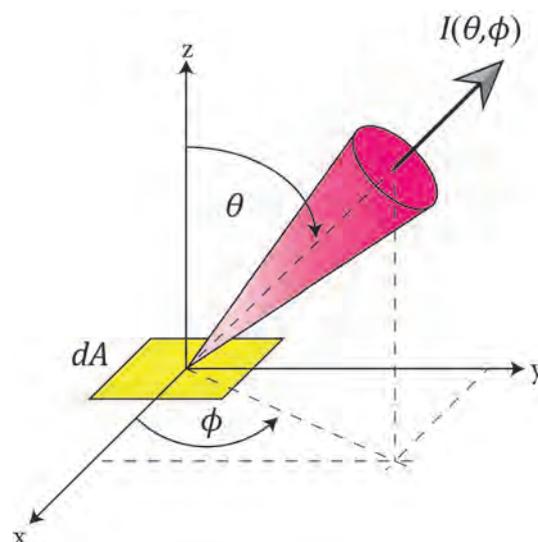


Figura 1.5. Ángulo sólido. Fuente: Elaboración propia.

$$I(\theta, \phi) = \frac{d\dot{Q}}{dA \cdot \cos\theta \cdot dw} = \frac{d\dot{Q}}{dA \cdot \cos\theta \cdot \sin\theta \cdot d\theta \cdot d\phi} \quad (W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}) \quad (\text{Ec.1.9})$$

El flujo de radiación de la radiación emitida es el poder emisor E , que es la velocidad a la que la radiación es emitida por unidad de superficie emisora:

$$dE = \frac{d\dot{Q}}{dA} = I(\theta, \phi) \cdot \cos\theta \cdot \sin\theta \cdot d\theta \cdot d\phi \quad (W \cdot m^{-2}) \quad (\text{Ec.1.10})$$

1.3. Factor de configuración

1.3.1. Historia

No es posible determinar con precisión cuando fue introducido el concepto de factor de configuración en el ámbito de la transferencia de calor radiante. En el libro (Howell et al., 2015), se hace una reseña histórica de los factores de configuración donde se pone de manifiesto que uno de los primeros cálculos del intercambio radiante entre superficies fue establecido por (Christiansen, 1883) mientras estudiaba la radiación entre dos cilindros concéntricos, obteniendo una expresión analítica donde no se hace mención al factor de configuración.

Más tarde, (Sumpner, 1892) discutió la validez de la ley de los cosenos de Lambert en relación a algunos experimentos en fotometría, en cuya disertación estuvo muy próximo a definir un factor de configuración, pero finalmente no lo hizo.

Posteriormente, (Hyde, 1907) revisó la teoría de la radiación, pero no separó los términos geométricos de las ecuaciones integrales ni definió el factor de configuración, a pesar de evaluar por ejemplo el intercambio radiante que tiene lugar entre una elipse y un elemento de área. (Saunders, 1928) profundizó en el trabajo de Christiansen y definió un factor que denotó como K , siendo la fracción de energía que saliendo de una superficie retorna a la misma por reflexión del resto de superficies y entonces es reabsorbida por la superficie. Aunque Saunder aplicó el citado factor a configuraciones geométricas sencillas entre dos cuerpos, no extendió su trabajo más allá. En la década de 1920 es cuando el concepto de factor de configuración aparece en numerosas referencias, concepto que definió (Nusselt, 1928) como factor de ángulo, tal y como lo conocemos hoy, en el trascurso de las investigaciones que dieron como fruto la técnica de la esfera unitaria. Otros trabajos como los realizados por (Yamauti, 1924; Buckley, 1927) hacen uso de la idea desarrollada por Nusselt.

El cálculo del campo radiante que genera una bola de fuego es de gran interés para la evaluación de la seguridad de las personas y las consecuencias que puede tener sobre su entorno. Los modelos geométricos que generalmente se desarrollan para el cálculo de la radiación emitida por una bola de fuego suelen estar constituidos por conjuntos de elementos de superficie definidos en un espacio tridimensional.

Cuando se modela la radiación emitida por bolas de fuego, ésta se representa típicamente como una simple figura geométrica, la esfera, que emite radiación desde su superficie hacia un receptor.

La radiación térmica recibida por una superficie a una determinada distancia puede estimarse mediante el modelo de llama sólida. Este modelo, desarrollado principalmente por Welker, Atallah y Raj (Icheme, 1992), considera al fuego como una llama sólida que irradia calor desde su superficie, siendo la metodología más comúnmente utilizada para modelar la radiación térmica en incendios (Johnson et al., 1994; Cracknell et al., 1994; Rew et al., 1997). Este modelo viene definido por la siguiente expresión:

$$I = E \cdot F \cdot \tau_A \quad (\text{Ec.1.11})$$

En esta ecuación:

I :	Intensidad de radiación térmica que llega al receptor.	(kW/m ²)
E :	Poder emisivo superficial de la bola de fuego, que depende de cada combustible.	(kW/m ²)
τ_A :	Transmisividad atmosférica, dependiente de las condiciones atmosféricas.	(-)
F :	El factor de configuración entre la bola de fuego y el receptor objetivo.	(-)

Para los dos primeros parámetros existen correlaciones y ecuaciones relativamente sencillas que permiten estimar sus valores con una determinada incertidumbre. La dependencia del transporte radiante entre dos superficies depende profundamente de la determinación de los factores de configuración, cuya evaluación es mucho más compleja. Cuando se tienen dos superficies, cada una emite energía radiante hacia los alrededores en proporción a su energía interna, y parte de ella es interceptada por la otra. La relación entre la energía interceptada por una superficie y la total emitida por la otra, es lo que se conoce como factor de configuración. Existen otras denominaciones similares como factor de vista, factor de visión, factor de forma o factor geométrico, aunque en esta tesis se adoptará el término factor de configuración.

Por definición, los factores de configuración dependen de la geometría y configuración entre las superficies (Mills, 1995) y de los ángulos, respecto de la normal de la superficie, con que son emitidas las radiaciones en cada punto. Estos ángulos se denominan ángulos de visión.

1.3.2. Formulación matemática

El factor de configuración entre dos elementos de superficie depende únicamente de la geometría de las mismas y de su orientación relativa en el espacio.

Existen varios factores de configuración dependiendo de la caracterización matemática de las superficies implicadas: superficies diferenciales, superficies finitas y superficies mixtas diferencial-finita. En esta tesis estamos interesados en el factor de configuración entre una bola de fuego (superficie finita) y un receptor diferencial. En la práctica del cálculo de consecuencias de bolas de fuego, se consideran receptores diferenciales a pequeños objetos, incluyendo el cuerpo humano (Mannan, 2005).

El objetivo es determinar la radiación que recibe un vulnerable, concretamente las personas. Para objetos mayores, como tanques de almacenamiento, se consideran superficies finitas.

El tratamiento matemático del factor de configuración es distinto en función de las superficies implicadas en la transferencia de energía (Tabla 1.1). En el *Anexo A* puede consultarse su deducción matemática.

Tabla 1.1. Expresiones matemáticas del factor de configuración. Fuente: Modest, 2013a.

TIPO DE SUPERFICIES	ECUACIÓN
ELEMENTOS DIFERENCIALES	$dF_{dA_1-dA_2} = \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi r^2} dA_2$ (Ec.1.12)
ELEMENTO DIFERENCIAL Y ELEMENTO FINITO	$F_{dA_1-A_2} = \int_{A_2} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi r^2} dA_2$ (Ec.1.13)
ELEMENTOS FINITOS	$F_{A_1-A_2} = \frac{1}{A_2} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi r^2} dA_1 dA_2$ (Ec.1.14)

En su cálculo, se lleva a cabo una importante simplificación, que es considerar que las superficies implicadas son negras. Es decir, no es necesario considerar la radiación reflejada y se considera que toda la radiación emitida es difusa (isotrópica, independiente de la dirección en que se emite). Este criterio se encuentra universalmente aceptado para el cálculo de factores de configuración (Modest, 2013a; Howell et al., 2015).

El factor geométrico de configuración entre dos superficies (finita y diferencial), negras, isotérmicas y difusas puede obtenerse a partir de balances de energía (Modest, 2013a; Howell et al., 2015) y viene dado por la Ec.1.13:

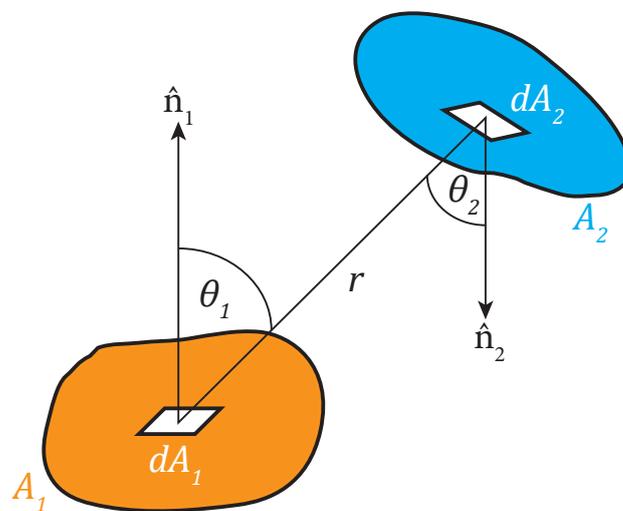


Figura 1.6. Factor de configuración entre dos superficies. Fuente: Elaboración propia.

Donde θ_1 y θ_2 son los ángulos de visión y r es la distancia entre las dos áreas, que se encuentran situadas en planos distintos (Figura 1.6). En su formulación matemática se dan por cumplidas las siguientes leyes de la óptica geométrica:

1. La ley de los cosenos formulada por Lambert. La radiación recibida por una superficie es máxima cuando el haz incide de forma perpendicular sobre ésta. Si existe oblicuidad, la radiación irá disminuyendo en función del coseno que forman emisor y receptor.
2. La ley del cuadrado inverso de la intensidad de radiación. Si la fuente y el receptor aumentan la distancia que existe entre ellos, el factor de configuración disminuye de forma proporcional con el cuadrado de su distancia y viceversa.

De forma rigurosa, la ecuación anterior es válida para los siguientes valores de los ángulos de visión:

$$F_{A_1-A_2} = \begin{cases} \iint \frac{1}{A_2} \left(\frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi r^2} \right) dA_1 dA_2, \forall \theta_1 \text{ y } \theta_2 \leq 90^\circ \\ 0, \forall \theta_1 \text{ o } \theta_2 > 90^\circ \end{cases} \quad (\text{Ec.1.15})$$

La expresión anterior nos indica que las caras de las superficies se ven si el ángulo de visión que forman las dos superficies es igual o inferior a 90° , no viéndose si cualquiera de ellas tiene un ángulo de visión superior a 90° (Figura 1.7).

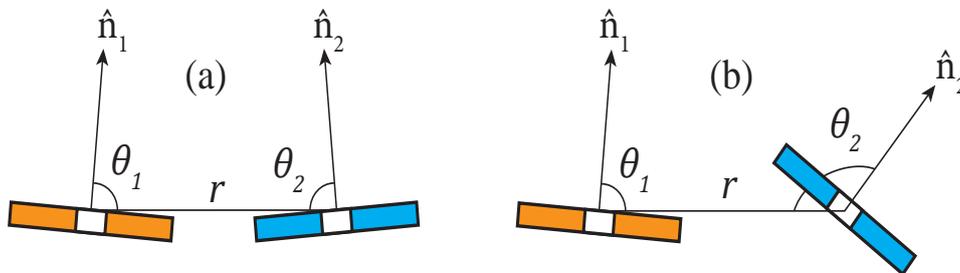


Figura 1.7. Orientación relativa entre superficies. a) $\theta_1, \theta_2 \leq 90^\circ$; $\theta_2 > 90^\circ$. Fuente: Elaboración propia.

Cabe destacar la ley de reciprocidad del factor de configuración, que viene establecida por la siguiente expresión, válida únicamente para intensidades de radiación constantes:

$$F_{A_1-A_2} \cdot A_1 = F_{A_2-A_1} \cdot A_2 \quad (\text{Ec.1.16})$$

De este modo, conociendo el factor de configuración de la superficie 1 sobre la superficie 2, entonces el factor de configuración de la superficie 2 sobre la superficie 1 puede determinarse mediante:

$$F_{A_2-A_1} = \frac{F_{A_1-A_2} \cdot A_1}{A_2} \quad (\text{Ec.1.17})$$

La novedad que incorpora esta tesis al cálculo de factores de configuración radica en el estudio de bolas de fuego con obstrucciones, es decir, debido a la interposición u obstrucción de la radiación por la introducción de una tercera superficie.

Esta particularidad, se denomina efecto sombra (“shadow effect”) y ha sido citado en la bibliografía para distintas aplicaciones, por ejemplo para estudiar la interferencia de barras de combustible en reactores nucleares (Bopche et al, 2010). La modelización matemática del efecto sombra se basa en determinar las líneas de unión que partiendo del emisor, “ven” al receptor e interceptan a la tercera superficie. En tales casos, el factor de configuración será cero, no contribuyendo a la integral de superficie.

1.4. Objetivos

El objetivo principal de esta tesis es la obtención de nuevos factores de configuración para el sistema constituido por una bola de fuego como fuente emisora de radiación y un receptor parcialmente bloqueado por una tercera superficie plana. Los resultados de esta tesis permitirán determinar de forma directa los factores de configuración del citado sistema en función de los parámetros geométricos que lo caracterizan, y gracias a ello estimar el intercambio radiante. Se consideran dos posiciones elementales para la bola de fuego, a ras de suelo y elevada sobre el terreno.

Para conseguir tales objetivos, el *Capítulo 1* contiene una introducción a las explosiones BLEVE, los efectos ocasionados por la radiación térmica, sus principios fundamentales y las ecuaciones que modelan su comportamiento, especialmente el factor de configuración entre superficies. De igual modo, se sientan las bases de las magnitudes y conceptos que serán utilizados en capítulos posteriores.

El *Capítulo 2* se dedica al estado del arte sobre factores de configuración de bolas de fuego. Se revisan los factores de configuración disponibles que más se aproximan al sistema objeto de estudio y se describen los principales métodos de cálculo existentes para resolver la integral de superficie.

En el *Capítulo 3* se describe el proceso de formación de una bola de fuego y los métodos clásicos utilizados para su modelización. Se define el nuevo modelo de bola de fuego con presencia de obstáculos y se establece el planteamiento geométrico del sistema.

La descripción general de las técnicas analíticas y numéricas utilizadas para la determinación del factor de configuración para algunos casos particulares se aborda en el *Capítulo 4*. Se incluye el marco teórico fundamental que sustenta el modelo matemático, los aspectos geométricos elementales y el método numérico seleccionado para calcular la solución de la integral doble. Se exponen los resultados para las distintas configuraciones consideradas, en formato gráfico y tabular. Se analiza el error cometido por el método y se discute su influencia y alcance sobre el factor de configuración calculado. También se determina el lugar geométrico de la bola de fuego totalmente oculta (visibilidad nula) y se desarrolla una aproximación a la solución numérica mediante un método semi-analítico.

En el *Capítulo 5* se desarrollan aplicaciones prácticas relacionadas con la modelización de la bola de fuego. Una de ellas es la revisión del modelo dinámico de la bola de fuego, considerando el efecto sombra. En este nuevo modelo, la presencia del muro determina la existencia de distintas regiones de visibilidad conforme la bola de fuego crece y se eleva. En esas regiones resulta fundamental la utilización de los resultados obtenidos en el *Capítulo 4*. Otra herramienta es la elaboración de curvas de vulnerabilidad de bolas de fuego con efecto sombra, para la determinación de zonas de planificación. A partir del lugar geométrico de visibilidad nula, se obtiene el factor geométrico del muro, lo que permite dimensionar barreras que ofrecen una protección total a la radiación térmica. Asimismo, se realizan propuestas de diseño de barreras físicas para la planificación del uso del suelo en el entorno de industrias químicas.

Por último, en el *Capítulo 6* se formulan las principales conclusiones de la tesis y se sugieren algunas líneas de investigación que permitan continuar el trabajo desarrollado. El resto de material recopilado se encuentra en los *Anexos*, e incluye contenidos de gran relevancia para la tesis que han sido desplazados a este apartado para una mayor claridad.

2 ANTECEDENTES

“El estudio profundo de la naturaleza es la fuente más fértil de descubrimientos matemáticos”

Joseph Fourier

2.1. Factores de configuración de bolas de fuego

En el análisis de consecuencias de fenómenos de tipo térmico, es preciso determinar los efectos que los incendios y las explosiones pueden inducir en sus alrededores. La intensidad de radiación emitida debe calcularse para estimar la vulnerabilidad de un receptor situado a una cierta distancia. El valor obtenido puede compararse con los umbrales y nos permite conocer el alcance de la exposición.

El método más extendido en la actualidad para su evaluación es el modelo de llama sólida. Este modelo postula que el flujo de calor recibido por la superficie receptora es función del factor de configuración, entre otras variables. Por tanto, es un parámetro imprescindible para poder estudiar los efectos de la radiación sobre un observador. Sin embargo, la evaluación del factor de configuración puede suponer en la mayoría de casos una etapa más compleja en si misma que el problema a resolver. Por ello, es frecuente recurrir a factores ya existentes y realizar distintas aproximaciones, antes que afrontar el cálculo del factor para la geometría de estudio. Sin duda, este aspecto tiene mucho que ver con la escasa literatura disponible para geometrías del factor de configuración en incendios en el ámbito de la industria de proceso, almacenamiento y transporte. A efectos de su tratamiento para el análisis del riesgo, en este apartado se abordarán únicamente fenómenos macroscópicos. Queda excluida, por tanto, la radiación térmica aplicada a los procesos de combustión y difusión en incendios. A continuación se expondrán las principales contribuciones en este campo. En primer lugar se repasan aquellos trabajos que se dedican directamente al cálculo de factores de configuración para geometrías involucradas en incendios.

(Mudan, 1987) aborda la necesidad de caracterizar la geometría de la llama en incendios para poder estimar su radiación térmica y propone expresiones analíticas para geometrías cilíndricas y rectangulares. Su enfoque se dirige a la estimación de los efectos de grandes incendios de charco (pool-fires) de hidrocarburos en plantas de almacenamiento y producción. Concretamente presenta 3 factores de configuración:

- Llama de base circular con geometría cilíndrica, inclinada sobre su eje vertical. Representa un incendio de charco en un dique circular, para un observador que puede estar situado a favor, en contra o transversalmente al viento.
- Llama de base rectangular con geometría inclinada, representando un incendio bidimensional con la doble posibilidad del observador situado a favor o en contra del viento.
- Llama de base rectangular con geometría inclinada, representando un incendio de charco, con el observador ubicado con el viento de costado.

Los factores derivados fueron comparados con los registrados experimentalmente con un cilindro de cobre a una temperatura uniforme de 1050K (1323°C), obteniéndose una buena correlación entre ambos. Para algunas configuraciones se aprovecharon de los trabajos realizados en la materia por (Hamilton et al., 1952; Rein et al., 1970; Sparrow et al., 1978). En las citadas geometrías, para el caso límite de inclinación nula, las expresiones obtenidas coinciden con las disponibles en la literatura.

El siguiente trabajo destacado es el realizado por (Davis et al., 1989). Su estudio surge de la necesidad de superar las deficiencias precedentes para la obtención del factor de configuración aplicado a incendios. Según Davis, la descripción de la llama, la posición del receptor y el enfoque computacional no eran adecuados. Mediante la utilización del método de la integral de contorno se obtienen algoritmos para receptores que son considerados, a efectos de cálculo, elementos diferenciales de superficie. Las geometrías descritas son llamas cilíndricas que se consideran inclinadas por el viento y llamas cónicas.

El método utilizado consiste en la aplicación del teorema de Stokes para convertir la integral de superficie en una integral de línea a lo largo de un contorno, que representa la superficie expuesta. Lo aplica a 4 geometrías, entre las que se encuentra un disco, un cilindro recto, un cilindro inclinado y un tronco de cono, obteniendo desviaciones de un 0,01%, respecto a las expresiones disponibles en el catálogo de Howell (Howell, 2010). Aunque no se explicitan expresiones para el cálculos de los factores de configuración, el artículo describe el método utilizado e incluye un anexo donde se especifica la obtención de los diferenciales de superficie y las ecuaciones de las curvas que definen los contornos. Posteriormente, (Davis et al., 1990), extiende su trabajo a superficies finitas, aplicando un método que se basa en la representación paramétrica de la superficie a considerar, lo que permite simplificar la integral en términos de un producto vectorial. Este enfoque lo aplica a cuatro superficies: un cilindro recto, un disco, una esfera y un plano.

El único trabajo encontrado en la literatura que guarda una relación directa con el objeto de esta tesis, sobre factores de configuración con presencia de obstáculos, es el desarrollado por (Papazoglou et al., 2003). Este autor proporciona un modelo para la estimación del calor radiante en el entorno de incendios de charco considerando la presencia de un muro barrera. El cálculo del efecto del muro se determina para un receptor diferencial y un incendio de charco de geometría cilíndrica.

Se consideran dos posiciones del cilindro, a ras de suelo y elevado. Este método hace uso del factor de configuración estimado por (Hamilton et al., 1952), que se corresponde con el factor B-31 del catálogo de Howell y de relaciones de conservación de la energía en lugar de cálculo numérico.

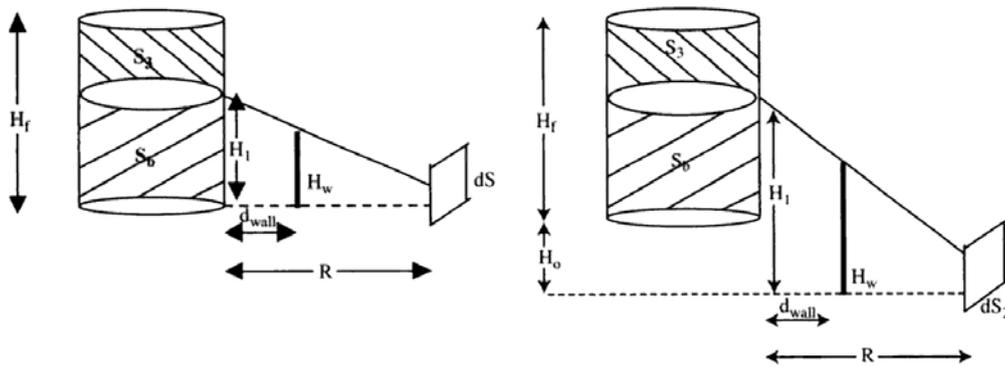


Figura 2.1. Geometría utilizada para el cálculo del factor de configuración. Fuente: Papazoglou et al., 2003.

En la Figura 2.1 se observa como el muro crea una sombra que afecta a la transmisión de calor entre la superficie del incendio de charco y la superficie diferencial. En este caso, el factor de configuración se calcula mediante la ecuación canónica 1.13, donde la superficie de la llama no es la correspondiente al cilindro completo, sino únicamente el área denominada S_3 . Por tanto, se calcula el factor correspondiente al cilindro completo y se le sustrae el factor correspondiente a la superficie S_b .

En su trabajo, (Papazoglou et al., 2003), utiliza este método para calcular el riesgo individual del incendio de charco con la presencia del muro mediante la función Probit propuesta por (Eisenberg et al., 1975). Implementa las etapas de cálculo en un programa informático, que consta del cálculo de la distancia entre el muro y la superficie del incendio, el cálculo de la altura sobre la superficie del cilindro que partiendo del receptor pasa por el muro, el cálculo del factor de configuración y del calor radiante, y por último, el riesgo individual. Se comparan las curvas de riesgo individual para el caso sin muro y con muro (Figura 2.2), constatando la gran reducción obtenida para muros de escasa altura y proponiendo su construcción en las inmediaciones de tanques de almacenamiento de sustancias inflamables con el fin de reducir la vulnerabilidad de las personas.

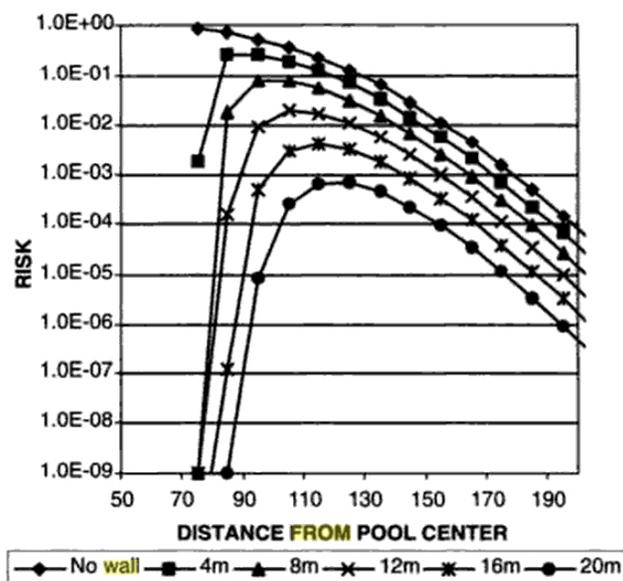


Figura 2.2. Curvas de riesgo individual para incendios de charco con y sin muro barrera. Fuente: Papazoglou et al., 2003.

Otros autores analizan el riesgo cuantitativo producido por la radiación térmica procedente de bolas de fuego (Prugh, 1994; Lees, 1996; Roberts et al., 2000; Casal, 2008; CCPS, 2010). Su planteamiento central no es el cálculo del factor de configuración, pero describen la metodología utilizada para estimarlo. Todos utilizan el modelo de llama sólida. (CCPS, 2010) considera el siguiente factor de configuración:

$$F = \frac{R^2}{X_0^2} \cos\theta \quad (\text{Ec.2.1})$$

En la Ec.2.1, R es el radio de la bola de fuego, X_0 es la distancia desde el centro de la bola de fuego y θ es el ángulo entre la normal a la superficie y el punto de conexión del receptor al centro de la esfera. Esta expresión se aplica a escenarios donde la bola de fuego se encuentra elevada una altura $H > R$ y la distancia se mide desde un punto a ras de suelo hasta el centro de la bola de fuego. Si esta distancia es superior al radio de la bola de fuego, el factor se calcula mediante:

- Superficie horizontal.

$$F = \frac{HR^2}{(X_0^2 + H^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (\text{Ec.2.2})$$

- Superficie vertical.

$$F = \frac{HX_0^2}{(X_0^2 + H^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (\text{Ec.2.3})$$

La representación de los parámetros X_0 , R y H puede observarse en la Figura 2.3:

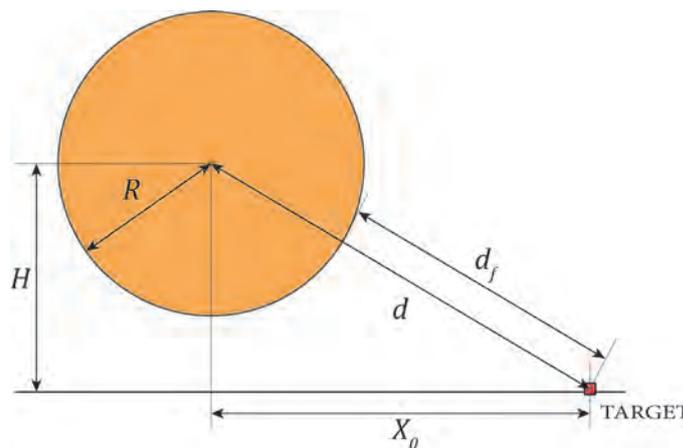


Figura 2.3. Orientación entre una bola de fuego y un receptor. Fuente: Elaboración propia.

Cuando el receptor se encuentra muy alejado de la bola de fuego, el factor de configuración puede aproximarse por la siguiente expresión:

$$F = \frac{X_0 R^2}{(X_0^2 + H^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{X_0 R^2}{(X_0^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{X_0 R^2}{(X_0)^{\frac{6}{2}}} = \frac{X_0 R^2}{X_0^3} = \frac{R^2}{X_0^2} \quad (\text{Ec.2.4})$$

En los casos donde el receptor se encuentra debajo de la bola de fuego, citan la existencia de expresiones tanto para orientación vertical como para inclinación arbitraria del mismo, que es la que ilustran en su libro (CCPS, 2010). Para la citada configuración, diferencian dos situaciones: que el receptor ve completamente a la bola de fuego y otra donde la ve parcialmente. Las expresiones que se proporcionan son:

$$F = \frac{R^2}{X_0^2} \cos\theta \quad ; \theta \leq \frac{\pi}{2} - \phi \quad (\text{Ec.2.5})$$

$$F = \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \arcsin\left(\frac{\sqrt{X_0^2 - R^2}}{X_0 \sin\theta}\right) + \frac{R^2}{\pi X_0^2} \arccos\left(-\frac{\sqrt{X_0^2 - R^2}}{R} \cos\theta\right) - \frac{1}{\pi X_0^2} \left(\sqrt{(X_0^2 - R^2)}(R^2 - X_0^2 \cos^2\theta)\right) \quad (\text{Ec.2.6})$$

$$\theta > \frac{\pi}{2} - \phi$$

En su Apéndice A recoge estas expresiones y varios esquemas gráficos para una sencilla interpretación. También incluye factores aplicables a llamas, que son asimiladas a cilindros. (SFPE, 2002) utiliza estas mismas expresiones para estimar la radiación térmica procedente de bolas de fuego de hidrocarburos.

(Crocker et al., 1988) ha proporcionado expresiones para el factor de configuración de una bola de fuego esférica a ras de suelo en tres casos, para un receptor vertical finito, un receptor horizontal diferencial y un receptor vertical diferencial. Las expresiones, que han sido obtenidas mediante el modelo de fuente puntual, son las siguientes:

$$F = \frac{R^2}{X_0^2} \quad (\text{Ec.2.7})$$

$$F_v = \frac{R^2}{X_0^2} \cos\theta \quad (\text{Ec.2.8})$$

$$F_h = \frac{R^2}{X_0^2} \sin\theta \quad (\text{Ec.2.9})$$

(Lees, 1996) considera como enfoque principal una bola de fuego situada a ras de suelo, diferenciando dos geometrías, hemisférica para el etapa de crecimiento-ascenso y esférica cuando se encuentra completamente desarrollada. Indica que se dispone de factores para receptores situados por debajo y por encima de la bola de fuego, referenciando los factores de CCPS descritos anteriormente.

(Casal, 2008) dedica un capítulo de libro a evaluar las consecuencias de una explosión tipo BLEVE, incluyendo radiación térmica, a la que aplican el modelo de llama sólida. En cuanto al factor de configuración, proporciona una expresión entre una esfera (bola de fuego) y una superficie plana (receptor) perpendicular a su radio:

$$F = \frac{D^2}{4d^2} \quad (\text{Ec.2.10})$$

La variable d es la distancia entre el receptor y el centro de la esfera, siendo D el diámetro de la bola de fuego. Se indica que para otras posiciones del receptor, el factor de configuración debe ser corregido mediante el ángulo formado entre la superficie y la superficie perpendicular al radio de la esfera. Este criterio es equivalente al utilizado en las Ec.2.8 y Ec.2.9. El mismo criterio es utilizado por (TNO, 2005).

(Abbasi et al., 2007) hace una exhaustiva revisión del mecanismo BLEVE, incluyendo sus causas, sus consecuencias y las estrategias preventivas. Hace un repaso a las expresiones analíticas y empíricas para el cálculo de consecuencias de una explosión BLEVE, incluyendo tres expresiones para el factor de configuración, que se corresponden con las propuestas por CCPS (Tabla 2.1):

Tabla 2.1. Factores de configuración propuestos para una bola de fuego. Fuente: Abbasi et al., 2007.

Referencia	Posición del objetivo	Ecuación	
CCPS, 2010	Horizontal	$\frac{HD^2}{4(X_0^2 + H^2)^{\frac{3}{2}}}$	Ec. 2.11
CCPS, 2010	Vertical	$\frac{HX_0^2}{4(X_0^2 + H^2)^{\frac{3}{2}}}$	Ec. 2.12
CCPS, 1999 Van den Bosch et al., 2005	Máximo valor del factor de configuración	$\frac{D^2}{4d^2}$	Ec. 2.13

Se concluye del anterior análisis que la mayoría de referencias científicas y normativas utilizan las mismas fuentes, principalmente los factores del catálogo de Howell (Howell, 2010) numerados como B-39 (Chung et al., 1972; Juul, 1979), B-43 (Cunningham, 1961; Hauptmann, 1968; Liebert et al., 1968; Naraghi, 1988) y B-44 (Juul, 1979; Chung et al., 1981; Naraghi, 1988). Todos ellos son factores entre una esfera finita y un elemento diferencial de superficie.

(Stepanov et al., 2011) hace una revisión de los procesos hidrodinámicos y radiantes que acompañan a las explosiones químicas y a las mezclas combustible-aire para hidrocarburos, planteando un modelo computacional para estimar la radiación térmica de una bola de fuego. En base a ello obtiene la distribución del flujo de calor para distintas orientaciones del receptor y posición de la bola de fuego (Figura 2.4 y Figura 2.5):

- Posición de la bola de fuego:
 - Bola de fuego elevada (elevated fireball).
 - Bola de fuego a ras de suelo (aboveground fireball).
- Posición del receptor:
 - Vertical.
 - Horizontal.

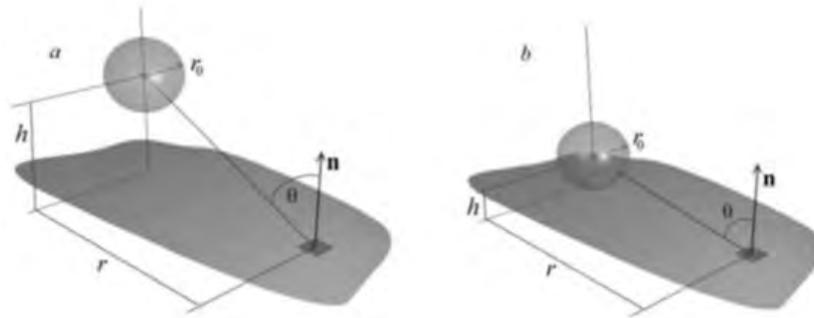


Figura 2.4. Esquema utilizado para el cálculo de una bola de fuego sobre un receptor horizontal. Fuente: Stepanov et al., 2011.

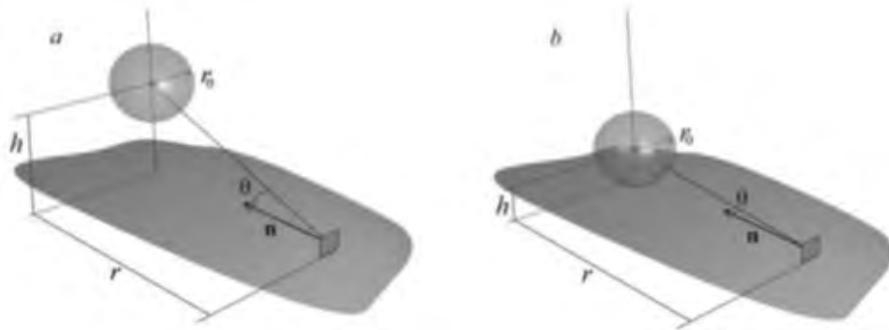


Figura 2.5. Esquema utilizado para el cálculo de una bola de fuego sobre un receptor vertical. Fuente: Stepanov et al., 2011.

Para ello, utilizan las ecuaciones B8-B9 y B11-B12 del *Anexo B*, que se corresponden con los factores B-43 y B-44 del catálogo de (Howell, 2010). El autor lleva a cabo una evaluación de la variación de los factores para distintos valores límite de los parámetros y se proporcionan los gráficos para cada caso.

Se ha constatado la existencia de factores de configuración para bolas de fuego en distintas posiciones. Sin embargo, no existen en la literatura, ecuaciones ni métodos desarrollados para la determinación del factor de configuración de bolas de fuego en presencia de obstáculos. A continuación se realizará un repaso de los métodos y técnicas disponibles para el cálculo del factor de configuración.

2.2. Métodos para la determinación del factor de configuración

Existen algunos textos (Modest, 2013a; Howell et al., 2015) donde se proponen distintas clasificaciones acerca de los métodos más extendidos para la determinación de factores de configuración. Todos ellos coinciden en diferenciar claramente los métodos analíticos de los métodos numéricos, y dentro de cada uno de ellos, subdividirlos en función del tipo de superficies implicadas.

Se hace evidente en la bibliografía una omisión casi generalizada respecto a los métodos experimentales para la obtención del factor de configuración.

A partir de los trabajos de Nusselt comenzó a utilizarse fundamentalmente el método analítico, ya que en aquella época no estaban desarrollados los métodos numéricos. En los casos de gran complejidad matemática, considerados irresolubles en aquel contexto, se idearon distintos sistemas experimentales que permitían determinar el factor de configuración con un cierto error. Algo similar sucede con los métodos gráficos, pero en este caso no han sido omitidos, sino clasificados inapropiadamente dentro de los métodos numéricos.

A continuación se realizará una breve descripción de los métodos más utilizados. Se detallan aquellos métodos que tienen más interés para el desarrollo de esta tesis, no siendo el objetivo realizar una revisión exhaustiva de todos los métodos de cálculo. También es importante destacar que en la evaluación del factor de configuración es frecuente la combinación de distintos métodos y técnicas para su resolución.

2.2.1. Métodos analíticos

Integración de superficie

Este método implica la resolución matemática de la ecuación canónica (Ec.1.13) por medio de una integración de área, la cual es equivalente a una integral doble. Así es posible obtener, en algunos casos, una ecuación algebraica para el factor de configuración, que puede resolverse numéricamente para determinados valores de sus parámetros.

Incluso para geometrías relativamente sencillas puede suponer un desafío importante, debido al tedioso cálculo integral. En general, el tratamiento que se suele dar al cálculo de factores de configuración en las asignaturas impartidas en las titulaciones de ingeniería (Transferencia de Calor) es muy primario, apoyándose con frecuencia en las soluciones existentes en los catálogos. Ello puede llevar a preconcebir que la determinación de los factores es relativamente sencilla, algo tremendamente alejado de la realidad.

Sin duda, uno de los grandes inconvenientes que se encuentran a la hora de resolver la ecuación por integración directa es la escasa bibliografía que presenta el proceso completo de integración. En nuestros días, la implementación generalizada de técnicas de cálculo numérico ha supuesto un abandono de las técnicas de integración directa, a las que se les presta menor atención en la bibliografía especializada. Es por ello que hay que remontarse a notas técnicas sobre factores de configuración en turbinas de gas (Hamilton et al., 1952) y reactores nucleares (Landoni, 1962) para encontrar desarrollos completos de la integral de área.

En textos como (Modest, 2013a; Howell et al., 2015) se ofrecen resúmenes de cálculo sobre ejemplos de aplicación, sin demasiado grado de detalle y prescindiendo de pasos intermedios.

Al respecto cabe destacar el libro publicado por (Cabeza-Lainez, 2009) donde se expone un análisis matemático exhaustivo acerca de elementos básicos, fuentes lineales y circulares, lo que constituye una excepción muy valiosa.

La evaluación analítica de la integración de área pasa forzosamente por las siguientes etapas:

- Determinar los diferenciales de área y los cosenos de los ángulos de visión en términos de las variables de integración.
- Determinar los límites de las integrales.
- Solución de la integral múltiple mediante las propiedades del cálculo integral.

Además de lo anterior, se ha observado la utilización recurrente de los siguientes recursos:

- Cambios de variable.
- Cambio de coordenadas.
- Geometría analítica en el espacio.
- Proyecciones de superficies en el plano.

Gran parte de los factores de configuración existentes en los catálogos (Howell, 2010) han sido obtenidos por medio de este método. A su favor tiene, como toda solución analítica, que se obtiene una expresión matemática que proporciona toda la información sobre el comportamiento del sistema, para cualquier valor de las variables y parámetros que intervienen en las ecuaciones.

Álgebra del factor de configuración

El álgebra del factor de configuración se basa en la utilización de las siguientes propiedades (Mahan, 2002):

- a) Conservación de la energía.

$$\sum_{j=1}^n F_{i,j} = 1 \quad ; \quad 1 \leq i \leq n \quad (\text{Ec.2.14})$$

- b) Relaciones de reciprocidad.

$$A_i F_{i,j} = A_j F_{j,i} \quad ; \quad 1 \leq i \leq n \quad (\text{Ec.2.15})$$

- c) Consolidación de superficies.

$$\left(\sum_{i=1}^m A_i \right) F_{(\sum A_i) \rightarrow A_j} = \sum_{i=1}^m A_i F_{A_i \rightarrow A_j} \quad ; \quad 1 \leq i \leq n \quad ; \quad 1 \leq i \leq n \quad (\text{Ec.2.16})$$

En las expresiones anteriores, aparece el siguiente término:

$$\sum_{i=1}^m A_i \quad (\text{Ec.2.17})$$

Se corresponde con el área de una superficie compuesta por m elementos de superficie contiguos.

d) Relaciones de simetría o geometría entre las superficies.

Por medio de las propiedades anteriores, es posible determinar el factor de configuración sin realizar ninguna integración, en base a relacionar los distintos factores que componen el sistema en cuestión con un factor de configuración conocido. La base para utilizar esta técnica estriba en identificar superficies solapadas o adyacentes que definan nuevos factores de configuración y que puedan ser definidas en términos de factores conocidos. En el texto de (Howell et al., 2015) puede encontrarse la aplicación del citado método a varios casos de estudio.

Integral de contorno

Aplicando dos veces el teorema de Stokes, la integral doble de superficie se convierte en una integral doble de línea (Figura 2.6), siendo matemáticamente equivalentes:

$$F_{A_1-A_2} = \frac{1}{2\pi A_1} \oint_{C_1} \oint_{C_2} \ln r \overrightarrow{dr_1} \overrightarrow{dr_2} = \frac{1}{2\pi A_1} \oint_{C_1} \oint_{C_2} (\ln r dx_1 dx_2 + \ln r dy_1 dy_2 + \ln r dz_1 dz_2) \quad (\text{Ec.2.18})$$

En esta ecuación:

C_1, C_2 :	contornos que delimitan las áreas de visión de las superficies A_1, A_2 .
dx, dy, dz :	elementos diferenciales de longitud
r :	distancia entre los contornos de las respectivas superficies.

Es evidente la ventaja que se obtiene al transformar una integral doble en una doble integral de línea, ya que la integración sobre cuatro variables se convierte en la integración sobre el contorno de dos superficies, facilitando en ocasiones su integración analítica. En el caso de elemento diferencial y elemento finito, supone una integración de línea sobre el contorno de una superficie. (Shapiro, 1985) analizó el coste computacional necesario para evaluar numéricamente la integral de contorno respecto a la integración de área. En su trabajo obtuvo que el método de integración de área tiene un orden de complejidad $O(n^4)$ y el de contorno $O(n^2)$, donde n es el número de nodos en que se divide el área y el contorno respectivamente. Además del menor tiempo de computación, concluyó que el resultado obtenido por medio de este método es más preciso. (Ambirajan et al., 1993) aplicó el método de contorno para evaluar factores de configuración en geometrías no cartesianas y obtuvieron valores muy precisos. (Erchiqui et al., 2007) también confirmó que el uso del teorema de Stokes mejora la precisión y reduce los tiempos de cálculo.

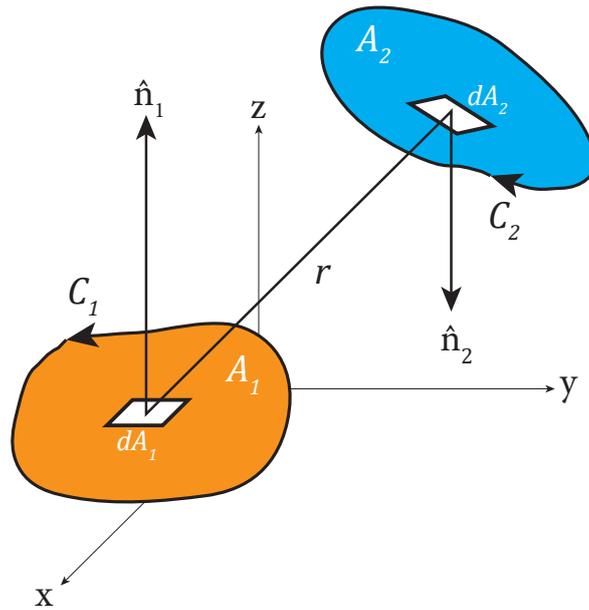


Figura 2.6. Integración sobre el contorno de una superficie. Fuente: Elaboración propia.

En la evaluación de la integral debe prestarse atención a aquellas partes de A_2 que son directamente visibles desde A_1 , o su diferencial dA_1 , tal y como indica (Sparrow, 1963) en su trabajo. Hay que tener en cuenta la variación de $\ln(r)$ con los intervalos diferenciales, ya que la función $\ln(r)$ varía fuertemente cuando los contornos se aproximan, siendo ∞ cuando entran en contacto.

Método de la esfera interna

Este método se aprovecha de las propiedades de la esfera y se aplica para cavidades en el interior de una esfera. La geometría que ilustra este método se encuentra en la Figura 2.7. Se trata de dos elementos que forman parte de la superficie de una misma esfera, cuya configuración tiene la particularidad de que los ángulos de visión son idénticos ($\theta_1 = \theta_2 = \theta$), y que además la línea de unión entre ambos elementos es $r = 2R \cos \theta$. Bajo tales condiciones se producen las siguientes simplificaciones:

$$F_{dA_1-A_2} = \int_{A_2} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi r^2} dA_2 = \int_{A_2} \frac{\cos^2 \theta}{\pi (2R \cos \theta)^2} dA_2 = \int_{A_2} \frac{\cos^2 \theta}{4\pi^2 R^2 \cos^2 \theta} dA_2 = \frac{1}{4\pi^2 R^2} \int_{A_2} \frac{\cos^2 \theta}{\cos^2 \theta} dA_2 = \frac{1}{4\pi^2 R^2} \int_{A_2} dA_2 = \frac{A_2}{4\pi^2 R^2} = \frac{A_2}{A_{ESFERA}} \quad (\text{Ec.2.19})$$

Este resultado pone de manifiesto que el factor no depende de la posición de dA_1 , por lo que en una esfera, debido a las singulares características de su geometría, el factor de configuración entre dos superficies depende únicamente del área de la superficie receptora, y no de su posición sobre la esfera. Esta peculiaridad puede ser aprovechada para determinar factores de configuración de superficies sobre la esfera, si bien no es necesario que toda su superficie pertenezca a la de la esfera.

Este método suele combinarse con el álgebra del factor de configuración, relaciones de reciprocidad y condiciones de simetría.

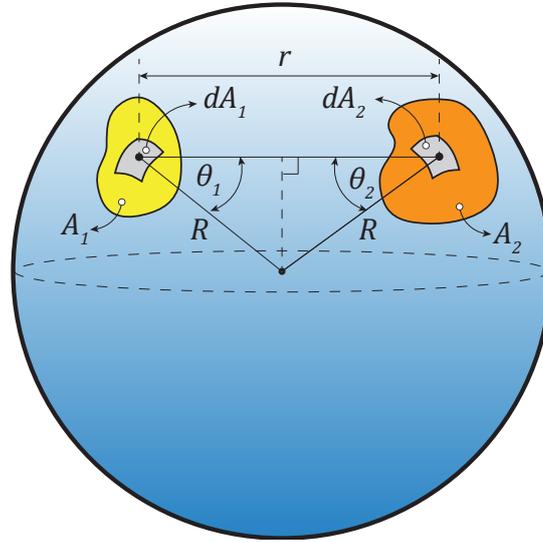


Figura 2.7. Método de la esfera interna. Fuente: Elaboración propia.

Método de la esfera unitaria

Este método fue concebido experimentalmente por (Nusselt, 1928) para resolver el factor de configuración entre un elemento diferencial y un elemento finito, introduciendo la geometría del ángulo sólido en proyección para simplificar el problema. Según (Cabeza-Lainez et al., 2009), hasta ese momento, los procedimientos que conducen a una expresión exacta de los trazados que representan la ley de proyección del ángulo sólido eran, a menudo, inexactos. En ocasiones al área de la proyección no podía ser determinada, debido a ciertas dificultades que surgían en el proceso de integración, obteniendo intersecciones que no podían ser expresadas analíticamente y, por tanto, las integrales correspondientes eran consideradas como irresolubles.

El método consiste en trazar una semiesfera de radio unidad sobre el elemento diferencial de área dA_1 . Entonces, el elemento de área A_2 se proyecta radialmente hacia dA_1 y seguidamente de forma ortogonal sobre la base de la semiesfera, según se muestra en la Figura 2.8. En base a dicha construcción geométrica, el factor de configuración entre dA_1 y una superficie cualesquiera A_2 puede expresarse como:

$$F_{dA_1-A_2} = \frac{1}{\pi} \int_{A_2} \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{r^2} dA_2 = \frac{1}{\pi} \int_{A_2} \cos\theta_1 d\omega_1 \quad (\text{Ec.2.20})$$

$d\omega_1$ es la proyección de dA_2 en la superficie de la semiesfera (s), ya que:

$$d\omega_1 = \frac{dA_s}{R^2} = \frac{dA_s}{1} = \frac{\cos\theta_2 dA_2}{r^2} \quad (\text{Ec.2.21})$$

Con lo que el factor de configuración se transforma en:

$$F_{dA_1-A_2} = \frac{1}{\pi} \int_{A_S} \cos\theta_1 dA_S \tag{Ec.2.22}$$

Se observa en la Figura 2.8 que $dA_S \cos\theta_1$ es la proyección ortogonal de dA_S sobre la base de la semiesfera. Por tanto:

$$F_{dA_1-A_2} = \frac{1}{\pi} \int_{A_2} \cos\theta_1 dA_S = \frac{A_P}{\pi} \tag{Ec.2.23}$$

Como indica (Cabeza-Lainez et al., 2009), la principal consecuencia que podemos extraer de este hecho es que el problema de obtener el valor del factor de configuración tendrá una única solución independientemente de la complejidad del cálculo, ya que el área de la proyección produce siempre un valor unívoco. Los factores pueden ser entendidos como proyecciones y consecuentemente poseen la propiedad aditiva. Esto es muy útil cuando disponemos de varias fuentes emisoras o cuerpos no lambertianos, ya que sus efectos pueden ser considerados por separado y luego sumarlos. Por tanto, la media de todas estas proporciones geométricas extendida a la superficie sobre la que calculamos nos dará el factor de configuración, el cual en algunos casos es muy difícil de obtener mediante métodos analíticos. No obstante, es interesante saber que es posible resolver uno de los problemas fundamentales de la transferencia radiante por medio de procedimientos puramente geométricos.

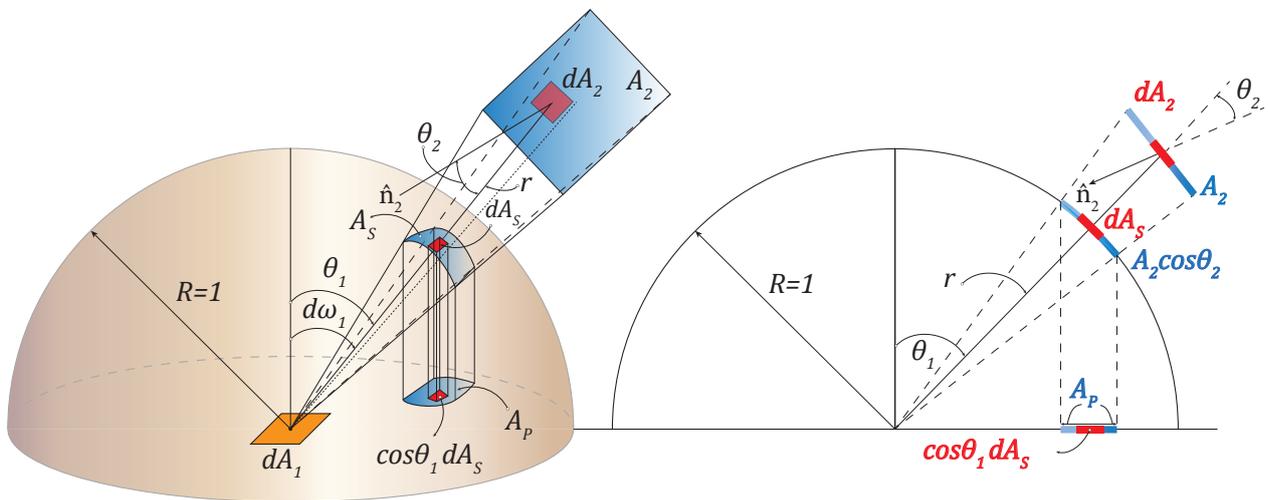


Figura 2.8. Analogía de Nusselt. Fuente: Elaboración propia.

La analogía de Nusselt ilustra el hecho de que elementos de superficie cuya proyección sobre la semiesfera es idéntica tienen el mismo factor de configuración, ya que tienen el mismo ángulo sólido, como puede apreciarse en la Figura 2.9.

Al realizar la proyección radial de la superficie, se transforma un problema tridimensional en uno bidimensional, ya que el ángulo sólido para cada proyección es único e invariable, sin perder la información esencial respecto a la contribución energética de cada superficie. Es evidente que el factor de configuración es proporcional al área de la proyección ortogonal a la base de la semiesfera. Por tanto será mayor cuanto más grado de paralelismo formen las dos superficies, lo que tiene lugar en un plano tangente a su cenit. Por el contrario, conforme las superficies adoptan orientaciones ortogonales la contribución es mínima, como puede apreciarse en la Figura 2.10:

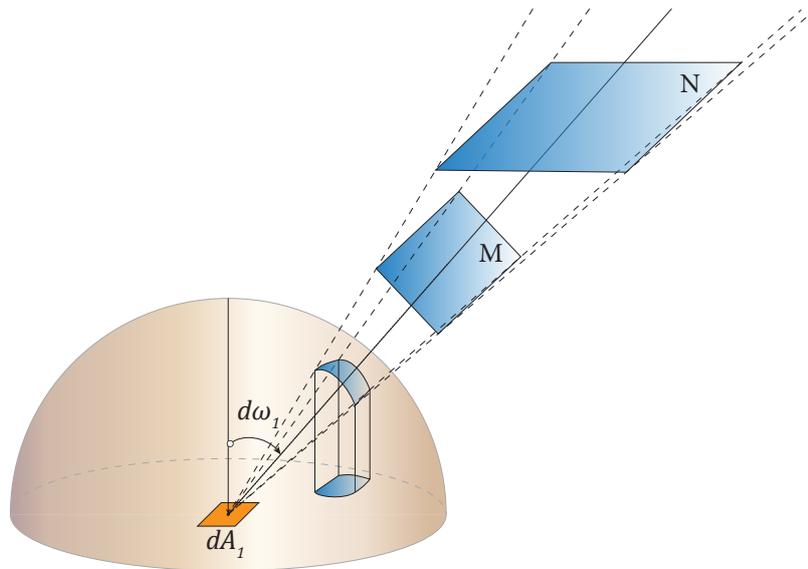


Figura 2.9. Elementos con idéntica proyección sobre la semiesfera poseen el mismo factor de configuración.

Fuente: Elaboración propia.

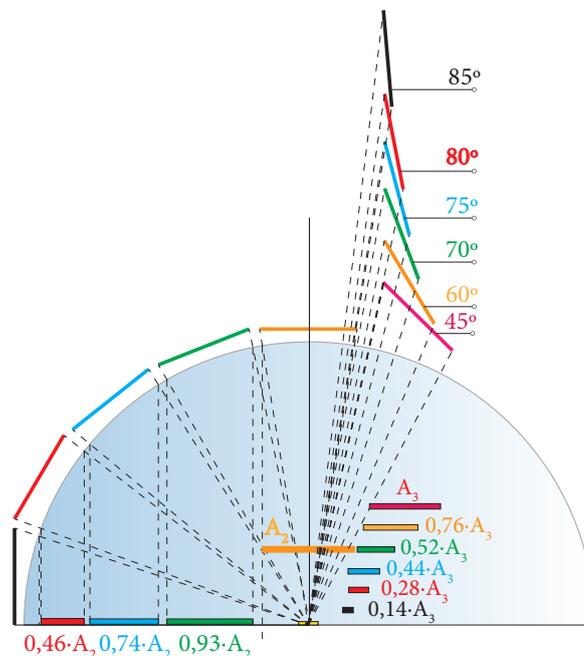


Figura 2.10. Influencia de la orientación geométrica sobre el factor de configuración. Fuente: Elaboración propia.

Este método sustenta gran parte de métodos gráficos y experimentales desarrollados posteriormente para la determinación del factor de configuración. Experimentalmente destacan el integrador mecánico diseñado por (Hottel, 1930) y posteriormente mejorado por (Cherry et al., 1939), el enlace mecánico de Hamilton (Hamilton et al., 1952), el método óptico de proyección de sombras de Eckert (Eckert et al., 1959) y el centelleador de Farrel (Farrel, 1976). Ello permitió el tratamiento de objetos de geometría compleja. En cuanto a métodos gráficos, (Hooper et al., 1952) fueron posiblemente los pioneros en presentar un procedimiento gráfico de utilidad. Se trata de utilizar métodos de geometría descriptiva proyectando varios puntos de la superficie A_2 sobre la semiesfera construida sobre el foco emisor de naturaleza infinitesimal. Los citados métodos son intuitivos y sencillos, pero requieren la preparación de los diseños, lo que consume mucho tiempo y dedicación para cada caso de estudio.

(Alciatore et al., 1988) presentó soluciones matemáticas equivalentes al método gráfico, permitiendo su tratamiento computacional. Basándose en el método de la semiesfera y utilizando conceptos de geometría analítica, obtuvo (Alciatore et al., 1989) ecuaciones analíticas explícitas para determinar el factor de configuración en tres dimensiones. En su artículo aplica el método a un tetraedro, siendo válido para el contorno cerrado de cualquier curva segmentada que pueda formar parte del perímetro de una superficie o el contorno exterior visible de un objeto tridimensional. La expresión que deduce, tras varias simplificaciones, es:

$$F_{dA-c} = \frac{1}{2\pi} \left| \sum_{i=1}^N \frac{P_i \times P_{i+1} \cdot z}{\|P_i \times P_{i+1}\|} \left[\arctan \left(\frac{P_{i+1} \times P_{i(i+1)}}{\|P_i \times P_{i+1}\|} \right) - \arcsin \left(\frac{P_i \times P_{i(i+1)}}{\|P_i\| \times \|P_{i(i+1)}\|} \right) \right] \right| \quad (\text{Ec.2.24})$$

P_i son las coordenadas de los vértices del contorno (x_i, y_i, z_i) y $P_{i(i+1)}$ son vectores definidos como diferencia entre los vértices adyacentes, $P_{i(i+1)} = (x_{i+1} - x_i, y_{i+1} - y_i, z_{i+1} - z_i)$. El resto de elementos de la ecuación son productos vectoriales, escalares y módulos tanto de puntos (vértices) como vectores. El valor absoluto en la expresión se emplea para permitir que la curva sea atravesada en una dirección positiva o negativa. En la Figura 2.11. se representa el planteamiento geométrico utilizado.

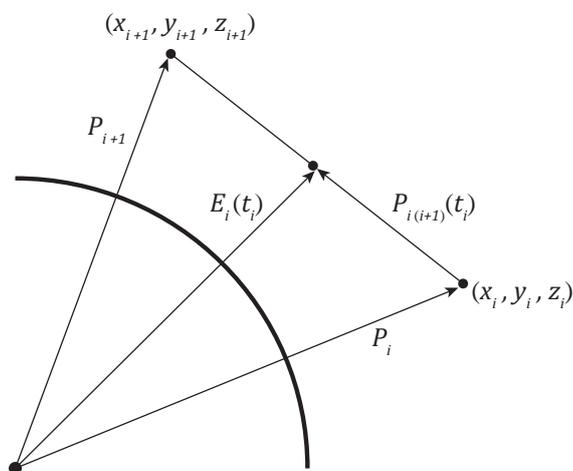


Figura 2.11. Vectores utilizados en la proyección. Fuente: Elaboración propia.

2.2.2. Métodos numéricos

Método de integración de superficie

Este método consiste en una división de la superficie en pequeñas superficies llamadas elementos finitos. (Chung et al., 1982) propuso un método que conserva el formalismo de los elementos finitos. Describe las coordenadas de las superficies en un sistema local, calculando entonces los factores de configuración por el método de cuadratura de Gauss, mediante la siguiente expresión:

$$F_{1-2} = \frac{1}{\pi A_1} \sum_i \sum_j w_i w_j f(\xi_i, \eta_j) \quad (\text{Ec.2.25})$$

En esta ecuación:

ξ_i, η_j son los puntos de integración de Gauss.

w_i, w_j son los coeficientes (pesos) de integración de Gauss.

$f(\xi_i, \eta_j)$ es la función a integrar.

(Krishnaprakas, 1998) estudió las potencialidades de este método para el cálculo de factores de configuración en geometrías complejas, proponiendo su resolución mediante la descomposición en triángulos elementales, obteniendo la siguiente expresión:

$$F_{1-2} = \frac{1}{A_i} \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^N A_{ik} F_{ikjl} \quad (\text{Ec.2.26})$$

En esta ecuación se definen:

F_{ikjl} es el factor de configuración entre el triángulo k en la superficie i y el triángulo l en la superficie j .

M, N : número de triángulos en las superficies i, j respectivamente.

En general, para obtener más precisión se requiere más mallado, mientras que más mallado implica mayor tiempo de cálculo. La ecuación canónica puede reescribirse en forma de una doble suma transformando los cosenos directores en función de operaciones vectoriales, obteniendo:

$$F_{1-2} \approx \frac{-1}{\pi A_i} \sum_i \sum_j \left(\frac{(\vec{r} \cdot \vec{n}_1)(\vec{r} \cdot \vec{n}_2)}{(\vec{r} \cdot \vec{r})^2} \right) \quad (\text{Ec.2.27})$$

$$\vec{r} \cdot \vec{n}_1 = r \cdot \cos \theta_1$$

$$-\vec{r} \cdot \vec{n}_2 = r \cdot \cos \theta_2 \quad (\text{Ec.2.28})$$

El signo negativo se debe a que r se extiende desde la superficie de A_1 a la superficie A_2 , como puede apreciarse en la Figura 2.12:

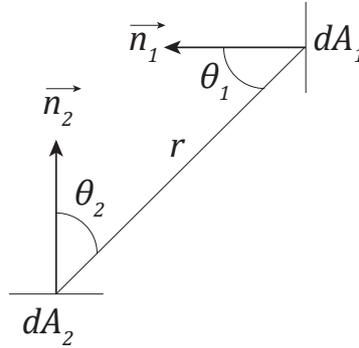


Figura 2.12. Orientación espacial entre los elementos de superficie. Fuente: Elaboración propia.

(Augusto et al., 2007) presenta un método computacional para la determinación de factores de configuración entre dos superficies considerando geometrías complejas con huecos y obstrucciones. El ámbito de aplicación del trabajo es la simulación en edificación y se encuentra limitado a superficies planas bidimensionales. Utiliza el algoritmo de triangulación de Delaunay y un mallado basado en el algoritmo de refinamiento Rupert-Delaunay; que controla el tamaño de los triángulos evitando la generación indeseada de triángulos de ángulo reducido. Obtiene resultados muy precisos, con errores del 0,06 %.

El método numérico adoptado genera un mallado triangular en ambas superficies para distinguir las zonas visibles y ocultas, con la siguiente aproximación:

$$F_{i-j} = \frac{1}{A_i} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{\pi r^2} dA_i dA_j \quad (\text{Ec.2.29})$$

Los elementos diferenciales de área son evaluados para cada triángulo.

Método de integración de contorno

(Rammohan, 1996) planteó un método numérico para implementar el método de integración de Gauss en la resolución de la Ec.2.18, a partir de la siguiente expresión:

$$F_{i-j} = \frac{1}{2\pi A_i} \left(\sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} (a_{x1,i} \cdot a_{x2,j} + a_{y1,i} \cdot a_{y2,j} + a_{z1,i} \cdot a_{z2,j}) \left(\sum_{k=1}^p \sum_{l=1}^q w^k w^l \ln(d(\xi, \eta)) \right) \right) \quad (\text{Ec.2.30})$$

Los coeficientes a_{1i} y a_{2j} representan transformaciones de coordenadas espaciales en los puntos de contorno de las superficies (A_i, A_j) a las coordenadas locales de Gauss, y los coeficientes w^k y w^l representan los coeficientes gaussianos entre p y q , que son respectivamente el número de puntos de Gauss utilizados para cada una de las superficies A_i y A_j .

Técnicas de Integración Gaussiana

Distintas técnicas de integración numérica se han utilizado para resolver la ecuación integral (Ec.1.13). Sin embargo, el método más extendido es la integración por cuadratura de Gauss. (Rammohan et al., 1996) aplicó la regla del trapecio, el método de Simpson y la integración Gaussiana a la integral de contorno (Ec.2.18). De los anteriores, se demostró que el método de Gauss, para igual número de puntos de evaluación y superficies con contornos rectos, es el más preciso y requiere menor un tiempo de computación. En el caso de que los contornos sean curvos, se requiere un mayor tiempo de cálculo.

(Mazumder et al., 2012) determinó los factores de configuración entre dos polígonos planos orientados arbitrariamente mediante dos métodos: Monte Carlo y cuadratura Gauss-Legendre (10 y 20 puntos), obteniendo resultados muy similares, aunque resultó más preciso el esquema de integración Gaussiano. (Erchiqui et al., 2009) también aplicó la integración Gaussiana a superficies con contornos rectilíneos, en comparación con otros métodos como la doble integración de área y la integral de contorno.

La cuadratura de Gauss establece que la integral definida de una función puede aproximarse como suma ponderada de los valores de la función en determinados puntos dentro del dominio de integración.

$$Int = \int_x f(x)dx = \sum_{k=1}^n w_k f(x_k) \quad (\text{Ec.2.31})$$

w_k son los coeficientes o pesos y $f(x_k)$ son las $n+1$ evaluaciones de la función $f(x)$. La función $f(x)$ debe ser suave, de modo que las singularidades se concentren en los pesos. Los puntos y coeficientes de la cuadratura de Gauss se encuentran tabulados dependiendo del intervalo de integración, siendo la más extendida para el cálculo de factores de configuración la de Gauss-Legendre. Un punto de cuadratura aplicado a la ecuación canónica (Ec.1.13) está definido por un espacio de 4 dimensiones ($R^2 \times R^2$), es decir, representa la selección de un par de puntos 2D (x, x') situados en los elementos (i, j) en los que debe evaluarse el integrando.

En la evaluación de integrales múltiples de dimensión dos e incluso tres se utilizan métodos clásicos como la regla del trapecio, Simpson, integración de Romberg, cuadratura Gaussiana, etc. Se ha demostrado que para resolver integrales múltiples de dimensiones superior a tres, los métodos tradicionales se vuelven menos competitivos debido a la gran cantidad de cálculos a efectuar. En tales casos, los métodos probabilísticos como el de Monte Carlo requieren menos tiempo de cálculo y una precisión superior. La ecuación integral del factor de configuración para superficies finitas tiene dimensión 4, aunque puede ser reducida a dimensión 2 por aplicación del teorema de Stokes, o dimensión 1 en caso de superficie finita y receptor diferencial.

Hemicubo

(Cohen et al., 1985) publicó un método numérico para determinar factores de configuración, denominado hemicubo, que básicamente es una adaptación del método de la semiesfera de Nusselt.

Es decir, se realiza la proyección de la superficie pero en vez de hacerla sobre una semiesfera se realiza sobre un hemicubo, que es más sencilla de evaluar numéricamente. Así, la semiesfera es reemplazada para las 5 caras del cubo (superior y laterales). Sobre un diferencial de área, se construye un hemicubo (medio cubo), cuyas caras son subdivididas en pequeñas celdillas o cuadrículas.

El algoritmo comienza con la discretización de N celdillas que definen una dirección y un ángulo sólido (Figura 2.13). El factor de configuración entre un elemento diferencial de área y una superficie finita es conocido, de modo que se computa para cada celdilla. Para ello, se considera un hemicubo de altura la unidad y una base de 2 unidades.

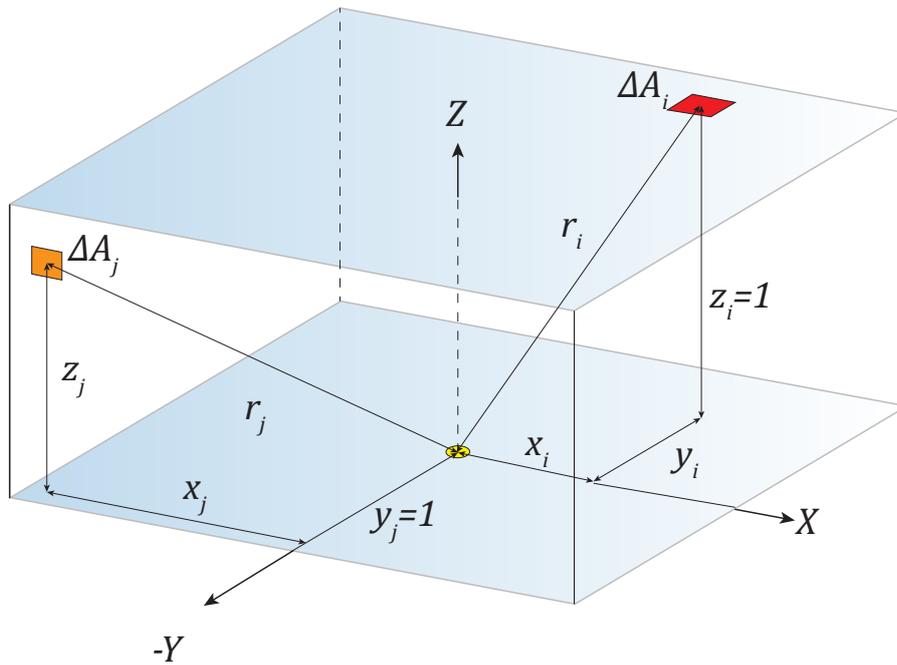


Figura 2.13. Discretización del método del hemicubo. Fuente: Elaboración propia.

Los factores de configuración se determinan entonces por medio de la siguiente expresión, aplicando Pitágoras:

$$\Delta F_{dA_i} = \frac{1}{\pi r_i^2} \Delta A_i = \frac{1}{\pi(1+x_i^2+y_i^2)} \Delta A_i \quad (\text{Ec.2.32})$$

$$\Delta F_{dA_j} = \frac{z_j}{\pi r_j^2} \Delta A_j = \frac{z_j}{\pi(1+x_j^2+z_j^2)} \Delta A_j \quad (\text{Ec.2.33})$$

Donde ΔA es el área de cada celdilla.

Cada cara del hemicubo define una proyección en perspectiva, de modo que el factor de configuración se aproxima proyectando el elemento sobre las caras del hemicubo y sumando los factores de configuración de las celdillas cubiertas por la proyección (Figura 2.14).

Si la distancia del elemento a través de cada celdilla es menor que el anterior valor almacenado, esa distancia es grabada e identificada, así como el identificador del elemento. Es decir, cuando sobre un mismo pixel se proyectan varios elementos de superficie, se descarta el elemento más lejano, ya que no puede ser visto por el receptor. Ello requiere capacidad de almacenamiento (buffer). Cuando se han procesado todos los elementos de superficie, cada celdilla tendrá asociado un identificador con el elemento más próximo y con un valor para el factor de configuración.

Entonces el factor de configuración de un elemento de superficie se determina a partir de las contribuciones de los factores de configuración de cada celdilla sobre el que se proyecta:

$$F_{i-j} = \sum_{w \in j} \Delta F_w \quad (\text{Ec.2.34})$$

Donde w representa las celdillas que son cubiertas por la proyección del elemento j .

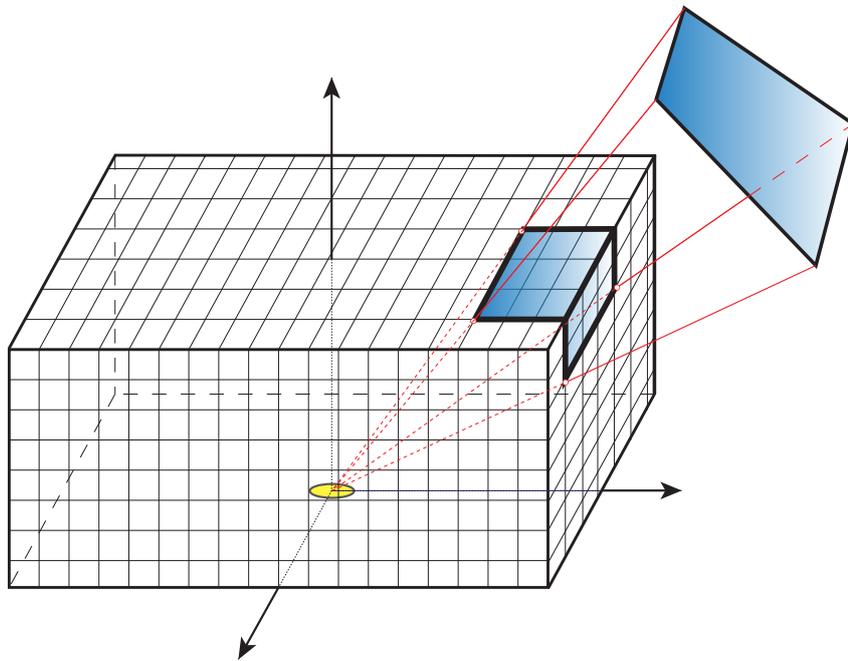


Figura 2.14. Obtención del factor de configuración con el método del hemicubo. Fuente: Elaboración propia.

Este método requiere un tamaño de celda pequeño para conseguir resultados precisos, si bien no es un problema actualmente con la capacidad de los procesadores existentes. Es un algoritmo muy extendido y ampliamente utilizado en el cálculo de la radiación en computación y sistemas gráficos. Para poder llevar a cabo la proyección de los elementos de superficie sobre el hemicubo se requiere seguir el siguiente proceso computacional: test de visibilidad, transformación de vista y selección, proyección en perspectiva y conversión del muestreo. Pueden encontrarse más detalles en (Chalmers et al., 1994).

El algoritmo del hemicubo se basa en distintas aproximaciones que en caso de ser violadas producen resultados inexactos del factor de configuración:

- 1) Proximidad. Se considera que la distancia entre las superficies implicadas es grande comparada con el diámetro efectivo de las superficies (Figura 2.15). Este efecto tiene lugar si las superficies se encuentran muy próximas comparadas con su diámetro efectivo o son adyacentes. En esos casos la distancia entre los centroides de una superficie respecto a todos los puntos de la superficie receptora varía en gran medida. La dependencia del factor de configuración con la distancia no es lineal, lo que produce pobres resultados en su aproximación. En tales casos, (Baum, 1989) propone un esquema híbrido que combina el método del hemicubo con un método analítico cuando la condición de proximidad es violada.

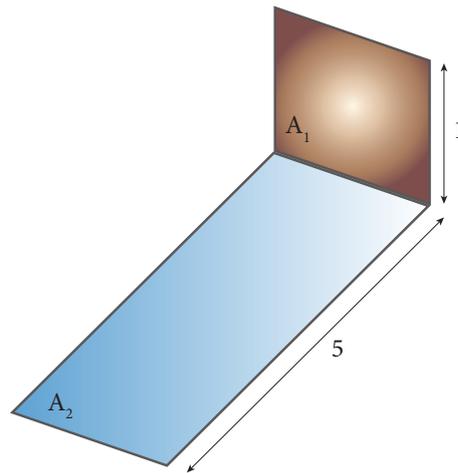


Figura 2.15. Error de proximidad en el método del hemicubo. Fuente: Elaboración propia.

- 2) Visibilidad. Se considera que existe visibilidad entre las dos superficies. En aquellos casos donde no se cumple esta condición, suele utilizarse un factor de visibilidad que se evalúa desde el centroide de las superficies. Esto hace que en determinados casos, desde el centroide exista visibilidad completa de la otra superficie, pero no así en otros puntos sobre la superficie, desde donde puede no haber visibilidad (Figura 2.16). Como la función de visibilidad es una función discontinua (adopta el valor unidad cuando existe visibilidad y es nula cuando las superficies no se ven) se produce una sobreestimación del factor de configuración, ya que hay poca sensibilidad para detectar el bloqueo por parte de otra superficie. Una forma de evitar este problema pasa por discretizar la superficie en subelementos más pequeños para mejorar la precisión.

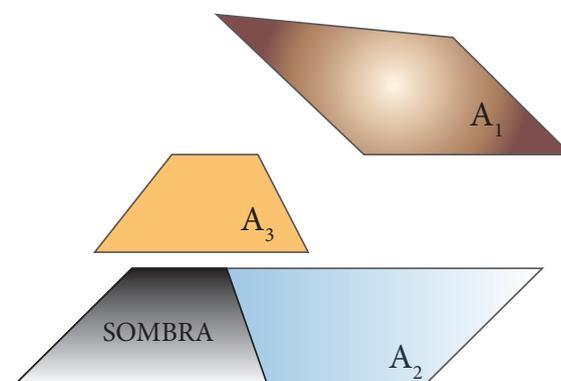


Figura 2.16. Error de visibilidad en el método del hemicubo. Fuente: Elaboración propia.

- 3) La verdadera proyección de cada superficie en el hemicubo puede ser aproximada de forma precisa utilizando un hemicubo de resolución finita. Como el hemicubo tiene una resolución finita (tamaño de celdillas), no siempre la proyección de superficies ocupa un número exacto de celdillas, lo que puede llevar a sobrestimar o subestimar el factor de configuración (Figura 2.17). Por ejemplo pueden existir elementos de dimensión inferior a las celdillas que puedan no ser registrados, a pesar de emitir energía. La forma de solucionar este problema es aumentar la resolución del hemicubo o filtrar los resultados.

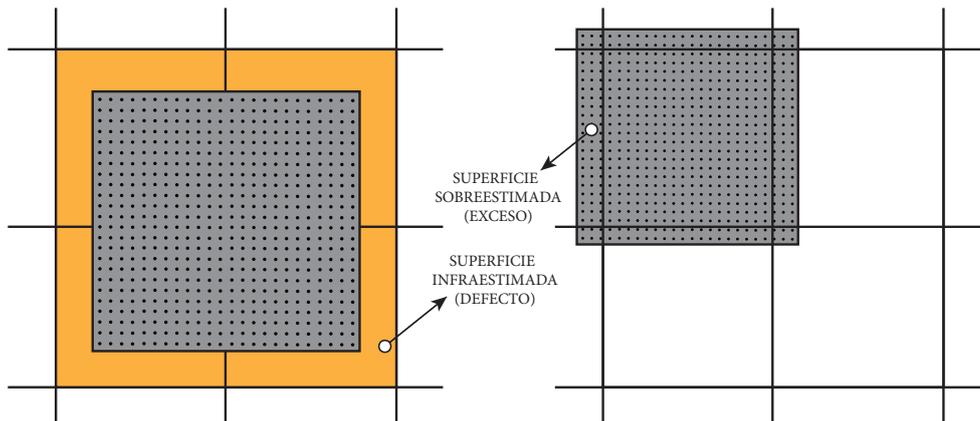


Figura 2.17. Error de "aliasing" en el método del hemicubo. Fuente: Elaboración propia.

Autores como (Baum, 1989) han investigado sobre la imprecisión del método y (Max, 1995) presenta variaciones del método, habiendo obtenido el tamaño óptimo de celdilla para minimizar el error. Por su parte, (Sillion, 1989) desarrolló un algoritmo para corregir la escasa flexibilidad del método del hemicubo y evitar los problemas de muestreo. Por último, se destaca que mediante el método del hemicubo es posible considerar la presencia de obstáculos, proyectando también las superficies que interfieren.

Superplano

El algoritmo del superplano (Zhou et al., 1992) sustituye el hemicubo por dos planos buffer separados denominados: buffer de factores de configuración y buffer de sombra. El buffer de factores sirve para aproximar la integral del factor de configuración por la suma de los factores elementales definidos sobre cada píxel, mientras que el buffer de sombra guarda la visibilidad desde el elemento receptor actual. Este método consigue reducir el problema del aliasing.

Monte Carlo

En general, se designa como Monte Carlo a un amplio conjunto de métodos numéricos basados en propiedades estadísticas (distribuciones de probabilidad) de las variables de procesos físicos, utilizando secuencias de números aleatorios. Matemáticamente es un proceso estocástico numérico, que se caracteriza por una secuencia de estados cuya evolución está determinada por sucesos aleatorios. Existen muchos problemas matemáticos que son resolubles mediante métodos estadísticos, a través de técnicas de muestreo, debido precisamente a que a veces resulta poco práctico examinar todos los casos posibles. Un muestreo aleatorio puede revelar un comportamiento típico.

El método de Monte Carlo permite realizar simulaciones de procesos físicos muy complejos de manera eficiente, siendo especialmente útil en radiación térmica, ya que la naturaleza no lineal y la complejidad geométrica hacen ineficaces la mayor parte de métodos determinísticos. En radiación, la energía se transporta mediante fotones a través de distancias a lo largo de una trayectoria, antes de interactuar con la materia. Así, la aplicación del Método de Monte Carlo a problemas en radiación térmica implica rastrear la historia de las trayectorias de una muestra estadísticamente significativa de fotones desde los puntos de emisión hasta los puntos de absorción. Su aplicación en radiación térmica fue introducida por (Fleck, 1961) y posteriormente por (Howell et al., 1964). En (Howell, 1998) se hace un repaso del método de Monte Carlo aplicada a la Transferencia de Calor por Radiación, con las principales contribuciones bibliográficas hasta el momento. En ella se presenta un ejemplo aplicado al cálculo de factores de configuración para el que se conoce la solución analítica.

También destaca el trabajo de (Weiner et al., 1965), que discute como puede utilizarse el método para determinar factores de configuración y el error estadístico que conlleva. (Yarbrough et al., 1986) presentó una revisión del uso del método de Monte Carlo para evaluar factores de configuración, comparando los resultados con los valores analíticos para algunas geometrías y (Bushinskii, 1976) presentó factores de configuración para geometrías bidimensionales simples y comparó los resultados con los valores analíticos.

Por otro lado, se proponen varios métodos para ajustar las fluctuaciones estadísticas que conlleva la utilización del método. (Vercammen et al, 1980) aplicó el método de Monte Carlo para calcular factores de configuración para su aplicación en hornos, así como un algoritmo para ajustar las variaciones estadísticas en el factor calculado. (Edwards, 1985) utilizó el método para evaluar factores de configuración entre elementos de superficie y volumen. (Yang et al., 1995) realizó una profunda descripción del método de distribución de la absorción de energía radiante (denominado READ), que utilizaba el método de Monte Carlo para computar factores de configuración que después introduce en la matriz de energía para determinar la transferencia por radiación en geometrías bidimensionales y tridimensionales. De un modo similar, (Maruyama et al., 1996) utiliza en su análisis un método basado en la emisión de rayos desde elementos de superficie y volumen para determinar factores que describen el intercambio radiante, que es posteriormente calculado, concretamente para geometría toroidal.

De especial interés es el artículo publicado por (Hoff et al., 1989), donde se realiza una exhaustiva descripción del procedimiento para determinar factores de configuración mediante el método de Monte Carlo. Como se ha comentado anteriormente, en radiación térmica, el método de Monte Carlo genera de forma aleatoria valores para todas las variables que afectan a la emisión y reflexión de radiación difusa. Esos valores se emplean para simular la distribución teórica de la radiación emitida, de modo que la distribución de energía resultante se utiliza para la estimación del factor de configuración de una superficie respecto a la otra. Las principales variables que caracterizan a la distribución de la emisión de radiación térmica es el ángulo que forma el ángulo de visión con la dirección de la trayectoria del fotón emitido (rayo), ya que la longitud de onda se considera constante para cuerpos grises difusos y el ángulo azimutal es independiente de la radiación emitida.

El primer paso consiste en determinar la distribución de energía emitida y reflejada en función del citado ángulo. Los números aleatorios seleccionados para el ángulo deben satisfacer la función de densidad de probabilidad, de modo que se obtiene un valor del ángulo en función del número aleatorio. Entonces se seleccionan dos números aleatorios para calcular los citados ángulos. En cálculo computacional, las secuencias de números aleatorios son, de forma rigurosa, pseudo-aleatorios, ya que son generados mediante un algoritmo que garantiza que la secuencia sea lo suficientemente impredecible y que no se repitan sus ciclos. Los algoritmos para la generación de números aleatorios utilizan una semilla (número inicial) como punto de partida para la generación de la correspondiente secuencia. La secuencia de números aleatorios suele estar constituida de acuerdo a una distribución uniforme dentro del intervalo (0,1).

Hoy en día, las principales herramientas y bibliotecas matemáticas de cálculo computacional disponen de algoritmos que permiten la generación de secuencias de números aleatorios uniformemente distribuidos en el intervalo (0,1).

Una vez que se calculan los números aleatorios, se pueden calcular los ángulos y a partir de ellos se determina una dirección de emisión para un fotón (rayo) hacia una superficie de incidencia. El procedimiento consiste en trazar rayos desde la superficie de origen a las superficies de intersección (Figura 2.18). Aquellas superficies que son intersecadas son almacenadas y la superficie correspondiente a la menor longitud del rayo es designada como la superficie de incidencia para ese rayo. Las ecuaciones que gobiernan la trayectoria de los rayos son expresiones matemáticas que definen la configuración geométrica de las superficies, y que en el artículo de (Hoff et al., 1989) se encuentran disponibles para plano, cilindro y esfera. Seguidamente es necesario establecer los criterios de intersección, que permitirán establecer los rayos que inciden sobre la superficie de destino.

Como el factor de configuración se define como la fracción de energía radiante que saliendo de una superficie incide sobre la otra, puede calcularse como:

$$F_{i-2} = \frac{\text{Rayos incidentes sobre } 2}{\text{Total rayos emitidos desde } i} \quad (\text{Ec.2.35})$$

Por ejemplo, dados dos elementos de superficie i, j entre los que se quiere calcular el factor de configuración, F_{ij} , se toman al azar n pares de puntos $x_i(k), x_j(k)$. Entonces puede calcularse el factor de configuración mediante la siguiente expresión:

$$F_{ij} = A_j \sum_{k=1}^n \frac{\cos\theta_{xi}(k) \cos\theta_{xj}(k)}{\pi r^2 + \frac{A_j}{n}} ; \left\langle \begin{array}{l} x_i, x_j \text{ visibles} \\ \cos\theta_{xi}, \cos\theta_{xj} > 0 \end{array} \right\rangle \quad (\text{Ec.2.36})$$

Este algoritmo puede mejorarse si se toman muestras de pares de puntos distribuidos de manera no uniforme y adaptativa. Es válido únicamente si las dos superficies son visibles.

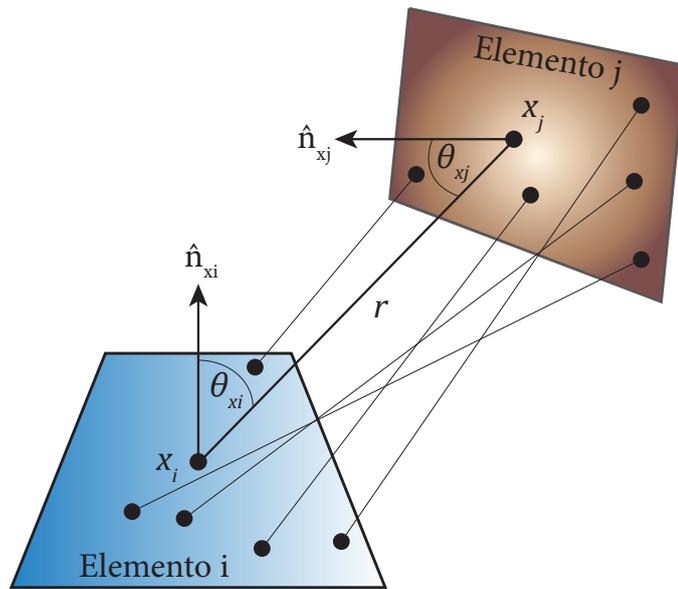


Figura 2.18. Trazado de rayos en el método de Monte Carlo. Fuente: Elaboración propia.

En el artículo de (Peralta et al., 2006) puede encontrarse otra aplicación del método muy interesante, donde se evalúa el factor para la configuración particular plano-esfera, con un alto grado de detalle en el arreglo de la integral y el desarrollo algebraico intermedio. Finalmente utiliza el método de Monte Carlo del disparo aleatorio hacia un blanco fijo (Sobol, 1983), incluyendo un esquema del algoritmo de cálculo realizado en Matlab.

Por último cabe resaltar otra contribución de interés. Se trata de (Pianykh et al., 1998) donde se realiza una mejora del método de Monte Carlo para la configuración de un elemento diferencial sobre un disco, mediante comparación con el valor analítico. Su enfoque está claramente dirigido hacia la radiosidad para síntesis de imagen. Destaca su metodología secuencial y la explicación de pasos intermedios en la resolución del método.

Otras estrategias consisten en el muestreo mediante trazado de rayos de forma uniforme distribuidas en el coseno (random walks) como propone (Sbert, 1996) en su tesis doctoral, donde presenta distintas técnicas para resolver la ecuación del factor de configuración por medio del método de Monte Carlo, mediante el uso de la geometría integral. Por un lado, propone una expresión explícita para su cómputo utilizando la integral de área:

$$F_{i-j} \approx \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left(\frac{1}{\pi A_i} \right) \frac{V(x, x') \cos \theta_k \cos \theta'_k}{r^2 f(x, x')} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left(\frac{1}{\pi A_i} \right) \frac{V(x, x') \cos \theta_k \cos \theta'_k}{\frac{r^2}{A_i A_j}} = \quad (\text{Ec.2.37})$$

$$\frac{A_j}{\pi N} \sum_{k=1}^N \left(\frac{1}{\pi A_i} \right) \frac{V(x, x') \cos \theta_k \cos \theta'_k}{r^2}$$

Se toman puntos al azar desde cada superficie A_i , A_j y se calcula el factor entre elementos de superficie (parches i,j), lo que significa utilizar como función de distribución de probabilidad uniforme $f(x,x')=1/A_i A_j$, por lo que no importa cómo se haga el muestreo.

Se considera otra forma de computar el factor de configuración utilizando la integral de la semiesfera, definida como:

$$F_{i-j} = \frac{1}{\pi A_i} \int \int_{A_i \Omega} V_{ij}(\theta, \phi, x) \cos\theta d\omega dA_i = F_{ij} = \frac{1}{\pi A_i} \int \int_{A_i \Omega} V_{ij}(\theta, \phi, x) \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi dA_i \quad (\text{Ec.2.38})$$

Donde la integral se evalúa sobre el elemento diferencial de área dA_i y las direcciones de la semiesfera sobre dicho elemento. La función de visibilidad V_{ij} adopta el valor 0 o 1 en función de si el elemento j es visible desde dA_i con centro en x y dirección (θ, ϕ) . Tomando como función de distribución de probabilidad uniforme $f(\theta, \phi, x)=1/\pi^2 A_i$ y tomando N direcciones de acuerdo a $(\theta, \phi, x)=(\pi R_1/2, 2\pi R_2, x)$, la expresión del factor se convierte en:

$$\begin{aligned} F_{i-j} &\approx \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left(\frac{1}{\pi A_i} \right) \frac{V_{ij}(\theta_k, \phi_k, x_k) \cos\theta_k \sin\theta_k}{f(\theta_k, \phi_k, x_k)} \\ &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left(\frac{1}{\pi A_i} \right) \frac{V_{ij}(\theta_k, \phi_k, x_k) \cos\theta_k \sin\theta_k}{\frac{1}{\pi^2 A_i}} \\ &= \frac{\pi}{N} \sum_{k=1}^N V_{ij}(\theta_k, \phi_k, x_k) \cos\theta_k \sin\theta_k \end{aligned} \quad (\text{Ec.2.39})$$

(Sbert, 1996) hace una extensa descripción a la modelización y tratamiento computacional de las citadas soluciones. Por otra parte, otros autores han realizado adaptaciones estocásticas del método interactivo de Jacobi para sistemas lineales (Tobler al, 1998).

La simulación de Monte Carlo incluye las siguientes etapas:

- Especificación de la superficie emisora.
- Selección de los ángulos de emisión.
- Trayectoria en la dirección de propagación.
- Determinación, en su caso, del punto de intersección con la superficie de destino.
- Determinación de la historia de los destinos sobre la superficie 2.

Las estrategias de mejora del método para forzar más eventos en la simulación y corregir el resultado estadístico permiten obtener estimaciones más precisas.

2.2.3. Otros métodos

Radiosidad

Existen otros métodos utilizados para mejorar la calidad en la generación de imágenes por ordenador. En la actualidad se basan en la utilización del método de la radiosidad (Goral et al., 1984), cuya resolución requiere la determinación de factores de configuración, siendo la etapa más compleja dentro del proceso. Con el tiempo, se han desarrollado distintos métodos para mejorar el cálculo de factores de configuración asociados a problemas de radiosidad.

La técnica de Radiosidad (Radiosity) es una tecnología de renderización que pretende simular con realismo la forma en que la luz interactúa en un entorno o escena, calculando el intercambio de luz entre superficies difusas. Para ello, se lleva a cabo una subdivisión del modelo en pequeñas unidades denominadas parches, y éstos a su vez en otras unidades más pequeñas elementos, que serán la base de la distribución de luz final. Sobre esas unidades elementales se realiza el envío y seguimiento del trazado de una serie de rayos de luz dentro de la escena tridimensional a representar. Los rayos interaccionan con los objetos del entorno, desencadenando la generación de rayos secundarios en función de las características del modelo (reflexión, transmisión, sombra, etc). El seguimiento de los rayos primarios y secundarios determinará el color de cada punto de la pantalla. La idea subyacente detrás del método de radiosidad es la de lograr un equilibrio en la distribución de la energía de una escena. Los métodos asociados al cálculo de la radiosidad no pueden clasificarse unívocamente, ya que se aprovechan de distintas técnicas proyectivas y numéricas. Debido a su alta complejidad, combinan prácticamente todos los métodos existentes de cálculo de factores de configuración. Una revisión rigurosa de los mismos escapa del alcance de este capítulo, ya que se encuentran aplicados a una disciplina muy específica, aunque puede encontrarse más información en (Cohen et al., 1993) y en las tesis doctorales de (Rosell, 2006) y (Vueghs, 2009).

Programas de cálculo

La determinación de factores de configuración comenzó a ser implementada en programas informáticos de cálculo con el desarrollo de los primeros procesadores. Los primeros códigos de programación de los distintos algoritmos datan de (Dummer et al., 1963), que desarrollaron CNVUFAC, programa que permitía calcular factores de configuración nodo a nodo para el estudio de radiación del cuerpo negro. Por su parte, (Mitalas et al., 1966) elaboraron programas para el cálculo de factores de configuración basados en el lenguaje de programación FORTRAN IV. CNVUFAC fue posteriormente modificado por la NASA y en última instancia por (Wong, 1976), para adaptarlo al sistema de computación utilizado por el Lawrence Livermore National Laboratory, donde (Edwards, 1972) había desarrollado el programa TRUMP. El programa TRUMP estaba concebido para obtener la distribución de temperaturas en sistemas multidimensionales para régimen estacionario y transitorio. De la década de los 60 también surgió RAVFAC (Lovin et al., 1969), que fue posteriormente modificado por VIEW (Puccinelli, 1973) para ser implementado en NASTRAN y utilizado por el Oak Ridge National Laboratory.

Seguidamente, (Wong, 1976) desarrolló GRAY CNVUFAC, un programa que integraba TRUMP y CNVUFAC y además permitía evaluar el flujo de calor por radiación gris partiendo de los valores obtenidos con CNVUFAC como input. Las geometrías disponibles eran cilindros, conos, esferas, elipsoides, placas planas, discos, toroides y superficies de revolución, incluidas porciones de las mismas.

Desde 1979, el código de elementos finitos TACO (Mason, 1980) y TACO2 (Burns, 1982) fue utilizado para análisis de transferencia de calor en el Lawrence Livermore National Laboratory. Desde entonces hubo un crecimiento notable en el número de programas capaces de calcular factores de configuración para modelos de elementos finitos, como SHAPEFACTOR (Emery, 1980) que utilizaba la integración de contorno. GLAM (Garelis et al., 1981) podía utilizarse para calcular factores en geometrías axi-simétricas con efecto sombra. MONTE (Burns, 1983) es otro programa que utiliza el método de Monte Carlo para una biblioteca de 20 geometrías planas.

(Shapiro, 1983) desarrolló FACET, que calcula factores de configuración entre superficies para geometrías planas 2D y 3D axi-simétricas con efecto sombra. Los resultados obtenidos con FACET eran utilizados para realizar simulaciones en transferencia térmica con programas de cálculo por elementos finitos. (Vogt, 1994) desarrolló un software financiado por la NASA, denominado TRASYSS para el estudio de la radiación a la que se encuentra sometida una nave espacial en órbita. Entre otras posibilidades incluye cálculo de factores de configuración.

(Glass, 1995) implementa el método del hemicubo en el programa CHAPARRAL, que demuestra ser mucho más eficaz computacionalmente que los algoritmos anteriores para calcular factores de configuración. También permite resolver la ecuación matricial de radiosidad mediante iteraciones Gauss-Seidel combinadas con técnicas de refinamiento progresivo. SPENVIS View Factor Calculator (<http://spenvis.oma.be>) es una herramienta de la Agencia Espacial Europea (ESA) que permite el cálculo del factor de configuración para distintas geometrías predeterminadas. Utiliza el método de integración adaptativa (Walton, 2002), el algoritmo de Delaunay para la triangulación de superficies e integración Gaussiana para resolver la integral doble. La precisión es un valor introducido por el usuario. Internamente, el programa en caso de no alcanzarla, divide los triángulos en sub-triángulos hasta que se alcance la convergencia.

(Walton, 2002) propone en su informe el método de integración adaptativa ante otros algoritmos ray-tracing o hemicubo, mediante el programa VIEW3D, con el que es posible determinar factores de configuración para geometrías 3D con obstrucción parcial. En su trabajo aprovecha algunos aspectos computacionales desarrollados en CHAPARRAL. Desde el año 2009 se encuentra disponible como software de código abierto (<http://view3d.sourceforge.net>). En el apéndice D del libro de (Modest, 2013b) pueden encontrarse códigos adicionales aplicables al cálculo de radiación térmica.

El gran crecimiento experimentado en el ámbito del software comercial de cálculo por elementos finitos ha puesto en manos del investigador una gran variedad de herramientas de simulación y análisis de sistemas físicos. Entre ellos destacan los estudios mecánicos, térmicos y fluidodinámicos. A continuación se relacionan los programas disponibles más extendidos: Solidworks®, Autodesk Inventor®, Ansys Fluent®, C&R RadCad®, MSC Software®, Comsol Multiphysics®, Siemens NX® y Mentor HyperLynx Thermal®. Estos programas permiten calcular factores de configuración. El hándicap principal del software comercial es la heterogeneidad de algoritmos y técnicas utilizadas para la resolución de un mismo problema. Por otra parte, el sistema es cerrado y no se tiene control sobre el proceso de cálculo, lo que limita su personalización.

A pesar de disponer de manuales y guías de ayuda, no siempre se detallan los métodos utilizados para el cálculo de los factores de configuración. Del mismo modo, los programas de cálculo numérico han evolucionado muchísimo, incorporando novedosas herramientas y aplicaciones para el modelado de sistemas; que permiten tener un dominio absoluto sobre el desarrollo y poder adaptarlo a un problema concreto. Mathworks Matlab®, Wolfram Mathematica® y Maplesoft® son algunos de los paquetes más utilizados por ingenieros e investigadores.

2.3. Factores de configuración disponibles

El estudio del intercambio radiante entre dos superficies ha producido un amplio número de factores de configuración en el último siglo. Son múltiples las disciplinas en las que la obtención del factor de configuración se torna como una etapa fundamental para determinar el calor radiado (Hamilton et al., 1952; Landoni et al., 1962; Dummer et al., 1963; Pucinnelli, 1973; Hankinson, 1986; Beard et al., 1993; Stasiek, 1998; Bopche et al., 2010; Bao et al., 2011; Maor et al., 2012; Vorre et al., 2015). Precisamente por ese motivo, los resultados proporcionados por los investigadores se encuentran dispersos y distribuidos en publicaciones especializadas de distintos ámbitos científicos.

En este sentido merece ser destacado el eminente trabajo de (Howell, 2010), que consiguió en 1982 realizar la mayor contribución hasta el momento en cuanto a inventario de factores de configuración; publicando un catálogo que reunía en una única fuente todo el material diseminado en la literatura técnica. Los factores presentados en el catálogo incorporaron correcciones de errores detectados en publicaciones anteriores, aunque no fueron revisados y calculados todos los que se publicaron. Por ello el autor instaba a ser cauteloso en su uso, comprobándolos, especialmente en el caso de tablas y gráficos. Actualmente está vigente la tercera edición, que corrige los errores de la primera y segunda edición, y además se encuentra publicado como recurso del libro (Howell et al., 2015). Dispone actualmente de más de 300 factores de configuración y se encuentra disponible de forma gratuita en www.thermalradiation.net/indexCat.html. El catálogo se encuentra dividido en tres secciones, diferenciando los siguientes factores de configuración:

- A) Entre elementos diferenciales de área.
- B) Entre elemento diferencial de área y elemento de área finita.
- C) Entre elementos de área finita.

En cada sección, los factores se muestran ordenados de menor a mayor complejidad, es decir, primero se relacionan aquellos entre superficies planas, posteriormente entre superficies planas y cilíndricas, planas y cónicas, planas y esféricas, etc.

2.4. Modelado del efecto sombra

Debido a las configuraciones geométricas, la determinación analítica del intercambio radiante entre superficies es muy compleja desde el punto de vista matemático, por lo que en ocasiones se realizan aproximaciones y simplificaciones.

Sin embargo, es una mala praxis trabajar con valores imprecisos del factor de configuración, ya que puede inducir errores importantes y resultados poco reproducibles. Para la mayoría de aplicaciones en ingeniería, se ha demostrado que es necesario disponer de una precisión de al menos 6 dígitos significativos en el valor de los factores de configuración (Ramanujam et al., 2006). Por este motivo, el efecto sombra inducido por otros elementos no debe despreciarse, ya que debe descontarse la fracción de energía que no recibe la superficie bloqueada.

(Shapiro, 1983) implementó un código para cálculo por computadora (FACET) del factor de configuración para elementos axi-simétricos, elementos bidimensionales y tridimensionales con efecto sombra. En su trabajo recopila información relativa a los códigos computacionales existentes hasta la fecha, destacando las capacidades y aplicaciones de cada uno de ellos. Incorpora algoritmos para la detección del efecto sombra, para interferencias inducidas por la propia superficie y terceras superficies. En su exposición, relata que entre dos superficies, pueden darse las siguientes situaciones respecto al efecto sombra (Figura 2.19):

- 1) Las superficies son visibles.
 - a) No existe interferencia.
- 2) Interferencia inducida por la propia superficie.
 - b) Parcial.
 - c) Total.
- 3) Interferencia inducida por una tercera superficie.
 - d) Parcial.
 - e) Total.

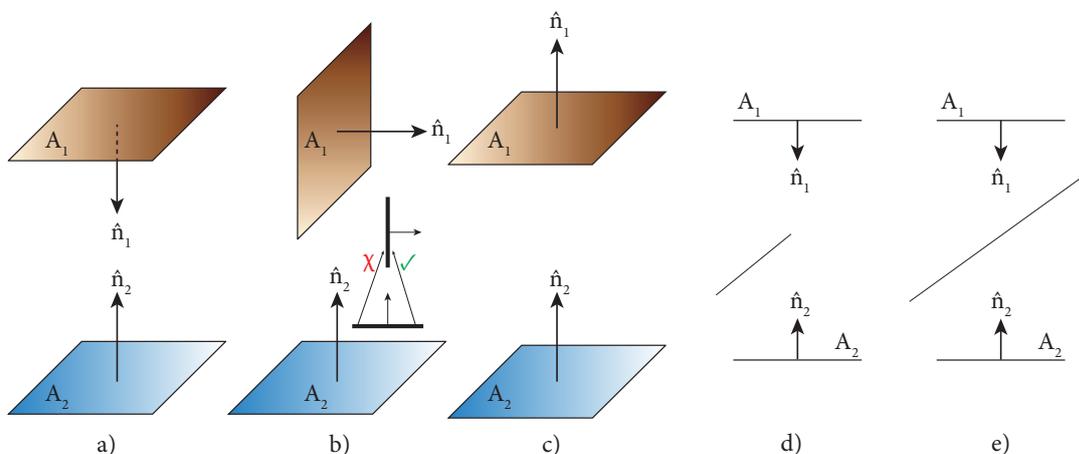


Figura 2.19. Tipos de sombra entre dos superficies. Fuente: Elaboración propia.

El bloqueo del caso puede comprobarse en función de los ángulos θ_i, θ_j (Figura 1.6). Si $\cos\theta_i > 0$ y $\cos\theta_j > 0$, entonces las superficies se ven la una a la otra. Esto es equivalente a que se cumpla:

$$\vec{r}_{ij} \times \vec{n}_i > 0 \tag{Ec.2.40}$$

$$\vec{r}_{ji} \times \vec{n}_j > 0 \tag{Ec.2.41}$$

En la expresión anterior, r_{ij} son las líneas que unen los puntos ij de cada superficie y θ_i, θ_j los ángulos que forman dichas líneas con las normales n_i, n_j respectivamente. Si todos los r_{ij} satisfacen la ecuación anterior, las superficies se ven entre ellas. Si ningún r_{ij} satisface la ecuación anterior, existe bloqueo total. Si solo algunos r_{ij} satisfacen la ecuación anterior, existe bloqueo parcial. El efecto sombra inducido por una tercera superficie puede verificarse mediante líneas que partiendo de la superficie 1 se dirijan a la superficie 2 (Figura 2.20). En el caso de superficies planas, puede comenzarse por unir sus centroides, sus vértices, subdividir la superficie en elementos más pequeños, etc.

Existen métodos ray-tracing (algoritmo de trazado de rayos utilizado para la determinación de superficies visibles) que discretizan la superficie y evalúan la visibilidad en cada elemento de superficie considerado. Como es evidente, estas operaciones tienen un alto coste computacional, mayor conforme más pequeño es el mallado de la superficie.

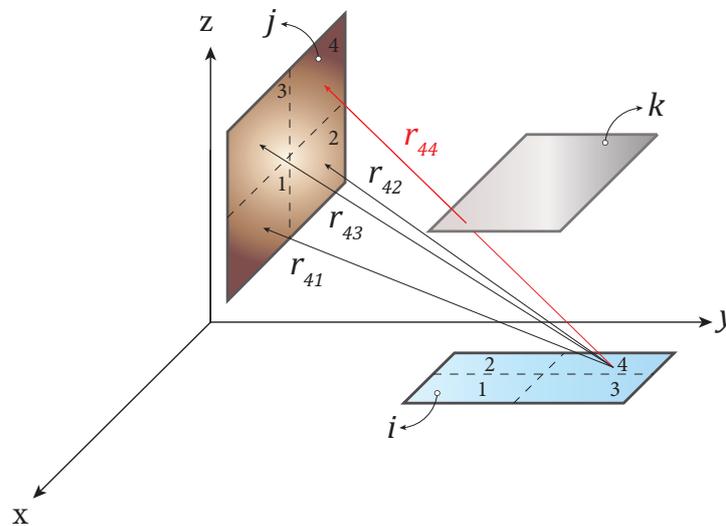


Figura 2.20. La línea de unión r_{44} no contribuye al factor de configuración. Fuente: Elaboración propia.

(Shapiro, 1983) hace uso de los siguientes algoritmos, correspondientes a las aproximaciones de la integral doble de área y de la integral de contorno (Apartado 2.2.1), respectivamente:

$$F_{i-j} \cong \frac{1}{A_i} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j A_i A_j}{\pi r_{ij}^2} \tag{Ec.2.42}$$

$$F_{i-j} \cong \frac{1}{2\pi A_i} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \ln r_{ij} \hat{v}_i \times \hat{v}_j \tag{Ec.2.43}$$

En el primer caso las superficies se subdividen en superficies más pequeñas, mientras que en el segundo caso los contorno se subdividen en segmentos de línea (v_i, v_j). También hace mención al método desarrollado por (Mitalas et al., 1966), para superficies cuadriláteras. Los métodos de contorno y Mitalas tienen un menor coste computacional, sin embargo la integración por área se utiliza si existe interferencia parcial por la propia superficie o interferencia por una tercera superficie. Para superficies que comparten un eje utiliza el método de Mitalas. (Jithesh et al., 2007) presentó un método de integración numérica para evaluar el factor de configuración con efecto sombra y compararlo con los valores analíticos. Utiliza la discretización de la integración por superficie para la superficie emisora y la discretización de la integral de contorno para la superficie receptora. Aplica este método a las siguientes geometrías:

- a) Elemento diferencial de área sobre un rectángulo, siendo la superficie que produce la interferencia también rectangular.
- b) Radiador con dos aletas. En este caso realizan una discretización triangular de la superficie emisora.

Obtienen resultados muy próximos al valor analítico, con poco error, pero en su trabajo no aparecen detalles ni algoritmos del proceso de cálculo.

(Katte et al., 2000) obtuvo expresiones analíticas para factores de configuración diferenciales en configuraciones axi-simétricas de cilindros, aplicando el método de la integral de contorno. Por su parte, (Deiveegan et al., 2004) presentó soluciones analíticas entre un elemento diferencial coaxial respecto a un área finita, en presencia de una superficie obstructora finita. (Ramanujam et al., 2006) desarrolló factores de configuración analíticos entre un elemento diferencial de superficie a un rectángulo finito, siendo obstruida su visión relativa por la presencia de una esfera o un paralelepípedo. Se plantean tres casos:

- El elemento diferencial es perpendicular a la base del plano y la superficie de bloqueo es un paralelepípedo.
- El elemento diferencial es paralelo a la base del plano y la superficie de bloqueo es un paralelepípedo.
- El elemento diferencial tiene una orientación arbitraria y la superficie de bloqueo es una esfera.

(Walton, 2002) describe el uso de técnicas de integración adaptativa para el cálculo de simples polígonos convexos con obstrucciones.

Su trabajo comienza por repasar los algoritmos utilizados para factores de configuración sin presencia de obstáculos. Cuando se introduce una tercera superficie al problema, ésta puede bloquear parcial o totalmente la vista entre las dos primeras superficies, o bien no tener ningún efecto. En el caso de bloqueo parcial, los métodos de cálculo consisten en modificaciones de los métodos de integración de área:

- Doble integración de área con bloqueo

La expresión utilizada en este caso es la siguiente:

$$F_{1-2} = \frac{-1}{\pi A_1} \sum_i \sum_j \frac{(\vec{r} \cdot \vec{n}_1)(\vec{r} \cdot \vec{n}_2)}{(\vec{r} \cdot \vec{r})^2} b_{ij} \Delta A_i \Delta A_j \quad (\text{Ec.2.44})$$

El parámetro b_{ij} es un factor de bloqueo cuyo valor es cero si los rayos que conectan Δ_i y Δ_j son obstruidos por la tercera superficie y la unidad en caso de que el rayo no sea bloqueado. Por otro lado se encuentra la expresión:

$$\frac{(\vec{r} \cdot \vec{n}_1)(\vec{r} \cdot \vec{n}_2)}{(\vec{r} \cdot \vec{r})^2} \quad (\text{Ec.2.45})$$

$$\frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{r^2} \quad (\text{Ec.2.46})$$

Los términos de la Ec.2.45 se han expresado en forma de operaciones vectoriales, siendo equivalente a la Ec.2.46, ya que se cumple:

$$\begin{aligned} \vec{r} \cdot \vec{n}_1 &= r \cos\theta_1 \\ \vec{r} \cdot \vec{n}_2 &= r \cos\theta_2 \end{aligned} \quad (\text{Ec.2.47})$$

En la Figura 2.21 se observa como el rayo entre dA_1 y dA_2 no se encuentra bloqueado mientras que el rayo entre dA_1 y dA_0 está bloqueado.

- Integración simple de área con proyección

Un método alternativo es proyectar la sombra de la obstrucción sobre la segunda superficie, como se muestra en la Figura 2.21 mediante el rectángulo en línea discontinua. Entonces se obtiene F_{12} mediante la siguiente expresión:

$$F_{1-2} = \frac{1}{2\pi A_1} \sum_{i=1}^{N^2} \sum_{j=1}^{E_2} \left(\frac{\vec{c}_i \cdot \vec{n}_1}{e_i} \right) \left[\frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{d_i}{e_i}\right) \right] \Delta A_j \quad (\text{Ec.2.48})$$

Donde la suma interior se realiza sobre las aristas de las porciones no bloqueadas de la superficie 2. La posición de la sombra varía en función de la posición del punto de proyección sobre la superficie 1. Este método se encuentra limitado a polígonos convexos, pero mejora a sus métodos predecesores, que se basaban en sustraer la sombra de la porción del resto de superficie. En el trabajo de (Walton, 2002) se encuentran los detalles de cálculo. Concretamente, se utiliza la técnica de coordenadas homogéneas, que permiten representar de la misma manera puntos y vectores en el espacio afín.

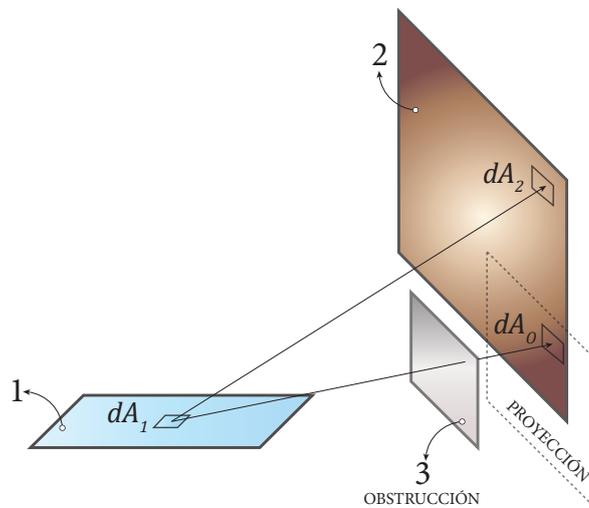


Figura 2.21. Proyección de la sombra sobre la superficie receptora. Fuente: Elaboración propia.

Integración adaptativa

Los procedimientos de integración que adaptan la longitud de los subintervalos al comportamiento del integrando se llaman métodos de integración adaptativa. La integración adaptativa se utiliza para controlar el número de puntos considerados en la integral simple de área. Si se emplea un insuficiente número de divisiones, se obtiene un valor impreciso del factor de configuración, mientras que un número excesivo acarreará elevados tiempos de computación. Un mejor esquema de integración surge teniendo presente que en aquellas regiones del intervalo de integración donde el integrando no presenta grandes variaciones se pueden tomar subintervalos “grandes” y que en regiones donde la variación del factor de configuración es “grande” podemos tomar subintervalos “pequeños” de manera tal que la suma de las contribuciones al error total sea menor que la tolerancia prefijada.

Un método adaptativo procede como sigue: se aplica la regla de cuadratura sobre todo el intervalo para obtener una aproximación a la integral y se estima su error. Si el error estimado es mayor que la tolerancia prefijada, se divide el intervalo de integración a la mitad y se aplica la regla de cuadratura a cada uno de los subintervalos y se estima sus respectivos errores. Ahora, si la suma de dichas estimaciones de los errores excede la tolerancia requerida, entonces el subintervalo con mayor cota de error es, a su vez, subdividido a la mitad y así siguiendo hasta que la estimación del error total sea menor que la tolerancia prefijada. De esta forma se proporciona un mayor refinamiento en aquellas porciones de la superficie donde es necesario.

La eliminación de potenciales obstrucciones se lleva a cabo mediante la realización de distintas comprobaciones. Una de ellas está basada en la relación entre los vértices que caracterizan al polígono y el plano que contiene la superficie obstructora. Se calcula mediante producto vectorial. Si tras la realización de estas comprobaciones se determina que las superficies no están obstruidas, se utilizan los algoritmos tradicionales. En caso contrario, se realiza un test adicional para determinar si la sombra de la superficie obstructora se proyecta de una superficie a otra. Este test fue propuesto por (Shapiro, 1983).

Una vez determinada la dirección de la proyección, cualquier obstrucción que puede ver únicamente a la superficie emisora es eliminada de la lista. Entonces se calcula el factor de configuración por integración adaptativa mediante integración simple de área. La integración adaptativa permite obtener factores de configuración de forma más precisa respecto a otros métodos como ray-tracing o hemicubo.

La integración adaptativa especialmente adecuada para aquellos casos en que las superficies se encuentran próximas. El resto de conclusiones van dirigidas a programas de cálculo relacionados con el intercambio energético en edificios.

(Feng et al., 2012) modeló el efecto sombra entre dos esferas del mismo tamaño, trabajo motivado por la necesidad de tener un conocimiento detallado de los procesos de transmisión de calor y distribución de temperaturas en un reactor modular de lecho de bolas (PBMR). Proporciona el factor de configuración en el citado caso y aporta un esquema de integración novedoso mediante la combinación de tres técnicas: la integral de Tanaka (Tanaka, 2008), la integración de Fibonacci para esferas y el cambio de variable mediante escalado no uniforme. Los beneficios de esta contribución son la mejora de la precisión y eficiencia del procedimiento, sobre todo aplicado a conjuntos pequeños.

El procedimiento numérico se describe a continuación, de forma resumida. Para la resolución de las integrales dobles se utiliza un sistema de coordenadas cilíndricas y una función de visibilidad definida por:

$$v_b = v_e(x_1, x_2) * b(r, \Omega_b)$$

$$v_e(x_1, x_2) = \left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ si } \left\{ \begin{array}{l} n_1 \cdot r \geq 0 \\ y \\ n_2 \cdot r \leq 0 \end{array} \right\} \\ 0 \text{ en caso contrario} \end{array} \right\} \quad (\text{Ec.2.49})$$

$$b(r, \Omega_b) = \left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ si } r \cap \Omega_b \neq \emptyset \text{ (radiovector } r \text{ interseca } \Omega_b) \\ 0 \text{ si } r \cap \Omega_b = \emptyset \text{ (radiovector } r \text{ no interseca } \Omega_b) \end{array} \right\}$$

En esta ecuación:

v_e es la función de visibilidad entre las dos esferas.

v_b es la función de visibilidad entre las dos esferas, considerando la obstrucción.

r es la distancia entre los puntos x_1 de la superficie 1 y x_2 de la superficie 2.

n_1 y n_2 son las normales en las superficies 1 y 2 en los puntos x_1 y x_2 , respectivamente.

Ω_b es el dominio del obstáculo.

$b(r, \Omega_b)$ es la función de bloqueo.

Entonces el factor de configuración, considerando el efecto sombra y que las dos esferas son iguales, puede determinarse mediante:

$$F_{12} = F_{21} = F(d, \Omega_b) = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^1 \int_0^{2\pi} g(x_1, d, \Omega_b) d\phi_1 dz_1 \quad (\text{Ec.2.50})$$

$$g(x_1, d, \Omega_b) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-1}^0 \int_0^{2\pi} f(x_1, x_2, d) v_b(x_1, x_2, \Omega_b) d\phi_2 dz_2$$

Los pasos para resolver esta integral son tres, siendo abordados en el artículo (Feng et al., 2012) con detalle:

- 1) Seleccionar una función de transformación de variable adecuada.
- 2) Aplicar el producto tensorial del esquema de integración modificado de Fibonacci para integrales dobles sobre las dos semiesferas.
- 3) Utilizar una aproximación ray-tracing para considerar el bloqueo en la integral.

2.4.1. Algoritmos ray-tracing

Durante este capítulo se ha hecho mención expresa al trazado de rayos o ray-tracing, que se conforma como un método esencial para modelar el efecto sombra en radiación e iluminación. En primer lugar debe establecerse una representación matemática del rayo. De modo ideal, un rayo no es más que un punto de origen y una dirección de propagación. La utilización de coordenadas paramétricas en el espacio resulta especialmente apropiada para caracterizar este fenómeno.

$$p(t) = i + t \cdot (f - i) \quad (\text{Ec.2.51})$$

Una vez conocido un rayo $p(t)$, debe conocerse la intersección con la otra superficie para $t > 0$. Si disponemos de la ecuación $p(t) = i + t(f - i) = i + td$ y una superficie implícita $f(p) = 0$, la intersección tendrá lugar cuando los puntos en el rayo satisfacen la ecuación implícita:

$$f(p(t)) = 0 = f(i + td) \quad (\text{Ec.2.52})$$

La ecuación de una esfera de radio R y centro $c = (x_c, y_c, z_c)$ puede representarse por la ecuación implícita:

$$(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 + (z - z_c)^2 - R^2 = 0 \quad (\text{Ec.2.53})$$

Esta ecuación puede reescribirse en forma vectorial:

$$(p - c) \cdot (p - c) - R^2 = 0 \quad (\text{Ec.2.54})$$

Cualquier punto p que satisfaga la ecuación anterior se encuentra en la esfera. Se puede resolver la ecuación anterior para conocer los valores t de los puntos que intersecan a la esfera.

$$(i + td - c) \cdot (i + td - c) - R^2 = 0 = (d \cdot d)t^2 + 2d(i - c)t + (i - c)(i - c) - R^2 \quad (\text{Ec.2.55})$$

La Ec.2.55 tiene la forma de una ecuación cuadrática de segundo grado en t :

$$At^2 + Bt + C = 0 \quad (\text{Ec.2.56})$$

$$t = \frac{d \cdot (i - c) \pm \sqrt{(d \cdot (i - c))^2 - (d \cdot d)((i - c)(i - c) - R^2)}}{(d \cdot d)} \quad (\text{Ec.2.57})$$

La solución de la Ec.2.57 se encuentra condicionada por el valor del discriminante. Si es negativo, la raíz cuadrada es imaginaria y no existen intersecciones entre la esfera y el rayo. Si el discriminante es positivo, existen dos soluciones, una solución donde el rayo entra en la esfera y otra donde el rayo sale. Por otra parte, si el valor del discriminante es cero, el rayo es tangente a la esfera exactamente en un punto. Debe tenerse en cuenta el valor del discriminante antes de llevar a cabo operaciones sobre otros términos. Puede encontrarse más información en (Haines, 1989). Una vez que se dispone de un método para generar un rayo que partiendo de un punto interseca un objeto, podemos añadir superficies que bloquean la visión relativa entre ambos elementos. Entonces se chequea la intersección entre la superficie emisora y la superficie obstructora. Para aquellos casos en los que existe intersección, la contribución al factor de configuración será nula. Por el contrario, si el rayo sorteja el obstáculo e interseca a la superficie objetivo, se computa un factor de configuración elemental en función de la relación geométrica existente a partir del método numérico utilizado.

Los modernos algoritmos ray-tracing desarrollan ecuaciones y utilizan secuencias de cálculo con el menor coste computacional. Son un complemento a los métodos convencionales de cálculo del factor de configuración, por lo que pueden adaptarse a los mismos. Por ejemplo, (Hoff et al., 1989) lo implementa para el método de Monte Carlo, como ya se ha comentado anteriormente; (Wallace et al., 1989) lo combina con el método del hemicubo, con el que calculan factores de configuración para resolver la ecuación de radiosidad. (Li et al., 1997) realiza una revisión de métodos ray-tracing aplicados al cálculo de factores de configuración para varias configuraciones, incluyendo el sistema plano-esfera sin efecto sombra. (Vueghs, 2009) introduce algunas mejoras a los métodos ray-tracing clásicos, que combina con el método de los elementos finitos (Vueghs et al., 2010). Además, define nuevas ecuaciones para la intersección de un rayo con una esfera, entre otras geometrías. En general, los algoritmos ray-tracing han evolucionado mucho, existiendo distintas técnicas de aceleración de los mismos (Arvo et al., 1989; Cohen et al., 1993). Las principales estrategias existentes se basan en reducir el tiempo de cálculo necesario para comprobar la intersección, reducir el número de rayos emitidos y reemplazar los rayos por haces de rayos. De esta manera, se pretende conseguir algoritmos con intersecciones más rápidas, utilizando menos rayos y generalizando éstos. Por ejemplo, (Mazumder, 2006) aplica técnicas de aceleración ray-tracing al método de Monte Carlo para transporte radiante entre superficies. En esta tesis se utilizará el algoritmo de (Badouel, 1990), que será descrito en el *Capítulo 4*.

2.5. Conclusiones

A lo largo de esta revisión bibliográfica se ha evidenciado que existe un importante volumen de literatura dedicada al estudio del intercambio energético entre superficies. Se han descrito los fundamentos de los principales métodos disponibles para la determinación del factor de configuración, incluyendo su implementación en programas de cálculo. El estado del conocimiento para modelar el efecto sombra ha sido definido, destacando los métodos de trazado de rayos como herramienta fundamental. Por último, se han señalado los trabajos que guardan una mayor similitud con esta tesis.

Puede afirmarse que existe una gran variedad de métodos y procedimientos de cálculo. Gran parte de ellos combina distintas técnicas, que han sido desarrolladas para dar respuesta a un problema concreto. Se encuentran aplicados a ámbitos de especialización desiguales y no siempre son adaptables al sistema que se pretende estudiar. Por esta razón, se establece la necesidad de desarrollar una metodología propia para la determinación de factores de configuración plano-esfera con bloqueo parcial por una tercera superficie. El estado del arte examinado en este capítulo constituirá el marco referencial para sustentar el modelo del sistema.

La principal conclusión que se extrae de la revisión bibliográfica es que no existen factores de configuración para el sistema constituido entre una esfera (bola de fuego) y un receptor entre los que se interpone un obstáculo (pared plana). Existen algunas soluciones analíticas del factor de configuración entre cuerpos esféricos y superficies diferenciales. Sin embargo, esas formulaciones tienen las siguientes restricciones:

- El factor de configuración de una esfera a una superficie diferencial se limita al caso en el que el receptor tiene visibilidad completa respecto a la esfera.
- En aquellos casos de visibilidad incompleta (parcial), no se considera el efecto interferencia de una superficie opaca intermedia. Se limita a los casos en que una superficie no puede ver completamente a la otra en virtud de su posición geométrica relativa. Es decir, a aquellos casos en los que la interferencia es inducida por la propia superficie.

Por tanto, en esta tesis será la primera vez que se publiquen factores de configuración para una esfera considerando el efecto sombra ocasionado por un muro plano, para distintas posiciones de la esfera. El método numérico calcula los factores para un conjunto de variables normalizadas, lo que proporciona una solución universal, válida para cualquier configuración del sistema. Además de la obtención de nuevos factores de configuración, se estudiará el sistema descrito para la modelización matemática y la predicción de las consecuencias de una bola de fuego bajo distintas hipótesis.

3 PLANTEAMIENTO GEOMÉTRICO

“Todos los problemas de Geometría pueden reducirse fácilmente a términos tales, que no es necesario conocer de antemano más que la longitud de algunas líneas rectas para construirlos”

René Descartes

3.1. Introducción

La generación de una bola de fuego implica una secuencia de eventos. Generalmente comienza con la ruptura de un recipiente que contiene una sustancia líquida inflamable sobrecalentada, de modo que gran parte del líquido es expulsado a la atmósfera. En respuesta a esta rápida caída de presión, una porción del líquido se evapora casi instantáneamente. Este vapor se expande rápidamente, pulverizando parte del líquido remanente en finas gotitas, creando de este modo una nube de aerosol turbulenta, formada por aire, gotitas y vapor. La turbulencia proporciona una rápida mezcla en el interior de la nube. La ignición de este aerosol produce una bola de fuego que termina cuando todo el combustible se consume.

Existen distintos sucesos que pueden desencadenar una bola de fuego. El fallo del recipiente se puede producir por impacto (proyectil, descarrilamiento, accidente), fatiga, corrosión o fallos operacionales que tengan como consecuencia un aumento excesivo de la presión interna. El aumento de la presión interna también se puede producir como consecuencia del calentamiento accidental del recipiente desde el exterior, procedente de un dardo de fuego o un incendio de charco. La mayoría de los tratamientos que se hacen de la bola de fuego están relacionados con gases licuados. Los accidentes con metano, butano y propano frecuentemente tienen como resultado una bola de fuego.

3.2. Proceso de formación y desarrollo de una bola de fuego

Una bola de fuego es, sin lugar a dudas, uno de los tipos de accidentes más perjudiciales que pueden ocurrir en una planta de procesos químicos, ya que es capaz de producir daños en un área varias veces mayor que la propia dimensión de la bola de fuego. Son una grave amenaza, ya que irradian un intenso calor con una capacidad destructiva que puede ser letal, provocando quemaduras graves a las personas, inflamando otros elementos combustibles y ocasionando daños por efecto dominó en equipos vulnerables y en propiedades.

En análisis cuantitativos del riesgo de escenarios donde se produce la despresurización de un recipiente, el riesgo de muerte por una bola de fuego tiende a ser mayor que el de proyección de fragmentos u onda de choque. El peligro de radiación térmica tiende a dominar la evaluación del riesgo del campo cercano, siendo el factor más dominante para las personas situadas en las proximidades del recipiente.

Por tanto, en la realización de análisis de riesgos de recipientes a presión o tanques de almacenamiento que contienen líquidos inflamables sobrecalentados, es importante ser capaz de modelar de la forma más precisa posible los efectos de la radiación térmica de las bolas de fuego. Aunque la forma de la bola de fuego depende del modo de fallo del recipiente, se considera que adoptan la geometría esférica, calculándose un diámetro característico. Vídeos y otras observaciones de accidentes han evidenciado que la mayoría de las bolas de fuego pueden ser razonablemente descritas con una geometría esférica durante la mayor parte de su duración.

El desarrollo de bolas de fuego y sus efectos han sido estudiados por distintos autores, especialmente para LNG/LPG (Dorofeev, 1995), donde se incluyen expresiones del diámetro también para gasóleos y gasolina. (Crawley, 1982) describe el desarrollo de una bola de fuego a través de 3 etapas:

3.2.1. Crecimiento

En esta primera etapa, se produce una rápida mezcla del combustible con el aire y su progresiva combustión, estando dominada por el impulso inicial de las sustancias inflamables. Consta de dos intervalos, que abarcan aproximadamente 1 segundo cada uno. Durante el primer intervalo, la bola de fuego crece aproximadamente hasta la mitad de su diámetro final y el contorno de la llama es brillante con color blanco-amarillento, indicando una temperatura aproximada de 1300°C. En el segundo intervalo de la primera fase, la bola de fuego alcanza su máximo volumen, pero en torno a un 10% de la superficie es oscura y envuelta en hollín, siendo el resto de color blanco, amarillento-anaranjado o rojo claro, indicando temperaturas del orden de 900-1300°C.

3.2.2. Combustión constante

En la segunda fase, que tiene una duración promedio de unos 10 segundos, la bola de fuego, que ha evolucionado hacia una forma casi esférica, ya no crece. En el comienzo de esta fase comienza a despegar. Comienza a elevarse y cambia a la típica forma de hongo. El combustible residual se mezcla con el aire en la propia nube y entra en combustión, estando dominada esta fase más por la flotabilidad y efectos de combustión que por el impulso inicial.

3.2.3. Consunción

En la última fase, la bola de fuego mantiene su tamaño, pero las llamas se vuelven menos oscuras y más traslúcidas. La combustión prácticamente se ha completado y la bola de fuego se desplaza debido a la flotabilidad, provocando la entrada de aire fresco y enfriando la misma hasta que cesa su existencia.

La Figura 3.1 ilustra el desarrollo típico de una bola de fuego en función del tiempo, procedente de una fuente situada a ras de suelo.

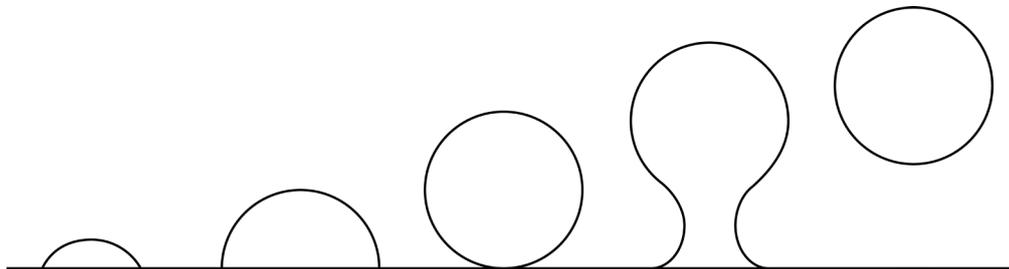


Figura 3.1. Dinámica de formación de una bola de fuego. Fuente: Elaboración propia.

Los principales resultados del estudio de la liberación, ignición y combustión de nubes de vapor inflamables es el desarrollo de modelos fenomenológicos y técnicas predictivas para la estimación cuantitativa de las características de dichos escapes y sus efectos. El modelado de consecuencias se refiere al cálculo o estimación de los valores numéricos que describen los resultados físicos reproducibles de escenarios donde se produce la pérdida de contención de materias inflamables y tóxicas con respecto a su impacto potencial sobre las personas y los bienes. El modelado de incendios se suele utilizar como input para determinar el nivel de radiación que recibirá un objetivo situado a una cierta distancia.

3.2.4. Modelización

En este sentido, se han desarrollado varios modelos de bola de fuego (Roberts, 1981; Prugh, 1994) incluyendo correlaciones para los parámetros característicos de la misma. Como en el caso de otras estimaciones en análisis del riesgo, existen variaciones de muchos de los parámetros que configuran el escenario sobre el que se calculan los efectos de la bola de fuego.

Los métodos existentes para la evaluación de los riesgos de una bola de fuego están basados en la esquematización grosera del fenómeno y en el uso de dependencias empíricas entre los parámetros integrales de una nube inflamada (diámetro, duración, poder emisor) como funciones de la masa de combustible. A continuación se muestran distintas correlaciones para la altura de la bola de fuego (Tabla 3.1):

Tabla 3.1. Ecuaciones para determinar la altura de la bola de fuego.

Referencia	Ecuación	
(Bagster et al., 1989)	$H=D=2R$	Ec.3.1
(CCPS, 1999)	$H=0,75D=1,5R$	Ec.3.2
(Van den Bosch et al., 2005)	$H=6,48M^{0,325}$	Ec.3.3
(Ahlert, 2000)	$H=4,35M^{0,333}$	Ec.3.4

Una bola de fuego es un fenómeno de naturaleza dinámica. Típicamente, la bola de fuego se inicia como una pequeña bola localizada en el suelo. Transcurridos unos segundos, la bola de fuego crece en tamaño, alcanzando rápidamente su diámetro máximo.

Seguidamente comienza a flotar y se eleva del terreno conforme el calor del incendio vaporiza las gotitas de líquido, incrementando la temperatura de la masa remanente de la mezcla vapor-aire, que entra en combustión. Conforme se eleva, se consume el combustible disponible y la bola de fuego finalmente deja de existir. La Figura 3.1 representa esquemáticamente la secuencia.

La mayor parte de modelos de radiación de bolas de fuego ignoran la naturaleza dinámica de la bola de fuego y son tratados simplemente como fenómenos estáticos, cuyo tamaño y poder emisor son constantes y se encuentran situadas en una posición fija.

Además consideran que la bola de fuego alcanza su máximo diámetro instantáneamente y mantienen dicho tamaño a lo largo de su duración. Estos modelos han sido confirmados y ajustados por los experimentos realizados a pequeña y media escala, así como del análisis de accidentes.

Los modelos estáticos, que serán evaluados en esta tesis, asumen dicha conjetura. En efecto, tradicionalmente la bola de fuego se ha modelado como una esfera a ras de suelo cuyo máximo diámetro es alcanzado instantáneamente y mantenido durante el periodo de combustión (Hardee et al., 1973; Roberts, 1981, Crocker et al., 1988).

Por otra parte, la mayor parte de modelos estáticos considera la bola de fuego sobre el suelo, pero otros utilizan una posición elevada.

Otros modelos, por ejemplo el del TNO (CCPS,1999) consideran la bola de fuego situada a una altura de 1,5 veces el radio de la bola de fuego. Después de la ignición, la combustión de los vapores incrementan la flotabilidad de la nube inflamada y por tanto se favorece su tendencia a elevarse.

En la Figura 3.2 se puede observar el enfoque clásico de la caracterización geométrica de una bola de fuego elevada y en tierra, con sus principales parámetros.

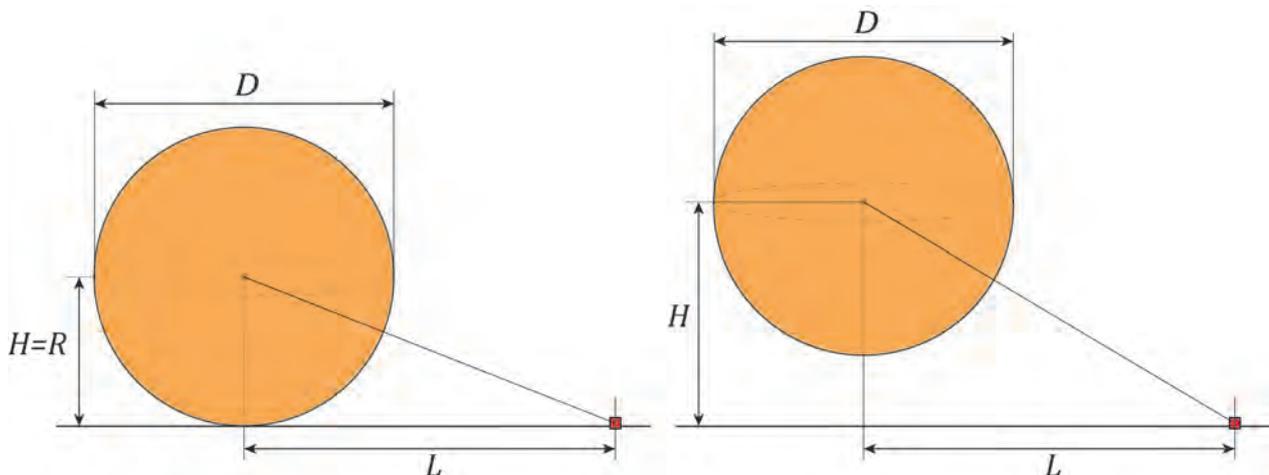


Figura 3.2. Enfoque geométrico clásico de la bola de fuego. Fuente: Elaboración propia.

3.3. Nuevo enfoque con presencia de obstáculos

Desde la perspectiva del análisis del riesgo, la evaluación de las consecuencias de las bolas de fuego requiere la definición de un escenario que describa lo más fielmente posible el fenómeno. A pesar del progreso alcanzado en la comprensión y cuantificación de los principales procesos físicos que rigen en el desarrollo y efectos de accidentes industriales que involucran sustancias inflamables, todavía existen algunas áreas donde es necesario seguir avanzando. Una de ellas es la presencia de barreras de seguridad que limiten los efectos de los accidentes graves. Concretamente, un muro situado a una cierta distancia del receptor, con una altura variable, que proporcione un efecto sombra, de tal manera que la radiación térmica recibida sea inferior a la que recibiría sin la existencia del muro.

Este nuevo modelo matemático para la caracterización de bolas de fuego con presencia de obstáculos permitirá realizar cálculos más realistas y disponer de métodos de diseño más seguros. Si se proyectan adecuadamente, las barreras de seguridad pueden proporcionar protección contra la proyección de fragmentos, las ondas de choque y la radiación térmica. A pesar de las dimensiones de las bolas de fuego, puede garantizarse aceptables niveles de protección dependiendo de la configuración de los parámetros del sistema.

A efectos del planteamiento geométrico del problema, se considerará como bola de fuego el resultado de la ignición de mezclas combustible-aire procedentes de recipientes a presión que contengan líquidos inflamables o gases licuados, ya que estas han sido estudiadas en la literatura y existen evidencias respecto a su proceso de formación, como se ha comentado anteriormente.

El nuevo modelo planteado en esta tesis se ilustra en la Figura 3.3. La introducción de una tercera superficie, un muro situado entre el receptor y la bola de fuego, proporciona una protección a la radiación térmica que puede ser cuantificada mediante técnicas de cálculo. Solo una parte de la energía emitida por la bola de fuego sería transmitida al receptor, ya que parte de ella es bloqueada por la presencia del obstáculo.

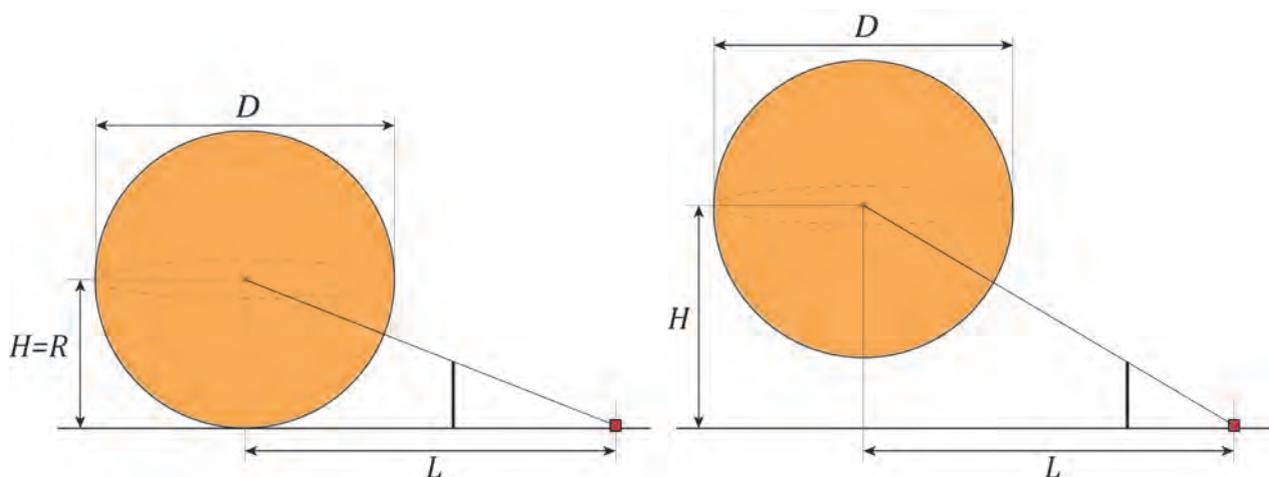


Figura 3.3. Nuevo enfoque de la bola de fuego, incluyendo un muro. Fuente: Elaboración propia.

En los siguientes apartados se detalla el planteamiento geométrico para dos casos particulares correspondientes al modelo estático, que son el de bola de fuego situada en tierra y el de bola de fuego elevada. En el *Capítulo 5* se desarrollará una variación del modelo dinámico considerando el efecto sombra, aprovechando los desarrollos de los casos particulares anteriores.

3.3.1. Bola de fuego a ras de suelo

La Figura 3.4 muestra una representación de la formulación matemática general del sistema. Una esfera de diámetro D define la dimensión de la bola de fuego y se encuentra situada sobre el suelo. La altura del centro de la esfera se encuentra definida por su radio R . Un receptor diferencial se encuentra situado a una distancia X_o . Entre ellos se sitúa un muro plano caracterizado por su altura, Z_w , y su distancia respecto al receptor, X_s . Sin embargo, se define una variable intermedia fundamental para el planteamiento geométrico, denominada Z_p , que representa la proyección vertical sobre el eje z de la línea que partiendo del receptor pasa por el punto de coordenadas (X_w, Z_w) . Aplicando el teorema de Tales, puede obtenerse la relación entre las variables independientes X_o , X_w y Z_w :

$$Z_p = \frac{Z_w X_o}{X_o - X_w} = \frac{Z_w X_o}{X_s} \quad (\text{Ec.3.5})$$

Como se puede inferir de la ecuación (Ec.3.5), Z_p representa un conjunto de combinaciones de las variables $[X_o, X_w, Z_w]$, valores que producen un mismo efecto sombra.

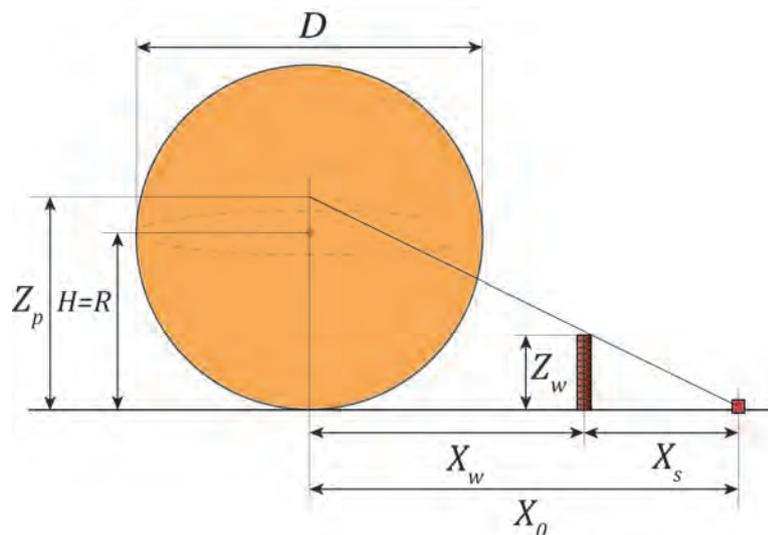


Figura 3.4. Esquema de una bola de fuego a ras de suelo con la presencia de un muro. Fuente: Elaboración propia.

Cuando los valores de Z_w son muy pequeños, la interferencia inducida por el muro no es un efecto controlante, y para el caso límite de $Z_w=0$ (no hay muro), el factor de configuración máximo puede determinarse analíticamente, ya que su solución se encuentra disponible en los catálogos.

Por otra parte, cuando la altura de la barrera se aproxima al diámetro de la esfera, el factor de configuración tiende a cero, sea cual sea el valor de X_0 . Ahora se definen dos nuevas variables adimensionales:

$$Z_d = \frac{Z_p}{D} = \frac{Z_w X_0}{2RX_s} \tag{Ec.3.6}$$

$$X_d = \frac{X_0}{D} \tag{Ec.3.7}$$

De esta forma, cuatro variables independientes (X_0, X_w, Z_w, D) pueden transformarse únicamente en dos (Z_d, X_d), simplificando notablemente el tratamiento matemático del problema y permitiendo extraer las soluciones de factor de configuración en un conjunto universal de gráficos $F_{max}^w = f(Z_d, X_d)$.

3.3.2. Bola de fuego elevada

En este caso, el planteamiento geométrico se muestra en la Figura 3.5. Una esfera de radio R define la bola de fuego que está situada a una altura H . La altura del centro de la esfera se define mediante la suma de su radio y la altura de la base de la esfera, H_b , respecto al suelo. Procediendo de la misma forma que en el caso anterior, podemos relacionar las principales variables del sistema en el parámetro Z_p . Cuando el efecto del muro es despreciable, existe otra expresión analítica que permite determinar el factor de configuración máximo.

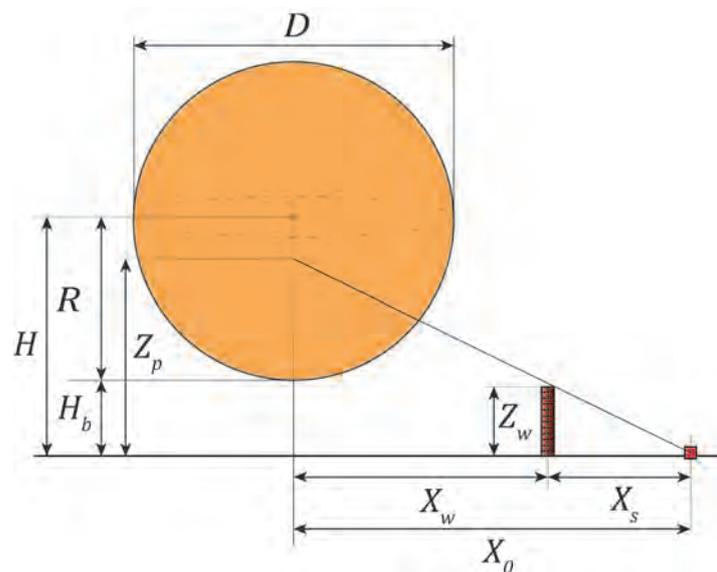


Figura 3.5. Esquema de una bola de fuego elevada con la presencia de un muro. Fuente: Elaboración propia.

A diferencia del caso anterior, esta condición (efecto sombra despreciable) puede ser satisfecha para $Z_w \neq 0$, es decir, siempre que la línea de proyección sea igual o inferior a la tangente inferior a la esfera, independientemente del valor de X_0 . Dicho de otro modo, puede haber casos en que el muro tenga unas características tales que la sombra que produce se proyecte por debajo de la base de la esfera.

Para los casos donde la esfera se sitúa a una cierta altura, se define una nueva variable adimensional:

$$H_d = \frac{H}{D} \quad (\text{Ec.3.8})$$

Entonces, para la bola de fuego elevada, las soluciones del factor de configuración pueden obtenerse como un conjunto de gráficos $F_{max}^w = f(Z_d, X_d, H_d)$, considerando una selección de alturas características de la bola de fuego.

3.3.3. Analogía geométrica

En la Figura 3.6 se puede apreciar, a modo de resumen, el fundamento esencial sobre el que se sustenta el planteamiento geométrico de esta tesis, y que supone una gran simplificación para el sistema de bola de fuego con presencia de un muro plano. Muros con distintas alturas y distancias de separación al receptor proporcionan un mismo efecto sombra y por tanto se corresponden con un mismo factor de configuración. Con ello, las soluciones obtenidas son universales y de aplicación a cualquier sistema.

Para la bola de fuego situada a ras de suelo ($H=R$), el muro situado a una distancia X_{s1} tiene una altura Z_{w1} , inferior a la del muro situado a una distancia X_{s2} , cuya altura es Z_{w2} . En ambos casos, parte de la radiación emitida por la bola de fuego es interceptada por el muro, y no llega al receptor. La cantidad de energía recibida por el receptor es la misma en ambos casos, y geoméricamente se corresponde con cualquier muro que determine una proyección sobre el eje z igual a Z_{p1} (zona sombreada en color azul). Este planteamiento anterior se satisface igualmente para bolas de fuego elevadas ($H>R$).

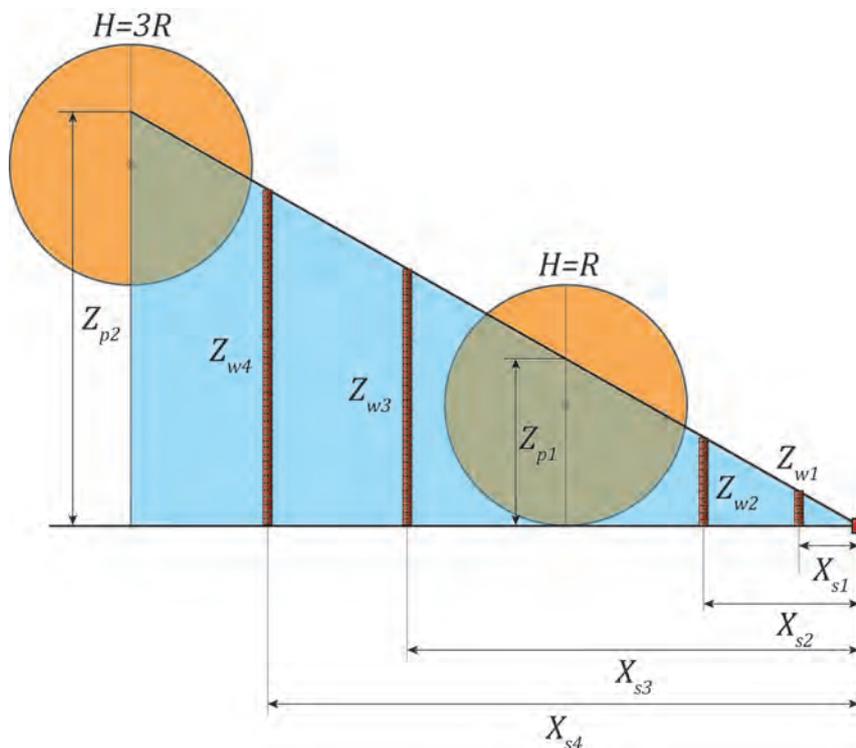


Figura 3.6. Esquema bidimensional del efecto sombra para distintas características del muro. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 3.7 muestra el mismo concepto en tres dimensiones, para una bola de fuego elevada.

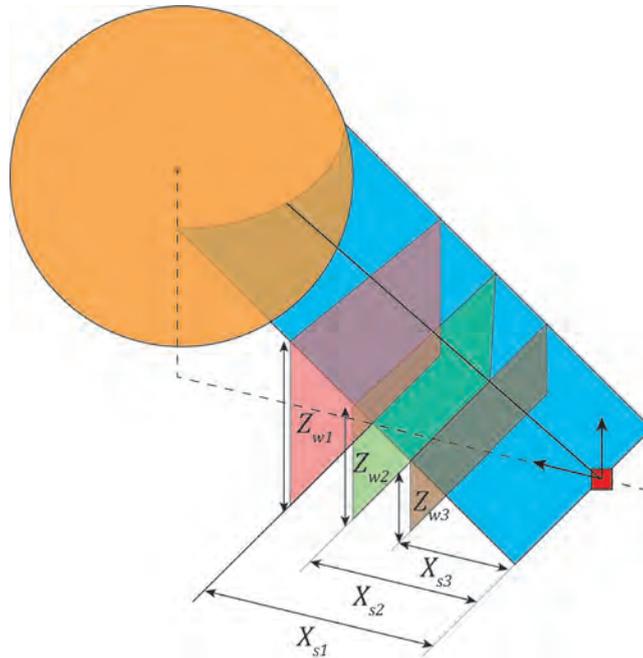


Figura 3.7. Esquema tridimensional del efecto sombra para distintas características del muro. Fuente: Elaboración propia.

4 RESOLUCIÓN MATEMÁTICA

“Los encantos de esta ciencia sublime, las matemáticas, solo se le revelan a aquellos que tienen el valor de profundizar en ella”

Carl Friedrich Gauss

En este capítulo se realizará una descripción general de las técnicas analíticas y numéricas utilizadas para la determinación del factor de configuración en algunos casos particulares. La resolución analítica de la ecuación canónica del factor de configuración (Ec.4.1) requiere la ejecución de las siguientes etapas:

- Determinar los diferenciales de área y los cosenos de los ángulos de visión en términos de las variables de integración para el sistema objeto de estudio.
- Determinar los límites de las integrales en términos de las variables de integración.
- Solución de la integral múltiple mediante las propiedades del cálculo integral y con la utilización de cambios de variable, cambio de coordenadas, geometría analítica en el espacio, proyecciones de superficies en el plano y otros recursos matemáticos.

Para el caso que se plantea, una bola de fuego con un obstáculo constituido por un muro plano, la ecuación integral resultante es irresoluble analíticamente, por lo que es necesario recurrir a métodos numéricos para poder obtener una solución aproximada a la real. Esas técnicas serán descritas en el Apartado 4.3.

A pesar de ello, fruto del esfuerzo realizado intentando resolver analíticamente la ecuación integral en los comienzos de la tesis mediante la exploración de distintas técnicas, se ha desarrollado un novedoso e inédito método semi-analítico que proporciona una solución aproximada válida únicamente para determinados rangos de sombra, que se presenta en el Apartado 4.4.

Por otra parte, para algunos casos singulares relacionados con la geometría del sistema, se dispone tanto de soluciones analíticas para el factor de configuración recogidas en la bibliografía como de ecuaciones derivadas analíticamente para casos de sombra completa. Son las denominadas soluciones analíticas para los casos extremos, recogidas en el Apartado 4.2.

4.1. Introducción

En esta tesis, se pretende determinar el factor de configuración entre una superficie finita, una esfera que representa una bola de fuego y un receptor diferencial que caracteriza un determinado elemento vulnerable. En el *Anexo A* se describe la deducción matemática de la ecuación integral para el cálculo analítico del factor de configuración, que viene dada por:

$$F_{dA_2-A_1} = \int_{A_1} \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi r^2} dA_1 \quad (\text{Ec.4.1})$$

θ_1 y θ_2 son los ángulos de visión, formados entre la línea que une ambas superficies y sus respectivas normales. Por su parte, r es la distancia existente entre las dos superficies, que se encuentran situadas en planos distintos (Figura 4.1). Como ya se ha comentado en el Apartado 1.3.2, en la formulación matemática del factor de configuración se considera que las superficies son negras (absorben de forma ideal toda la energía radiante que incide sobre ellas), isotérmicas y difusas (absorben difusivamente y también reflejan la energía radiante de forma difusa).

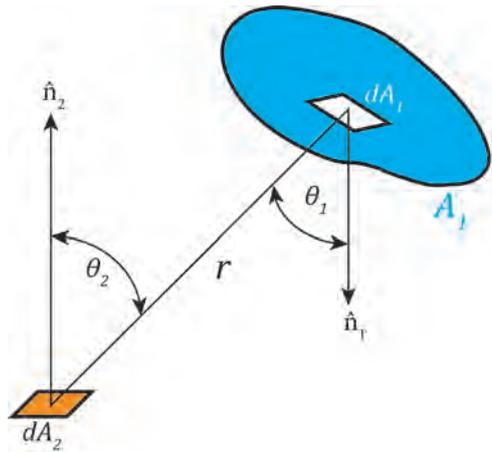


Figura 4.1. Esquema para la formulación matemática del factor de configuración. Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, se dan por cumplidas algunas leyes de la óptica geométrica, como la ley de los cosenos de Lambert y la ley del cuadrado inverso de la intensidad de radiación.

En los cálculos realizados en esta tesis, se considerará que el receptor diferencial está situado sobre una superficie vertical y sobre una superficie horizontal, a los que nos referiremos como factores de configuración vertical y horizontal, respectivamente.

En algunas aplicaciones, como es el caso del análisis de consecuencias, es de gran interés conocer la alineación del receptor en una localización particular que está sometida a la máxima radiación térmica incidente. Para el sistema de bola de fuego, esta condición se cumple cuando el vector de radiación es ortogonal a la alineación del plano que contiene al receptor.

El citado vector de radiación varía en función de los valores que adoptan los parámetros que definen el sistema bola de fuego-muro-receptor en cada caso particular. Como en esta tesis se trata de obtener soluciones universales de aplicación a cualquier sistema, se caracterizará el factor de configuración máximo como la suma de los cuadrados de los factores de configuración vertical y horizontal:

$$F_{max} = \sqrt{F_v^2 + F_h^2} \quad (\text{Ec.4.2})$$

Cabe indicar que en el espacio tridimensional, esta aproximación solamente se satisface cuando la energía radiante caracterizada por la proyección del vector de radiación forma 45° con tres orientaciones mutuamente perpendiculares del receptor, como se ilustra en la Figura 4.2.

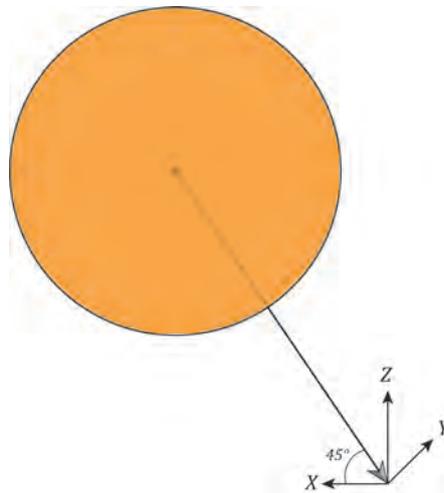


Figura 4.2. Configuración geométrica que proporciona el máximo factor de configuración. Fuente: Elaboración propia.

4.2. Soluciones analíticas para los casos extremos

Se dispone de soluciones analíticas para algunos casos límite, como son:

- Bola de fuego totalmente visible.
- Bola de fuego totalmente oculta.

4.2.1. Bola de fuego totalmente visible

En este escenario, no existe ninguna barrera interpuesta entre emisor y receptor. Varios autores han contribuido al desarrollo de factores de configuración entre un elemento diferencial de área y una esfera finita, que pueden ser utilizados para modelar el comportamiento del evento bola de fuego. El caso más simple es un objetivo situado de forma perpendicular a la esfera. (Naraghi, 1988) trabajó sobre factores para esferas y obtuvo la solución analítica para un receptor situado verticalmente. (Crocker et al., 1988) obtuvo expresiones analíticas para el factor de configuración de una bola de fuego respecto a un receptor diferencial orientado verticalmente y horizontalmente. De acuerdo a la Figura 4.3, se definen los siguientes parámetros adimensionales:

$$H_d = \frac{H}{D} \tag{Ec.4.3}$$

$$X_d = \frac{X_0}{D}$$

En función de los mismos, la ecuación general para el factor de configuración vertical es:

$$F_v = \frac{\frac{X_0}{R}}{\left(\left(\frac{H}{R}\right)^2 + \left(\frac{X_0}{R}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}} = \frac{\frac{X_0}{D}}{4\left(\left(\frac{H}{D}\right)^2 + \left(\frac{X_0}{D}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}} = \frac{X_d}{4\left(H_d^2 + X_d^2\right)^{\frac{3}{2}}}; H_d \geq 1/2 \tag{Ec.4.4}$$

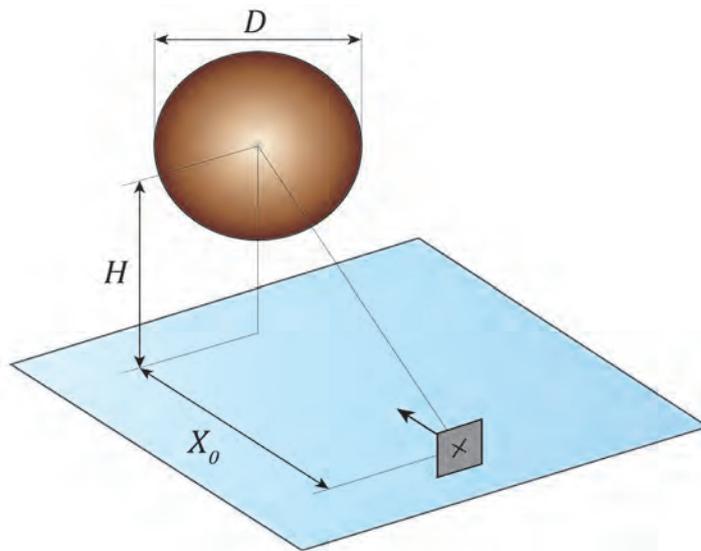


Figura 4.3. Transferencia radiante de una bola de fuego elevada respecto a un receptor situado en un plano vertical.

Fuente: Elaboración propia.

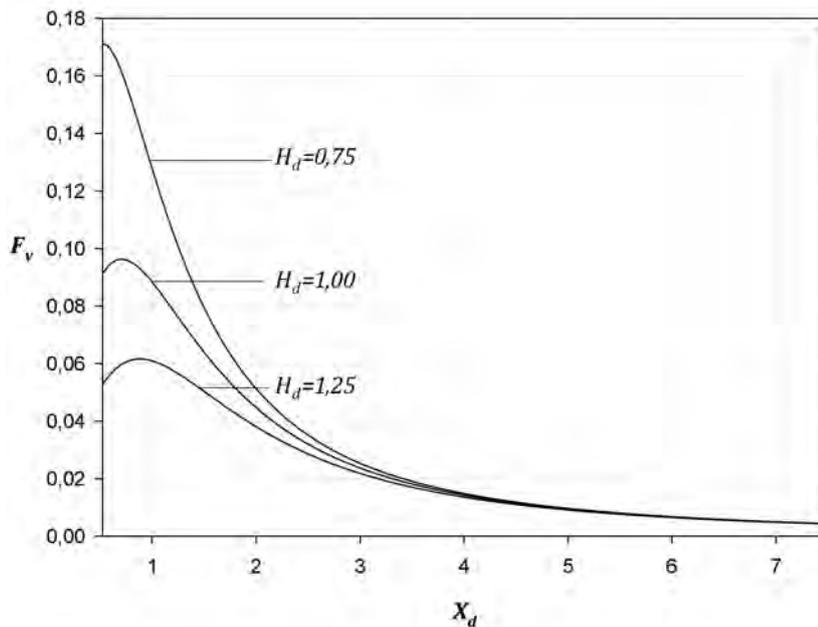


Figura 4.4. Factor de configuración vertical de una bola de fuego para distintas alturas y distancias. Fuente: Elaboración propia.

La Ec.4.4. aparece representada en la Figura 4.4. La expresión asintótica del factor de configuración vertical cuando la posición del receptor es mucho mayor que la altura de la bola de fuego, adopta la siguiente forma:

$$F_v = \frac{1}{4X_d^2} ; X_d \gg H_d \tag{Ec.4.5}$$

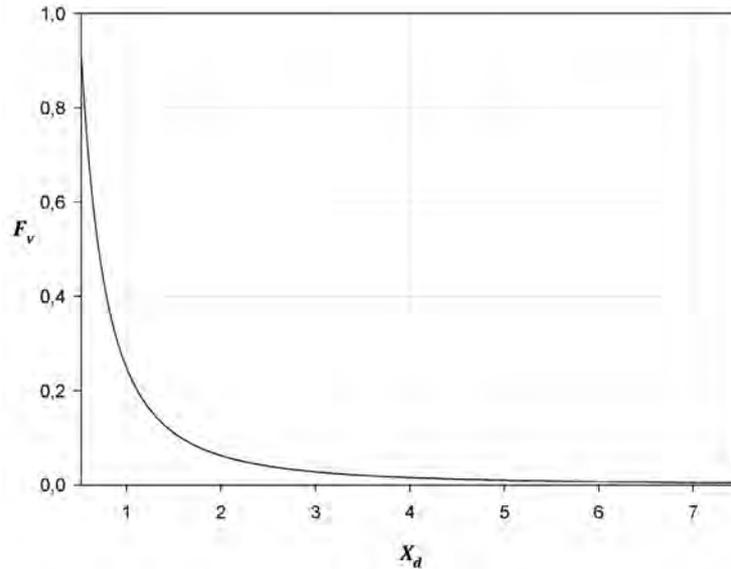


Figura 4.5. Asintota del factor de configuración vertical para receptores alejados. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.5, puede apreciarse la progresión con la que el factor de configuración vertical tiende a cero, para receptores alejados de la bola de fuego. Por su parte, el factor de configuración para un receptor situado en un plazo horizontal viene dado por (Figura 4.6):

$$F_h = \frac{\frac{H}{R}}{\left(\left(\frac{H}{R}\right)^2 + \left(\frac{X_0}{R}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}} = \frac{\frac{H}{D}}{4\left(\left(\frac{H}{D}\right)^2 + \left(\frac{X_0}{D}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}} = \frac{H_d}{4\left(H_d^2 + X_d^2\right)^{\frac{3}{2}}} ; H_d \geq 1/2 \tag{Ec.4.6}$$

En este caso, se observa (Figura 4.7) una inversión en la tendencia de los factores de configuración horizontal en función de la altura. Para valores bajos de X_d, el factor correspondiente a la menor altura de bola de fuego es superior al de posiciones superiores, como se aprecia en el gráfico.

Esta inversión está determinada por la función de la ecuación (Ec.4.6). Para un valor X_d constante, el denominador aumenta conforme aumenta H_d. El numerador es directamente proporcional a H_d, por lo que el factor viene determinado por la altura de la bola de fuego respecto a un denominador que también aumenta con ésta. El denominador de la bola situada a menor altura es el más pequeño, de manera que el factor resulta ser el mayor.

Este efecto se va atenuando conforme aumenta la distancia a la que está situado el receptor, de modo que los valores de denominador se van igualando, para una altura determinada. Así, cuando $X_d=2$ se ha producido la inversión completa de los valores representados en la Figura 4.7.

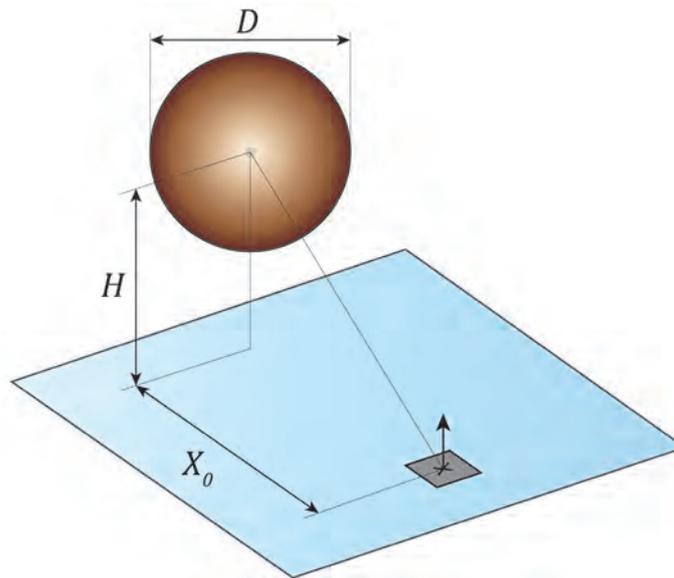


Figura 4.6. Transferencia radiante de una bola de fuego elevada respecto a un receptor situado en un plano horizontal.

Fuente: Elaboración propia.

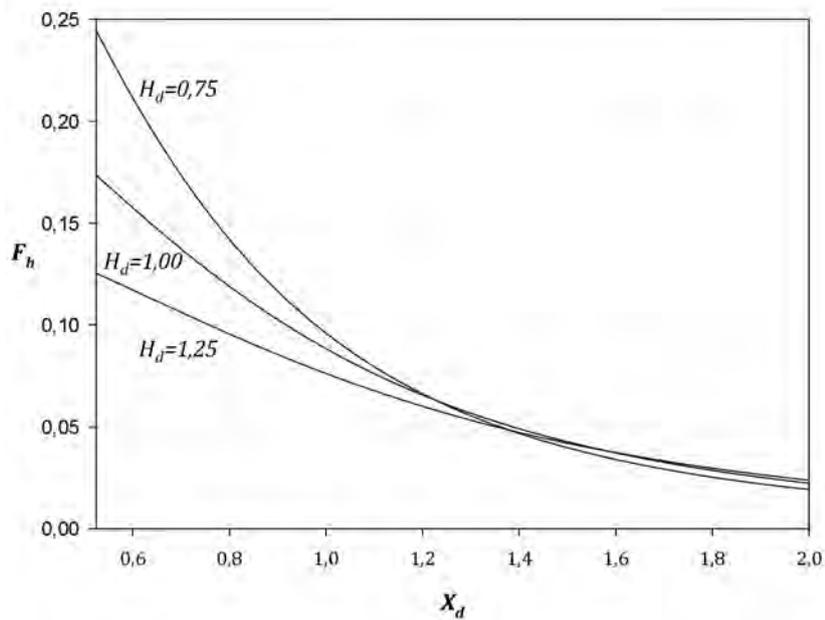


Figura 4.7. Factor de configuración horizontal de bola de fuego para distintas alturas y distancias. Fuente: Elaboración propia.

En cambio, al igual que en el caso anterior, cuando el receptor se encuentra muy alejado, la expresión anterior (Ec.4.6) se simplifica a:

$$F_h = \frac{H_d}{4X_d^3} ; X_d \gg H_d \quad (\text{Ec.4.7})$$

Comparando las ecuaciones (Ec.4.5) y (Ec.4.7) se evidencia que el factor horizontal tiende a cero a una tasa mucho más rápida que el factor vertical, para receptores remotos.

Se puede obtener la relación entre los factores de configuración vertical y horizontal dividiendo dichas ecuaciones (Ec.4.4) y (Ec.4.6):

$$\frac{F_v}{F_h} = \frac{X_d}{H_d} ; H_d \geq 1/2 \quad (\text{Ec.4.8})$$

De la expresión anterior se deduce que los factores tendrán idéntico valor cuando $X_d = H_d$, es decir, cuando la posición del receptor coincida con la altura de la bola de fuego. Según la ecuación canónica (Ec. 4.1) que define el factor de configuración entre un elemento de superficie y un elemento diferencial, el integrando está constituido por los valores de los cosenos de los ángulos formados entre la línea que une emisor y receptor con las respectivas normales, así como el valor de la distancia que los separa al cuadrado, en el denominador. A efectos de comparación este valor permanece constante, de manera que evaluaremos la relación entre los factores en virtud del ángulo formado entre la normal del elemento diferencial y la línea de visión. En la Figura 4.8 se muestra la línea vertical que define la posición del receptor equivalente al radio de la esfera. En esa posición, el valor de X_d es inferior al de la altura de la bola de fuego, ya que cualquier bola elevada está caracterizada por $H_d > 1/2$.

Por tanto, en esa región, el factor horizontal será superior al vertical. Si nos fijamos en el ángulo formado por la normal respecto a la línea que conecta con la bola de fuego, observamos que el ángulo correspondiente al receptor orientado verticalmente, $\theta_v > \theta_h$, y sus cosenos directores varían en sentido contrario, de manera que $\cos\theta_v < \cos\theta_h$, llegando a la generalización $F_h > F_v$.

Conforme avanzamos en el eje X , llega un momento donde la línea que une al receptor y al emisor forma un ángulo de 45° , exactamente cuando el receptor se sitúa a una distancia igual a la altura geométrica del centro de la bola de fuego. En ese caso, los ángulos son idénticos, al igual que sus cosenos y factores.

Una vez superado este punto, $X_d > H_d$, el cociente de la ecuación (Ec.4.8) será mayor que uno y el factor vertical será superior al horizontal. En términos de ángulos, puede apreciarse que al alejarse el receptor, la línea que lo conecta a la bola de fuego va disminuyendo su pendiente, reduciéndose el ángulo θ_v a costa del aumento de θ_h . Entonces $\cos\theta_v > \cos\theta_h$ y se confirma esta tendencia.

Así, para el sistema descrito, el factor irá evolucionando en función de la posición relativa del receptor respecto a la altura de la bola de fuego.

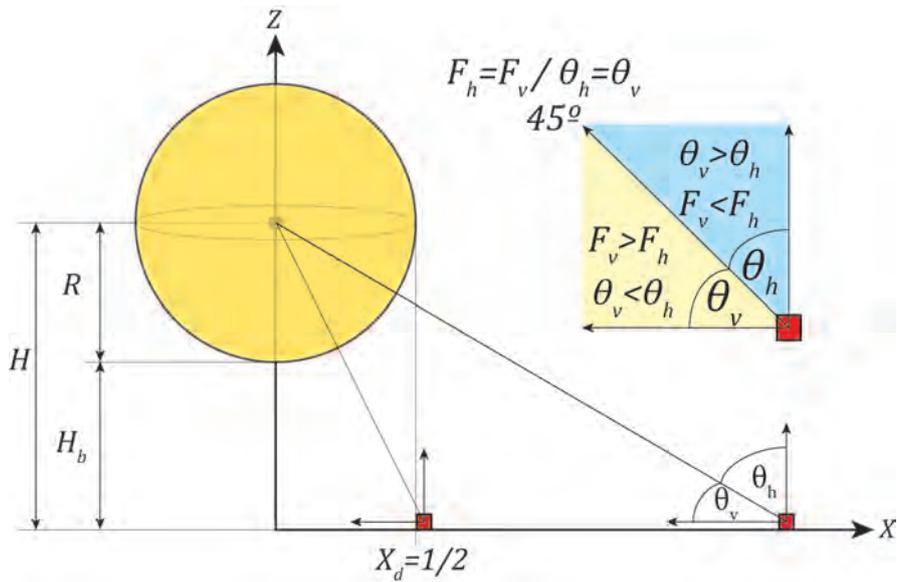


Figura 4.8. Inversión de los factores de configuración vertical y horizontal. Fuente: Elaboración propia.

Para el caso particular de bola a ras de suelo ($H_d = 1/2$), las Ec.4.4 y Ec.4.6 se convierten en las Ec.4.9 y Ec.4.10 (Figuras 4.9 y 4.10):

$$F_v = \frac{2X_d}{(1 + 4X_d^2)^{3/2}} \quad ; \quad H_d = 1/2 \tag{Ec.4.9}$$

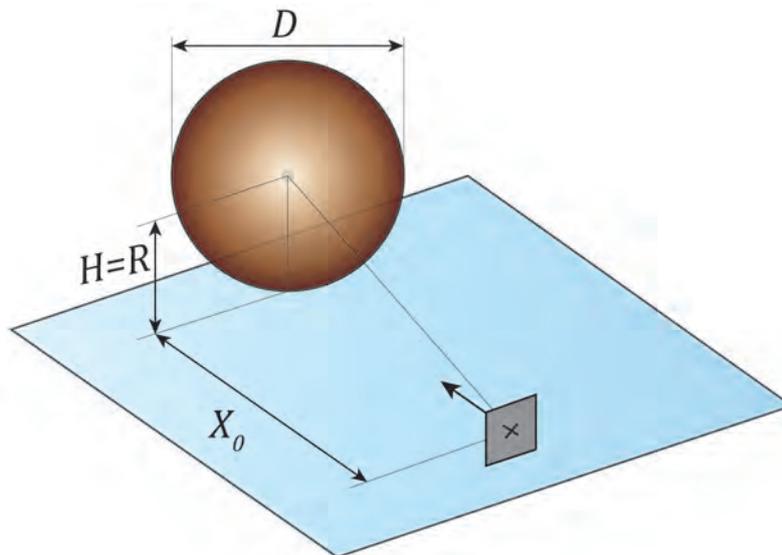


Figura 4.9. Transferencia radiante de una bola de fuego a ras de suelo respecto a un receptor situado sobre un plano vertical. Fuente: Elaboración propia.

$$F_h = \frac{1}{(1 + 4X_d^2)^{3/2}} \quad ; \quad H_d = 1/2 \tag{Ec.4.10}$$

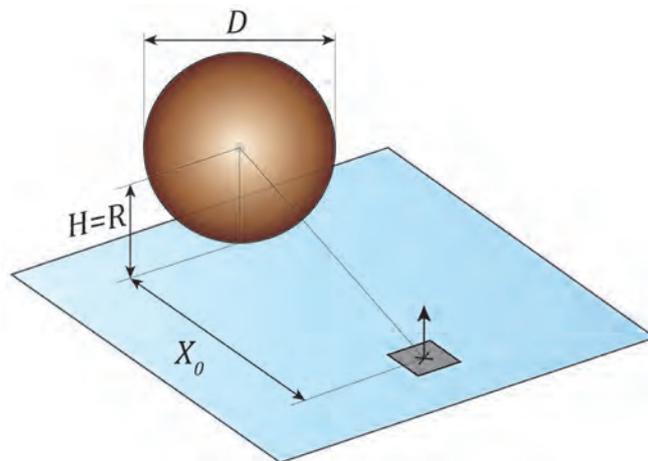


Figura 4.10. Transferencia radiante de una bola de fuego a ras de suelo respecto a un receptor situado sobre un plano horizontal.
Fuente: Elaboración propia.

$$\frac{F_v}{F_h} = 2X_d \quad ; \quad H_d = 1/2 \quad \text{(Ec.4.11)}$$

De esta última expresión, se desprende del sistema en tierra que, para cualquier $X_d > 1/2$, el factor vertical será siempre superior al horizontal, $F_v > F_h$. Por otra parte, el valor máximo del factor de configuración de una bola de fuego (Figura 4.12) viene dado por (Van den Bosch et al., 2005):

$$F_{max} = \left(\frac{R}{d}\right)^2 = \frac{1}{4\left(\left(\frac{X_0}{D}\right)^2 + \left(\frac{H}{D}\right)^2\right)} = \frac{1}{4(X_d^2 + H_d^2)} \quad \text{(Ec.4.12)}$$

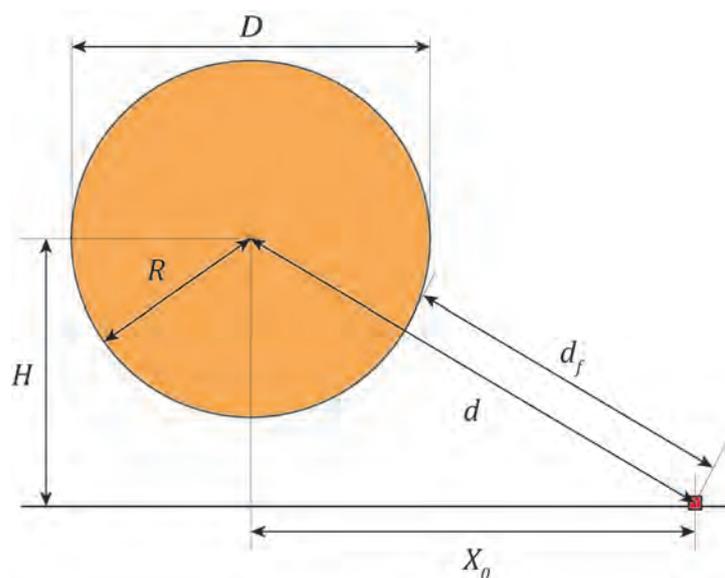


Figura 4.11. Geometría descriptiva para la determinación del factor de configuración máximo de una bola de fuego elevada.
Fuente: Elaboración propia.

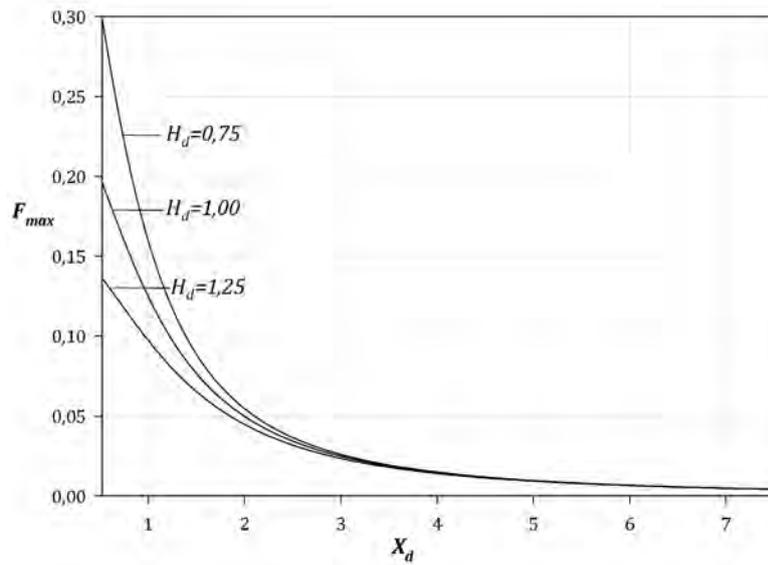


Figura 4.12. Factor de configuración máximo teórico en función de la distancia para distintas elevaciones de la bola.

Para el caso particular de bola a ras de suelo ($H_d=1/2$), la ecuación (Ec.4.12) se transforma en:

$$F_{max} = \left(\frac{R}{d}\right)^2 = \frac{1}{1 + 4\left(\frac{X_0}{D}\right)^2} = \frac{1}{1 + 4X_d^2} \tag{Ec.4.13}$$

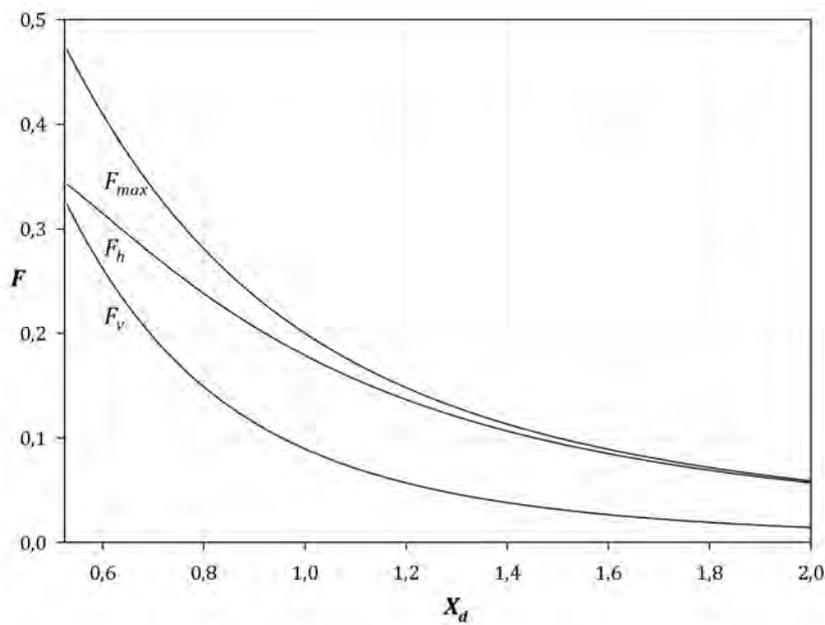


Figura 4.13. Factor de configuración máximo, vertical y horizontal para bola de fuego a ras de suelo.

En la Figura 4.13, se observa como el factor de configuración vertical tiende a cero con mayor rapidez que el factor horizontal, cuya contribución al factor de configuración máximo es mayor.

No se han representado valores superiores del eje X_d , ya que el factor de configuración tiende a cero conforme el receptor se aleja. La Figura 4.14 muestra como varía el factor de configuración horizontal y vertical para distintas alturas de la bola de fuego, donde puede apreciarse la inversión del factor de configuración horizontal comentada anteriormente, algo que no sucede con el factor de configuración vertical.

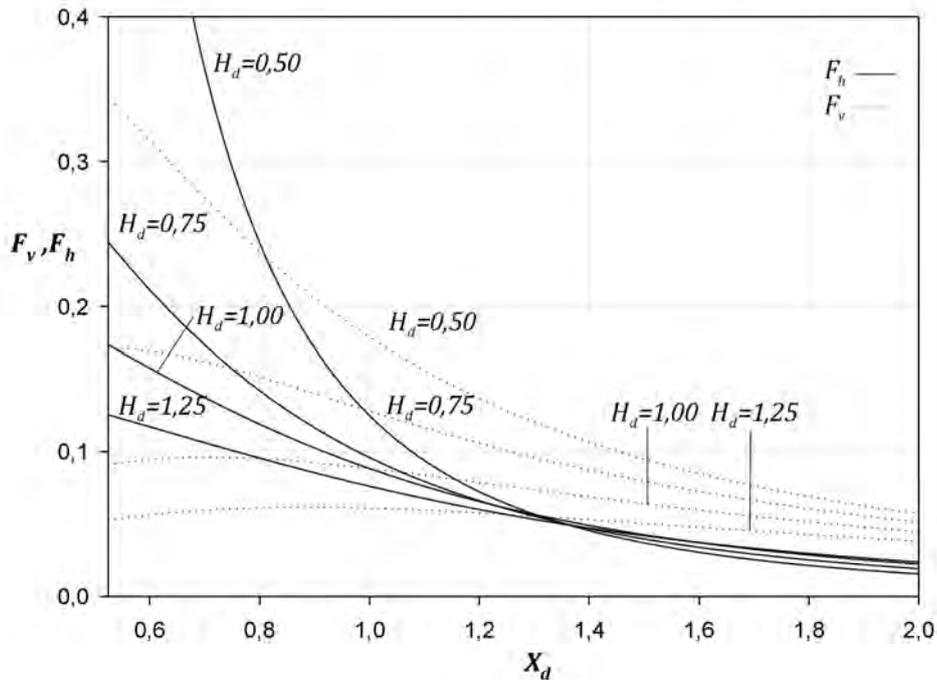


Figura 4.14. Factor de configuración vertical y horizontal para bola de fuego a distintas alturas.

4.2.2. Bola de fuego totalmente oculta

En este caso, el receptor se encuentra completamente bloqueado respecto a la bola de fuego, ya que su visión relativa se encuentra obstaculizada por el muro, de modo que la fracción de energía emitida por la bola de fuego que alcanza al receptor es nula. En estas condiciones, el factor de configuración resultante es cero.

En base a lo anterior se plantea la necesidad de encontrar el lugar geométrico de la barrera que ocasiona un bloqueo total de la visión entre la bola de fuego y el receptor, en función de los parámetros del muro. Se busca determinar el lugar geométrico donde el factor de configuración se anula, es decir, aquellas posiciones del receptor respecto la bola de fuego a partir de las cuales la fracción de energía recibida es cero. Conforme aumenta la altura del muro, la visión relativa bola de fuego-receptor va disminuyendo hasta eclipsarse completamente.

El interés de esta condición geométrica radica en su utilidad para el diseño de barreras de ingeniería que permitan proteger elementos vulnerables de la radiación térmica emitida de una bola de fuego. Posibilita el dimensionamiento de barreras en zonas de exclusión, zonas urbanas consolidadas muy próximas a vías por las que circulan mercancías peligrosas y nuevas urbanizaciones.

El factor de configuración será nulo para aquellos valores de Z_s iguales o mayores a la línea que, partiendo del receptor pasa por el punto (X_w, Z_w) y además es tangente superior a la bola de fuego. Cabe destacar que para una bola de fuego elevada existen dos posibles tangentes. La tangente inferior no nos interesa porque proporciona visibilidad total entre la bola de fuego y el receptor, y su intercambio de energía vendría dado por la ecuación (Ec.4.12). Es decir, se trataría de un muro de reducida elevación cuyo efecto sería irrelevante en términos de protección frente a la radiación térmica. Para valores superiores, la línea de visión entre el receptor y la bola de fuego intercepta la esfera y existe una porción de la misma que es capaz de ver al receptor, transmitiéndose una fracción del total de energía desde el emisor al receptor. Para representar esta situación se ha utilizado un modelo 2D (Figura 4.15):

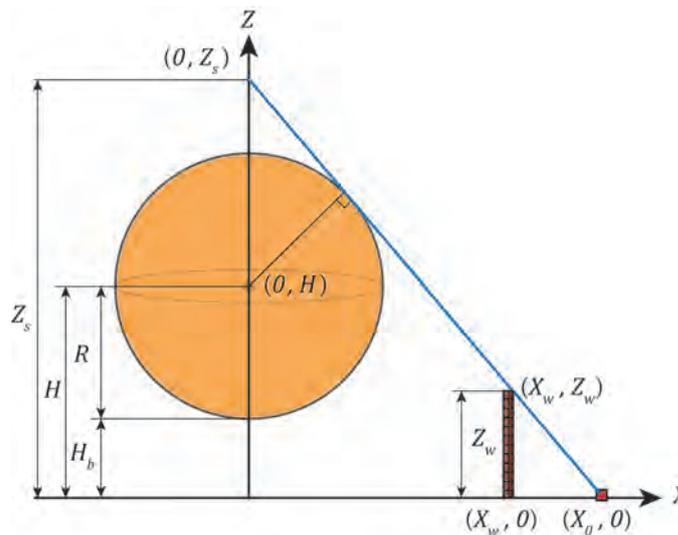


Figura 4.15. Geometría que proporciona visibilidad nula. Fuente: Elaboración propia.

Por tanto, estamos interesados en determinar analíticamente el valor de la ordenada Z_s . Para ello aplicamos principios de geometría euclídea (Figura 4.16):

1. Escribimos la ecuación de la recta que pasa por $(X_0, 0)$ y (X_1, Z_1) .
2. Obtenemos la distancia perpendicular desde el centro de la esfera al punto de tangencia, de donde obtendremos el valor de la pendiente.
3. Escribimos la ecuación de la recta tangente y evaluamos su valor para $Z(x(0))$, obteniendo Z_s .

A continuación se muestra un esquema del proceso de cálculo:

$$Z - Z_1 = m(X - X_0)$$

$$Z - 0 = mX - mX_0$$

$$mX - Z - mX_0 = 0$$

(Ec.4.14)

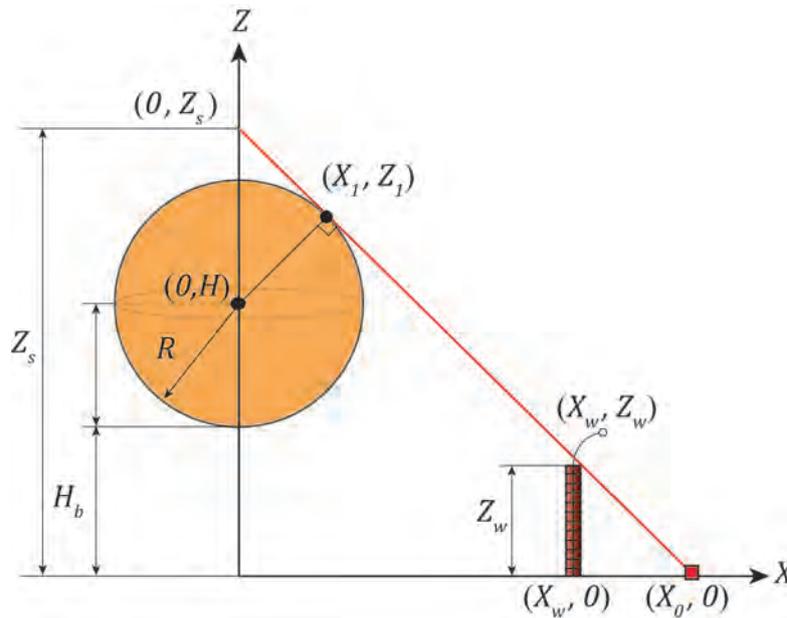


Figura 4.16. Esquema para la determinación analítica de Z_s . Fuente: Elaboración propia.

La distancia perpendicular desde el centro de la esfera a sus tangentes es igual al radio:

$$\frac{|m(0) - mX_o - 1H|}{\sqrt{m^2 + (-1)^2}} = R = \frac{|-mX_o - H|}{\sqrt{m^2 + 1}} = \frac{mX_o + H}{\sqrt{m^2 + 1}} \quad (\text{Ec.4.15})$$

Elevamos al cuadrado ambos términos, multiplicamos ambos lados por (m^2+1) y reordenamos:

$$m^2(X_o^2 - R^2) + m(2X_oH) + (H^2 - R^2) = 0 \quad (\text{Ec.4.16})$$

Esta ecuación es cuadrática en m , cuya solución viene dada por:

$$m = \frac{-X_oH \pm R\sqrt{X_o^2 + H^2 - R^2}}{(X_o^2 - R^2)} \quad (\text{Ec.4.17})$$

Estamos interesados en la pendiente negativa de mayor valor, es decir, la raíz negativa. Ahora podemos escribir la ecuación de la recta tangente:

$$Z = m(X - X_o) = \frac{-X_oH - R\sqrt{X_o^2 + H^2 - R^2}}{(X_o^2 - R^2)}(X - X_o) \quad (\text{Ec.4.18})$$

Y obtenemos el valor de la ordenada en el origen para $Z((X=0))$:

$$Z_s = X_0 \left[\frac{X_0 H + R \sqrt{(X_0^2 + H^2 - R^2)}}{(X_0^2 - R^2)} \right] \quad (\text{Ec.4.19})$$

Desarrollando la ecuación anterior en función de los parámetros del sistema (X_d, H_d) , se obtiene finalmente el parámetro adimensional que caracteriza el lugar geométrico buscado:

$$Z_{sd} = \frac{Z_s}{D} = X_d \left[\frac{4X_d H_d + \sqrt{(4X_d^2 + 4H_d^2 - 1)}}{(4X_d^2 - 1)} \right] \quad (\text{Ec.4.20})$$

Esta ecuación (4.17) es válida para $X_d > 1/2$ y cualquier valor de H_d mayor o igual que cero ya que conforme X_d tiende a $1/2$, la pendiente se inclina y el valor de Z_{sd} crece asintóticamente hacia el infinito. Para un receptor remoto ($X_d \gg 1/2$) el valor de Z_{sd} tiende a $1/2$. En la Figura 4.20 se representa gráficamente la ecuación (Ec.4.20). La ecuación general nos permite ahora determinar el valor de Z_{sd} para algunos casos particulares:

- a. Bola de fuego a ras de suelo ($H_d = 1/2$):

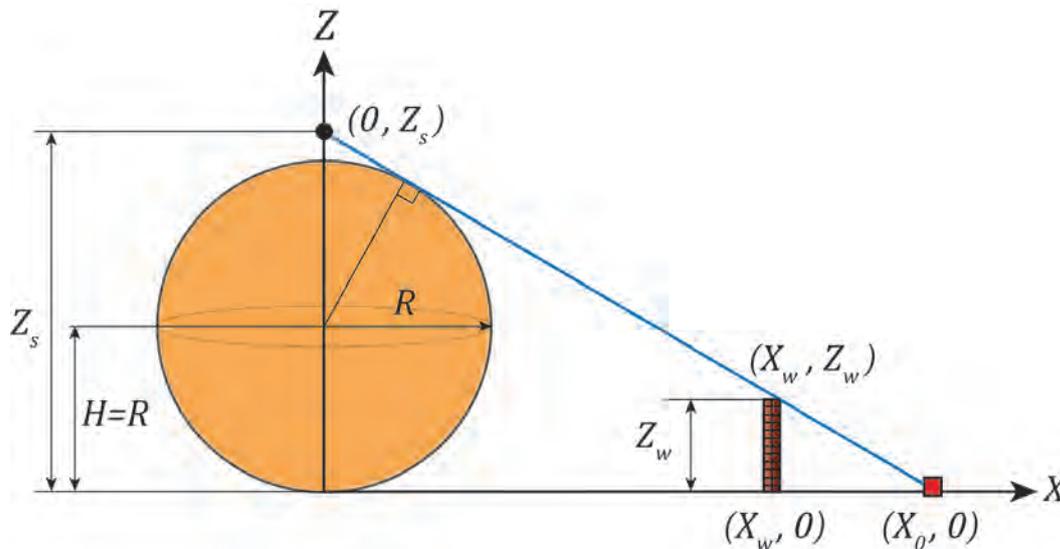


Figura 4.17. Condición de visibilidad nula de una bola de fuego a ras de suelo. Fuente: Elaboración propia.

$$Z_s(H_d = 1/2) = \frac{D}{1 - \left(\frac{1}{2X_d}\right)^2} \quad (\text{Ec.4.21})$$

$$Z_{sd}\left(H_d = \frac{1}{2}\right) = \frac{Z_s\left(H_d = \frac{1}{2}\right)}{D} = \frac{1}{1 - \left(\frac{1}{2X_d}\right)^2} \quad (\text{Ec.4.22})$$

b. Semiesfera en tierra ($H_d=0$):

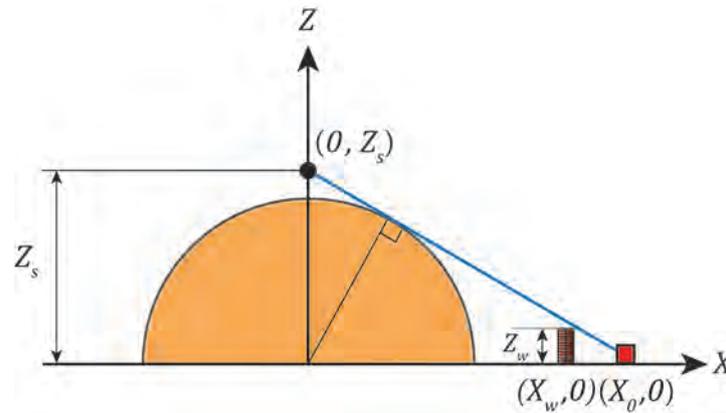


Figura 4.18. Condición de visibilidad nula de una semiesfera en tierra. Fuente: Elaboración propia.

$$Z_s(H_d = 0) = D \frac{X_d}{\sqrt{4X_d^2 - 1}} \tag{Ec.4.23}$$

$$Z_{sd}(H_d = 0) = \frac{Z_s(H_d = 0)}{D} = \frac{X_d}{\sqrt{4X_d^2 - 1}} \tag{Ec.4.24}$$

c. Receptor situado a una distancia igual a la altura de la bola de fuego ($X_d=H_d$):

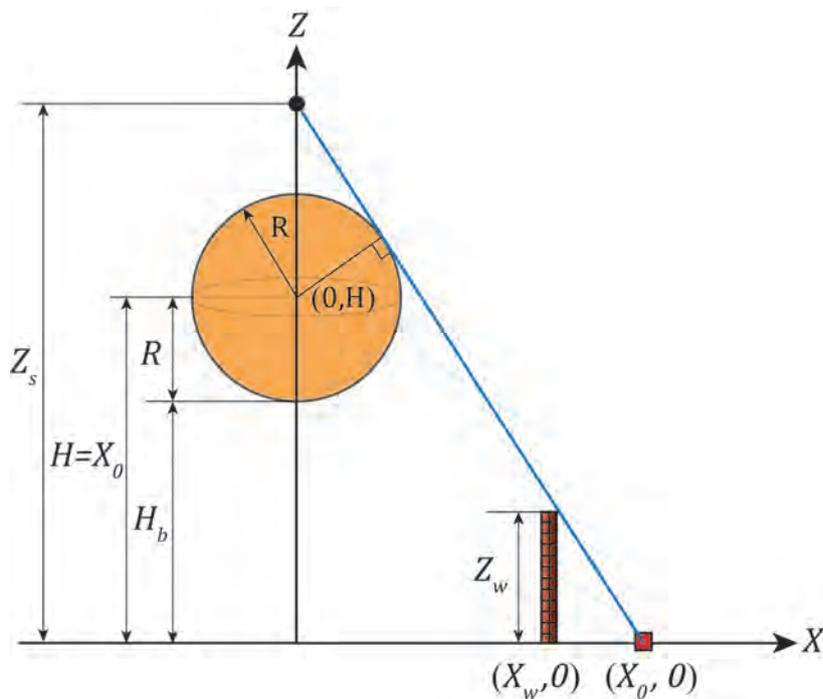


Figura 4.19. Condición de visibilidad nula de una bola elevada con $H=X_0$ o $H_d=X_d$. Fuente: Elaboración propia.

$$Z_s(X_d = H_d) = X_d D \left[\frac{4X_d^2 + \sqrt{8X_d^2 - 1}}{4X_d^2 - 1} \right] \quad (\text{Ec.4.25})$$

$$Z_{sd}(X_d = H_d) = \frac{Z_s(X_d = H_d)}{D} = X_d \left[\frac{4X_d^2 + \sqrt{8X_d^2 - 1}}{4X_d^2 - 1} \right] \quad (\text{Ec.4.26})$$

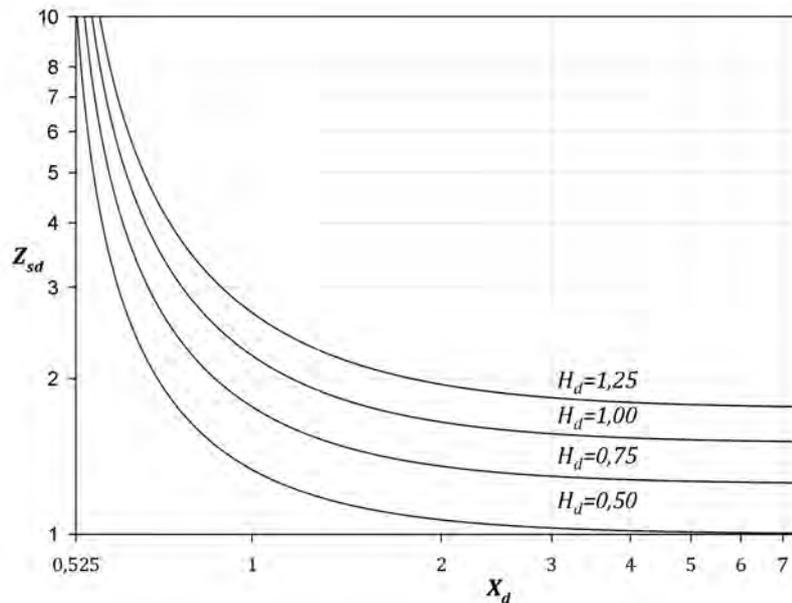


Figura 4.20. Representación del parámetro Z_{sd} que caracteriza el lugar geométrico que proporciona sombra completa.

Fuente: Elaboración propia.

En esta Figura se observa como el lugar geométrico que caracteriza el eclipse completo de la radiación de la bola de fuego por parte del muro adopta valores más elevados para mayores alturas, debido a que la tangente superior se encuentra a mayor cota para bolas elevadas. Las diferencias se acentúan para valores próximos a $X_d = 0,525$, puesto que la tangente se vuelve más vertical. Conforme aumenta X_d , los valores mantienen una separación proporcional, con comportamiento asintótico para X_d elevados. La asintota se corresponde, en cada caso, con la tangente horizontal superior a la esfera. Para una bola de fuego a ras de suelo, se corresponde con 1, que es el valor del diámetro de la bola de fuego.

Se define un nuevo coeficiente, el factor de sombra, que viene determinado por:

$$s = \frac{Z_d}{Z_{sd}} \quad (\text{Ec.4.27})$$

En función de una serie de valores representativos del citado parámetro podemos caracterizar la visibilidad relativa del sistema bola de fuego-receptor.

Cuando $s \geq 1$, el muro eclipsa completamente a la bola de fuego y el factor de configuración es cero. Los casos de ocultación parcial se concentran en la región $0 < s < 1$. Cuando $s = 0$, no existe efecto sombra porque la altura del muro es cero. En la Figura 4.21 se analiza el factor de sombra de una bola de fuego situada en $H_d = 1$ para distintos valores de Z_d . Cuando Z_d es elevado, se aproxima con mayor pendiente al valor $s = 1$. Las curvas que no intersecan con el eje horizontal $s = 1$ representan aquellas configuraciones del muro que posibilitan visibilidad relativa entre emisor y receptor, en menor medida conforme se aproximan a dicho límite. El gráfico también proporciona información de aquellos valores de X_d a partir de los cuales no existe visibilidad, para un cierto valor de Z_d . Por ejemplo, para $Z_d = 1,7$ existe visibilidad parcial para valores de X_d inferiores a 3, y visibilidad nula por encima de dicho valor.

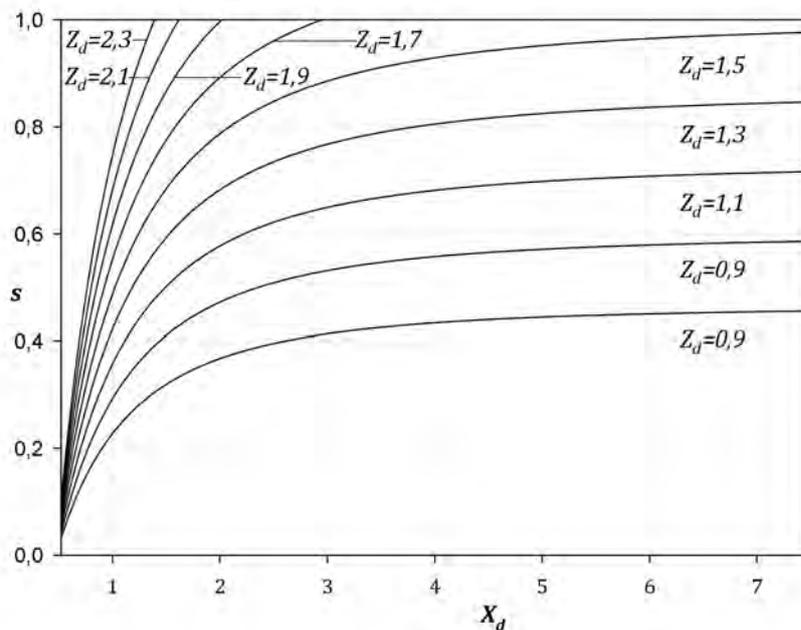


Figura 4.21. Representación del factor de sombra para $H_d = 1$. Fuente: Elaboración propia.

4.3. Soluciones numéricas para casos de ocultación parcial

El caso de ocultación parcial está caracterizado por una bola de fuego en la que parte de la radiación térmica emitida por su superficie es interceptada por un muro, de modo que solo una determinada fracción de energía consigue llegar al receptor.

Por tanto, el propósito de este apartado consiste en cuantificar exactamente qué cantidad de energía recibe el receptor para distintas configuraciones de bola de fuego, muro y receptor. A este respecto, nos basaremos en los principios geométricos descritos en el *Capítulo 3*.

Esta tesis contribuye significativamente al conocimiento de los factores de configuración entre una esfera y un receptor diferencial considerando el efecto de sombra, porque hasta el momento, no hay referencias a esta configuración particular en los catálogos existentes en la literatura.

La determinación de factores de configuración entre cuerpos es de gran importancia en el cálculo del intercambio de calor radiativo, que son utilizados como inputs para cálculos de transferencia de radiación entre superficies y otros similares. En los proyectos de ingeniería relacionados con el proceso, almacenamiento y transporte de sustancias peligrosas, el campo radiante producido por una bola de fuego tiene un gran importancia en la evaluación y análisis de consecuencias. Sin embargo, se dispone de muy pocas soluciones exactas o aproximadas en la literatura para los factores de configuración cuando se consideran superficies de obstrucción. Como se ha comentado en el apartado anterior, se han publicado soluciones analíticas para los factores de configuración entre una superficie esférica y receptores diferenciales (Howell et al., 2015).

Sin embargo, estas formulaciones tienen las siguientes restricciones:

- En casi todos los casos, el factor de configuración entre una esfera y una superficie diferencial se limita al caso en el que el receptor tiene visibilidad completa respecto a la esfera.
- En todos los casos de visibilidad nula, no se consideran los efectos de interferencia inducidos por una superficie opaca intermedia. Se limita a aquellos casos en los que una superficie no puede ver completamente a la otra en virtud de su posición geométrica relativa (CCPS, 2010; Beyler, 2016). Estos casos particulares de visibilidad nula no representan la obstrucción causada por una superficie que se estudia en esta tesis, sino que es la propia inclinación del receptor la que no permite ver completamente la bola de fuego. De ello se deduce que no existe un efecto de barrera, sino una sombra inducida por la propia superficie y su orientación geométrica respecto al receptor.

Por tanto, las soluciones analíticas o numéricas para el factor de configuración entre una esfera y un receptor diferencial cuando está presente una superficie intermedia (es decir, un muro) no están todavía disponibles en la bibliografía. En este apartado se presentan, en forma tabular y gráfica, las soluciones numéricas del factor de configuración para diferentes posiciones relativas entre la bola de fuego y el muro. Los modelos actuales no consideran el efecto de sombra de muros, colinas, acantilados o estructuras similares, sobrestimando la vulnerabilidad por radiación térmica. Con estas nuevas soluciones se posibilita el estudio de nuevos escenarios de aplicación directa y real en la industria de procesos.

El factor de configuración entre un elemento diferencial de área y una superficie finita viene representado en la Figura 4.1, y puede obtenerse mediante balances de energía (Ec.4.1).

Sin embargo, mediante ese procedimiento no es posible resolver analíticamente el problema, por lo que es necesario recurrir a técnicas numéricas. El algoritmo utilizado en esta tesis para determinar el factor de configuración entre un elemento diferencial y una esfera fue desarrollado por (Hankinson, 1986), con el fin de calcular factores de configuración existentes entre distintos tipos de llamas y un receptor, para una amplia gama de geometrías involucradas en incendios de gran escala. La técnica utilizada es un método numérico de integración de área (Apartado 2.2.2) entre una superficie emisora y un receptor diferencial, que permite solventar las dificultades existentes en la resolución analítica de la ecuación (Ec.4.1).

La aplicación de este método al caso particular de una bola de fuego consiste, en primer lugar, en definir una esfera, que es la geometría de la llama en este caso. La resolución numérica se lleva a cabo caracterizando la superficie emisora mediante elementos triangulares (Figura 4.22), que son referenciados respecto a un sistema de coordenadas, mediante un conjunto de puntos o vértices y otro de caras. A pesar de que la integración numérica del factor de configuración puede llevarse a cabo dividiendo la esfera en elementos de cualquier geometría, es preferible utilizar triángulos, ya que permiten el modelado de cualquier geometría de llama, como es el caso de cilindros, conos, esferas u otras formas irregulares, en caso de que puedan ser definidas matemáticamente. Además, este método simplifica en gran medida su implementación en ordenador.

Cada vértice está constituido por las coordenadas xyz que definen su posición en el espacio, mientras que una cara está constituida por el conjunto de tres vértices que definen un plano en el espacio, es decir un elemento triangular. Así, se pueden definir los factores de configuración para cada elemento triangular mediante:

$$F_i = \begin{cases} \frac{\cos\theta_i \cos\theta_2}{\pi r_i^2} A_i, & \forall \theta_i \wedge \theta_2 \leq 90^\circ \\ 0, & \forall \theta_i \wedge \theta_2 > 90^\circ \end{cases} \quad (\text{Ec.4.28})$$

En esta ecuación:

A_i : Área del triángulo i .

r_i : Línea de unión entre la cara del triángulo y el receptor.

θ_i : Ángulo de visión del elemento triangular i , formado entre su normal y la línea de unión r_i .

θ_2 : Ángulo de visión del receptor, formado entre su normal y la línea de unión r_i .

La condición anterior indica que los dos ángulos deben ser menores o iguales a 90° con el fin de diferenciar entre los elementos que son vistos por el receptor y los que no lo son. Se obtiene entonces el factor de configuración global teniendo en cuenta la contribución individual de cada elemento:

$$F_{dA_2-A_1} = \sum_{i=1}^N F_i = \sum_{i=1}^N \frac{\cos\theta_i \cos\theta_2}{\pi r_i^2} A_i \quad (\text{Ec.4.29})$$

El desarrollo matemático subsiguiente se basa en cálculo vectorial, una vez definidas la posición espacial de la bola de fuego y la orientación del objetivo, como se muestra en la Figura 4.22. La precisión del método depende de la cantidad de elementos de la llama (N_e). Un mayor número de elementos implica un menor tamaño de las caras que forman la llama, de manera que se obtiene una mayor precisión. Otro factor a considerar es la separación entre el emisor y el receptor. Cuanto menor sea la distancia mayor debe ser el número de elementos para lograr una precisión aceptable.

El receptor es caracterizado por su posición en el espacio y su orientación. Para determinar el área del triángulo se utiliza el producto de dos vectores que definen dos aristas del triángulo, definidos a partir de sus vértices.

$$\vec{v} = (v_x, v_y, v_z) = (P_{i3} - P_{i1}) = [(P_{i3-x} - P_{i1-x}), (P_{i3-y} - P_{i1-y}), (P_{i3-z} - P_{i1-z})] \quad (\text{Ec.4.30})$$

$$\vec{w} = (w_x, w_y, w_z) = (P_{i2} - P_{i1}) = [(P_{i2-x} - P_{i1-x}), (P_{i2-y} - P_{i1-y}), (P_{i2-z} - P_{i1-z})]$$

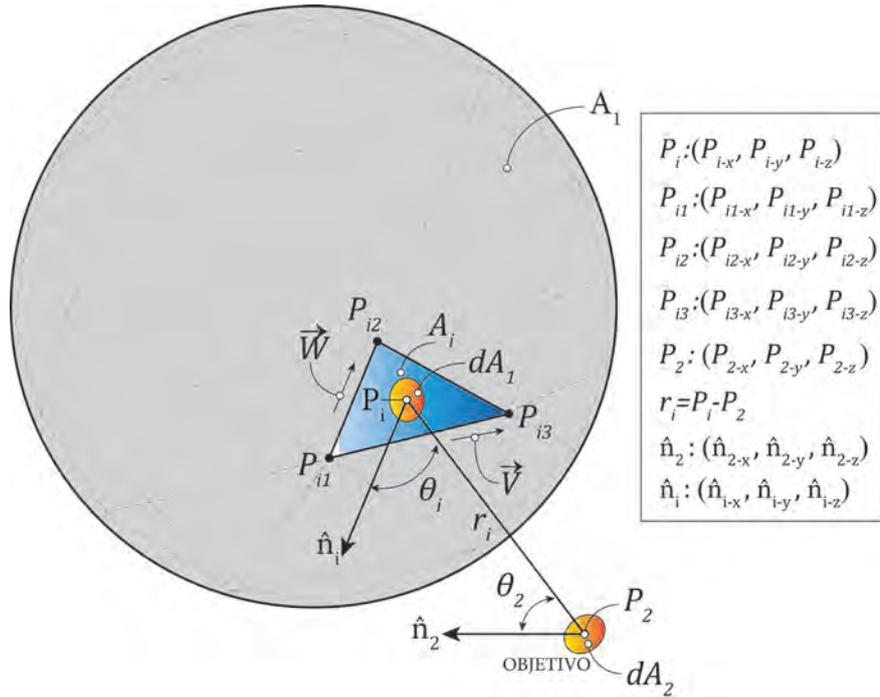


Figura 4.22. Descomposición de la superficie en elementos triangulares. Fuente: Hankinson, 1986.

$$A_i = \frac{|\vec{v} \times \vec{w}|}{2} = \frac{\sqrt{[(v_y w_z - v_z w_y)^2 + (v_z w_x - v_x w_z)^2 + (v_x w_y - v_y w_x)^2]}}{2} \quad (\text{Ec.4.31})$$

La longitud de la línea que une el centro del triángulo y el receptor se puede expresar en términos de la posición de los puntos inicial y final del mismo:

$$r_{2i} = (r_{2i-x}, r_{2i-y}, r_{2i-z}) = [(P_{i-x} - P_{2-x}), (P_{i-y} - P_{2-y}), (P_{i-z} - P_{2-z})] \quad (\text{Ec.4.32})$$

P_i es el centro del triángulo i y viene dado por:

$$P_i = (P_{i-x}, P_{i-y}, P_{i-z}) = \left[\frac{(P_{i1-x} + P_{i2-x} + P_{i3-x})}{3}, \frac{(P_{i1-y} + P_{i2-y} + P_{i3-y})}{3}, \frac{(P_{i1-z} + P_{i2-z} + P_{i3-z})}{3} \right] \quad (\text{Ec.4.33})$$

A partir de dicha expresión la longitud del vector r_{2i} se calcula mediante:

$$r_{2i} = |r_{2i}| = \sqrt{(r_{2i-x}^2 + r_{2i-y}^2 + r_{2i-z}^2)} \quad (\text{Ec.4.34})$$

Para determinar los ángulos de visión θ_i y θ_2 se definen los siguientes vectores unitarios:

$$\begin{aligned} \bar{r}_{2i} &= \left(\frac{r_{2i-x}}{r_i}, \frac{r_{2i-y}}{r_i}, \frac{r_{2i-z}}{r_i} \right) = \left(\frac{P_{i-x} - P_{2-x}}{r_i}, \frac{P_{i-y} - P_{2-y}}{r_i}, \frac{P_{i-z} - P_{2-z}}{r_i} \right) \\ \bar{r}_{i2} = -\bar{r}_{2i} &= \left(-\frac{r_{2i-x}}{r_i}, -\frac{r_{2i-y}}{r_i}, -\frac{r_{2i-z}}{r_i} \right) = \left(\frac{P_{2-x} - P_{i-x}}{r_i}, \frac{P_{2-y} - P_{i-y}}{r_i}, \frac{P_{2-z} - P_{i-z}}{r_i} \right) \end{aligned} \quad (\text{Ec.4.35})$$

La normal del elemento triangular puede calcularse de una forma similar a la utilizada para obtener A_i , mediante el siguiente producto de vectores:

$$\bar{n}_i = \frac{\bar{v} \times \bar{w}}{|\bar{v} \times \bar{w}|} = \left[\left(\frac{v_y w_z - v_z w_y}{2A_i}, \frac{v_z w_x - v_x w_z}{2A_i}, \frac{v_x w_y - v_y w_x}{2A_i} \right) \right] \quad (\text{Ec.4.36})$$

Por su parte, la normal del receptor:

$$\bar{n}_2 = (n_{2-x}, n_{2-y}, n_{2-z}) \quad (\text{Ec.4.37})$$

Finalmente, los valores de los ángulos de visión se obtienen por producto escalar de los vectores unitarios:

$$\begin{aligned} \cos\theta_2 &= \bar{n}_2 \times \bar{r}_{2i} = \left[\frac{n_{2-x}(P_{i-x} - P_{2-x})}{r_i} + \frac{n_{2-y}(P_{i-y} - P_{2-y})}{r_i} + \frac{n_{2-z}(P_{i-z} - P_{2-z})}{r_i} \right] \\ \cos\theta_i &= \bar{n}_i \times \bar{r}_{i2} = \left[\frac{(v_y w_z - v_z w_y)(P_{2-x} - P_{i-x})}{2A_i r_i} + \frac{(v_z w_x - v_x w_z)(P_{2-y} - P_{i-y})}{2A_i r_i} + \frac{(v_x w_y - v_y w_x)(P_{2-z} - P_{i-z})}{2A_i r_i} \right] \end{aligned} \quad (\text{Ec.4.38})$$

Con el desarrollo anterior, se dispone de las expresiones explícitas de todos los elementos que integran la ecuación (Ec.4.1).

El efecto sombra inducido por una tercera superficie se modela mediante una técnica de trazado de rayos, como se ha descrito en el Capítulo 2 (Apartado 2.4), en combinación con el algoritmo anterior. En este caso, el algoritmo utilizado es el propuesto por (Badouel, 1990), que describe un método sencillo de implementar y altamente eficiente para determinar cuando una línea interseca a un triángulo en el espacio. La aplicación de este método se encuentra limitada a polígonos convexos.

La Figura 4.23 muestra un esquema del algoritmo utilizado para determinar el factor de configuración para la geometría particular de una bola de fuego obstruida por un polígono convexo.

Se comienza por dividir la esfera en n triángulos, calculando las propiedades de cada triángulo resultante. Posteriormente, se trazan las líneas que conectan el centro de cada triángulo con el receptor diferencial, con el fin de determinar sus respectivos ángulos de visión. Con esta información ya estamos en condiciones de determinar si ambas superficies son capaces de verse mutuamente, en virtud de su posición relativa en el espacio.

Si los ángulos formados son superiores a 90 grados, emisor y receptor no se ven, de modo que ese triángulo es descartado para calcular el factor de configuración. En la Figura 4.24 pueden apreciarse algunos triángulos grises que cumplen dicha condición. Si por el contrario, los ángulos son inferiores o iguales a 90 grados, emisor y receptor se ven, por lo que dicho triángulo será considerado para aplicar el algoritmo ray-tracing.

A continuación se procede a comprobar si las líneas que parten del emisor al receptor intersecan al obstáculo. Como puede apreciarse en la Figura 4.24, los triángulos sombreados de color rojo no logran superar el muro, por lo que su contribución no será tomada en cuenta para el cálculo del factor de configuración, puesto que el factor individual para ese triángulo es cero. Las líneas que parten de los triángulos sombreados de color verde pasan por encima del muro y llegan al receptor.

Entonces el factor de configuración individual de ese triángulo se determina a partir de los cosenos de los ángulos de visión, su área y la distancia que lo separa del receptor. Se realiza la misma operación para todos los triángulos cuyas líneas de visión sobrepasan el muro sin intersecarlo. Finalmente, el factor de configuración se obtiene sumando la contribución de los factores de configuración individuales de cada triángulo.

Seguidamente, se expone el desarrollo matemático del algoritmo ray-tracing utilizado, que se basa en el trabajo de (Badouel, 1990).

La representación matemática del rayo viene determinada por la siguiente ecuación:

$$r(\chi) = O + \chi \cdot \overline{PO} \quad (\text{Ec.4.39})$$

Como puede observarse en la Figura 4.25, conforme la distancia fraccional λ se mueve desde el punto O a lo largo del vector PO alcanza el punto P . En efecto, $r(0)=O$ y $r(1)=P$. Para calcular la trayectoria de un rayo debemos conocer P y O .

Dependiendo del sistema de coordenadas utilizado, el punto P puede ser determinado mediante distintos métodos de geometría analítica. El triángulo T está formado por tres vértices V_i , consistentes en tres aristas V_0V_1 , V_0V_2 y V_1V_2 . Su normal se define como:

$$\vec{n} = \overline{V_0V_1} \times \overline{V_0V_2} \tag{Ec.4.40}$$

El plano que contiene al triángulo $T(V_0V_1V_2)$ puede ser definido como un conjunto de puntos, que cumplen:

$$\vec{n} \cdot (P - V_0) = 0 = \vec{n} \cdot P - V_0 \cdot \vec{n} = \vec{n} \cdot P - t = AP_x + AP_y + AP_z - t \tag{Ec.4.41}$$

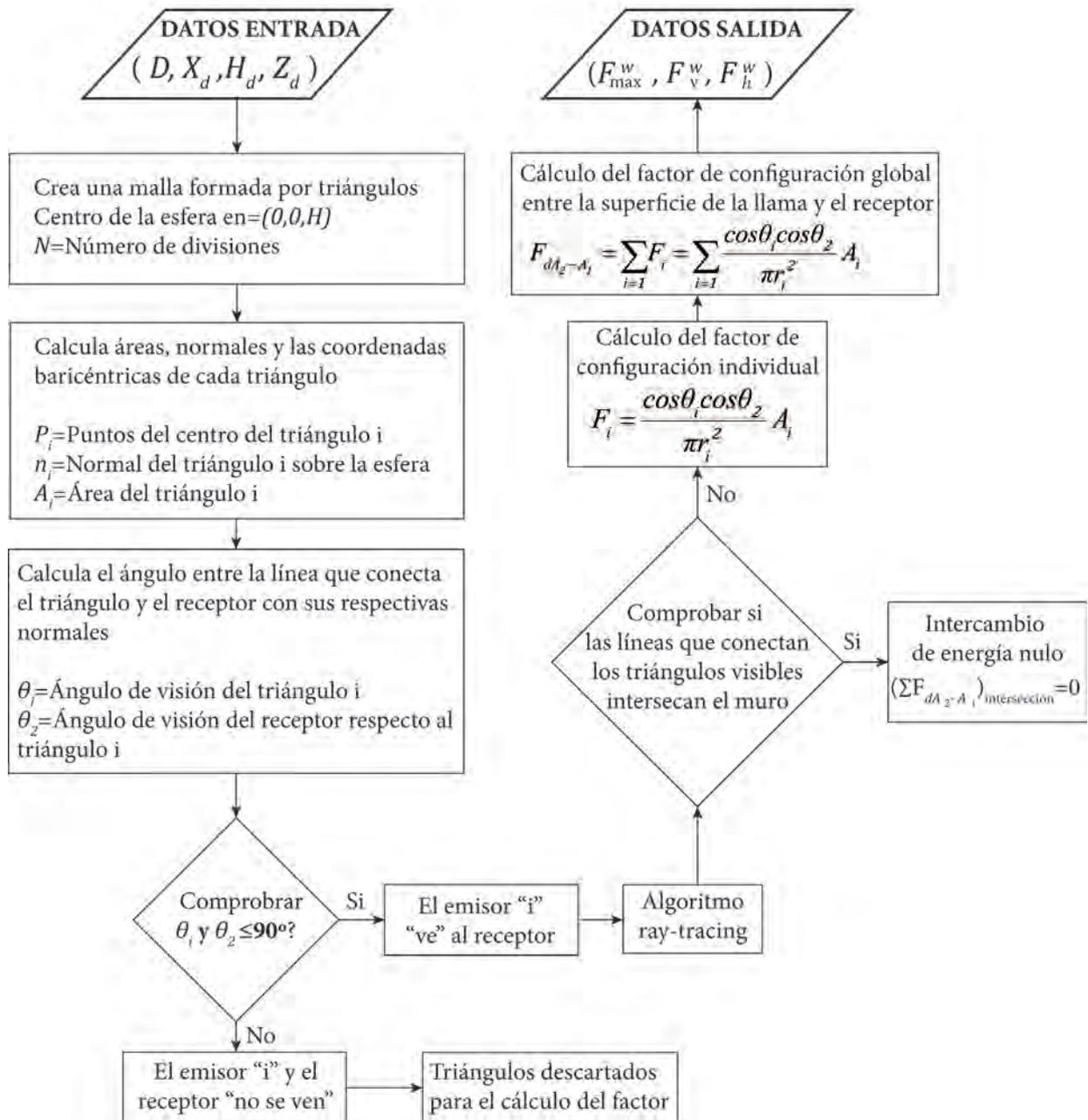


Figura 4.23. Algoritmo para el cálculo del factor de configuración entre una bola de fuego y un receptor diferencial con efecto sombra. Fuente: Elaboración propia.

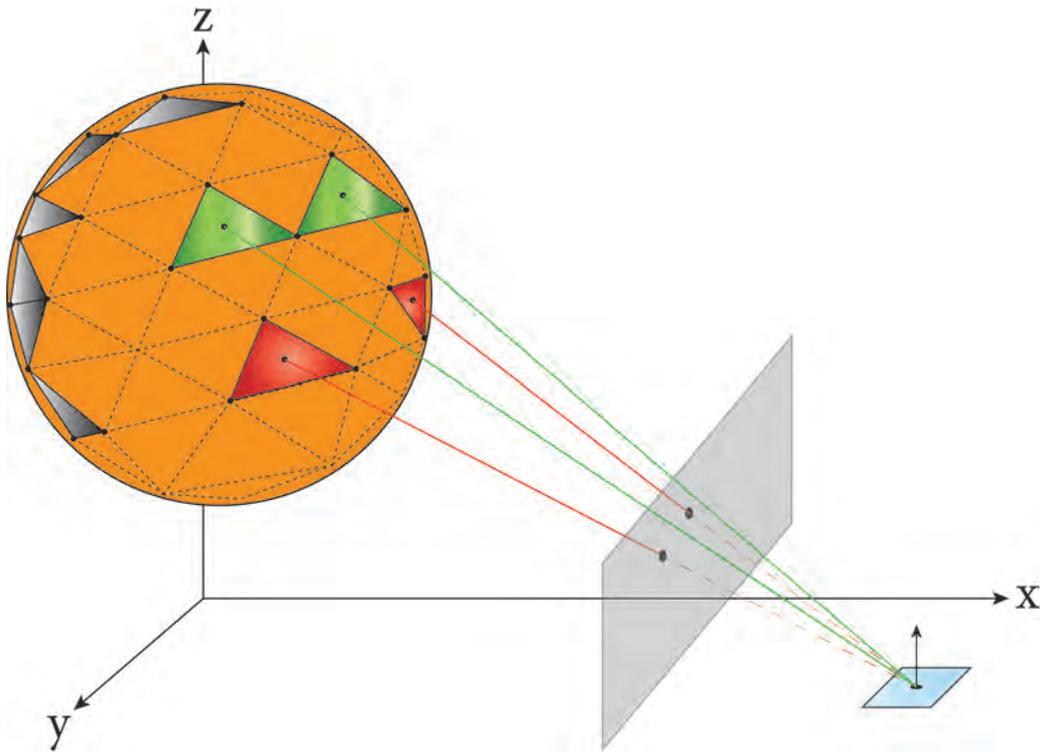


Figura 4.24. Trazado de rayos entre una bola de fuego y un receptor situado en un plano horizontal. Fuente: Elaboración propia.

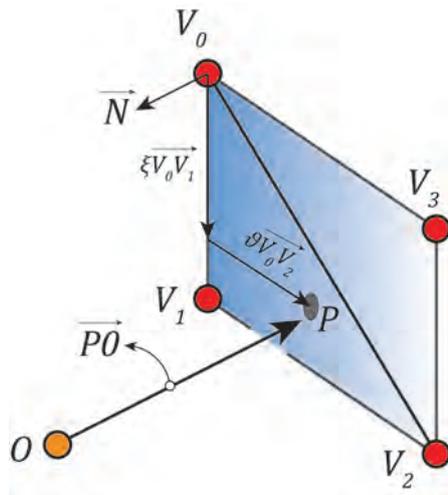


Figura 4.25. Algoritmo “ray tracing” de Badouel.

Encontrar el punto de intersección del rayo dentro del triángulo T se reduce a encontrar el valor para χ para los que $r(\chi)$ se encuentra en la superficie del triángulo, que viene dado por:

$$\vec{n} \cdot r(\chi) - t = 0 = \vec{n} \cdot (O + \vec{K} \chi) - t \tag{Ec.4.42}$$

Resolviendo para λ se obtiene:

$$\chi = -\frac{t + \vec{n} \cdot O}{\vec{n} \cdot \vec{K}} \tag{Ec.4.43}$$

Si el producto del denominador de la ecuación (Ec.4.43) es cero, el rayo es paralelo al plano, y no hay un punto de intersección único. Por lo tanto se rechaza la intersección. Otro caso posible es que $\chi \leq 0$, lo que significa que la intersección se encuentra detrás del punto de origen, de modo que la intersección es rechazada de nuevo.

En el caso de $\chi > 0$, existe un punto de intersección con el plano que contiene al triángulo. Además de eso, es necesario comprobar χ para valores pequeños, porque un rayo que se origina en la superficie de un triángulo situado en la esfera podría auto-intersecarse consigo mismo.

Ahora hay que determinar si el punto de intersección con el plano que contiene al triángulo se encuentra dentro de los límites del triángulo. Cualquier punto en el triángulo cumple que:

$$\overline{V_0 P} = \xi \overline{V_0 V_1} + \vartheta \overline{V_0 V_2} \quad (\text{Ec.4.44})$$

El punto P se encuentra situado dentro del triángulo si se verifica que: $\vartheta \geq 0$, $\xi \geq 0$, y $\vartheta + \xi \leq 1$, donde (ϑ, ξ) son las coordenadas baricéntricas del triángulo. La ecuación anterior puede ser reescrita como un conjunto de ecuaciones:

$$P_x - \overline{V_{0x}} = \xi (\overline{V_{1x}} - \overline{V_{0x}}) + \vartheta (\overline{V_{2x}} - \overline{V_{0x}}) \quad (\text{Ec.4.45})$$

$$P_y - \overline{V_{0y}} = \xi (\overline{V_{1y}} - \overline{V_{0y}}) + \vartheta (\overline{V_{2y}} - \overline{V_{0y}}) \quad (\text{Ec.4.46})$$

$$P_z - \overline{V_{0z}} = \xi (\overline{V_{1z}} - \overline{V_{0z}}) + \vartheta (\overline{V_{2z}} - \overline{V_{0z}}) \quad (\text{Ec.4.47})$$

Para simplificar, se proyecta el triángulo en uno de los planos principales XY , XZ o YZ . Después de esta proyección, la coordenada baricéntrica del triángulo permanece constante. Por lo tanto, un problema 3D se convierte en uno más simple 2D que tiene una solución eficiente. Para implementar este algoritmo, el plano seleccionado debe evitar una proyección degenerada, es decir, garantizar que no se proyecta el triángulo en un plano perpendicular al mismo. Si esto sucediera, la proyección resultante sería una línea. Esto se hace mediante la exclusión de la coordenada que tiene la componente más grande en el plano normal al vector N y proyectando el triángulo en el plano perpendicular a dicho eje. Por lo tanto, el área proyectada es la más grande posible, evitando errores numéricos. Luego, tomando el eje X como el dominante, la proyección sobre el plano YZ resulta:

$$P_y - \overline{V_{0y}} = \xi (\overline{V_{1y}} - \overline{V_{0y}}) + \vartheta (\overline{V_{2y}} - \overline{V_{0y}}) \quad (\text{Ec.4.48})$$

$$P_z - \overline{V_{0z}} = \xi (\overline{V_{1z}} - \overline{V_{0z}}) + \vartheta (\overline{V_{2z}} - \overline{V_{0z}}) \quad (\text{Ec.4.49})$$

Este resultado puede ser generalizado, computando y almacenando un índice i_0 de tal manera que:

$$i_0 = \begin{cases} 0 & \text{if } |\vec{n}_x| = \max(|\vec{n}_x|, |\vec{n}_y|, |\vec{n}_z|) \\ 1 & \text{if } |\vec{n}_y| = \max(|\vec{n}_x|, |\vec{n}_y|, |\vec{n}_z|) \\ 2 & \text{if } |\vec{n}_z| = \max(|\vec{n}_x|, |\vec{n}_y|, |\vec{n}_z|) \end{cases} \quad (\text{Ec.4.50})$$

Por otra parte, proyectando los vectores V_0P , V_0V_1 y V_1V_2 resultan tres vectores tridimensionales (a , b , c) en el plano de proyección, donde (s, u) son las coordenadas bidimensionales del vector en este plano:

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} P_{i_1} - V_{0i_1} \\ P_{i_2} - V_{0i_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_0 \\ u_0 \end{pmatrix}; \quad \vec{b} = \begin{pmatrix} V_{1i_1} - V_{0i_1} \\ V_{1i_2} - V_{0i_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_1 \\ u_1 \end{pmatrix}; \quad \vec{c} = \begin{pmatrix} V_{2i_1} - V_{0i_1} \\ V_{2i_2} - V_{0i_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_2 \\ u_2 \end{pmatrix} \quad (\text{Ec.4.51})$$

Por lo tanto, la ecuación (Ec.4.44) puede reescribirse como:

$$\vec{a} = \xi \vec{b} + \vartheta \vec{c} \quad (\text{Ec.4.52})$$

$$\begin{pmatrix} s_1 & s_2 \\ u_1 & u_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi \\ \vartheta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_0 \\ u_0 \end{pmatrix} \quad (\text{Ec.4.53})$$

Resolviendo esta ecuación matricial por medio de la regla de Cramer, las soluciones para ϑ y ξ vienen dadas por:

$$\xi = \frac{\begin{vmatrix} s_0 & s_2 \\ u_0 & u_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} s_1 & s_2 \\ u_1 & u_2 \end{vmatrix}}; \quad \vartheta = \frac{\begin{vmatrix} s_1 & s_0 \\ u_1 & u_0 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} s_1 & s_2 \\ u_1 & u_2 \end{vmatrix}} \quad (\text{Ec.4.54})$$

A partir de estas soluciones, se puede comprobar si el punto de intersección pertenece al triángulo, ecuación (Ec.4.44). Finalmente se procede a la suma de factores mediante la Ec.4.29.

4.3.1. Bola de fuego a ras de suelo

A partir del método desarrollado en el apartado anterior, se han llevado a cabo distintos cálculos para el caso particular de una bola de fuego a ras de suelo. Los resultados obtenidos se muestran en Figura 4.27, y corresponden al factor de configuración máximo (F_{max}^w), en un gráfico doble logarítmico para una mejor representación de los datos.

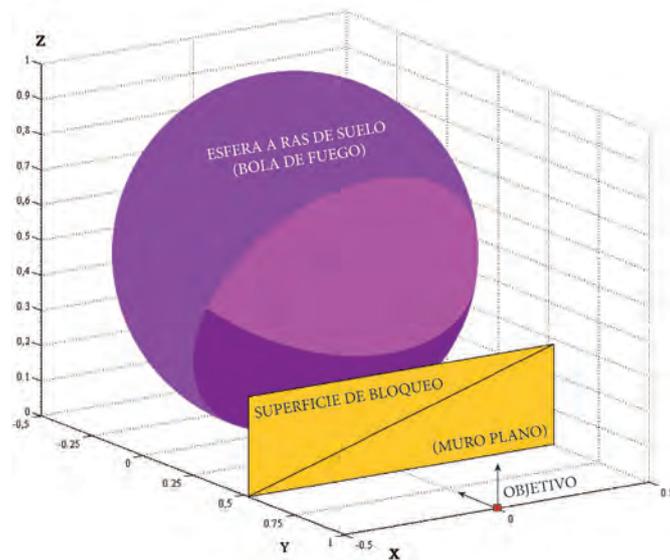


Figura 4.26. Representación del escenario para la determinación numérica del factor de configuración de una bola de fuego a ras de suelo. Fuente: MATLAB, elaboración propia.

Como se ha puesto de manifiesto en el *Capítulo 3*, muros con distintas alturas y distancias de separación al receptor pueden inducir un mismo efecto sombra, correspondiéndose con un mismo factor de configuración. Por este motivo, el muro se ha situado en una posición que permita variar su altura sin intersecar a la esfera y al mismo tiempo poder calcular el factor de configuración a lo largo del eje X_d . En base a ello, la coordenada seleccionada para situar el muro es $0,525 \cdot D$, equivalente a $1,05 \cdot R$. En cuanto a la posición del receptor, los valores se han calculado desde $X_d = 0,55$, que corresponde a un receptor ligeramente desplazado de la posición del muro. Con este sencillo planteamiento, el cálculo matemático del factor de configuración para distintas alturas de muro y posiciones del receptor se puede llevar a cabo dejando fija la posición del muro en el eje X_d .

En cuanto al valor superior de X_d , autores como (Crawley, 1982; Baker et al., 1983, Birk, 1996) consideran suficientemente segura, para bolas de fuego de gases licuados del petróleo, una distancia mínima de $4R$ ($X_d = 2$). Este valor considera que los intervinientes están equipados con equipos de protección personal. Para la población en general, sugieren una distancia entre $15-30R$ ($7,5 \leq X_d \leq 15$), siendo el valor de $30R$ muy conservador, especialmente para volúmenes inferiores a 5 m^3 . En el ámbito de esta tesis, el valor máximo de X_d ha sido fijado en $7,5$, equivalente a $15R$.

Como se aprecia en la Figura 4.26, un muro con una anchura equivalente al diámetro de la esfera y altura variable se sitúa justo fuera de la proyección vertical del radio de la esfera, interponiéndose delante de un receptor diferencial y bloqueando parte de la radiación emitida por la esfera. En color magenta más claro se representa la fracción de superficie de la esfera que es visible por parte del receptor. El comportamiento del sistema mantiene cierta similitud con el modelo de decaimiento exponencial, aunque la ley no se cumple por completo, ya que el factor de configuración no puede obtenerse multiplicando el anterior por un coeficiente constante inferior a 1. La correlación de los datos es aproximadamente lineal hasta $Z_d \approx 0,8$.

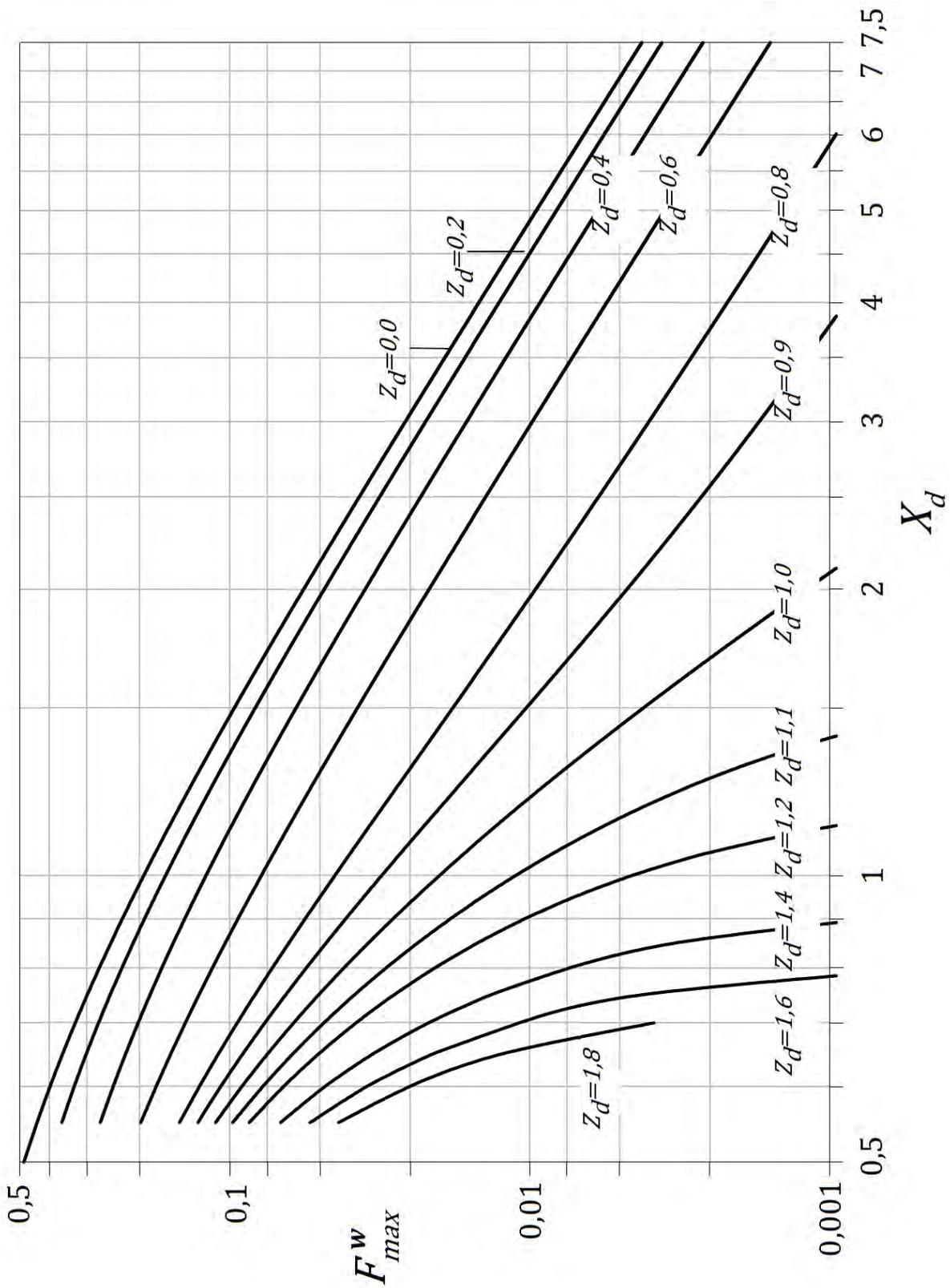


Figura 4.27. Factores de configuración para una bola de fuego a ras de suelo bajo diversas configuraciones de bloqueo. ($N_e=2500$). Fuente: Elaboración propia.

Para valores de Z_d superiores a 0,8, la influencia del muro se torna más importante, de manera que el factor disminuye fuertemente. Cuando la altura del muro es cero, no existe obstrucción, y el factor de configuración obtenido numéricamente puede compararse con el valor analítico, proporcionado por la ecuación (Ec.4.12). De esta manera, incluso con un número relativamente pequeño de elementos triangulares, el algoritmo utilizado proporciona un error inferior al 0,05% (ver Tabla 4.1).

Tabla 4.1. Error relativo proporcionado por el método numérico.

N_e	ε (%)
100	$3,32 \cdot 10^{-2}$
500	$1,32 \cdot 10^{-3}$
1000	$3,31 \cdot 10^{-4}$
2000	$8,25 \cdot 10^{-5}$
3000	$3,67 \cdot 10^{-5}$
4000	$2,06 \cdot 10^{-5}$
5000	$1,82 \cdot 10^{-5}$
6000	$1,26 \cdot 10^{-5}$

Las Tablas 4.2 y 4.3 muestran, respectivamente, los factores de configuración para receptores diferenciales situados sobre superficies verticales y horizontales, obtenidos utilizando $N_e=2500$ elementos.

Tabla 4.2. Factores de configuración verticales, F_v^w , para una bola de fuego a ras de suelo ($N_e=2500$).

Z_d	X_d									
	0,55	0,75	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	7,5
0,0	0,3348	0,2560	0,1788	0,0570	0,0266	0,0152	0,0098	0,0069	0,0051	0,0044
0,2	0,2423	0,2008	0,1460	0,0483	0,0227	0,0130	0,0084	0,0059	0,0043	0,0038
0,4	0,1492	0,1336	0,1011	0,0348	0,0165	0,0095	0,0061	0,0043	0,0032	0,0028
0,6	0,0907	0,0823	0,0619	0,0209	0,0098	0,0056	0,0036	0,0026	0,0019	0,0016
0,8	0,0570	0,0482	0,0329	0,0090	0,0040	0,0022	0,0014	0,0010	0,0007	0,0006
0,9	0,0459	0,0363	0,0222	0,0044	0,0017	0,0009	0,0005	0,0004	0,0003	0,0002
1,0	0,0373	0,0269	0,0138	0,0011	0,0001	4,6E-5	1,5-E5	6,5E-6	3,0E-6	2,1E-6
1,1	0,0307	0,0195	0,0074	0						
1,2	0,0254	0,0138	0,0029							
1,4	0,0179	0,0060								
1,6	0,0129	0,0017								
1,8	0,0095									

Tabla 4.3. Factores de configuración horizontales, F_h^w , para una bola de fuego a ras de suelo ($N_e=2500$).

Z_d	X_d									
	0,55	0,75	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	7,5
0,0	0,3043	0,1706	0,0894	0,0142	0,0044	0,0019	0,0009	0,0006	0,0004	0,0003
0,2	0,2855	0,1622	0,0856	0,0137	0,0042	0,0018	0,0009	0,0006	0,0003	0,0003
0,4	0,2357	0,1355	0,0721	0,0117	0,0036	0,0015	0,0008	0,0005	0,0003	0,0002
0,6	0,1835	0,1017	0,0527	0,0082	0,0025	0,0010	0,0005	0,0003	2,1E-4	1,7E-4
0,8	0,1412	0,0703	0,0326	0,0041	0,0011	0,0004	0,0002	1,5E-4	9,2E-5	7,5E-5
0,9	0,1241	0,0567	0,0235	0,0021	0,0005	0,0002	0,0001	6,0E-5	3,7E-5	3,0E-5
1,0	0,1093	0,0449	0,0155	0,0005	6,1E-5	1,1E-5	3,1E-6	1,1E-6	4,4E-7	2,9E-7
1,1	0,0966	0,0346	0,0088	0						
1,2	0,0857	0,0258	0,0037							
1,4	0,0680	0,0125								
1,6	0,0545	0,0039								
1,8	0,0441									

El ratio del factor de configuración en presencia del muro respecto al valor teórico obtenido sin presencia de obstáculos, se ilustra en la Figura 4.28 para distintos valores de Z_d . Este gráfico muestra, como se esperaba, la tendencia a la disminución del ratio del factor de configuración con el incremento de la altura del muro. Los valores corresponden al ratio del factor de configuración medio para X_d , donde las barras de error representan la desviación estándar.

Para $Z_d=0$, la altura del muro es cero y el factor de configuración se determina mediante la ecuación (Ec.4.12). Por tanto, no existe reducción de la radiación térmica emitida y el valor es equivalente al teórico. Por ejemplo, si se fija un valor de obstrucción de $Z_d=0,4$, el factor de configuración disminuye en torno al 40%. El incremento de 0,2 unidades del parámetro Z_d representa aproximadamente una disminución adicional de un 20% del valor del factor hasta que Z_d se aproxima al valor de 1. En esta región, la relación entre las variables es aproximadamente lineal, como puede apreciarse en la Figura 4.28. Cuando $Z_d=0,9$, el factor tan solo supone el 10% del valor teórico, lo que significa un bloqueo casi total del receptor respecto a la bola de fuego. Por encima de $Z_d=1$, el factor de configuración disminuye asintóticamente hasta cero.

La relación anterior puede ajustarse a una curva, de manera que se puede llevar a cabo una estimación aproximada del factor de configuración en presencia de muro a partir del valor teórico y del valor de la función del factor de proyección, para un determinado efecto sombra:

$$F_{max}^w = F_{max} f(Z_d) \quad (\text{Ec.4.55})$$

$$f(Z_d) = (a_1 Z_d^6 + a_2 Z_d^5 + a_3 Z_d^4 + a_4 Z_d^3 + a_5 Z_d^2 + a_6 Z_d + a_7) \quad (\text{Ec.4.56})$$

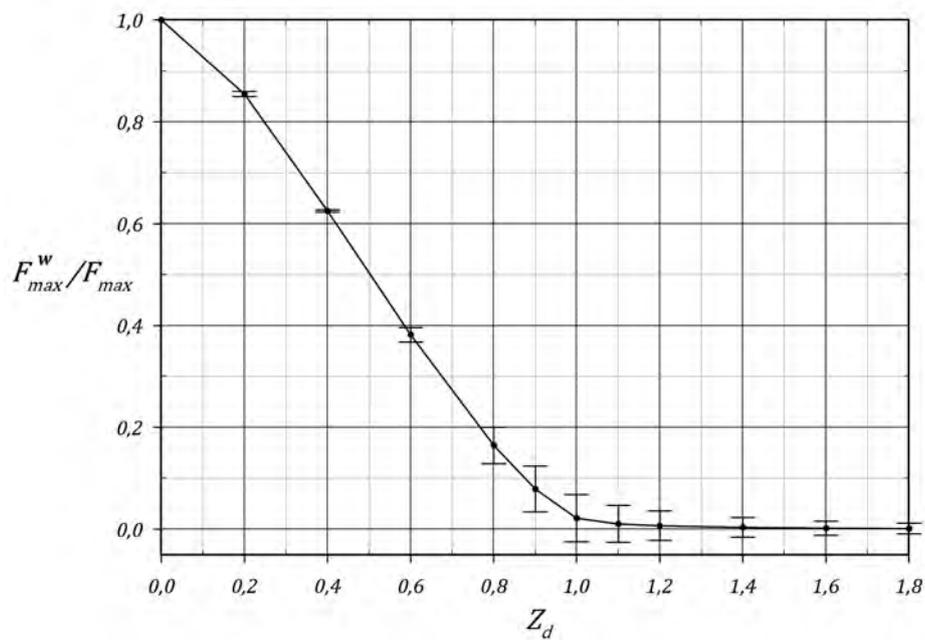


Figura 4.28. Relación entre el máximo factor de configuración para una bola de fuego a ras de suelo con y sin presencia de muro en función de Z_d . (Barras de error representan la desviación estándar).

Los valores de los coeficientes a_i son:

$$a_1 = 0,8052; a_2 = -4,1954; a_3 = 7,4713; a_4 = -4,6899; a_5 = 0,3165; a_6 = -0,675; a_7 = 1,0006; R_{squared} = 0,9998.$$

4.3.2. Bola de fuego elevada

Igual que en el apartado anterior, el muro se ha colocado a una distancia $0,525D$, permitiendo así variar su altura sin intersectar la esfera (Figura 4.29). Si $H_d = 1/2$, la bola de fuego se encuentra a ras de suelo y los resultados son los obtenidos en el Apartado 4.2.1. Los cálculos se han realizado para $H_d > 1/2$ hasta un valor límite de H_d , que proporciona la máxima altura que la bola de fuego es capaz de alcanzar, a través del conocimiento del comportamiento ascensional de la bola de fuego y datos disponibles de accidentes reales.

El objetivo final es modelar el sistema para un rango de valores de H_d que cubran la mayor parte de casos que tienen lugar en situaciones reales. El valor superior de H_d puede estimarse en base a lo establecido en la bibliografía.

De acuerdo a (Bagster et al., 1989), el centro de la bola de fuego puede ser estimado mediante la (Ec.3.1). (Prugh, 1991a) sugiere utilizar la expresión de (CCPS, 1999) para la altura del centro de la bola de fuego elevada en el momento de su máximo diámetro (Ec.3.2). La ecuación (Ec.3.1) proporciona un valor de $H_d = 1$ y la ecuación (Ec.3.2) $H_d = 0,75$. En consecuencia, la parte inferior de la bola de fuego estaría separada del suelo una distancia equivalente a $D/2$ y $D/4$, respectivamente; que se corresponde con la altura de la base de la esfera, H_b .

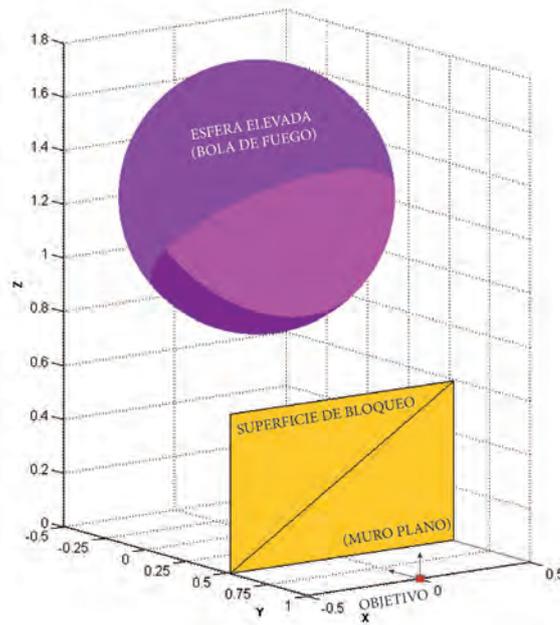


Figura 4.29. Escenario para la determinación numérica del factor de configuración de una bola de fuego elevada.

Fuente: MATLAB, elaboración propia.

Otro enfoque consiste en utilizar las correlaciones establecidas por varios autores, basadas en la observación de análisis de accidentes, para determinar la altura del centro de la bola de fuego. Esas correlaciones son funciones de la masa de combustible. En base a ello, debe estimarse el rango de volúmenes de los tanques que almacenan gases licuados en la industria. A partir de ellos, los límites de la masa de combustible pueden estimarse y por tanto la máxima altura. (Ulrich et al., 2004) estima un volumen típico máximo de recipientes esféricos de 8000 m^3 , que corresponde a un diámetro de 25 m. Las correlaciones para estimar la altura del centro de la bola de fuego son las proporcionadas por (Ahlert, 2000; Van den Bosch et al., 2005), que se corresponden con las ecuaciones (Ec.3.3 y Ec.3.4) respectivamente.

Satyanarayana (Satyanarayana et al., 1991) realizó un estudio comparativo de varias expresiones procedentes de varias explosiones y accidentes reales para estimar el diámetro de la bola de fuego. La correlación que mejor ajusta con los datos es la propuesta por Gayle (Bagster et al., 1989):

$$D = 6,14M^{0,325} \quad (\text{Ec.4.57})$$

Ahora podemos encontrar una relación para H_d , utilizando la expresión TNO (Ec.3.3) para H :

$$H_d = \frac{H}{D} = 1,05 \quad (\text{Ec.4.58})$$

Y la expresión de CCPS (Ec.3.4) para H da:

$$H_d = \frac{H}{D} = 0,708M^{0,008} \quad (\text{Ec.4.59})$$

Ecuación que tiende asintóticamente a 0,8.

Un estudio más riguroso puede llevarse a cabo dividiendo las ecuaciones (Ec.3.3) y (Ec.3.4) por diferentes correlaciones disponibles en (Satyanarayana et al., 1991) para el diámetro de la bola de fuego. En este sentido, podemos determinar un valor medio para H_d . De todo lo anterior, se puede concluir que el intervalo de interés se encuentra comprendido entre $1/2 < H_d \leq 3/2$. El límite superior corresponde a la máxima altura alcanzada por la bola de fuego durante los dos últimos tercios de su duración en el modelo dinámico (Casal, 2008).

En cuanto al límite superior de X_d , permanece en 7,5 unidades. En este caso, la distancia entre el receptor y el centro de la bola de fuego se incrementa conforme esta se eleva. Así, estamos en una situación ligeramente más conservadora que en el caso de bola en tierra. La bola de fuego se encuentra más alejada del receptor y el factor de configuración cabe esperar que sea más pequeño, dado que es una función del inverso del cuadrado de la distancia que separa a emisor y receptor.

Para el caso de bola elevada, el cálculo del factor de configuración puede ser caracterizado en tres regiones, dependiendo de la visibilidad relativa entre la bola de fuego y el receptor:

- a. Visibilidad completa. Cuando $Z_d=0$, la bola de fuego ‘ve’ completamente al objetivo y el efecto sombra es nulo, la interferencia inducida por el muro no es un factor controlante, y el factor de configuración puede determinarse mediante la ecuación (Ec.4.12). Para $Z_d>0$, también podemos tener visibilidad completa si disponemos de un muro con cierta altura ($Z_w>0$), pero que no ejerza ninguna interferencia a la radiación térmica. Aunque la altura del muro sea mayor que cero, el efecto sombra puede ser despreciable, proporcionando visibilidad completa si Z_d no supera un determinado valor umbral denominado Z_{vd} . Esta condición se cumple siempre que la línea de proyección que partiendo del receptor, pase por el punto (X_w, Z_w) y sea inferior o igual a la tangente en su parte inferior (Figura 4.31). Así, una barrera que cumpla esas condiciones no protegerá al objetivo de la radiación térmica. Es decir, para el rango de valores de Z_d entre cero y el proporcionado por la ecuación (Ec.4.60), no existe efecto sombra (Figura 4.31). La ecuación característica del citado valor límite es (véase Figura 4.30):

$$Z_{vd} = \frac{Z_v}{D} \leq X_d \left(\frac{H_d \sqrt{4X_d^2 + 4H_d^2 - 1} - X_d}{X_d \sqrt{4X_d^2 + 4H_d^2 - 1} + H_d} \right); \quad \forall H_d > 1/2 \quad (\text{Ec.4.60})$$

- b. Visibilidad parcial. Para valores superiores a Z_{vd} e inferiores a Z_{sd} , el factor de configuración está determinado por los métodos numéricos desarrollados en esta tesis. Con el incremento de los valores de Z_d para cada valor de X_d , la visibilidad parcial entre el receptor y la bola de fuego se reduce. Hasta que llega un momento en que la altura del muro bloquea completamente el intercambio de energía entre la bola de fuego y el receptor, y en consecuencia, el factor de configuración es nulo, cualquiera que sea el valor de X_d . Esta situación viene caracterizada por el parámetro Z_{sd} , que puede determinarse mediante la Ec.4.20.

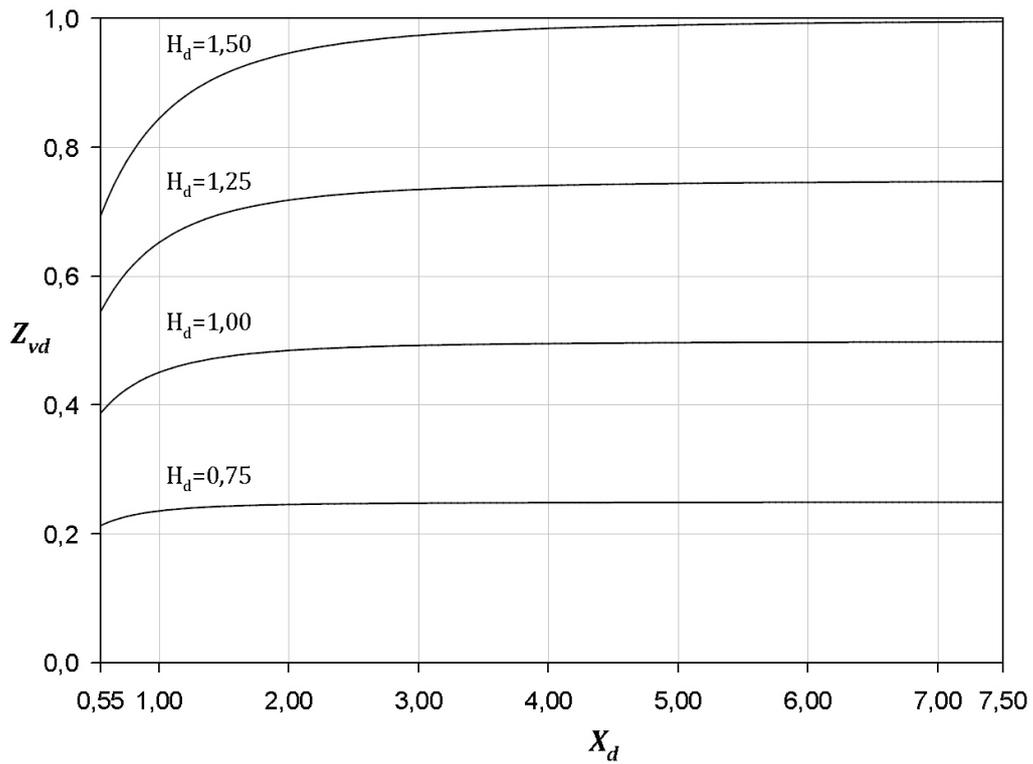


Figura 4.30. Representación del factor de visibilidad completa para distintas alturas.

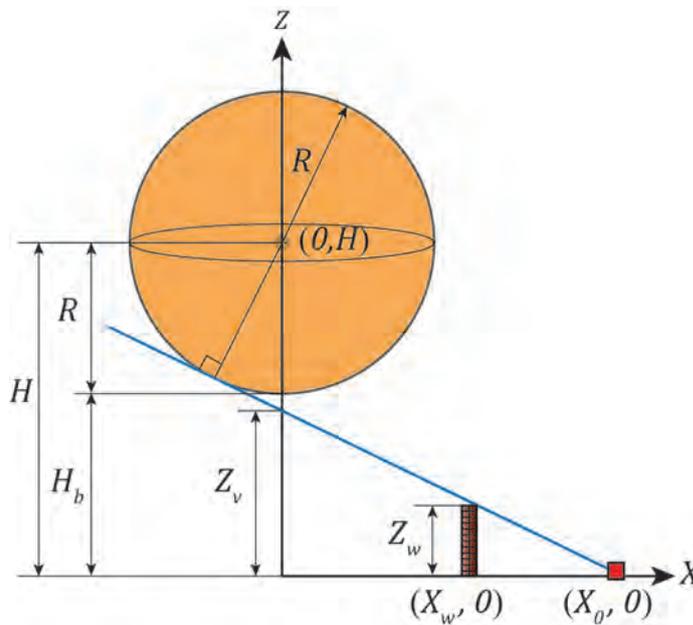


Figura 4.31. Geometría que proporciona visibilidad completa. Fuente: Elaboración propia.

- c. Visibilidad nula. Para valores iguales o superiores a Z_{sd} , el muro bloquea completamente la visión relativa entre bola de fuego y receptor, con lo que el factor de configuración es cero.

En la Tabla 4.4 se resumen las condiciones que rigen cada una de las regiones:

Tabla 4.4. Visibilidad relativa en función de Z_d . Fuente: Elaboración propia.

Región	s	Z_d	Factor de configuración	Visibilidad
a	$s=0$	$0 < Z_d \leq Z_{vd}$	Determinado analíticamente mediante ecuación (Ec.4.12)	Completa
b	$0 < s < 1$	$Z_{vd} < Z_d < Z_{sd}$	Determinado mediante cálculo numérico	Parcial
c	$s \geq 1$	$Z_d \geq Z_{sd}$	Cero	Nula

Las Figuras 32, 33 y 34 representan el factor de configuración máximo F_{max}^w respecto al ratio de distancia del receptor respecto al diámetro de la bola de fuego (X_d), para diferentes alturas de la bola de fuego. Se han seleccionado específicamente los valores de $H_d = 0,75, 1$ y $1,25$ para caracterizar el rango probable de alturas a las que se eleva la bola de fuego.

Cabe destacar que el parámetro Z_d adopta distintos valores dependiendo de la altura de la bola de fuego. Si consideramos una bola de diseño de diámetro D , Z_d depende directamente de Z_p , que está definido desde nivel de suelo ($Z=0$), de modo que la proyección de un mismo muro sobre el eje vertical de la esfera es distinto dependiendo de la altura de la bola de fuego (Figura 3.5).

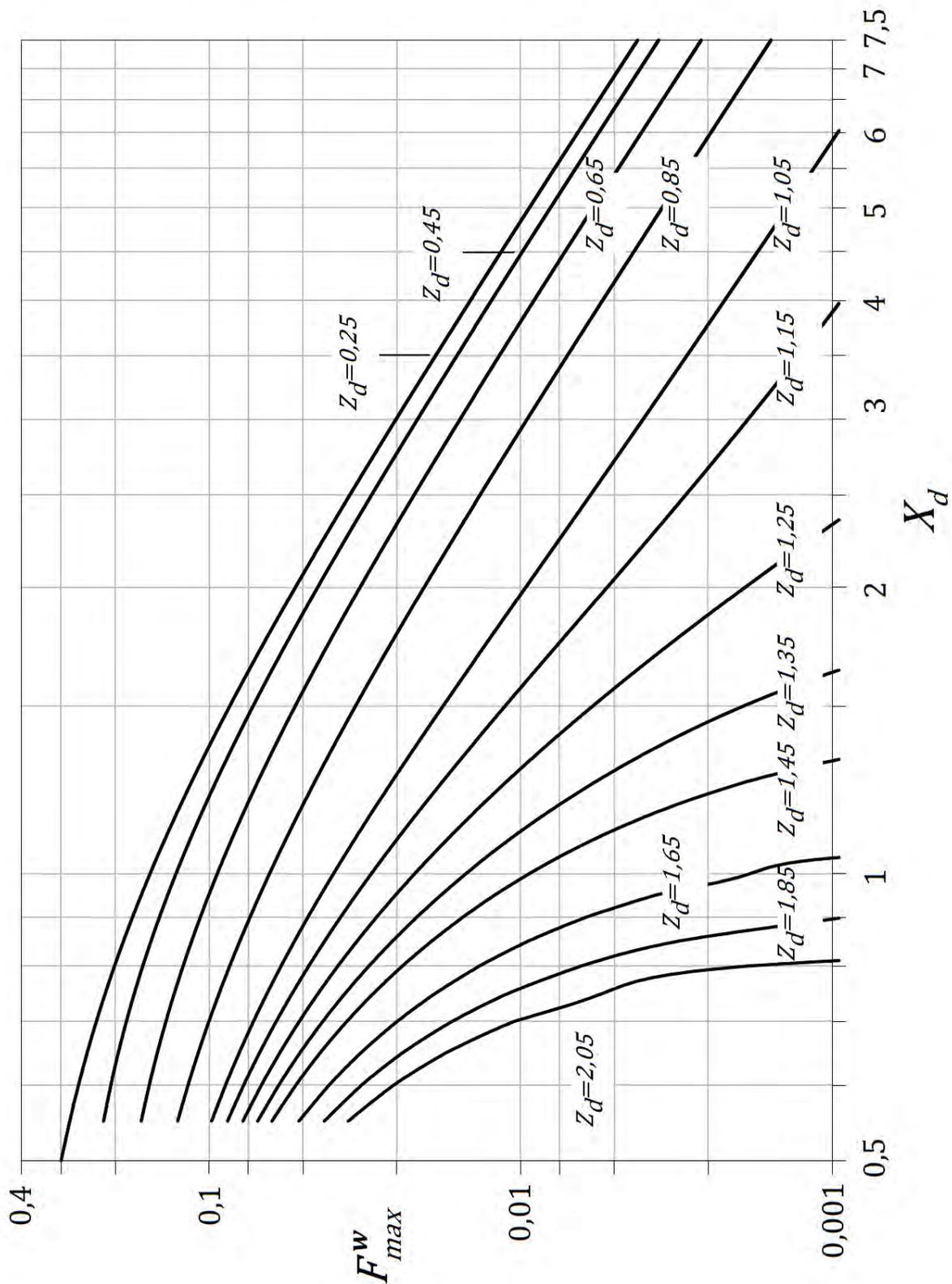


Figura 4.32. Factor de configuración máximo de una bola de fuego elevada ($H_d=0,75$) para distintos escenarios de bloqueo.

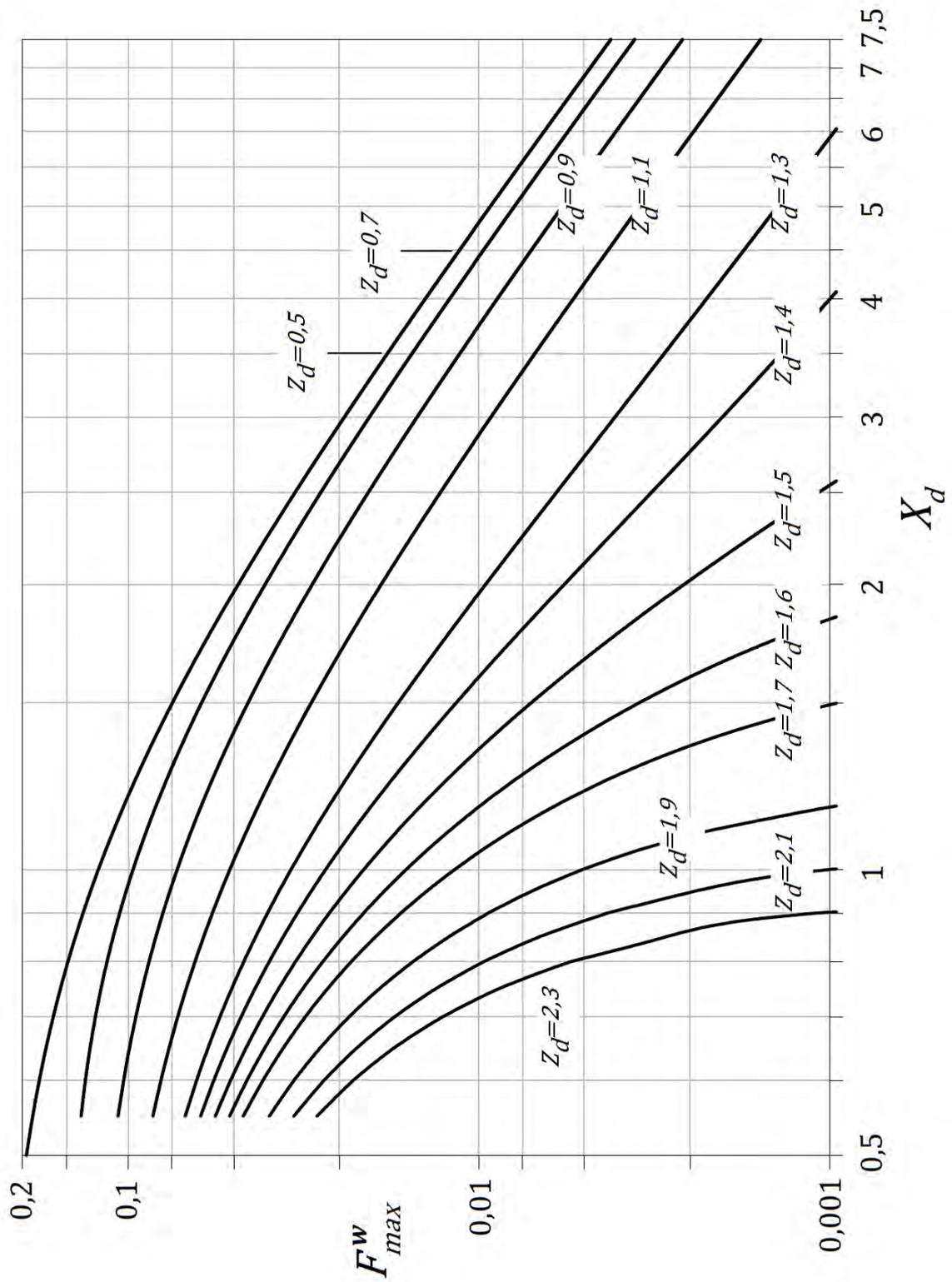


Figura 4.33. Factor de configuración máximo de una bola de fuego elevada ($H_d = 1$) para distintos escenarios de bloqueo.

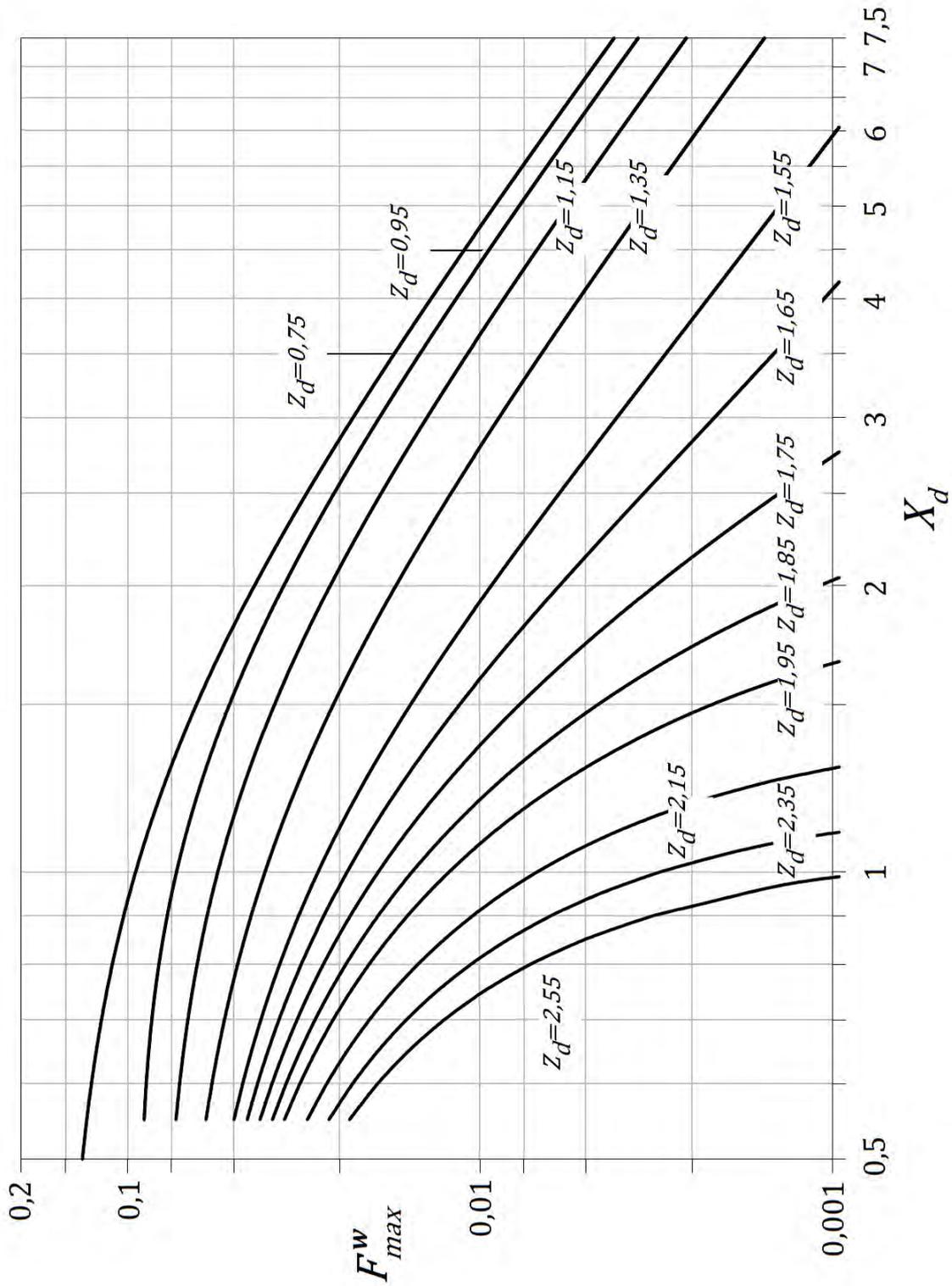


Figura 4.34. Factor de configuración máximo de una bola de fuego elevada ($H_d=1,25$) para distintos escenarios de bloqueo.

En las Tablas 4.5-4.10 se relacionan los factores de configuración de receptores situados sobre planos horizontales y verticales, respectivamente, para distintos factores de altura.

Tabla 4.5. Factores de configuración verticales, F_v^w , para una bola de fuego elevada ($H_d=0,75$, $N_e=2500$).

Z_d	X_d									
	0,55	0,75	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	7,5
0,25	0,1709	0,1571	0,1279	0,0513	0,0253	0,0148	0,0096	0,0067	0,0050	0,0043
0,45	0,1109	0,1152	0,1003	0,0429	0,0215	0,0126	0,0082	0,0058	0,0042	0,0037
0,65	0,0700	0,0766	0,0689	0,0308	0,0155	0,0091	0,0060	0,0042	0,0031	0,0027
0,85	0,0453	0,0493	0,0436	0,0188	0,0093	0,0055	0,0036	0,0025	0,0018	0,0016
1,05	0,0305	0,0313	0,0253	0,0086	0,0039	0,0022	0,0014	0,0009	0,0007	0,0006
1,15	0,0253	0,0248	0,0185	0,0046	0,0018	0,0009	0,0005	0,0003	2,8E-4	2,4E-4
1,25	0,0213	0,0196	0,0130	0,0016	0,0003	8,4E-5	2,9E-5	1,2E-5	5,8E-6	4,1E-6
1,35	0,0180	0,0154	0,0086	1,1E-5	0					
1,45	0,0153	0,0120	0,0052							
1,65	0,0113	0,0070	0,0009							
1,85	0,0086	0,0038								
2,05	0,0066	0,0018								

Tabla 4.6. Factores de configuración horizontales, F_h^w , para una bola de fuego elevada ($H_d=0,75$, $N_e=2500$).

Z_d	X_d									
	0,55	0,75	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	7,5
0,25	0,2330	0,1571	0,0959	0,0192	0,0063	0,0027	0,0014	0,0008	0,0005	0,0004
0,45	0,1960	0,1375	0,0860	0,0177	0,0058	0,0025	0,0013	0,0007	4,9E-4	4,0E-4
0,65	0,1557	0,1094	0,0689	0,0143	0,0047	0,0021	0,0010	0,0006	0,0004	0,0003
0,85	0,1224	0,0823	0,0500	0,0098	0,0032	0,0014	0,0007	0,0004	2,7E-4	2,2E-4
1,05	0,0970	0,0597	0,0327	0,0050	0,0015	0,0006	0,0003	1,8E-4	1,1E-4	9,5E-5
1,15	0,0867	0,0502	0,0252	0,0028	0,0007	0,0002	0,0001	7,7E-5	4,7E-5	3,8E-5
1,25	0,0778	0,0419	0,0186	0,0010	0,0001	2,6E-5	7,4E-6	2,5E-6	1,0E-6	6,9E-7
1,35	0,0701	0,0346	0,0130	7,6E-6	0					
1,45	0,0633	0,0282	0,0082							
1,65	0,0522	0,0181	0,0016							
1,85	0,0435	0,0106								
2,05	0,0365	0,0053								

Tabla 4.7. Factores de configuración verticales, F_v^v , para una bola de fuego elevada ($H_d=1, N_e=2500$).

Z_d	X_d									
	0,55	0,75	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	7,5
0,5	0,0924	0,0959	0,0883	0,0447	0,0237	0,0142	0,0094	0,0066	0,0049	0,0043
0,7	0,0533	0,0648	0,0656	0,0368	0,0199	0,0121	0,0080	0,0056	0,0042	0,0037
0,9	0,0357	0,0444	0,0456	0,0264	0,0144	0,0088	0,0058	0,0041	0,0030	0,0026
1,1	0,0247	0,0300	0,0300	0,0164	0,0087	0,0053	0,0035	0,0024	0,0018	0,0016
1,3	0,0176	0,0203	0,0188	0,0080	0,0038	0,0022	0,0014	0,0009	0,0007	0,0006
1,4	0,0150	0,0167	0,0145	0,0047	0,0018	0,0009	0,0005	0,0003	2,8E-4	2,4E-4
1,5	0,0129	0,0137	0,0109	0,0021	0,0004	0,0001	4,7E-5	2,0E-5	9,7E-6	6,9E-6
1,6	0,0112	0,0113	0,0080	0,0003	0					
1,7	0,0097	0,0092	0,0057							
1,9	0,0075	0,0061	0,0023							
2,1	0,0059	0,0040	0,0004							
2,3	0,0047	0,0025								

Tabla 4.8. Factores de configuración horizontales, F_h^v , para una bola de fuego elevada ($H_d=1, N_e=2500$).

Z_d	X_d									
	0,55	0,75	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	7,5
0,5	0,1681	0,1279	0,0883	0,0223	0,0079	0,0035	0,0018	0,0011	0,0007	0,0005
0,7	0,1292	0,1042	0,0749	0,0199	0,0071	0,0032	0,0017	0,0010	0,0006	0,0005
0,9	0,1038	0,0825	0,0590	0,0157	0,0056	0,0025	0,0013	0,0008	0,0005	0,0004
1,1	0,0838	0,0635	0,0435	0,0107	0,0037	0,0016	0,0008	0,0005	0,0003	0,0002
1,3	0,0685	0,0480	0,0300	0,0057	0,0018	0,0007	0,0003	0,0002	1,4E-4	1,1E-4
1,4	0,0622	0,0415	0,0242	0,0035	0,0009	0,0003	0,0001	9,5E-5	5,8E-5	4,7E-5
1,5	0,0566	0,0358	0,0191	0,0016	0,0002	5,0E-5	1,4E-5	5,1E-6	2,0E-6	1,3E-6
1,6	0,0518	0,0307	0,0146	0,0003	0					
1,7	0,0474	0,0262	0,0107							
1,9	0,0401	0,0188	0,0047							
2,1	0,0343	0,0130	0,0009							
2,3	0,0295	0,0086								

Tabla 4.9. Factores de configuración verticales, F_v^w , para una bola de fuego elevada ($H_d=1,25, N_e=2500$).

Z_d	X_d									
	0,55	0,75	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	7,5
0,75	0,0539	0,0605	0,0609	0,0381	0,0218	0,0135	0,0091	0,0065	0,0048	0,0042
0,95	0,0282	0,0378	0,0427	0,0308	0,0182	0,0114	0,0077	0,0055	0,0041	0,0036
1,15	0,0200	0,0268	0,0303	0,0221	0,0132	0,0083	0,0056	0,0040	0,0030	0,0026
1,35	0,0145	0,0190	0,0208	0,0140	0,0081	0,0050	0,0034	0,0024	0,0018	0,0015
1,55	0,0109	0,0136	0,0138	0,0073	0,0037	0,0021	0,0014	0,0009	0,0007	0,0006
1,65	0,0095	0,0114	0,0110	0,0046	0,0019	0,0010	0,0006	0,0004	2,9E-4	2,5E-4
1,75	0,0083	0,0097	0,0087	0,0024	0,0006	0,0001	7,0E-5	3,0E-5	1,4E-5	1,0E-5
1,85	0,0073	0,0082	0,0068	0,0008	0					
1,95	0,0065	0,0069	0,0052							
2,15	0,0051	0,0049	0,0028							
2,35	0,0041	0,0035	0,0012							
2,55	0,0034	0,0024	0,0002							

Tabla 4.10. Factores de configuración horizontales, F_h^w , para una bola de fuego elevada ($H_d=1,25, N_e=2500$).

Z_d	X_d									
	0,55	0,75	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	7,5
0,75	0,1226	0,1008	0,0761	0,0238	0,0091	0,0042	0,0022	0,0013	0,0008	0,0007
0,95	0,0878	0,0770	0,0613	0,0207	0,0080	0,0037	0,0020	0,0012	0,0007	0,0006
1,15	0,0722	0,0618	0,0483	0,0161	0,0063	0,0029	0,0016	0,0009	0,0006	0,0005
1,35	0,0599	0,0488	0,0365	0,0110	0,0041	0,0019	0,0010	0,0006	3,9E-4	3,2E-4
1,55	0,0502	0,0382	0,0263	0,0062	0,0020	0,0008	0,0004	0,0002	1,6E-4	1,3E-4
1,65	0,0461	0,0338	0,0220	0,0040	0,0011	0,0004	0,0002	0,0001	7,0E-5	5,6E-5
1,75	0,0425	0,0298	0,0180	0,0022	0,0003	8,3E-5	2,4E-5	8,9E-6	3,7E-6	2,5E-6
1,85	0,0393	0,0262	0,0146	0,0007	0					
1,95	0,0364	0,0230	0,0115							
2,15	0,0314	0,0175	0,0065							
2,35	0,0273	0,0132	0,0029							
2,55	0,0240	0,0097	0,0006							

En términos cualitativos, un incremento de H_d , Z_d o X_d producirá un decrecimiento del factor de configuración. Basado en la ecuación (Ec.4.1), un incremento en H_d implica un aumento en la distancia entre el centro de la bola de fuego y el receptor, como ocurre con el incremento de X_d .

Respecto a Z_d , su incremento conlleva el incremento de la altura del muro, y por lo tanto disminuye la superficie visible entre la bola de fuego y el receptor.

De esta manera, se podría pensar que como la altura de la bola de fuego aumenta, los valores del factor de configuración disminuirán, para cualquier valor constante de X_d que se elija y teniendo en cuenta idéntica visibilidad.

Debe tenerse precaución a la hora de comparar los resultados de los factores de configuración para bolas de fuego a distintas alturas. El mismo efecto sombra se produce a condición de que las bolas de fuego estén más alejadas del receptor, de acuerdo con el Teorema de Tales. El sistema proporciona la misma visibilidad para valores crecientes de H_d a diferentes distancias del receptor y para distintos factores de proyección de la esfera. La Figura 4.35 muestra esta particularidad. Las bolas de fuego más alejadas del receptor y situadas a mayor altura tendrían, por tanto, factores de configuración inferiores que las que se encuentran más próximas al receptor.

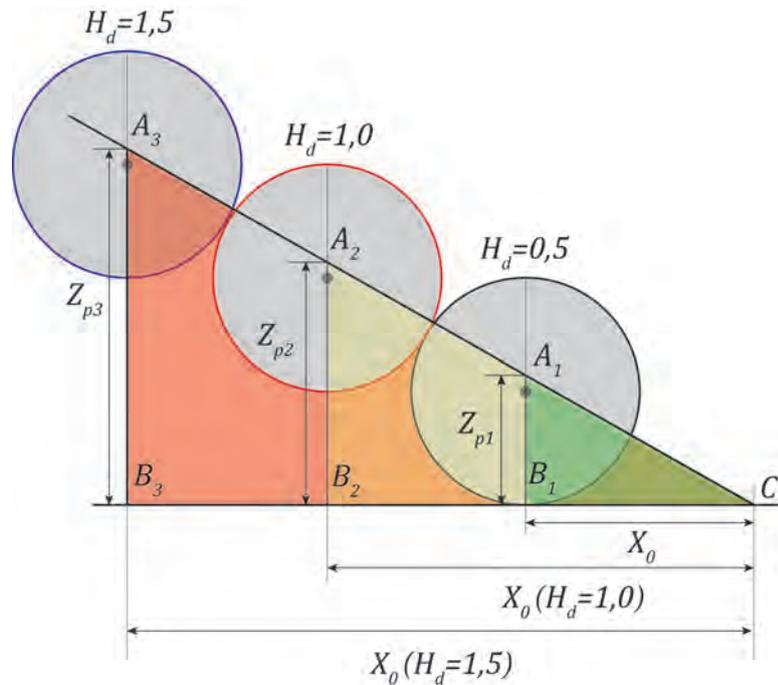


Figura 4.35. Geometría que proporciona idéntica visibilidad. Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, el cálculo realizado en esta tesis considera las bolas de fuego situadas sobre el mismo eje vertical a diferentes alturas. Para bolas situadas a distintas alturas, el sistema no proyecta la misma sombra para cualquier combinación de X_d y Z_d que se elija.

Conforme aumenta el valor de Z_d , la visibilidad relativa entre el receptor y la esfera se reduce, en la medida que lo hace su superficie visible, ya que el obstáculo bloquea mayor superficie de la bola de fuego. De este modo, el ángulo sólido formado entre la línea de proyección y la tangente superior a la esfera decrece, y lo hace en mayor medida conforme crece X_d .

Cuando X_d aumenta, para un valor de Z_d equivalente, la pendiente de la línea de proyección disminuye, reduciéndose dicho ángulo sólido, incluso llegando a condición de visibilidad nula. En la Figura 4.36 puede observarse la línea de proyección equivalente a $Z_d=1,70$. Para un receptor situado en $X_d=1$, la visibilidad es reducida, pero conforme se desplaza a valores superiores, esa superficie roja irá disminuyendo, hasta llegar un momento en que la bola es eclipsada completamente por el muro.

Para valores de X_d pequeños, próximos a la bola de fuego, el ángulo de visión es muy pequeño, sin embargo el factor de configuración es mayor para bolas de fuego a ras de suelo que las situadas ligeramente por encima de ella. Por ejemplo, un valor de $Z_d=1,45$ produce un eclipse completo de una bola a ras de suelo para $X_d=1,25$, un valor de $Z_d=1,70$ y $X_d=1,75$ para bolas situadas a $H_d=1$ y un valor de $Z_d=2,20$ y $X_d=2,25$ para bolas situadas a $H_d=1,5$. La Figura 4.36 ilustra esta situación para la bola a ras de suelo, mostrando para $X_d=1$, como el receptor está a punto de ser eclipsado.

El desplazamiento a lo largo del eje X_d reduce drásticamente el factor de configuración de bolas en tierra frente al experimentado por las bolas de fuego elevadas, lo que resulta en que el factor de configuración de la bola de fuego elevada es superior a la situada a nivel del suelo. Esta geometría de esferas apiladas determina que el factor de configuración, en ciertos casos, es mayor para bolas elevadas que para la bola en tierra. Esta situación se produce bajo determinadas condiciones, para valores de Z_d próximos al eclipse total y de X_d próximos a la bola de fuego.

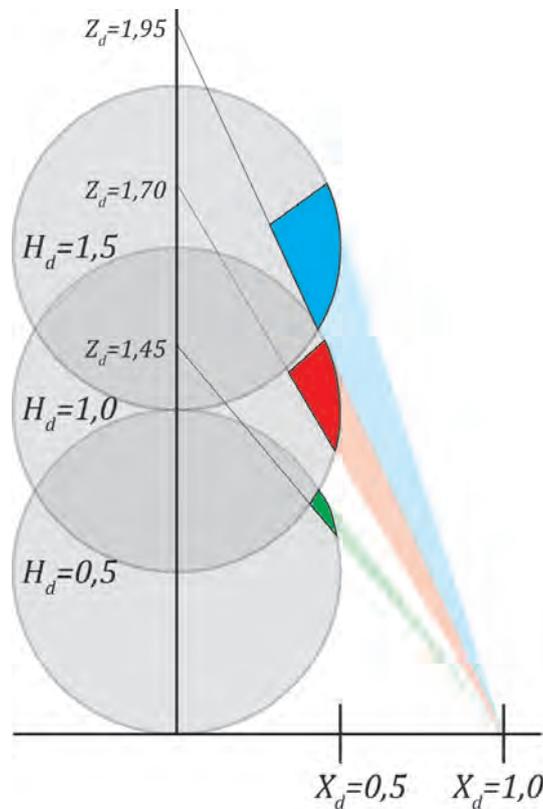


Figura 4.36. Inversión del factor de configuración. Fuente: Elaboración propia.

Otra cuestión interesante es la relación entre los factores a diferentes alturas respecto a la bola de fuego sobre el suelo. El objetivo es examinar en qué condiciones la barrera proporciona una mayor protección, y cuánto más conservadora es la bola a ras de suelo respecto a la bola elevada. Para cualquier valor de X_d , el factor de la bola en tierra es superior al de las bolas elevadas, aunque el aumento de Z_d hace que los factores de configuración de las bolas elevadas se aproximen a los valores de bola en tierra. Por ejemplo, por encima de $Z_d = 1,05$ para $H_d = 0,75$, $Z_d = 1,30$ para $H_d = 1$ y $Z_d = 1,55$ para $H_d = 1,25$, el factor de la bola elevada supera al de la bola en tierra. Para valores de Z_d más altos, el factor de configuración de las bolas elevadas es mayor en varias unidades, aunque esto se produce solo para pequeños valores de X_d . Como se ha comentado, por encima de esos valores, el factor de proyección de la bola de fuego en tierra es tal que el receptor no puede ver al emisor. A medida que aumenta X_d , el receptor está más lejos, el factor de configuración de las bolas elevadas es cada vez más próximo al de bola a ras de suelo. Ello es debido a que la distancia entre el emisor y el receptor es cada vez más próxima y porque gana influencia la mayor visibilidad de la bola de fuego elevada.

En resumen, el factor de una bola elevada es generalmente menor que a nivel del suelo, a excepción de los ciertos valores X_d por debajo de 1,25 y Z_d mayores que 1,25, 1,50 y 1,75 para factores de altura de 0,75, 1 y 1,25 respectivamente.

4.4. Método semi-analítico para el cálculo del factor de configuración con efecto sombra

El modelado del factor de configuración con efecto sombra se puede realizar mediante técnicas analíticas, numéricas, o semi-analíticas. Las primeras requieren una tediosa resolución matemática, de gran complejidad y para la que no siempre existe una solución que pueda expresarse mediante una ecuación. Las numéricas son una aproximación a la solución analítica mediante determinados algoritmos de cálculo computacional, como se ha descrito en el Apartado 4.3. Existe otra metodología para determinar la solución del problema que se plantea, que consiste en considerar el calcular el factor de configuración del sistema sin efecto sombra y posteriormente sustraer de dicho factor el correspondiente a la sombra u obstrucción. Varios autores (Bopche et al., 2010; Feng et al., 2012) han utilizado técnicas semi-analíticas para determinar el factor de configuración de sistemas con efecto sombra, mediante la resta algebraica del factor con visibilidad parcial respecto al factor con visibilidad completa. Los métodos para obtener el factor de configuración considerando la sombra son variadas, habiéndose utilizado en esta tesis un procedimiento inédito, que se describe a continuación.

4.4.1. Bola de fuego a ras de suelo

El método consiste en obtener una aproximación del factor de configuración para bolas de fuego a ras de suelo mediante ecuaciones matemáticas. En primer lugar partimos de la configuración geométrica presentada en la Figura 4.37. En ella se aprecia una bola de fuego a ras de suelo, cuyos principales parámetros ya fueron definidos en el *Capítulo 3* y en anteriores apartados. Sin embargo, se definen algunas nuevas variables que serán necesarias para la subsiguiente resolución matemática, como es el caso de W_1 , Z_t , δ y φ :

$$\sin \varphi = \frac{R}{X_0} \tag{Ec.4.61}$$

$$\cos \varphi = \frac{\sqrt{X_0^2 - R^2}}{X_0} \tag{Ec.4.62}$$

$$\tan \varphi = \frac{R}{\sqrt{X_0^2 - R^2}} \tag{Ec.4.63}$$

$$W_1 = X_s \tan \varphi = X_s \frac{R}{\sqrt{X_0^2 - R^2}} \tag{Ec.4.64}$$

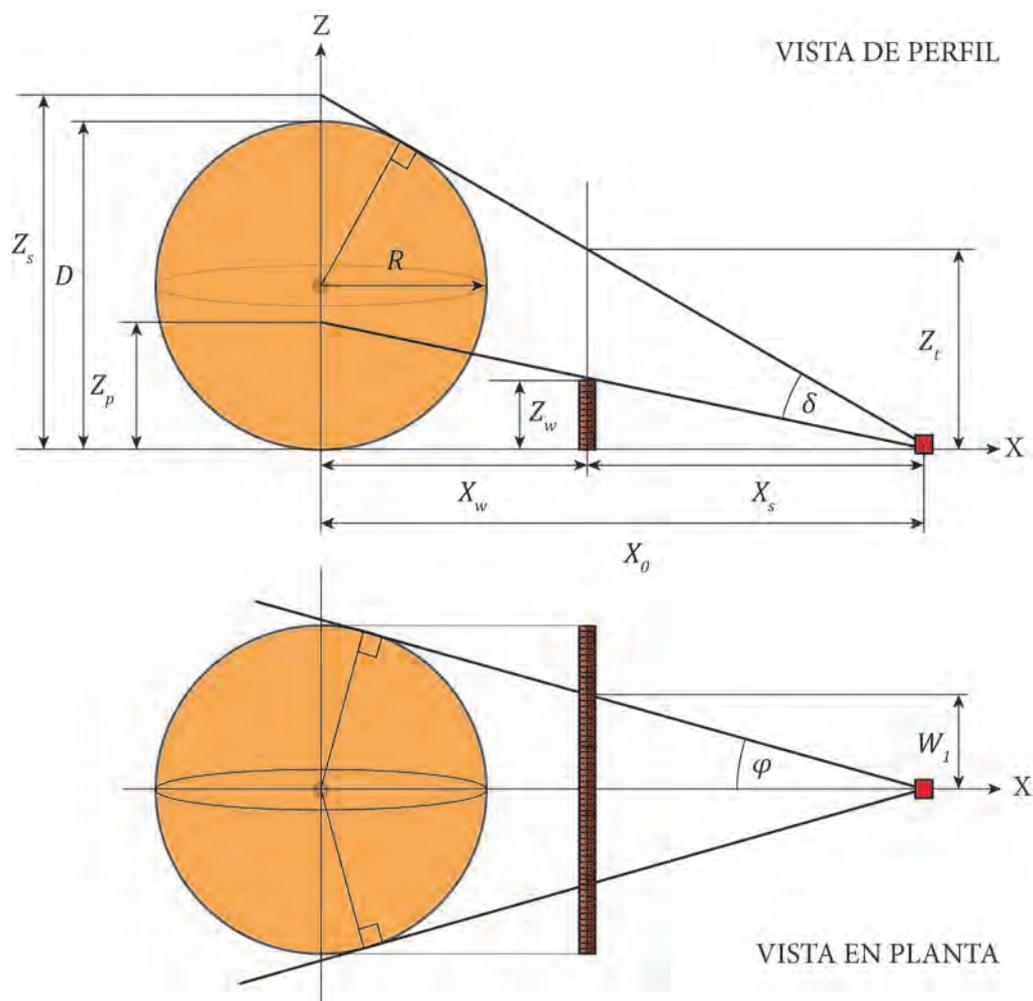


Figura 4.37. Esquema geométrico de bola en tierra para el cálculo semi-analítico. Fuente: Elaboración propia.

Para el citado esquema, no ha sido posible obtener soluciones analíticas exactas derivadas de la integral doble de la ecuación del factor de configuración, siendo necesario recurrir a métodos numéricos para resolver el problema, tal y como se ha expuesto en el Apartado 4.3. Lo que puede llevarse a cabo es una aproximación de la solución analítica, utilizando el siguiente enfoque:

- En ausencia de muro, existe visibilidad completa, y el factor de configuración es proporcionado por las ecuaciones teóricas (Ec.4.4 y Ec.4.6).
- Si existe visibilidad parcial, el ángulo sólido entre el receptor y la esfera es obstaculizado por el muro, de modo que la intersección entre el cono y el muro genera una elipse. Podemos obtener una aproximación mediante la sustracción directa del factor de configuración de un triángulo proyectado en la elipse respecto al factor de configuración teórico proporcionado por la esfera para el caso de visibilidad completa.

Para realizarlo con más precisión, debe encontrarse la curva proyectada por el cono en el muro, que es una elipse de eje mayor Z_t , como se detalla en la Figura 4.38:

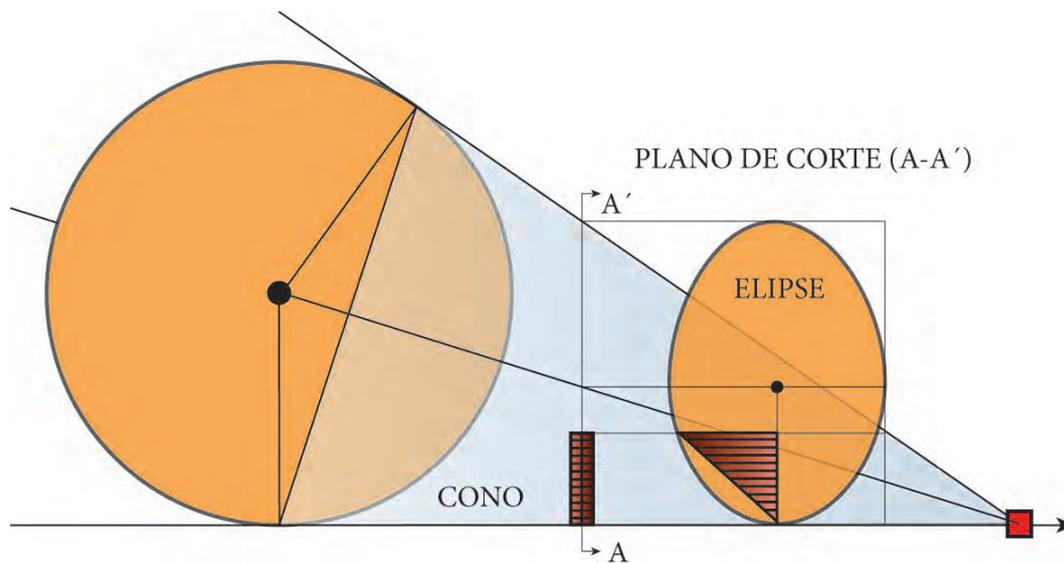


Figura 4.38. Intersección del ángulo sólido de una bola de fuego por un plano de corte. Fuente: Elaboración propia.

$$\tan(2\delta) = \frac{\frac{2R}{X_0}}{1 - \frac{R^2}{X_0^2}} = \frac{2RX_0}{X_0^2 - R^2} \quad (\text{Ec.4.65})$$

$$Z_t = X_s \tan(2\delta) = \frac{2RX_0X_s}{(X_0^2 - R^2)} \quad (\text{Ec.4.66})$$

$$\sin \delta = \frac{R}{\sqrt{X_0^2 + R^2}} \quad (\text{Ec.4.67})$$

$$\cos \delta = \frac{X_0}{\sqrt{X_0^2 + R^2}} \quad (\text{Ec.4.68})$$

$$\tan \delta = \frac{R}{X_0} \tag{Ec.4.69}$$

$$W_2 = W_1 \left(\sqrt{1 - \left(\frac{\frac{Z_t - Z_w}{2}}{\frac{Z_t}{2}} \right)^2} \right) = 2X_s \frac{R}{\sqrt{X_0^2 - R^2}} \sqrt{\frac{Z_w}{X_s \frac{2RX_0}{X_0^2 - R^2}} \left(1 - \frac{Z_w}{X_s \frac{2RX_0}{X_0^2 - R^2}} \right)} \tag{Ec.4.70}$$

Solamente es necesario sustraer 2 triángulos $W_2 \cdot Z_w$ situados a una distancia X_w (Figura 4.39):

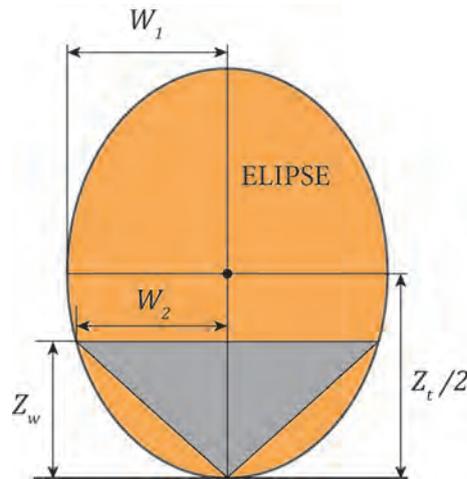


Figura 4.39. Sustracción de triángulos sobre la elipse. Fuente: Elaboración propia.

El factor de configuración de esos triángulos puede encontrarse en (Cabeza Lainez, 2009) para receptores situados en planos verticales y horizontales:

$$F_{v,\Delta} = \frac{1}{2} \left(\frac{Z_w}{\sqrt{X_s^2 + Z_w^2}} \operatorname{atan} \left(\frac{W_2}{\sqrt{X_s^2 + Z_w^2}} \right) \right) \tag{Ec.4.71}$$

Desarrollando la ecuación anterior mediante manipulación algebraica, se obtienen los factores de configuración para un receptor situado sobre una superficie vertical, en términos de X_d y Z_d :

$$F_{v,\Delta} = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{X_d}{Z_d} \right)^2}} \operatorname{atan} \left(\frac{\frac{X_d}{Z_d} \sqrt{Z_d \left(1 - \frac{1}{(2X_d)^2} \right)} \left(1 - Z_d \left(1 - \frac{1}{(2X_d)^2} \right) \right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{X_d}{Z_d} \right)^2} \sqrt{X_d^2 - \frac{1}{4}}} \right) \right) \tag{Ec.4.72}$$

Procediendo de la misma forma, se dispone del factor de configuración del triángulo horizontal:

$$F_{h,\Delta} = \frac{1}{2} \left(\frac{W_2}{\sqrt{Z_w^2 + W_2^2}} \operatorname{atan} \left(\frac{\sqrt{Z_w^2 + W_2^2}}{X_s} \right) - \frac{X_s}{\sqrt{Z_w^2 + X_s^2}} \operatorname{atan} \left(\frac{W_2}{\sqrt{Z_w^2 + X_s^2}} \right) \right) \quad (\text{Ec.4.73})$$

Desarrollando en términos de X_d y Z_w :

$$F_{h,\Delta} = \frac{1}{4} \left(\frac{2X_d \sqrt{Z_d \left(1 - \frac{1}{(2X_d)^2} \right) \left(1 - Z_d \left(1 - \frac{1}{(2X_d)^2} \right) \right)}}{\sqrt{\left(4Z_d + \left(\frac{Z_d}{X_d} \right)^2 \right) (4X_d^2 - 1)}} \operatorname{atan} \left(\frac{\sqrt{4Z_d + \left(\frac{Z_d}{X_d} \right)^2}}{2X_d} \right) - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z_d}{X_d} \right)^2}} \operatorname{atan} \left(\frac{2 \sqrt{Z_d \left(1 - \frac{1}{(2X_d)^2} \right) \left(1 - Z_d \left(1 - \frac{1}{(2X_d)^2} \right) \right)}}{\sqrt{\left(1 + \left(\frac{Z_d}{X_d} \right)^2 \right) (4X_d^2 - 1)}} \right) \right) \quad (\text{Ec.4.74})$$

Ambas expresiones, $F_{h,\Delta}$ y $F_{v,\Delta}$, son válidas en el rango $X_d > 1/2$ y $0 < Z_d < Z_{sd}$. Finalmente, la aproximación analítica del factor de configuración, para una bola de fuego a ras de suelo con efecto sombra, es sencilla e inmediata:

$$F_{v,a}^w = F_v - 2F_{v,\Delta} \quad (\text{Ec.4.75})$$

$$F_{h,a}^w = F_h - 2F_{h,\Delta} \quad (\text{Ec.4.76})$$

El factor de configuración máximo puede obtenerse a partir de:

$$F_{max,a}^w = \sqrt{\left(F_{v,a}^w \right)^2 + \left(F_{h,a}^w \right)^2} \quad (\text{Ec.4.77})$$

Mediante este método se han obtenido los resultados de la Tablas 4.11 y 4.12, para un rango seleccionado de valores de X_d y Z_d .

Tabla 4.11. Factores de configuración verticales, $F_{v,\Delta}^w$ para una bola de fuego a ras de suelo.

Z_d	X_d									
	0,55	0,75	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	7,5
0,2	0,22477	0,19191	0,14121	0,04722	0,02225	0,01278	0,00826	0,00576	0,00425	0,00370
0,4	0,11977	0,11937	0,09408	0,03349	0,01596	0,00920	0,00596	0,00416	0,00307	0,00268
0,5	0,08666	0,09293	0,07521	0,02736	0,01308	0,00755	0,00489	0,00342	0,00252	0,00220
0,6	0,06456	0,07413	0,06114	0,02250	0,01077	0,00622	0,00403	0,00282	0,00208	0,00181
0,8	0,04336	0,05676	0,04896	0,01905	0,00927	0,00539	0,00350	0,00245	0,00181	0,00158
0,9	0,04021	0,05627	0,05104	0,02232	0,01133	0,00671	0,00440	0,00310	0,00229	0,00200
1,0	0,04013	0,06003	0,05873	0,03217	0,01833	0,01159	0,00793	0,00575	0,00435	0,00383
1,1	0,04218	0,06737	0,07270	0						
1,2	0,04571	0,07781	0,09505							
1,4	0,05550	0,10716								
1,6	0,06716	0,14997								
1,8	0,07955	0,25602								

Tabla 4.12. Factores de configuración horizontales, $F_{h,\Delta}^w$ para una bola de fuego a ras de suelo.

Z_d	X_d									
	0,55	0,75	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	7,5
0,2	0,27916	0,15963	0,08451	0,01361	0,00425	0,00183	0,00094	0,00055	0,00035	0,00028
0,4	0,21336	0,12574	0,06784	0,01116	0,00350	0,00151	0,00078	0,00045	0,00029	0,00023
0,5	0,17887	0,10547	0,05697	0,00940	0,00295	0,00127	0,00066	0,00038	0,00024	0,00020
0,6	0,14783	0,08595	0,04600	0,00750	0,00235	0,00101	0,00052	0,00030	0,00019	0,00016
0,8	0,09952	0,05446	0,02807	0,00446	0,00140	0,00060	0,00031	0,00018	0,00011	0,00009
0,9	0,08196	0,04378	0,02295	0,00425	0,00143	0,00064	0,00034	0,00020	0,00013	0,00010
1,0	0,06813	0,03674	0,02152	0,00635	0,00263	0,00130	0,00073	0,00045	0,00029	0,00024
1,1	0,05746	0,03336	0,02488	0						
1,2	0,04944	0,03360	0,03509							
1,4	0,03961	0,04518								
1,6	0,03586	0,07446								
1,8	0,03629									

Para el propósito de comparar resultados, el porcentaje de error ha sido calculado considerando los resultados numéricos del Apartado 4.3.1 como el valor exacto. Los resultados numéricos fueron obtenidos considerando una esfera cuya superficie estaba dividida en 2500 elementos triangulares (N_e), que representan la superficie de la llama.

De acuerdo con los resultados, el método propuesto funciona aceptablemente bien para valores del parámetro Z_d hasta $1/2$. Este valor corresponde a una línea de proyección que pasa por el centro de la esfera. Para ese rango de valores, el porcentaje de error es inferior al 10% (destacado en negrita en las Tablas 4.13 y 4.14), apreciándose como por encima de este valor el error crece rápidamente. La justificación a este comportamiento es sencilla, y está relacionada con la pobre aproximación que se obtiene de la elipse mediante triángulos a partir de cierta altura, como puede apreciarse en la Figura 4.39. Los triángulos cada vez cubren menos superficie de la elipse, la aproximación empeora y consecuentemente el error crece.

En términos generales, el porcentaje de error es mayor para incrementos de Z_d y decrementos de X_d . Como puede observarse en la Tabla 4.13 y 4.14, el valor calculado es inferior al valor exacto, de manera que el porcentaje de error es positivo. Este comportamiento se mantiene hasta 0,6 para factores horizontales y hasta 0,5 para factores verticales. A partir de esos valores, el método no funciona bien y el error relativo crece rápidamente.

Tabla 4.13. Porcentaje de error de los factores de configuración verticales calculados respecto al resultado numérico.

Z_d	X_d									
	0,55	0,75	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	7,5
0,2	7,2	4,6	3,1	2,3	2,1	2,2	2,2	2,1	2,1	2,1
0,4	19,3	10,4	7,0	3,7	3,3	3,0	3,2	3,0	3,0	3,0
0,5	25,0	12,0	6,6	1,7	0,4	0,5	0,1	0,2	0,1	0,1
0,6	28,8	10,0	1,6	7,4	8,9	9,7	9,9	10,0	10,1	10,1

Tabla 4.14. Porcentaje de error de los factores de configuración horizontales calculados respecto al resultado numérico.

Z_d	X_d									
	0,55	0,75	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	7,5
0,2	2,2	1,6	1,2	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
0,4	9,2	7,0	6,0	4,6	4,4	4,3	4,4	4,3	4,3	4,3
0,5	14,1	11,2	9,4	7,3	6,6	6,6	6,4	6,5	6,5	6,5
0,6	19,4	15,5	12,9	9,0	8,3	7,9	7,8	7,8	7,7	7,7

A pesar de ello, este novedoso método permite una buena aproximación a la solución real para un rango específico de efecto sombra. Esta estrategia de cálculo puede ser adecuada y muy útil para resolver similares geometrías con efecto sombra, ya sea con triángulos o con otras figuras geométricas.

4.4.2. Bola de fuego elevada

Para una bola elevada, el planteamiento es similar, como se muestra en la Figura 4.40. Ahora, recurrimos a factores conocidos para poder aproximar la solución, como es el de un círculo elevado.

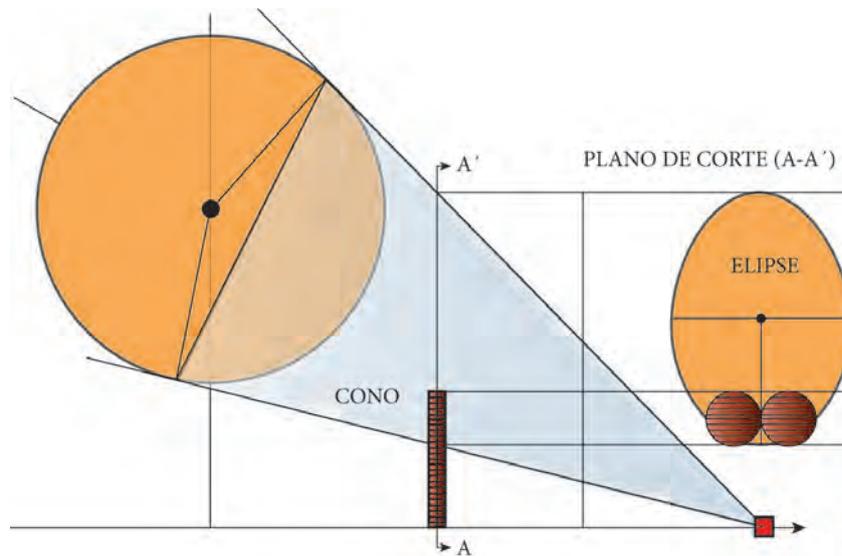


Figura 4.40. Intersección del ángulo sólido de una bola de fuego por un plano de corte. Fuente: Elaboración propia.

Se requiere conocer la coordenada del centro del círculo sobre la elipse para detraer dichos factores del factor de configuración teórico (Figura 4.41).

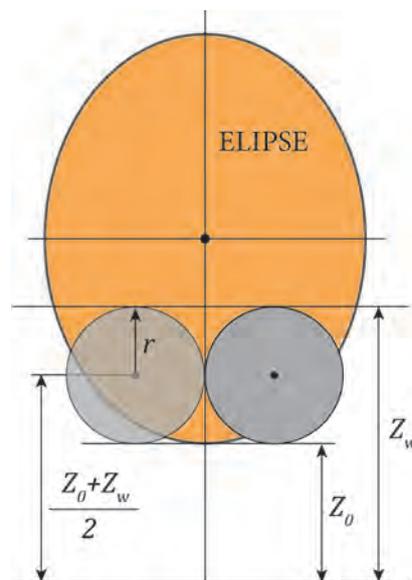


Figura 4.41. Sustracción de dos círculos sobre la elipse resultante de la intersección. Fuente: Elaboración propia.

A partir de la Ec.4.60, podemos plantear el teorema de Thales (Figura 4.42), con el fin de obtener la base de la elipse, caracterizada por la altura Z_0 :

$$\frac{Z_v}{X_0} = \frac{Z_0}{X_s} \tag{Ec.4.78}$$

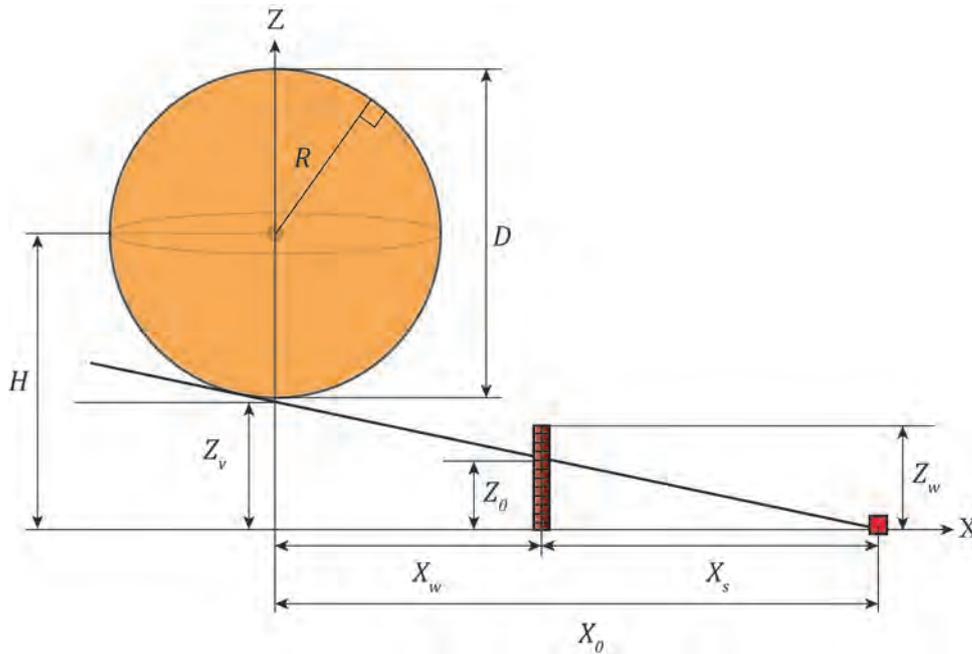


Figura 4.42. Geometría utilizada para la determinación de la coordenada de la base de la elipse.

Fuente: Elaboración propia.

Z_0 es precisamente la única variable desconocida. Desarrollando las ecuaciones y realizando distintas sustituciones podemos obtener la coordenada z del triángulo y el valor r de su radio:

$$z = \frac{1}{2}(Z_w + Z_0) = \frac{X_s}{2} \left(\frac{Z_d}{X_d} + f_0 \right) \quad (\text{Ec.4.79})$$

$$r = \frac{1}{2}(Z_w - Z_0) = \frac{X_s}{2} \left(\frac{Z_d}{X_d} - f_0 \right) \quad (\text{Ec.4.80})$$

La función $f_0(X_d, H_d)$ es parte de la Ec.4.60:

$$f_0 = \frac{H_d \sqrt{4X_d^2 + 4H_d^2 - 1} - X_d}{X_d \sqrt{4X_d^2 + 4H_d^2 - 1} + H_d} \quad (\text{Ec.4.81})$$

El factor de configuración para el círculo se obtiene de (Cabeza Lainez et al., 2013), de acuerdo a la Figura 4.43:

$$F_{v,o} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{x^2 + y^2 + z^2 - r^2}{\sqrt{(r^2 + y^2 + z^2)^2 - 4r^2(x^2 + z^2)}} \right) \quad (\text{Ec.4.82})$$

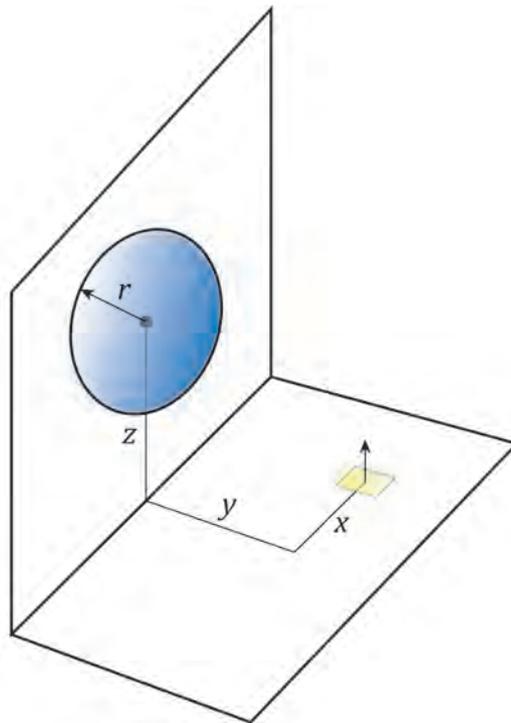


Figura 4.43. Planteamiento geométrico para la determinación del factor de configuración de un círculo elevado.
Fuente: Cabeza Lainez et al., 2013.

$$F_{h,o} = \frac{yz}{2(x^2 + z^2)} \left(\frac{r^2 + x^2 + y^2 + z^2}{\sqrt{(r^2 + x^2 + y^2 + z^2)^2 - 4r^2(x^2 + z^2)}} - 1 \right) \quad (\text{Ec.4.83})$$

Podemos obtener las ecuaciones anteriores en términos de Z_d y X_d , sustituyendo z y r por medio de la Ec.4.79 y Ec.4.80 respectivamente, y teniendo en cuenta que de acuerdo a la Figura 4.40, $y=X_s$:

$$F_{v,o} = \frac{1}{4} \left(1 - \frac{4 + \left(\frac{Z_d}{X_d}\right)^2 + f_o^2 + 2\left(\frac{Z_d}{X_d}\right)f_o}{\sqrt{\left(16 - 4\left(\frac{Z_d}{X_d}\right)^4 - 8\left(\frac{Z_d}{X_d}\right)^2 f_o^2 + 16\left(\frac{Z_d}{X_d}\right)^3 f_o + 16\left(\frac{Z_d}{X_d}\right)f_o^3 - 4f_o^4 + 16f_o^2 + 16\left(\frac{Z_d}{X_d}\right)^2}\right)} \right) \quad (\text{Ec.4.84})$$

$$F_{h,0} = \frac{\left(\frac{Z_d}{X_d}\right) - f_0}{4 \left(\left(\frac{Z_d}{X_d}\right)^2 + f_0^2\right)} \left(\frac{1 + \frac{3}{4}\left(\frac{Z_d}{X_d}\right)^2 + \frac{3}{4}f_0^2 - \frac{1}{2}\left(\frac{Z_d}{X_d}\right)f_0}{\sqrt{\left(1 - \frac{11}{16}\left(\frac{Z_d}{X_d}\right)^4 + \frac{30}{16}\left(\frac{Z_d}{X_d}\right)^2 f_0^2 + \frac{4}{16}\left(\frac{Z_d}{X_d}\right)^3 f_0 + \frac{4}{16}\left(\frac{Z_d}{X_d}\right)f_0^3 - \frac{11}{16}f_0^4 + \frac{3}{2}\left(\frac{Z_d}{X_d}\right)^2 + \frac{3}{2}f_0^2 - \left(\frac{Z_d}{X_d}\right)f_0}\right)} - 1 \right) \quad (\text{Ec.4.85})$$

Estas ecuaciones del factor de configuración para el círculo sobre la elipse son válidas en el rango $X_d > 1/2$, $H_d > 1/2$ y $Z_{vd} < Z_d < Z_{sd}$. Procediendo de la misma forma que en el Apartado 4.4.1:

$$F_{v,a}^w = F_v - 2F_{v,0} \quad (\text{Ec.4.86})$$

$$F_{h,a}^w = F_h - 2F_{h,0} \quad (\text{Ec.4.87})$$

Los resultados se muestran en las Tablas 4.15 y 4.16. En zonas donde el receptor se encuentra muy próximo al muro la aproximación proporciona valores negativos del factor de configuración, los cuales se han omitido en las tablas. Por otra parte, en las Tablas 4.17 y 4.18 se pueden identificar las zonas donde la aproximación funciona razonablemente bien, valores a partir de los cuales el error crece muy rápidamente.

Tabla 4.15. Factores de configuración verticales, $F_{v,0}^w$ para una bola de fuego elevada ($H_d=1$).

Z_d	X_d									
	0,55	0,75	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	7,5
0,5	0,00063	0,09559	0,08824	0,04469	0,02370	0,01430	0,00940	0,00670	0,00490	0,00430
0,7		0,09333	0,08561	0,04360	0,02317	0,01400	0,00920	0,00656	0,00480	0,00421
0,9		0,09491	0,08294	0,04104	0,02177	0,01315	0,00864	0,00616	0,00450	0,00395
1,1		0,10446	0,08354	0,03773	0,01967	0,01181	0,00774	0,00552	0,00402	0,00353
1,3				0,03438	0,01710	0,01008	0,00653	0,00464	0,00336	0,00295
1,4				0,03289	0,01572	0,00909	0,00583	0,00412	0,00296	0,00260
1,5				0,03163	0,01430	0,00804	0,00507	0,00356	0,00253	0,00222
1,6				0,03064	0,01288	0,00694	0,00425	0,00295	0,00206	0,00180
1,7				0,02998	0,01148	0,00580	0,00339	0,00229	0,00155	0,00135
1,9				0,02985	0,00887	0,00346	0,00156	0,00088	0,00044	0,00036
2,1				0,03155	0,00665	0,00112	-0,00038	-0,00066	-0,00078	-0,00074
2,3				0,03534	0,00498	-0,00114	-0,00237	-0,00230	-0,00211	-0,00193

Tabla 4.16. Factores de configuración horizontales, $F_{h,o}^w$ para una bola de fuego elevada ($H_d=1$).

Z_d	X_d									
	0,55	0,75	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	7,5
0,5	0,15603	0,12480	0,08766	0,02235	0,00790	0,00357	0,00189	0,00111	0,00071	-0,00262
0,7	0,08454	0,08822	0,06923	0,01957	0,00705	0,00320	0,00170	0,00100	0,00064	-0,03921
0,9	-0,06769	0,01723	0,02953	0,01151	0,00434	0,00200	0,00107	0,00063	0,00040	-0,11019
1,1			-0,02919	-0,00168	-0,00042	-0,00017	-0,00009	-0,00005	-0,00003	-0,23079
1,3			-0,11450	-0,01953	-0,00725	-0,00339	-0,00183	-0,00109	-0,00070	
1,4			-0,17564	-0,03007	-0,01143	-0,00541	-0,00294	-0,00176	-0,00113	
1,5			-0,26178	-0,04165	-0,01610	-0,00770	-0,00421	-0,00253	-0,00163	
1,6			-0,40141	-0,05427	-0,02125	-0,01026	-0,00564	-0,00341	-0,00220	
1,7			-0,70520	-0,06796	-0,02686	-0,01309	-0,00725	-0,00439	-0,00284	

Tabla 4.17. Porcentaje de error del factor $F_{v,o}^w$ para una bola de fuego elevada ($H_d=1$) respecto al resultado numérico.

Z_d	X_d									
	0,55	0,75	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	7,5
0,5	0,67979	0,41764	0,15821	0,06000	0,07440	0,23199	0,30423	0,52769	1,00508	0,65858
0,7	75,15894	43,87361	30,41769	18,19492	15,95382	15,53908	14,54955	15,33046	13,41921	13,78302
0,9	197,53687	113,68607	81,60206	55,12569	50,45472	49,32422	47,70594	48,63197	45,92828	46,39519

Tabla 4.18. Porcentaje de error del factor $F_{h,o}^w$ para una bola de fuego elevada ($H_d=1$) respecto al resultado numérico.

Z_d	X_d									
	0,55	0,75	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	7,5
0,5	7,2232	2,4980	0,8291	0,0515	0,0819	0,0031	0,0012	0,0006	0,0003	554,0311
0,7	34,5964	15,3421	7,6421	1,9987	1,2913	0,9605	0,8491	0,7894	0,7540	7560,8582
0,9	165,1581	79,1189	49,9892	27,0967	23,4607	22,0960	21,5177	21,2073	21,0185	26448,44

5 APLICACIONES PRÁCTICAS

“La preocupación por el hombre y su destino siempre debe ser el interés primordial de todo esfuerzo técnico. Nunca olvides esto entre tus diagramas y ecuaciones”

Albert Einstein

El trabajo desarrollado en esta tesis tiene un importante carácter práctico, ya que el modelado del efecto sombra de la bola de fuego permite su aplicación directa a distintos escenarios reales, con el fin de proporcionar determinados niveles de seguridad sobre personas o elementos vulnerables.

En este Capítulo se realizará una revisión del modelo dinámico de bola de fuego, introduciendo la influencia de barreras a la radiación térmica. Los factores de configuración determinados en el *Capítulo 4* se utilizarán para la determinación de zonas de planificación de escenarios representativos que almacenan o transportan gases licuados inflamables. La protección de elementos vulnerables frente a la radiación térmica se evaluará desde la condición de bola de fuego totalmente oculta. Por último, se lleva a cabo la propuesta de barreras físicas para la planificación territorial de accidentes graves de tipo térmico en el entorno de emplazamientos con presencia de sustancias inflamables. La aplicación de dicho método a un caso de estudio permite comprobar la utilidad de esta herramienta de planificación.

5.1. Modelo dinámico de bola de fuego considerando el efecto sombra

En el *Capítulo 4*, se han establecido dos escenarios fundamentales para evaluar el factor de configuración entre una bola de fuego y un receptor con efecto sombra. Se trata de la bola de fuego situada a ras de suelo y de la bola elevada para distintas alturas características. Dicho modelo describe el comportamiento de las bolas de fuego considerando que:

- a) Adquieren su máximo diámetro instantáneamente.
- b) Lo mantienen constante hasta que se completa su duración.
- c) Emiten radiación térmica a una tasa constante.
- d) Están situadas en una posición fija respecto al suelo.

Se trata por tanto de un modelo fundamentalmente estático. (Martinsen et al.,1999) propuso un modelo dinámico, donde los principales atributos de la bola de fuego varían con el tiempo, a diferencia del modelo estático. Sus principales características son:

- a) El tamaño de la bola de fuego es variable con el tiempo.
- b) Emiten radiación térmica a una tasa que varía con el tiempo.
- c) La posición de su centro se desplaza respecto al suelo.

El nuevo método propuesto permite modelizar con mayor precisión el fenómeno bola de fuego, de naturaleza dinámica, proporcionando unas mejores predicciones y evitando la sobreestimación de las zonas de riesgo potencialmente peligrosas por radiación térmica que se obtienen mediante el empleo del modelo estático. En (Martinsen et al.,1999; Casal, 2008) pueden encontrarse un análisis e información más detallada sobre el modelo y sus limitaciones. A continuación se muestran las principales ecuaciones que rigen en el modelo dinámico, de acuerdo a lo establecido en las referencias anteriores:

Geometría de la bola de fuego:

$$t_{max} = 0,9M^{0,25} \quad (\text{Ec.5.1})$$

$$D(t) = 8,664M^{0,25} t_i^{1/3} \quad ; \quad 0 \leq t_i \leq t_{max} / 3 \quad (\text{Ec.5.2})$$

$$H(t) = 0,5D \quad ; \quad 0 \leq t_i \leq t_{max} / 3 \quad (\text{Ec.5.3})$$

$$D_{max}(t) = 5,8M^{1/3} \quad ; \quad t_{max} / 3 < t_i < t_{max} \quad (\text{Ec.5.4})$$

$$H(t) = \frac{3D_{max}t_i}{2t_{max}} \quad ; \quad t_{max} / 3 < t_i < t_{max} \quad (\text{Ec.5.5})$$

Propiedades térmicas:

$$\eta_{rad} = 0,00325 p^{0,32} \quad ; \quad p, Nm^{-2} \quad (\text{Ec.5.6})$$

$$E_{max} = 0,0133 \eta_{rad} \Delta H_c M^{1/12} \quad ; \quad 0 \leq t_i \leq t_{max} / 3 \quad (\text{Ec.5.7})$$

$$E(t) = E_{max} \left[\frac{3}{2} \left(1 - \frac{t_i}{t_{max}} \right) \right] \quad ; \quad t_{max} / 3 < t_i < t_{max} \quad (\text{Ec.5.8})$$

$$\tau(t) = 2,85 (p_w d(t))^{-0,12} ; \quad p_w = \text{constante} \quad (\text{Ec.5.9})$$

$$d(t) = \sqrt{X_0^2 + H^2} - D/2 \quad (\text{Ec.5.10})$$

$$I(t) = \tau(t)F(t)E(t) \quad (\text{Ec.5.11})$$

$$D_t(t) = \int I(t)^{4/3} dt \quad (\text{Ec.5.12})$$

La tendencia de las distintas variables D, H, E en función del tiempo puede observarse en la Figura 5.1:

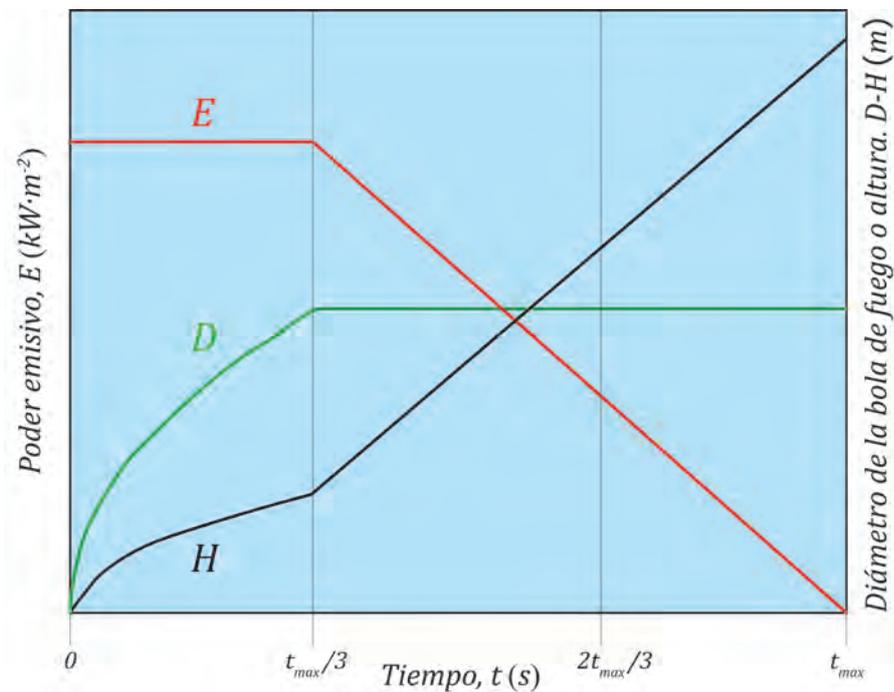


Figura 5.1. Variación de diámetro, poder emisor y altura en función del tiempo. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al factor de configuración, el modelo dinámico proporciona una expresión para su cálculo, pero se utilizará el método numérico comentado en el Apartado 4.3 para efectuar su cálculo, ya que en este caso se pretende modelar el efecto sombra. La ecuación para el cálculo del factor de configuración proporcionada por el modelo dinámico no considera la presencia de obstrucciones.

5.1.1. Planteamiento

En esta tesis, se realizará por primera vez el modelado de una bola de fuego dinámica, considerando el efecto sombra que ejerce un muro plano. De este modo se combinan dos métodos encaminados a efectuar un modelado más realista del mecanismo ascensional de una bola de fuego con presencia de obstáculos. La principal característica de este método combinado es que la bola de fuego, durante su régimen transitorio, pasa por distintas etapas en las que la visibilidad relativa puede ser nula, parcial y total.

Así, dependiendo del factor de proyección de la esfera (Z_d), es posible que haya casos en los que la bola de fuego no vea al receptor en sus etapas iniciales. En el comportamiento del sistema pueden diferenciarse tres regiones principales:

a) Visibilidad nula

En general, esta etapa tiene lugar al inicio, donde la bola de fuego comienza a desarrollarse y su diámetro es aún pequeño. Durante un determinado periodo, el factor de configuración es cero, ya que la barrera obstaculiza toda visión relativa entre receptor y emisor. A partir de la Ec.4.20, obtenemos la siguiente condición:

$$Z_p \geq Z_s \geq X_d D \left[\frac{4X_d H_d + \sqrt{(4X_d^2 + 4H_d^2 - 1)}}{(4X_d^2 - 1)} \right] \quad (\text{Ec.5.13})$$

Es decir, el factor es cero si la proyección sobre el eje de la esfera es superior al lugar geométrico que proporciona una barrera total al intercambio energético. Desarrollando la Ec.5.13 para $H_d=1/2$, que es la altura que corresponde al primer periodo, se obtiene:

$$Z_p \geq \frac{1}{\frac{1}{D(t)} - \frac{D(t)}{4X_0^2}} \quad (\text{Ec.5.14})$$

Sustituyendo $D(t)$ según la función del primer periodo (Ec.5.2), obtenemos:

$$Z_p \geq \frac{4X_0^2 8,664 M^{1/4} t_i^{1/3}}{4X_0^2 - 8,664^2 M^{1/16} t_i^{1/9}} \quad (\text{Ec.5.15})$$

De esta manera podemos obtener una ecuación implícita en función de la variable independiente t_i , que es necesario resolver por un proceso de iteración, para conocer qué valor de t_i hace un cero en la función. Ese es el instante de tiempo, denominado t_s , en el que se igualan Z_s y Z_p , para el primer periodo:

$$F^I(t_i) = \left[\left(\frac{4X_0^2 8,664 M^{1/4} t_i^{1/3}}{4X_0^2 - 8,664^2 M^{1/16} t_i^{1/9}} \right) - Z_p \right] \quad ; 0 \leq t_i \leq t_{max} / 3 \quad (\text{Ec.5.16})$$

Bajo el mismo planteamiento, para el segundo periodo se obtiene la siguiente expresión:

$$F''(t_i) = \left[\frac{5,8 \cdot M^{\frac{1}{3}}}{2} \left(\frac{2X_d \sqrt{4X_d^2 + \left(\frac{3t_i}{t_{max}}\right)^2} - 1 + \left(\frac{3t_i}{t_{max}}\right)}{4X_d^2 - 1} + 1 \right) - Z_p \right] ; t_{max} / 3 < t_i < t_{max} \quad (\text{Ec.5.17})$$

b) Visibilidad parcial

En esta etapa, existe un bloqueo parcial por parte del receptor, y el factor de configuración se determina mediante el método numérico comentado en el Apartado 4.3.

$$Z_v < Z_p < Z_s \quad ; \quad Z_p > 0 \quad (\text{Ec.5.18})$$

c) Visibilidad total

La bola de fuego va ascendiendo, y llega un momento en el que se alcanza una visibilidad completa con el receptor. Por esta razón, durante un determinado periodo de tiempo, el factor de configuración es idéntico al valor teórico, ya que la visibilidad es total y la barrera no ejerce ningún efecto. Esta condición se cumple cuando:

$$Z_p \leq Z_v \leq X_0 \left(\frac{H_d \sqrt{4X_d^2 + 4H_d^2 - 1} - X_d}{X_d \sqrt{4X_d^2 + 4H_d^2 - 1} + H_d} \right) \quad ; \quad H_d > 1/2 \quad (\text{Ec.5.19})$$

El momento a partir del cual la visibilidad es completa, viene determinado por la función implícita:

$$F^v(t_i) = \left[X_0 \left(\frac{\frac{3t_i}{2t_{max}} \sqrt{4X_d^2 + 4\left(\frac{3t_i}{2t_{max}}\right)^2} - 1 - X_d}{X_d \sqrt{4X_d^2 + 4\left(\frac{3t_i}{2t_{max}}\right)^2} - 1 + \frac{3t_i}{2t_{max}}} \right) - Z_p \right] ; t_{max} / 3 < t_i < t_{max} \quad (\text{Ec.5.20})$$

La función $F^v(t_i)$ está definida para $H_d > 1/2$, ya que para $H_d = 1/2$ la bola de fuego está en tierra, que corresponde con el primer periodo del modelo dinámico y la tangente a su base tiene la ecuación $Z(t) = 0$. Por este motivo $Z_v = 0$ y la Ec 5.20 parte del valor de $t_{max} / 3$.

5.1.2. Casuística

En definitiva, disponemos de las ecuaciones Z_s y Z_v en función del tiempo. Estas funciones, se definen para cada régimen de visibilidad mediante ecuaciones diferentes (F^I , F'' y F^v), que son las establecidas para el modelo dinámico.

Si fijamos un conjunto de valores de Z_p , X_o y M , podemos conocer a partir de qué instante de tiempo las funciones Z_s y Z_v están por encima o por debajo de Z_p . Mientras Z_p se encuentre por encima de Z_s , el factor de configuración será cero, y cuando sea inferior habrá visibilidad parcial, hasta que se alcance la curva de Z_v , momento en el que Z_p es menor que Z_v y la visibilidad será total, pudiendo calcular el valor del factor de configuración mediante la ecuación analítica (Ec 4.12). En la Figura 5.2 pueden apreciarse las distintas etapas que atraviesa la bola de fuego dependiendo de la visibilidad relativa.

Asimismo, en el gráfico pueden observarse los valores de t_i en los que se produce la inversión, designados como t_s y t_v .

Otro parámetro de interés es el valor a partir del cual no existe visibilidad completa puede observarse en la gráfica, y corresponde a valores de Z_p superiores al máximo valor que alcanza la función Z_v en $t=t_v$. Este valor sirve para caracterizar las regiones de visibilidad para un Z_p determinado. Es decir, si el valor de Z_p es superior a dicho límite, solamente existirá visibilidad nula y parcial, ofreciendo una mayor protección frente a la radiación térmica. Sustituyendo $t_i=t_v$ en la Ec.5.20 obtenemos dicho valor límite:

$$Z_{p,nv} = \left[6X_o \left(\frac{\sqrt{(X_d^2 + 2)}}{X_d \sqrt{(X_d^2 + 2)} + 3} \right) \right] \quad (\text{Ec.5.21})$$

Este gráfico (Figura 5.2) se encuentra definido para valores de Z_p mayores de cero e inferiores a $Z_{p,max}$. El valor de $Z_{p,max}$ se corresponde con el máximo valor de Z_s para $t=t_{max}$. Se corresponde con el lugar geométrico del caso extremo de bola de fuego totalmente oculta. Si se parte de un valor de Z_p superior a este, no es necesario efectuar cálculos, ya que el factor será cero. Este valor puede calcularse sustituyendo $t_i=t_{max}$ en la Ec.5.17:

$$Z_{p,max} = 10,6 M^{\frac{1}{3}} \left(\frac{X_d \sqrt{X_d^2 + 2}}{4X_d^2 - 1} \right) \quad (\text{Ec.5.22})$$

Por otra parte, cuando $Z_p=0$, no existe barrera, y la visibilidad es total. De la definición de Z_v , cuando se cumple la condición $Z_p \leq Z_v$, la visibilidad es completa (zona amarilla), de manera que cuando $Z_p=0$, en el primer tercio de tiempo, $Z_v=0$, siendo la visibilidad total. A partir del primer tercio $Z_v > Z_p$, siendo asimismo la visibilidad total. En cuanto a Z_s , es una función definida para $Z_p > 0$, ya que por definición, cuando $Z_p=0$, no existe muro, y Z_s representa el lugar geométrico de las proyecciones del muro que proporcionan visibilidad nula. Es cierto que cuando $Z_p=0$, $Z_s > Z_p$ para todo el rango de t , pero eso no implica que la visibilidad sea parcial, ya que partimos de la premisa de que hay visibilidad parcial si $Z_s > Z_p$, para todo $Z_p > 0$.

Por tanto, según muestra la Figura 5.2, el sistema bola de fuego-receptor pasaría por tres zonas o regiones de visibilidad:

- Zona de visibilidad nula (color gris). Hasta alcanzar el valor t_s , el factor de configuración sería cero. Si el valor de Z_p es bajo, pasaríamos por 3 etapas, una muy corta de visibilidad nula, otra de visibilidad parcial y por último visibilidad completa. La barrera ofrece escasa protección y el efecto sombra es limitado.
- Zona de visibilidad parcial (color naranja). A partir de t_s , el factor de configuración se calcularía con el método numérico, pero realizando únicamente cálculos entre t_s y t_v . En este caso concreto (Figura 5.2) $t_s > t_{max}/3$, por lo que los cálculos basados en el modelo dinámico serían solo para el segundo periodo, hasta alcanzar el valor de t_v . Si el valor de Z_p es medio pasaríamos por tres etapas, visibilidad nula, visibilidad parcial y visibilidad total. En este caso, el orden de magnitud de Z_p fluctuaría en torno a la proyección vertical que corresponde con el centro de la esfera.
- Zona de visibilidad completa (color amarillo). A partir de t_v , el cálculo del factor de configuración se realizaría únicamente con las ecuaciones teóricas de visibilidad completa. Si el valor de Z_p es alto, no habría visibilidad total, habría visibilidad cero en los momentos iniciales y posteriormente parcial. En este caso, el valor que representa un orden de magnitud para Z_p sería aquel próximo a la proyección vertical que corresponde con la línea que, partiendo del receptor, es tangente superior a la bola de fuego.

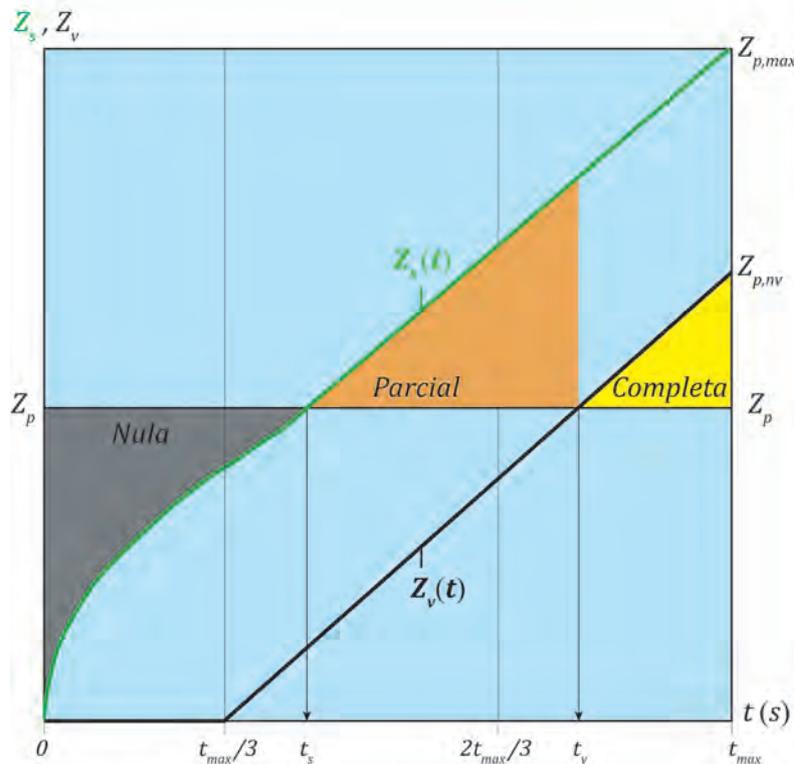


Figura 5.2. Variación de las condiciones de visibilidad relativa en función del tiempo. Fuente: Elaboración propia.

A continuación desarrollaremos el cálculo del modelo dinámico con efecto sombra para un accidente donde está implicado LPG, con el fin de poner en práctica el método anterior:

Tabla 5.1. Valores considerados en el caso práctico. Fuente: Elaboración propia.

Datos de hipótesis			
Variable	Descripción	Valor	Unidades
M	Masa combustible	100 000	kg
p	Presión antes de rotura	19	bar
X_0	Distancia del receptor	275	m
X_w	Distancia muro	10	m
Z_w	Altura muro	5,45	m
p_w	Presión parcial del vapor de agua en la atmósfera	1155	Pa
ΔH_c	Poder calorífico	46 000	kJ/kg

La metodología de cálculo aparece descrita en la Figura 5.3, y es la siguiente:

1. Calculamos el valor de t_{max} mediante la Ec.5.1 y se define el número de divisiones t_i :

$$t_{max} = 0,9 \cdot 100\,000^{0,25} = 16,0 \text{ s}$$

$$t_{max/3} = \frac{16}{3} = 5,3 \hat{=} \text{ s}$$

Consideramos 48 divisiones de tiempo, correspondientes a tres divisiones por cada segundo. Por tanto $N=48$.

2. Calculamos Z_p (a partir de X_w, X_0, Z_w)

$$Z_p = \frac{X_0 \cdot Z_w}{X_s} = \frac{275 \cdot 5,45}{10} = 149,9$$

3. Comprobamos los cruces de Z_p con Z_s y Z_v :

$$t_s = 0,75 \text{ s}$$

$$t_v = 12,01 \text{ s}$$

Por debajo de t_s el factor es cero, por lo que en el rango entre $0 < t < t_s$ no es necesario efectuar cálculos. A partir de estos valores, obtenemos la siguiente tabla de tiempos, que será la que utilizemos para calcular el factor de configuración en cada intervalo (Figura 5.4):

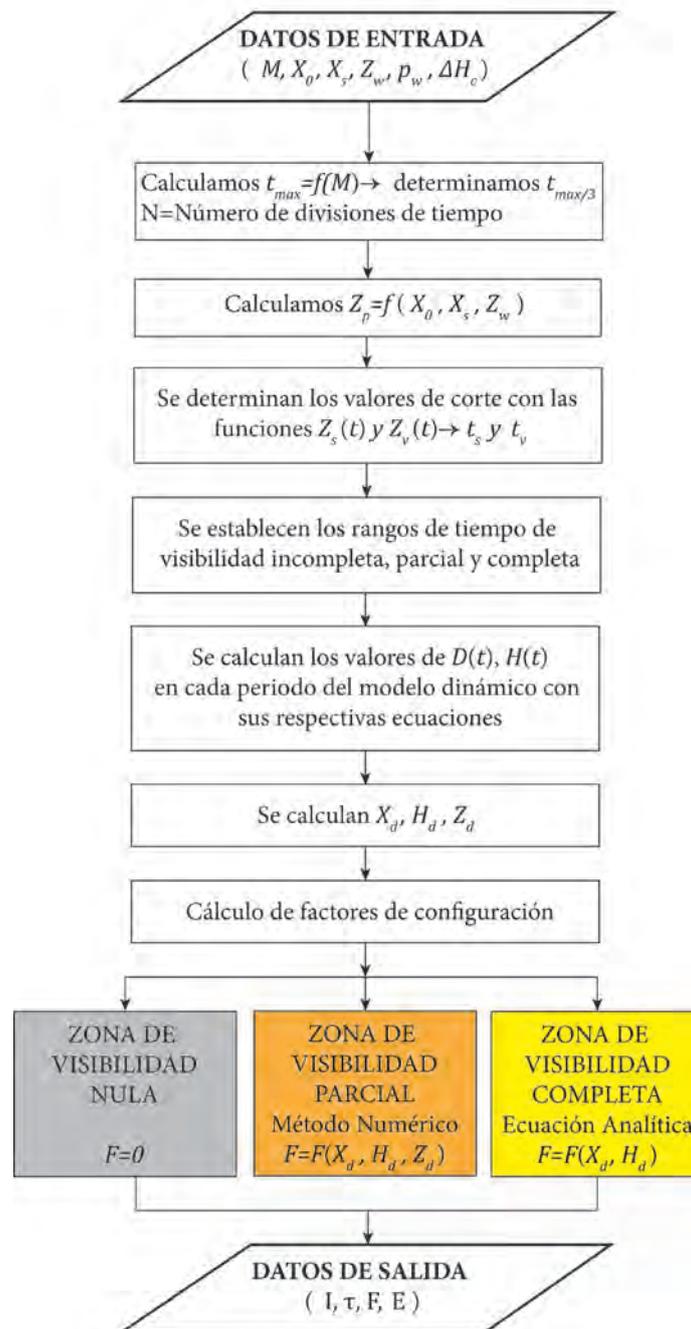


Figura 5.3. Algoritmo de cálculo del modelo dinámico de bola de fuego con presencia de obstáculos. Fuente: Elaboración propia.

4. Se calculan D y H para cada intervalo con sus correspondientes ecuaciones (Ec.5.2, 5.3, 5.4 y 5.5).
5. A partir de los valores anteriores se calcula H_d (en el primer periodo tenemos una bola a ras de suelo, $H_d=0,5$, y por tanto no hay que calcularlo, ya que es un valor constante).
6. Se calcula X_d para cada t_i , ya que varía al cambiar el diámetro de la bola.

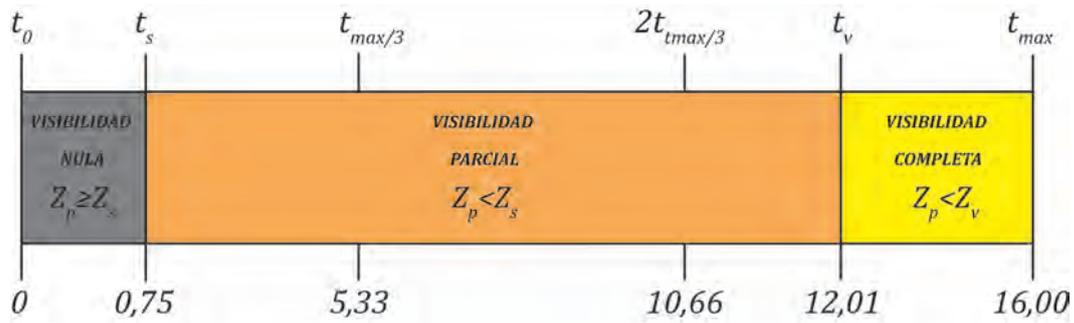


Figura 5.4. Tabla de tiempos con distintas condiciones de visibilidad. Fuente: Elaboración propia.

7. Calculamos los $Z_{di}=Z_p / D_i$.
8. Calculamos $F(X_d, H_d, Z_d)$ con el modelo numérico (Apartado 4.3).
9. Calculamos F con el modelo teórico en el intervalo de visibilidad total (Ec.4.12).
10. Calculamos η_{rad}, d, τ (Ec.5.6, 5.9 y 5.10).
11. Calculamos E (Ec.5.7 y 5.8).
12. Calculamos $I= \tau FE$ (Ec.5.11).

En la Tabla 5.2 aparecen resumidos los resultados de los cálculos realizados para el modelo dinámico con sombra.

Tabla 5.2. Resultados para el caso práctico del modelo dinámico. $N_e=2500$. Fuente: Elaboración propia.

Visibilidad Parcial / Primer período / $t_s \rightarrow t_{max}/3$										
t_1	D_1	H_1	H_{d1}	X_{d1}	Z_{d1}	F_1	d_1	E_1	τ	I_1
0,7526	140,14	70,07	0,5	1,96	1,06	0,000070	213,71	530,10	0,642	0,02
1,00	154,07	77,03		1,78	0,97	0,003304	208,55		0,644	1,13
1,33	169,57	84,78		1,62	0,88	0,009987	202,98		0,646	3,42
1,66	182,67	91,33		1,50	0,82	0,017046	198,43		0,648	5,86
2,00	194,11	97,05		1,41	0,77	0,024566	194,56		0,650	8,46
2,33	2004,35	102,17		1,34	0,73	0,031893	191,19		0,651	11,01
2,66	213,65	106,82		1,28	0,70	0,038763	188,19		0,652	13,40
3,00	222,20	111,10		1,23	0,67	0,046092	185,49		0,653	15,96
3,33	230,15	115,07		1,19	0,65	0,052069	183,03		0,654	18,06
3,66	237,57	118,78		1,15	0,63	0,058662	180,76		0,655	20,38
4,00	244,57	122,28		1,12	0,61	0,064959	178,67		0,656	22,60
4,33	251,18	125,59		1,09	0,59	0,071791	176,72		0,657	25,01
4,66	257,46	128,73		1,06	0,58	0,077129	174,90		0,658	26,90
5,00	263,45	131,72		1,04	0,56	0,083688	173,19		0,659	29,22
5,33	269,21	134,59		1,02	0,55	0,088324	171,57		0,659	30,88

Visibilidad Parcial / Segundo periodo / $t_{max}/3 \rightarrow t_v$										
t_2	D_2	H_2	H_{d2}	X_{d2}	Z_{d2}	F_2	d_2	E_2	τ	I_2
5,33	269,2	134,56	0,50	1,02	0,55	0,088324	171,55	530,17	0,659	30,86
5,66		142,97	0,53			0,086463	175,34	513,61	0,658	29,22
6,00		151,38	0,56			0,084440	179,31	497,05	0,656	27,53
6,33		159,79	0,59			0,082453	183,45	480,49	0,654	25,91
6,66		168,21	0,62			0,080323	187,76	463,93	0,652	24,30
7,00		176,62	0,65			0,078281	192,23	447,37	0,651	22,80
7,33		185,03	0,68			0,076339	196,85	430,81	0,649	21,34
7,66		193,44	0,71			0,074298	201,62	414,25	0,647	19,91
8,00		201,85	0,74			0,072328	206,52	397,69	0,645	18,55
8,33		210,26	0,78			0,069738	211,57	381,13	0,643	17,09
8,66		218,67	0,81			0,067804	216,74	364,57	0,641	15,85
9,00		227,08	0,84			0,065979	222,03	348,00	0,639	14,67
9,33		235,49	0,87			0,064157	227,45	331,44	0,638	13,57
9,66		243,90	0,90			0,062353	232,97	314,88	0,636	12,49
10,00		252,31	0,93			0,060626	238,61	298,32	0,634	11,47
10,33		260,72	0,96			0,058905	244,34	281,76	0,632	10,49
10,66		269,13	0,99			0,057287	250,18	265,20	0,630	9,57
11,00		277,54	1,03			0,055083	256,11	248,64	0,629	8,61
11,33		285,95	1,06			0,053566	262,13	232,08	0,627	7,79
11,66		294,36	1,09			0,052072	268,23	215,52	0,625	7,01
12,00	302,77	1,12	0,050620	274,42	198,96	0,623	6,27			
12,01	303,03	1,125	0,050361	274,60	198,46	0,623	6,23			

Visibilidad Completa / Último periodo / $t_v \rightarrow t_{max}$										
t_3	D_3	H_3	H_{d3}	X_{d3}	Z_{d3}	F_3	d_3	E_3	τ	I_3
12,01	269,2	303,03	1,12	1,02	0,55	0,108203	274,60	198,46	0,623	13,38
12,33		311,18	1,15			0,105059	280,68	182,39	0,622	11,91
12,66		319,59	1,18			0,101923	287,02	165,83	0,620	10,48
13,00		328,00	1,21			0,098893	293,43	149,27	0,618	9,13
13,33		336,42	1,24			0,095966	299,91	132,71	0,617	7,85
13,66		344,83	1,28			0,093140	306,45	116,15	0,615	6,65
14,00		353,24	1,31			0,090411	313,06	99,59	0,614	5,52
14,33		361,65	1,34			0,087778	319,73	83,03	0,612	4,46

Visibilidad Completa / Último periodo / $t_v \rightarrow t_{max}$										
t_3	D_3	H_3	H_{d3}	X_{d3}	Z_{d3}	F_3	d_3	E_3	τ	I_3
14,66		370,06	1,37			0,085236	326,45	66,47	0,610	3,46
15,00		378,47	1,40			0,082785	333,23	49,91	0,609	2,52
15,33		386,88	1,43			0,080419	340,06	33,35	0,608	1,63
15,66		395,29	1,46			0,078138	346,94	16,79	0,606	0,79
16,00		403,70	1,50			0,075937	353,86	0,22	0,605	0,01
16,0045						0,075908	353,96	0,00	0,605	0,00

También se han realizado los cálculos con el modelo dinámico sin efecto sombra, en el que la metodología de cálculo es idéntica a la llevada a cabo en la Tabla 5.2, salvo que los factores de configuración se calculan mediante su valor teórico. Asimismo, se ha analizado el caso práctico con el modelo estático para bola de fuego a ras de suelo y elevada, para escenarios con sombra y sin sombra. El modelo estático para esas configuraciones ha sido descrito en el *Capítulo 4*. En la Tabla 5.4 aparecen los resultados de cada modelo, para el que se han utilizado las siguientes ecuaciones Probit (Tsao et al., 1979):

$$Y = a + b \cdot \ln(V) \quad (\text{Ec.5.23})$$

Tabla 5.3. Modelos Probit utilizados. Fuente: Tsao et al., 1989.

Función	Efectos	a	b	V
1	Quemaduras primer grado	-39,83	3,0186	$t \cdot I^{4/3}$
2	Quemaduras segundo grado	-43,14		
3	Mortalidad	-36,38	2,56	
4	Mortalidad (ropa)	-37,23		

A partir de dichas ecuaciones, las variables Probit se convierten a porcentaje de población afectada mediante las ecuaciones analíticas propuestas por (Vilchez et al., 2001).

Del cálculo mediante distintos modelos estáticos destaca la reducción de la intensidad de radiación recibida que proporcionan los modelos con sombra respecto a los modelos sin sombra, con un 54% para bola a ras de suelo y 56% para bola elevada. En cuanto a la dosis de radiación térmica, la reducción es de un 64% para la bola a ras de suelo, un 66% para la bola elevada y un 68% para el modelo dinámico, respecto al modelo sin sombra. El muro consigue, por tanto, reducir 2 tercios de la dosis incidente.

El nivel de radiación térmica es muy elevado, y la mortalidad es del 100% para los modelos estáticos sin sombra. Si consideramos el efecto ejercido por la sombra, la mortalidad se reduce en un 16% y un 40% para bola en tierra y elevada, respectivamente.

Destaca la gran reducción proporcionada por el muro para el modelo dinámico, que pasa de un 89% de mortalidad a tan solo un 5%; si consideramos el efecto protector que ejerce la ropa, prácticamente la mortalidad es inferior al 1%.

Tabla 5.4. Comparación de un modelo dinámico y estático con y sin efecto sombra. Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	Tipo de modelo					
	Estático				Dinámico	
	Bola Ras de Suelo		Bola Elevada			
	Sin Sombra	Sombra	Sin Sombra	Sombra	Sin Sombra	Sombra
D (m)	269,21				Variable	
H_d	0,5		0,75			
X_d	1,02					
Z_d	0,55					
t_{max} (s)	16,00					
t_s (s)					0,7526	
t_v (s)					12,0157	
E (kW·m ⁻²)	530,10				Variable	
τ	0,65		0,63			
F	0,193279	0,088449	0,155670	0,031396		
I (kW·m ⁻²)	67,56	30,92	52,01	22,83		
D_t	4,40·10 ⁷	1,55·10 ⁷	3,10·10 ⁷	1,03·10 ⁷	1,70·10 ⁷	5,42·10 ⁶
Probit	8,67	6,00	7,78	4,97	6,25	3,31
Quemaduras de primer grado (%)	100	100	100	100	100	97,5
Quemaduras de segundo grado (%)	100	96,7	100	72,5	98,2	9,0
Mortalidad (%)	100	84	99,7	59	89	5
Mortalidad (%) considerando el efecto protector de la ropa	99,7	55,9	97,2	18,4	65,1	0,55

En cuanto a daños sobre la piel, según el modelo estático sin sombra el 100% de la población sufriría quemaduras de segundo grado y únicamente se produce una reducción significativa en el modelo dinámico, pasando del 98% de la población a un 9%.

En la Figura 5.5 se observa el desarrollo vertical de la bola de fuego para algunos instantes de tiempo, con la variación de diámetro y altura de la bola de fuego correspondiente al modelo dinámico. En la Figura 5.6 se representan los valores de intensidad de radiación térmica en función del tiempo, para el modelo dinámico con sombra, comparándolo con el modelo dinámico sin sombra y los modelos estáticos de bola a ras de suelo y elevada, con y sin efecto sombra:

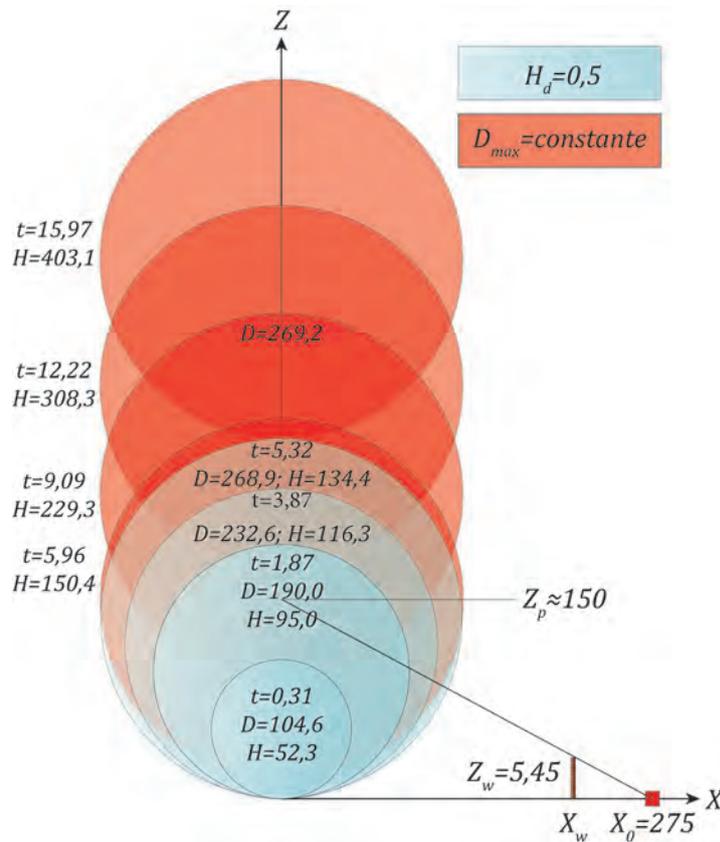


Figura 5.5. Evolución del tamaño y altura de la bola de fuego con el tiempo. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 5.6 se observan los distintos modelos de bola de fuego. Los modelos estáticos se caracterizan por un nivel de intensidad de radiación que es constante durante todo el periodo de vida de la bola de fuego. El modelo estático, más próximo al receptor, proporciona intensidades más elevadas, en comparación con el elevado. En ambos casos, el efecto sombra produce una reducción importante del nivel de radiación, que resulta ser mayor para la bola en tierra, como se aprecia por la diferencia de altura de sus correspondientes líneas horizontales.

El modelo dinámico clásico parte de un nivel de intensidad nulo en el instante inicial. Progresivamente comienza a aumentar, conforme crece la bola de fuego, hasta alcanzar su máximo diámetro. En ese instante se alcanza la máxima intensidad, correspondiente al primer tercio de su vida. A partir de ese momento la bola comienza a elevarse y la radiación va disminuyendo hasta su completa consunción. El modelo dinámico con sombra, arranca desde un nivel de intensidad nulo en el instante inicial, pero la existencia del muro impide que la bola vea al receptor, por lo que el factor es cero, como se aprecia en el gráfico, hasta alcanzar el tiempo t_s . A partir de ese momento, el modelo sigue el mismo patrón que el modelo clásico, pero con un nivel de intensidad sensiblemente inferior puesto que la visibilidad es parcial y los factores de configuración son menores. La bola asciende hasta un punto en el que la visibilidad es completa, justo en el instante t_v . Entonces, se produce un aumento de los factores de configuración, que corresponden al modelo clásico, motivo por el que las curvas se solapan en el último intervalo.

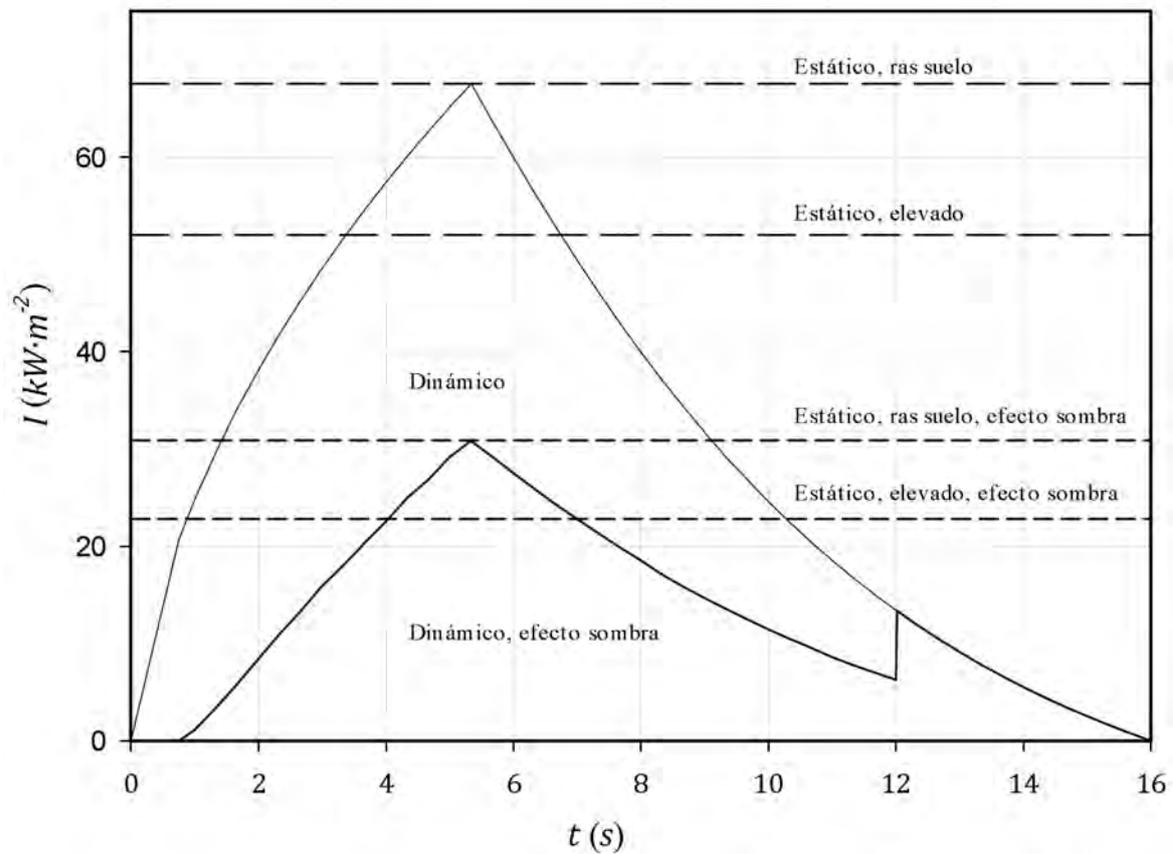


Figura 5.6. Intensidad de radiación en función del tiempo para el caso práctico con presencia de muro.

5.2. Zonas de planificación. Curvas de vulnerabilidad

La radiación térmica emitida por una bola de fuego es muy elevada por la gran cantidad de combustible involucrado. Además, su corto periodo de duración limita el tiempo de que disponen las personas para protegerse o abandonar la zona. Los efectos que la radiación térmica ejerce sobre las personas se puede concretar en efectos fisiológicos y patológicos.

Los fisiológicos son aquellos que producen una alteración en las constantes vitales del organismo: temperatura, tensión arterial, respiración y frecuencia cardíaca. Apenas producen daños sobre las personas.

Los efectos patológicos son más importantes, ya que se manifiestan a través de quemaduras ocasionadas por la absorción del calor sobre la piel. Las quemaduras generalmente se clasifican en primer grado, segundo grado y tercer grado, en base a la profundidad y extensión del daño, que se encuentran relacionadas con dosis térmica.

- Quemaduras de primer grado. Se caracterizan por un daño superficial, con enrojecimiento y sequedad de la piel que provoca una sensación de dolor. No generan ampollas y la sensación de dolor aumenta con el tiempo de exposición. Sus efectos son reversibles con el paso de los días.

- Quemaduras de segundo grado. Se caracterizan por provocar daños a la epidermis, con aparición de ampollas y requieren de asistencia para su recuperación.
- Quemaduras de tercer grado. Se caracterizan por provocar daños a la dermis, ocasionando la pérdida de sensibilidad en la zona afectada y vulnerabilidad ante agentes patógenos que pueden desencadenar infecciones. Requieren de asistencia urgente y sus efectos suelen ser irreversibles pudiendo ocasionar incluso la muerte.

A partir de los factores de configuración calculados en el *Capítulo 4*, pueden caracterizarse los efectos sobre la población debidos a la radiación térmica de la bola de fuego con efecto sombra, en base a distintos índices.

5.2.1. Funciones Probit

Un primer criterio para caracterizar el nivel de daño consiste en utilizar las funciones Probit 1,2 y 3 de la Tabla 5.3, correspondientes a quemaduras de primer grado, quemaduras de segundo grado y mortalidad. Las quemaduras de tercer grado no se consideran al no estar suficientemente contrastadas las ecuaciones que permiten calcular la dosis umbral.

De esta forma pueden elaborarse gráficos donde se represente el porcentaje de población afectada, en función de la posición del receptor (X_d) y de las características del muro (Z_d). El objetivo es disponer de una herramienta de planificación para accidentes donde se produzcan bolas de fuego, considerando el efecto protector del muro.

Con el fin de obtener una gran representatividad y universalidad de los gráficos, se consideran cuatro casos típicos de tanques de almacenamiento y transporte de LPG, que es una de las sustancias más utilizadas en la industria de procesos y susceptible de ocasionar una bola de fuego:

- Camión Cisterna (Road Tanker).
Masa de diseño: 20 Toneladas.
Volumen característico 45-56 m³.
- Vagón Cisterna (Rail Tank Car).
Masa de diseño: 50 Toneladas.
Volumen característico: 108-130 m³.
- Depósito de Almacenamiento Horizontal (Horizontal Storage Tank).
Masa de diseño: 100 Toneladas.
Volumen característico: 225-250 m³ (60 000 US gallon).
- Esfera de Almacenamiento (Sphere Tank).

Masa de diseño: 450 Toneladas.

Volumen característico: 1000-6000 m³. Se utiliza la masa equivalente a 1000 m³.

El cálculo de factores de configuración se lleva a cabo según el modelo estático, en régimen estacionario, para una bola de fuego a ras de suelo ($H_d=0,5$) y elevada, para el caso particular de ($H_d=1$).

La metodología de cálculo de la intensidad de radiación térmica será la utilizada en (Casal et al., 2001), correspondiente a un modelo de cálculo internacionalmente aceptado. El poder calorífico se asume igual a 50 000 kJ/kg (H_c) y la fracción de energía que se emite en forma de radiación térmica igual a 1/3 (η_{rad}), que representa un valor conservador, equivalente a una presión de rotura de 2 MPa.

En la Figura 5.7 se muestra un ejemplo de estos gráficos. Se representa el porcentaje de letalidad para una bola de fuego a ras de suelo con efecto sombra, para una masa de 100 toneladas. En el Anexo C se recogen la familia de curvas para cuatro casos anteriormente descritos, incluyendo los porcentajes de letalidad, quemaduras de primer grado y quemaduras de segundo grado.

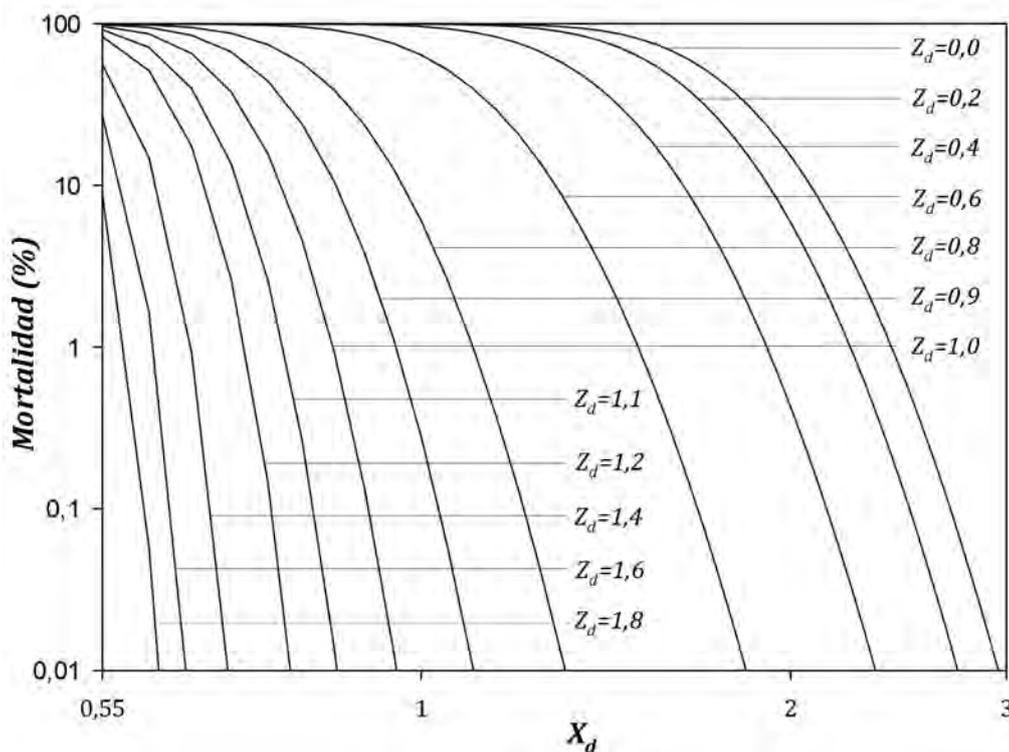


Figura 5.7. Porcentaje de letalidad para bola de fuego en tierra ($H_d=0,5$) con efecto sombra (M=100 Tn).

Fuente: Elaboración propia.

5.2.2. Intensidad de radiación térmica

La intensidad de radiación térmica es otro parámetro interesante para identificar las zonas umbral a partir de las cuales las personas experimentan daños como consecuencias del fenómeno térmico.

Considerando a la bola de fuego como un evento de corta duración, inferior a 1 minuto, diversos autores y normativas establecen valores umbrales para las zonas de alerta e intervención. Al respecto, cabe destacar el trabajo realizado por (Raj, 2008), que lleva a cabo una revisión de los criterios para la exposición de la población ante la radiación térmica emitida por incendios existentes en distintas normativas. Mediante ensayos con fuego real se ha determinado que el extendido criterio para la seguridad pública de 5 kW/m^2 durante 20-30 segundos de exposición es muy conservador y representa un elevado de factor de seguridad.

Por tanto, mediante gráficos del tipo $I=I(X_d, Z_d, H_d)$ podemos conocer, para distintos valores umbrales considerados, que zonas (caracterizadas por la posición del receptor y las características del muro) ofrecen protección para la población y los intervinientes. En la Figura 5.7 se muestra el gráfico para una bola a ras de suelo formada a partir de una carga equivalente a un camión cisterna de LPG ($M=20 \text{ Tn}$). La línea discontinua representa la isolínea correspondiente a 5 kW/m^2 . Supongamos que se establece ese valor como aquel por debajo del cual las personas no sufren daños durante el periodo de vida de la bola de fuego. Entonces, las curvas por debajo de la isolínea corresponderían a zonas seguras. Por tanto, se dispone de información para el dimensionamiento de barreras y zonas de planificación.

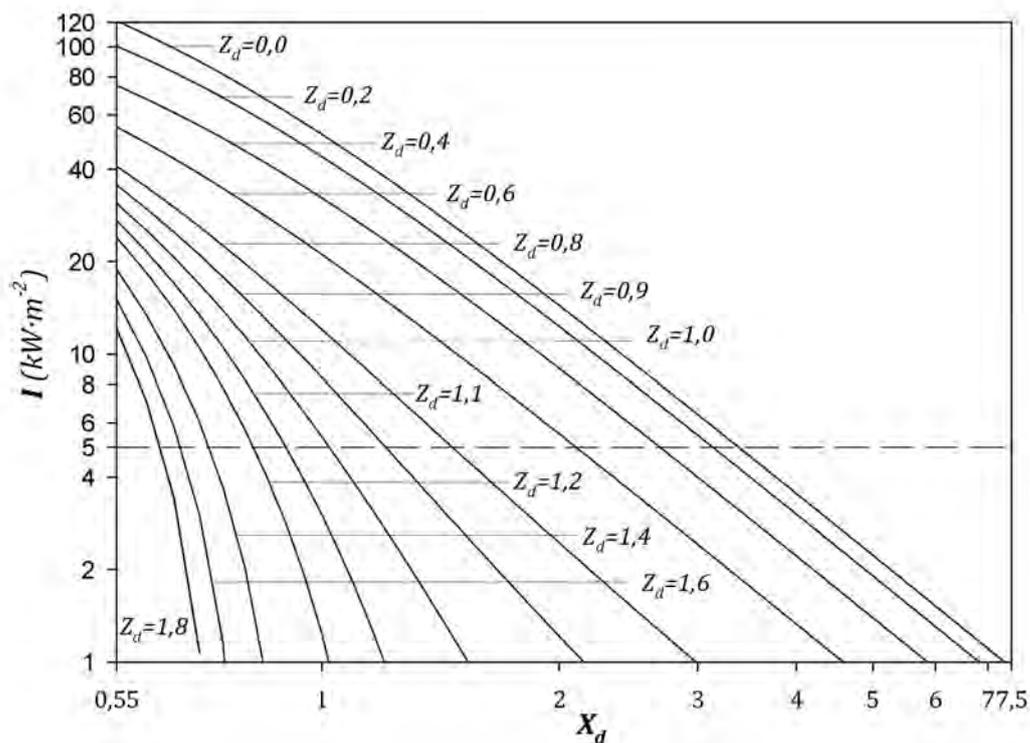


Figura 5.8. Intensidad de radiación para bola de fuego a ras de suelo con efecto sombra ($M=20 \text{ Tn}$). Fuente: Elaboración propia.

5.2.3. Dosis de radiación térmica

Otros criterios se basan en la dosis de radiación térmica, que considera el tiempo de exposición, pudiendo obtenerse una misma dosis de radiación mediante distintas combinaciones de valores de intensidad térmica y tiempo.

En España, la Directriz básica de protección civil para el control y planificación ante el riesgo de accidentes graves en los que intervienen sustancias peligrosas, establece dos zonas a efectos de los fenómenos peligrosos que pueden producir los accidentes graves:

- **Zona de intervención:** es aquella en la que las consecuencias de los accidentes producen un nivel de daños que justifica la aplicación inmediata de medidas de protección. Establece un valor umbral de dosis de radiación térmica de $250 \text{ (kW}\cdot\text{m}^{-2})^{4/3}\cdot\text{s}$. Este valor se corresponde con la isolínea de dosis que puede provocar quemaduras de segundo grado, de acuerdo a (Buettner, 1951). Este nivel de dosis es equivalente a las siguientes combinaciones de intensidad térmica y tiempos de exposición:

Tabla 5.5. Intensidad térmica y tiempo de exposición equivalentes a una dosis térmica de $250 \text{ (kW}\cdot\text{m}^{-2})^{4/3}\cdot\text{s}$.

Fuente: Elaboración propia.

$I \text{ (kW}\cdot\text{m}^{-2})$	18,8	11,1	8,2	6,6	5,6	4,9
$t \text{ (s)}$	5	10	15	20	25	30

- **Zona de alerta:** es aquella en la que las consecuencias de los accidentes provocan efectos que, aunque perceptibles por la población, no justifican la intervención, excepto para los grupos críticos de población. Establece un valor umbral de dosis de radiación térmica de $115 \text{ (kW}\cdot\text{m}^{-2})^{4/3}\cdot\text{s}$. Este valor se corresponde con el umbral a partir del cual comienza la sensación de dolor y se producen quemaduras de primer grado, de acuerdo a (Mudan, 1984).

Tabla 5.6. Intensidad térmica y tiempo de exposición equivalentes a una dosis térmica de $115 \text{ (kW}\cdot\text{m}^{-2})^{4/3}\cdot\text{s}$.

Fuente: Elaboración propia.

$I \text{ (kW}\cdot\text{m}^{-2})$	10,5	6,2	4,6	3,7	3,1	2,7
$t \text{ (s)}$	5	10	15	20	25	30

Por otra parte, en el trabajo realizado por (HSE, 2013), después de considerar los efectos patológicos y fisiológicos de los efectos térmicos, propone un criterio de letalidad para la dosis de radiación térmica de:

- 1% Letalidad. $1000 \text{ (kW}\cdot\text{m}^{-2})^{4/3}\cdot\text{s}$
- 50% Letalidad. $2000 \text{ (kW}\cdot\text{m}^{-2})^{4/3}\cdot\text{s}$
- 100% Letalidad. $3200 \text{ (kW}\cdot\text{m}^{-2})^{4/3}\cdot\text{s}$

En la Figura 5.9 se representa la dosis de radiación térmica frente a la posición del receptor y el efecto de la barrera, incluyendo las isolíneas correspondientes a los criterios de vulnerabilidad anteriormente citados:

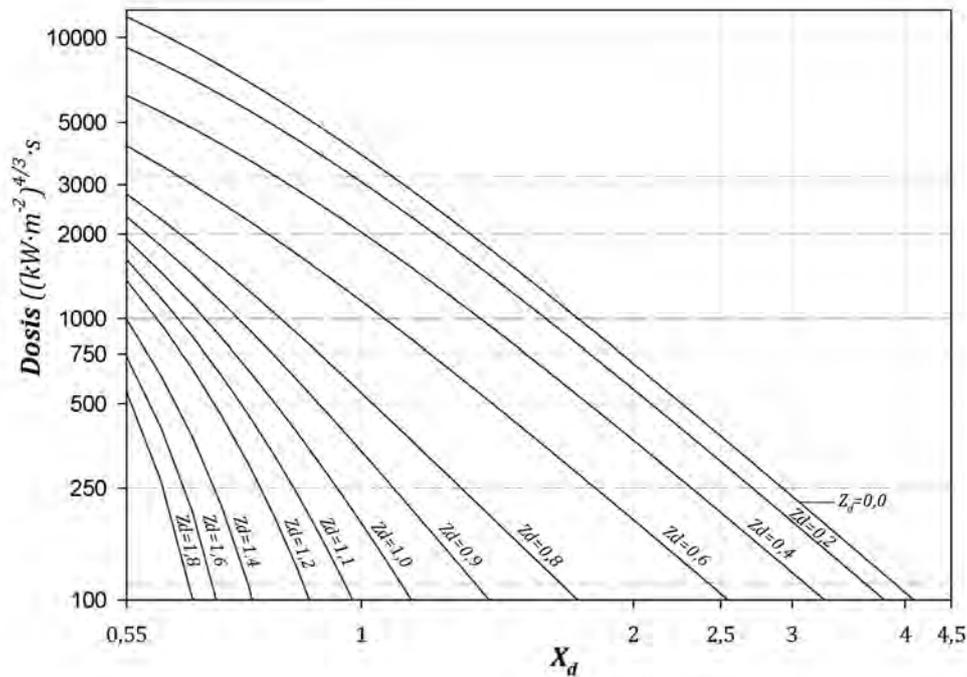


Figura 5.9. Dosis de radiación térmica para bola de fuego en tierra ($H_d=0,5$) con efecto sombra ($M=100$ Tn).

Fuente: Elaboración propia.

Los gráficos obtenidos en este apartado sirven para conocer las características de las barreras que proporcionan determinados niveles de protección a las personas ante la radiación térmica, bajo distintos criterios de vulnerabilidad.

5.3. Protección de elementos vulnerables

En el *Capítulo 4*, se han desarrollado las bases teóricas de la bola de fuego totalmente oculta. Basándonos en la ecuación del lugar geométrico, podemos conocer para cada valor de X_d , el valor de Z_s que proporciona un factor de configuración nulo, es decir, un bloqueo completo de la visión relativa entre la bola de fuego y el objetivo. Para un par coordenadas cualesquiera (X_d, H_d), podemos determinar el parámetro Z_{sd} .

Ahora definimos el factor del muro, f_w , que es la relación entre la altura del muro respecto a su distancia al receptor:

$$f_w = \frac{Z_w}{X_s} \tag{Ec.5.24}$$

A partir de dicho valor, podemos determinar el factor geométrico del muro, $f_{w=0}$, es decir, un muro cuya geometría característica impide que la bola de fuego vea al receptor, teniendo como resultado un intercambio de energía nulo entre ambos.

En la Figura 5.10 puede apreciarse como los muros A,B,C,D,E tienen distintas alturas y distancias al receptor, pero sin embargo, en todos los casos bloquean la bola de fuego y por tanto su factor geométrico del muro es idéntico. Se trata de la analogía descrita en el *Capítulo 3*.

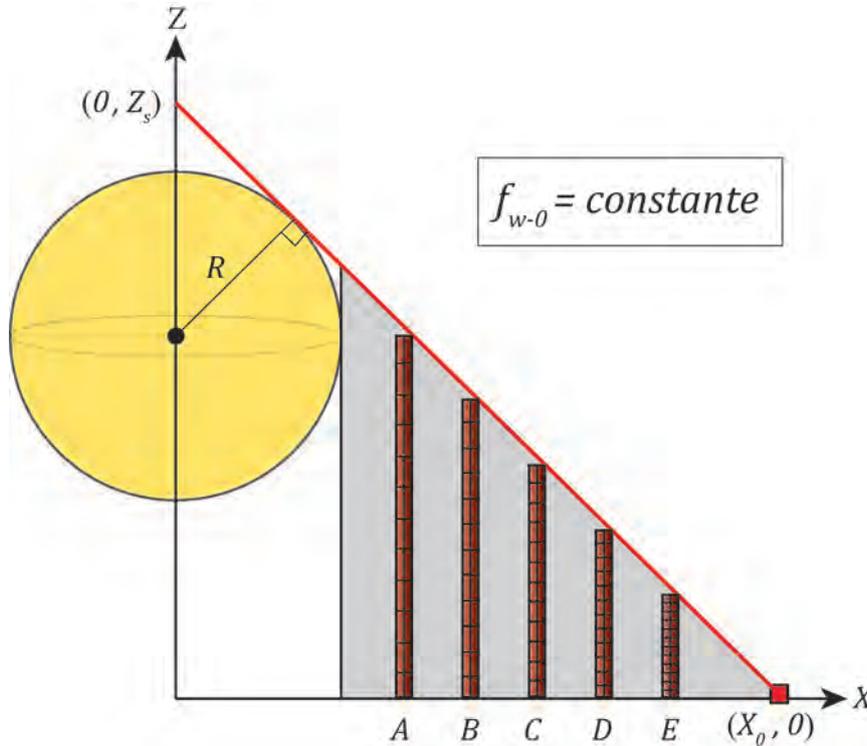


Figura 5.10. Distintas geometrías del muro proporcionan visibilidad nula. Fuente: Elaboración propia.

Aplicando el teorema de Thales podemos relacionar las variables ($f_{w-0}, Z_{sd}, X_d, H_d$):

$$f_{w-0} = \left(\frac{Z_w}{X_s} \right)_{F=0} \geq \frac{Z_s}{X_0} \geq \frac{Z_{sd}}{X_d} \geq \left[\frac{4X_d H_d + \sqrt{(4X_d^2 + 4H_d^2 - 1)}}{(4X_d^2 - 1)} \right] \quad (\text{Ec.5.25})$$

La ecuación anterior tiene una gran utilidad en términos de planificación y protección de elementos vulnerables en la industria de procesos. Para cada tanque de almacenamiento puede definirse una bola de fuego de diseño, y en base a ello estimarse la ubicación y características del muro que proporcionan una protección total a la radiación térmica.

Una vez determinado el factor geométrico del muro, f_{w-0} , fijando una de las siguientes variables obtenemos unívocamente la otra:

- La altura del muro, Z_w .
- La separación del muro, X_s , respecto a un objetivo situado en X_0 .

Si por ejemplo obtenemos un factor geométrico del muro $f_{w-0}=2$, esta condición implica que la altura del muro será el doble de la distancia al receptor, o dicho de otro modo, la distancia al receptor será la mitad de la altura del muro.

Desde un punto de vista económico, para una misma protección, interesa que el muro se sitúe próximo al receptor, ya que de esta forma el muro requiere menor altura, como se muestra en la Figura 5.10.

Podemos representar f_{w-0} (Ec.5.25) para distintas alturas de la bola de fuego, frente a X_d . Este gráfico resulta muy útil para el dimensionamiento de barreras, a partir de un valor conocido de X_d y una altura determinada de la bola de fuego, como se muestra en la Figura 5.11:

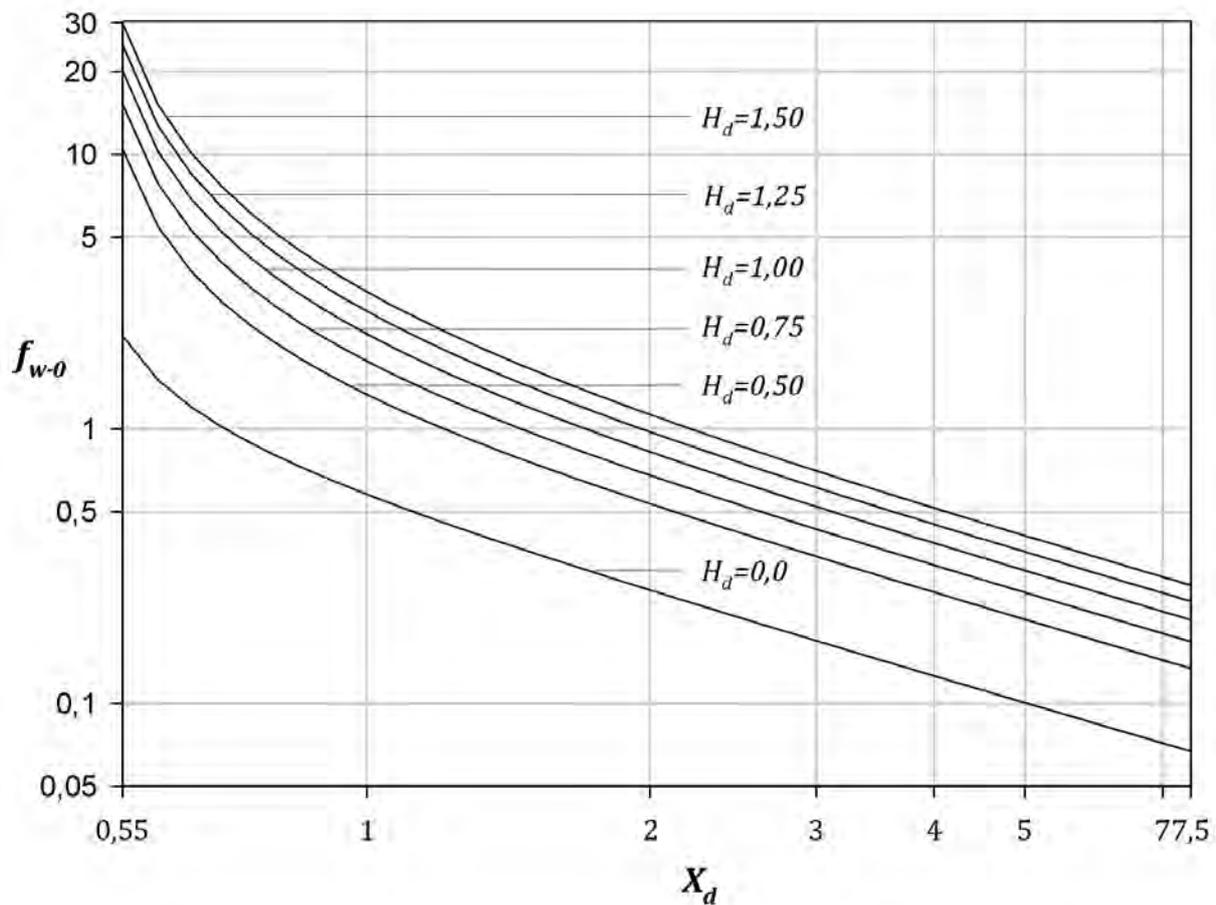


Figura 5.11. Representación del factor geométrico del muro para distintas alturas de la bola de fuego. Fuente: Elaboración propia.

Procediendo de la misma forma, para las bolas elevadas podemos determinar otro parámetro, el factor geométrico del muro visible, f_{w-100} , es decir, aquel muro cuya geometría característica permite que la bola de fuego vea al receptor, siendo por tanto su efecto despreciable.

Este parámetro está relacionado con la condición de visibilidad completa desarrollada en el Apartado 4.3.2.a. Su ecuación característica es la siguiente:

$$f_{w-100}(X_d, H_d) \geq \left[\frac{H_d \sqrt{(4X_d^2 + 4H_d^2 - 1)} - X_d}{X_d \sqrt{(4X_d^2 + 4H_d^2 - 1)} + H_d} \right] \quad (\text{Ec.5.26})$$

En la Figura 5.12, se puede observar, para una bola de fuego elevada ($H_d=1$), las regiones donde el muro no tiene influencia alguna (I-parte del gráfico bajo la curva de f_{w-100}), el muro produce una sombra parcial (II-parte del gráfico comprendido entre la curva de f_{w-100} y f_{w-0}) y el muro produce un bloqueo total (III-parte del gráfico situado por encima de la curva de f_{w-0}). En la región I, existen condiciones de visibilidad completa y el factor de configuración se puede determinar mediante las ecuaciones teóricas de bola de fuego totalmente visible (Apartado 4.2.1). En la región II, la visibilidad es parcial y el factor de configuración se determina mediante las soluciones numéricas para casos de ocultación parcial (Apartado 4.3). Cuando se alcanza la curva de f_{w-0} la visibilidad es nula y el factor de configuración es cero. En base a este gráfico, no interesa dimensionar muros que se encuentren en la región I, porque no proporcionan ningún efecto barrera. Por otra parte, para un mismo valor de X_d no deben utilizarse muros o barreras por encima de la región III, ya que el incremento de altura del muro no se corresponde con una mayor protección frente a la radiación térmica. Conforme nos desplazamos desde la región comprendida entre la curva f_{w-100} y f_{w-0} , va aumentando progresivamente el efecto barrera.

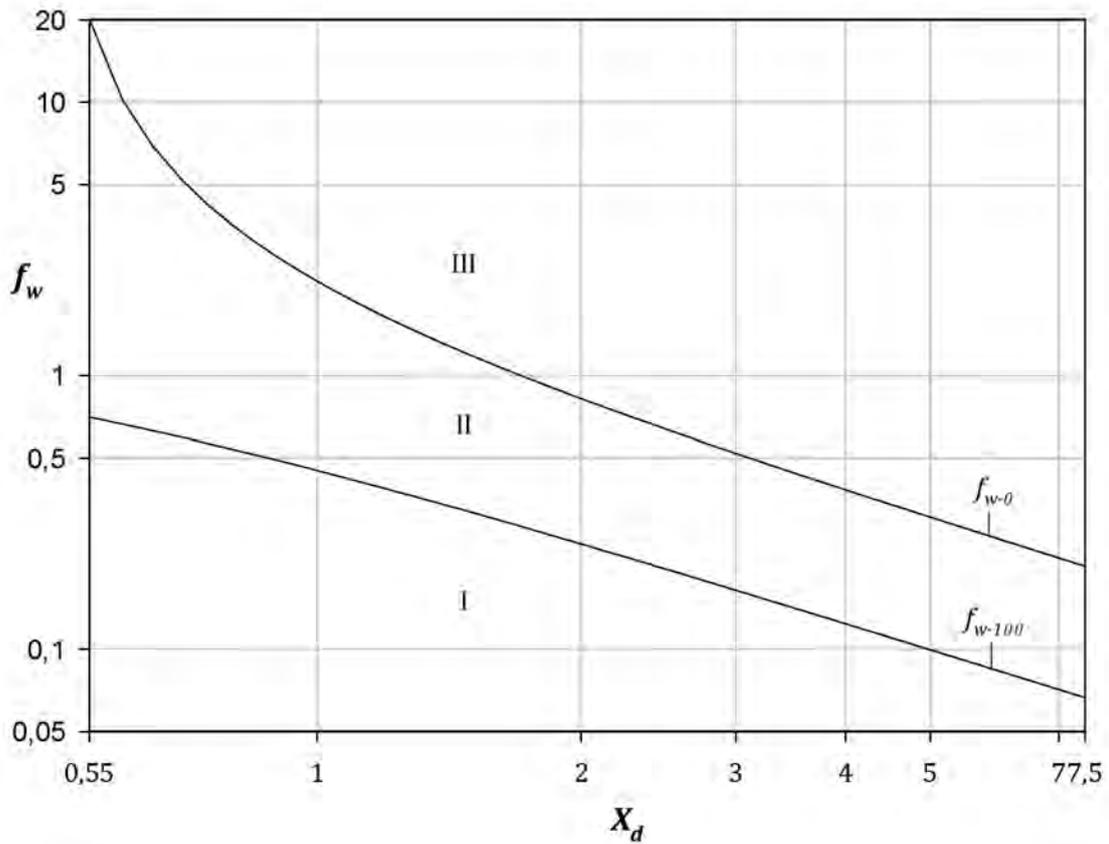


Figura 5.12. Factor geométrico del muro bajo distintas condiciones de visibilidad ($H_d=1$). Fuente: Elaboración propia.

Si desarrollamos la expresión del factor de sombra, definida en el Apartado 4.2.2:

$$s = \frac{Z_d}{Z_{sd}} = \frac{Z_p/D}{Z_s/D} = \frac{Z_p}{Z_s} = \frac{Z_w X_0}{X_s Z_s} = f_w \frac{X_0}{Z_s} = f_w \frac{X_d}{Z_{sd}} \quad (\text{Ec.5.27})$$

Si comparamos esta expresión con la Ec.5.25, podemos relacionar s y f_{w-0} :

$$s = \frac{f_w}{f_{w-0}} \quad (\text{Ec.5.28})$$

De donde se deduce que cuando existe visibilidad nula (Tabla 4.4), $s=1$, y $f_w=f_{w-0}$. Es decir, el factor del muro se convierte en el factor geométrico del muro cuando se alcanza la visibilidad nula ($s=1$).

5.4. Propuestas de diseño de barreras físicas para la planificación territorial de accidentes graves de tipo térmico en el entorno de emplazamientos industriales o infraestructuras con presencia de sustancias inflamables

5.4.1. Introducción

En las últimas décadas, los accidentes tecnológicos en la industria de procesos y en el transporte de mercancías peligrosas se han incrementado globalmente. El desarrollo de la actividad industrial para satisfacer las demandas de la población actual crece a un ritmo vertiginoso, lo que acarrea un mayor volumen de transporte. Las sociedades modernas son cada vez más dependientes de las sustancias peligrosas, de manera que los ciudadanos y sus bienes, localizados en las proximidades de las zonas donde se almacenan y transportan dichas sustancias, se enfrentan al riesgo de sufrir las adversas consecuencias de un accidente.

La peligrosidad intrínseca de la actividad industrial y el transporte de sustancias peligrosas delimitan áreas de influencia en su entorno que deben controlarse para impedir que el desarrollo de las zonas industriales y las infraestructuras ocasionen niveles de riesgo no admisibles en zonas habitadas.

Muchas industrias se ubican junto a zonas densamente pobladas y viceversa. En otros casos, el crecimiento urbanístico se aproxima a industrias que inicialmente estaban localizadas en las afueras del núcleo urbano. La presión demográfica y la expansión de las ciudades hacia su periferia conlleva la ocupación del suelo en zonas adyacentes a grandes infraestructuras viarias, por donde circulan mercancías peligrosas. Otro caso característico es el de las infraestructuras ferroviarias, que atraviesan núcleos urbanos y suelen tener la estación en el centro de la ciudad. Por esas mismas vías por donde circulan trenes de pasajeros también lo hacen trenes de mercancías.

Gran parte de los accidentes producidos en este contexto, involucran gases licuados del petróleo (LPG) y otras sustancias altamente inflamables, que han ocasionado numerosas víctimas.

En dichos casos, se ha demostrado que las consecuencias de los accidentes pueden agravarse seriamente debido a la proximidad de zonas vulnerables habitadas por personas, ya que se extienden fuera de sus fronteras.

En la Figura 5.13, se observa el complejo de refino Philadelphia Energy Solutions, asentado en dicha zona desde 1866. Actualmente es una de las refinerías americanas más próximas a la población, con un intenso transporte de crudo por ferrocarril. Unas 700 000 personas viven en un radio de 800 metros alrededor de la refinería.

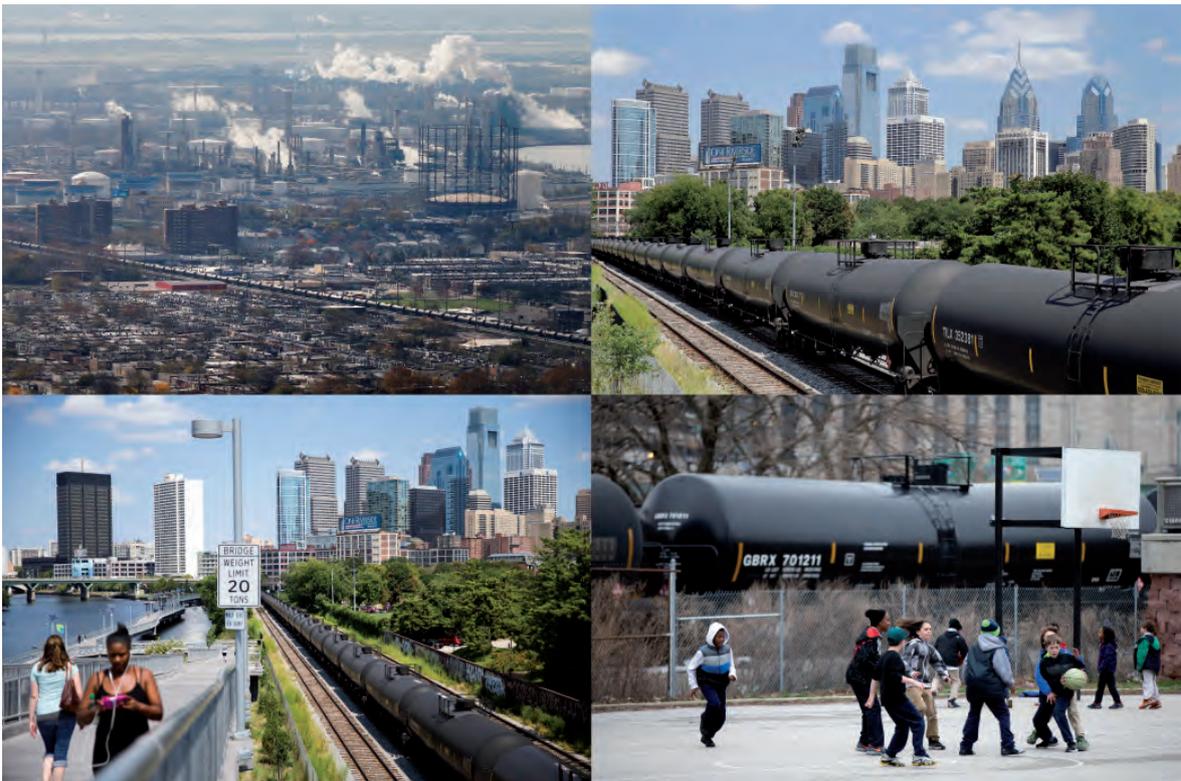


Figura 5.13. Philadelphia: riesgo químico y territorio. Fuente: <http://pes-companies.com>.

En el proceso de gestión del riesgo, es muy importante evaluar los posibles efectos de un accidente con el fin de proteger los elementos más vulnerables del sistema, además de mejorar la respuesta en caso de que ocurra.

5.4.2. Planificación del uso del suelo

Esos accidentes han obligado a las administraciones a adoptar medidas legislativas dirigidas a la prevención y control de los mismos. Por ejemplo, la Directiva 2012/18/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 4 de julio de 2012, relativa al control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas (conocida popularmente como SEVESO III), indica en su Artículo 13 (Planificación de la ocupación del suelo):

1. *Los Estados miembros velarán por que se tengan en cuenta los objetivos de prevención de accidentes graves y de limitación de sus consecuencias para la salud humana y el medio ambiente en sus políticas de ocupación del suelo y en otras políticas pertinentes. Procurarán alcanzar tales objetivos mediante el control de:*
 - a. *El emplazamiento de los establecimientos nuevos.*
 - b. *Las modificaciones de los establecimientos.*
 - c. *Las nuevas obras, tales como vías de comunicación, lugares de uso público y zonas de viviendas, realizadas en las inmediaciones de los establecimientos, cuando el emplazamiento o las obras ejecutadas puedan originar o aumentar el riesgo o las consecuencias de un accidente grave.*

2. *Los Estados miembros velarán por que su política de asignación o utilización del suelo y otras políticas pertinentes, así como los procedimientos de aplicación de dichas políticas, tengan en cuenta la necesidad, a largo plazo:*
 - a. *Mantener las distancias adecuadas entre, por una parte, los establecimientos contemplados en la presente Directiva y, por otra, las zonas de vivienda, las zonas frecuentadas por el público, las áreas recreativas y, en la medida de lo posible, las grandes vías de transporte;*
 - b. *Proteger las zonas que presenten un interés natural particular o tengan un carácter especialmente sensible en las inmediaciones de establecimientos, manteniendo, cuando proceda, las distancias de seguridad apropiadas u otras medidas pertinentes;*
 - c. *En el caso de los establecimientos existentes, de tomar medidas técnicas adicionales, para no incrementar los riesgos para la salud humana y el medio ambiente.*

3. *Los Estados miembros velarán por que todas las autoridades competentes y todos los servicios facultados para tomar decisiones en este ámbito establezcan procedimientos de consulta adecuados para facilitar la aplicación de las políticas adoptadas con arreglo al apartado 1.*

Sin embargo, la Directiva no define las metodologías de análisis del riesgo para determinar los valores umbrales que deben aplicarse para la planificación del suelo. Por tanto, cada estado miembro debe aplicar su propia metodología, lo que conlleva que a un mismo establecimiento, situado en países diferentes, le resulten de aplicación políticas distintas. Las directrices desarrolladas por (Christou et al., 2006), establecen 4 métodos de análisis del riesgo para la planificación del suelo: métodos basados en las consecuencias, métodos basados en el riesgo, métodos de enfoque determinístico con evaluación del riesgo y métodos híbridos.

Con el tiempo, la citada Directiva se ha ido consolidando y se ha pasado de utilizar tablas genéricas para establecer distancias de separación a emplear metodologías de evaluación basadas en las consecuencias y en los riesgos.

Pero el factor de riesgo que constituye el territorio todavía no se implementa de una forma homogénea y armonizada, debido al articulado genérico de la Directiva y de las distintas administraciones responsables de la ordenación del territorio y del urbanismo. La Directiva no cuantifica en detalle las distancias de separación y otorga a los Estados miembros y a las autoridades competentes la decisión de establecer qué distancia sería adecuada para cada establecimiento, por lo que implícitamente se reconoce que no es posible tener un procedimiento único para todos los Estados miembros. También hay que destacar que la planificación del uso del suelo es un asunto de intereses confrontados. Por un lado, se procura proporcionar la máxima seguridad a la población circundante y, por otro, facilitar el asentamiento de la actividad industrial, con el fin de obtener el máximo beneficio de su explotación.

Transporte por carretera

Un ejemplo representativo del impacto catastrófico que pueden tener los accidentes sobre entornos vulnerables es el acontecido en el Camping Los Alfaques (Figura 5.14), situado en el municipio de Alcanar, al sur de Tarragona (España) el 11 de Julio de 1978. Un camión cargado con propileno licuado, debido al sobrellenado de la carga, produjo la rotura del depósito de la cisterna. La consecuencia fue una explosión tipo BLEVE con la formación de una bola de fuego que ocasionó 243 víctimas mortales y más de 300 heridos. Se produjeron quemaduras severas generalizadas (Arturson, 1981).

A raíz de este accidente se llevó a cabo una modificación de la normativa que regula el transporte de mercancías peligrosas por carretera, prohibiendo las rutas por travesías urbanas y mejorando otros aspectos relacionados con la seguridad de los vehículos y transportistas.



Figura 5.14. Vista actual del Camping de los Alfaques. Fuente: Google Maps.

Transporte por ferrocarril

El accidente de Viareggio ha sido el más grave acontecido en el transporte de mercancías peligrosas por ferrocarril en Europa en los últimos 50 años.

La noche del 29 de Junio de 2009, la localidad de Viareggio, situada en la región italiana de la Toscana al noroeste de Pisa, sufrió el descarrilamiento de un tren de LPG cuando pasaba por la estación de la ciudad (Figura 5.15). El tren transportaba 630 Tn de LPG distribuido en 14 vagones cisterna, que había sido cargado por la tarde en la refinería de San Martino (Milán) y se dirigía al almacenamiento de LPG en Gricignano, próximo a Nápoles.

El eje frontal del primer vagón cisterna sufrió una rotura, provocando el descarrilamiento del tren. El primer vagón se separó de la locomotora y descarrilló arrastrando 9 vagones que quedaron fuera de la vía. El vagón siniestrado impactó contra un poste de señalización ocasionando un corte sobre el recipiente de 50 cm de longitud y varios centímetros de ancho. El gas comenzó a formar charcos y se produjo una dispersión pesada de vapores de LPG que fue extendiéndose por las proximidades de la estación. No existía apenas distancia de separación entre la estación y las viviendas más próximas, situadas a escasos 11 metros.

El gas se fue desplazando y acumulándose hasta que después de aproximadamente 3 minutos encontró una fuente de ignición, lo que ocasionó una UVCE. Cinco edificios colapsaron debido a explosiones internas y los edificios situados junto a la estación fueron envueltos en llamas.

En el momento del accidente, un hombre que cruzaba por un paso elevado, a unos 8 metros de altura, fue literalmente vaporizado. Fallecieron 14 personas en el momento de la explosión por distintas causas, unos por colapso de edificios, inhalación de gases tóxicos y radiación térmica.

El balance final fue de 32 muertos, 13 heridos graves y más de 1100 personas evacuadas de sus viviendas por razones de seguridad. Hay que tener en cuenta que era verano, la mayor parte de ventanas estaban abiertas y se produjeron combustiones confinadas del gas inflamable en el interior de algunas viviendas próximas, sufriendo daños que desaconsejaban su posterior habitabilidad.

La densidad de población en la zona es de aproximadamente 2000 habitantes/km². En la zona oeste existía un muro de alrededor de 2 metros de altura. Después del accidente, la Rete Ferroviaria Italiana (gestor de la red ferroviaria nacional), construyó en esa zona un muro de 2,5 metros de altura a lo largo de 200 metros para separar la estación de las viviendas próximas.

En el trabajo realizado por (Landucci et al., 2011) puede encontrarse más información, concretamente un mapa de la intensidad de radiación a nivel de suelo en el entorno del accidente.



Figura 5.15. Estación de Viareggio y entorno urbano. Fuente: Google Maps.

Otro accidente destacado en el transporte de mercancías peligrosas por ferrocarril es el ocurrido el 6 de Julio de 2013 en Lac-Mégantic, una población situada al sur de Quebec, en Canadá. Se produjo cuando un convoy de vagones cisterna cargados con crudo descarrilaron, ocasionando un gran derrame. Los incendios y explosiones posteriores destruyeron 40 edificios, 53 vehículos y ocasionaron 47 víctimas mortales. Además, el petróleo contaminó el río y el lago adyacente.

Infraestructuras logísticas

Respecto a las infraestructuras, un caso destacado es el de Rotterdam, que es el puerto más grande de Europa y uno de los más activos del mundo en términos de transbordo de carga. Su estratégica ubicación en el Mar del Norte, en la confluencia del Rin y el Mosa junto a sus excelentes conexiones intermodales, hacen de él un importantísimo nudo de comunicaciones que canaliza el intercambio de mercancías entre Europa y el resto del mundo, mediante transporte por carretera, ferrocarril, marítimo, fluvial y oleoducto.

En la Figura 5.16 se observa la proximidad de zonas pobladas junto a numerosos tanques de almacenamiento e importantes infraestructuras viarias con una elevada densidad en el transporte de mercancías peligrosas. La expansión del puerto ha acercado los parques de almacenamiento junto a zonas inicialmente alejadas. Esta configuración puede ocasionar accidentes originados tanto en el interior como desde el exterior de la industria, afectando a la población.

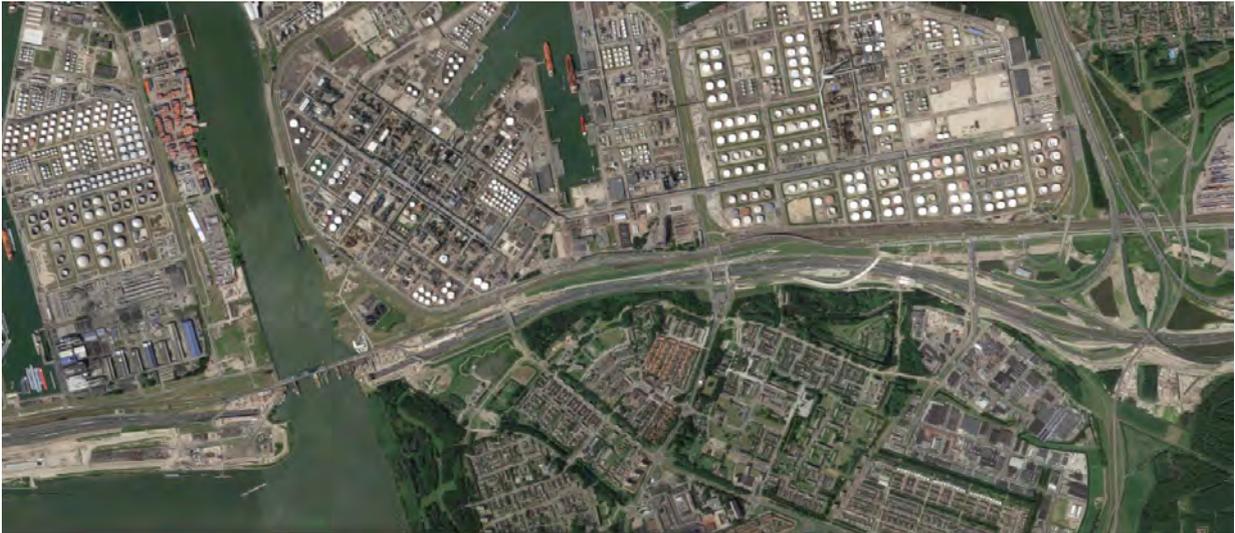


Figura 5.16. Puerto de Rotterdam: urbanizaciones, infraestructuras de transporte e industria. Fuente: Google Maps.

Establecimientos industriales

La refinería CEPSA de Tenerife fue la primera refinería española (1930) y ha tenido una repercusión notable para la industria y el desarrollo económico y social tanto de la ciudad de Santa Cruz de Tenerife, como de toda Canarias. Esta situación estratégica le ha permitido abastecer de derivados petrolíferos a diversos mercados (canario, peninsular, africano y americano).



Figura 5.17. Refinería de Santa Cruz de Tenerife. Fuente: Google Maps.

A pesar de que la producción se encuentra paralizada desde el año 2014, por el incumplimiento de ciertos requisitos medioambientales relacionados con la calidad del aire, sigue realizando actividades de recepción, almacenaje, mezcla y distribución. También se encuentra inmersa en varios contenciosos relacionados con aspectos urbanísticos del suelo urbano que ocupa.

El caso de la refinería de Santa Cruz de Tenerife representa un claro ejemplo de una instalación alejada del centro urbano, cuya población ascendía a 61 983 habitantes cuando fue puesta en marcha, y que ya en la década de los 80 se había triplicado. La refinería de Cepsa en la capital tinerfeña se construyó en la salida sur de la ciudad, pero actualmente queda situada dentro de ella (Figura 5.17).

Estos casos representan solo son una pequeña muestra del problema global que supone la coexistencia del riesgo químico y el territorio, tanto en el transporte por carretera y ferrocarril, establecimientos industriales e infraestructuras logísticas.

5.4.3. Barreras de seguridad y protección

La probabilidad de ocurrencia de accidentes no puede reducirse a cero, pero si pueden adoptarse medidas para intentar evitar que ocurran. La primera medida a llevar a cabo es la actuación sobre la fuente del peligro, reduciendo la probabilidad de ocurrencia del suceso. La segunda medida sería actuar sobre los elementos que van a sufrir las consecuencias del accidente, protegiéndolos frente a sus efectos.

Distintas normativas técnicas requieren la introducción de barreras de seguridad con el fin de evitar o reducir la probabilidad de propagación de accidentes graves en la industria, recomendando la utilización de múltiples capas de seguridad o protección con el riesgo de reducir accidentes tipo dominó. De acuerdo a la clasificación de (CCPS, 2001), las capas de seguridad se pueden dividir en:

- a) Diseño inherentemente seguro.
- b) Sistemas de protección pasiva.
- c) Sistemas de protección activa.
- d) Medidas procedimentales y de emergencia.

Desde el punto de vista de la seguridad industrial, la ingeniería química debe velar por desarrollar y aplicar las metodologías y sistemas que permitan disminuir la ocurrencia y efecto de los accidentes graves. Las propuestas derivadas de este apartado constituyen una referencia a considerar para la implementación de políticas de uso del suelo en entornos con riesgos tecnológicos, donde existen limitadas posibilidades de mitigación del riesgo.

Las barreras físicas se enmarcan dentro de los sistemas de protección pasiva, que son dispositivos o barreras que no requieren energía ni activación externa para llevar a cabo su función protectora. Típicamente, la protección pasiva constituye una barrera física entre el origen del accidente y el elemento vulnerable, estando disponible inmediatamente después de producirse el accidente.

En el caso concreto del escenario bola de fuego, la rápida evolución del fenómeno excluye la posibilidad de emplear sistemas de protección activa. Las sirenas y otros elementos de aviso a la población no son eficaces.

La instalación de barreras físicas de protección permite integrar el peligro y los elementos vulnerables, agotadas las metodologías clásicas de reducción de riesgos. La instalación de barreras físicas son un elemento de protección integrado en el territorio que permite resguardar a la población de los posibles accidentes que puedan originarse en la industria o el transporte. Pueden implantarse en el tejido urbano de forma sostenible mediante integración paisajística.

El enfoque consiste en disminuir las consecuencias de los accidentes graves tanto en la industria como en el transporte de mercancías peligrosas, aplicando barreras físicas de protección. Deben desplegarse entre las rutas de transporte y las edificaciones y construcciones vulnerables situadas en su entorno próximo. Una barrera de protección debe separar un objeto vulnerable de una explosión capaz de producir efectos que dañen al objetivo, y a su vez debe reducir a un nivel admisible los efectos sobre el mismo.

Los accidentes conllevan pérdidas significativas que en ocasiones suponen vidas humanas. También ocasionan daños por radiación térmica a las construcciones situadas en las inmediaciones de las rutas de transporte. La utilización de barreras es una solución técnica relativamente novedosa, utilizada fundamentalmente en el ámbito militar por razones de seguridad frente a explosiones. El caso que se plantea, a diferencia de las barreras contra explosiones, tiene lugar en lugares donde es previsible que ocurran accidentes, pudiendo planificarse.

Dentro del transporte, el que se lleva a cabo por carretera es capaz de generar mayor daño potencial debido a que las vías transcurren muy próximas a zonas pobladas o industrias de alto nivel de riesgo. Evidentemente, las medidas para mitigar las consecuencias de un hipotético accidente son más difíciles de implantar en el transporte al no tener lugar en un entorno fijo. El transporte atraviesa áreas vulnerables o infraestructuras críticas como túneles, puentes, polígonos industriales, etc. En general, podemos afirmar que no existe una regulación específica que requiera la evaluación o el control del riesgo existente en el transporte de mercancías peligrosas. Las respectivas normativas ADR y RID se regulan principalmente las características y distintas modalidades del transporte, pero no profundizan en la problemática del transporte de mercancías a través de áreas pobladas o en la optimización de rutas para reducir el riesgo.

En el caso del transporte por ferrocarril, el fenómeno BLEVE es el escenario accidental más frecuente cuando hay involucrados gases licuados inflamables, con un 24%. De ese porcentaje, el 6,5% corresponde a BLEVES acompañadas de bolas de fuego. Los datos han sido obtenidos de las bases de datos MHIDAS, ARIA y FACTS en el periodo 1960-2010 (Landucci et al., 2016).

Según la base de datos FACTS, entre los años 1958 y 2003 se produjeron 38 BLEVES en el transporte por ferrocarril, de los que 14 (36%) tuvieron lugar con LPG. A pesar del progreso en la seguridad de procesos, siguen produciéndose a escala mundial accidentes que causan incendios, bolas de fuego, explosiones BLEVE y explosiones no confinadas, originando daños severos.

Algunos accidentes recientes como Viaregio, Byalistok, Lac-Mégantic, así lo confirman. En el caso de la industria, es difícil proporcionar protección frente a la radiación térmica porque el tamaño de la bola de fuego excede cualquier dimensión razonable y porque las distancias entre tanques o unidades de almacenamiento son muy reducidas. Por este motivo, dentro la industria las barreras físicas deben ir encaminadas a proteger zonas especialmente sensibles o críticas.

El riesgo asociado a explosiones tipo BLEVE puede ser controlado mediante la adecuación de distancias entre las industrias y las grandes vías de circulación. La utilización de distancias de seguridad forma parte de una amplia estrategia de seguridad conocida como emplazamiento de plantas industriales y planificación del uso del suelo (CCPS, 2003).

Los segmentos de carretera situados a grandes distancias del objetivo son intrínsecamente seguros. Cuando la carretera se sitúa cerca del elemento vulnerable, la distancia puede ser insuficiente para garantizar la seguridad y debe desplegarse una barrera de seguridad para proteger al objetivo. Existen muchos casos donde esto ocurre, en carreteras colindantes con industrias o donde el espacio disponible para ubicar una futura industria encuentra limitado a una determinada porción del territorio cuyo entorno se encuentra consolidado.

Las barreras de protección proporcionan, en general, las siguientes ventajas:

- *Protección frente a proyectiles.* (Luccioni et al., 2012) han llevado a cabo el diseño de un muro de hormigón armado para la protección de edificios ante explosiones accidentales en industrias petroquímicas, demostrando su eficacia.
- *Protección frente a sobrepresiones.* Las barreras contra las sobrepresiones han demostrado reducir de forma notable los efectos de la onda expansiva en edificios (Remennikov et al., 2007; Zhou et al., 2008). Otros autores han estudiado la influencia de la forma de la barrera y de los materiales en la reducción de la sobrepresión (Hajek et al., 2016).
- *Protección frente a radiación térmica.* En esta tesis se ha demostrado la influencia de un muro plano en la reducción de la radiación térmica emitida por una bola de fuego respecto a un receptor. Las barreras de protección frente a la radiación térmica no se encuentran consolidadas como medida para la reducción de riesgos, como si sucede con las medidas de protección pasiva frente al fuego y la llama.
- *Protección frente a dispersión pesada de vapores.* Existe una estrategia ampliamente extendida consistente en la implantación de barreras de mitigación (Tchouvelev et al., 2007; Ponchaut et al., 2011; Busini et al., 2012). En algunas condiciones, la barrera puede empeorar el escenario de dispersión. Se ha encontrado que los grandes obstáculos influyen en la dispersión de nubes reduciendo la distancia de daño más del 50% en comparación con una liberación de campo abierto (Busini et al., 2012).

- Las barreras pueden combinarse con otras metodologías de protección pasiva.
- Una inversión relativamente pequeña puede reducir las consecuencias en caso de producirse accidentes mayores.
- Múltiples posibilidades de diseño estructural y de integración urbana y paisajística.
- Permiten la coexistencia de riesgo y territorio en zonas pobladas, ante la imposibilidad de cumplir las distancias de seguridad exigidas por la normativa.
- Protegen a los elementos vulnerables situados en su entorno (edificaciones), sin necesidad de llevar a cabo su refuerzo o protección adicional ante los posibles efectos adversos.
- Permiten resolver problemas existentes y anticiparlos desde la fase de diseño en el caso de nuevas instalaciones, proporcionando determinados niveles de seguridad.

Gran parte de las ventajas anteriores pueden obtenerse individualmente, pero todavía no se han desarrollado métodos para combinar la protección ante sobrepresiones, radiación térmica y fragmentos procedentes de una explosión BLEVE, por ejemplo. La aplicación de barreras a escenarios con riesgo tecnológico todavía está por desarrollar y no existen normas o guías de diseño específicas que aborden la implantación de barreras orientadas a la protección de accidentes en la industria. La definición de parámetros básicos de diseño y la creación de una metodología que permita integrar las barreras de protección en la evaluación de riesgos para la planificación del uso del suelo de industrias y transporte en el entorno de zonas habitadas serán herramientas clave para la toma de decisiones en el futuro. Además, la instalación de una barrera de protección se encuentra condicionada por varios factores, como sobre quien recae la propiedad de la zona donde pretende instalarse, la regulación legal de la misma, la configuración de la zona, la ortografía del terreno, así como otras consideraciones urbanísticas, arquitectónicas, paisajísticas, medioambientales y sociales. Estos factores no siempre estarán controlados, por lo que esta disciplina supone un nuevo reto.

5.4.4. Normativa relacionada con distancias de seguridad y barreras

Existen en la bibliografía varias referencias sobre las distancias de seguridad que deben establecerse entre establecimientos industriales y elementos vulnerables, atendido a diferentes escenarios, criterios, parámetros y valores umbral (CCPS, 2003). Pero en lo que respecta a la planificación de uso del suelo en el entorno de establecimientos con riesgo químico, se dispone de escasas normas o guías de planificación. A este respecto cabe destacar en España, concretamente la Resolución IRP/971/2010, de 31 de Marzo, de la Generalitat de Catalunya, relativa a los criterios de implantación de nuevos elementos vulnerables compatibles con la gestión de riesgos de protección civil. Esta norma, con una clara finalidad operativa, trata de limitar la vulnerabilidad de elementos existentes en zonas de riesgo, para aquellos casos en que la gestionabilidad de las emergencias no está garantizada.

Se establecen criterios para el control de la implantación de los nuevos elementos vulnerables compatibles con la gestión de los riesgos de protección civil frente a las emergencias colectivas y para el aseguramiento de las capacidades de autoprotección de la población, con el fin de evitar que futuras poblaciones se ubiquen en zonas de riesgo.

Para ello, se establecen criterios para controlar las zonas con previsiones de desarrollo en suelo urbanizable, mediante franjas donde se establecen las tipologías de los elementos vulnerables considerados compatibles con la gestión del riesgo. La Tabla 5.7 resume las distancias de cada zona:

Tabla 5.7. Franjas de seguridad. Fuente: Resolución IRP/971/2010, Generalitat de Catalunya.

Instalaciones industriales	Transporte	Franja de seguridad (m)
Con alto volumen de almacenamiento de: -Gases licuados del petróleo (Metano, Butano y Propano) -Combustibles líquidos derivados del petróleo (Queroseno, gasolina y gasoil)	-Mercancías tóxicas que pueden generar nubes de gran alcance	500
-Gases licuados inflamables (LPG) -Sustancias que pueden generar nubes inflamables, deflagraciones o explosiones -Sustancias que pueden generar BLEVEs -Sustancias tóxicas que no pueden producir grandes nubes tóxicas		250
-Sustancias inflamables o muy inflamables que no pueden generar nubes inflamables ni deflagraciones		100
	-Sustancias inflamables o muy inflamables que no pueden generar nubes inflamables ni deflagraciones	75
-Resto de casos		50

Se contempla el caso de la instalación de barreras físicas, como elemento de mitigación de las consecuencias (Tabla 5.8). En tal caso, las zonas de indefensión frente a la autoprotección pueden reducirse a los siguientes valores:

Tabla 5.8. Reducción de distancias por instalación barreras físicas. Fuente: Resolución IRP/971/2010, Generalitat de Catalunya.

Valor inicial franja seguridad (m)	Valor final franja de seguridad (m)
500	250
250	100
100	50

Para ello, se proporcionan unos parámetros básicos de diseño (Tabla 5.9) que debe resistir la barrera, respecto a los fenómenos térmicos y mecánicos:

Tabla 5.9. Condiciones que son exigidas a la barrera física. Fuente: Resolución IRP/971/2010, Generalitat de Catalunya.

Fenómeno	La barrera debe soportar		Después de la barrera no debe superarse	
Sobrepresión	35	kPa	6	kPa
Alcance de la proyección de fragmentos	Mayor		Menor	
Radiación térmica	37	kW/m ²	8	kW/m ²

Por último, se establecen pautas para las zonas verdes y de ocio, que deben evitar que su uso cotidiano genere condiciones de pública concurrencia que a la vez puedan suponer afectaciones colectivas en caso de emergencia por riesgo químico en instalaciones que manipulan sustancias peligrosas. Las zonas no deben estar próximas a actividades de pública concurrencia ni población especialmente vulnerable.

La instalación de barreras permite reducir las franjas o distancias de seguridad entre el foco de riesgo y los elementos vulnerables, siempre que su diseño garantice unos niveles admisibles en caso de que tenga lugar un accidente grave.

5.4.5. Caso de estudio

A continuación se desarrollará un caso práctico, correspondiente a un vagón cisterna de LPG.

La metodología utilizada está basada en las consecuencias. Un enfoque basado en las consecuencias se centra en el peor escenario posible, el que ocasiona las consecuencias más severas, descartando de esta forma otros escenarios más probables pero cuyos efectos sobre las personas y el entorno serían menos adversos. El escenario considerado es el suceso bola de fuego, como parte de una explosión tipo BLEVE con gases licuados inflamables.

Las consecuencias del escenario se determinarán mediante el modelado del fenómeno seleccionado, obteniendo unas distancias en las que la intensidad del fenómeno da lugar a efectos no deseados. Este análisis conlleva determinada incertidumbre debido a las aproximaciones de los distintos modelos matemáticos, al realizarse ciertas estimaciones de parámetros que pueden ser desconocidos. A pesar de ello, el enfoque habitual es utilizar suposiciones conservativas que proporcionen una sobreestimación de las distancias, de modo que el error siempre esté del lado de la seguridad.

Las zonas peligrosas en el entorno de la zona de estudio se determinan aplicando criterios de vulnerabilidad relacionados con la intensidad del fenómeno, concretamente funciones Probit. En cuanto al concepto de distancia de seguridad, se considera aquella donde se puede emplazar la fuente de riesgo de modo que en caso de accidente no se produzca destrucción ni riesgo para la población situada en su entorno.

Pero hay que destacar que las distancias de seguridad o planificación con frecuencia delimitan perímetros de radio constante, cuyo interior corresponde a zonas no seguras. Algunos efectos de una explosión tienen una importante componente direccional, como la sobrepresión y la proyección de fragmentos.

A diferencia de ellos, la propagación de la radiación térmica no es direccional (Birk, 1996) por lo que no se tendrá en cuenta la posición de los recipientes en el momento de la explosión. En los accidentes que ocurren en el transporte de mercancías peligrosas, es habitual que exista un importante desplazamiento de su posición normal.

También es importante destacar que si la distancia entre el punto de origen de la bola de fuego y el objetivo es muy pequeña, en torno a su radio, la eficacia de la barrera puede ser inferior a lo previsto en los cálculos, por la gran turbulencia o corrientes térmicas generadas a esa distancia. Recordemos que el vector de escalado de radiación térmica para efecto domino suele estar determinado por el radio de la bola de fuego o $37,5 \text{ kW/m}^2$.

Se analiza el caso de un convoy de mercancías, que realiza la ruta desde Escombreras (Cartagena) a Pinto (Madrid). Como parte del itinerario, el tren pasa por la ciudad de Murcia. En la estación ferroviaria Murcia del Carmen, que toma el nombre del barrio en que se sitúa, residen 23 000 personas.

Como consecuencia de las obras del tren de alta velocidad a Murcia, la estación se encuentra en obras y se produce un fallo operacional en la regulación del tráfico ferroviario. Se produce el impacto entre el convoy y una perfiladora de balasto, maquinaria utilizada para el mantenimiento de la vía. El tren, que transporta 20 vagones de 112 m^3 de LPG (cargado al 85%), circulaba a 40 km/h (Figura 5.18).



Figura 5.18. Transporte ferroviario de LPG. Fuente: Andrés Medina.

Características del entorno

La estación se encuentra afectada por un Plan Especial de Ordenación Urbana, que conlleva la reorganización del área residencial marginal, logrando la integración de la misma con su entorno. Como parte de la redacción del citado plan, se solicita un estudio para evaluar la compatibilidad de las edificaciones, equipamientos y zonas verdes proyectadas con el riesgo tecnológico asociado al transporte de mercancías peligrosas por ferrocarril.

Accidente grave

Tras el impacto, tiene lugar el derrame de propano en fase líquida y la inmediata inflamación del gas, ocasionando un incendio de charco. Los vagones se encuentran amontonados y las llamas impactan sobre un vagón adyacente, lo que hace aumentar su presión interior. Transcurridos 5 minutos tiene lugar una explosión BLEVE, acompañada de la formación de una gran bola de fuego.

En la Figura 5.19 se describe el escenario del accidente. El vagón cisterna se encuentra en uno de los andenes de la estación. A la derecha se encuentra el acceso principal a la estación, donde hay planeado un aparcamiento en superficie que ocupa 5000 m² de suelo urbano, con capacidad para 200 vehículos. Junto a esa zona, existe una avenida que conecta con las grandes rondas de circulación de la ciudad. Además, hay previstas torres de edificios de uso residencial.

En el lado izquierdo se encuentra una estación intermodal de transporte, con autobuses, taxis y tranvía. Muy próximo a esta zona se encuentra proyectado una gran bulevar. Se han indicado las zonas susceptibles de ser protegidas mediante barreras físicas con el fin de acotar las distintas zonas próximas a la estación, mediante una línea vertical y un círculo.

Al efectuar los cálculos se obtiene que la radiación de 8 kW/m² (Ec.1.11), establecida por la normativa, se alcanza para un valor de 2,525 del parámetro X_d (Ec.3.7). Esta distancia es equivalente a 521,9 metros. De acuerdo a las distancias de la Figura 5.19, todas las zonas representadas se verían expuestas a un nivel superior de radiación. Para alcanzar un nivel de radiación de 5 kW/m² sería necesario estar situado a 672 metros del origen del accidente. En la Tabla 5.10 se resume la radiación recibida en los puntos seleccionados:

Tabla 5.10. Radiación recibida en cada punto. Fuente: Elaboración propia.

Zonas a proteger		X_d	Distancia al origen (m)	Radiación térmica (kW/m ²)
B1	Tránsito peatonal en el límite de la zona de servidumbre ferroviaria	0,75	155	41,6
B2	Tránsito peatonal en el exterior del aparcamiento	1,00	207	31,9
B3	Tránsito peatonal en la mediana de la avenida	1,25	259	24,5
B4	Tránsito peatonal junto a las edificaciones	1,50	310	19,0
B5	Tránsito peatonal en el bulevar	1,75	362	15,0

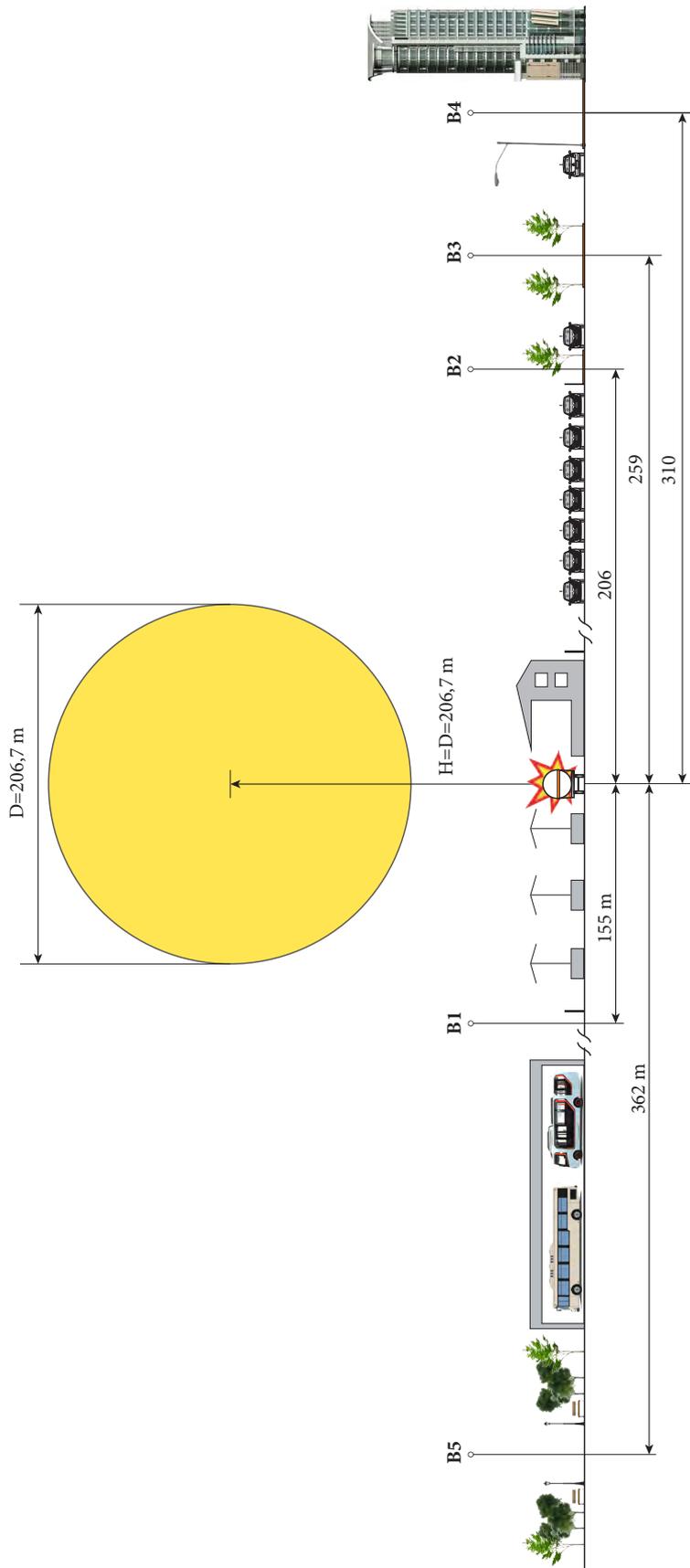


Figura 5.19. BLEVE de vagón cisterna de LPG en la estación Murcia el Carmen. Fuente: Elaboración propia.

Se puede conocer a continuación, qué condición geométrica del muro proporciona para cada una de esas distancias, niveles de radiación térmica dentro de lo establecido por la norma. Basándonos en los cálculos realizados de acuerdo al Apartado 5.2.2, podemos conocer para la distancia X_d correspondiente a cada punto vulnerable, qué valores del parámetro Z_d proporcionan un nivel de radiación térmica inferior a 8 kW/m^2 (Tabla 5.11):

Tabla 5.11. Factores de proyección de la esfera que cumplen el criterio de intensidad de radiación. Fuente: Elaboración propia.

Zona	Z_d	Radiación térmica (kW/m^2)
B1	1,7	7,24
B2	1,4	7,22
B3	1,3	6,17
B4	1,1	7,67
B5		5,96

Cálculo de la altura de la barrera

Por medio de la siguiente expresión (Ec.5.29), podemos calcular la altura de la barrera que proporciona la protección recogida en la Tabla 5.12, para distintas separaciones del receptor (X_s).

$$Z_w = X_s \left(\frac{Z_d}{X_d} \right) \quad (\text{Ec.5.29})$$

En base a dicha expresión, se elabora la siguiente tabla:

Tabla 5.12. Alturas de las barreras para distintas separaciones del receptor. Fuente: Elaboración propia.

Zona	Z_d / X_d	Z_w (m)				
B1	2,26	4,53	9,06	13,6	18,13	22,66
B2	1,40	2,80	5,60	8,40	11,20	14,00
B3	1,04	2,08	4,16	6,24	8,32	10,40
B4	0,73	1,46	2,93	4,40	5,86	7,33
B5	0,62	1,25	2,51	3,77	5,02	6,28
		2	4	6	8	10
		X_s (m)				

Cálculo de la sobrepresión

Antes de concretar el diseño de la barrera, debe garantizarse que se cumple la condición de sobrepresión, es decir, que después de la barrera no debe existir un valor superior a 6 kPa ($0,06 \text{ bar}$). La metodología de cálculo será la empleada en (Casal et al., 2001). En base a las distancias de las zonas a proteger, será suficiente con calcular la sobrepresión para B1. Si cumple el criterio para esa distancia, el resto de zonas recibirán una sobrepresión inferior.

En primer lugar se calcula el valor de la fracción de vaporización. Los datos son los siguientes: temperatura crítica ($T_c=369,8 K$), temperatura de ebullición normal ($T_b=231,1 K$), calor específico del líquido ($C_p=2400 J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}$) y temperatura ambiente ($T_o=298 K$):

$$f = 1 - e^{-2,63 \left(\frac{C_p}{H_v} \right) (T_c - T_b) \left(1 - \left(\frac{T_c - T_o}{T_c - T_b} \right)^{0,38} \right)} = 0,525 \quad (\text{Ec.5.30})$$

Para calcular el equivalente TNT, es necesario el cálculo del volumen del vapor, tanto el existente en el vagón cisterna en el momento de la explosión más el generado en la vaporización. El volumen del vapor, V , es el 15% del total, es decir $16,5 m^3$. El volumen de la fase líquida es el resto hasta $112 m^3$, esto es, $95,5 m^3$. Las densidades de la fase líquida y la fase vapor, a la temperatura de $55^\circ C$, que es la que se alcanza en el momento de la explosión, son respectivamente ($\rho_l=444 kg\cdot m^{-3}$; $\rho_v=37 kg\cdot m^{-3}$). De este modo se obtiene un volumen total de:

$$V^* = V + V_l f \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right) = 618,5 m^3 \quad (\text{Ec.5.31})$$

Para el cálculo del equivalente TNT es necesario conocer el valor de las siguientes variables: coeficiente de dilatación adiabática ($\gamma=1,14$), presión en el recipiente en el momento de la explosión ($P=19 bar$), presión atmosférica ($P_a=1 bar$).

$$W_{TNT} = \left(\frac{0,021 P V^*}{\gamma - 1} \right) \left(1 - \left(\frac{P_a}{P} \right)^{\left(\frac{\gamma-1}{\gamma} \right)} \right) = 534,87 kg \quad (\text{Ec.5.32})$$

La posición donde queremos determinar el valor de la sobrepresión es en la zona B1, de manera que $X_w=155 m$. Considerando que la fracción de energía convertida en onda de presión es de un 40% (β) y sustituyendo los parámetros calculados anteriormente, obtenemos la distancia escalada:

$$d_n = \frac{X_w}{(\beta \cdot W_{TNT})^{1/3}} = 25,91 m \quad (\text{Ec.5.33})$$

A partir de la distancia reducida, mediante gráficos (Van den Berg et al., 1993), puede obtenerse el valor de la onda de presión, que resulta ser de $5 kPa$ ($0,05 bar$). Se deduce, al calcularse sin considerar la barrera, que se cumplen las condiciones marcadas por la normativa respecto a la sobrepresión.

Estos cálculos confirman que la franja de seguridad establecida para el caso de LPG (al que correspondían 250 metros) podría reducirse a 100 metros. Sin embargo, esta zona se encuentra en el radio de acción de la bola de fuego durante su fase de crecimiento, por lo que las barreras se situarán más alejadas.

Propuesta de barreras

Los cálculos efectuados anteriormente permiten identificar aquellos desarrollos urbanísticos potencialmente incompatibles con el riesgo tecnológico. Las posibles ubicaciones para instalar las barreras se encuentran condicionadas por las restricciones urbanísticas del sector. Escapa del alcance de este caso práctico analizar la viabilidad de las diferentes alternativas para la implantación de barreras en función de la titularidad de los terrenos, razón por la cual se considerará que se dispone de permiso y autorización para instalar dichas barreras.

La bola de fuego genera unos efectos muy severos sobre el recinto de la estación y parte de la zona de aparcamiento, ya que se emplazan muy próximas al lugar de la explosión. Como resultado, en estas zonas no se podrán mitigar los efectos ocasionados por la bola de fuego con barreras físicas, a pesar de la baja siniestralidad que caracteriza al transporte de mercancías peligrosas por ferrocarril. La frecuencia de que se produzca una ruptura catastrófica de un vagón cisterna de LPG que produzca como consecuencia una bola de fuego es de $5,5 \cdot 10^{-8}$ por año, y que se produzca una BLEVE por impacto de llama sobre la cisterna de $1,4 \cdot 10^{-7}$ (Bevi, 2009).

En la selección y concepción preliminar de la barrera de protección deben conjugarse un buen comportamiento ante los efectos del accidente y una adecuada integración arquitectónica sobre su entorno urbano. En la Tabla 5.13 se muestra un resumen de las barreras propuestas:

Tabla 5.13. Resumen de parámetros de las barreras propuestas. Fuente: Elaboración propia.

Barrera	Tipo	Longitud (m)	Altura (m)	Separación (m)	Radiación (kW/m ²)	Sobrepresión (kPa)	Cumplimiento normativa	
							<37 kW/m ²	<35kPa
B1	Muro	Según los requisitos del sector de urbanización	10,0	4,0	<7,24	<5,0	SI	SI
B2	Muro		6,0	4,0	<7,22	<3,5	SI	SI
B3	Muro		5,0	4,0	<6,17	<3,1	SI	SI
B4	Muro		3,0	4,0	<7,67	<2,6	SI	SI
B5	Muro con dunas o terraplén		7,0	10,0	<5,96	<2,4	SI	SI

Para la selección de la altura, se ha tenido en cuenta la proximidad de las zonas vulnerables a barreras arquitectónicas, que sirven como anclaje para la instalación de la barrera.

La barrera para proteger el punto B1, está condicionada por ser la que se encuentra más próxima a la estación, en una zona transitada por personas. Se ubicará a 4 metros y tendrá una altura de 10 metros, altura considerada máxima para cualquier integración sobre el entorno. Según la Tabla 5.12 (alturas), correspondería una altura de 9 metros, pero se sobredimensiona ligeramente para reducir los efectos de turbulencia por la corriente de gases calientes.

Las barreras B2, B3 y B4 suponen una gran inversión y se propone una reordenación de la zona (Figura 5.20), con el fin de reducir el riesgo para la zona de gran tránsito y densidad de personas como es el aparcamiento y la entrada a la estación. No son por tanto necesarias las barreras para protección de los vulnerables B2 y B3. La barrera para proteger al vulnerable B4 se ubica a 10 metros de separación y en base a la Tabla 5.12, obtendría una altura de 7,33 metros, proponiéndose una altura constructiva de 7,5 metros.

En base a los cálculos efectuados en el Apartado 5.2.1, podemos confirmar que para la barrera B1 la mortalidad es del 4% y para las barreras B4 y B5 es nula.

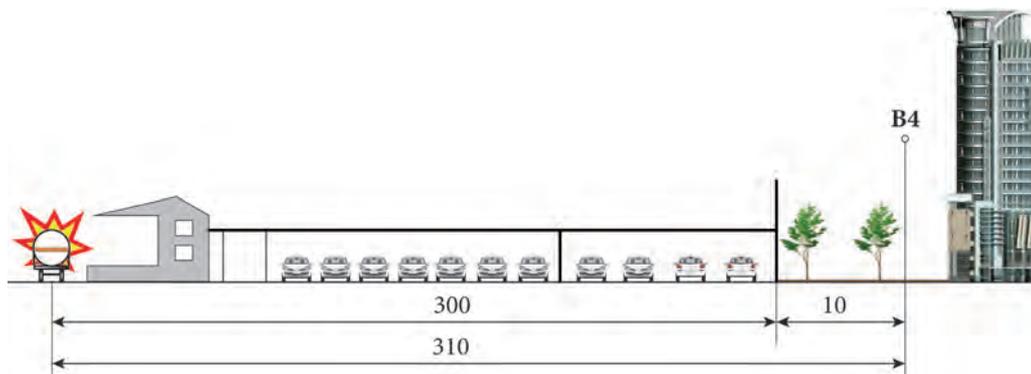


Figura 5.20. Reordenación de la zona del vulnerable B4. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al vulnerable B5, se propone la integración paisajística de la barrera en la zona verde prevista para el bulvar.

Proyección de fragmentos

Por último, se evalúa el impacto de la proyección de fragmentos primarios sobre las propuestas de barrera. Para ello se hará un cálculo simplificado considerando que los fragmentos siguen una trayectoria parabólica, formando un ángulo de 45° con el terreno en su impulso inicial. Esta hipótesis no considera ningún atributo del fragmento (masa, forma, dimensiones), ni efectos de rozamiento. De esta forma se puede determinar la altura del proyectil a su paso por la barrera, y conocer si la altura de ésta es suficiente.

(Birk, 1996), establece para recipientes de LPG de volumen superior a 5 m³, un alcance de:

$$x_{proy} = 465 \cdot m_l^{0,1} \tag{Ec.5.34}$$

Donde m_l es la masa del líquido, en kg.

La velocidad inicial (m/s) viene dada por la siguiente expresión:

$$v_0 = \sqrt{\frac{g \cdot X_{max}}{\sin(2\psi)}} \tag{Ec.5.35}$$

En esta ecuación, g es la aceleración de la gravedad ($9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$) y Ψ es el ángulo de proyección (45°). En esas condiciones, la altura del proyectil a la distancia x , se puede calcular mediante:

$$h_{\text{proy}} = X_w \tan(\Psi) - \frac{gX^2}{2v_0^2 \cos^2(\Psi)} \quad (\text{Ec.5.36})$$

Efectuando los cálculos de las barreras para proteger los vulnerables B4 y B5 se obtiene:

Tabla 5.14. Altura de las barreras para la proyección de fragmentos. Fuente: Elaboración propia.

Masa de LPG m_l (kg)	Vulnerable a proteger	Alcance máximo X_{max} (m)	Velocidad inicial v_0 (m/s)	Distancia a la barrera X_w (m)		Altura de la barrera h (m)	
50 000	Todos	1372	116,0	B1	151	B1	134,2
				B4	300	B4	233,7
				B5	352	B5	260,8
	B1	155	38,9	151		1,8	
	B4	310	55,1	300		6,4	
	B5	362	59,5	352		5,4	

La Tabla 5.14 muestra un resumen de los cálculos de la altura de las barreras para la proyección de fragmentos. Desde un punto de vista general, de acuerdo a la Ec.5.34, el máximo alcance de los fragmentos es de 1372 m. Esa condición requiere, en las zonas previstas para la instalación de barreras, una altura desproporcionada, ya que esas barreras interceptarían cualquier fragmento, impidiendo que alcanzaran su máximo alcance.

Evidentemente, esa situación no es factible, de modo que debe asumirse que no se puede proteger mediante barreras físicas la totalidad de fragmentos que puedan proyectarse. Nuestra intención es conocer si podemos proteger a los vulnerables B1, B4 y B5 mediante la altura de las barreras propuestas. En la Tabla 5.14 se aprecia como la altura de los fragmentos a su paso por la barreras B1, B4 y B5 es inferior a la altura proyectada del muro, por lo que quedaría garantizada su protección. Es decir, la altura proyectada para los distintos muros es mayor que la altura que alcanzan los fragmentos en dichos puntos. Por tanto, se cumplen la totalidad de los requisitos exigidos por la Resolución IRP/971/2010 a la barrera.

Diseño de la barrera

A partir de la altura de cálculo de los muros se puede llevar a cabo un predimensionamiento. La primera cuestión a abordar es seleccionar el material con el que se construirá la barrera. Para el fin que se persigue, debe ser relativamente económico, disponible, sobrio y austero. Los materiales que mejor ajustan a estas necesidades son hormigón armado, acero y tierra o una combinación de los mismos. El hormigón armado es masivo y tiene una mayor capacidad protectora que el acero, y además no requiere mantenimiento. Un terraplén de tierra puede ser una buena solución en zonas donde se disponga del espacio y distancias de separación necesarias para su construcción. Es muy económico y de rápida construcción.

A continuación se muestra una sección aproximada de un muro en ménsula de hormigón armado, que constituye un tipo estructural adecuado para alturas de hasta 10 metros. Su perfil esbelto permite adaptar de forma sencilla la barrera a terrenos irregulares y el tacón inferior reduce el deslizamiento del mismo. Se analiza el caso de la barrera para la protección del vulnerable B1:

El cálculo estructural del muro debe llevarse a cabo cumpliendo las directrices del Código Técnico de la Edificación (CTE) y la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE). Sin embargo, por la alta especificidad del muro y las solicitaciones a las que está expuesto, además de lo establecido en las citadas normativas, deben tenerse en cuenta lo establecido por (Ambrosini et al., 2009; Hajek et al., 2016). La introducción de refuerzos, extensiones, superficies de diversa morfología y materiales especiales permite mejorar la eficacia de las barreras en la atenuación de efectos térmicos y mecánicos.

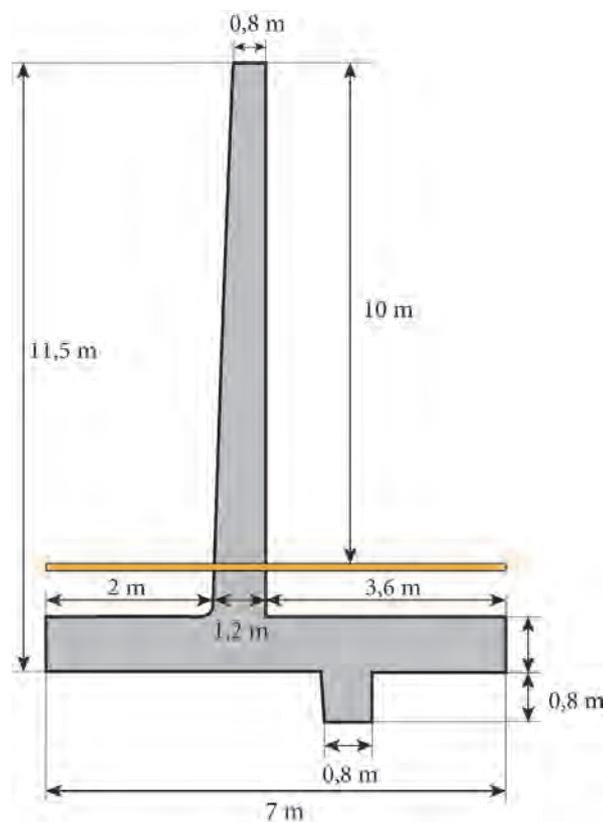


Figura 5.21. Predimensionamiento de la barrera del vulnerable B1. Fuente: Elaboración propia.

Con este ejemplo se demuestra la aplicabilidad de los métodos desarrollados en esta tesis para el emplazamiento y dimensionamiento de barreras para la protección de elementos vulnerables en entornos de riesgo tecnológico. En el caso de Viareggio, cabe recordar que se construyó un muro de 2,5 metros de altura por parte de la Rete Ferroviaria Italiana en el entorno de la estación. En el dimensionamiento de este muro no se tuvo en consideración el efecto sombra en su trasdós, constituyendo una barrera ineficaz para la protección de las personas ante la radiación térmica.

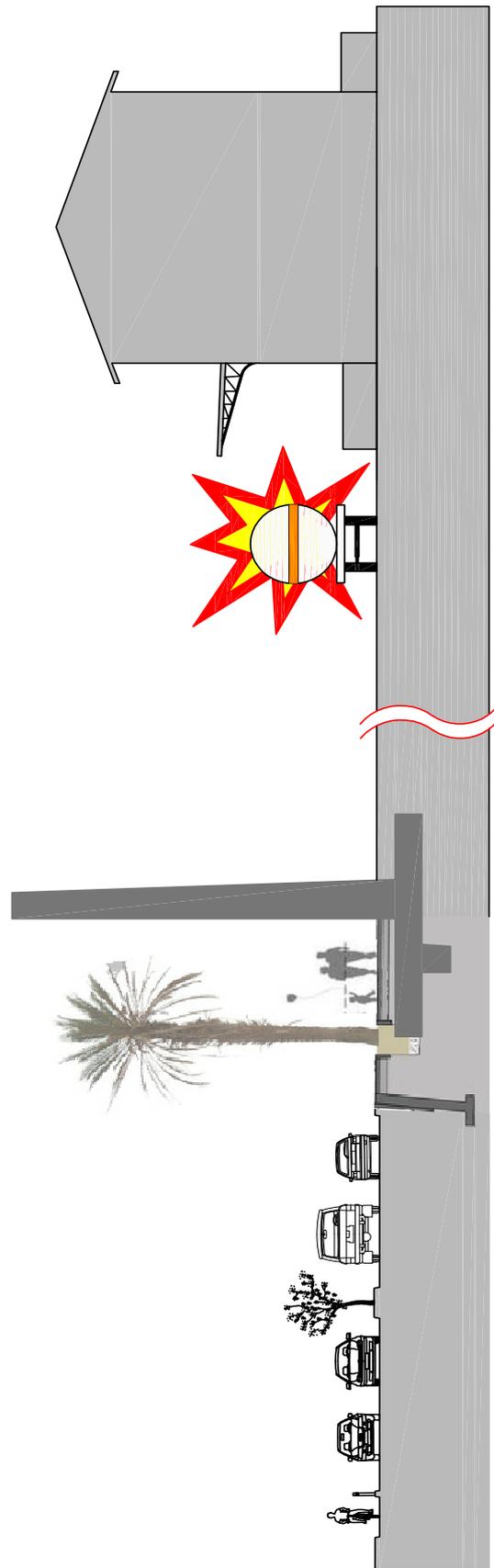


Figura 5.22. Integración arquitectónica de la barrera en el entorno de la estación. Fuente: Elaboración propia.

6 CONCLUSIONES

El trabajo realizado y los resultados obtenidos en el desarrollo de esta tesis permiten extraer las siguientes conclusiones:

1. El análisis bibliográfico ha puesto de manifiesto que no existen en la literatura factores de configuración entre una esfera y un receptor diferencial considerando el efecto sombra ejercido por un muro plano. En esta tesis se publican por primera vez los citados factores. Asimismo, en el ámbito del riesgo tecnológico, no se ha encontrado información relativa al modelado de una bola de fuego con efecto sombra.
2. Respecto a la determinación matemática de factores de configuración, se ha constatado que existe una gran variedad de métodos y procedimientos de cálculo, habiéndose descrito los más significativos. Sin embargo, cuando se considera el efecto sombra, no existe una metodología concreta para resolver el problema, siendo habitual la combinación de distintos métodos y técnicas para su resolución. Ha sido necesario desarrollar una metodología propia para la determinación de factores de configuración plano-esfera con bloqueo parcial por una tercera superficie, combinando la integración numérica de superficie con un método de trazado de rayos (ray-tracing).
3. Se ha desarrollado un método matemático para determinar el factor de configuración entre una esfera (bola de fuego) y un receptor diferencial, considerando el efecto sombra ocasionado por una tercera superficie (muro plano) interpuesta entre receptor y emisor. En el cálculo del factor de configuración se han considerado las siguientes orientaciones del receptor: vertical, horizontal y máxima. En este enfoque se ha considerado un modelo de bola de fuego estático, con posiciones de la esfera a ras de suelo y elevada. El muro tiene un ancho igual al diámetro de la esfera, y los factores de configuración son determinados para cualquier altura y posición relativa del muro respecto a la bola de fuego y el receptor. El algoritmo utilizado proporciona unos resultados de gran precisión para un pequeño número de divisiones y tiempo de ejecución. La publicación de estos factores permitirá el cálculo, simulación y modelado de sistemas físicos y químicos semejantes, donde sea necesario considerar el transporte de radiación entre superficies. Como herramienta práctica, posibilita la resolución de un problema común en el análisis de riesgo, lo que permite un modelo de ingeniería más realista. Proporciona conocimientos y herramientas sobre un efecto no considerado hasta ahora.

4. Se han obtenido expresiones analíticas del lugar geométrico que determina la condición de visibilidad nula. Es decir, aquella configuración geométrica que ocasiona el bloqueo completo de la visibilidad relativa entre receptor y bola de fuego, debido a la presencia del muro. Las ecuaciones son válidas para bolas de fuego a ras de suelo y elevadas. En dicha situación, el factor de configuración es cero, ya que la fracción de energía emitida por la bola de fuego no alcanza al receptor. Esta condición geométrica tiene un gran interés por su utilidad en el diseño de barreras de protección de elementos vulnerables, caracterizado por los parámetros factor geométrico del muro y factor de sombra.
5. Se ha desarrollado un método semi-analítico, que mediante el uso de ecuaciones matemáticas, permite determinar los factores de configuración de bolas de fuego a ras de suelo y elevadas con efecto sombra. La metodología utilizada consiste en sustraer al factor de configuración sin efecto sombra, que es conocido, el factor correspondiente a la sombra u obstrucción. Este método proporciona resultados menos precisos que el método numérico, en mayor medida conforme aumenta la altura del muro. Constituye una importante contribución, ya que hasta el momento no se disponía de métodos ni ecuaciones explícitas para obtener una aproximación a la solución del citado sistema.
6. Los resultados obtenidos han permitido desarrollar un nuevo modelo matemático de bola de fuego dinámica considerando el efecto sombra. Este modelo se basa en el modelo clásico de bola de fuego dinámica, pero introduce nuevas condiciones y ecuaciones que rigen el comportamiento del sistema. Este enfoque describe el régimen transitorio de la bola de fuego, evolucionando a través de diferentes regiones en las que la visibilidad relativa puede ser nula, parcial y total. Las condiciones geométricas que delimitan las distintas regiones de visibilidad relativa entre la bola de fuego y el receptor han sido determinadas analíticamente. Mediante este método se posibilita la aplicación del modelo dinámico de bola de fuego a escenarios con sombra.
7. A partir de dicho modelo, se ha realizado una comparativa de las consecuencias derivadas de un accidente con bola de fuego, respecto a los modelos estático y dinámico clásicos. Se ha obtenido el perfil transitorio de la intensidad de radiación, constatando la gran reducción existente entre el modelo con y sin sombra. Este enfoque proporciona una nueva herramienta para el análisis y estudio de los efectos de accidentes con bola de fuego.
8. Mediante los factores de configuración con efecto sombra, pueden caracterizarse los efectos sobre la población debidos a la radiación térmica procedente de una bola de fuego, mediante curvas de vulnerabilidad. Estos gráficos se han elaborado para volúmenes típicos de las distintas unidades de almacenamiento de LPG. En ellas se representan distintas variables que caracterizan los efectos térmicos frente a la posición del receptor y las características del muro. El gráfico constituye una herramienta de planificación para los escenarios más habituales, sin necesidad de realizar cálculos.

9. En esta tesis se realiza una propuesta de diseño de barrera física, con el fin de limitar el nivel de riesgo en zonas habitadas situadas junto a industrias de proceso o infraestructuras de transporte, susceptibles de originar accidentes graves de tipo térmico. En general, no existen en la normativa metodologías de análisis del riesgo para determinar los valores umbrales que deben aplicarse en la planificación del uso del suelo. La instalación de barreras físicas se regula en algunas normativas, permitiendo reducir las distancias de seguridad si cumplen ciertos criterios. Existen referencias en la bibliografía relacionadas con el diseño de barreras destinadas a reducir la sobrepresión e incluso resistir el impacto de fragmentos, pero ninguna relacionada con la reducción de la radiación térmica tras la misma. Utilizando los métodos desarrollados en esta tesis, es posible estimar el emplazamiento y dimensionamiento de una barrera para la protección de elementos vulnerables, de acuerdo a los valores de radiación térmica requeridos.

Por último, cabe señalar algunas líneas de investigación que requieren de trabajo futuro para dar continuidad a lo desarrollado en esta tesis:

- La metodología utilizada para determinar el factor de configuración puede aplicarse a otras geometrías de llama y superficies de obstrucción. El método semi-analítico puede utilizarse para la determinación de nuevos factores de configuración de geometrías semejantes. En términos de utilidad metodológica, este trabajo proporciona una estrategia reproducible para escenarios similares.
- Es necesario efectuar más trabajo sobre el diseño de barreras, especialmente en cuanto a especificaciones de materiales, detalles constructivos y requisitos de resistencia mecánica y térmica. El diseño de barreras también puede utilizarse para contrastar las distancias de seguridad establecidas en distintas normativas y formular nuevas recomendaciones y criterios técnicos relacionados con la planificación del uso del suelo. Por otra parte, hasta el momento no se ha realizado ningún estudio técnico sobre el diseño de barreras que permita atenuar conjuntamente los efectos de la radiación térmica y la sobrepresión, ya que en la mayoría de los casos podría cumplir un doble propósito. La protección frente a la proyección de fragmentos generados por explosiones es otro ámbito donde el diseño de barreras tiene una gran aplicación.

Nomenclatura

A	Área, m^2
c	Velocidad de la luz en el vacío, $m \cdot s^{-1}$
C_1	Primera constante de radiación, $W \cdot m^{-2}$
C_2	Primera constante de radiación, $m \cdot K$
C_p	Calor específico del líquido, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
d	Distancia entre el receptor y el centro de la bola de fuego, m
D	Diámetro de la bola de fuego, m
d_f	Distancia entre el receptor y la superficie de la llama, m
d_n	Distancia escalada, m
D_t	Dosis de radiación térmica, $(kW \cdot m^{-2})^{4/3} s$
E	Poder emisor, $W \cdot m^{-2}$
E_a	Energía absorbida, $W \cdot m^{-2}$
$E_{b,\lambda}$	Poder emisor espectral, $W \cdot m^{-2}$
E_i	Radiación incidente, $W \cdot m^{-2}$
E_{max}	Poder emisor máximo, $kW \cdot m^{-2}$
E_r	Energía reflejada, $W \cdot m^{-2}$
E_t	Energía transmitida, $W \cdot m^{-2}$
F	Factor de configuración, -
$F_{A_1-A_2}$	Factor de configuración entre superficies finitas, -
$F_{dA_1-A_2}$	Factor de configuración entre superficies diferencial y finita, -
$F_{dA_1-dA_2}$	Factor de configuración entre superficies diferenciales, -
F_h	Factor de configuración horizontal, -
$F_{h,O}$	Factor de configuración horizontal del círculo situado sobre la elipse, -
$F_{h,\Delta}$	Factor de configuración horizontal del triángulo situado sobre la elipse, -
F^I	Función implícita del modelo dinámico para el primer periodo, -
F^{II}	Función implícita del modelo dinámico para el segundo periodo, -
F_{max}	Factor de configuración máximo, -
F_{max}^w	Factor de configuración máximo en presencia del muro, -
$F_{max,a}^w$	Factor de configuración máximo analítico en presencia del muro, -
$F_{h,a}^w$	Factor de configuración horizontal analítico, con presencia de muro, -
F_v	Factor de configuración vertical, -
$F_{v,O}$	Factor de configuración vertical del círculo situado sobre la elipse, -
$F_{v,\Delta}$	Factor de configuración vertical del triángulo situado sobre la elipse, -
$F_{v,a}^w$	Factor de configuración vertical analítico con presencia de muro, -
F^v	Función implícita del modelo dinámico para visibilidad completa, -
f	Fracción de vaporización, -

f_0	Función, -
f_{w-0}	Factor geométrico del muro, -
f_{w-100}	Factor geométrico del muro visible, -
g	Aceleración de la gravedad en la superficie terrestre, $m \cdot s^{-2}$
H	Altura del centro de la bola de fuego, m
h	Constante de Planck, $J \cdot s$
H_b	Altura de la base de la bola de fuego respecto al suelo, m
H_d	Ratio entre la altura y el diámetro de la bola de fuego, -
h_{proy}	Altura del proyectil, m
H_v	Entalpía de vaporización, $kJ \cdot kg^{-1}$
I	Intensidad de radiación, $W \cdot m^{-2}$
i_0	Índice de proyección, -
k	Constante de Boltzmann, $J \cdot K^{-1}$
K_i	Parámetro adimensional, -
L	Separación del receptor respecto a la bola de fuego, m
L_p	Longitud de Planck, m
M	Masa de combustible de la bola de fuego, kg
m_l	Masa del líquido, kg
\hat{n}	Vector normal a la superficie, -
N_e	Número de elementos de la llama, -
P	Presión en el interior del recipiente en el momento de la explosión, bar
P_a	Presión atmosférica, bar
P_i	Coordenada i del punto P, -
p_w	Presión parcial del vapor de agua, Pa
Q	Flujo de calor, $W \cdot m^{-2}$
r	Distancia entre las superficies, m
R	Radio de la bola de fuego, m
s	Factor de sombra, -
T	Temperatura absoluta, K
T_0	Temperatura ambiente, K
$t_{1/3}$	Tiempo equivalente al primer periodo de la bola de fuego, s
T_b	Temperatura de ebullición normal, K
T_c	Temperatura crítica, K
t_{max}	Duración de la bola de fuego, s
t_s	Tiempo durante el cual la visibilidad es nula, s
t_v	Instante de tiempo a partir del cual la visibilidad es completa, s
V	Volumen del vapor dentro del recipiente antes de la explosión, m^3
V^*	Volumen total de vapor en el recipiente, m^3
v_0	Velocidad inicial del proyectil, $m \cdot s^{-1}$
V_i	Vértices del triángulo, -
V_{ij}	Función de visibilidad, -

V_l	Volumen del líquido dentro del recipiente antes de la explosión, m ³
W_1	Eje menor de la elipse, m
W_2	Base del triángulo sobre la elipse, m
w_i	Coefficientes de integración de Gauss, -
W_{TNT}	Equivalente TNT, kg
X_0	Distancia entre el centro de la bola de fuego y la posición del receptor, m
X_d	Ratio entre la separación del receptor y el diámetro de la bola de fuego, -
x_{proy}	Alcance del proyectil, m
X_s	Distancia entre el muro y el receptor, m
X_w	Distancia entre el centro de la bola de fuego y la posición del muro, m
Z_0	Altura de la base de la elipse, m
Z_d	Ratio entre el parámetro Z_p y el diámetro de la esfera, m
Z_p	Altura, proyectada sobre el eje vertical de la esfera, de la línea que parte del receptor y es tangente al muro, m
$Z_{p,max}$	Valor del parámetro Z_p en el instante t_{max} , m
$Z_{p,nv}$	Valor del parámetro Z_p a partir del cual no se alcanza visibilidad completa, m
Z_s	Altura, proyectada sobre el eje vertical de la esfera, que proporciona visibilidad nula, m
Z_{sd}	Ratio entre el parámetro Z_s y el diámetro de la esfera, m
Z_t	Altura de la elipse, m
Z_v	Altura, proyectada sobre el eje vertical de la esfera, de la línea que partiendo del receptor, es tangente inferior a la esfera y proporciona visibilidad completa, m
Z_{vd}	Ratio entre el parámetro Z_v y el diámetro de la esfera, m
Z_w	Altura del muro, m

Letras griegas

α	Absortividad, -
β	Fracción de la energía liberada convertida en onda de presión, -
γ	Coefficiente de dilatación adiabática, -
δ	Ángulo formado entre una línea tangente al muro y una línea tangente superior a la esfera, cuyo origen común es la posición del receptor, rad
ΔH_c	Poder calorífico, kJ·kg ⁻¹
ε	Error relativo, %
η_{rad}	Fracción de la masa de combustible involucrada en la explosión, -
θ	Ángulo de visión, rad
λ	Longitud de onda, m
ξ, ϑ	Coordenadas baricéntricas del triángulo,
ρ	Reflectividad, -
ρ_l	Densidad del líquido, kg·m ⁻³
ρ_v	Densidad del vapor, kg·m ⁻³
σ	Constante de Stefan-Boltzmann, W·m ⁻² ·K ⁻⁴

τ	Transmisividad, -
τ_A	Transmisividad atmosférica, -
ν	Frecuencia, Hz
ν_b	Función de visibilidad entre dos esferas considerando obstrucción, -
ν_e	Función de visibilidad entre dos esferas, -
φ	Ángulo formado entre una línea tangente a la esfera y una línea que pasa por su centro, cuyo origen común es la posición del receptor, rad
χ	Parámetro de intersección del algoritmo ray-tracing, -
ψ	Ángulo de proyección del fragmento, deg
ω	Ángulo sólido, sr
ϕ	Acimut, Ángulo de visión, rad

Bibliografía

Abbasi, T., Abbasi, S.A., 2007. The boiling liquid expanding vapour explosion (BLEVE): mechanism, consequence assessment, management. *J. Hazard. Mater.* 141, 489–519. doi:10.1016/j.jhazmat.2006.09.056

Ahlert, R.C., 2000. Guidelines for consequence analysis of chemical releases. Center for Chemical Process Safety, American Institute of Chemical Engineers (AIChE), 185–199. ISBN: 0-8169-0786-2. doi:10.1002/ep.670190304

Alciatore, D, Shamburger, E.S. Janna, W.S.,1988. Microcomputer Solution to the Mathematical Equivalent of the Graphical Method for Finding Radiation Shape Factors, *The Engineering Design Graphics Journal*, Vol 52, No1.

Alciatore, D., Lipp, S., and Janna, W., 1989. Closed Form Solution of the General Three Dimensional Radiation Configuration Factor Problem with Microcomputer Solution, *Proceedings of The 26th National Heat Transfer Conference and Exhibition*.

Ambirajan, A., Venkateshan, S.P., 1993. Accurate determination of diffuse view factors between planar surfaces. *Int. J. Heat Mass Transf.* 36, 2203–2208. doi:10.1016/S0017-9310(05)80151-6

Ambrosini, D. Luccioni, B.M., 2009. Reinforced concrete wall as protection against accidental explosions in the petrochemical industry. *Structural Engineering and Mechanics*, Journal Volume. 32, No.2, pp.213–233. doi:10.12989/sem.2009.32.2.213

Arturson, G., 1981. The los alfaques disaster: A boiling-liquid, expanding-vapour explosion. *Burns* 7, 233–251. doi:10.1016/0305-4179(81)90104-2

Arvo, J., Kirk, D., 1989. A survey of ray tracing acceleration techniques, in: A.S. Glassner (Ed.), *An Introduction to Ray Tracing*, Morgan Kaufmann Publishers, Inc. pp. 201–262.

Augusto, L. de C., 2007. Numerical Method for Calculating View Factor Between Two Surfaces. *Proc. Build. ...* 269–274.

Badouel, D., 1990. An efficient ray-polygon intersection. *Graphics Gems*. Academic Press Professional.

Bagster, D.F., Pitblado, R.M., 1989. Thermal hazards in the process industry. *Chem. Eng. Prog.* 85, 69–75.

Baker, W.E., Cox, P.A., Westine, P.S., Kulesz, J.J., Strehlow, R.A., 1983. Explosion hazards and evaluation. Chapter 7. Thermal Radiation Effects. Elsevier. ISBN: 978-0-444-42094-7. doi:10.1016/B978-0-444-42094-7.50015-X

Balke, C. Heller, W. Konersmann, R. Ludwig, J., 1999. Study of the Failure Limits of a Tank Car Filled with Liquefied Petroleum Gas Subjected to an Open Pool Fire Test. Berlin, Germany: Federal Institute for Materials Research and Testing (BAM).

Bao, C., Cai, N., Croiset, E., 2011. An analytical model of view factors for radiation heat transfer in planar and tubular solid oxide fuel cells. *Journal of Power Sources*, 196, 3223–3232. doi:10.1016/j.jpowsour.2010.11.128

Baum, D.R., Rushmeier, H.E., Winget, J.M., 1989. Improving Radiosity Solutions Through the Use of Analytically Determined Form-factors. *SIGGRAPH Comput. Graph.* 23, 325–334. doi:10.1145/74334.74367

Beard, A., Drysdale, D., Holborn, P., Bishop, S., 1993. Configuration factor for radiation in a tunnel or partial cylinder. *Fire Technology*, 29, 281–288. doi: 10.1007/BF01152111

Bevi risk assessments, version 3.2. (2009). Bilthoven, Netherlands: National Institute of Public Health and Environment (RIVM)

Beyler, C.L., 2016. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Chapter 66. Fire Hazard Calculations for Large, Open Hydrocarbon Fires. Springer New York. ISBN: 978-1-4939-2564-3. doi:10.1007/978-1-4939-2565-0

Birk, A.M. Ye, Z. Maillette, J. Cunningham, M., 1993. Hot and cold bleves: Observation and discussion of two different kinds of bleves. In *AiChE Heat Transfer Conference, AiChE Symposium Series*.

Birk, A.M., Cunningham, M.H., 1994. The boiling liquid expanding vapour explosion. *J. Loss Prev. Process Ind.* 7, 474–480. doi:10.1016/0950-4230(94)80005-7

Birk, A.M., 1996. Hazards from propane BLEVEs: An update and proposal for emergency responders. *J. Loss Prev. Process Ind.* 9, 173–181. doi:10.1016/0950-4230(95)00046-1

Birk, A. M., Cunningham, M.H., 1996. Liquid temperature stratification and its effect on BLEVEs and their hazards. *J. Hazard. Mater.* 48, 219–237. doi:10.1016/0304-3894(95)00157-3

Birk, a. M., Poirier, D., Davison, C., 2006. On the response of 500gal propane tanks to a 25% engulfing fire. *J. Loss Prev. Process Ind.* 19, 527–541. doi:10.1016/j.jlp.2005.12.008

Birk, a. M., Davison, C., Cunningham, M., 2007. Blast overpressures from medium scale BLEVE tests. *J.*

Loss Prev. Process Ind. 20, 194–206. doi:10.1016/j.jlp.2007.03.001

Bopche, S.B., Sridharan, A., 2010. Analytical expressions for configuration factor between cylindrical surfaces in rod bundle geometry. Nucl. Eng. Des. 240, 3020–3036. doi:10.1016/j.nucengdes.2010.05.011

Buckius, R.O., Tien, C.L., 1977. Infrared flame radiation. Int. J. Heat Mass Transf. doi:10.1016/0017-9310(77)90001-1

Buckley, H., 1927. Radiation from the interior of a reflecting cylinder, Philos Mag, vol4, pp, 753-762.

Buettner, K., 1951. Effects of extreme heat and cold on human skin. I. Analysis of temperature changes caused by different kinds of heat application, J. appl. Physiol. 3, 691-702.

Burns, P. J., 1982. TAC02D - A Finite Element Heat Transfer Code. University of California, Lawrence Livermore National Laboratory, Rept. UCID-17980.

Burns, P. J., 1983 MONTE - A Two Dimensional Radiative Exchange Factor Code. Colorado State University, Ft. Collins, CO.

Bushinskii, A. V, 1976. Determination of the geometric-optics coefficients of thermal radiation by the Monte Carlo method. J. Eng. Phys. 30, 116–121. doi:10.1007/BF00859491

Busini, V., Lino, M., Rota, R., 2012. Influence of large obstacles and mitigation barriers on heavy gas cloud dispersion: A liquefied natural gas case-study. Ind. Eng. Chem. Res. 51, 7643–7650. doi:10.1021/ie201591b

Cabeza Lainez, J.M., 2009. Fundamentos de transferencia radiante luminosa. Editorial Netbiblo. ISBN: 9788497453851.

Cabeza-Lainez, J.M., Pulido-Arcas, J. A., Castilla, M.-V., 2013. New configuration factor between a circle, a sphere and a differential area at random positions. J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 129, 272–276. doi:10.1016/j.jqsrt.2013.06.027

Cabeza-Lainez et al, 2014 (comunicación personal).

Casal, J. Arnaldos, J. Montiel, H. Planas-Cuchi, E. Vilchez, J. A., 2001. Handbook of hazardous materials spills technology, Part 5 Spill Modelling, Chapter 22 Modeling and Understanding BLEVEs. Mc Graw-Hill.

Casal, J., 2008. Evaluation of the Effects and Consequences of Major Accidents in Industrial Plants. Industrial Safety Series, Elsevier, Volume 8. ISBN: 978-0-444-53081-3. doi:10.1016/S0921-9110(08)80003-1

CCPS, 1999. Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, Second Edition. American Institute of Chemical Engineers. 9780816907205. doi:10.1002/9780470935422

CCPS, 2001, Layer of Protection Analysis: Simplified Process Risk Assessment, Center for Chemical Process Safety. American Institute of Chemical Engineers. John Wiley & Sons, New York.

CCPS, 2003. Guidelines for facility siting and layout. Center for Chemical Process Safety. American Institute of Chemical Engineers .New York.

CCPS, 2010. Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires, and BLEVEs. Chapter 6. Basic Principles of BLEVEs. ISBN: 9780816904747. doi:10.1002/9780470938157.ch6

Chalmers, A.G., Paddon, D.J., 1994. Parallel Processing of Progressive Refinement Radiosity Methods, in: Brunet, P., Jansen, F.W. (Eds.), Photorealistic Rendering in Computer Graphics: Proceedings of the Second Eurographics Workshop on Rendering. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 149–159. doi:10.1007/978-3-642-57963-9_15

Cherry, V.H. Davis, D.D. Boelter L.M.K., 1939. A mechanical integrator for determination of illumination from diffuse surface sources, Trans Illuminating Eng Soc, vol 34, no9, pp 1085-1092.

Christiansen, C., 1883. Absolute Bestimmung des Emissions- und Absorptionvermögens für warmes, Ann Physics, Wied vol 19, pp 267-283.

Christou M., Struckl M., Biermann T., 2006. Land use Planning Guidelines in the Context of Article 12 of the Seveso II Directive 96/82/EC as Amended by Directive 105/2003/EC, European Commission Joint Research Centre - Institute for the Protection and Security of the Citizen.

Chung, B.T.F., Sumitra, P.S., 1972. Radiation Shape Factors from Plane Point Sources. J. Heat Transfer 94, 328–330. doi:10.1115/1.3449944

Chung, B.T.F., Naraghi, M.H.N., 1981. Some exact solutions for radiation view factors from spheres. AIAA J. 19, 1077–1081. doi:10.2514/3.7843

Chung, T.J., Kim, J.Y., 1982. Radiation View Factors by Finite Elements. J. Heat Transfer 104, 792–795. doi:10.1115/1.3245203

Cohen, M., Greenberg, D., 1985. The hemi-cube: A radiosity solution for complex environments. ACM SIGGRAPH Comput. Graph. 19, 31–40. doi:10.1145/325334.325171

Cohen, M.F., Wallace, J.R., 1993. Radiosity and Realistic Image Synthesis, Chapter 4 - The Form Factor

- BT, Morgan Kaufmann, Boston, pp. 65–107. doi:10.1016/B978-0-08-051567-0.50010-5
- Cornell, E.S., 1936. Early studies in radiant heat. *Ann. Sci.* 1, 217–225. doi:10.1080/00033793600200171
- Cracknell, R.F., Davenport, J.N., Carsley, A.J., 1994. A model for heat flux on a cylindrical target due to the impingement of a large-scale natural gas jet fire. *ICHEME Symposium Series No. 139*, Pages 161-175.
- Crawley, F.K., 1982. Effect of ignition of a major fuel spillage, in: *EFCE Publication Series (European Federation of Chemical Engineering). The Assessment of Major Hazards*, 125–145.
- Crocker, W.P., Napier, D.H., 1988. Assessment of mathematical models for fire and explosion hazards of liquefied petroleum gases. *J. Hazard. Mater.* 20, 109–135. doi:10.1016/0304-3894(88)87009-2
- Cunningham, F.G., 1961. Power Input to a Small Flat Plate from a Diffusely Radiating Sphere with Application to Earth Satellites. *NASA TN D-710 30*, 635–638.
- Davis, B.C., Bagster, D.F., 1989. The computation of view factors of fire models. 1. Differential targets. *J. Loss Prev. Process Ind.* 2, 224–234. doi:10.1016/0950-4230(89)80037-3
- Davis, B.C., Bagster, D.F., 1990. The computation of view factors of fire models. 2. Finite targets. *J. Loss Prev. Process Ind.* 3, 327–329. doi:10.1016/0950-4230(90)80027-8
- Deiveegan, M., Ramamoorthy, V., Katte, S.S., 2004. Analytical Expressions for View Factors with an Intervening Surface. *J. Thermophys. Heat Transf.* 18, 273–277. doi:10.2514/1.5295
- Dorofeev, S.B., Sidorov, V.P., Efimenko, A.A., Kochurko, A.S., Kuznetsov, M.S., Chaivanov, B.B., Matsukov, D.I., Pereverzev, A.K., Avenyan, V.A., 1995. Fireballs from deflagration and detonation of heterogeneous fuel-rich clouds. *Fire Saf. J.* 25, 323–336. doi:10.1016/0379-7112(96)00008-2
- Droste, B., Schoen, W., 1988. Full scale fire tests with unprotected and thermal insulated LPG storage tanks. *J. Hazard. Mater.* 20, 41–53. doi:10.1016/0304-3894(88)87005-5
- Dummer, R. S and Breckenridge, Jr, W. T., 1963. Radiation Configuration Factor. General Dynamics Corp., Astronautics Div., ERR-AN-244.
- Eckert, E.R.G., Drake, R.M., 1959. *Heat and Mass Transfer*, Mc-Graw-Hill Book Co, Inc, New York.
- Edwards, A.L., 1972. TRUMP-A Computer Program for Transient and Steady State Temperature Distributions in Multidimensional Systems. University of California, Lawrence Livermore National Laboratory, Rept. UCRL-14754.

Edwards, D. K., 1985. Hybrid Monte-Carlo Matrix-Inversion Formulation of Radiation Heat Transfer with Volume Scattering, Proc. 23rd Natl. Heat Trans. Conf, Denver, pp. 273-278.

Eisenberg, N.A., Lynch, C.J. Breeding, R.J., 1975. Vulnerability Model: A Simulation System for Assessing Damage Resulting from marine Spills (VM1). US Coast Guard, AD/A-015 245, NTIS rapport no. CG-D-137-75.

Emery, A.F., 1980. Instruction Manual for the Program SHAPEFACTOR. Sandia National Laboratories, Livermore, CA, SANDS0-8027.

Erchiqui, F., Ngoma, G.D., 2007. Analyse comparative des méthodes de calcul des facteurs de formes pour des surfaces à contours rectilignes. Int. J. Therm. Sci. 46, 284–293. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2006.06.001

Evans, J., Popp, B., 1985. “Pictet”s Experiment: The Apparent Radiation and Reflection of Cold.”. Am. J. Phys. 53, 737-753. doi:10.1119/1.14305

Farrell, R., 1976. Determination of Configuration Factors of Irregular Shape. J. Heat Transfer 98, 311–313. doi:10.1115/1.3450540

Feingold, A., Gupta, K.G., 1970. New Analytical Approach to the Evaluation of Configuration Factors in Radiation From Spheres and Infinitely Long Cylinders. J. Heat Transfer 92, 69–76. doi:10.1115/1.3449647

Feng, Y.T., Han, K., 2012. An accurate evaluation of geometric view factors for modelling radiative heat transfer in randomly packed beds of equally sized spheres. Int. J. Heat Mass Transf. 55, 6374–6383. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.06.025

Fischer, S., Forse'n, R., Hertzberg, O., Jacobsson, A., Koch, B., Runn, P., Thaning, L. and Winter, S., 1995. Vadautslappav Brandfarliga Och Giftiga Gaser Och Vatskor (in Swedish), FOA-D-95-00099-4.9-SE, Forsvarets Forskningsanstalt Stockholm.

Fleck, J A., 1961. The calculation of nonlinear radiation transport by a Monte Carlo method: Statistical physics. Methods in Computational Physics, vol. 1, pp. 43-65.

Garelis, E. Rudy, T. E., Hickman, R. B., 1981. GLAM - A Steady State Numerical Solution to the Vacuum Equation of Transfer in Cylindrically Symmetric Geometries. University of California, Lawrence Livermore National Laboratory, Rept. UCID-19157.

Gayle, J.B., Bransford, J.W., 1965. Size and Duration of Fireballs from Propellant Explosions. NASA Rep. TM X-53314. Huntsville, AL.

Glass, M.W., 1995. CHAPARRAL: A Library for Solving Large Enclosure Radiation Heat Transfer

Problems. Sandia National Laboratories. United States, Department of Energy. doi:10.2172/120875

Goral, C.M. Torrance, K.E., Greenberg, D.P., Battaile, B., 1984. Modeling the Interaction of Light Between Diffuse Surfaces. SIGGRAPH Comput. Graph. 18, 213–222. doi:10.1145/964965.808601

Gostintsev, Y., A.Solodovnik, A. F., Lazarev, V., 1982. Theory of the aerodynamics, self ignition, and burnup of turbulent thermals, vortex rings, and jets in a free atmosphere. Khim. Fiz., No. 9, 1279- 1290.

Gubinelli, G., Cozzani, V., 2009. Assessment of missile hazards: identification of reference fragmentation patterns. J. Hazard. Mater. 163, 1008–18. doi:10.1016/j.jhazmat.2008.07.056

Haines, E., 1989. An Introduction to Ray Tracing, in: Glassner, A.S. (Ed.), . Academic Press Ltd., London, UK, UK, pp. 33–77.

Hajek, R., Foglar, M., Fladr, J., 2016. Influence of barrier material and barrier shape on blast wave mitigation. Constr. Build. Mater. 120, 54–64. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.05.078

Hamilton, D.C., Morgan, W.R., 1952. Radiant-interchange configuration factors, National Advisory Committee for Aeronautics. TN Technical note 2836.

Hankinson, G., 1986. A method for calculating the configuration factor between a flame and a receiving target for a wide range of flame geometries relevant to large-scale fires. Fire Safety Science. Proceedings of the first international symposium, 197–206. doi:10.3801/IAFSS.FSS.1-197

Hardee, H.C., Lee, D.O., 1973. Thermal hazard from propane fireballs. Transp. Plan. Technol. 2, 121–128. doi:10.1080/03081067308717067

Hasegawa, K., Sato, K., 1978. Experimental Investigation of the Unconfined Vapour-Cloud Explosions of Hydrocarbons. Technical memorandum no. 16., Fire Research Institute, Japan.

Hauptmann, E.G., 1968. Angle factors between a small flat plate and a diffusely radiating sphere. AIAA J. 6, 938–939. doi:10.2514/3.4634

Hemmatian, B., 2016. Contribution to the study of boiling liquid expanding vapor explosions and their mechanical effects. Universidad Politécnica de Cataluña.

Hoff, S.J., Janni, K.A., 1989. Monte Carlo Technique for the Determination of Thermal Radiation Shape Factors 32, 1023–1028. doi:10.13031/2013.31108

Holden, P.L., Reeves, A.B., 1985. Fragment hazards from failures of pressurised liquefied gas vessels. Chem. Eng. Symp. Ser. 93, Pages 205–220.

Holden P.L., 1988. Assessment of missile hazards: Review of incident experience relevant to major hazard plant. Safety and reliability directorate, Health & Safety Directorate.

Hooper, F.C. Juhasz, E.S., 1952. Graphical Evaluation of Radiation Interchange Factor, ASME Paper 52-F-19. Presented at the ASME Fall Meeting in Chicago.

Hottel, H.C., 1930, Radiant heat transmission. Mech. Eng., vol. 52, no. 7, pp. 699-704.

Howell, J.R., Perlmutter, M., 1964. Monte Carlo Solution of Thermal Transfer Through Radiant Media Between Gray Walls. J. Heat Transfer 86, 116–122. doi:10.1115/1.3687044

Howell, J.R., 1998. The Monte Carlo method in radiative heat transfer. ... Mech. Eng. J. Heat Transf. 120. doi:10.1115/1.2824310

Howell, J. R., 2010. A catalog of radiation heat transfer configuration factors.

Howell, J.R., Siegel, R., Pinar Mengüç, M., 2015. Thermal Radiation Heat Transfer, 6th Edition, CRC Press. Taylor & Francis. ISBN: 9781466593275.

HSE, 2013. Methods of Approximation and Determination of Human Vulnerability for Offshore Major Accident Hazard Assessment 1–55.

Hyde, E.P., 1907. Geometrical theory of radiating surfaces with discussion of light tubes, nat bur stand U.S. Bull, vol 3, pp81-104.

Icheme.,1992. Major Hazards Onshore & Offshore. Institution of Chemical Engineers, Symposium Series No. 130. Taylor & Francis.

Jithesh, P., Lal, S., Rajkumar, M., 2007. Determination of Radiation View Factors Considering Shadow Effect. Proceedings of 5th International Symposium on Radiative Transfer, Volume 695016, Pages 2-4, Bodrum, Turkey.

Johnson, D.M., Pritchard, M.J.,1991. Large Scale Experimental Study of Boiling Liquid Expanding Vapour Explosions (BLEVEs). British Gas plc. Research and Technology Division.

Johnson, A.D., Brightwell, H.M., Carsley, A.J., 1994. A model for predicting the thermal radiation hazards from large-scale horizontally released natural gas jet fires. Trans. IChemE 72, 157–166.

Juul, N.H., 1979. Diffuse Radiation View Factors from Differential Plane Sources to Spheres. J. Heat Transfer 101, 558–560. doi:10.1115/1.3451029

- Katte, S.S., Venkateshan, S.P., 2000. Accurate Determination of View Factors in Axisymmetric Enclosures with Shadowing Bodies Inside. *J. Thermophys. Heat Transf.* 14, 68–76. doi:10.2514/2.6491
- Khan, F.I., Abbasi, S. A., 1998. Models for domino effect analysis in chemical process industries. *Process Saf. Prog.* 17, 107–123. doi:10.1002/prs.680170207
- Kielec, D.J., Birk, A.M., 1997. Analysis of Fire-Induced Ruptures of 400-L Propane Tanks. *J. Press. Vessel Technol.* 119, 365. doi:10.1115/1.2842317
- Krishnaprakas, C.K., 1998. View-Factor Evaluation by Quadrature over Triangles. *J. Thermophys. Heat Transf.* 12, 118–120. doi:10.2514/2.6313
- Laboureur, D., Birk, A.M., Buchlin, J.M., Rambaud, P., Aprin, L., Heymes, F., Osmont, A., 2015. A closer look at BLEVE overpressure. *Process Saf. Environ. Prot.* 95, 159–171. doi:10.1016/j.psep.2015.03.004
- Landoni, J., Sabet, M. Chung, B., 1962. View Factors for Heat Radiation in HTGR Core Configuration. US Atomic Energy Commission. doi:10.2172/4736222
- Landucci, G., Antonioni, G., Tugnoli, A., Bonvicini, S., Molag, M., Cozzani, V., 2016. HazMat transportation risk assessment: A revisit in the perspective of the Viareggio LPG accident. *J. Loss Prev. Process Ind.* doi:10.1016/j.jlp.2016.08.009
- Landucci, G., Tugnoli, A., Busini, V., Derudi, M., Rota, R., Cozzani, V., 2011. The Viareggio LPG accident: Lessons learnt. *J. Loss Prev. Process Ind.* 24, 466–476. doi:10.1016/j.jlp.2011.04.001
- Lee, S.C., Tien, C.L., 1981. Optical constants of soot in hydrocarbon flames. *Symp. Combust.* 18, 1159–1166. doi:10.1016/S0082-0784(81)80120-8
- Lees, F.P., 1996. *Loss Prevention in the Process Industries-Hazard Identification, Assessment, and Control*, 2nd edition, vols. 1–3, Butterworth-Heinemann, Oxford.
- Leslie, I.R.M., Birk, A.M., 1991. State of the art review of pressure liquefied gas container failure modes and associated projectile hazards. *J. Hazard. Mater.* 28, Pages 329–365 doi:10.1016/0304-3894(91)87083-E
- Li, B.-W., Tao, W.-Q., Liu, R.-X., 1997. Ray effect in ray tracing method for radiative heat transfer. *Int. J. Heat Mass Transf.* 40, 3419–3426. doi:10.1016/S0017-9310(96)00363-8
- Liebert, C.H., Hibbard, R.R., 1968. *Theoretical Temperatures of Thin-Film Solar Cells in Earth Orbit*. NASA TN D-4331.
- Lihou, D.A., Maund, J.K., 1982. Thermal radiation hazard from fireballs. *The Assessment of major hazards*

ICChemE Symp. Ser., No. 71, Pages 131-224.

Lovin, J. K. Lubkowitz, A.W., 1969. RAVFAC View Factor Program. Lockheed Missile and Space Co., Huntsville, AL, LMSC-DI48620.

Luccioni, B.M., Ambrosini, D., 2012. Buildings protection against accidental explosions in petrochemical facilities, in: Press/Balkema, T.& F.G.-C. (Ed.), *Advances in Protective Structures Research*. pp. 195–220. doi:10.1201/b12768-8

Ludwig, C.B, Malkmus, W., Reardon, J.E., Thomson J.A.L., 1973. *Handbook of Infrared Radiation from Combustion Gases*. National Aeronautics and Space Administration, NASA SP-3080.

Mahan, J. R., 2002. *Radiation heat transfer : a statistical approach*. Wiley, New York .

Makhviladze, G.M., Roberts, J.P., Yakush, S.E., 1999a. Fireball during combustion of hydrocarbon fuel releases. I. Structure and lift dynamics. *Combust. Explos. Shock Waves* 35, 219–229. doi:10.1007/BF02674442

Makhviladze, G.M., Roberts, J.P., Yakush, S.E., 1999b. Fireball during combustion of hydrocarbon fuel releases II. Thermal radiation. *Combust. Explos. Shock Waves* 35, 359–369. doi:10.1007/BF02674465

Mannan, S., 2005. *Lees' Loss Prevention in the Process Industries (Third Edition)*. Butterworth-Heinemann, Burlington, pp. v–vii. doi:10.1016/B978-075067555-0.50081-5

Maor, T., Appelbaum, J., 2012. View factors of photovoltaic collector systems. *Solar Energy*, 86, 1701–1708. doi:10.1016/j.solener.2012.03.017

Marshall, V.C., 1987. *Major chemical hazards*. Chichester, Ellis-Horwood.

Martinsen, W.E., Marx, J.D., 1999. An improved model for prediction of radiant heat from fireballs. 1999 Int. Conf. Work. Model. Consequences Accid. Releases Hazard. Mater. San Fr. Calif. Sept. 28 - Oct. 1, 1999 CCPS, 605–621.

Maruyama, S. Aihara, T., 1996. Radiative Heat Transfer of Arbitrary 3-D Participating Media and Surfaces with Non-Participating Media by a Generalized Numerical Method REM2. *Radiative Transfer I—Proc. First Int. Symp. Radiation Transfer*, M. Pinar Menguc, ed., Begell House, New York, pp. 153-167. doi: 10.1615/ICHMT.1995.RadTransfProc.130

Mason, Jr, W. E., 1980. TACO- A Finite Element Heat Transfer Code. University of California, Lawrence Livermore National Laboratory, Rept. UCID-17980, Rev. 1.

- Max, N.L., 1995. "Optimal sampling for hemicubes," in *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 1, no. 1, pp. 60-76. doi:10.1109/2945.468388
- Mazumder, S., 2006. Methods to Accelerate Ray Tracing in the Monte Carlo Method for Surface-to-Surface Radiation Transport. *J. Heat Transfer* 128, 945. doi:10.1115/1.2241978
- Mazumder, S., Ravishankar, M., 2012. General procedure for calculation of diffuse view factors between arbitrary planar polygons. *Int. J. Heat Mass Transf.* 55, 7330–7335. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.07.066
- McDevitt, C.A., Chan, C.K., Steward, F.R., Tennankore, K.N., 1990. Initiation step of boiling liquid expanding vapour explosions. *J. Hazard. Mater.* 25, 169–180. doi:10.1016/0304-3894(90)85076-F
- Mébariki, A., Mercier, F., Nguyen, Q.B., Saada, R.A., 2009. Structural fragments and explosions in industrial facilities. Part I: Probabilistic description of the source terms. *J. Loss Prev. Process Ind.* 22, 408–416. doi:10.1016/j.jlp.2009.02.006
- Mills, A.F. *Heat and Mass Transfer*. CRC Press, 1995. ISBN 9780256114430.
- Mitalas, G.P. Stephenson, D.G., 1966. FORTRAN IV Programs to Calculate Radiant Interchange Factors. National Research Council of Canada, Division of Building Research, Ottawa, Canada, DBR-25.
- Modest, M.F., 2013a. Chapter 4 - View Factors, In *Radiative Heat Transfer (Third Edition)*, Academic Press, Boston, 2013, Pages 129-159, ISBN 9780123869449. doi:10.1016/B978-0-12-386944-9.50004-2
- Modest, M.F., 2013b. Appendix D - View Factor Catalogue, In *Radiative Heat Transfer (Third Edition)*, Academic Press, Boston, 2013, Pages 836-851, ISBN 9780123869449. doi:10.1016/B978-0-12-386944-9.50033-9
- Mudan, K.S., 1984. Thermal radiation hazards from hydrocarbon pool fires. *Prog. Energy Combust. Sci.* 10, 59–80. doi:10.1016/0360-1285(84)90119-9
- Mudan, K.S., 1987. Geometric view factors for thermal radiation hazard assessment. *Fire Saf. J.* 12, 89–96. doi:10.1016/0379-7112(87)90024-5
- Naraghi, M.H., 1988. Radiative View Factors from Spherical Segments to Planar Surfaces. *J. Thermophys. Heat Transf.* 2, 373–375. doi:10.2514/3.56226
- Nusselt, W., 1928. Graphische bestimmung des winkelverhältnisses bei der wärmestrahlung. *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, vol 72, no. 20 p 673.

- Papazoglou, I.A. Aneziris O.N. Bonanos, G., 2003. Effect of a concrete wall in the limitation of thermal radiation resulting from large industrial fires. *Safety and Reliability-Bedford & van Gelder*. Swets & Zitlinger, Lisse, 1205–1210.
- Peralta, H. Mesa, L., 2006. Metodología para determinación de factores de forma de radiación aplicada a la configuración particular plano-esfera. *Ing. e Investig*, vol. 26, n 1, pp. 30-36.
- Petersen, P.C., Fishburn, E.S., Neer, M.E., 1977. The Ignition, Combustion and Radiant Intensity of Spherical Clouds of Hydrogen, A.R.A.P report no. 291.
- Peterson, D.F., 2002. BLEVE: facts, risk factors, and fallacies, *Fire Eng.* 155, Pages 97–103.
- Pianykh, O.S., Tyler, J.M., Jr, W.N.W., 1998. Improved Monte Carlo form factor integration. *Comput. Graph.* 22, 723–734. doi:10.1016/S0097-8493(98)00093-4
- Pietersen, C., 1988. Analysis of the LPG-disaster in Mexico City. *J. Hazard. Mater.* 20, 85–107. doi:10.1016/0304-3894(88)87008-0
- Ponchaut, N.F., Kytömaa, H.K., Morrison, D.R., Chernovsky, M.K., 2011. Modeling the vapor source term associated with the spill of LNG into a sump or impoundment area. *J. Loss Prev. Process Ind.* 24, 870–878. doi:10.1016/j.jlp.2011.06.020
- Prugh, R.W., 1991a. Quantify BLEVE hazards, *Chem. Eng. Prog.* 87, Pages 66–72.
- Prugh, R.W., 1991b. Quantitative Evaluation of Bleve Hazards. *Journal of Fire Protection Engineering*, 3, 9–24. doi:10.1177/104239159100300102
- Prugh, R.W., 1994. Quantitative evaluation of fireball hazards. *Process Saf. Prog.* 13, 83–91. doi:10.1002/prs.680130211
- Puccinelli, E.F., 1973. View Factor Computer Program User's Manual. Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, X-324-73-272.
- Raj, P.K., 2008. A review of the criteria for people exposure to radiant heat flux from fires. *J. Hazard. Mater.* 159, 61–71. doi:10.1016/j.jhazmat.2007.09.120
- Ramanujam, K.S., Abishek, S., Katte, S.S., 2006. Differential view factor for a rectangle with intervening parallelepiped or sphere. *J. Thermophys. Heat Transf.* 20, 10–13. doi:10.2514/1.20296
- Rammohan, V.R., Sastri, V.M.K., 1996. Efficient evaluation of diffuse view factors for radiation. *Int. J. Heat Mass Transf.* 39, 1281–1286. doi:10.1016/0017-9310(95)00203-0

Real Decreto 1196/2003, de 19 de septiembre, por el que se aprueba la Directriz básica de protección civil para el control y planificación ante el riesgo de accidentes graves en los que intervienen sustancias peligrosas

Reid, R.C., 1976. Superheated liquids, *Am. Scientist* 64, Pages 146–156.

Reid, R.C., 1979. Possible Mechanism for Pressurized-Liquid Tank Explosions or BLEVE's. *Science* 203, 1263–1265. doi:10.1126/science.203.4386.1263

Rein, R. G. Sliepcevich, C. M. Welker, J. R. 1970. Radiation view factors for tilted cylinders, *J. Fire and Flammability*, 1, 140-153.

Remennikov, A.M., Rose, T.A., 2007. Predicting the effectiveness of blast wall barriers using neural networks. *Int. J. Impact Eng.* 34, 1907–1923. doi:10.1016/j.ijimpeng.2006.11.003

Rew, P.J., Hulbert, W.G., Deaves, D.M., 1997. Modelling of Thermal Radiation From External Hydrocarbon Pool Fires. *Process Saf. Environ. Prot.* 75, 81–89. doi:10.1205/095758297528841

Ring, E., Francis, E., 1984. *Recent Advances in Medical Thermology. The Development of Thermal Imaging*, Systems Springer New York. doi:10.1007/978-1-4684-7697-2

Roberts, A.F., 1981. Thermal radiation hazards from releases of LPG from pressurised storage. *Fire Saf. J.* 4, 197–212. doi:10.1016/0379-7112(81)90018-7

Roberts, T., Gosse, A., Hawksworth, S., 2000. Thermal Radiation from Fireballs on Failure of Liquefied Petroleum Gas Storage Vessels. *Process Saf. Environ. Prot.* 78, 184–192. doi:10.1205/095758200530628

Rossel, V.L., 2006. Aportaciones a la mejora del cálculo del factor de forma mediante métodos proyectivos. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Sistemas informáticos y Computación.

Sabet, M., Chung, B.T.F., 1988. Radiation view factors from a sphere to nonintersecting planar surfaces. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 2, No. 3 (1988), pp. 286-288. doi:10.2514/3.56225

Satyanarayana, K., Borah, M., Rao, P.G., 1991. Prediction of thermal hazards from fireballs. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 4, 344–347. doi:10.1016/0950-4230(91)80048-Y

Saunders, O.A., 1928. Notes on some radiation heat transfer formulae. *Proc. Phys. Soc.* 41, 569–575.

Sbert, M., 1996. The Use of global random directions to compute radiosity: global Montecarlo techniques. Phd Thesis. Universitat Politècnica de Catalunya. Departament Llenguatges i Sistemes Informàtics.

- Schulz-Forberg, B. Droste, B. Charlett, H., 1984. Failure mechanisms of propane-tanks under thermal stresses including fire engulfment, in: Proceedings of the International Symposium on Transport and Storage of LPG and LNG, Antwerp.
- SFPE., 2002. Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd Edition, P.J. DiNenno, Editor –in –Chief, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, Chapter 3-11.
- Shapiro, A., 1983. FACET: a radiation view factor computer code for axisymmetric, 2D planar, and 3D geometries with shadowing. Lawrence Livermore Laboratory. University of California.
- Shapiro, A.B., 1985. Computer Implementation, Accuracy, and Timing of Radiation View Factor Algorithms. ASME J. Heat Transf. 730–732. doi:10.1115/1.3247490
- Sillion, F. Puech, C., 1989. A general two-pass method integrating specular and diffuse reflection. Computer Graphics (SIGGRAPH '89 Proceedings) 23:3, pp. 335–344.
- Sobol, I. M., 1983. Método de Montecarlo, Ed. Mir, Moscu.
- Sparrow, E.M.M., 1963. A New and Simpler Formulation for Radiative Angle Factors. J. Heat Transfer 85, 81–87. doi:10.1115/1.3686058
- Sparrow, E.M., Cess, R.D., 1978. Radiation Heat Transfer. McGraw-Hill, New York.
- Stasiek, J.A., 1998. Application of the transfer configuration factors in radiation heat transfer. International Journal of Heat and Mass Transfer, 41, 2893–2907. doi:10.1016/S0017-9310(98)00024-6
- Stawczyk, J., 2003. Experimental evaluation of LPG tank explosion hazards. J. Hazard. Mater. 96, 189–200. doi:10.1016/S0304-3894(02)00198-X
- Stepanov, K.L., Stanchits, L.K., Stankevich, Y. A., 2011. Modeling of explosion thermal radiation. J. Eng. Phys. Thermophys. 84, 179–206. doi:10.1007/s10891-011-0462-3
- Sumpner, W.E., 1892. The Diffusion of Light. Proc. Phys. Soc. London 10, 10–29. doi:10.1088/1478-7814/12/1/304
- Surzhikov, S.T., 1997. Thermal radiation of large-scale oxygen-hydrogen fireballs. Analysis of the problem and main results. Teplofiz. Vysok. Temp., 35, Pages 416- 423.
- Tanaka, S., 2008. Exact View-factor Analysis for Radiation from a Sphere to another Sphere linked with a Coaxial Cylinder. Review of the Faculty of Marine Sciences, Kobe University, 05, 85-92.

Tchouvelev, A. V, Cheng, Z., Agranat, V.M., Zhubrin, S. V, 2007. Effectiveness of small barriers as means to reduce clearance distances. *Int. J. Hydrogen Energy* 32, 1409–1415. doi:10.1016/j.ijhydene.2006.10.020

TNO.,2005. Netherlands Organization for Applied Scientific Research, *Methods for the Calculation of Physical Effects Due to Releases of Hazardous Materials (Liquids and Gases)*, Yellow Book, TNO, The Hague, Netherlands, Third edition, Second revised print.

Tobler, R.R.F., Neumann, L., Sbert, M., Purgathofer, W., 1998. A new Form Factor Analogy and its Application to Stochastic Global Illumination Algorithms, in: Drettakis, G., Max, N. (Eds.), *Rendering Techniques '98: Proceedings of the Eurographics Workshop in Vienna, Austria, June 29---July 1, 1998*. Springer Vienna, Vienna, pp. 35–44. doi:10.1007/978-3-7091-6453-2_4

Tripp, W., Hwang, C., Crank, R.E., 1962, Radiation shape factors for plane surfaces and spheres, circles, or cylinders (Spec. Rept. 16) *Kansas State Univ. Bull.*, vol. 46, no. 4.

Tsao, C.K, Perry, W.W.,1979. Modifications to the vulnerability model: a simulation system for assessing damage from marine spills 9VM4, ADA 075 231, US Coast Guard NTIS Report No. CG-D-38–79.

Tseng, J.W.C., Strieder, W., 1990. View Factors for Wall to Random Dispersed Solid Bed Transport 112, 816–819. doi:10.1115/1.2910467

Ulrich, G.D., Vasudevan, P.T., 2004. *Chemical engineering process design and economics: A practical guide*, 2nd edition. Durham, N.H: Process Pub.

Van den Berg, A.C., Lannoy, A., 1993. Methods for vapour cloud explosion blast modelling. *J. Hazard. Mater.* 34, 151–171. doi:10.1016/0304-3894(93)85003-W

Van den Bosch, C.J.H., Weterings, R.A.P.M., 2005. *Methods for the Calculation of Physical Effects-Due to Releases of Hazardous Materials (liquids and gases)*, ‘Yellow Book’, The Committee for the Prevention of Disasters by Hazardous Materials, Director-General for Social Affairs and Employment, The Hague.

Venart, J.E., Sollows, K.F., Sumathipala, K., Rutledge, G.A., Jian,X.,1993a. Boiling Liquid Compressed Bubble Explosions: Experiments/Models, *Gas–Liquid Flows*, vol. 165, ASME, New York, Pages 55–60.

Venart, J.E.S., Rutledge, G.A., Sumathipala, K., Sollows, K., 1993b. To BLEVE or not to BLEVE: Anatomy of a boiling liquid expanding vapor explosion. *Process Saf. Prog.* 12, 67–70. doi:10.1002/prs.680120202

Vercammen, H.A.J., Froment, G.F., 1980. An improved zone method using monte carlo techniques for the simulation of radiation in industrial furnaces. *Int. J. Heat Mass Transf.* 23, 329–337. doi:10.1016/0017-9310(80)90121-0

- Vílchez, J.A., Montiel, H., Casal, J., Arnaldos, J., 2001. Analytical expressions for the calculation of damage percentage using the probit methodology. *J. Loss Prev. Process Ind.* 14, 193–197. doi:10.1016/S0950-4230(00)00041-3
- Viskanta, R., 2014. Chapter Two – Developments in Radiation Heat Transfer: A Historical Perspective, *Advances in Heat Transfer*. Elsevier. doi:10.1016/bs.aiht.2014.08.001
- Vogt, R.A., 1994. TRASYS: Thermal Radiation Analyzer System. NASA Johnson Space Center, USA.
- Vorre, M.H., Jensen, R.L., Le Dréau, J., 2015. Radiation exchange between persons and surfaces for building energy simulations. *Energy and Buildings*, 101, 110–121. doi:10.1016/j.enbuild.2015.05.005
- Vueghs, P., 2009. Innovative Ray Tracing Algorithms for Space Thermal Analysis. PhD Thesis. Faculty of Applied Sciences. Department of Aerospace and Mechanics. University of Liege.
- Vueghs, P., de Koning, H.P., Pin, O., Beckers, P., 2010. Use of geometry in finite element thermal radiation combined with ray tracing. *J. Comput. Appl. Math.* 234, 2319–2326. doi:10.1016/j.cam.2009.08.088
- Wallace, J.R., Elmquist, K. a., Haines, E. a., 1989. A Ray tracing algorithm for progressive radiosity. *ACM SIGGRAPH Comput. Graph.* 23, 315–324. doi:10.1145/74334.74366
- Walls, W.L., 1978. What is a BLEVE, *Fire J.* 31, Pages 46–47.
- Walls, W.L., 1979. The BLEVE—part 1, *Fire Command.* 17, Pages 35–37.
- Walton, G.N., 2002. Calculation of Obstructed View Factors by Adaptive Integration. National Institute of Standards and Technology (US Department of Commerce), NISTIR 6925
- Weiner, M.M. Tindall, J.W. Candell, L.M., 1965. Radiative Interchange Factors by Monte Carlo. ASME Paper 65-WA/HT-51.
- Wong, R.L., 1976. User's Manual for CNVUFAC, The General Dynamics Heat Transfer Radiation View Factor Program. University of California, Lawrence Livermore National Laboratory, Rept. UCID-17275.
- Yamauti, Z., 1924. Geometrical Calculation of Illumination, *Res Eletrotech Lab Tokyo*, vol 148.
- Yang, W.-J., Taniguchi, H. Kudo, K., 1995. Radiative Heat Transfer by the Monte Carlo Method. *Advances in Heat Transfer*, Vol. 27, J. P. Hartnett and T. F. Irvine, eds., Academic Press, San Diego, pp. 1-215.
- Yarbrough, D.W. Lee, C-L., 1986. Monte Carlo Calculation of Radiation View Factors,” *Integral Methods in Science and Engineering*, Fred R. Payne, C. C. Corduneanu, A. Haji-Sheikh, and T. Huang, eds.,

Hemisphere, Washington, DC, pp. 563-574.

Zhou, Y., Peng, Q., 1992. The super-plane buffer: An efficient form-factor evaluation algorithm for progressive radiosity. *Comput. Graph.* 16, 151–158. doi:10.1016/0097-8493(92)90041-S

Zhou, X.Q., Hao, H., 2008. Prediction of airblast loads on structures behind a protective barrier. *Int. J. Impact Eng.* 35, 363–375. doi:10.1016/j.ijimpeng.2007.03.003

ANEXO A

Deducción matemática de la ecuación del factor de configuración

El factor de configuración es la fracción de energía emitida por una superficie isotérmica, opaca y difusa, que es interceptada directamente por la superficie receptora. Su definición matemática constituye la base teórica de esta tesis y el punto de partida para la determinación de factores de configuración, ecuación a la que se hace referencia constante. En este *Anexo* se muestra la deducción de las siguientes ecuaciones (Modest, 2013a; Howell et al., 2015):

- a) Factor de configuración entre elementos diferenciales.
- b) Factor de configuración entre un elemento diferencial y una superficie finita.
- c) Factor de configuración entre superficies finitas.

a) Factor de configuración entre elementos diferenciales

Consideremos los dos elementos diferenciales ilustrados en la Figura A1.

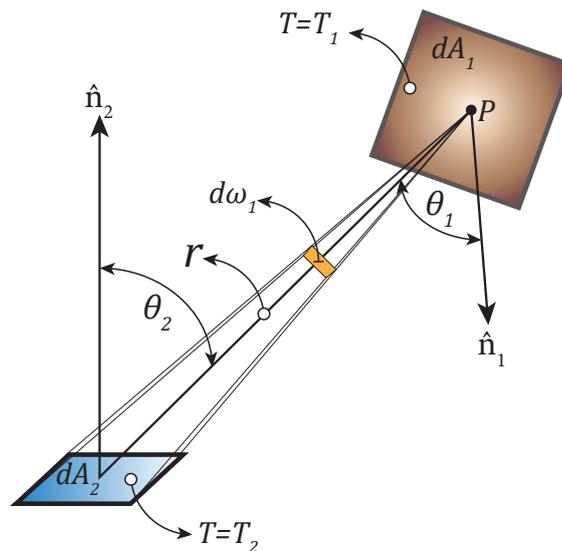


Figura A1. Geometría para el intercambio de energía entre dos elementos diferenciales.

Los elementos dA_1 y dA_2 se encuentran a las temperaturas T_1 y T_2 respectivamente, orientados de forma arbitraria en el espacio y tienen sus normales formando los ángulos θ_1, θ_2 con la línea de unión entre ambos elementos denotada por r . Por definición:

$$dF_{dA_1-dA_2} = \frac{\text{Energía difusa emitida por } dA_1 \text{ interceptada directamente por } dA_2}{\text{Energía difusa total emitida por } dA_1} \quad (\text{Ec.A1})$$

La intensidad de radiación se define como la cantidad total de energía emitida por una superficie por unidad de área proyectada normal a r por unidad de ángulo sólido:

$$i_1 = \frac{d^2 Q_{dA_1-dA_2}}{dA_1 \cos \theta_1 d\omega_1} \quad (\text{Ec.A2})$$

Reordenando la ecuación anterior, y designando como i_1 la intensidad de radiación que se transmite desde dA_1 , la cantidad total de energía por unidad de tiempo que sale de dA_1 e incide en dA_2 es:

$$d^2 Q_{dA_1-dA_2} = i_1 dA_1 \cos \theta_1 d\omega_1 \quad (\text{Ec.A3})$$

$d\omega_1$ es el ángulo sólido subtendido por dA_2 cuando es visto desde dA_1 .

Como la intensidad de radiación se considera difusa, es independiente del ángulo bajo el cual sale de la superficie. La ecuación anterior puede reescribirse para cualquier intervalo de longitud de onda:

$$d^3 Q_{dA_1-dA_2} = i_1(\lambda) d\lambda dA_1 \cos \theta_1 d\omega_1 \quad (\text{Ec.A4})$$

La energía total radiante puede calcularse integrando la expresión anterior para todas las longitudes de onda:

$$d^2 Q_{dA_1-dA_2} = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} d^3 Q_{dA_1-dA_2} = dA_1 \cos \theta_1 d\omega_1 \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} i_1(\lambda) d\lambda \quad (\text{Ec.A5})$$

Para una superficie difusa, $i_1(\lambda)$ no depende de la dirección por lo que los elementos del integrando que dependen de factores geométricos pueden sacarse fuera de la integral. Dicho de otro modo, la integración sobre la longitud de onda es independiente de la geometría. Este resultado permitiría determinar el factor geométrico de configuración para un espectro de longitudes de onda (energía espectral). El desarrollo que se muestra a continuación se realiza para cantidades totales de energía, considerando que el factor de configuración es el mismo para todas las longitudes de onda, simplificando así la formulación.

Consideremos la superficie dA_2 y unamos todos los puntos de su contorno sobre el punto P . De este modo obtendremos una superficie, de vértice en P , que delimitará un área sobre la superficie. Dicha área constituye la medida de ángulo sólido bajo el cual se ve la superficie dA_2 desde el punto O . Así, el ángulo sólido $d\omega_1$ viene definido por:

$$d\omega_1 = \frac{dA_2 \cos\theta_2}{r^2} \quad (\text{Ec.A6})$$

Sustituyendo esta expresión en la Ec.A3, se obtiene la siguiente ecuación:

$$d^2Q_{dA_1-dA_2} = \frac{i_1 dA_1 \cos\theta_1 dA_2 \cos\theta_2}{r^2} \quad (\text{Ec.A7})$$

Esta ecuación representa la cantidad total de energía por unidad de tiempo transferida por dA_1 que incide en dA_2 . De modo análogo obtenemos una expresión para la radiación emitida desde dA_2 y recibida por dA_1 :

$$d^2Q_{dA_2-dA_1} = \frac{i_2 dA_2 \cos\theta_2 dA_1 \cos\theta_1}{r^2} \quad (\text{Ec.A8})$$

En el caso especial de que la superficie receptora sea un cuerpo negro, las expresiones anteriores proporcionan la cantidad de energía emitida por un elemento que es recibida por el otro. Sustituyendo las expresiones anteriores en la definición del factor de configuración planteada en la Ec.A1:

$$dF_{dA_1-dA_2} = \frac{d^2Q_{dA_1-dA_2}}{\pi i_1 dA_1} = \frac{\frac{i_1 \cos\theta_1 \cos\theta_2 dA_1 dA_2}{r^2}}{\pi i_1 dA_1} = \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2 dA_2}{\pi r^2} = \frac{\cos\theta_1 d\omega_1}{\pi} \quad (\text{Ec.A9})$$

$\pi i_1 dA_1$ representa la energía difusa total emitida por dA_1 sobre el ángulo sólido. Igualmente:

$$dF_{dA_2-dA_1} = \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi r^2} dA_1 \quad (\text{Ec.A10})$$

Multiplicando las Ec.A9 y Ec.A10 por dA_1 y dA_2 respectivamente, se obtiene:

$$\begin{aligned}
 dF_{dA_2-dA_1} dA_2 &= \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2 dA_1}{\pi r^2} dA_2 \\
 dF_{dA_1-dA_2} dA_1 &= \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2 dA_2}{\pi r^2} dA_1 \\
 \frac{dF_{dA_1-dA_2} dA_1}{dF_{dA_2-dA_1} dA_2} &= 1 ; \quad \frac{dF_{dA_1-dA_2}}{dF_{dA_2-dA_1}} = \frac{dA_2}{dA_1} \\
 dF_{dA_1-dA_2} dA_1 &= dF_{dA_2-dA_1} dA_2
 \end{aligned}
 \tag{Ec.A11}$$

La relación anterior se denomina relación de reciprocidad del factor de configuración, que viene a indicar que los factores de configuración son proporcionales a la relación entre sus elementos diferenciales de superficie.

b) Factor de configuración entre un elemento diferencial y una superficie finita

Ahora consideraremos un elemento diferencial dA_1 , isotérmico, difuso, con emisividad constante a temperatura T_1 que intercambia energía con un área finita A_2 , isotérmica a temperatura T_2 . La relación que se ha obtenido para el intercambio entre dos elementos diferenciales puede extenderse a este caso, permitiendo a A_2 ser finita. En la Figura A2 se muestra el distinto valor que adopta el ángulo θ_2 en función de la posición de dA_1 sobre A_2 . Del mismo modo, θ_1 varía al cambiar el valor de r .

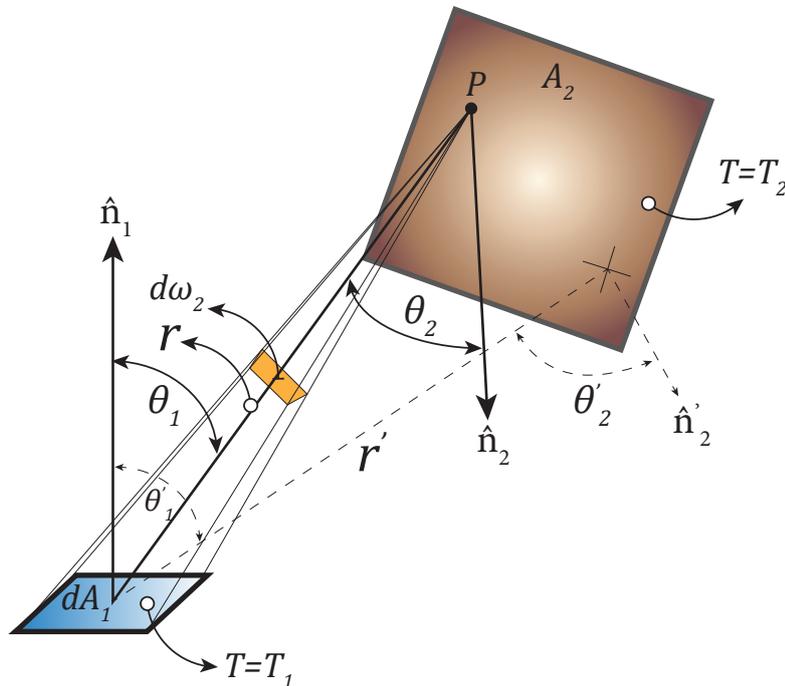


Figura A2. Geometría para el intercambio de energía entre un elemento diferencial y un área finita.

En estas condiciones, existen 2 factores de configuración a considerar, el factor $dF_{dA_1-A_2}$ desde el área diferencial dA_1 al área finita A_2 y el factor $dF_{A_2-dA_1}$ desde el área finita A_2 al elemento diferencial dA_1 .

Para obtener el factor $dF_{dA_1-A_2}$ recordemos que la energía radiante total emitida por el elemento dA_1 es:

$$dQ_1 = \pi i dA_1 \quad (\text{Ec.A12})$$

Por su parte, la energía que intercepta a dA_2 sobre A_2 es:

$$d^2 Q_{dA_1-dA_2} = \frac{i_1 \cos\theta_1 \cos\theta_2 dA_1 dA_2}{r^2} \quad (\text{Ec.A13})$$

El factor de configuración $dF_{dA_1-A_2}$ se obtiene integrando sobre A_2 la Ec.A13 dividida por la Ec.A12:

$$F_{dA_1-A_2} = \frac{\int_{A_2} d^2 Q_{dA_1-dA_2}}{dQ_1} = \frac{\int_{A_2} \frac{i_1 \cos\theta_1 \cos\theta_2 dA_1 dA_2}{r^2}}{\pi i dA_1} = \int_{A_2} \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi r^2} dA_2 \quad (\text{Ec.A14})$$

Se observa que el integrando de la Ec.A14 es $dF_{dA_1-dA_2}$, por lo que se puede reordenar como:

$$F_{dA_1-A_2} = \int_{A_2} dF_{dA_1-dA_2} \quad (\text{Ec.A15})$$

La integral anterior muestra la contribución de las fracciones de energía que alcanzan A_2 a la energía total, mediante la suma sobre todo el dominio de A_2 .

Ahora vamos a determinar $dF_{A_2-dA_1}$. La energía que intercepta dA_1 desde A_2 , es:

$$dQ_{A_2-dA_1} = dA_1 \int_{A_2} i_2 \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{r^2} dA_2 \quad (\text{Ec.A16})$$

La energía total que emite A_2 es:

$$Q_2 = \int_{A_2} \pi i_2 dA_2 \quad (\text{Ec.A17})$$

Entonces el factor de configuración es la relación entre las Ec.A16 y Ec.A17:

$$dF_{A_2-dA_1} = \frac{dA_1 \int_{A_2} i_2 \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{r^2} dA_2}{\int_{A_2} \pi i_2 dA_2} = \frac{dA_1}{A_2} \int_{A_2} \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{r^2} dA_2 \quad (\text{Ec.A18})$$

La Ec.A18 ha sido obtenida sujeta a la condición de que A_2 emite y refleja uniformemente la intensidad de radiación sobre toda su área. El integrando, de nuevo, corresponde con la Ec.A10, de modo que:

$$dF_{A_2-dA_1} = \frac{dA_1}{A_2} \int_{A_2} dF_{dA_1-dA_2} \quad (\text{Ec.A19})$$

Como en el caso anterior, puede obtenerse la relación de reciprocidad:

$$dF_{dA_1-A_2} dA_1 = dF_{A_2-dA_1} A_2 \quad (\text{Ec.A20})$$

c) Factor de configuración entre superficies finitas

Por último, se obtendrá el factor de configuración entre dos áreas finitas representadas en la Figura A3.

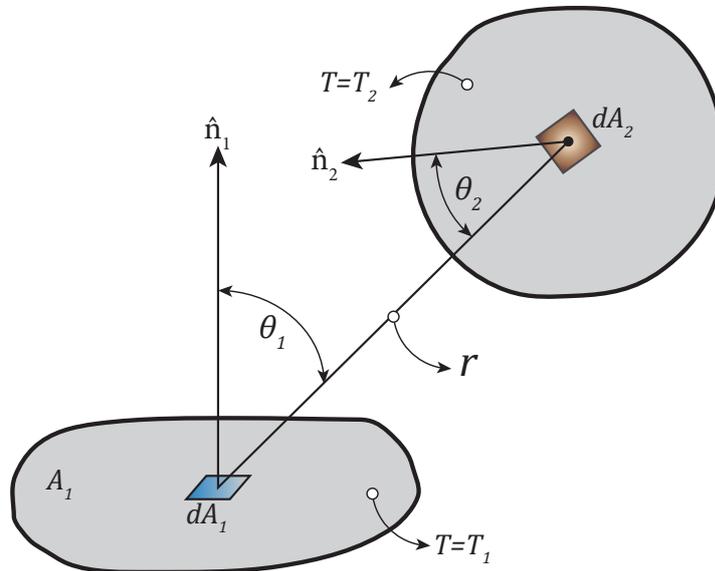


Figura A3. Geometría para el intercambio de energía entre dos áreas finitas.

Por definición, $F_{A_1-A_2}$ es la fracción de energía emitida desde A_1 que es interceptada por A_2 . La energía total emitida por A_1 es:

$$Q_1 = \pi i_1 A_1 \quad (\text{Ec.A21})$$

La radiación que es emitida desde un elemento dA_1 e interceptada por dA_2 fue obtenida anteriormente por medio de la Ec.A13. Si se integra sobre A_1 y A_2 , se obtiene la energía emitida por A_1 interceptada por dA_2 . Dividiéndola por la Ec.A21 obtenemos el factor de configuración:

$$F_{A_1-A_2} = \frac{\int_{A_1} \int_{A_2} \pi i_1 \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi r^2} dA_1 dA_2}{\pi i_1 A_1} = \frac{1}{A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi r^2} dA_1 dA_2 \quad (\text{Ec.A22})$$

Esta expresión puede reescribirse en términos de los factores de configuración obtenidos en el apartado b):

$$F_{A_1-A_2} = \frac{1}{A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} dF_{dA_1-dA_2} dA_1 = \frac{1}{A_1} \int_{A_1} F_{dA_1-A_2} dA_1 \quad (\text{Ec.A23})$$

La expresión para $F_{A_2-A_1}$ es trivial:

$$F_{A_2-A_1} = \frac{\int_{A_1} \int_{A_2} \pi i_2 \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi r^2} dA_1 dA_2}{\pi i_2 A_2} = \frac{1}{A_2} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi r^2} dA_1 dA_2 \quad (\text{Ec.A24})$$

Finalmente se obtiene la relación de reciprocidad:

$$F_{A_1-A_2} A_1 = F_{A_2-A_1} A_2$$

$$\frac{F_{A_1-A_2} A_1}{F_{A_2-A_1} A_2} = 1 ; \quad \frac{F_{A_1-A_2}}{A_2} = \frac{A_2}{A_1} \quad (\text{Ec.A25})$$

RESUMEN DE ECUACIONES PARA EL FACTOR DE CONFIGURACIÓN

TIPO DE SUPERFICIES	ECUACIÓN
ELEMENTOS DIFERENCIALES	$dF_{dA_1-dA_2} = \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi r^2} dA_2 \quad (\text{Ec.A10})$
ELEMENTO DIFERENCIAL Y ELEMENTO FINITO	$F_{dA_1-A_2} = \int_{A_2} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi r^2} dA_2 \quad (\text{Ec.A18})$
ELEMENTOS FINITOS	$F_{A_1-A_2} = \frac{1}{A_2} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi r^2} dA_1 dA_2 \quad (\text{Ec.A24})$

TIPO DE SUPERFICIES	RELACIÓN DE RECIPROCIDAD
ELEMENTOS DIFERENCIALES	$dF_{dA_1-dA_2} dA_1 = dF_{dA_2-dA_1} dA_2 \quad (\text{Ec.A11})$
ELEMENTO DIFERENCIAL Y ELEMENTO FINITO	$dF_{dA_1-A_2} dA_1 = dF_{A_2-dA_1} A_2 \quad (\text{Ec.A20})$
ELEMENTOS FINITOS	$F_{A_1-A_2} A_1 = F_{A_2-A_1} A_2 \quad (\text{Ec.A25})$

ANEXO B

Catálogo de Factores de Configuración Plano-Esfera

En este *Anexo* se expone una recopilación de factores de configuración para la geometría particular plano-esfera. La mayoría han sido extraídos del catálogo de Howell (Howell, 2010), habiéndose mejorado la presentación de los gráficos relativos a la orientación espacial entre las superficies y la normalización de los parámetros que rigen las ecuaciones. Contiene los factores de mayor correlación con la tesis, permitiendo su directa referenciación y consulta.

La colección de factores es la siguiente:

- **Factores entre elementos diferenciales y áreas finitas:**
 - F1. Orientación perpendicular, eje de la esfera y normal del plano coaxiales.
 - F2. Orientación tangencial, eje de la esfera y tangente al plano coaxiales.
 - F3. Orientación oblicua, el elemento plano no interseca la esfera.
 - F4. Orientación oblicua, el elemento plano interseca la esfera.
 - F5. Orientación arbitraria, eje de la esfera pasa por el centro del elemento diferencial.
 - F6. Orientación perpendicular, eje de la esfera y normal del plano paralelas.
 - F7. Orientación paralela, el plano es paralelo al eje de la esfera.
 - F8. Orientación paralela, la normal del elemento diferencial es paralelo al eje de la esfera.
 - F9. Orientación perpendicular, eje de la esfera situado sobre la esquina del rectángulo.
 - F10. Orientación arbitraria en el espacio.

- **Factores entre áreas finitas:**
 - F11. Orientación perpendicular; eje de la esfera y normal del rectángulo coaxiales.
 - F12. Orientación perpendicular, eje de la esfera situado sobre la esquina del rectángulo.
 - F13. Esfera situada sobre la esquina de un rectángulo, formando un determinado ángulo.
 - F14. Orientación perpendicular, eje de la esfera y normal del rectángulo paralelos.

Factor de Configuración F1.

(B-39 Catálogo Howell)

- Superficie 1: Elemento diferencial plano.
- Superficie 2: Esfera finita.
- Configuración: La normal del elemento diferencial de área pasa por el centro de la esfera.

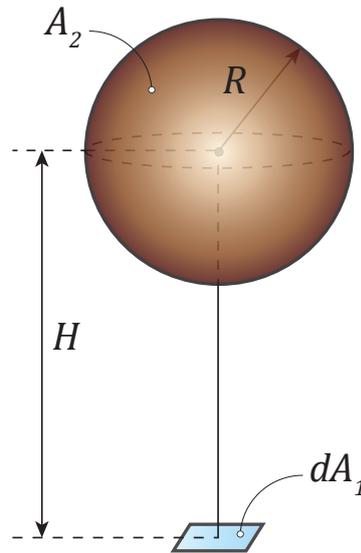


Figura B1. Representación geométrica del factor F1.

•Solución analítica:

$$F_{dA_1-A_2} = \left(\frac{R}{H} \right)^2 = \frac{R^2}{H^2} = \frac{D^2}{4H^2} \quad (\text{Ec.B1})$$

- Referencias: Chung et al., 1972; Juul, 1979.

Factor de Configuración F2

(B-40 Catálogo Howell)

- Superficie 1: Elemento diferencial plano.
- Superficie 2: Esfera finita.
- Configuración: La tangente al elemento diferencial de área pasa por el centro de la esfera.

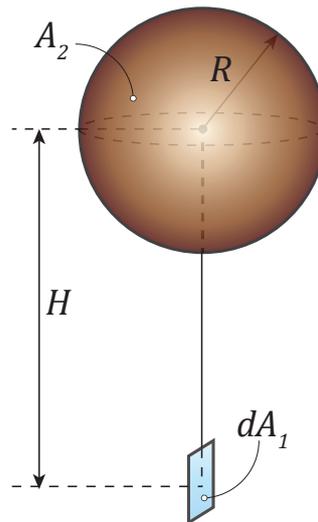


Figura B2. Representación geométrica del factor F2.

- Solución analítica:

$$F_{dA_1-A_2} = \frac{1}{\pi} \left(\arctan \left(\frac{1}{\sqrt{K_1^2 - 1}} \right) - \left(\frac{\sqrt{K_1^2 - 1}}{K_1^2} \right) \right) \quad (\text{Ec.B2})$$

$$K_1 = \frac{H}{R} \quad (\text{Ec.B3})$$

- Referencia: Chung et al., 1972.

Factor de Configuración F3

(B-41 Catálogo Howell)

- Superficie 1: Elemento diferencial plano.
- Superficie 2: Esfera finita.
- Configuración: Orientación oblicua, el elemento plano no interseca la esfera.

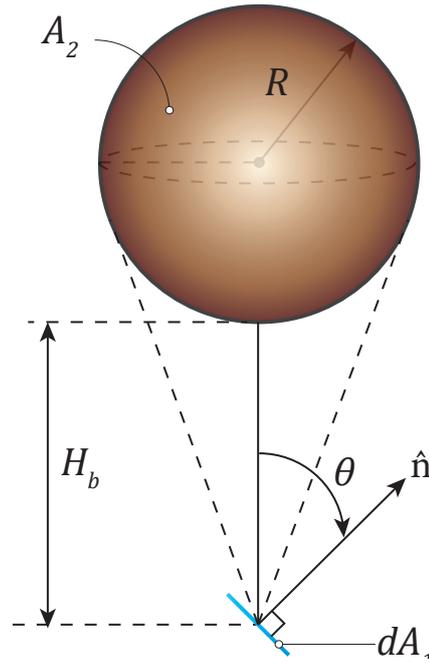


Figura B3. Representación geométrica del factor F3.

- Solución analítica:

$$F_{dA_1-A_2} = \frac{1}{(1+K_1)^2} \cos\theta \quad (\text{Ec.B4})$$

$$K_1 = \frac{H_b}{R} \quad (\text{Ec.B5})$$

- Referencias: Juul, 1979; Chung et al., 1981.

Factor de Configuración F4

(B-42 Catálogo Howell)

- Superficie 1: Elemento diferencial plano.
- Superficie 2: Esfera finita.
- Configuración: Orientación oblicua, el elemento plano interseca la esfera.

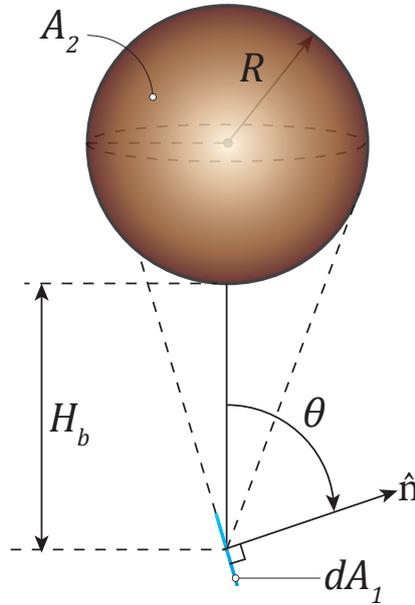


Figura B4. Representación geométrica del factor F4.

- Solución analítica:

$$\begin{aligned}
 F_{dA_1-A_2} = & \left[\frac{(\sqrt{K_1^2 - 1}) \sin\theta}{\pi K_1^2} \sqrt{(1 - (K_1^2 - 1) \cot^2\theta)} \right] \\
 & + \left[\frac{1}{\pi} \left(\arctan \left(\frac{\sin\theta \sqrt{(1 - (K_1^2 - 1) \cot^2\theta)}}{\sqrt{K_1^2 - 1}} \right) - \left(\frac{\sqrt{K_1^2 - 1}}{K_1^2} \right) \right) \right] \quad (\text{Ec.B6}) \\
 & + \left[\frac{\cos\theta}{\pi K_1^2} \left(\pi - \arccos \left(\sqrt{(K_1^2 - 1) \cot^2\theta} \right) \right) \right]
 \end{aligned}$$

$$K_1 = \frac{H_b}{R} - 1 \quad (\text{Ec.B7})$$

- Referencias: Cunningham, 1961; Juul, 1979; Chung et al., 1981.

Factor de Configuración F5

(B-43 Catálogo Howell)

- Superficie 1: Elemento diferencial plano.
- Superficie 2: Esfera finita.
- Configuración: Orientación oblicua, el elemento plano interseca la esfera.

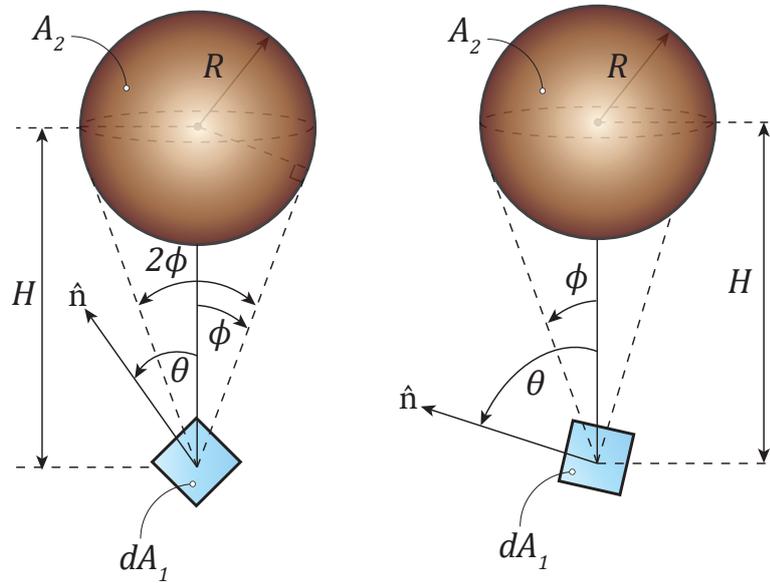


Figura B5. Representación geométrica del factor F5.

- Solución analítica:

Caso 1)

$$\frac{\pi}{2} - \phi \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} + \phi$$

$$F_{dA_1-A_2} = \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \arcsin\left(\frac{\sqrt{K_1^2 - 1}}{K_1 \sin\theta}\right) + \frac{1}{\pi K_1^2} \left(\cos\theta \arccos\left(-\sqrt{K_1^2 - 1} \cot\theta\right) - \left(\sqrt{K_1^2 - 1} \sqrt{1 - K_1^2 \cos^2\theta}\right) \right) \tag{Ec.B8}$$

Caso 2)

$$\theta < \frac{\pi}{2} + \phi$$

$$F_{dA_1-A_2} = \frac{\cos\theta}{K_1^2} \tag{Ec.B9}$$

$$K_1 = \frac{H}{R} - 1 \tag{Ec.B10}$$

- Referencias: Cunningham, 1961; Hauptmann, 1968; Liebert et al., 1968.

Factor de Configuración F6

(B-44 Catálogo Howell)

- Superficie 1: Elemento diferencial plano.
- Superficie 2: Esfera finita.
- Configuración: Orientación perpendicular, eje de la esfera y normal del plano paralelas.

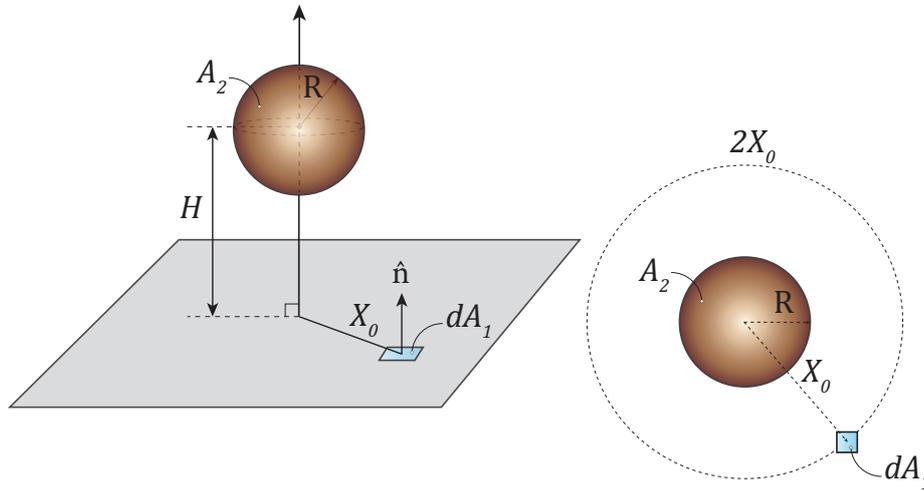


Figura B6. Representación geométrica del factor F6.

- Solución analítica:

Caso 1)

$$H \geq X_0$$

$$F_{dA_1-A_2} = \frac{H}{(X_0^2 + H^2)^{\frac{3}{2}}} \tag{Ec.B11}$$

Caso 2)

$$-1 \leq H \leq 1$$

$$F_{dA_1-A_2} = \frac{1}{\pi} \left[\frac{K_1}{(K_2^2 + K_1^2)^{\frac{3}{2}}} \arccos \left(\left(-\frac{K_1}{K_2} \right) \left(\sqrt{K_2^2 + K_1^2 - 1} \right) \right) - \frac{\left(\sqrt{(K_2^2 + K_1^2 - 1)(1 - K_1^2)} \right)}{K_2^2 + K_1^2} - \arcsin \left(\frac{\sqrt{K_2^2 + K_1^2 - 1}}{K_2} \right) + \frac{\pi}{2} \right] \tag{Ec.B12}$$

$$K_1 = \frac{H}{R} ; K_2 = \frac{X_0}{R} \tag{Ec.B13}$$

- Referencias: Juul, 1979; Chung et al., 1981.

Factor de Configuración F7

(B-46 Catálogo Howell)

- Superficie 1: Elemento diferencial plano.
- Superficie 2: Esfera finita.
- Configuración: El eje de la esfera y la normal del plano son paralelas.

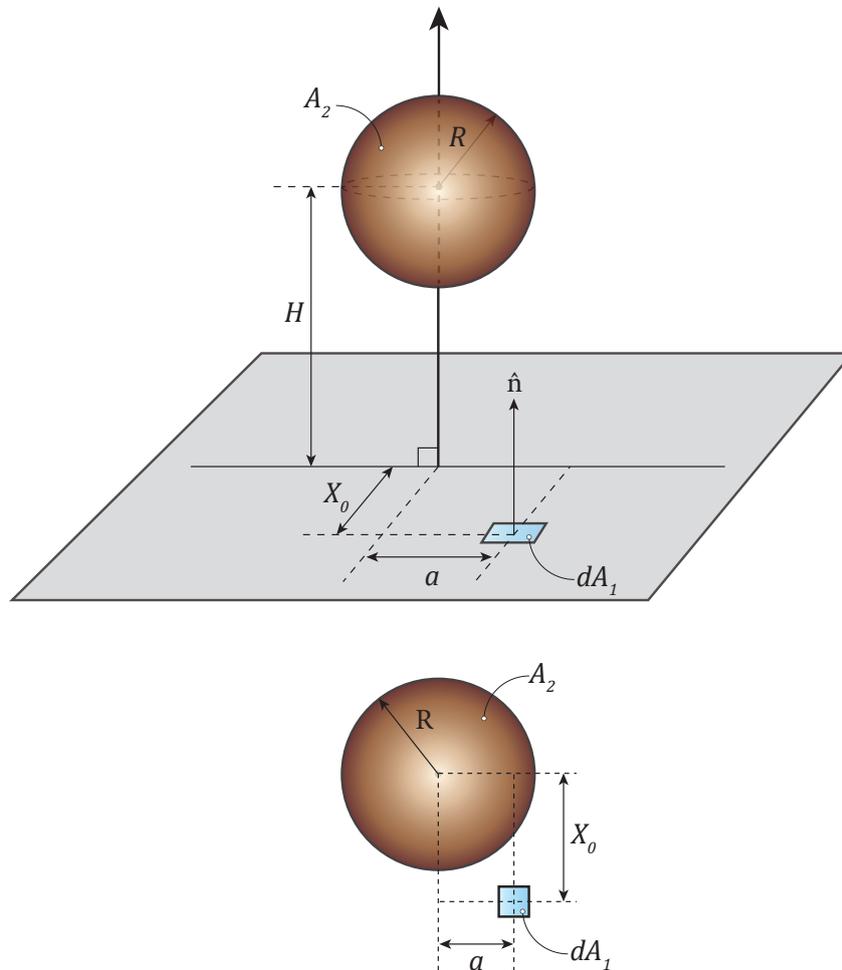


Figura B7. Representación geométrica del factor F7.

- Solución analítica:

$$F_{dA_1-A_2} = \frac{K_2^2}{(1 + K_1^2 + K_3^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (\text{Ec.B14})$$

$$K_1 = \frac{H}{a} ; K_2 = \frac{R}{a} ; K_3 = \frac{X_0}{a} \quad (\text{Ec.B15})$$

- Referencia: Naraghi, 1988.

Factor de Configuración F8

(B-47 Catálogo Howell)

- Superficie 1: Esfera finita.
- Superficie 2: Elemento diferencial plano.
- Configuración: Orientación paralela, eje de la esfera y normal del plano paralelos.

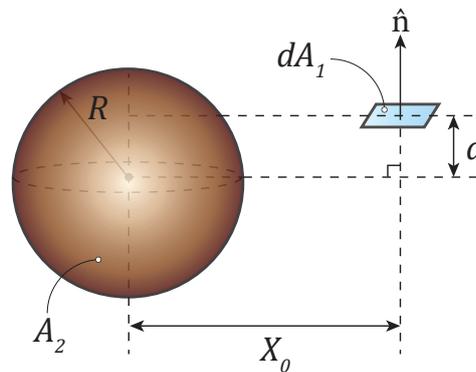


Figura B8. Representación geométrica del factor F8.

- Solución analítica:

$$F_{dA_1-A_2} = \frac{\sqrt{(K_3-1)(1-K_1^2)}}{\pi K_3} + \frac{1}{\pi} \arctan \sqrt{\frac{(1-K_1^2)}{(K_3-K_2)}} - \frac{K_1}{\pi K_3^{3/2}} \arccos \left(\frac{K_1 \sqrt{(K_3-1)}}{K_2} \right) \quad (\text{Ec.B16})$$

$$K_1 = \frac{a}{R} ; K_2 = \frac{X_0}{R} ; K_3 = H^2 + X_0^2 \quad (\text{Ec.B17})$$

- Referencia: Chung et al., 1981.

Factor de Configuración F9

(B-106 Catálogo Howell)

- Superficie 1: Esfera diferencial.
- Superficie 2: Rectángulo finito.
- Configuración: Orientación perpendicular, eje de la esfera situado sobre la esquina del rectángulo.

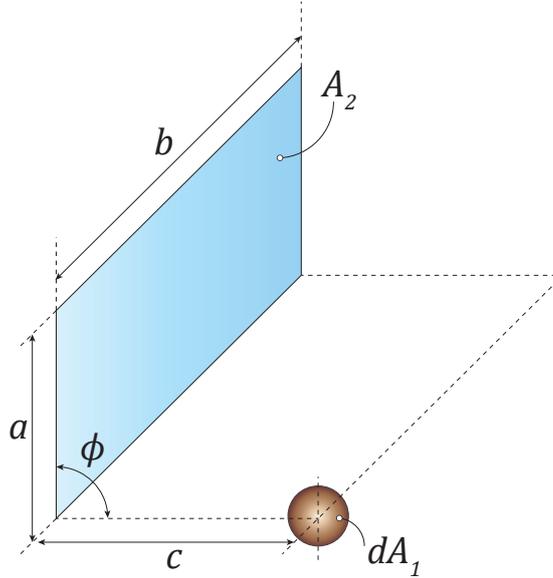


Figura B9. Representación geométrica del factor F9.

- Solución analítica:

Caso 1)

$0 < \phi < \theta$

$$F_{dA_1-A_2} = \frac{1}{4\pi} \left(\arctan \left(\frac{\left(\frac{K_2(K_1 - \cos\phi)}{\sin\phi} \right)}{\sqrt{1 + K_2^2 + K_1^2 - 2K_1\cos\phi}} \right) + \arctan \left(\frac{K_2 \cot\phi}{\sqrt{1 + K_2^2}} \right) \right) \quad (\text{Ec.B18})$$

Caso 2)

$\phi = \pi/2$

$$F_{dA_1-A_2} = \frac{1}{4\pi} \left(\arctan \left(\frac{K_1 K_2}{\sqrt{1 + K_1^2 + K_2^2}} \right) \right) \quad (\text{Ec.B19})$$

$$K_1 = \frac{a}{c} ; K_2 = \frac{b}{c} \quad (\text{Ec.B20})$$

- Referencia: Hamilton et al., 1952.

Factor de Configuración F10

- Superficie 1: Elemento diferencial plano.
- Superficie 2: Esfera finita.
- Configuración: Orientación arbitraria en el espacio.

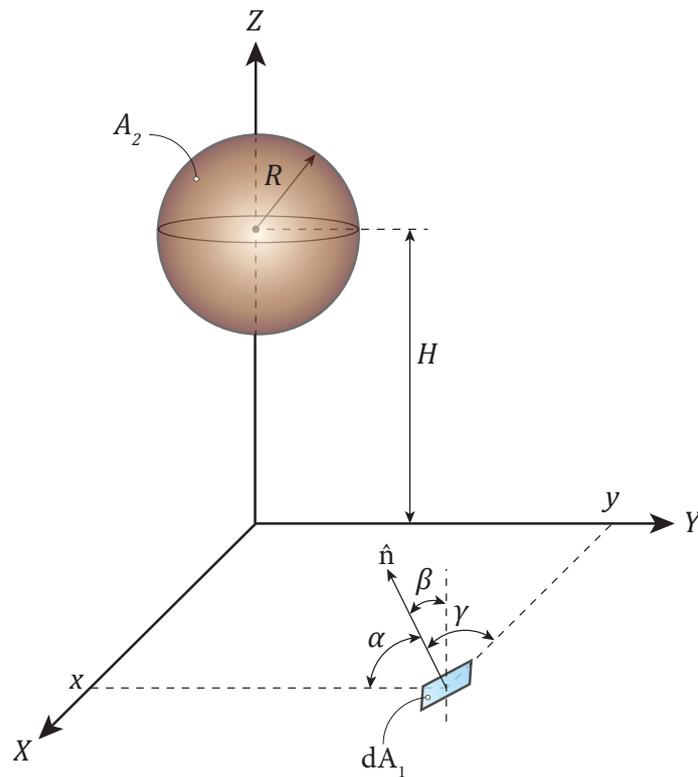


Figura B10. Representación geométrica del factor F10.

- Solución analítica:

$$F_{dA_1-A_2} = \frac{r^2 x}{\sqrt{(x^2 + y^2 + H^2)^3}} \cos\alpha + \frac{r^2 y}{\sqrt{(x^2 + y^2 + H^2)^3}} \cos\beta + \frac{r^2 H}{\sqrt{(x^2 + y^2 + H^2)^3}} \cos\gamma \quad (\text{Ec.B21})$$

- Referencia: Cabeza-Lainez et al., 2013.

Factor de Configuración F11

(C-121 Catálogo Howell)

- Superficie 1: Esfera finita.
- Superficie 2: Rectángulo finito.
- Configuración: Orientación perpendicular, eje de la esfera y normal del rectángulo coaxiales.

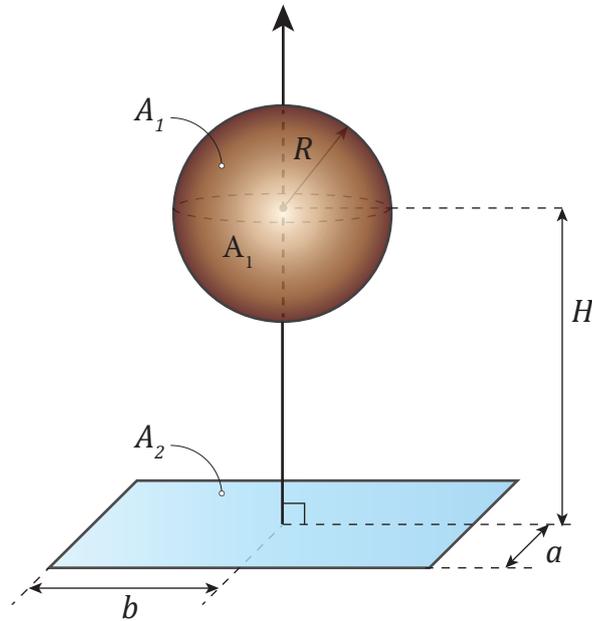


Figura B11. Representación geométrica del factor F11.

- Solución analítica:

$$F_{A_1-A_2} = \frac{1}{2\pi} \left(\arcsin \left(\frac{2K_1^2 - (1-K_1^2)(K_1^2 + K_2^2)}{(1+K_1^2)(K_1^2 + K_2^2)} \right) + \sin \left(\frac{2K_2^2 - (1-K_2^2)(K_1^2 + K_2^2)}{(1+K_2^2)(K_1^2 + K_2^2)} \right) \right) \quad (\text{Ec.B22})$$

$$K_1 = \frac{a}{H} ; K_2 = \frac{b}{H} \quad (\text{Ec.B23})$$

- Referencia: Feingold et al., 1970.

Factor de Configuración F12

(C-122 Catálogo Howell)

- Superficie 1: Esfera finita.
- Superficie 2: Rectángulo finito.
- Configuración: Orientación perpendicular, eje de la esfera situado sobre la esquina del rectángulo.

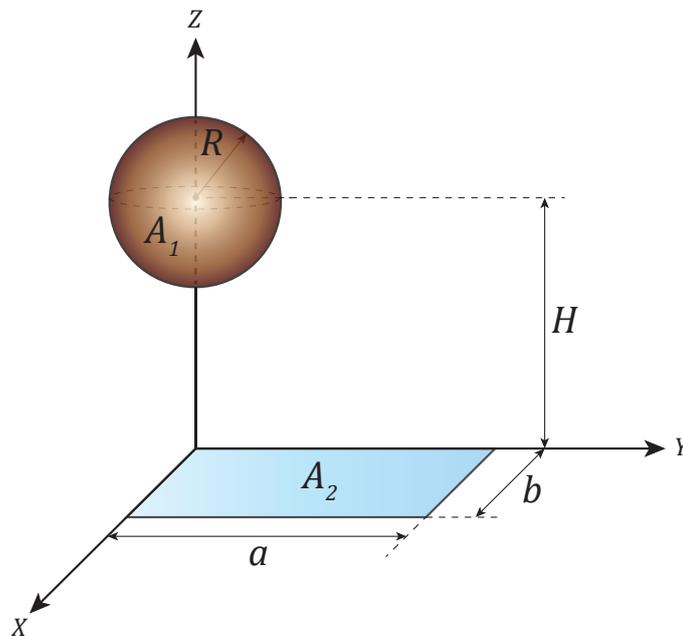


Figura B12. Representación geométrica del factor F12.

- Solución analítica:

$$F_{A_1-A_2} = \frac{1}{4\pi} \arctan \left(\sqrt{\frac{1}{K_1^2 + K_2^2 + K_1^2 K_2^2}} \right) \quad (\text{Ec.B24})$$

$$K_1 = \frac{H}{a} ; K_2 = \frac{H}{b} \quad (\text{Ec.B25})$$

- Referencias: Tripp et al., 1962; Sabet et al., 1988; Tseng et al., 1990.

Factor de Configuración F13

(C-122A Catálogo Howell)

- Superficie 1: Esfera finita.
- Superficie 2: Rectángulo finito.
- Configuración: La esfera está situada sobre la esquina del rectángulo, formando un determinado ángulo.

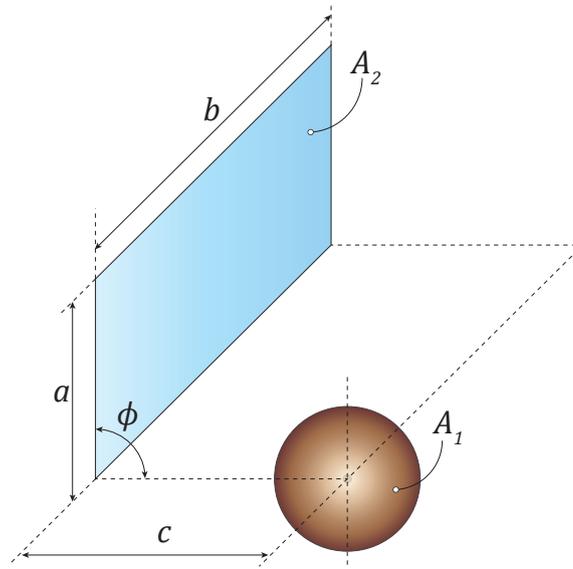


Figura B13. Representación geométrica del factor F13.

- Solución analítica:

Caso 1) $0 < \phi < \theta$

$$F_{A_1-A_2} = \frac{1}{4\pi} \left(\arctan \left(\frac{\left(\frac{K_2(K_1 - \cos\phi)}{\sin\phi} \right)}{\sqrt{1 + K_2^2 + K_1^2 - 2K_1\cos\phi}} \right) + \arctan \left(\frac{K_2 \cot\phi}{\sqrt{1 + K_2^2}} \right) \right) \quad (\text{Ec.B26})$$

Caso 2) $\phi = \pi/2$

$$F_{A_1-A_2} = \frac{1}{4\pi} \left(\arctan \left(\frac{K_1 K_2}{\sqrt{1 + K_1^2 + K_2^2}} \right) \right) \quad (\text{Ec.B27})$$

$$K_1 = \frac{a}{c} ; K_2 = \frac{b}{c} \quad (\text{Ec.B28})$$

- Referencia: Hamilton et al., 1952.

Factor de Configuración F14

- Superficie 1: Esfera finita.
- Superficie 2: Rectángulo finito.
- Configuración: Orientación perpendicular, eje de la esfera y normal del rectángulo paralelos.

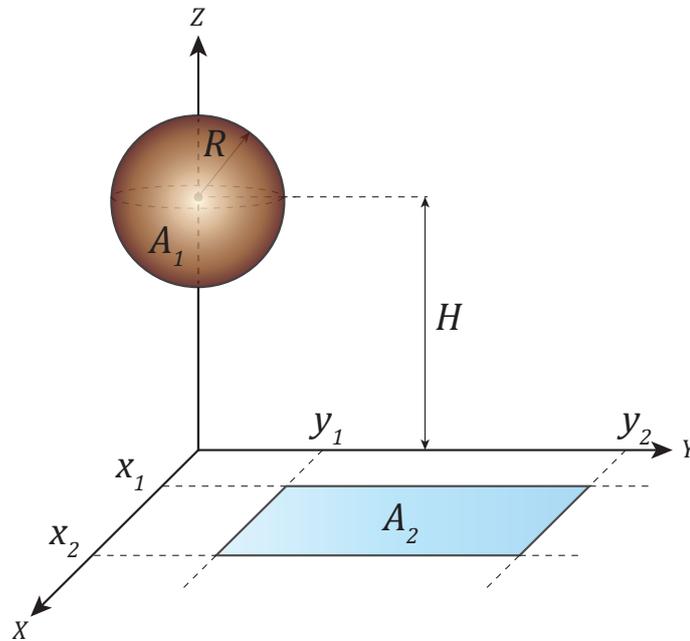


Figura B14. Representación geométrica del factor F14.

- Solución analítica:

$$F_{A_1-A_2} = \frac{1}{4\pi} \left(\begin{aligned} & \arctan \frac{x_2 y_2}{z \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + H^2}} - \arctan \frac{x_2 y_1}{z \sqrt{x_2^2 + y_1^2 + H^2}} \\ & - \arctan \frac{x_1 y_2}{z \sqrt{x_1^2 + y_2^2 + H^2}} + \arctan \frac{x_1 y_1}{z \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + H^2}} \end{aligned} \right) \quad (\text{Ec.B29})$$

- Referencia: Cabeza-Lainez et al., 2014 (comunicación personal).

ANEXO C

Curvas de Vulnerabilidad de Bolas de Fuego con Efecto Sombra

A partir de los factores de configuración calculados en el *Capítulo 4*, pueden caracterizarse las consecuencias sobre la población debidas a la radiación térmica de la bola de fuego con efecto sombra mediante las funciones Probit descritas en la Tabla 5.3. De esta forma, pueden elaborarse gráficos donde se represente el porcentaje de población afectada, en función de la posición del receptor (X_d) y de las características del muro (Z_d). El objetivo es disponer de una herramienta de planificación para accidentes donde se produzcan bolas de fuego, considerando el efecto protector del muro.

Se estudian cuatro casos representativos de depósitos y tanques de almacenamiento y transporte más frecuentes de LPG, que es una de las sustancias más utilizadas en la industria de procesos y susceptible de ocasionar una bola de fuego:

- C1. Camión Cisterna (Road Tanker).
Masa de diseño: 20 Toneladas.
Volumen característico 45-56 m³.
- C2. Vagón Cisterna (Rail Tank Car).
Masa de diseño: 50 Toneladas.
Volumen característico: 108-130 m³.
- C3. Depósito de Almacenamiento Horizontal (Horizontal Storage Tank).
Masa de diseño: 100 Toneladas.
Volumen característico: 225-250 m³ (60 000 US gallon).
- C4. Esfera de Almacenamiento (Spherical Storage Tank).
Masa de diseño: 450 Toneladas.
Volumen característico: 1000-6000 m³. Se utiliza la masa equivalente a 1000 m³.

El cálculo se lleva a cabo según el modelo estático para una bola de fuego a ras de suelo ($H_d=0,5$) y elevada, para el caso particular de ($H_d=1$). La metodología de cálculo de la intensidad de radiación térmica será la utilizada en (Casal et al, 2001). El poder calorífico se asume igual a 50 000 kJ/kg (H_c) y la fracción de energía que se emite en forma de radiación térmica igual a 1/3 (η_{rad}).

C.1.1. Camión cisterna. Bola a ras de suelo

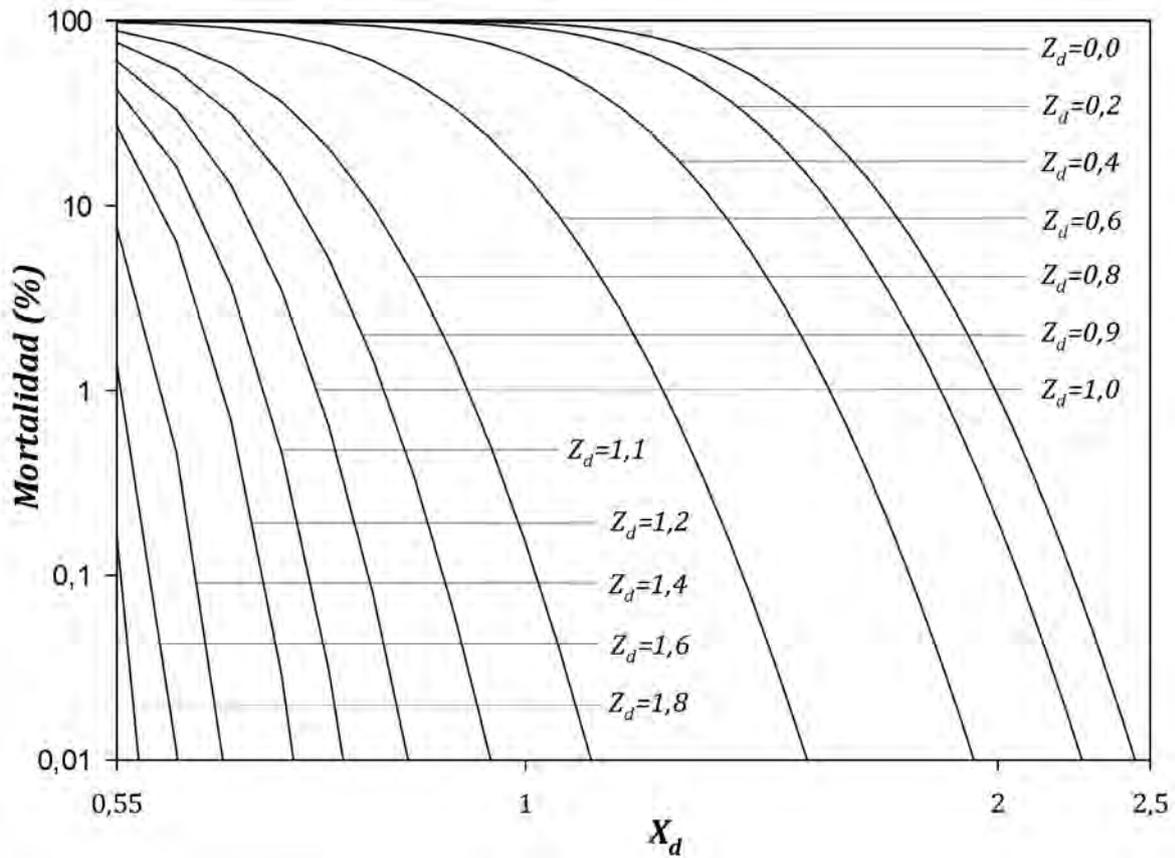


Figura C1. Curva de letalidad para una bola de fuego a ras de suelo. M=20 Tn.

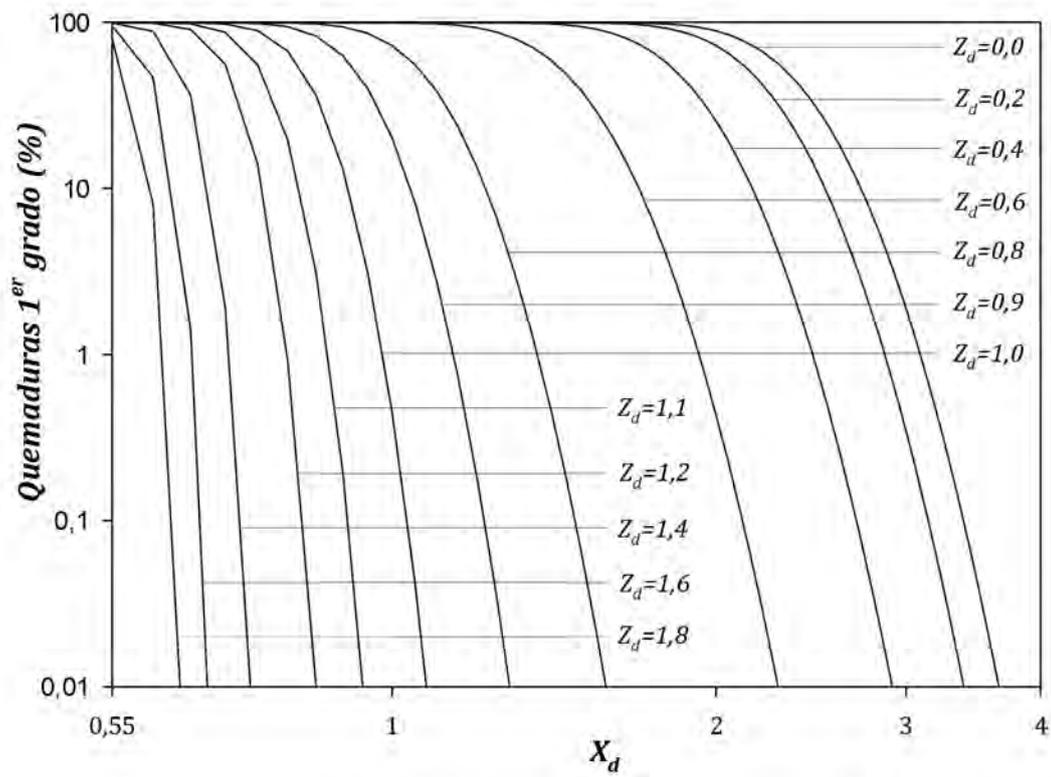


Figura C2. Porcentaje de vulnerabilidad a las quemaduras de primer grado para una bola de fuego a ras de suelo. M=20 Tn.

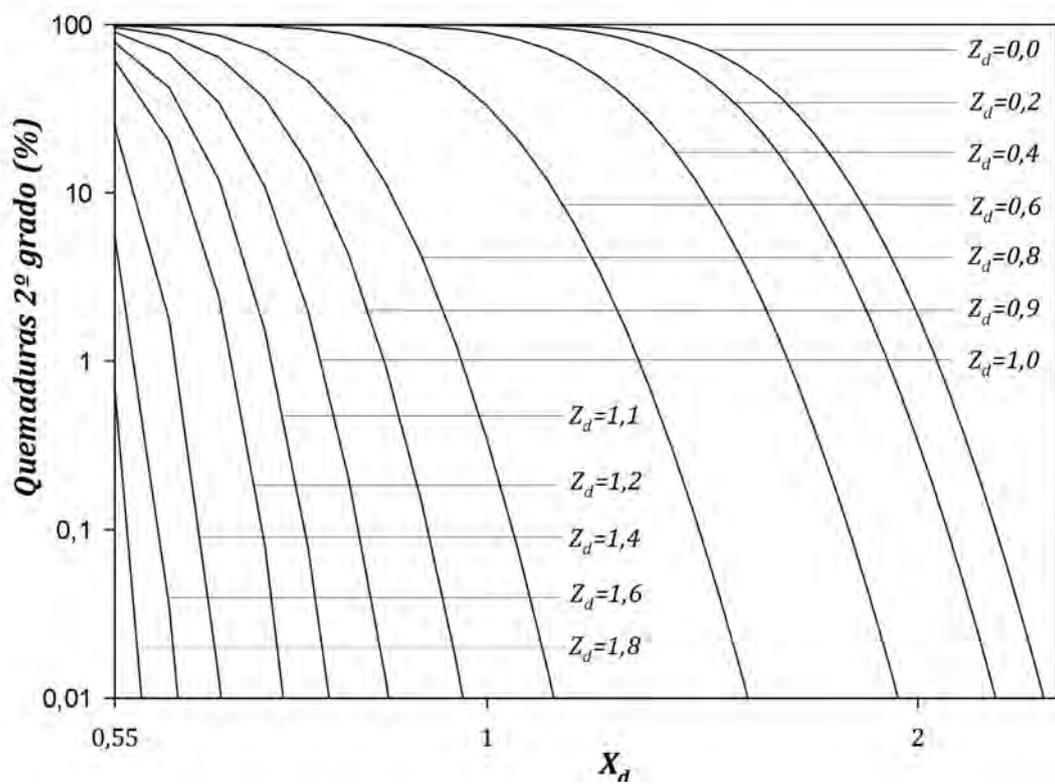


Figura C3. Porcentaje de vulnerabilidad a las quemaduras de segundo grado para una bola de fuego a ras de suelo. M=20 Tn.

C.1.2. Camión cisterna. Bola elevada

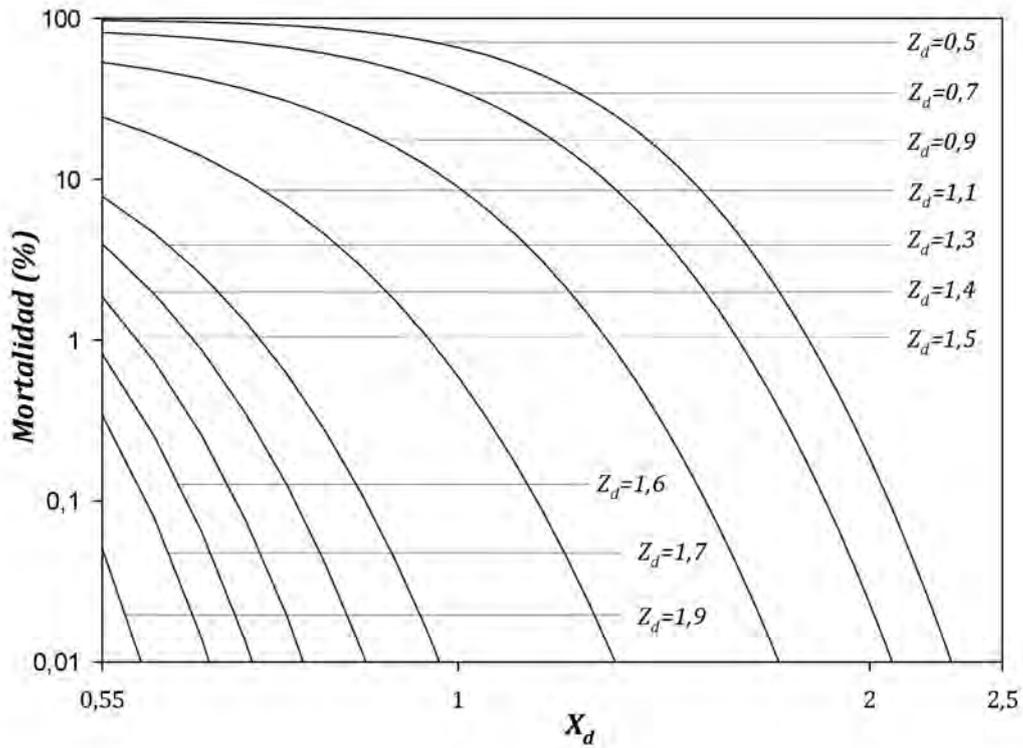


Figura C4. Curva de letalidad para una bola de fuego elevada. M=20 Tn.

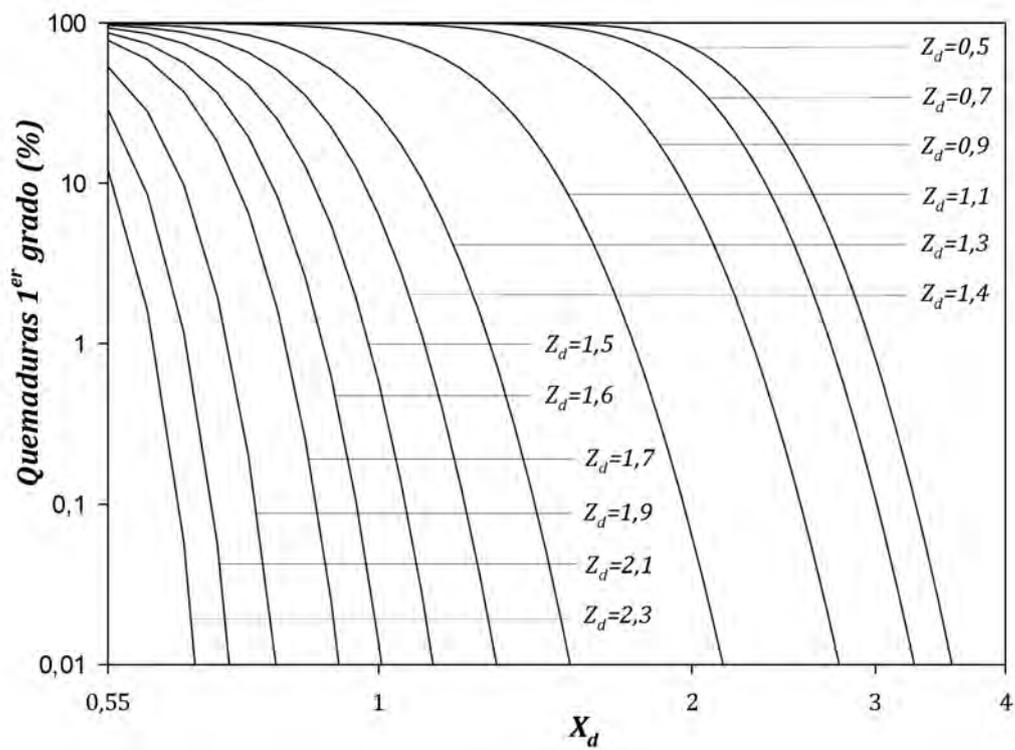


Figura C5. Porcentaje de vulnerabilidad a las quemaduras de primer grado para una bola de fuego elevada. M=20 Tn.

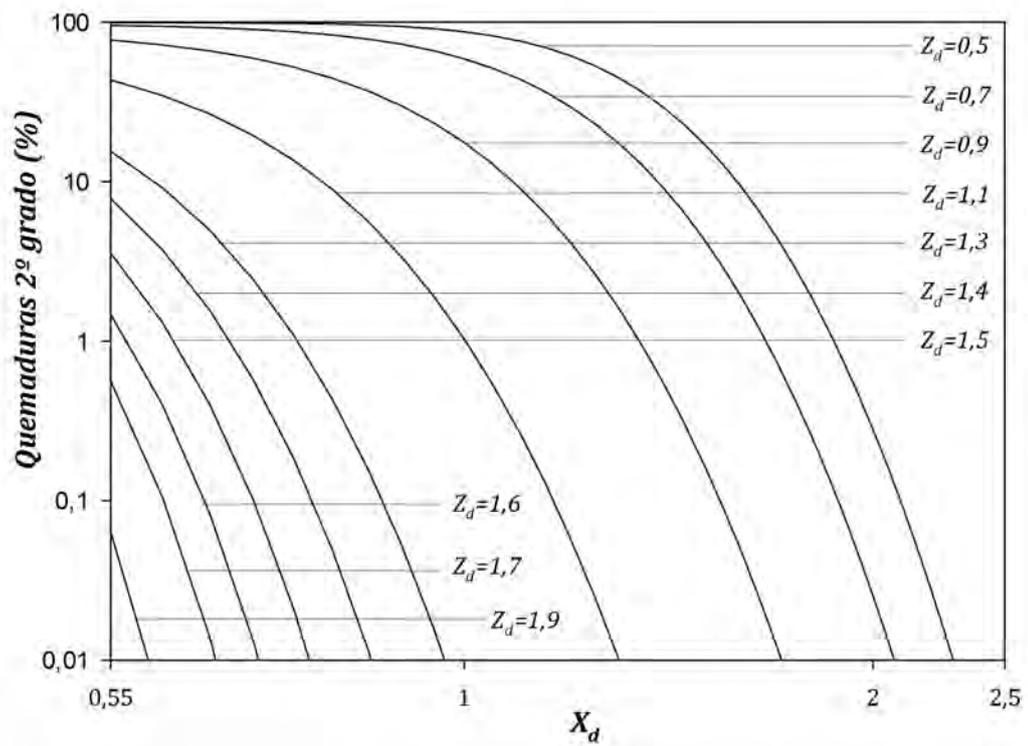


Figura C6. Porcentaje de vulnerabilidad a las quemaduras de segundo grado para una bola de fuego elevada. M=20 Tn.

C.2.1. Vagón cisterna. Bola a ras de suelo

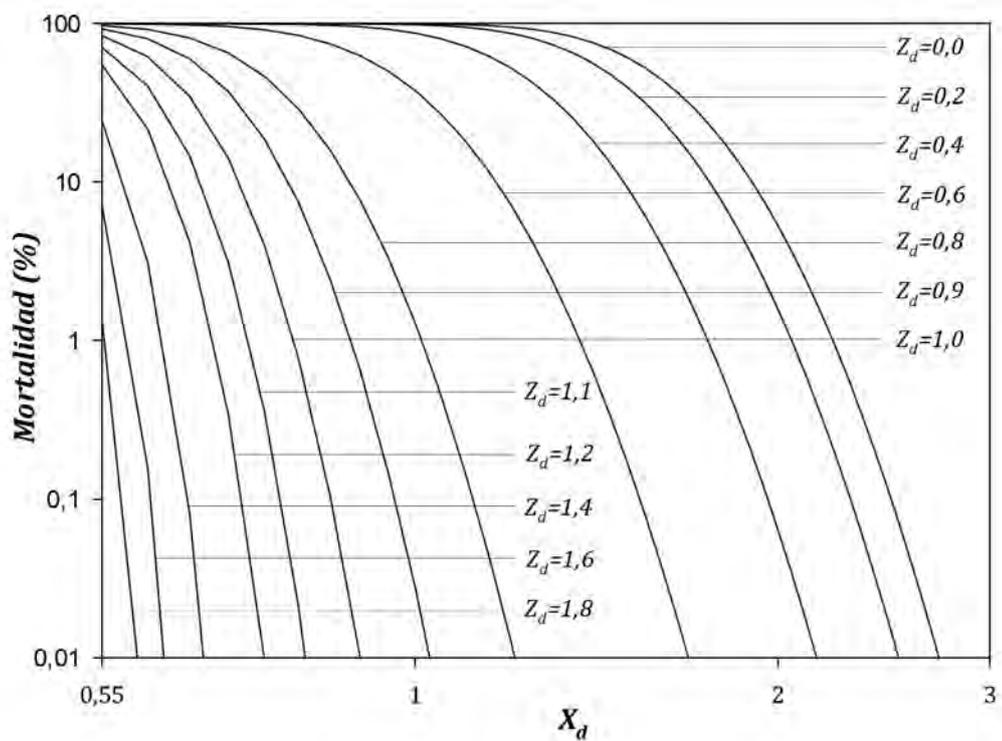


Figura C7. Curva de letalidad para una bola de fuego a ras de suelo. M=50 Tn.

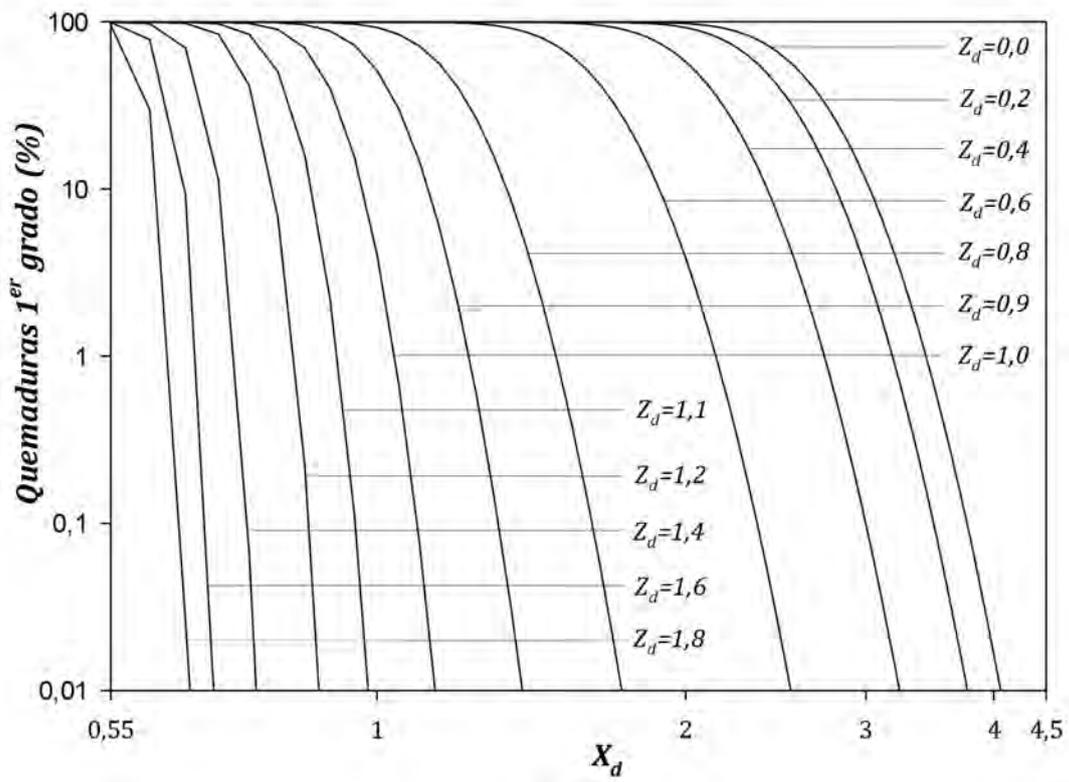


Figura C8. Porcentaje de vulnerabilidad a las quemaduras de primer grado para una bola de fuego a ras de suelo. M=50 Tn.

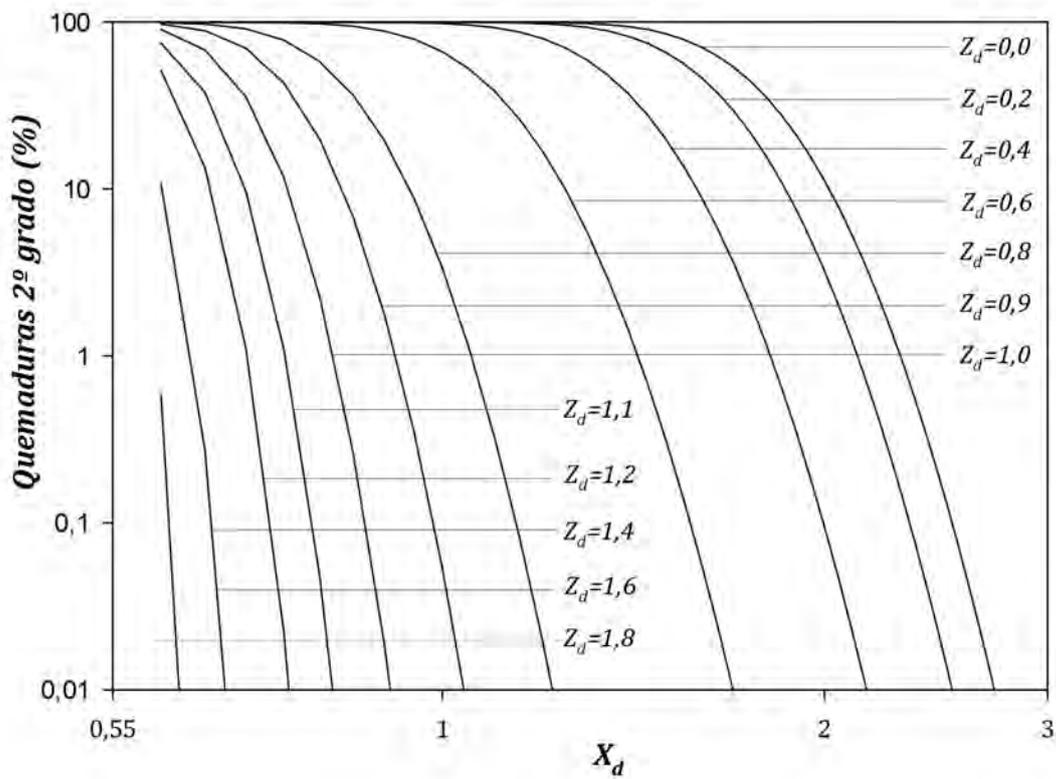


Figura C9. Porcentaje de vulnerabilidad a las quemaduras de segundo grado para una bola de fuego a ras de suelo. M=50 Tn.

C.2.2. Vagón cisterna. Bola elevada

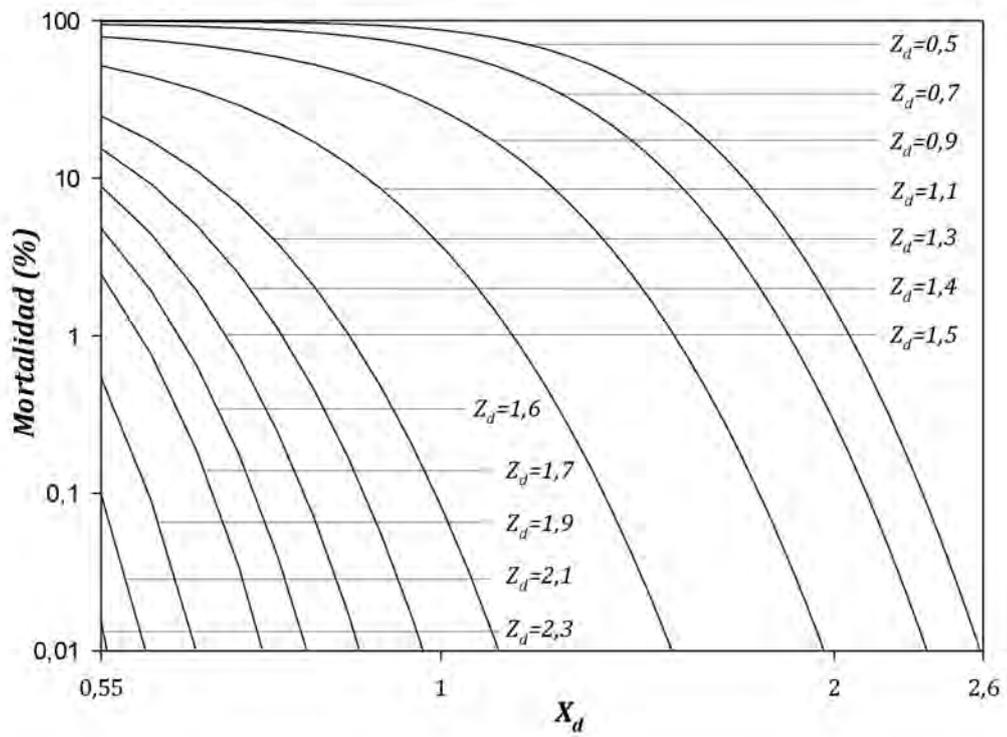


Figura C10. Curva de letalidad para una bola de fuego elevada. M=50 Tn.

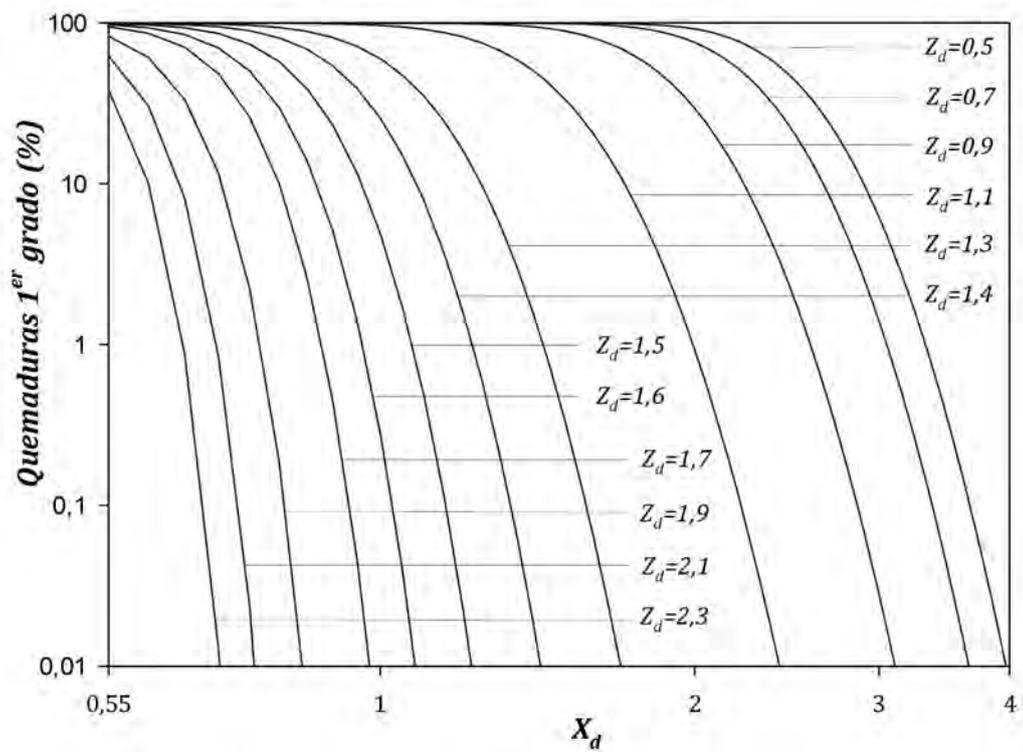


Figura C11. Porcentaje de vulnerabilidad a las quemaduras de primer grado para una bola de fuego elevada. M=50 Tn.

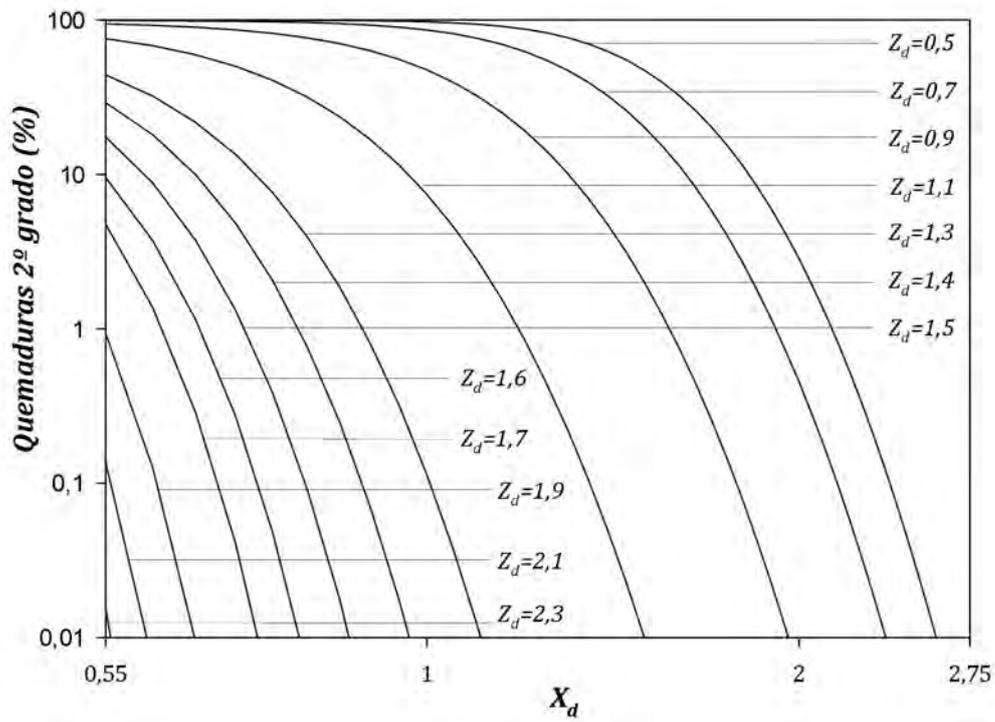


Figura C12. Porcentaje de vulnerabilidad a las quemaduras de segundo grado para una bola de fuego elevada. M=50 Tn.

C.3.1. Depósito de almacenamiento horizontal. Bola a ras de suelo

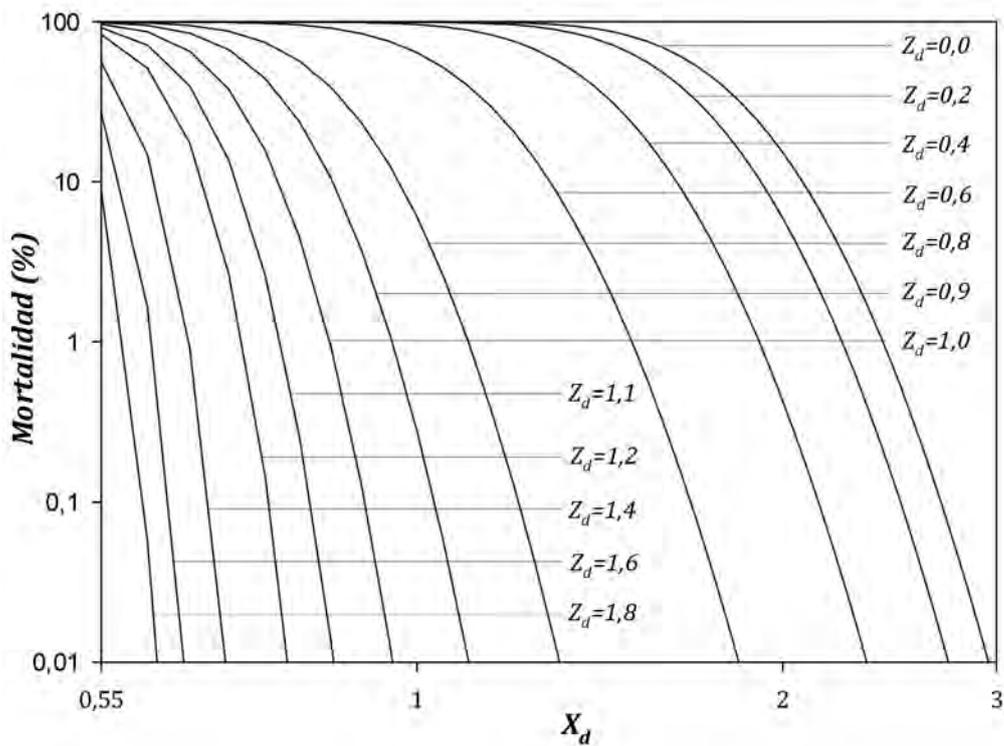


Figura C13. Curva de letalidad para una bola de fuego a ras de suelo. M=100 Tn.

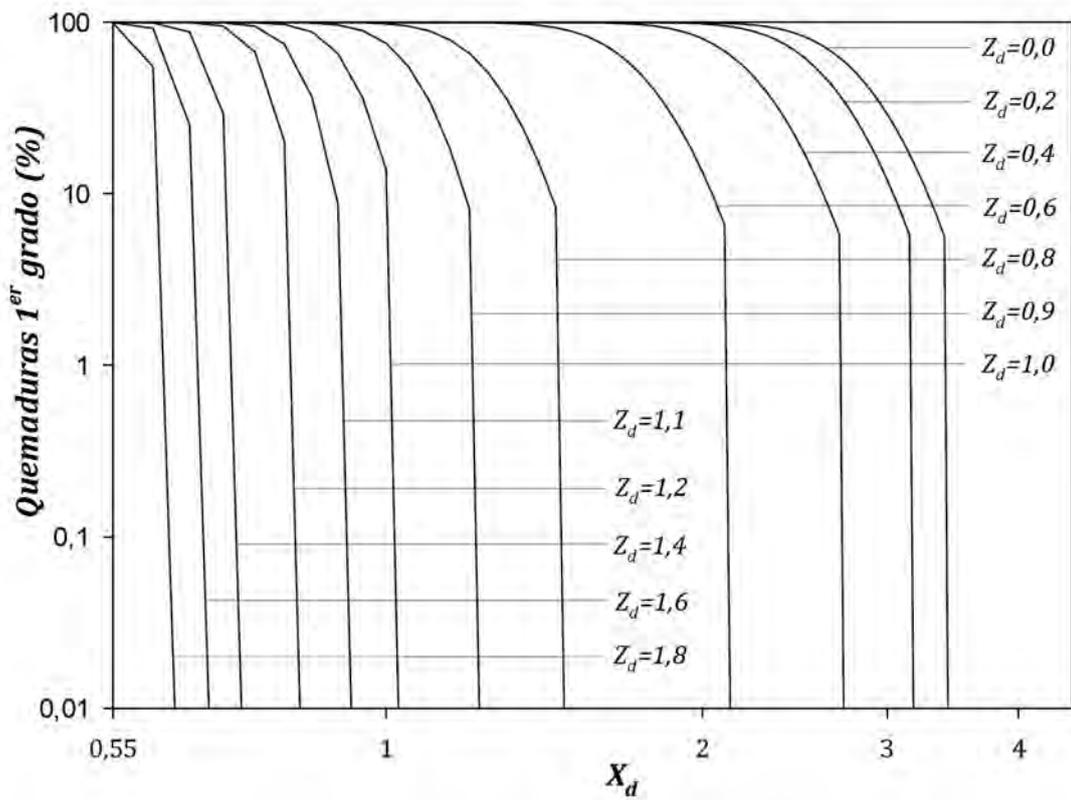


Figura C14. Porcentaje de vulnerabilidad a las quemaduras de primer grado para una bola de fuego a ras de suelo. $M=100$ Tn.

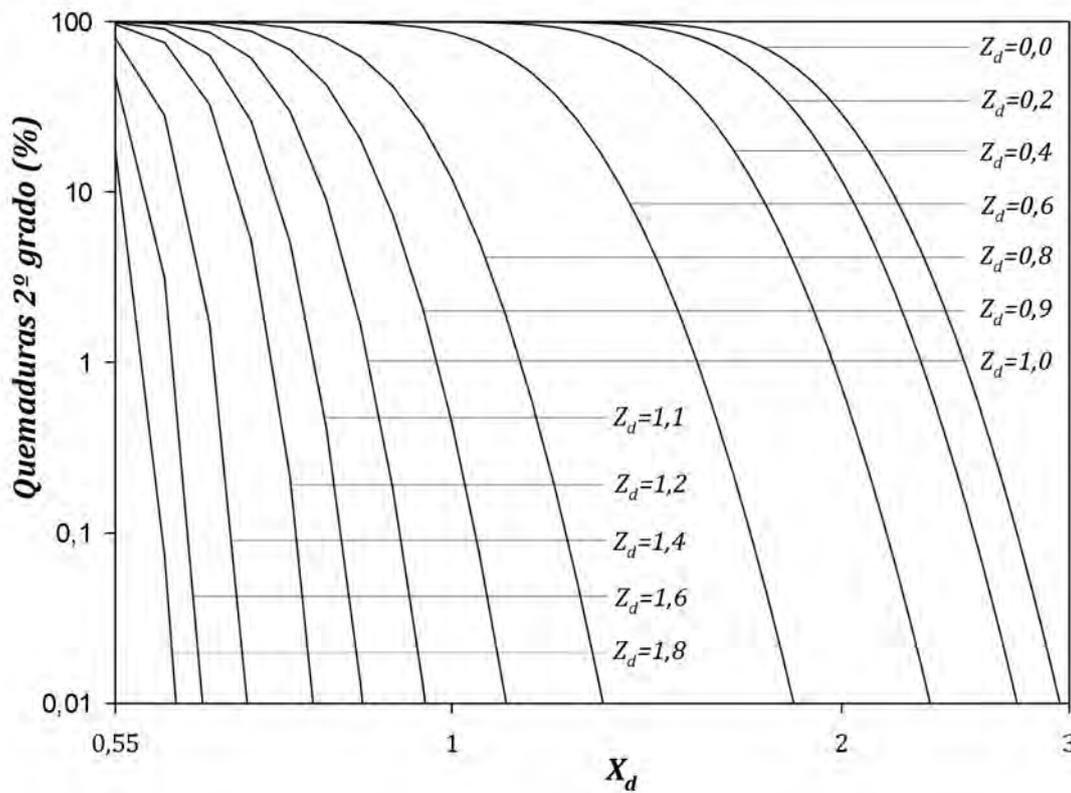


Figura C15. Porcentaje de vulnerabilidad a las quemaduras de segundo grado para una bola de fuego a ras de suelo. $M=100$ Tn.

C.3.2. Depósito de almacenamiento horizontal. Bola elevada

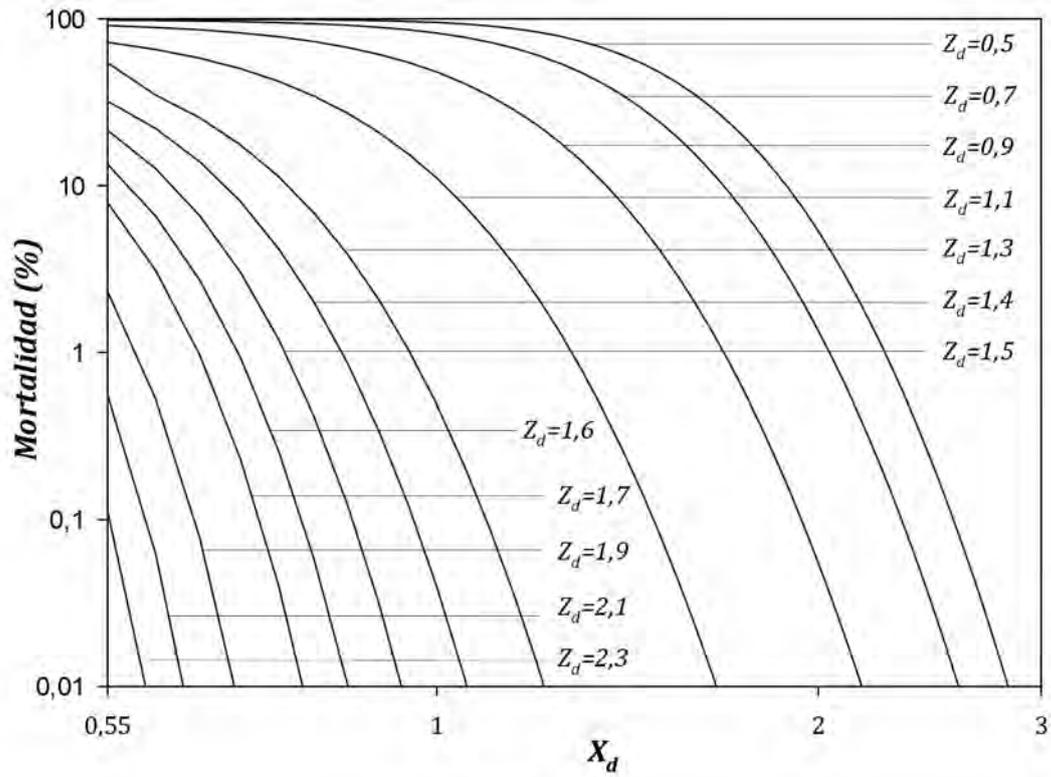


Figura C16. Curva de letalidad para una bola de fuego elevada. M=100 Tn.

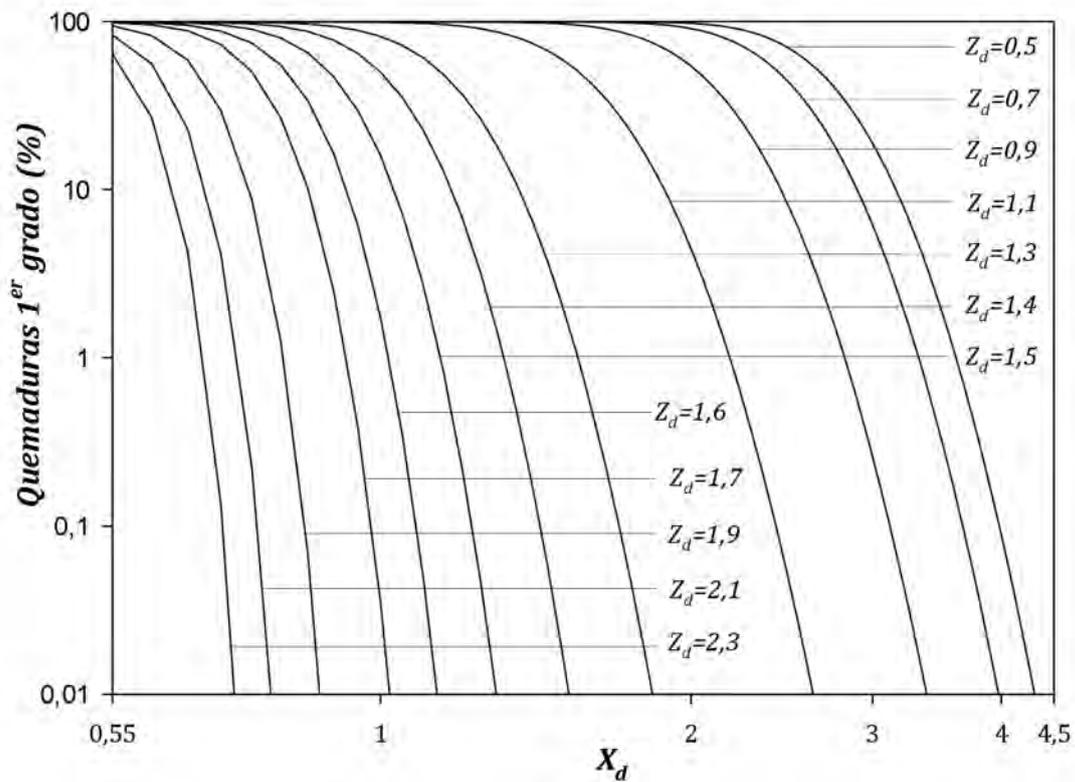


Figura C17. Porcentaje de vulnerabilidad a las quemaduras de primer grado para una bola de fuego elevada. M=100 Tn.

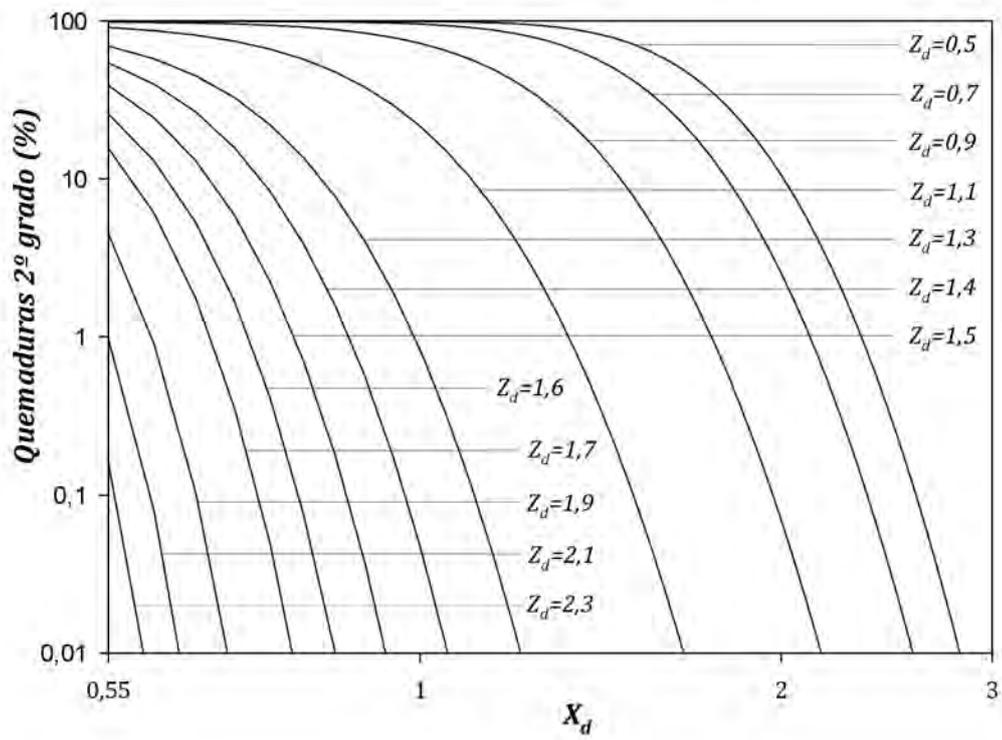


Figura C18. Porcentaje de vulnerabilidad a las quemaduras de segundo grado para una bola de fuego elevada. M=100 Tn.

C.4.1. Esfera de almacenamiento. Bola a ras de suelo

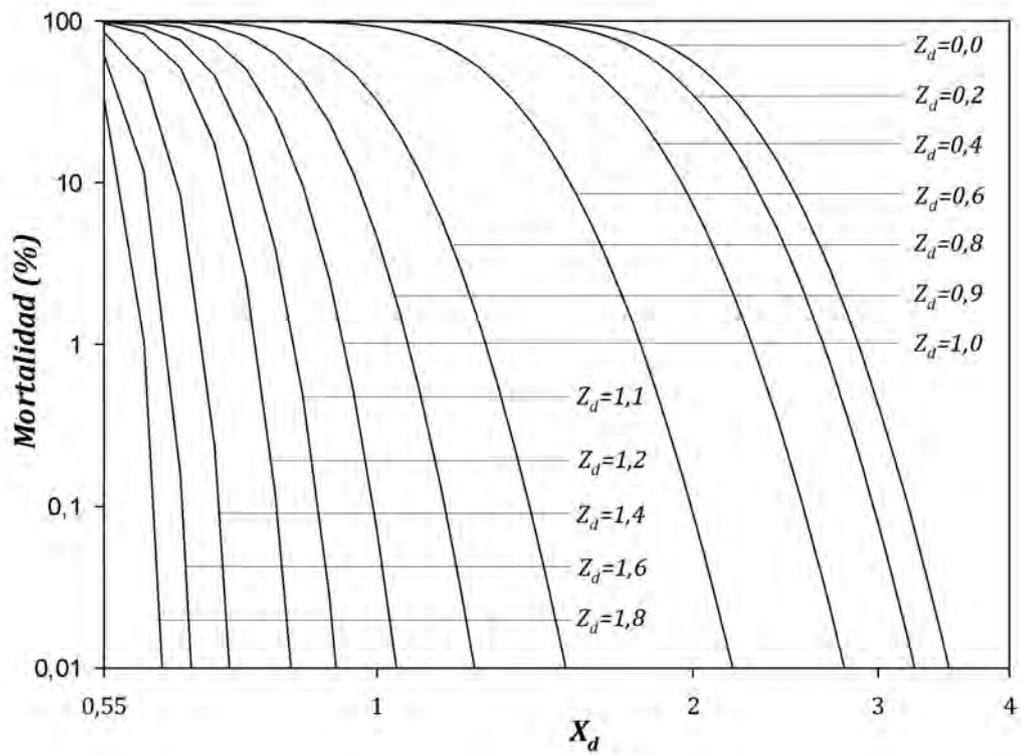


Figura C19. Curva de letalidad para una bola de fuego a ras de suelo. M=450 Tn.

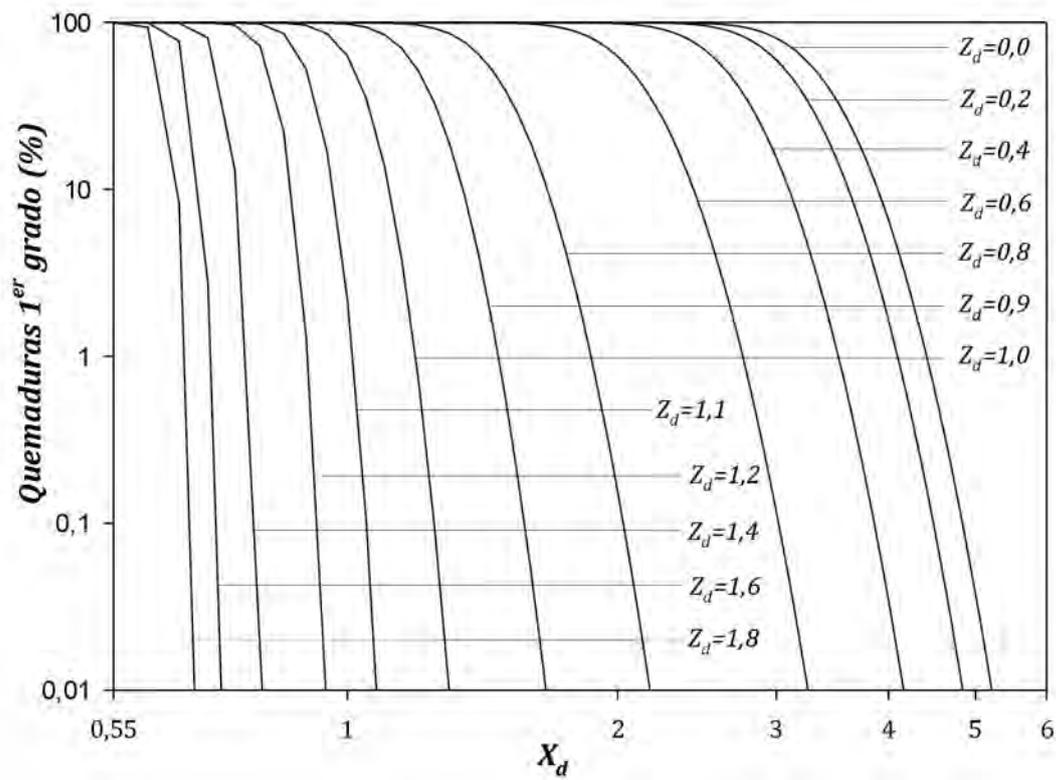


Figura C20. Porcentaje de vulnerabilidad a las quemaduras de primer grado para una bola de fuego a ras de suelo. M=450 Tn.

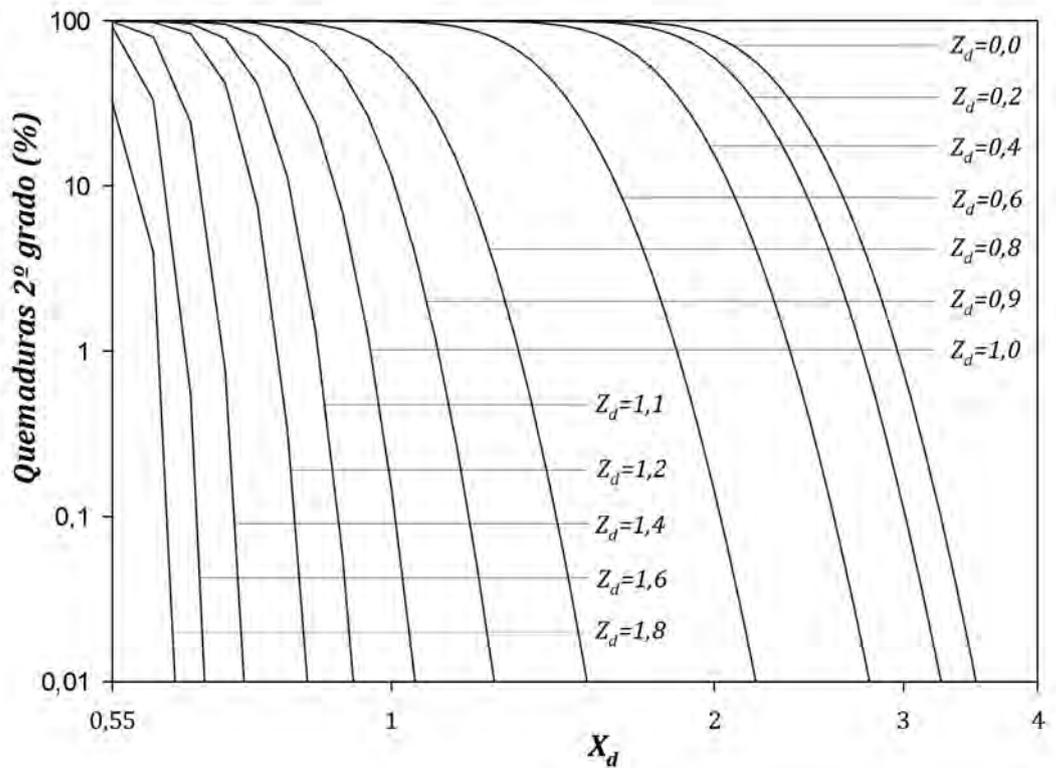


Figura C21. Porcentaje de vulnerabilidad a las quemaduras de segundo grado para una bola de fuego a ras de suelo. M=450 Tn.

C.4.2. Esfera de almacenamiento. Bola elevada

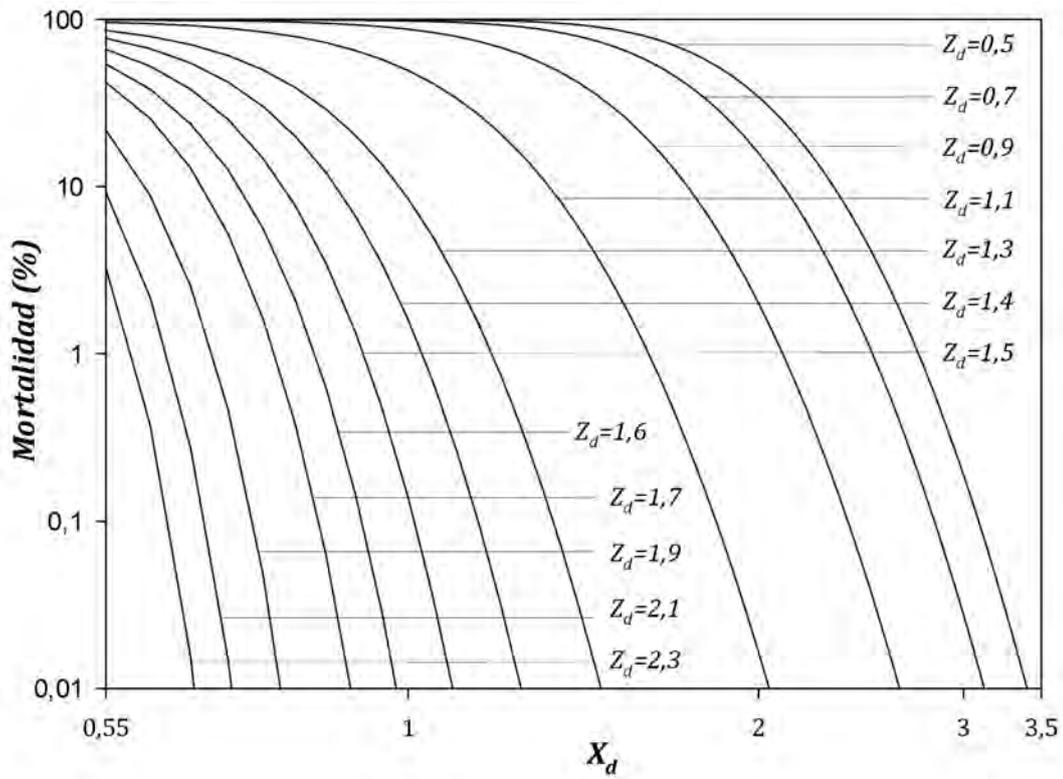


Figura C22. Curva de letalidad para una bola de fuego elevada. M=450 Tn.

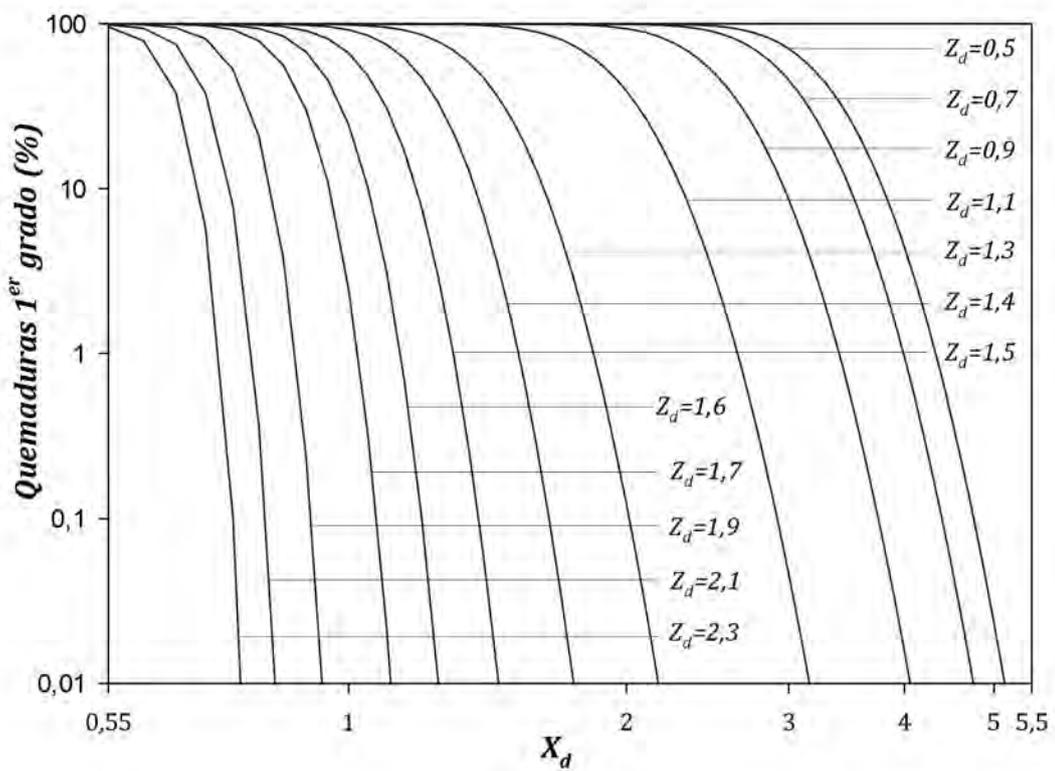


Figura C23. Porcentaje de vulnerabilidad a las quemaduras de primer grado para una bola de fuego elevada. M=450 Tn.

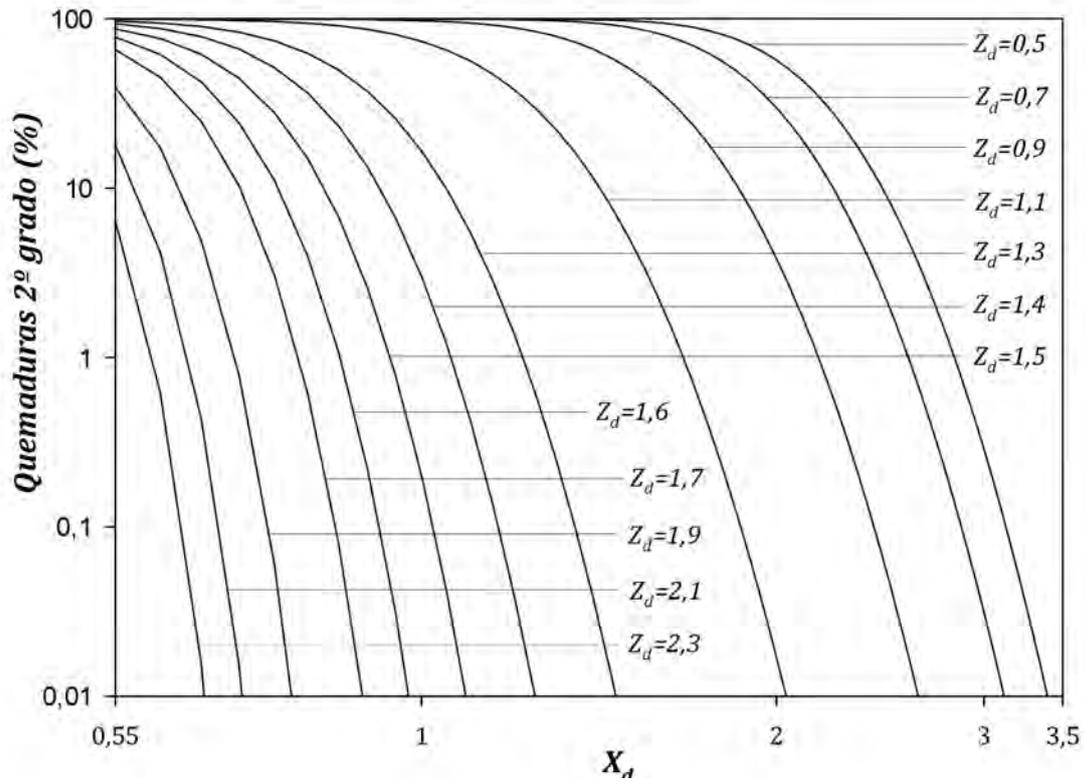


Figura C24. Porcentaje de vulnerabilidad a las quemaduras de segundo grado para una bola de fuego elevada. $M=450$ Tn.

La formación de una bola de fuego, aislada o como parte de una BLEVE, se caracteriza por la emisión de una intensa radiación térmica, capaz de causar daños letales e irreversibles a personas situadas a una distancia significativa. A pesar de que el conocimiento acerca de este fenómeno ha mejorado de forma sustancial, se siguen produciendo accidentes, por lo que es necesario desarrollar propuestas encaminadas a reducir los efectos de sus consecuencias. Ante esta situación emergen cuestiones tales como: ¿Qué medidas podemos adoptar para reducir la radiación térmica procedente de una bola de fuego sobre un vulnerable? ¿Consideran los modelos actuales el efecto de apantallamiento ejercido por bienes de equipo, orografía e infraestructuras?

Con el objetivo de resolver dichas interrogantes, esta tesis doctoral propone una metodología para la determinación de nuevos factores de configuración de bolas de fuego considerando el efecto sombra ejercido por una barrera. La obtención de dichos factores posibilita el modelado de bolas de fuego ante escenarios habituales en análisis del riesgo, obteniendo soluciones para casos extremos, desarrollando curvas de vulnerabilidad, formulando un nuevo modelo dinámico y efectuando propuestas para el diseño de barreras físicas.

**Centro de Estudios del Riesgo Tecnológico
(CERTEC)**



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH**

