



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Grado en Ingeniería de la Energía

**ECONOMÍA ENERGÉTICA CIRCULAR EN EL SECTOR
AGROALIMENTARIO Y LA TRANSICIÓN TECNOLÓGICA
HACIA LA DESCARBONIZACIÓN**



Memoria y presupuesto

Autor: Alex Gil Martí
Director: Francesc Estrany Coda
Convocatòria: 06/2019

Resum

El sector agroalimentari ha de preparar-se per afrontar grans reptes en relació amb l'ús eficient de recursos renovables i/o no renovables. Les estratègies basades en el concepte de "Economia Circular" aporten solucions de gran interès.

En aquest projecte s'estudia detingudament la situació de la indústria alimentària amb l'objectiu de trobar solucions a l'ús eficient dels recursos i aconseguir una transició viable (econòmica i ambientalment) cap a la descarbonització. Dit d'una altra manera, es vol dotar de valor a productes, materials i recursos per a mantenir-los econòmicament productius i ambientalment sostenibles durant el major temps possible reduint al màxim la quantitat de residus que generalment s'han de destinar per temps indefinit en dipòsits controlats.

Aquest nou projecte aposta per aprofitar els residus agroalimentaris per a la producció d'energia renovable en instal·lacions a petita escala per millorar l'autoconsum energètic i afavorir un important estalvi econòmic en la producció i gestió de residus i d'energia.

Resumen

El sector agroalimentario debe prepararse para afrontar grandes retos en relación con el uso eficiente de recursos renovables y/o no renovables. Las estrategias basadas en el concepto de “Economía Circular” aportan soluciones de gran interés.

En este proyecto se estudia detenidamente la situación de la industria alimentaria con el objetivo de hallar soluciones al uso eficiente de los recursos y encontrar una transición viable (económica y ambientalmente) hacia la descarbonización. Dicho de otra manera, se quiere dotar de valor a productos, materiales y recursos para mantenerlos económicamente productivos y ambientalmente sostenibles durante el mayor tiempo posible reduciendo al máximo la cantidad de residuos que generalmente se confinarán por tiempo indefinido en depósitos controlados.

Este nuevo proyecto apuesta por aprovechar los residuos agroalimentarios para la producción de energía renovable en instalaciones a pequeña escala para mejorar el autoconsumo energético y favorecer un importante ahorro económico en la producción y gestión de residuos y de energía.

Abstract

The agri-food sector needs to be prepared to confront big challenges in respect to renewable and/or non-renewable resources. Strategies founded under the concept of “Circular Economy” present an interesting approach.

This project studies in depth the food industry with the objective of finding solutions regarding the efficient use of resources and find a viable transition (both economically and environmentally) towards decarbonization. In other words, we must assign value to products, materials, and resources in order to maintain them economically productive, reducing at the best of our abilities the amount of waste that generally ends up being confined for an indefinite amount of time in storage deposits.

This new project calls for taking advantage of agri-food waste for the production of renewable energy in small-scale facilities to promote the self-consumption of energy and facilitate significant economic savings in the production and management of waste and energy.

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi familia y amigos que me han apoyado y aconsejado sobre todas las decisiones tomadas durante la realización del proyecto.

Por otro lado, apreciar el esfuerzo y el soporte recibido por parte del director del proyecto, Francesc Estrany. He tenido la suerte de poder disponer de sus conocimientos y aportaciones en todo momento.

A Vicente Jiménez, por ayudarme a encontrar la idea de este trabajo, por aclararme y solucionar todas las cuestiones planteadas y por orientarme para no perder el hilo y el objetivo principal.

Me gustaría agradecer a Salvador Salat, promotor de proyectos de uso energético por toda la ayuda recibida en cualquier duda que se me ha podido plantear.

Por último, agradecer a Silvano Stringa, ingeniero especializado en instalaciones de biomasa y transferencia de calor por aportarme todo el conocimiento técnico necesario para poder realizar el dimensionamiento del proyecto.

Glosario

UE-28	<i>28 païses de la Unió Europea</i>
VAB	<i>Valor Agregado Bruto</i>
PIB	<i>Producto Interior Bruto</i>
IDAE	<i>Instituto para Diversificación y Ahorro de Energía</i>
INE	<i>Instituto Nacional de Estadística</i>
GEI	<i>Gases de Efecto Invernadero</i>
PET	<i>Tereftalato de polietileno</i>
MTD	<i>Mejoras Técnicas Disponibles</i>
COT	<i>Carbono Orgánico Total</i>
CSS	<i>Combustible Sólido Secundario</i>
PCS	<i>Poder calorífico Superior</i>
PCI	<i>Poder Calorífico inferior</i>
Tn	<i>Toneladas</i>
EJ	<i>Exajoules</i>
ktep	<i>Miles de toneladas equivalentes de petróleo</i>
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i>
OPEX	<i>Operational Expenditure</i>
OCCC	<i>Oficina Catalana de Cambio Climático</i>

Índice

RESUM	I
RESUMEN	II
ABSTRACT	III
AGRADECIMIENTOS	IV
GLOSARIO	VI
1. INTRODUCCIÓN	11
1.1. Objetivos del trabajo.....	11
1.2. Alcance	12
2. MARCO CONCEPTUAL	13
2.1. Situación actual del sector agroalimentario en España y Europa.....	13
2.2. Procesos aplicados en la industria alimentaria	15
2.3. Consumo energético en el sector agroalimentario.....	18
2.4. Análisis de la situación energética en el sector agroalimentario.....	23
2.5. Generación y gestión de residuos del sector agroalimentario	26
3. ECONOMÍA CIRCULAR	29
3.1. De una economía lineal a una economía circular	29
3.2. Vías de gestión y valorización de residuos agroalimentarios	31
3.3. Marco legal.....	34
3.4. La incineración y/o coincineración como alternativa de valorización de los residuos del sector agroalimentario.....	37
3.4.1. Alternativas a la gestión de residuos alimentarios	37
4. APLICABILIDAD EN UNA EMPRESA DEL SECTOR	41
4.1. Actividad principal de la empresa.....	41
4.2. Requerimientos y objetivos	42
4.3. Información necesaria	45
4.3.1. Composición del combustible	45
4.3.2. Valor del residuo como combustible	48
4.4. Características generales	50
4.5. Normativa aplicable al proyecto.....	51

4.5.1.	Normativa Europea.....	51
4.5.2.	Normativa Española.....	54
4.6.	Descripción de la planta	55
5.	DIMENSIONAMIENTO DE LA PLANTA	57
5.1.	Almacenamiento.....	57
5.2.	Incineración	58
5.2.1.	Alimentador	58
5.2.2.	Módulo de combustión.....	62
5.2.3.	Chimenea de emergencia	70
5.3.	Recuperación energética.....	73
5.3.1.	Intercambiador de calor	73
5.4.	Tratamiento de gases	83
5.4.1.	Sistema de inyección de urea	84
5.4.2.	Ciclón de depuración	85
5.4.3.	Reactor de neutralización	87
5.4.4.	Filtro de mangas.....	89
5.4.5.	Ventilador de tiro	94
5.4.6.	Chimenea y conductos.....	95
5.4.7.	Sistema de control de emisiones.....	95
5.5.	Sistema eléctrico y de control de la planta	97
5.6.	Esquema general de la instalación	97
6.	CÁLCULOS	99
6.1.	Depósito de almacenamiento	99
6.2.	Cálculos iniciales	100
6.2.1.	Cálculo del poder calorífico inferior (PCI).....	100
6.2.2.	Datos requeridos.....	102
6.3.	Cálculos de la combustión	102
6.3.1.	Oxígeno requerido en la combustión	103
6.3.2.	Composición de los gases de combustión.....	109
6.4.	Cálculo de las emisiones.....	113
6.4.1.	Contaminantes.....	114
6.4.2.	Equiparación con los valores de la Directiva	116
6.4.3.	Reducción de gases ácidos.....	117
6.4.4.	Eliminación del óxido de nitrógeno	119
6.4.5.	Eliminación de dioxinas y furanos	121

6.5. Cálculos del intercambiador	121
6.6. Balance	127
7. ESTUDIO ECONÓMICO _____	129
7.1. Metodología.....	129
7.2. Análisis de la situación actual de la empresa	129
7.3. Inversión para una mejora energética y de gestión.....	134
7.4. Aplicación de la mejora energética	137
7.4.1. Rentabilidad.....	138
8. CONCLUSIONES _____	141
ANÁLISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL DEL PROYECTO _____	146
PRESUPUESTO DEL PROYECTO _____	147
BIBLIOGRAFIA _____	150

1. Introducción

El sector agroalimentario ejerce un papel cada vez más importante en la economía mundial y en el desarrollo de los países ya que es una de las fuentes más significativas de desarrollo.

Se entiende por “sector agroalimentario” aquel que se compone del sector primario, por un lado, se encuentra la ganadería, agricultura y pesca; y por otra parte, los procesos industriales, que engloba a toda aquella industria que se dedica a la transformación de materias primas en productos semielaborados o elaborados.

Según estudios recientes, la industria alimentaria es una de las más afectadas por las consecuencias del cambio climático a escala global, pero a su vez, es responsable de más del 25% de emisiones de CO₂. Este dato refleja la importancia del sector agroalimentario a nivel mundial.

Sin ningún tipo de duda, este sector juega un papel muy importante en el cumplimiento de la mayoría de los objetivos marcados para mejorar la sostenibilidad del medioambiente. Puede proponer soluciones vitales para el desarrollo de tecnologías más eficientes y para la gestión adecuada de los alimentos producidos.

1.1. Objetivos del trabajo

Este proyecto se basa en analizar y entender el sector agroalimentario y determinar cuál será su evolución en los próximos años. Visto que es una potencia mundial y un tema muy actual, se ha decidido buscar posibles soluciones a las flaquezas que puede presentar con tal de aportar mejoras tecnológicas y ambientales.

La idea es realizar una propuesta de proyecto en la que las empresas del sector agroalimentario puedan producir gran parte de la energía consumida, aportar valor positivo al medioambiente y obtener una rentabilidad económica que les permita ser lo máximo competitivas posible durante muchos años.

1.2. Alcance

Con esta propuesta de proyecto se quiere conseguir que las empresas del sector alimentario se planteen realmente la posibilidad de realizar ciertos cambios que favorezcan al desarrollo sostenible.

CAPÍTULO I: MARCO CONCEPTUAL

En este primer capítulo se presentará i analizará con detalle la situación del sector agroalimentario y de qué manera está evolucionando, con el objetivo de determinar en qué puntos del sector la situación se está volviendo irreversible.

Se considerará la economía circular como una de las posibles soluciones a los problemas y complicaciones que se pueden encontrar en la industria alimentaria. Se pretende aplicar este sistema para mejorar y prevenir todas aquellas flaquezas expuestas.

CAPÍTULO II: PROPUESTA DE PROYECTO PARA UNA EMPRESA DEL SECTOR

A partir de las conclusiones obtenidas en el capítulo anterior se pretende realizar una propuesta de proyecto a una empresa del sector agroalimentario. El objetivo es determinar la viabilidad del sistema y si realmente la opción propuesta puede ser una solución a los problemas.

Para ello se estudiará el funcionamiento de la empresa, el consumo que tiene, las horas de funcionamiento y cuáles son los objetivos que deben cumplirse. Una vez obtenidos estos datos se realizará un dimensionamiento técnico de todos los equipos necesarios y se calcularán las condiciones de operación.

CAPÍTULO III: VIABILIDAD ECONÓMICA

Por último, se determinará la inversión que debe realizar la empresa para la tecnología y el sistema propuesto con el objetivo de determinar su viabilidad y el periodo de retorno. Viendo esto se podrá ver si económicamente la propuesta realizada es factible.

2. Marco conceptual

2.1. Situación actual del sector agroalimentario en España y Europa

Hoy en día, el sector agroalimentario representa uno de los pilares fundamentales de la economía mundial con mayor impacto ambiental, siendo una de las actividades que da respuesta a una necesidad primordial del ser humano: el acceso a la alimentación.

Según algunas estadísticas realizadas por la Unión Europea, se prevé que la producción mundial de alimentos se duplique de aquí a 2050. Este hecho, se deberá principalmente a un elevado crecimiento de la población y, en cierta manera, por la evolución de los hábitos alimentarios.

En España, el sector de la industria agroalimentaria representa la principal actividad manufacturera. Aunque siempre ha sido una de las principales industrias del país, tuvo una época en la que perdió cierta relevancia. Esto sucedió a principios de siglo, cuando los sectores de la agricultura y la pesca perdieron peso. En cambio, el aumento de la industria de la alimentación y bebidas ha hecho que la industria alimentaria siga siendo una potencia con mucho peso España. Con esta variación en la evolución, en 2017 el peso del sector alimentario recuperó su buen posicionamiento a nivel nacional sin llegar nunca a su nivel óptimo. Aun así, en comparación con los 28 países de la unión europea (UE-28), la aportación del sector agroalimentario siempre ha sido mayor en España, alcanzando el año 2017 la máxima diferencia.

En la gráfica siguiente se muestra la evolución del valor agregado bruto (VAB) real que corresponde a una magnitud macroeconómica que mide el valor total creado por un sector, en este caso tanto en España como en la UE-28. Se puede observar como en los años de crisis, a partir de 2008-2009 el VAB en España sufrió una bajada muy considerable debido a la disminución de las cantidades vendidas por parte del sector. En el año 2014, se contempla una recuperación relativamente intensa y constante, de manera que en el año 2017 el VAB total supera el máximo nivel alcanzado en el año 2007.

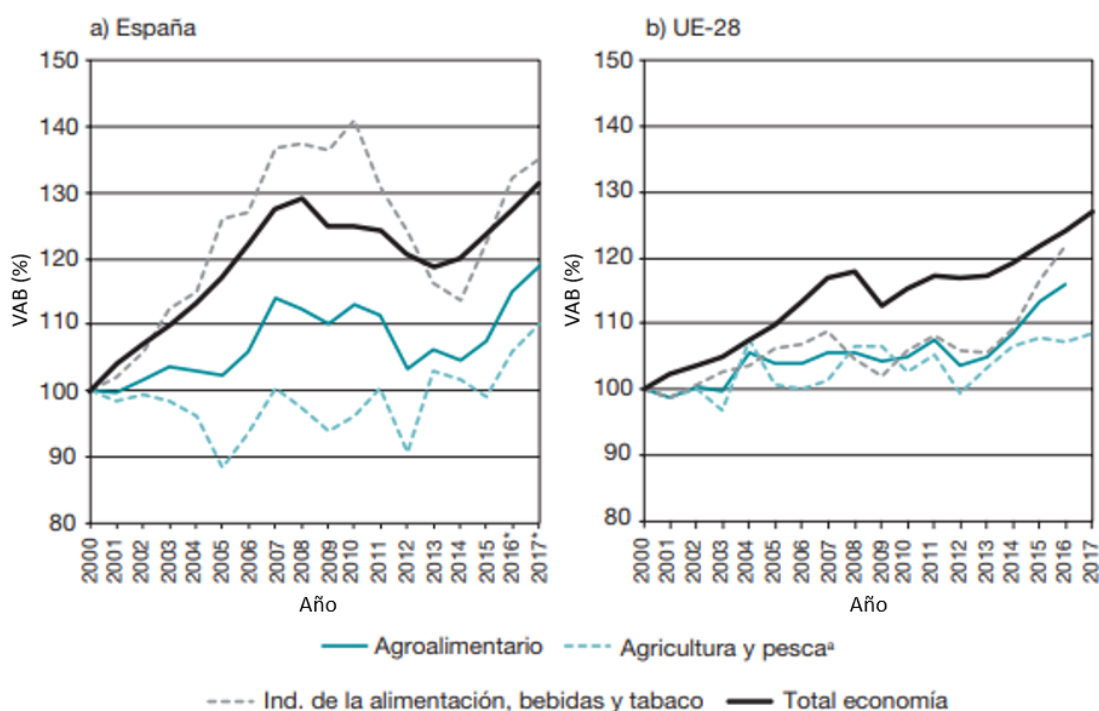


Gráfico 2.1.1. Evolución del VAB real en España y UE-28 desde el año 2000 hasta el año 2017

Fuente: Observatorio sobre el sector agroalimentario español en el contexto europeo – Informe 2017.

Focalizando el análisis en los años más recientes se puede ver un crecimiento bastante agudo por parte de los dos sectores, tanto la industria de alimentación y bebidas como la agricultura y pesca. Aunque la industria de alimentación tiene un crecimiento un poco mayor, no ha alcanzado el valor máximo de los años previos a la crisis cosa que sí que ha hecho el sector agrario.

En comparación con la Unión Europea, previo a los años de crisis, el crecimiento y la expansión en España fueron más intensos. Si bien el impacto de la crisis fue más fuerte en España que en el global de países de la UE-28, el sector agroalimentario se ha recuperado con más rapidez, principalmente en la industria de la alimentación y bebidas. Esto explica la semejanza en la evolución del total de la economía entre España y la UE-28.

Por otro lado, si se hace una comparación directa dentro del sector agroalimentario, se puede contemplar desde un punto de vista porcentual que tanto en España como en la UE-28 ha ido implantándose el sector industrial por encima del sector agrario. En el año 2000, en España el sector de agricultura y pesca aportaba el 62,8% del total del sector agroalimentario. En el año 2017, el sector industrial de la alimentación, bebidas y tabaco ha cogido más importancia y ha aumentado su presencia equilibrando la balanza. Esto ha conllevado a que, el sector agricultura y pesca haya perdido aproximadamente un 15% de presencia descendiendo a un 48,9% del total. En cambio, el sector industrial ha aumentado hasta un 51,1% en comparación con el 37,2% que aportaba en el año 2000.

A continuación, se presenta el Gráfico 2.1.2 que corrobora lo comentado en el párrafo anterior.

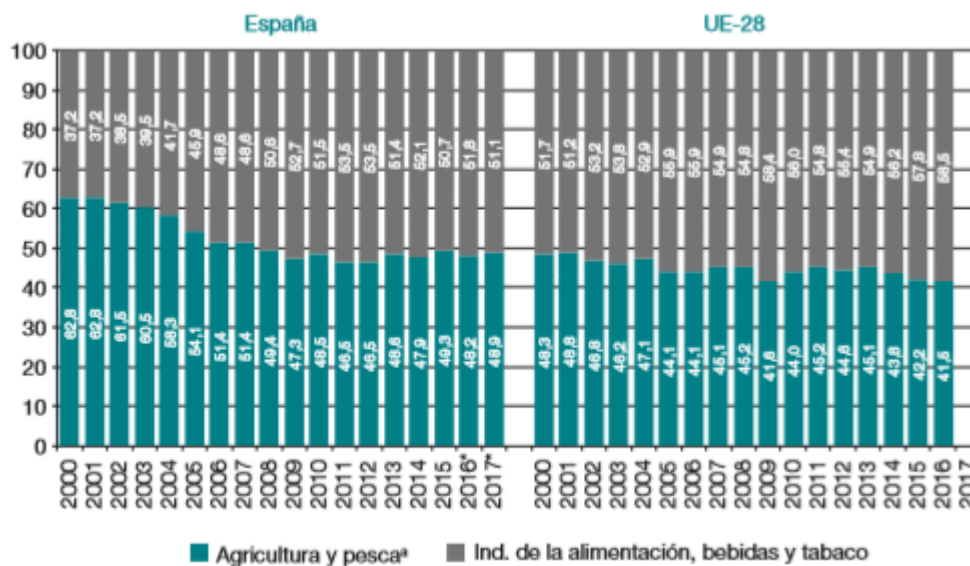


Gráfico 2.1.2. Disposición del sector agroalimentario en porcentaje desde el año 2000 hasta el año 2017

Fuente: Observatorio sobre el sector agroalimentario español en el contexto europeo – Informe 2017.

En comparación con otros países como Hungría o Finlandia con un sector agroalimentario basado principalmente en la agricultura y pesca, o bien, Bélgica e Irlanda que se sitúan en el otro extremo con un sector agroalimentario prácticamente compuesto por industria, España es uno de los países con más equilibrio entre los dos sectores.

Es importante tener en cuenta esta evolución para los próximos años. Mediante los gráficos presentados se puede observar la creciente implantación del sector industrial de la alimentación por encima del sector de la agricultura y pesca. A continuación, se analizarán los diferentes procesos de elaboración que engloba el sector industrial y como puede afectar la evolución de éste de manera global a corto y largo plazo.

2.2. Procesos aplicados en la industria alimentaria

Siendo el sector alimentario un sector muy amplio, para poder ofrecer al consumidor el producto deseado, previamente se han tenido que realizar diferentes tratamientos y elaboraciones. Si bien todo el mundo puede suponer que existe una variedad incontable de procesos de fabricación desde que se obtiene la materia prima hasta que es consumida, estos pueden ser clasificados principalmente en seis bloques diferentes.

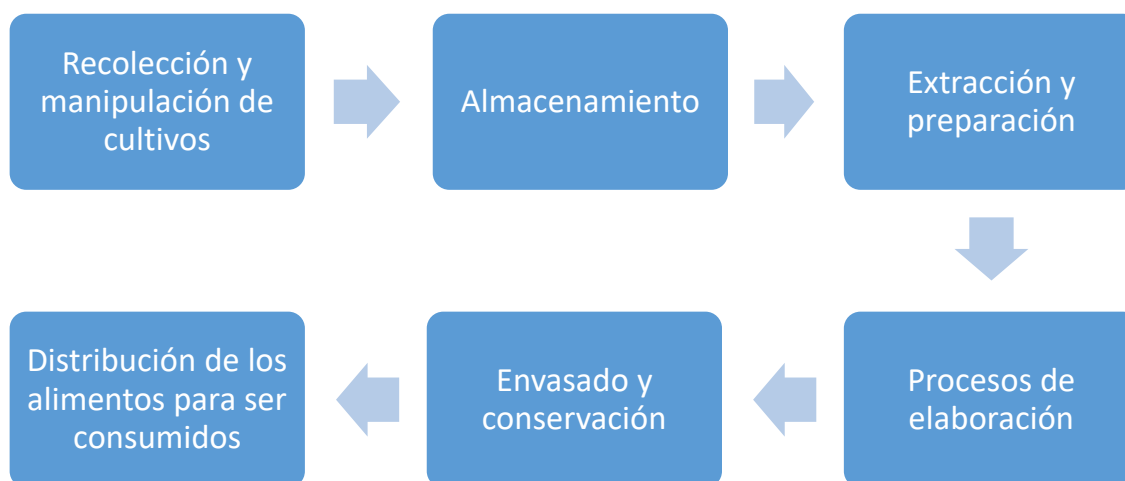


Gráfico 2.2.1. Clasificación de los procesos de fabricación

Fuente: Elaboración propia.

En primer lugar, respecto a la recolección y manipulación de los cultivos se puede destacar que, cada vez más, la participación humana en estos procesos va disminuyendo ya que la mayoría de las labores se están automatizando con máquinas especializadas.

En segundo lugar, se requiere el almacenamiento de los alimentos recolectados. Este proceso se realiza para reducir la estacionalidad de ciertos alimentos. Para ello se utilizan depósitos o almacenes acondicionados específicamente para el producto como podrían ser cámaras frigoríficas, depósitos herméticos o bien silos al aire libre.

A continuación, en función de las cualidades del alimento se tiene que realizar algún tipo de proceso de extracción y preparación. Algunos ejemplos más destacados son los huesos de los animales, las pepitas, la piel o la pulpa de las frutas o los cereales para el pan. Los procesos para realizar este tipo de labores son principalmente industriales.

Posteriormente se encuentran los procesos de elaboración. Estos consisten principalmente en transformar un alimento que en la mayoría de los casos es crudo en un producto comestible, como norma general para que tenga las cualidades requeridas para ser ingerido. Entre algunos ejemplos de procesos se encuentra la cocción, el secado que se utiliza para alimentos como el pescado y la carne para ser conservados posteriormente o la fermentación que se realiza principalmente en bebidas como el vino o la cerveza.

Seguido de la elaboración, la mayoría de los alimentos deben ser conservados. En algunos alimentos, es una de las fases más importantes para obtener el producto deseado. Para ello se tiene la posibilidad de utilizar el método de la pasteurización, la esterilización o algún proceso químico.

Una vez se ha obtenido el producto final debe ser envasado en sus cantidades pertinentes. Este proceso se realiza para que algunos alimentos estén protegidos de la luz, humedad y otros contaminantes ambientales. Otra peculiaridad del envasado es que puede ser utilizado para alargar la fecha de caducidad de los alimentos como puede ser el envasado al vacío.

Finalmente, la última etapa del proceso es la distribución de los alimentos a los supermercados, almacenes reguladores, distribuidores y puntos de venta para ser vendidos al consumidor. Es muy importante que los alimentos no se dañen durante el traslado y sean conservados en un ambiente óptimo para que no se pierdan ningún tipo de propiedades.

Es muy significativo que entre cada proceso se implemente un sistema de gestión que permita controlar la temperatura de cada alimento en tiempo real. A este proceso se lo llama trazabilidad de la cadena de frío. De esta manera la industria puede garantizar consistentemente tanto la calidad como la seguridad de los alimentos.

A continuación, se presenta una tabla que recoge los procesos de elaboración más importantes y destacados de la industria alimentaria.

Tabla 2.2.1. Procesos de elaboración en la industria alimentaria

SEPARACIONES MECÁNICAS	EXTRACCIÓN Y PRENSADO	TRATAMIENTO DE CONSERVACIÓN
<ul style="list-style-type: none"> ❖ Fraccionamiento de sólidos ❖ Tamizado ❖ Triturado ❖ Selección ❖ Sedimentación ❖ Decantación ❖ Centrifugado ❖ Filtrado ❖ Molienda ❖ Machacado 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Destilación ❖ Evaporación ❖ Cristalización ❖ Secado ❖ Cocción ❖ Fermentación 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Pasteurización ❖ Esterilización ❖ Refrigeración ❖ Congelación ❖ Deshidratación ❖ Radiación ❖ Mezclado

Fuente: Elaboración propia.

2.3. Consumo energético en el sector agroalimentario

Una vez determinado el gran potencial que significa la industria alimentaria en España y los principales procesos que se utilizan, algo que no debe pasarse por alto es el nexo realmente importante que hay entre el sector agroalimentario y la energía.

La cadena alimentaria requiere cantidades significativas de energía, estas pueden fluctuar en función de los mecanismos y procesos implementados. El sector alimentario consume aproximadamente el 30% de la energía consumida mundialmente y gran parte de esta energía es generada mediante combustibles fósiles. Por parte del sector de la agricultura y la pesca, los procesos implementados para la recolección y manipulación de materias primas presentan un gran consumo de productos petrolíferos. En cambio, el consumo en el sector industrial de la alimentación está centrado en los procesos de tratamiento y elaboración de productos finales con un consumo más centrado en la electricidad y el gas natural.

A continuación, se presenta un gráfico en el que se puede ver la repartición en porcentajes del consumo energético en el sector alimentario. En primer lugar, se puede distinguir el consumo por parte de la producción de cultivos siendo aproximadamente el 12% del consumo total de energía. Por otro lado, el procesamiento y la distribución juntamente con la preparación y la cocción de alimentos representan casi el 80% del consumo energético de la cadena alimentaria. Otro aspecto para tener en

cuenta es que, los países con un PIB más alto utilizan la mayor parte de esta energía para el procesamiento, transporte y distribución de alimentos. En cambio, en los países con un PIB más bajo, la cocción y la preparación de los alimentos es el principal consumidor de energía. Aunque la distribución energética sea diferente entre los países con un PIB más alto o más bajo, el consumo energético anual es aproximadamente el mismo, con una diferencia de 5 EJ/año.

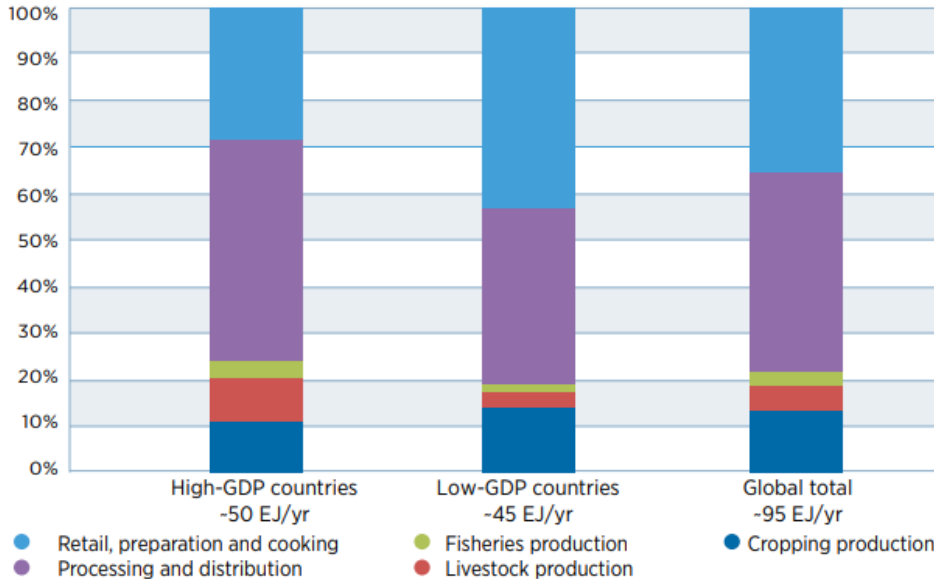


Gráfico 2.3.1. Consumo directo e indirecto de energía en diferentes etapas del sector alimentario

NOTA: GDP (Gross Domestic Product) en inglés es el equivalente al PIB (Producto Interior Bruto) en español.

Fuente: IRENA.

Una vez se ha analizado la distribución de la energía dentro del sector alimentario, es conveniente determinar en qué posición se encuentra la industria alimentaria respecto al resto de industrias en España. Para ello se ha realizado el Gráfico 2.3.2. mediante una serie de informes y estadísticas presentados por el por el IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía).

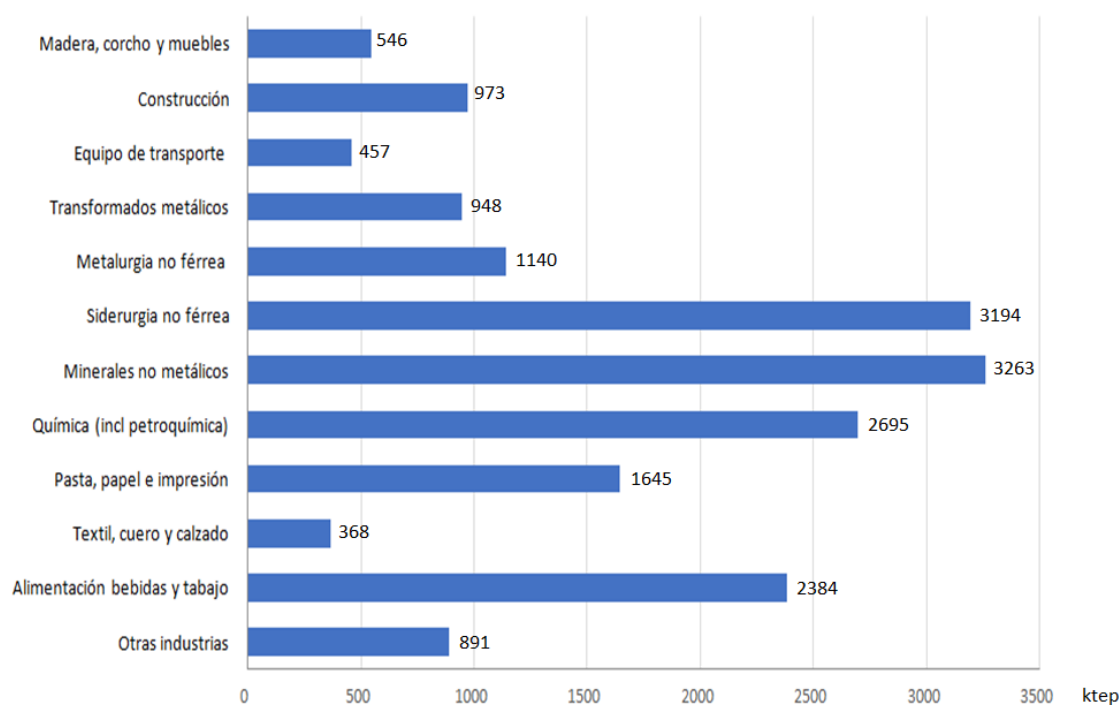


Gráfico 2.3.2. Balance del consumo de energía final en la industria el año 2016

Fuente: IDAE.

Siendo del año 2016 los datos más recientes a los cuales se ha podido tener acceso, se puede observar que, efectivamente, la industria alimentaria es una de las que consume más energía. En el Gráfico 2.3.2 se puede ver como el consumo energético anual es de 2384 ktep (toneladas equivalentes a petróleo) posicionándose como la cuarta industria más consumidora por detrás de la industria de minerales metálicos, seguida de la siderurgia no férrea y de la industria química. El conjunto de estas representa poco más del 60% del total de energía consumida.

Con estos gráficos, se puede ver una vez más como la cadena alimentaria, haciendo enfoque en los procesos industriales, tiene una demanda de energía muy significativa. A medida que el reclamo mundial de alimentos crezca, la demanda energética irá de la mano. El aumento de consumo de calorías por persona, el gran cambio que se está generando en las dietas y el aumento de la mecanización en toda la cadena de suministro alimentario hace que la situación energética en el sector se esté volviendo insostenible.

Por otro lado, no se puede perder de vista la energía que se desperdicia con la gran cantidad de alimentos que anualmente terminan siendo desechados, aproximadamente un tercio de todos los alimentos producidos se pierden o desperdician. Lo que genera un desperdicio de 1,5% del uso total de la energía utilizada. A continuación, se presentan algunas soluciones y cambios que debería asumir el sector alimentario.

Uno de los principales retos que la industria alimentaria plantea es la mejora de la eficiencia de los procesos y por lo tanto un primer paso para la mitigación del cambio climático. En España se tiene como objetivo ser uno de los principales referentes respecto a la reducción y compensación de las emisiones de gases de efecto invernadero y para ello es importante que toda la cadena alimentaria, empezando por las empresas recolectoras de materia primera hasta los proveedores encargados de transportar y distribuir el producto final, encuentre soluciones al respecto.

Todavía cabe señalar que, para avanzar en la sostenibilidad de los alimentos, el sector debería realizar un cambio importante respecto a los combustibles consumidos. Hay que tener en cuenta que los sistemas que producen el suministro de alimentos de todo el mundo dependen principalmente de combustibles fósiles. Las principales fuentes energéticas utilizadas por la mayoría de las grandes empresas industriales son la electricidad con más de un 50% del total, le sigue el gas natural con casi un 30% y los productos petrolíferos con poco más del 10%.

Si se hace un enfoque más directo en las energías consumidas por la industria de Alimentación y bebidas se puede observar que existe una gran dependencia de productos petrolíferos y de gas natural y con mucho menor peso el carbón y sus derivados. Mediante información proporcionada por el Instituto Nacional de Estadística (INE) se puede obtener el gráfico siguiente.

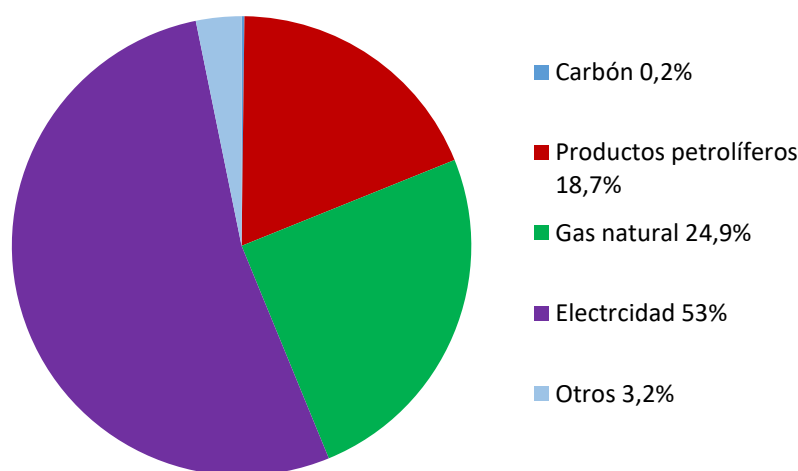


Gráfico 2.3.3. Distribución porcentual de las fuentes de energía en la industria de Alimentación, bebidas y tabaco en España

Fuente: INE.

Para hacer una relación directa entre los procesos industriales mencionados en el apartado anterior con el elevado consumo energético que se presenta en el sector alimentario se ha realizado un esquema representativo de la cadena de procesos de un matadero de porcinos. Se analizarán las diferentes etapas dentro de la cadena de producción indicando en cada momento la energía requerida.

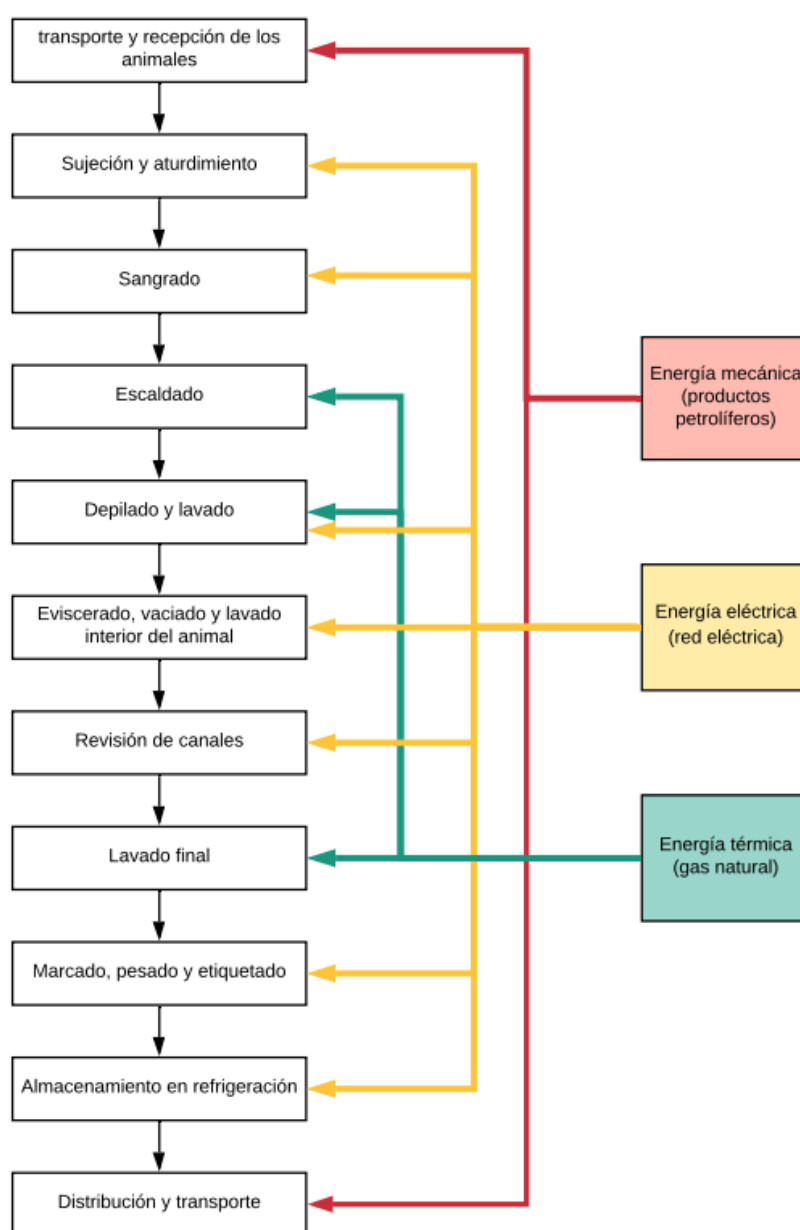


Gráfico 2.3.4. Principales procesos y energía consumida en un matadero de cerdos

Fuente: Elaboración propia.

En primer lugar, se disponen a transportar y distribuir los animales al matadero. Para ello hacen falta vehículos especializados que principalmente funcionarán con combustibles fósiles como el petróleo. Seguidamente, en la etapa de sujeción y aturdimiento son necesarios equipos sofisticados los cuales tienen un elevado consumo eléctrico. Posteriormente a esta etapa, se procede a escaldar, depilar y lavar cuidadosamente los animales. La energía consumida en este tipo de procesos es principalmente energía térmica. El vapor implementado se genera mediante un intercambio entre agua caliente y un

quemador de gas natural. En las fases como el eviscerado, el vaciado y el lavado interior se utilizan grandes cantidades de agua y electricidad. Por último, los almacenes de refrigeración son uno de los principales problemas que se presenta en el sector industrial. Estos grandes frigoríficos tienen un consumo eléctrico muy elevado e insostenible para el sistema energético.

En definitiva, la energía consumida en un matadero de porcinos y en la mayoría de los procesos industriales del sector alimentario se emplea fundamentalmente en la calefacción, tratamiento, limpieza y almacenamiento. Por lo tanto, los factores que más influyen en el consumo de energía son las condiciones climáticas a las cuales deben estar sometidos los alimentos y sobre todo los equipamientos empleados en las diferentes etapas para poder obtener los rendimientos productivos deseados.

2.4. Análisis de la situación energética en el sector agroalimentario

Una vez determinado uno de los principales objetivos de la industria agroalimentaria que es la mitigación del cambio climático y la concienciación de la protección del medioambiente es importante analizar la evolución de los combustibles fósiles hasta día de hoy y como se supone que evolucionarán los próximos años.

Siendo el sector alimentario un gran consumidor de combustibles fósiles y viniendo estos de países externos es transcendental conocer su viabilidad y cuál es la previsión de su progreso.

Como se ha visto anteriormente, la electricidad, los productos petrolíferos y el gas natural son las tres fuentes de energía que el sector alimentario consume directamente.

A parte de los problemas ambientales y del cambio climático ya mencionados, hay dos otros grandes factores que afectan directamente a los consumidores de combustible crudo. En primer lugar, es significativo tener en cuenta la inestabilidad geopolítica que padecen los principales países y regiones productoras de hidrocarburos. Por otro lado, también es crucial conocer las reservas actuales y el posible agotamiento de los combustibles fósiles.

La inestabilidad geopolítica que padecen ciertos países productores de petróleo y de gas natural es un motivo considerable para que países como España, decida migrar o encontrar otra solución que los aleje de posibles problemas con el encarecimiento o la falta de suministro de estos. Siendo un país que depende prácticamente de las importaciones de combustible fósil, es vital encontrar otros métodos y tecnologías para reducir esta dependencia y generar los combustibles o la energía de manera más local.

A continuación, se muestran dos gráficos en los que se puede ver como las reservas de petróleo y de gas natural están focalizadas en zonas muy concretas del planeta. En el caso de la producción de gas

natural, en el Gráfico 3.4.1 se puede ver como los principales productores son Alaska, Estados Unidos y Rusia. Por debajo de estos se sitúan la mayoría de los países de Oriente medio. En el caso del petróleo la repartición es casi la misma, probablemente la única diferencia es que en el continente africano hay un poco más de reservas de petróleo que de gas natural.

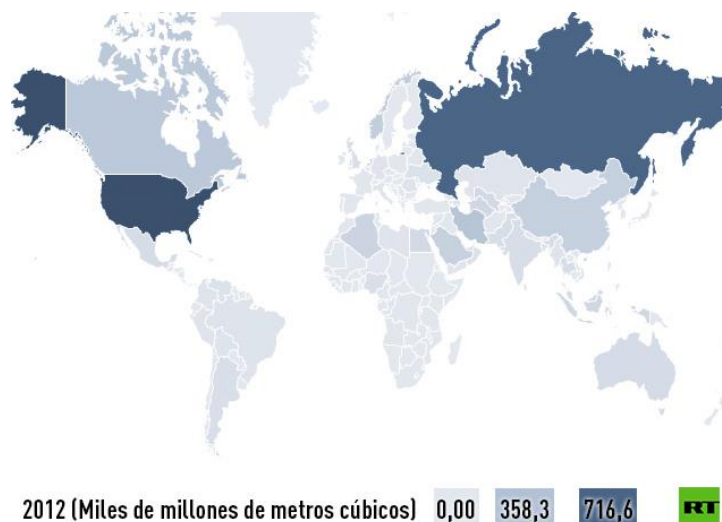


Gráfico 2.4.1. Producción mundial de gas natural

Fuente: Global Post.

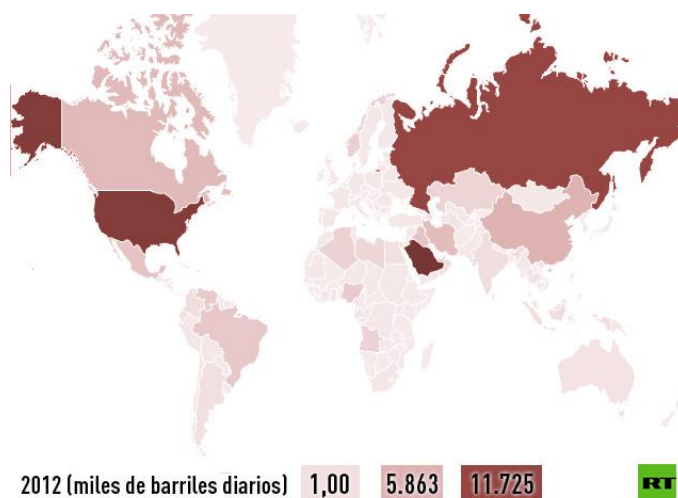


Gráfico 2.4.2. Producción mundial de Petróleo

Fuente: Global Post.

España en particular es uno de los principales importadores de combustibles fósiles de la Unión Europea. En el gráfico siguiente se muestra la dependencia energética que tiene respecto al resto de países europeos. Como se puede ver, se encuentra en la quinta posición con más dependencia energética, con aproximadamente un 75% de la energía consumida, superando con más de un 25% la

media europea. Es evidente que se trata de una situación que debe modificarse y reducirse de manera inmediata.

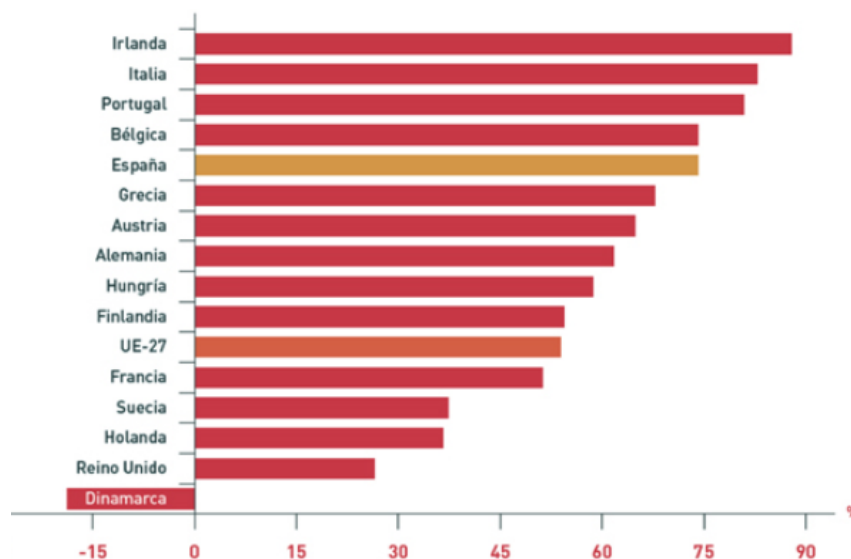


Gráfico 2.4.3. Dependencia energética en España dentro de la UE27

Fuente: EUROSTAT.

En cuanto a la posible futura escasez de combustibles fósiles, es necesario analizar por separado los tres combustibles principales que son el carbón, el petróleo y el gas natural.

En primer lugar, el carbón, a pesar de su antigua utilidad sigue siendo uno de los combustibles más utilizados y con abundantes yacimientos. Siendo una materia prima que no está concentrada geográficamente, no muestra peligro de escasez de suministro a medio plazo. Aunque no se utilice directamente como combustible para ninguna etapa de producción, es una de las principales materias primas para la generación de energía eléctrica.

En segundo lugar, el gas natural, es uno de los combustibles fósiles que más se utiliza en la industria y como se puede observar en el Gráfico 2.3.2., que es uno de los principales combustibles utilizados por el sector alimentario. Siendo uno de los combustibles que ha recibido una evolución prácticamente exponencial de su utilización ha desencadenado en una reducción muy rápida de sus reservas. Se pronostica que, la vida de este combustible ronda los 60 años, considerándose menor que la del carbono.

Por último, el petróleo, desde hace ya tiempo se utiliza de manera masiva en la mayor parte del mundo. La intensa explotación a la que se ha sometido el combustible crudo ha reducido muy significativamente las reservas. En este caso, se considera que no se podrá disponer de este más de 45 años. Por lo tanto, el petróleo se convierte en el combustible fósil con menores reservas.

Habría que decir también que, la energía eléctrica en España está principalmente producida mediante centrales nucleares, seguido de aerogeneradores, centrales de carbón y por último centrales hidráulicas. Lejos de tener un sistema energético renovable es importante considerar un posible cambio a corto plazo.

Visto esto, aunque las reservas sean más o menos abundantes, se están implantando cada vez más medidas para luchar contra la contaminación y reducción de emisiones de CO₂. Lo que puede hacer que algunos sectores industriales como la alimentación se vean muy perjudicados y deban asumir unos costes o limitaciones de consumo de combustibles fósiles que les impida realizar sus procesos. Esta situación obliga que se realice un cambio en la industria para implementar tecnologías de alta eficiencia y mucho más sostenibles.

2.5. Generación y gestión de residuos del sector agroalimentario

El concepto huella de carbono es conocido como la totalidad de gases de efecto invernadero (GEI) que son emitidos de manera directa o indirecta por una organización, un individuo, un proceso o un producto. Como se ha visto anteriormente en este documento, las fuentes principales de emisión de gases de efecto invernadero en el sector alimentario son los procesos de recolección, producción, distribución y consumo. No obstante, hay otra gran fuente generadora de GEI que es la llamada fin de ciclo de vida de los alimentos o gestión de residuos.

Se estima que, en Europa, aproximadamente uno de cada tres alimentos producidos es desperdiciado y que en todas las etapas de la cadena de producción mencionadas anteriormente hay una gran cantidad de pérdidas o desechos.

Los gobiernos hacen un gran esfuerzo para que las personas y los ciudadanos estén cada vez más concienciados con la reducción de la cantidad de alimentos desechados en las viviendas y por lo tanto por parte del consumidor final. Sin embargo, no existen estimaciones a escala de la UE sobre cuánta comida se desecha en las diferentes fases de los procesos. Tampoco se encuentran datos suficientemente fiables y críticos sobre los residuos de alimentos generados por el sector agroalimentario o por la industria del procesado de productos alimentarios.

Por lo tanto, el verdadero problema que se encuentra en el sector alimentario en materia de generación de residuos no es solo los alimentos desaprovechados o que no han sido consumidos sino también la cantidad de materia orgánica residual de la producción de un alimento o el plástico empleado para envasarlo y transportarlo.

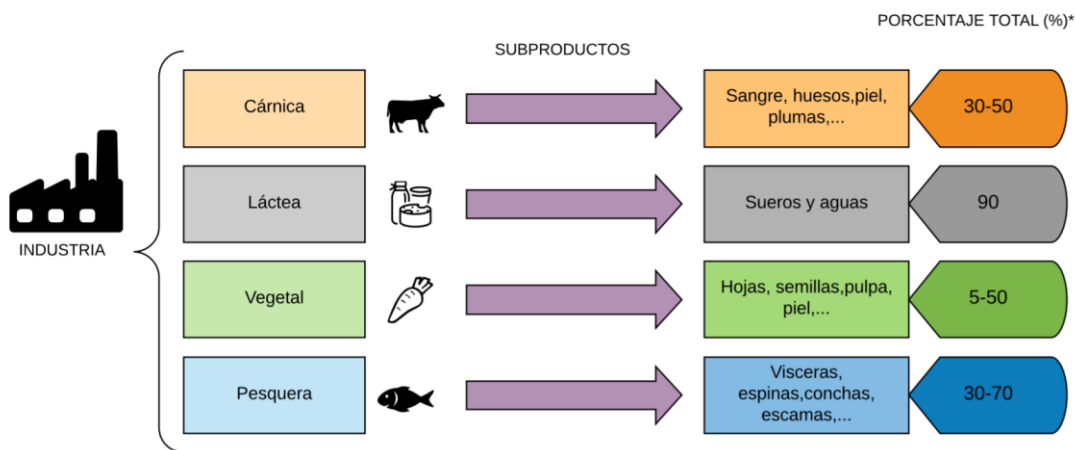
En términos generales, dentro de la industria alimentaria se pueden agrupar los residuos en tres grandes bloques. Estos pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos, en cualquier caso, es fundamental que

sean tratados de manera correcta para que no sean perjudiciales para el ambiente o para las poblaciones cercanas.

Tipos de residuos.

- ❖ En primer lugar, los **residuos sólidos**: son los más cuantiosos que se generan en la industria agroalimentaria. Estos provienen principalmente del sector cárnico o vegetal en los que se producen la mayoría de los desechos durante los procesos de tratamiento y producción.
- ❖ Por otro lado, los **residuos líquidos**: son aquellos que provienen de los procesos de limpieza y lavado del producto. Estos pueden contener aceites del tratado o de la maquinaria y grasas entre otros. Es el residuo que contiene más contaminantes y por ende, el más peligroso de los tres. Es prescindible un tratamiento antes de que sea vertido y desechado.
- ❖ Por último, los **residuos gaseosos**: son aquellos que se generan cuando se ponen en marcha las máquinas de producción y las calderas, estos son directamente expulsados a la atmósfera.

Cada sector en concreto genera residuos en diferentes porcentajes en función de los productos que fabrican. Para poder ver la cantidad de materia prima que es desechada se ha realizado un gráfico con cuatro sectores diferentes de la industria agroalimentaria en los que se producen distintos subproductos en diferentes porcentajes.



* Margen de porcentaje de materia prima aprovechada durante los procesos de elaboración

Gráfico 2.5.1. Porcentaje de materia prima que entra en los procesos productivos en diferentes sectores dentro de la industria alimentaria

Fuente: Elaboración propia.

La industria cárnica tiene un porcentaje total de materia prima aprovechada que no supera el 50%. En su etapa inicial en la que se sacrifican los animales se generan residuos como la sangre y los huesos

que son una preocupación ambiental además de sanitaria. Por otro lado, la generación de aguas residuales también tiene una gran importancia ya que contienen pesticidas y cloro. Otro aspecto que debe tenerse en cuenta en las industrias de producción intensiva de animales es la cantidad de excrementos que se generan como puede ser en el caso de un matadero de pollos, la gallinácea. Esta consiste en una mezcla entre los excrementos de las gallinas y los pollos junto con cascara de arroz que se acumula en el terrazo durante las etapas de producción. Se generan diariamente toneladas considerables que deben ser tratadas o gestionadas de alguna manera en concreto.

En los lácteos, se generan una gran variedad de productos para el consumidor y es por eso por lo que el porcentaje de residuos es mínimo. Se podrían considerar algunos residuos sólidos y efluentes líquidos. Correspondiente a los residuos sólidos son principalmente productos que han caducado o defectuosos. Es en el agua residual donde se encuentra la mayoría de residuo ya que está contaminada por grasas, proteínas y algunos sólidos suspendidos o disueltos.

Por último, el procesamiento de frutas y vegetales genera en gran parte aguas residuales y residuos sólidos. Son uno de los sectores que genera más cantidad de desechos. En los procesos iniciales, la mayoría de las frutas y verduras deben ser limpiadas cuidadosamente para retirarles todo tipo de pesticidas, sales o azúcares. Seguidamente, en los procesos mecánicos de preparación, separación y trituración entre otros se generan grandes cantidades de residuos sólidos provenientes de las hojas, semillas, cascaras, pulpa, entre otros. En general son difíciles de tratar.

En conclusión, en la generación de residuos por parte del sector agroalimentario es importante ser conscientes del gran problema que se crea. Muchos de los procesos industriales realizados en España generan cantidades inmensas de residuos y cada vez es más complicado gestionarlos. Los objetivos marcados por la unión europea y por el estado español son cada vez más críticos y exigentes en los aspectos de protección medioambiental. La industria alimentaria es una de las principales industrias que debe encontrar una solución respecto a la masificación de residuos generados.

Resumiendo, todos los puntos vistos hasta ahora, se puede afirmar que el sector agroalimentario debe conseguir que la cadena de suministro sea lo más independiente posible de los combustibles fósiles. Teniendo en cuenta que tiene un gran potencial para contribuir a la seguridad alimentaria a nivel mundial y sobre todo a la protección del medioambiente. Por lo tanto, la provisión de suministros de combustibles más seguros, accesibles y ambientalmente sostenibles debe ser una prioridad.

En definitiva, el gran desafío que enfrenta el mundo y en concreto este sector es desarrollar un sistema alimentario global que emita menos emisiones de GEI respondiendo sin problema a los precios fluctuantes de la energía al mismo tiempo que se mejora la eficiencia de los procesos y la reducción de residuos desechados.

3. Economía circular

3.1. De una economía lineal a una economía circular

Como se ha ido comentando a lo largo del trabajo la gestión del consumo energético y de los residuos del sector alimentario es uno de los principales retos de la sociedad moderna debido al gran impacto ambiental, económico y social que ello comporta.

El problema se centra en el modelo productivo que impera actualmente en la mayoría de los países. Este modelo está basado en un sistema muy simple, pero a su vez muy perjudicial para el medio ambiente y la salud. Estos últimos años se ha definido este sistema en tres grandes conceptos: **Producir, Consumir y Tirar**. Dicho de otra manera, el ser humano extrae una serie de recursos de la tierra, estos pueden ser utilizados como combustible o como materia prima, seguidamente estos recursos son transformados en una cadena de procesos y, finalmente el producto generado es vendido al consumidor. Este último, consumirá y hará uso del producto hasta que este pierda su utilidad o sobrepase su fecha de caducidad. Una vez han finalizado todas las etapas todo termina en el mismo sitio: la basura. Se trata de un proceso rápido, pero a la vez muy lento de tratar por parte del planeta, ya que está centrado en un sistema económico tanto capitalista como individualista con consecuencias totalmente insostenibles. A este modelo de producción en el que se evidencia que el flujo de recursos tiene un sentido único se le denomina “**economía lineal**”.

A continuación, se muestra un gráfico donde se puede ver claramente la linealidad del sistema.



Gráfico 3.1.1. Sistema económico actual: economía lineal

Fuente: Famos Depanel.

Hasta la fecha, la producción y el consumo de la humanidad ha estado totalmente descontrolado, no se ha prestado atención a la posibilidad de que los recursos pudieran ser ilimitados. Por otro lado, tampoco se han considerado las toneladas de residuos que se han ido generando puesto que la

solución siempre ha sido enviarlos y desecharlos en un vertedero, dicho de otra manera, a un pozo sin fondo como si no fuera a tener ningún tipo de repercusión en el planeta.

Es importante sensibilizarse con la situación y ver que el problema de la sociedad está en el hecho de que los recursos utilizados no son ilimitados, por lo tanto, no van a durar eternamente. Así mismo cabe destacar que, no solo la posibilidad de quedarse sin recursos es una realidad, sino que el ritmo de extracción y desecho es tan elevado que el agotamiento podría suceder antes de lo previsto.

Tras el análisis de la reducción ineludible de los recursos y el aumento de la contaminación que el planeta es incapaz de asumir, como por ejemplo las grandes cantidades de residuos por parte del sector alimentario, distintos países con gran apoyo al medio ambiente y la sostenibilidad han convergido en la misma conclusión; es necesario un nuevo proyecto, basado en un único concepto que se denomina **“economía circular”**. Según la definición que ofrece la Fundación para la Economía Circular, es *“un concepto económico que se interrelaciona con la sostenibilidad y cuyo objetivo es que el valor de los productos, los materiales y los recursos (agua, energía, etc.) se mantenga en la economía el mayor tiempo posible y que se reduzca al mínimo la generación de residuos”*.

Seguidamente se muestra un gráfico representativo de cómo debe ser la evolución de una economía más sostenible. Centrando el foco en el sector alimentario, es importante que todos los alimentos producidos sean mayoritariamente consumidos. En el caso de lo contrario es necesario gestionar bien todos los desechos para reducirlos y promover un mejor reciclaje. Dependiendo del tipo de desecho podrá ser considerado como materia prima para un nuevo producto y, de esta manera se conseguir una gestión completa.



Gráfico 3.1.2. Nuevo sistema económico: economía circular

Fuente: Famoc Depanel.

3.2. Vías de gestión y valorización de residuos agroalimentarios

Cada vez más, las estrategias empresariales del sector alimentario se están basando en los conceptos tales como la economía circular en los sistemas de producción y el aprovechamiento o revalorización de los subproductos. El principal objetivo de todas ellas es mejorar la sostenibilidad y la competitividad de las empresas.

El sector alimentario se apoya en las iniciativas expuestas en la estrategia Europa 2020¹ la cual pretende generar un crecimiento inteligente, sostenible e integrador. Es transcendental que Europa se convierta en un continente conocido por utilizar eficazmente sus recursos.

Esta estrategia propone una serie de medidas a medio y largo plazo, en las cuales hay iniciativas destinadas a convertir la UE en una economía circular reduciendo sustancialmente la cantidad de residuos y mejorando la gestión de estos. Para ello, la regla de las tres R es clave: **Reducir- Reutilizar- Reciclar**. En el mismo orden que se han expuesto, en primer lugar, se debe reducir todos los residuos posibles, en segundo lugar, hay que intentar reutilizar todo lo que se ha generado y, para finalizar, es importante reciclar todo lo que se pueda.

En España, merece especial atención la reciente iniciativa de un futuro sostenible “España 2030²” y la estrategia “Más alimento, menos desperdicio³”, dirigida a reducir las pérdidas y el desperdicio alimentario a su vez que una revalorización de los alimentos desechados, fomentando técnicas de consumo responsable y eficiente.

¹Estrategia Europa 2020: Los objetivos principales de esta estrategia son mejorar el empleo, la investigación y desarrollo (I+D), cambio climático y energía, educación y pobreza y exclusión social. En el caso de estudio, los objetivos marcados en la sección de clima y energía son: reducir en un 20% las emisiones de gases de efecto invernadero respecto a los niveles de 1990, promover que el 20% de las energías sean renovables e incremento del 20% de la eficiencia energética

²España 2030: En el año 2015, los 193 Estados miembros de las Naciones Unidas aprobaron la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Esta agenda cuenta con 17 objetivos en los que todos los países participan por igual y promueven el desarrollo económico, social y medioambiental. Presenta los mismos objetivos que la estrategia Europa 2020 pero un poco más ambiciosas, como por ejemplo la reducción de los gases de efecto invernadero a menos del 40% respecto a 1990.

³Estrategia más alimento menos desperdicio: es una iniciativa del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de España (MAPA) presentada en el año 2013 para limitar las pérdidas y el desperdicio de los alimentos y su impacto sobre el medio ambiente. La estrategia anima a todos los sectores de la sociedad a colaborar aportando sus opiniones, ideas, conocimientos y experiencias para, entre todos, contribuir a la reducción del desperdicio de alimentos.

A veces con aplicar las 3 R no es suficiente y, por lo tanto, es necesario encontrar una nueva vía para esos residuos y subproductos que no pueden ser reciclados. Esta alternativa se presenta en la jerarquía de los residuos, en la cual, se opta por ofrecer otro tipo de valorización.

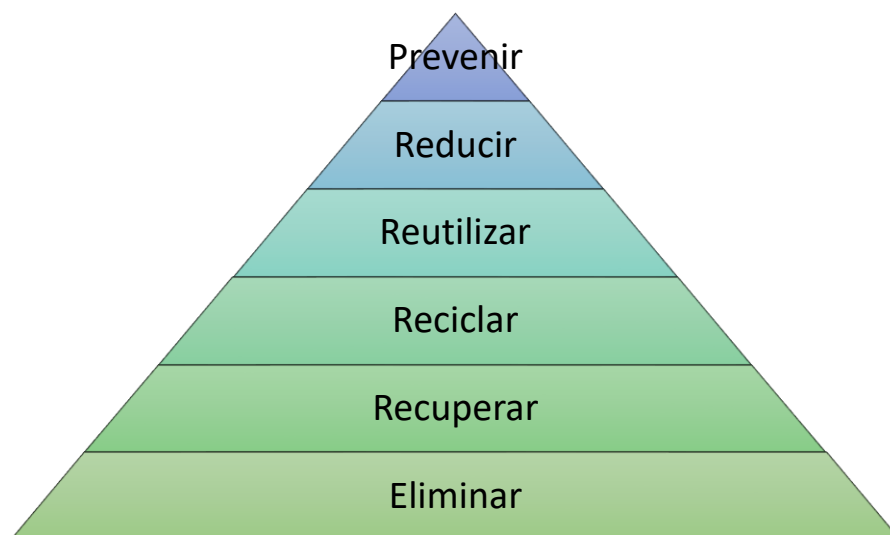


Gráfico 3.2.1. Jerarquía de los residuos

Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico presentado se puede ver como se ha añadido una cuarta R a la gestión de los residuos - **Recuperar**. Cuando algún elemento no puede ser reciclado, ya que las características que presenta no son óptimas, es importante buscar otra vía antes de que sea enviado a un vertedero.

La Comisión Europea publicó en la Directiva 2008/98/CE⁴ este tipo de cadena que sirve como orden de prioridades en las políticas relacionadas con la prevención y gestión de residuos. Esta pirámide forma la mejor opción global para el medioambiente desde un punto de vista legislativo.

En función del tipo de residuos, puede ser necesario encontrar una valorización mucho más eficiente que la presentada en dicha jerarquía. Los motivos pueden ser varios, como por ejemplo una viabilidad técnica, económica o medioambiental.

⁴Directiva 2008/98/CE: La presente Directiva establece medidas destinadas a proteger el medio ambiente y la salud humana mediante la prevención o la reducción de los impactos adversos de la generación y gestión de residuos, la reducción de los impactos globales del uso de los recursos y la mejora de la eficiencia de dicho uso.

Por consiguiente, debe hacerse énfasis en la estructura de la pirámide. En primer lugar, esta debería plantearse de forma distinta. La eliminación y recuperación de residuos no debería ser la base o los pilares de la pirámide. Lo más importante en todo momento es prevenir y reducir para no tener que

gestionar. Por lo que debería proponerse invertir el sentido de esta y lograr que realmente la eliminación sea la última opción de todas y tenga el menor peso posible.

En segundo lugar, como se ha mencionado anteriormente, es necesario ir un paso más allá del reciclaje. Hay muchos productos que están formado por un compuesto de papel y plástico o que contienen trazas de materia orgánica. Estos productos se convierten en un problema para su gestión. Por lo tanto, otro tipo de gestión y valorización debe ser planteado. En este momento es cuando muchos países se cuestionan la posibilidad de generar energía –**Valorización energética**.

Relacionar el problema de la generación y gestión de residuos con la situación energética significaría dar un paso de gigante. Plantear la posibilidad de reducir el consumo de combustibles fósiles y promover la utilización de residuos como fuente de energía (a poder ser renovable) para la protección del medio ambiente sería hacer un cambio muy positivo en una sociedad consumista y egoísta. Una vez más, aplicando este concepto en la industria alimentaria, se puede pensar que la valorización energética podría ser una gran solución: grandes toneladas de materia orgánica y plástico entre otros podrían ser utilizadas para generar la energía consumida en el mismo lugar de trabajo.

A continuación, se ha realizado un diagrama de Venn para representar exclusivamente la gestión de residuos en el sector alimentario, con el objetivo de generar energía. De esta manera se podrán ver las diferentes soluciones que se presentan.

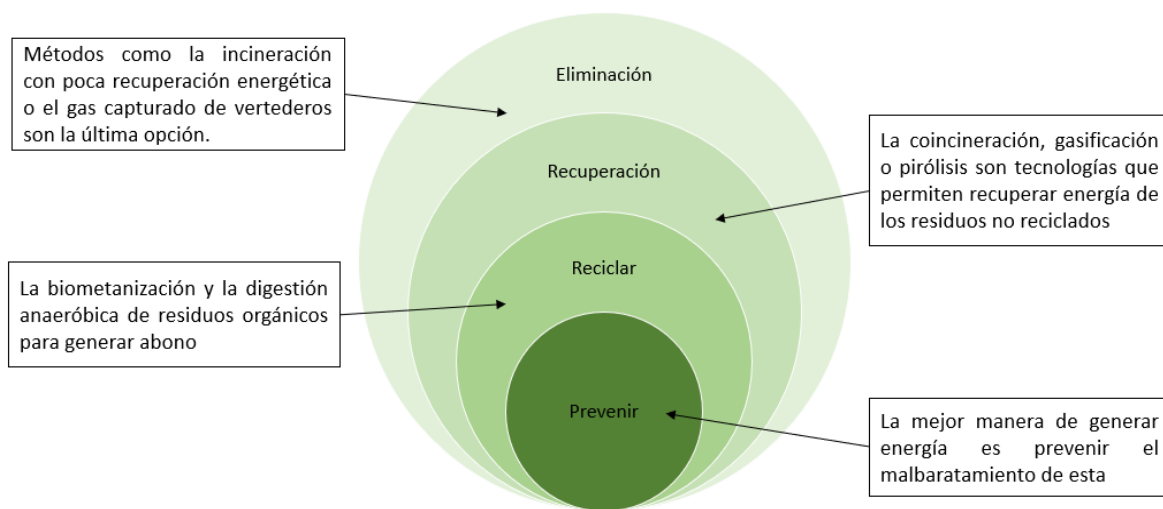


Gráfico 3.2.2. Valorización energética de los residuos del sector alimentario promoviendo la economía circular

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, se ha decidido poner en el centro del diagrama la Prevención, queriendo darle la máxima importancia. En este primer concepto, se podría considerar que prevenir es una de las mejores maneras de generar energía. El hecho de eliminar y/o optimizar una etapa dentro de un proceso de producción se convierte en un ahorro energético. En segundo lugar, una vez el residuo ya se ha generado, algunos métodos como la biometanización (tratamiento anaerobio de las partes biodegradables de los residuos de envase, que producen metano y residuos orgánicos estabilizados) puede ser una buena opción en el apartado de reciclaje. En el caso de que no sea viable el reciclado se debe considerar si existe algún tipo de recuperación. Algunas tecnologías como la co-incineración (toda instalación fija o móvil cuya finalidad principal sea la generación de energía que utiliza residuos como combustibles) o la gasificación, una tecnología muy similar, son posibilidades que deben tenerse en cuenta para la generación de energía. Por último, en el caso de que, por las cualidades de los residuos no se pueda realizar una recuperación se procede a la eliminación mediante vertederos o incineración. En ambos casos la recuperación energética es mínima (no es el principal objetivo de ambas tecnologías) y son las más negativas para el medioambiente.

La economía circular propone que los sistemas productivos se asemejen a ecosistemas, donde la salida de un proceso debe ser la entrada de otro. De acuerdo con este concepto, es inviable que un sistema productivo genere artículos de un solo uso, porque es desperdiciar su valor: por un lado, los materiales desechados y por otro lado el propio trabajo empleado en transformarlos. Valorizando energéticamente estos artículos desechados, los cuales supuestamente han perdido todo su valor, permiten la generación de otros que sí que podrán ser valorados y consumidos.

3.3. Marco legal

Todos los objetivos que se han planteado hasta ahora son muy ambiciosos y realmente positivos. La decisión de realizar este cambio y dar un paso hacia un planeta más sostenible está en manos de las grandes empresas multinacionales. Para conseguir que estas se planteen seriamente la posibilidad de realizar un cambio en la cadena de procesos o en la gestión de los residuos, la Comisión Europea realizó en 2015 un comunicado de prensa llamado **Cerrar el círculo**.

El objetivo principal, una vez más, es promover la implantación de la economía circular. Este comunicado fue publicado en Bruselas el 2 de diciembre de 2015. En él se especifica claramente que lo que se pretende es que *“las acciones propuestas contribuirán a un mayor reciclado y reutilización, y aportarán beneficios tanto al medio ambiente como a la economía. Estos planes extraerán el máximo valor y uso de todas las materias primas, productos y residuos, fomentando el ahorro energético y reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero. Las propuestas abarcan la totalidad del ciclo de vida: de la producción y el consumo a la gestión de residuos y el mercado de materias primas*

secundarias". Como se puede ver, esta definición encaja perfectamente con las necesidades que presentan la mayoría de las industrias del sector alimentario.

La decisión que toman la mayoría de las empresas es llevar todo el residuo a un vertedero ya que no deben preocuparse ni por el reciclado ni por las características de este. Es cierto que depositar el residuo en un vertedero tiene un coste añadido pero las multinacionales están dispuestas a asumirlo con tal de poder deshacerse de él. En el plan de acción presentado en este comunicado se pretende limitar de manera legislativa esta situación. La propuesta que se hace relativa a los residuos fija unos objetivos claros de reducción y establece una senda ambiciosa y totalmente creíble para la gestión y el reciclado.

A continuación, se presentan las principales propuestas que pueden influir en la industria alimentaria:

- ❖ Objetivo común de la UE: reciclado del 75% de los residuos de envase de aquí a 2030.
- ❖ Objetivo vinculante de reducción de la eliminación en vertedero a un máximo del 10% de todos los residuos de aquí a 2030.
- ❖ Promoción de instrumentos económicos para desalentar la eliminación en vertedero.

Después de 4 años desde su publicación, el 4 de marzo de 2019, se ha publicado un informe exhaustivo sobre la aplicación de los objetivos propuestos el año 2015 y se ha analizado la repercusión que han tenido. Según los vicepresidentes Timmersmans y Katien, los objetivos se están cumpliendo y Europa está a la cabeza como pionera y modelo para el resto del mundo.

Respecto a los objetivos que incumben a las industrias del sector alimentario, se han implementado nuevas tasas de reciclado mucho más ambiciosas, un régimen jurídico clarificado de los materiales que deberían ser reciclados y medidas reforzadas de prevención y gestión de residuos. Por otro lado, se ha hecho énfasis en la necesidad de aumentar la eficiencia de todos los procesos que se lleven a cabo incluyendo normas sobre los requisitos de eficiencia de los materiales.

Analizando todas las acciones puestas en marcha por la Unión Europea y los objetivos de impulsar la competitividad de Europa modernizando su economía e industria se puede ver que la industria alimentaria juega un papel muy importante. Como bien se ha visto en apartados anteriores, la alimentación es uno de los pilares de la economía mundial y, en España es una de las principales actividades manufactureras.

En el caso de España, la valorización energética, el reciclado, la eficiencia energética y la concienciación son soluciones para tener muy en cuenta. En el gráfico siguiente se puede ver cómo es uno de los países de la Unión Europea con menor porcentaje de residuos reciclados de los desechados con

aproximadamente el 30%. En comparación con los países nórdicos que alcanzan casi el 50% de residuos reciclados o recuperados, España está lejos de cumplir sus metas en el año 2020 y difícilmente en el año 2030.

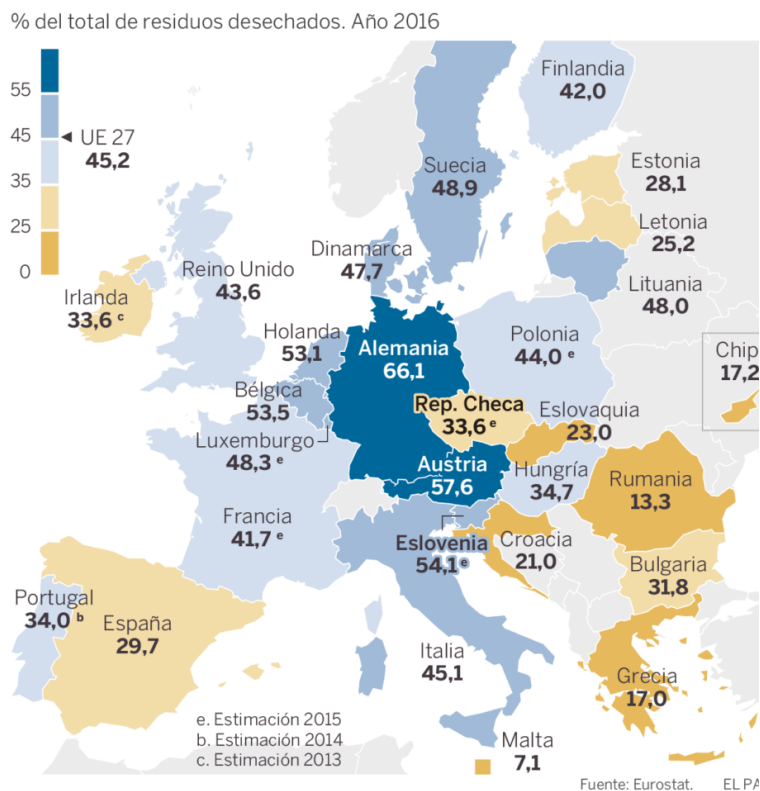


Gráfico 3.3.1. Tasa de reciclaje en Europa

Fuente: El País.

En conclusión, las industrias del sector alimentario se encuentran en un punto de no retorno. Se están encontrando en una situación a la cual no saben cómo hacer frente. La posibilidad de llevar los residuos a los vertederos se está convirtiendo en una posibilidad inviable. La reducción de estos está haciendo que el precio por tonelada de residuo sea cada vez más elevado. Por otro lado, los gobiernos están aplicando tasas aún más elevadas para promover otras soluciones que favorezcan al medioambiente. Parece ser que es la única solución viable para realizar un cambio.

Es esencial dejar atrás la cultura del desperdicio y conseguir crear un ecosistema en el cual se optimicen los recursos, se aumente la eficiencia de los procesos, mejorar los sistemas de gestión y optimizar todos los equipos. Viendo la solución que se propone, si se encuentra alguna manera de generar energía con los residuos recogidos en la misma fábrica se podrán reducir los desechos, aumentar la eficiencia y mejorar todos los sistemas de gestión.

3.4. La incineración y/o co-incineración como alternativa de valorización de los residuos del sector agroalimentario

Una vez se han visto y analizado las diferentes estrategias de gestión de residuos, es necesario determinar el alcance que puede existir en una tecnología de valorización energética como es la incineración.

Hay muchos residuos que contienen trazas de materiales no reciclables o muy difíciles de separar. Estos pierden poder para ser reutilizados o reciclados y actualmente son enviados directamente a vertederos.

En este trabajo se ha decidido apostar por la posibilidad de cerrar el círculo generando energía. Atendiendo a este objetivo, se intentará realizar una comparación con otras alternativas y presentar con exactitud el concepto de este sistema.

3.4.1. Alternativas a la gestión de residuos alimentarios

A continuación, se presentarán dos opciones existentes para la gestión de residuos alimentarios. Se ordenarán en función de su prioridad y estarán relacionadas con el Gráfico 3.2.2 presentado anteriormente.

3.4.1.1. Vertedero controlado

Una vez se ha obtenido un residuo en el sector alimentario, una de las posibilidades es trasladarlo a un vertedero controlado. Se trata de un lugar donde se depositan ordenadamente residuos sólidos en zonas especialmente preparadas para su tratamiento. Este tipo de vertedero debe cumplir las disposiciones legales vigentes en cuanto a la regulación, control y autorizaciones.

Este método es uno de los más utilizados en la actualidad. La industria alimentaria está caracterizada por generar residuos considerados como peligrosos o infecciosos. Por lo tanto, muchos de estos deben ser tratados y gestionados de una manera muy particular para no ocasionar ningún tipo de daño al medioambiente, lugares próximos a su deposición o poblaciones cercanas.

La principal función de esta tecnología de gestión es la eliminación de residuos complejos en condiciones tales que se intentan minimizar o hacer desaparecer los posibles efectos negativos sobre el entorno. Aunque las sustancias negativas no pueden ser aprovechadas, en algunos casos se consigue la degradación de la materia orgánica que posibilita el aprovechamiento de los gases generados.

Es un ejemplo muy claro de una de las últimas opciones expuestas en el Gráfico 3.2.2. Es obvio que para las empresas industriales es uno de los métodos más sencillos y cómodos, pero tiene muchos efectos negativos.

Tabla 3.4.1.1.1. Balance de ventajas e inconvenientes de un vertedero controlado

Ventajas	Inconvenientes
- Opción sencilla	- Emisiones de biogás
- Tecnología poco compleja	- Acumulación de sustancias peligrosas
- Bajo coste de maquinaria	- Ocupación se suelo
- Bajo coste de mantenimiento	- Dispersión de residuos y polvo
	- Incendios debido a la formación de gas
	- Olores anaeróbicos, moscas y roedores
	- ...

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.2. Compostaje

El compostaje es una de las otras opciones que se presentan para gestionar esos residuos que no han podido ser prevenidos o reutilizados. Se trata de una tecnología en la que se realiza un proceso de descomposición biológica aeróbica de la materia orgánica, contenida en los residuos, en condiciones de temperatura, pH, aireación y humedad controladas, y que tiene como objetivo su transformación en un producto orgánico para la mejora de suelos agrícolas.

Relacionando paralelamente el tipo de residuos que se generan en la industria alimentaria y las diferentes posibilidades de gestión existentes, el compostaje puede ser una de las más viables. Como bien se ha comentado anteriormente, gran parte de los residuos generados son de origen orgánico y presentan unas características favorables para este tipo de tecnología.

Los objetivos generales de esta tecnología son: inicialmente reducir el volumen total de los residuos, seguidamente, dentro de lo posible transformar la materia orgánica biodegradable en un producto biológicamente estable, por otro lado, es necesario retener el máximo contenido de nutrientes y destruir patógenos, huevos de insectos, malas hierbas, etc.

Industrias dedicadas a la generación de productos provenientes de alimentos vegetales como puede ser la producción de aceite de oliva, orujos, o industrias dedicadas a la bollería y repostería (residuos

generados a partir de productos orgánicos para la alimentación humana) son algunas de las más influyentes en esta tecnología.

A continuación, se presenta una tabla en la que se pueden ver las ventajas e inconvenientes de este proceso de gestión.

Tabla 3.4.1.2.1. Balance de ventajas e inconvenientes del compostaje

Ventajas	Inconvenientes
- Mejorar la estructura del suelo	- Emisiones de CO ₂
- Aporta material nutritivo	- Olores fuertes y desagradables
- Reduce los efectos negativos de los agentes tóxicos	- Ocupación de suelo elevada
- Conservación del medio ambiente	- Generación elevada de rechazo final
- Alargar la vida de algunos materiales	- Inversión económica medio alta
- Creación puestos de trabajo	
- Bajo coste de tratamiento y de gestión	

Fuente: Elaboración propia.

Aunque presente más ventajas que el vertido controlado desde un punto de visto medioambiental y tecnológico, existen inconvenientes de mucho peso que hacen de esta tecnología poco viable. Siguen existiendo grandes cantidades de residuos que deben ser transportados a vertederos y el rendimiento económico que se obtiene no es muy elevado. Esta tecnología es una de las opciones de reciclaje presentadas en el Gráfico 3.2.2 del apartado anterior.

3.4.1.3. Incineración

Por último, una vez se han estudiado dos alternativas a esta tecnología se presenta aquella por la cual se ha deseado apostar. Como bien se ha ido definiendo anteriormente, la incineración consiste en una técnica de valorización energética en la que, mediante la combustión controlada, se transforma la fracción orgánica de los residuos materiales inertes en gases, desprendiéndose simultáneamente una gran cantidad de calor que se puede aprovechar.

Los principales objetivos que presenta esta tecnología son la reducción del peso y el volumen con respecto al residuo original y recuperación energética.

Habiendo estudiado y determinado los grandes problemas que se están generando en el sector alimentario, se puede considerar que esta tecnología es de lejos la más eficiente de todas. Por un lado, se pueden tratar una gran variedad de residuos, y por otro, se puede generar energía térmica muy necesaria para los procesos.

Tabla 3.4.1.3.1. Balance de ventajas e inconvenientes de la incineración

Ventajas	Inconvenientes
- Reducción del volumen de residuos	- Inversión económica muy alta
- Esterilización de los residuos	- Necesidades tecnológicas exigentes y sofisticadas
- Recuperación energética	- Coste de mantenimiento elevado
- Reducción de las emisiones de metano	- Desincentiva la prevención
- Fijación de los metales pesados en las escorias.	
- Posibilidades de elección de ubicación	
- Bajo coste de tratamiento	
- Creación de puestos de trabajo	

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede ver, presenta todas las ventajas necesarias para promover un cambio en el sector alimentario. Se pueden reducir las cantidades de residuos generados, se puede realizar una recuperación energética en el mismo lugar de trabajo lo que eso conlleva al autoconsumo.

A continuación, se ha decidido realizar una propuesta de proyecto a una empresa de la industria alimentaria. El objetivo principal es determinar si realmente existe la viabilidad de aplicar esta tecnología desde un punto de vista económico y medioambiental realizando una previsión de la evolución desde un punto de vista legislativo en cuanto a la generación de residuos y desde un punto de vista económico en cuanto al precio de los combustibles consumidos por este sector.

4. Aplicabilidad en una empresa del sector

4.1. Actividad principal de la empresa

La actividad principal de la empresa se centra en el reciclaje y valorización de subproductos procedentes de la industria de alimentación humana para su transformación en ingredientes para la alimentación animal.

La empresa ofrece un servicio y asesoramiento integral a las industrias alimentarias desde el origen de su producción por tal de poder gestionar sus subproductos de la manera más adecuada.

El foco inicial está principalmente en las industrias de fabricación de panadería, pastelería, pastas alimenticias, galletas, cereales para el desayuno, chocolates, caramelos, snacks, fritos, frutos secos, arroz, harinas, helados, leche, yogur, lácteos, quesos, zumos y refrescos.

El proceso productivo comienza con la recogida selectiva de los subproductos alimenticios en las empresas generadoras. Una vez el subproducto llega a las instalaciones, este se clasifica en función de sus características. Tras un proceso inicial de separación del envoltorio y de elementos contaminantes, se introduce la materia orgánica en un secadero especializado en el cual se le extraerá la humedad deshidratándolo a una cierta temperatura. Una vez el producto ha sido deshidratado, pasa por un proceso de molienda hasta que obtiene una textura similar a la harina de galleta. Este se convierte en un producto con grandes propiedades nutricionales para la elaboración de pienso para animales. Se almacena la materia resultante, se somete a exhaustivos análisis de calidad y seguridad para finalmente ser distribuida.

El objetivo principal de la empresa es que el sector alimentario pueda aportar valor social medio ambiental y económico a su negocio reduciendo algunos recursos como puede ser en el caso de las empresas ganaderas y alargando la vida útil de los alimentos. De esta manera se puede ofrecer una alternativa económica al uso de materias primas tan habituales como los cereales y grasas.

A continuación, se presenta el diagrama de flujo de la empresa.

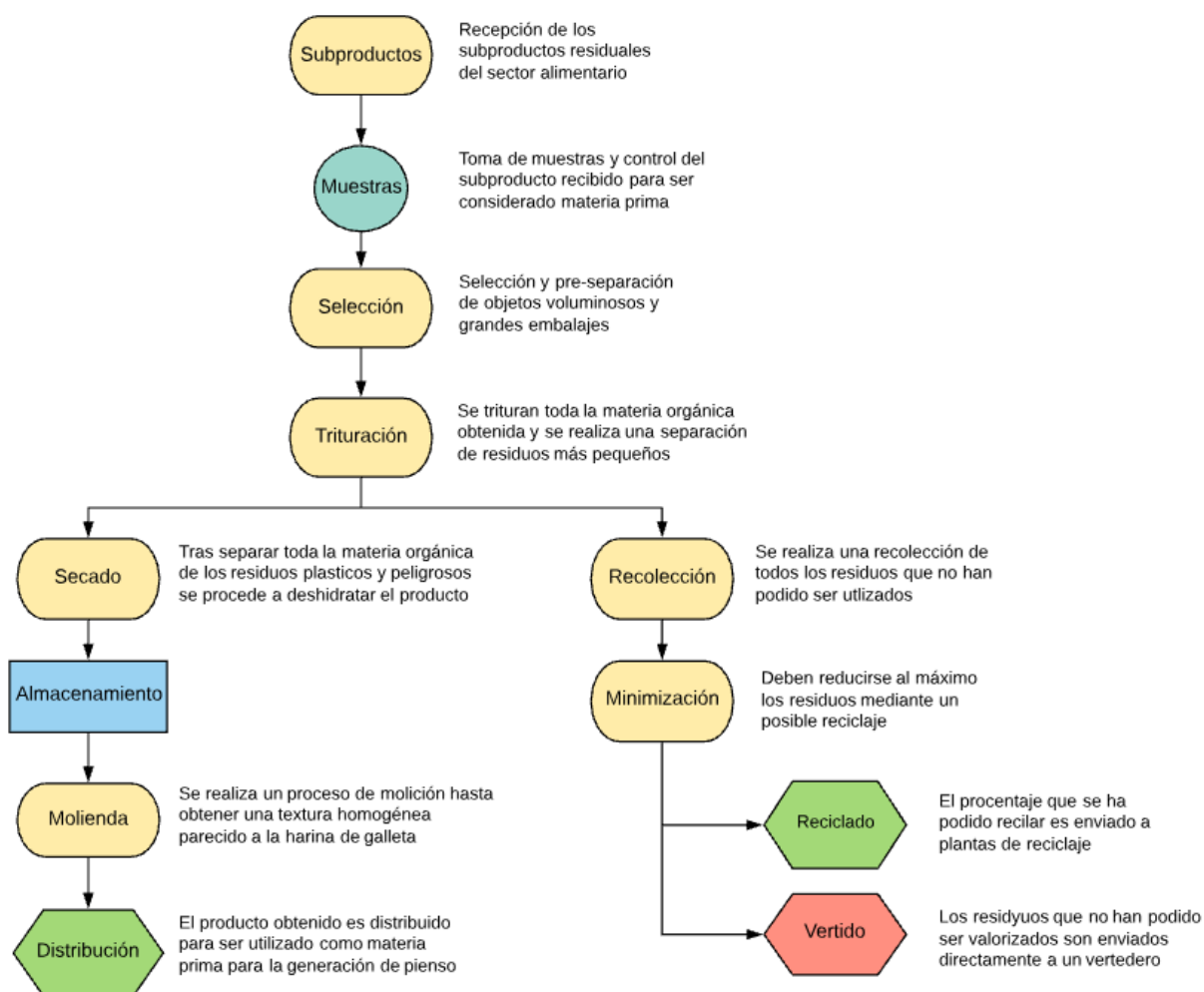


Gráfico 4.1.1. Diagrama de flujos de la empresa

Fuente: Elaboración propia.

4.2. Requerimientos y objetivos

Como se ha podido ver a lo largo de todo el trabajo, la empresa en cuestión presenta muchas de las características a favor de la protección del medio ambiente. Tal como se ha descrito, tienen como objetivo principal reducir en la medida de lo posible la cantidad de subproductos desechados por la industria alimentaria. Mediante el proceso de tratamiento y elaboración que implementan consiguen alargar el ciclo de vida de algunos materiales revalorizando productos alimentarios que no pueden ser consumidos por los humanos.

Acorde con los objetivos que se mencionan en el apartado de economía circular, la empresa podría mejorar aún más su posicionamiento y evolución en la protección del medio ambiente.

Considerando que en la mayoría de las empresas del sector alimentario el consumo energético es uno de los principales gastos económicos y que la generación de residuos uno de los problemas fundamentales a los cuales deben hacer frente, se realiza un esquema en el que se exponen las dos problemáticas y posibles soluciones al respecto.

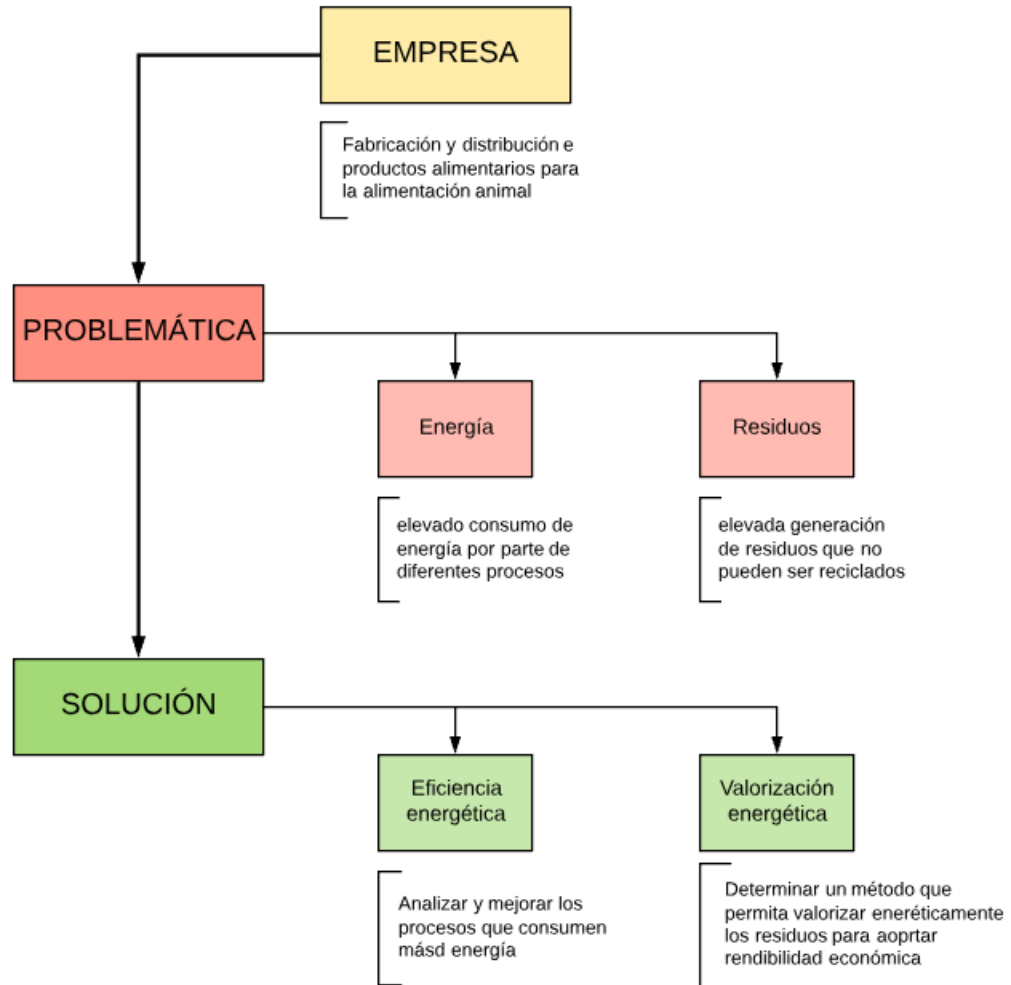


Gráfico 4.2.1. Posibles aportaciones a la gestión energética

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede ver, en primer lugar, la empresa debería realizar un análisis detallado de todos los procesos que están incluidos en su cadena de producción y buscar la manera de poder mejorarlos con

el objetivo de aumentar su eficiencia energética. Entre otras opciones se encuentran las dos propuestas siguientes:

- ❖ Optimizar los trayectos de recogida de subproductos alimentarios de los centros de producción. Es de gran importancia realizar una buena gestión logística para promover una movilidad sostenible. Una buena estrategia debe ser implementada para que los camiones o furgonetas destinadas a la recolección del material realicen cargas completas en cada viaje.
- ❖ Por otro lado, la reducción de emisiones por refrigeración y climatización también debe tenerse en cuenta. Debe realizarse un estudio en las instalaciones para ver si hay algún tipo de pérdidas considerables y determinar una posible solución al respecto.

En cuanto a la valorización energética, tras ver que la empresa debe destinar un porcentaje de los residuos generados a un vertedero, se pretende ofrecer la posibilidad de realizar una recuperación energética de estos. El objetivo principal es minimizar la eliminación de residuos al mismo tiempo que se obtiene un rendimiento económico.

Acorde con lo que se ha establecido a lo largo del trabajo se ha considerado una muy buena oportunidad, la posibilidad de realizar una recuperación energética de los residuos generados en la misma industria sin tener que transportarlos. Este proyecto permitirá que la propia empresa produzca gran parte de la energía consumida sin tener que desplazarse ni depender de terceros. De esta manera, la empresa dejará de pagar por deshacerse de sus residuos y podrá reducir notablemente su factura energética con el objetivo de obtener beneficios económicos.

Seguidamente se realizará una propuesta de una línea de incineración de residuos varios para la generación de energía térmica destinada a los procesos de secado de la empresa en cuestión.

En el gráfico siguiente se representa el objetivo que se desea obtener.

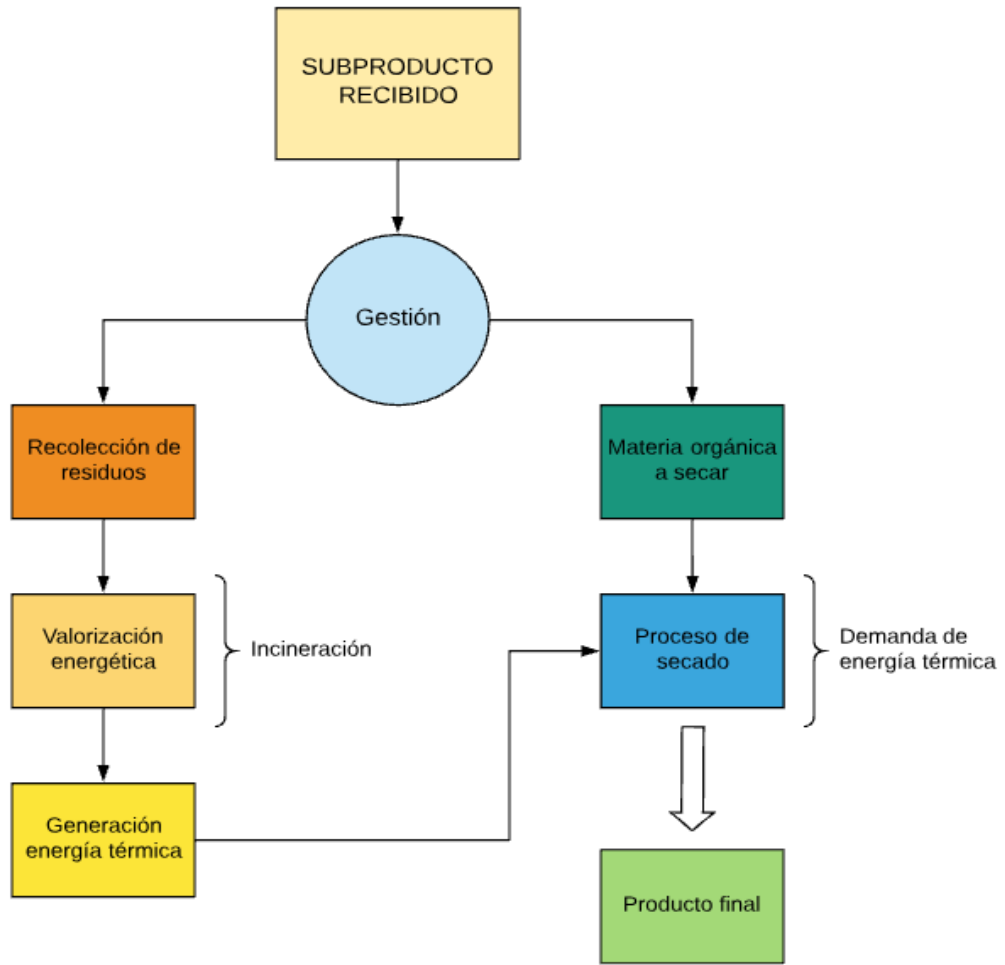


Gráfico 4.2.2. Objetivo del proyecto

Fuente: Elaboración propia.

4.3. Información necesaria

Inicialmente es necesario determinar qué tipo de residuo presenta la empresa y cuál es su composición para ver si legislativa y energéticamente es posible realizar el proyecto en cuestión.

4.3.1. Composición del combustible

Para determinar la composición del combustible se ha recogido una muestra de residuo y se ha enviado a un laboratorio en el cual se ha analizado y determinado la caracterización del combustible sólido recuperado. Debe tenerse en cuenta que la composición de los residuos puede variar en función de la

muestra escogida ya que los subproductos recolectados pueden ser diferentes dependiendo de la industria de la cual provienen y del tipo de alimento.

A continuación, se presentan los datos recuperados de la muestra en cuestión:

En primer lugar, se ha determinado la composición del residuo en función de los tipos de materiales presentes.

Tabla 4.3.1.1. Analítica de una muestra de residuo sólido

COMPOSICIÓN	% EN PESO	%H ₂ O	% SECO
Papel	15,00%	1,65%	13,35%
PET (Tereftalato de polietileno)	60,00%	5,40%	54,60%
Cartón	20,00%	3,60%	16,40%
Materia orgánica	5,00%	1,75%	3,25%

Fuente: Analítica del laboratorio.

Como se puede observar, el residuo recolectado está formado principalmente por papel, tereftalato de polietileno (tipo de plástico muy utilizado para envases alimentarios y bebidas), cartón y materia orgánica. Se han despreciado los vidrios, metales e inertes ya que son mínimos (no representan ni el 0,01% del residuo total) y no pueden utilizarse como valorización energética.

Es importante destacar que para cada uno de los componentes del residuo se ha obtenido su porcentaje de humedad total separando la base seca. Es el primer proceso que se realiza para determinar la cantidad de agua que contiene cada tipo de material. El método implementado se denomina pesado constante, consiste en pesar el compuesto después de ser secado durante un periodo de tiempo determinado. El proceso se realiza reiteradamente hasta que el peso no varía, en ese momento se compara el peso inicial con el peso final y se determina la cantidad de agua total. Posteriormente, estos valores deberán relacionarse para obtener el residuo total del cual se dispondrá.

En segundo lugar, el informe del laboratorio muestra la composición química de cada uno de los materiales por separado.

Tabla 4.3.1.2. Composición química de cada material

RESIDUO	H ₂ O	C	H	O	S	N	Cl	F	Cenizas
Papel	11,00%	43,90%	6,15%	41,66%	0,12%	0,42%	0,10%	0,00%	7,65%
PET	9,00%	68,00%	17,00%	14,00%	0,10%	0,20%	0,00%	0,00%	0,70%
Cartón	18,00%	45,52%	6,08%	44,30%	0,14%	0,20%	0,10%	0,00%	3,70%
Materia orgánica	35,00%	49,00%	6,60%	37,60%	0,20%	1,70%	0,02%	0,00%	5,00%

Fuente: Analítica del laboratorio.

En esta tabla se puede ver qué importancia presenta cada residuo en función de su composición química. Si se analizan detenidamente los resultados se puede ver como todos los combustibles presentan un alto contenido en Carbono, seguido de Hidrógeno y Oxígeno. Esto es debido a que todos ellos provienen de un origen orgánico.

Una vez se han recolectado y analizado todos los datos, es necesario realizar una serie de cálculos para determinar la composición química del combustible total.

La tabla siguiente muestra el porcentaje total de cada elemento químico en el combustible final en función del porcentaje de cada material.

Tabla 4.3.1.3. Composición química del combustible final

COMBUSTIBLE FINAL	H ₂ O	C	H	O	S	N	Cl	F	Cenizas
Papel	1,65%	6,59%	0,92%	6,25%	0,02%	0,06%	0,02%	0,00%	1,15%
PET	5,40%	40,80%	10,20%	8,40%	0,06%	0,12%	0,00%	0,00%	0,42%
Cartón	3,60%	9,10%	1,22%	8,86%	0,03%	0,04%	0,02%	0,00%	0,74%
Materia orgánica	1,75%	2,45%	0,33%	1,88%	0,01%	0,09%	0,00%	0,00%	0,25%
TOTAL	12,40%	58,94%	12,67%	25,39%	0,12%	0,31%	0,04%	0,00%	2,56%

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, teniendo en cuenta la composición del residuo y el porcentaje de cada compuesto se obtienen un combustible con las siguientes características en base seca y en base húmeda.

Tabla 4.3.1.4. Resumen de la composición del combustible

	Base SECA	Base HÚMEDA
C	58,94%	51,63%
H	12,67%	11,10%
O	25,39%	22,24%
S	0,12%	0,10%
N	0,31%	0,27%
Cl	0,04%	0,03%
F	0,00%	0,00%
H₂O	-	12,40%
Cenizas	2,56%	2,24%
TOTAL	100,00%	100,00%

Fuente: Elaboración propia.

4.3.2. Valor del residuo como combustible

Para saber si el residuo del cual se dispone puede utilizarse en procesos de valorización energética debe analizarse su posición y codificación en la guía de residuos de la comunidad autónoma en la que se esté realizando la propuesta de proyecto. En el caso en cuestión se trata de una planta localizada en Cataluña.

Según el CATÁLOGO DE RESIDUOS DE CATALUÑA, existe un procedimiento para codificar y clasificar los residuos. En primer lugar, debe localizarse la fuente o la actividad que genera el residuo en los capítulos del 01 al 12 o del 17 al 20 y buscar el código apropiado de seis cifras para el residuo. Los capítulos en cuestión están agrupados por sectores de actividad productiva y cada subcapítulo por especialidades dentro del propio sector.

Analizando todos los capítulos disponibles se determina que el residuo del cual se dispone está catalogado en el Capítulo **19**: “Residuos de las instalaciones para el tratamiento de residuos, de las plantas externas de tratamiento de aguas residuales y de la preparación de aguas para el consumo humano y de agua para el uso industrial”.

Dentro de este capítulo debe encontrarse el código completo que representa el residuo en cuestión. La definición que identifica el residuo del que se dispone es la siguiente: “Residuo combustible (combustible derivado de residuos)” y el código que obtiene es el **191210**.

A continuación, se presenta el extracto del CATÁLOGO DE RESIDUOS DE CATALUÑA donde se encuentra el residuo. Como se puede ver, en función del código se clasifican en diferentes clases, prioridades, vías y subvías.

Tabla 4.3.2.1. Extracto del catálogo de residuos de Cataluña

19 RESIDUS DE LES INSTAL·LACIONS PER AL TRACTAMENT DE RESIDUS, DE LES PLANTES EXTERNES DE TRACTAMENT D'AIGÜES RESIDUALS I DE LA PREPARACIÓ D'AIGUA PER A CONSUM HUMÀ I D'AIGUA PER A ÚS INDUSTRIAL						
Codi	Descripció	Classe	Prioritat	Vies	Subvies	
191206	Fusta que conté substàncies perilloses	P	1	R01	R0101	R0102 R0103
			2	D10	D1001	
			3	D05	D0503	
191207	Fusta diferent de l'especificada en el codi 191206	NP	1	R03	R0301	R0306 R0314
			2	R01	R0101	R0102 R0103
			3	D08	D0801	
			4	D05	D0502	
191208	Matèries tèxtils	NP	1	R03	R0306	R0314
			2	D05	D0502	
191209	Minerals (per exemple, sorra, pedres)	NP	1	R05	R0504	R0505
			2	D05	D0501	D0502
191210	Residus combustibles (combustible derivat del rebuig)	NP	1	R03	R0307	
			2	R01	R0101	R0102 R0103
			3	D10	D1001	

Fuente: Catálogo de Residuos de Cataluña.

Seguidamente se analizarán las clasificaciones aplicadas al residuo.

En primer lugar, debe determinarse si el residuo es Peligroso (P) o No Peligroso (NP). Según la directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo se define un residuo peligroso como aquel que presenta una o más características peligrosas. Estas se clasifican en función de si son explosivas, comburentes, inflamables, irritantes (irritación cutánea y lesiones oculares), toxicidad específica, toxicidad aguda, carcinógenas, corrosivas, infecciosas, tóxicas para la reproducción, liberación de gases tóxicos, sensibilizadoras y eco tóxicas. En el caso del residuo obtenido, no presenta ninguna de las características expuestas y por lo tanto se considera un residuo **No Peligroso**.

En segunda instancia, deben analizarse las vías de gestión de los residuos. Estas constituyen en conjunto de posibilidades técnicas para gestionar el residuo que, a partir de la publicación de la normativa 1996/350/CE, consta de un total de 28 posibilidades de vías de gestión: 15 de eliminación y 13 de valorización. Esta lista fue actualizada recientemente con la modificación de la Directiva (UE) 2018/851.

Dentro del código se incluyen diferentes prioridades entre las posibles vías de gestión atribuidas a cada residuo. Estas se ordenan con valores numéricos siendo el 1 la vía más prioritaria. Analizando el residuo del que se dispone, la gestión prioritaria tiene el código **R03**: preparación para la reutilización y valorización del material. En el caso de que esto no sea posible se procede a aplicar el segundo código

R01: valorización energética. Finalmente, si ninguna de las dos opciones es posible debe aplicarse el código **D10:** incineración.

Como se puede ver, la empresa en cuestión dispone de un residuo valorizado energéticamente en el caso de que no se pueda reutilizar. La mayoría de los materiales están mezclados, muy sucios y son difíciles de limpiar y separar. En consecuencia, la valorización energética será la solución prioritaria según el Catálogo.

Por último, una vez se ha decidido cuál es la principal vía de gestión del residuo en función de su estado se dispone de un código de subvías. Este indica principalmente como deben realizarse los procesos y también sigue un orden de prioridad. Si consideramos el código **R01** como decisión final de gestión existen 3 subvías diferentes. La sub vía **R0101:** utilización principal como combustible en instalaciones de incineración de residuos, la sub vía **R0102:** Utilización principal como combustible en la fabricación de cemento y la sub vía **R0103:** Utilización principal como combustible en otras instalaciones de coincineración.

Analizando el código de gestión del catálogo se ha podido observar cómo sigue los objetivos de prioridad establecidos en la pirámide jerárquica presentada en el apartado de economía circular. Esto se puede ver reflejado principalmente en las prioridades establecidas. Tanto la incineración como la deposición controlada son operaciones de eliminación y, por lo tanto, las dos tienen la prioridad más baja ya que son las más contaminantes.

4.4. Características generales

El diseño de la planta de valorización energética se realizará para tratar residuos generados exclusivamente por parte de la empresa en cuestión. Así mismo, según los datos recolectados y proporcionados por parte de la empresa, la producción de residuos anual es de 5.266,42 Tn/año.

Por otro lado, es necesario saber el horario y días de funcionamiento de la planta. Según los datos recibidos, la planta trabaja un total de 4.576 h/año.

Por último, mediante las facturas energéticas del año 2018 se ha podido determinar cuanta energía térmica se ha consumido.

A continuación, se presenta una tabla con el conjunto de datos necesarios para el dimensionamiento.

Tabla 4.4.1. Datos necesarios para la realización del proyecto

DATOS REQUERIDOS		
Horas anuales de funcionamiento	4.576	h/año
Horas trabajadas al día	24	h/día
Disponibilidad de la planta	52,22	%
Toneladas de residuo anual	5.266,420	Tn/año
Consumo horario de combustible global	1.151,281	kg/h
Margen de seguridad aplicado	0	%
Energía total requerida para el secado	28.606.174	kWh/año
Potencia térmica por hora requerida para el secado	6.251	kWh

Fuente: Empresa de estudio.

4.5. Normativa aplicable al proyecto

A continuación, se presentan las diferentes normativas que deben tenerse en cuenta para realizar este proyecto.

4.5.1. Normativa Europea

DIRECTIVA 2010/75/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 24 de noviembre.

Con esta directiva quedan derogadas las Directivas 78/176/CEE, 82/883/CEE, 92/112/CEE, 1999/13/CE, 2000/76/CE y 2008/1/CE, modificadas por los actos enumerados en la parte A del anexo IX.

La presente Directiva establece normas sobre la prevención y el control integrados de la contaminación procedente de las actividades industriales. En ella se establecen normas para evitar o, cuando esto no sea posible, reducir las emisiones al medio ambiente, al agua o al suelo. Por otro lado, establece normas adicionales respecto a reducir la generación de residuos con el fin de alcanzar un ecosistema más limpio.

En primer lugar, como norma general para toda planta industrial, debe tenerse en cuenta el **Artículo 15.1** que indica donde deben ser tomados los valores de media para controlar las emisiones de gases de la planta: *“los valores límite de emisión de las sustancias contaminantes se aplicarán en el punto en que las emisiones salgan de la instalación, cualquier dilución antes de ese punto no se tendrá en cuenta al determinar esos valores”*.

Dicho esto, el análisis de la Directiva se centra en el **Capítulo IV** en el que se detallan las disposiciones especiales sobre las instalaciones de incineración y co-incineración de residuos. A efecto de las instalaciones incluidas en el ámbito de aplicación, en el cual se encuentra el proyecto en cuestión, se

incluirán según el **Artículo 42**: “*todas las líneas de incineración y co-incineración y las instalaciones de recepción, almacenamiento y pretratamiento in situ de los residuos*”. Como bien indica esta citación, se incluye en la línea de incineración cualquier sistema y equipo utilizado para la alimentación de residuos a la caldera y las instalaciones realizadas para el tratamiento de gases residuales, dispositivos y sistemas de control.

Seguidamente, en el **Artículo 46** se presentan todas las condiciones fundamentales para el control de emisiones. En primer lugar, los gases residuales de la instalación deben ser evacuados por una chimenea que tenga una altura considerable para que no se dañe la salud humana ni el medio ambiente. Seguidamente, las emisiones a la atmósfera no superarán los valores límite establecidos en las partes 3 y 4 del Anexo VI.

A continuación, se presentan los valores límite establecido. Todos los valores se calcularán a una temperatura de 273,15 K, una presión de 101,3 kPa y una previa corrección del contenido en vapor de agua de los gases residuales.

Tabla 4.5.1.1. Valores límite de emisión medios diarios para las siguientes sustancias contaminantes (mg/Nm³)

Partículas totales	10
Sustancias orgánicas en estado gaseoso y de vapor expresadas en carbono orgánico total (COT)	10
Cloruro de hidrógeno (HCl)	10
Fluoruro de hidrógeno (HF)	1
Dióxido de azufre (SO ₂)	50
Monóxido de nitrógeno (NO) y dióxido de nitrógeno (NO ₂), expresado como NO ₂ , para instalaciones de incineración de residuos existentes con capacidad nominal superior a 6 toneladas por hora o para instalaciones de incineración de residuos nuevas	200
Monóxido de nitrógeno (NO) y dióxido de nitrógeno (NO ₂), expresado como NO ₂ , para instalaciones de incineración de residuos existentes con capacidad nominal no superior a 6 toneladas por hora	400

Fuente: Directiva 2010/75/UE.

Tabla 4.5.1.2. Valores límite de emisión medios semihorarios para las siguientes sustancias contaminantes (mg/Nm³)

	(100 %) A	(97 %) B
Partículas totales	30	10
Sustancias orgánicas en estado gaseoso y de vapor expresadas en carbono orgánico total (COT)	20	10
Cloruro de hidrógeno (HCl)	60	10
Fluoruro de hidrógeno (HF)	4	2
Dióxido de azufre (SO ₂)	200	50
Monóxido de nitrógeno (NO) y dióxido de nitrógeno (NO ₂), expresado como NO ₂ , para instalaciones de incineración de residuos existentes con capacidad nominal superior a 6 toneladas por hora o para instalaciones de incineración de residuos nuevas	400	200

Fuente: Directiva 2010/75/UE.

Por último, una planta de incineración o co-incineración no podrá funcionar más de 4 horas ininterrumpidamente si, durante este mismo período, se superan los valores límites de emisión. En estas mismas condiciones, una instalación no podrá funcionar más de 60 horas anuales.

Una vez determinadas las condiciones fundamentales del control de emisiones, deben estudiarse las condiciones de explotación. En el **Artículo 50** se presenta una lista de estas. Inicialmente, las instalaciones de incineración de residuos se explotarán de modo que *“se obtenga un grado de incineración tal que el contenido de carbono orgánico total (COT) de las escorias y las cenizas sea inferior al 3% o su pérdida por combustión sea inferior al 5% del peso seco de la materia”*. Por otro lado, la temperatura de los gases derivados de la incineración o co-incineración de residuos también está delimitada *“tras la última inyección de aire de combustión, de manera controlada y homogénea, e incluso en las condiciones más desfavorables, hasta, como mínimo 850 °C, durante al menos 2 segundos”*. En el caso de que se incineren o conciernen residuos peligrosos *“que contengan más del 1% de sustancias organohalogenadas, expresadas en cloro, [...] la temperatura necesaria debe ser elevada, como mínimo, hasta 1100 °C”*. Como equipo de seguridad, todas las cámaras de combustión de una instalación de incineración de residuos deberán estar equipadas con un quemador auxiliar que, *“se pondrá en marcha automáticamente cuando la temperatura de los gases de combustión, tras la última inyección de aire de combustión, descienda por debajo de las temperaturas establecidas”*. Este mismo quemador también se utiliza para la puesta en marcha o parada de la instalación para poder mantener las temperaturas mientras haya residuos no incinerados en la cámara. Finalmente, en la medida de lo posible, el calor generado por la instalación de incineración o co-incineración deberá ser recuperado.

DECISIÓN EJECUCIÓN (UE) 2018/1147 DE LA COMISIÓN de 10 de agosto.

En la presente Decisión de ejecución se establecen las conclusiones sobre las mejoras técnicas disponibles (MTD) en el tratamiento de residuos, de conformidad con la Directiva 2010/75/UE del parlamento europeo y del Consejo.

En el único Anexo presente se pueden determinar las diferentes técnicas y maneras de mejorar el tratamiento fisicoquímico de residuos sólidos y pastosos, el tratamiento fisicoquímico de residuos con poder calorífico, a las emisiones a la atmósfera, al tratamiento de carbón activo usado y catalizadores usados y finalmente a la descontaminación de equipos que contienen PCB (Policlorobifenilos).

4.5.2. Normativa Española

Respecto a las normativas españolas vigentes se pueden encontrar principalmente aquellas que hacen referencia al impacto medio ambiental. El proyecto en cuestión debe adaptarse al contenido de la autorización ambiental y ajustarse a los requerimientos de las leyes aplicables.

LEY 20/2009, de prevención y control ambiental de las actividades.

La presente Ley tiene por objeto establecer el sistema de intervención administrativa de las actividades con incidencia ambiental, en el que se toman en consideración las afecciones sobre el medio ambiente y las personas. Este sistema de intervención administrativa integra la evaluación de impacto ambiental de las actividades.

Según el **Artículo 29**, una vez efectuada la verificación de la suficiencia y la idoneidad del estudio de impacto ambiental del proyecto, es preciso que la documentación de este se someta a información pública por un período de treinta días, mediante su publicación en el Diario Oficial de la Generalidad de Cataluña. En la publicación debe hacerse constar el derecho a todos los ciudadanos a acceder a toda la información disponible sobre el procedimiento ambiental. Seguidamente, el estudio de impacto ambiental se pone a disposición del ayuntamiento del municipio que a su vez debe someterlo a exposición pública.

Por otro lado, haciendo referencia al **Artículo 68.2**, la autorización y la licencia ambientales establecerán el régimen de control inicial y la modalidad, los plazos y los contenidos de los controles periódicos a que se somete el ejercicio de la actividad.

Real Decreto Legislativo 1/2016, de 16 de diciembre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de prevención y control integrados de la contaminación.

Esta ley, tiene por objeto evitar o, cuando ello no sea posible, reducir y controlar la contaminación de la atmósfera, mediante el establecimiento de un sistema de prevención y control integrados de la contaminación, con el fin de alcanzar una elevada protección del medio ambiente en su conjunto.

Respecto a los valores y límites de emisiones, en relación con la decisión de ejecución presentada anteriormente, el **Artículo 8.3** informa que los titulares de las instalaciones deberán notificar, una vez al año, a las comunidades autónomas en las que estén ubicadas, los datos sobre las emisiones correspondientes a la instalación. En los que se deberá especificar la metodología empleada en las mediciones, su frecuencia y sus procedimientos de evaluación.

Real Decreto Legislativo 815/2013, de 18 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento de emisiones industriales y el desarrollo de la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación.

Esta ley establece las disposiciones para evitar y, cuando ello no sea posible, reducir la contaminación provocada por las instalaciones de incineración y co-incineración de residuos, grandes instalaciones de combustión e instalaciones que producen dióxido de titanio.

Según el **Artículo 12**, una vez otorgada la autorización ambiental integrada, el titular dispondrá de un plazo de cinco años para iniciar la actividad, salvo que en la autorización se establezca un plazo distinto. Una vez iniciada la actividad, el órgano competente realizará una visita a la inspección de acuerdo con las prescripciones establecidas.

4.6. Descripción de la planta

La instalación que se desea realizar es una planta de incineración de residuos varios con recuperación energética y sistema de tratamiento de gases. En ella se llevarán a cabo una serie de procesos de tratado para reducir el volumen de residuos y aprovechar la energía generada en la combustión para generar energía térmica la cual será enviada a la planta de producción.

A continuación, se presenta el esquema general separado en tres fases.

Inicialmente se realizarán los procesos de incineración, dónde se procurará introducir el combustible correctamente al horno rotatorio mediante un alimentador específico. Los gases a alta temperatura que se hayan generado seguirán su camino hacia la cámara de oxidación, y cámara de postcombustión.

Seguidamente, una vez estos gases han adquirido la temperatura adecuada serán dirigidos al intercambiador de calor en el que se obtendrá aire a alta temperatura el cual se utilizará directamente en la planta de producción.

Por último, en la fase final se procede a realizar todos los tratamientos de gases necesarios para cumplir con la normativa de emisiones. Estos gases serán mezclados con carbón activo e hidróxido cálcico para reducir las propiedades no deseadas y finalmente pasarán por un proceso de filtrado para eliminar todos los compuestos volátiles.

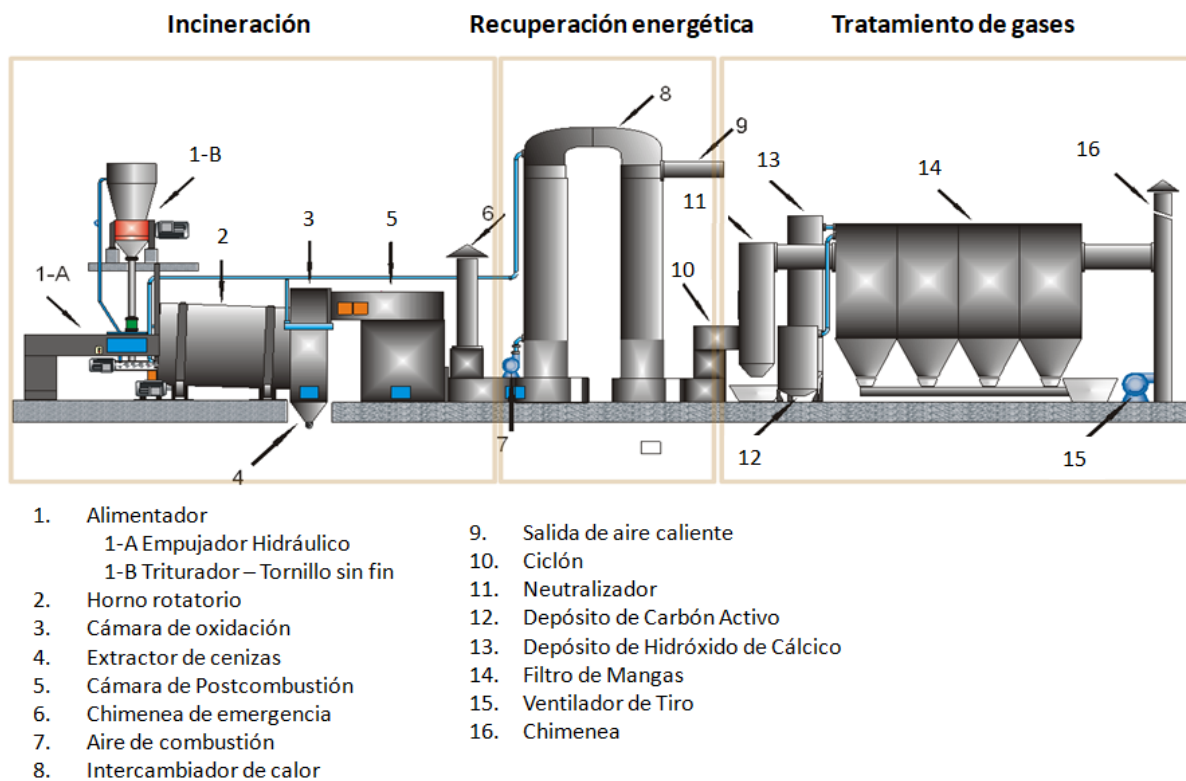


Gráfico 4.6.1. Esquema general de la planta

Fuente: Termosun Energías.

5. Dimensionamiento de la planta

5.1. Almacenamiento

Después de haber hecho todo el proceso de gestión y separación de materia orgánica y residuo, este último debe ser transportado a una zona para ser almacenado a su previa utilización como combustible.

El almacenamiento y la posterior manipulación del combustible del cual se requiere para la generación de energía térmica, deben tener una buena planificación para evitar múltiples secuencias de encendido y enfriamiento que pueden producirse por los cambios de carga en la red.

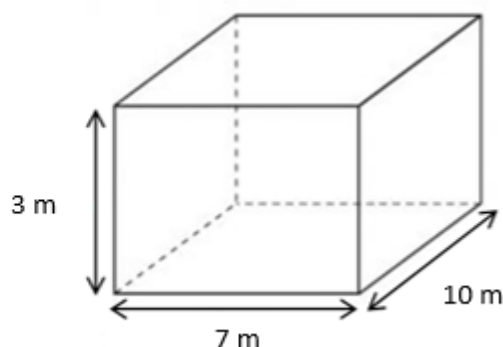
La primera opción para almacenar el combustible es un depósito fijo situado estratégicamente en la planta. Este debe estar lo suficientemente cerca del sistema de alimentación para evitar realizar largos recorridos. En el caso de que no sea posible, esto se puede compensar con un contenedor móvil.

En función de las prestaciones e intereses de la empresa se hará el dimensionamiento del almacenamiento. En este caso deben tenerse en cuenta la densidad media de los materiales y los días de funcionamiento requeridos de la planta para poder evitar inconvenientes.

Dicho esto, si se considera que la empresa trabaja las 24 horas del día y que el factor de seguridad aplicado es de 5 días de funcionamiento se obtiene un depósito de almacenamiento con las siguientes dimensiones.

Tabla 5.1.1. Dimensionamiento de un depósito de almacenamiento fijo

Volumen TOT	210	m³
Longitud	10	m³
Anchura	7	m³
Altura	3	m³



Fuente: Elaboración propia.

5.2. Incineración

5.2.1. Alimentador

Como bien se ha indicado en el esquema general previamente presentado se presenta la posibilidad de incorporar al proceso de incineración dos métodos de alimentación.

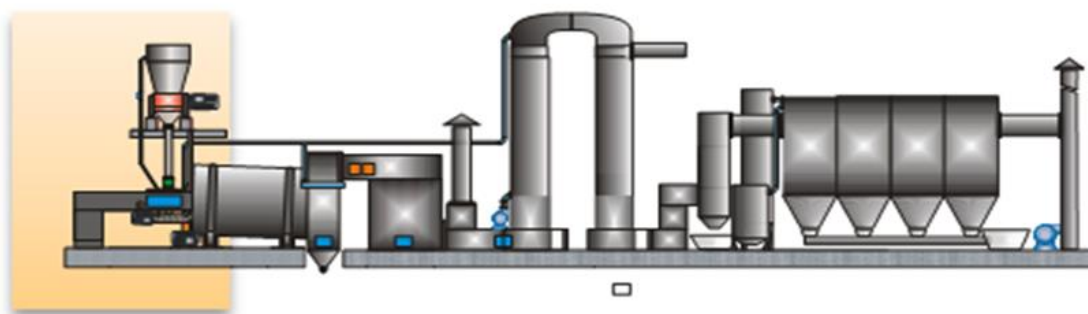


Figura 5.2.1.1. Etapa de alimentación al proceso de incineración

Fuente: Termosun Energías.

5.2.1.1. Empujador hidráulico

Inicialmente, mediante un pulpo o una grúa, debe cargarse el residuo en una tolva de alimentación. Se trata principalmente de un dispositivo con una forma similar a un embudo de gran tamaño utilizado para depositar temporalmente los materiales. Esta tiene unas válvulas de abertura y cierre en su parte superior e inferior lo que permite dosificar la cantidad de materiales que serán inyectados en el incinerador. La instalación y el control se realizarán para que trabaje juntamente con la automatización del horno.

A continuación, se muestra una imagen de cómo es una tolva de alimentación de residuos



Imagen 5.2.1.1.1. Tolva de alimentación de residuos sólidos.

Fuente: Catálogo Binder.

Seguidamente, se utiliza un empujador hidráulico para la introducción directa del combustible a la cámara de combustión. Una vez el combustible ha sido cargado en la tolva, la tapa de esta se cierra y se abre una válvula de guillotina en la puerta de alimentación del incinerador. Las alas montadas en la biela rígida hidráulica introducen el combustible dentro de la cámara de combustión. Las cuchillas que llevan incorporadas cortan las partes que sobresalen del combustible y garantizan una protección mecánica. Para poder asegurar una protección contra el desplazamiento de llamas hacia la tolva, la puerta de carga se cierra con el cierre de la válvula de guillotina y posteriormente se abre la tapa de la tolva de alimentación para volver a empezar el ciclo. Un extintor de agua automático y un termostato son equipos adicionales para la seguridad del sistema. Este tipo de alimentador se utiliza cuando se desea introducir combustibles de tamaño mediano grande a la cámara de combustión.

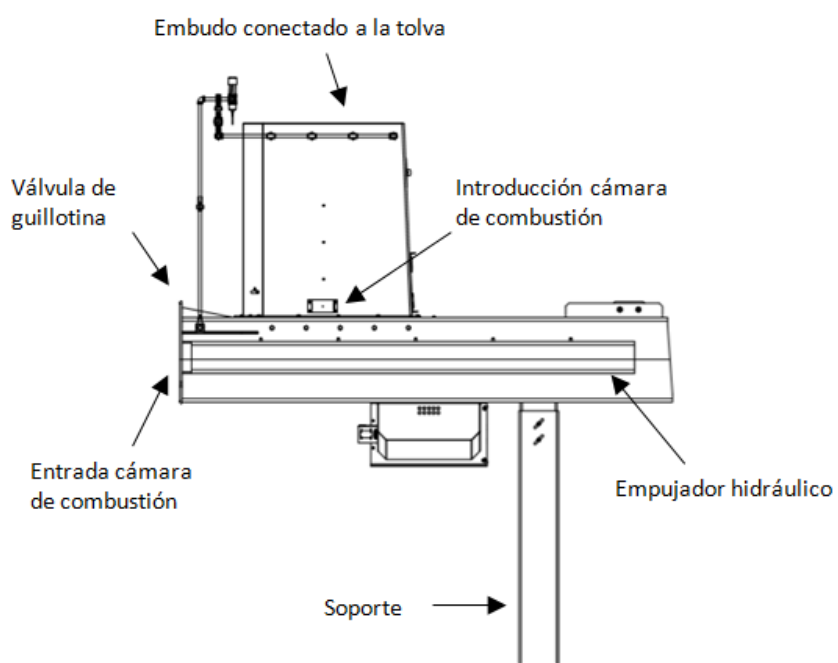


Figura 5.2.1.1.1. Funcionamiento de un empujador hidráulico

Fuente: Termosun Energías.

Para tener un concepto de la forma y el tamaño de este equipo se muestran una serie de fotografías.



Imagen 5.2.1.1.2. Conjunto de fotografías de empujadores hidráulicos

Fuente: Termosun Energías.

5.2.1.2. Tornillo sinfín

El segundo método implementado para la alimentación de combustible es un tornillo sinfín. El residuo previamente triturado es introducido directamente a la cámara de combustión. El material se introduce en la caldera con los tiempos de ciclos predeterminados.

El sistema utilizado no es muy complejo, el transportador se pone en funcionamiento a través de un motor-reductor y le suministra el movimiento al tornillo sinfín de alas helicoidales el cual va montado en unos cojinetes. La carga se realizará por un extremo en la parte superior y la descarga se realizará por la parte inferior del otro extremo.

Este sistema es utilizado en el caso de que el combustible a transportar sea de pequeñas dimensiones, si se introducen residuos de gran tamaño podría producirse un bloqueo o dañar el conducto de circulación.

En la figura y en el conjunto de imágenes siguientes se puede observar el funcionamiento del equipo y la entrada y salida del combustible.

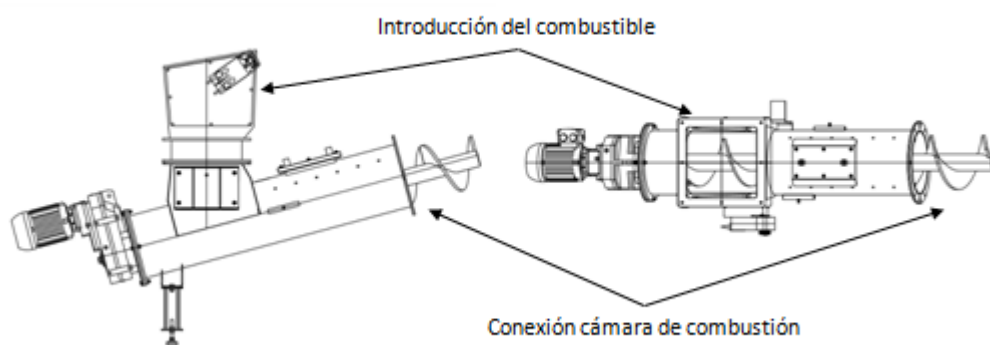


Figura 5.2.1.2.1. Funcionamiento de un tornillo sinfín

Fuente: Termosun Energías.



Imagen 5.2.1.2.1. Conjunto de fotografías de un tornillo sinfín transportador

Fuente: Catálogo Binder.

Como norma general, el empujador hidráulico sería suficiente para realizar la etapa de introducción de combustible a la cámara de combustión. Teniendo en cuenta que el combustible utilizado no es siempre el mismo y que puede variar sus cualidades y su poder calorífico de manera considerable, se ha planteado la opción de incorporar un alimentador de tornillo para introducir un combustible adicional en el caso de que sea necesario. Un ejemplo es la utilización de poso de café como combustible de mezcla. Introduciendo las cantidades específicas y necesarias se modifican las características del combustible final obteniendo así un funcionamiento óptimo de la planta.

5.2.2. Módulo de combustión

Seguidamente se presentan todos los procesos necesarios en el sistema de combustión una vez el combustible ha sido introducido. En primer lugar, se presentará el tipo de horno escogido y su principal funcionamiento, en segundo lugar, se hará una breve descripción del extractor de cenizas, seguidamente se explicarán la función de la cámara de oxidación y de la cámara de post combustión para finalmente definir la función de los ventiladores de aire de combustión.

5.2.2.1. Horno rotativo

En la planta siguiente se ha decidido utilizar un horno rotativo para realizar la primera fase de la destrucción térmica del residuo.

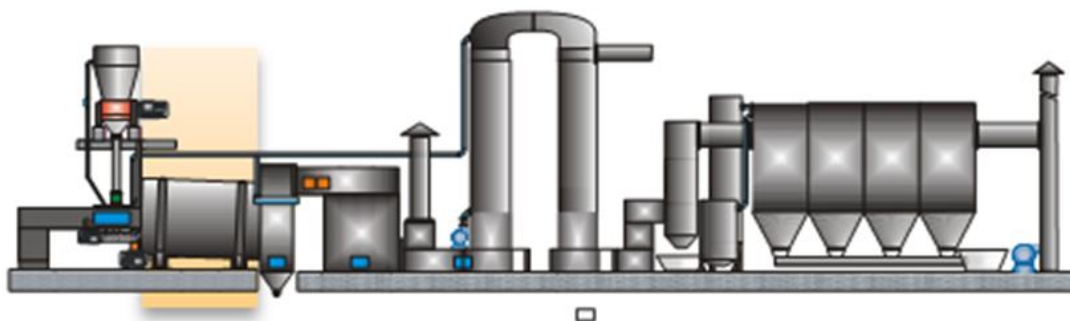


Figura 5.2.2.1.1. Etapa de combustión en el horno rotatorio

Fuente: Termosun Energías.

El horno es la cámara donde se vaporiza o gasifica el residuo. Es evidente que una parte importante de la combustión se generará en el interior del horno, de lo contrario, la temperatura generada puede ser insuficiente para mantener el nivel térmico requerido.

Por lo tanto, es necesario realizar una buena elección del tipo de horno que se desea utilizar. En el mercado existen una gran variedad de tecnologías y maquinarias. A continuación, se presentan los hornos más usuales:

- ❖ **Horno de parrilla:** Son los más conocidos y extendidos debido a su empleo en el tratamiento de RSU (Residuos Sólidos Urbanos) por su versatilidad y capacidad de tratamiento.
- ❖ **Horno de lecho fluido:** Este tipo de horno se utiliza para el tratamiento de materiales conflictivos, con un PCI bajo o diferencias de tamaño en el combustible.
- ❖ **Horno para líquidos:** Son reactores cilíndricos, en disposición vertical u horizontal con revestimiento de material refractario en su interior y equipados con uno o más quemadores.
- ❖ **Horno rotatorio:** Este tipo de horno es muy versátil y es apto para trabajar con materiales sólidos, fangosos e incluso líquidos.

Como se puede ver, la forma física del residuo es uno de los factores más importantes para la elección de un tipo de horno u otro. Mediante la tabla siguiente se ha podido tomar la decisión final.

Tabla 5.2.2.1.1. Idoneidad del tipo de horno de acuerdo con el residuo introducido

Tipo de residuo	Tipo de horno			
	Parrilla	Lecho fluido	Líquidos	Rotativo
Homogéneo	X	X		X
Sólido bajo punto de fusión		X	X	X
A granel voluminoso				X
Líquidos orgánicos				X
Fangos con carga halógena				X
Fangos orgánicos		X		X
Fangos con carga halógena			X	X
Viscosos				X

Fuente: Elaboración propia.

Analizando la tabla y comparando los resultados recibidos por el laboratorio se ve claramente que el único horno que podría funcionar correctamente es el horno rotativo ya que se desea introducir residuos voluminosos a granel. Por otro lado, la mayoría de los residuos son componentes plásticos y en cuando llegan al punto de fundición tienen una textura viscosa y pegajosa. En otros hornos como por ejemplo el de Parrilla, podría bloquear algún funcionamiento mecánico y provocaría una parada de la planta.

Principio de funcionamiento

Los incineradores de horno rotatorio están formados por una cámara de combustión cilíndrica recubierta de refractarios diseñados para asegurar la mayor resistencia térmica y contra el desgaste a la temperatura de operación, con un aislamiento en la superficie exterior e interior. Por otro lado, cuentan con una leve inclinación horizontal y una velocidad de rotación sobre su eje lo que permite que los residuos que se introducen por el extremo más elevado se desplacen a través del horno hasta ser descargados en el otro extremo. Este método admite una descarga continua de las cenizas durante la operación de este, permitiendo al mismo tiempo una homogenización de los residuos en la cámara de combustión y una combustión completa de todos los materiales introducidos.

En el gráfico presentado a continuación se puede observar como en la parte final del cilindro, al lado de la evacuación de cenizas, se dispone un quemador de soporte que utiliza combustibles con alto poder calorífico como por ejemplo el gas natural. Activando el quemador de soporte e introduciendo un ligero defecto de aire se obtiene una combustión entre pirolítica y de gasificación del residuo. Este equipo es necesario para controlar la ignición y obtener las temperaturas deseadas en el encendido inicial. Una vez se han conseguido las condiciones de llama requeridas, el quemador de soporte se detiene.

El aire de combustión, en condiciones inferiores a las estequiométricas, se introduce mediante un ventilador ubicado al lado del quemador para permitir una mezcla adecuada con el residuo y los gases

generados. El objetivo es oxigenar todas las partes de la cámara adecuadamente produciéndose una oxidación parcial uniforme. A este aire se le denomina aire primario.

El horno rotatorio funciona acorde con el principio de contraflujo, es decir, los residuos sólidos y las cenizas se mueven en dirección opuesta a los gases de combustión. Mientras la incineración del residuo está en proceso, éste rota muy lentamente, lo que garantiza una buena mezcla de los materiales y maximiza las superficies quemadas.

Los gases procedentes del lecho de combustión tienen un promedio de gases inadecuados en torno al 20-30%. En condiciones normales de funcionamiento, la temperatura que se adquiere en el interior de la cámara primaria de combustión varía de 700°C a 800°C. Esta se puede ajustar regulando el aire de introducción por el ventilador primario.

Para adquirir tales temperaturas el combustible debe pasar por diferentes estados. Inicialmente, una vez el combustible ha sido introducido en el horno adquiere una temperatura entre 100°C y 250°C. Estas condiciones permiten realizar un secado previo. Seguidamente, con el desplazamiento, el residuo va adquiriendo más temperatura hasta alcanzar aproximadamente los 600°C. A esta temperatura empiezan a desprenderse los gases y se puede apreciar una combustión de destilados volátiles. Por último, se realiza una combustión generalizada de la masa de combustible obteniendo una temperatura de 800°C. En esta última etapa de la combustión es cuando se forman las escorias y las cenizas.

Por último, el sistema motriz está basado en dos reductores de velocidad síncronos en un solo eje que accionan las ruedas motrices sobre las que se apoyan las bandas de rodadura de la cámara rotatoria.

En la figura siguiente se indican las diferentes partes que forman un horno rotativo y la circulación a contraflujo del combustible y de los gases de combustión.

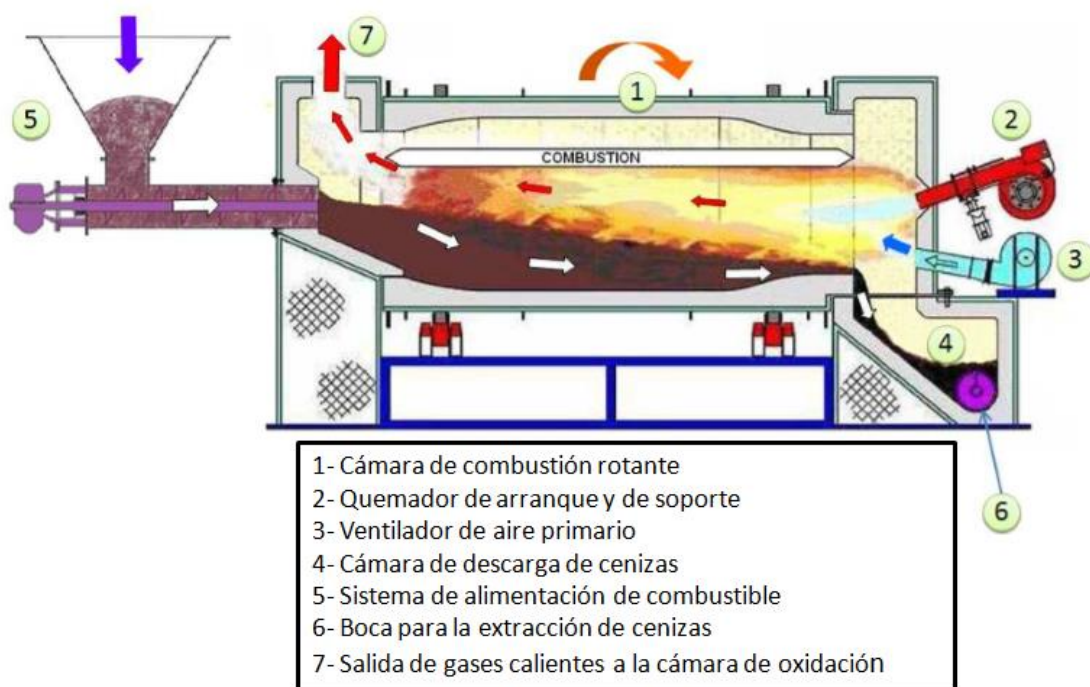


Figura 5.2.2.1.2. Funcionamiento de la cámara de combustión

Fuente: Termosun Energías.

5.2.2.2. Extractor de cenizas

Seguidamente se expone el proceso de extracción de cenizas.

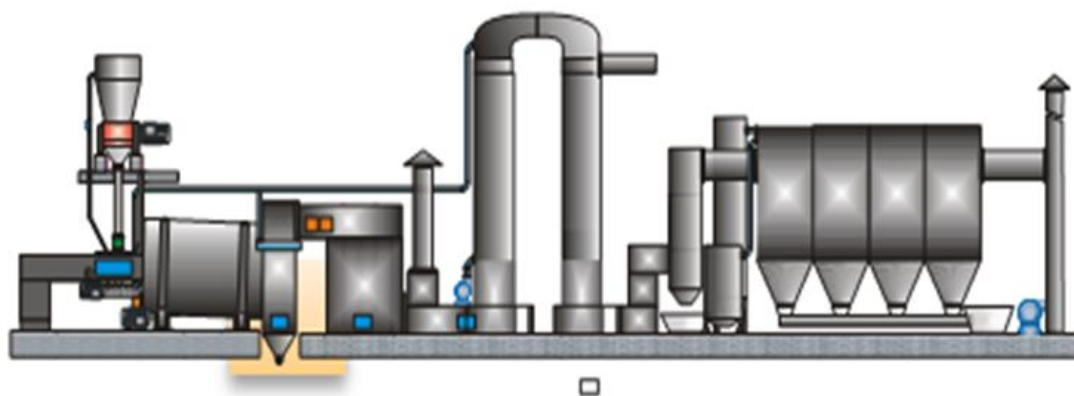


Figura 5.2.2.2.1. Etapa de extracción de cenizas

Fuente: Termosun Energías.

La combustión en el interior de la cámara se realiza de forma controlada. Cuando los residuos se han convertido en cenizas y llegan al final de la cámara de combustión primaria se descargan en el cenicero de forma continua. Estas caen a un depósito lleno de agua para ser enfriadas y minimizar cualquier riesgo. Posteriormente se transportan a un contenedor mediante una draga extractora.

A continuación, se muestra la draga transportadora y el contenedor final de cenizas. Como se puede observar este último tiene unas ruedas localizadas en la parte inferior para poder trasladar las cenizas a un contenedor final y facilitar el transporte y la descarga.

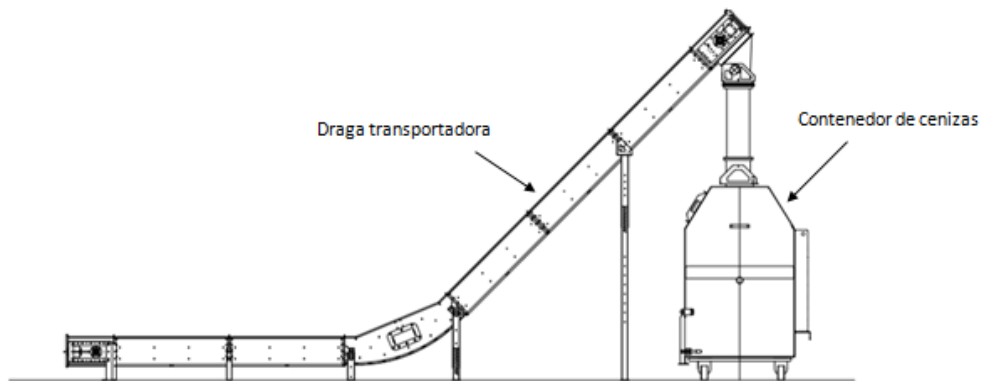


Figura 5.2.2.2.2. Etapa de extracción de cenizas

Fuente: Termosun Energías.

5.2.2.3. Cámara de oxidación

El objetivo de esta etapa del proceso es proporcionar el exceso de aire necesario para la completa oxidación y destrucción térmica de los compuestos presentes en la corriente de gases.

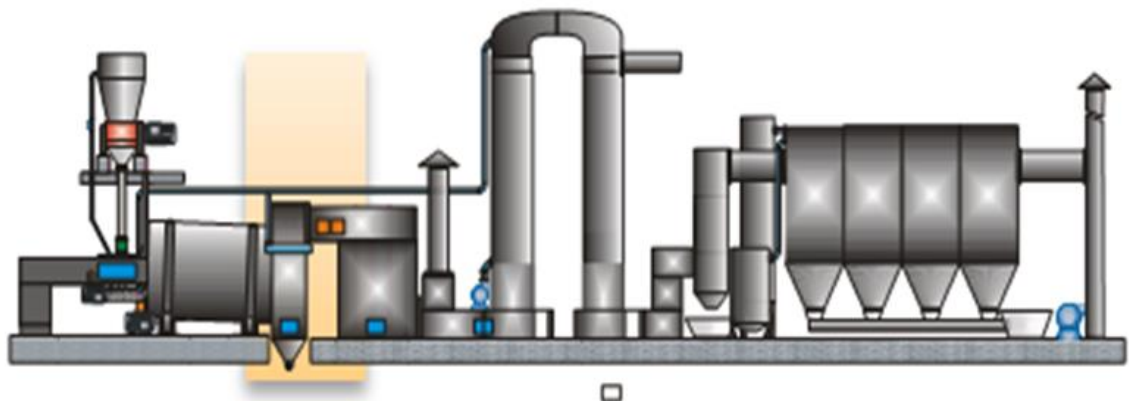


Figura 5.2.2.3.1. Etapa de oxidación

Fuente: Termosun Energías.

Los productos volátiles, es decir, gases de vapor con compuestos no deseados y partículas orgánicas que no se han quemado resultantes del proceso térmico que se realiza en la cámara de combustión, se introducen en una cámara de oxidación donde se realiza una inyección de aire adicional. Este aire secundario es introducido mediante unas boquillas que están distribuidas y orientadas de manera que se realice una turbulencia entre el aire inyectado y la corriente de gases. Con este proceso se logra aumentar la temperatura debido a la exotérmica de las reacciones de oxidación.

La cantidad de aire introducido en esta etapa debe ser el mínimo necesario para asegurar la destrucción térmica de los compuestos no deseados.

5.2.2.4. Cámara de postcombustión

En esta cámara se realiza la segunda fase de destrucción térmica de compuestos volátiles.

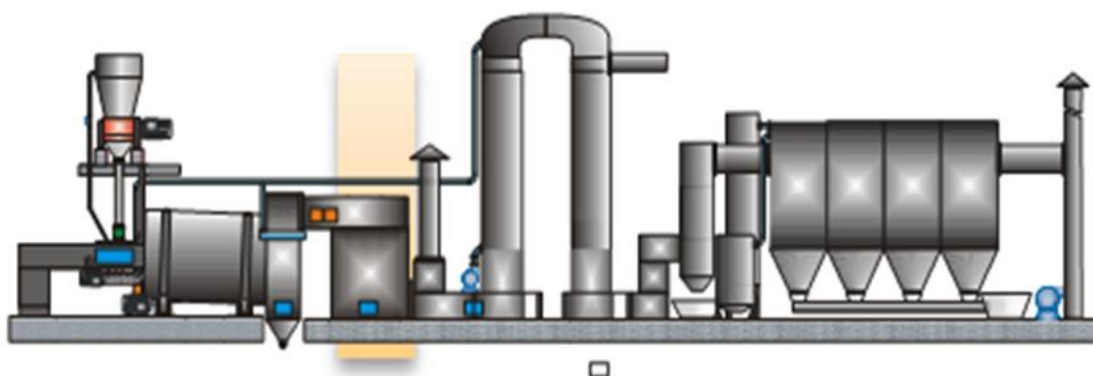


Figura 5.2.2.4.1. Etapa de postcombustión

Fuente: Termosun Energías.

Una vez los gases han recibido el tratamiento en la cámara de oxidación en la que se ha introducido el aire secundario necesario, estos pasan a una cámara de postcombustión con el fin de destruir todos los compuestos restantes. Este proceso tiene que estar diseñado para garantizar un valor mínimo de los siguientes parámetros:

- ❖ Temperatura
- ❖ Tiempo de residencia
- ❖ Turbulencia
- ❖ Contenido de oxígeno

La alta eficiencia de oxidación se logra de la manera siguiente:

- ❖ La temperatura se regula mediante el control del caudal de gases en la entrada de la cámara de oxidación. El objetivo es asegurar una temperatura en la cámara de postcombustión de 1.100 °C.
- ❖ El tiempo de residencia se asegura mediante las dimensiones y geometría de la cámara. En todas las condiciones de operación el tiempo de residencia de los gases de combustión debe ser superior a 2 segundos a una temperatura mínima de 850°C.
- ❖ Como bien se ha comentado en el apartado de oxidación, la turbulencia entre el aire y los gases es importante. Esta mezcla se asegura mediante la disposición de las boquillas y un diseño adecuado de la sección de entrada a la cámara de postcombustión.
- ❖ El último aspecto importante a tener en cuenta es el contenido en oxígeno. Debe asegurarse que hay un contenido mínimo de 6% de oxígeno. Este se indica y se controla mediante un analizador de O₂.

Las condiciones establecidas para asegurar la alta eficiencia de oxidación vienen marcadas por las directivas de la CEE (Comisión Económica Europea) que impone unas condiciones determinadas en el caso de la incineración de residuos. El objetivo de estas restricciones es impedir la expulsión de gases con un alto contenido de componentes inadecuados y asegura el buen funcionamiento de la instalación.

5.2.2.5. Ventilador de combustión

El propósito de esta etapa es aportar el oxígeno necesario para la oxidación del residuo.

En la explicación del funcionamiento de la cámara de combustión y oxidación se ha mencionado que existe una aportación de aire. En la cámara de combustión, el aire primario será el encargado de suministrar el oxígeno necesario para la combustión correcta de los residuos.

La distribución de este se hace de la manera siguiente: En primer lugar, se introducirá aire en la zona central, a bajas velocidades para asegurar una buena mezcla con los gases de combustión. Seguidamente, se introducirán boquillas de aire a alta velocidad en las zonas laterales para crear las corrientes encargadas de transportar los gases. Por último, se introducirán una serie de boquillas en la zona de descarga de cenizas para facilitar la expulsión de estas de la cámara de combustión y evitar cualquier posible colapso.

Por otro lado, el aire secundario introducido en la cámara de oxidación suministra el oxígeno necesario para completar la combustión producida en el horno. Este es introducido con unas boquillas a alta velocidad que generan una turbulencia elevada para favorecer la combustión completa.

Tanto el aire primario como secundario se precalientan en el intercambiador de calor antes de ser introducidos a la cámara de combustión y oxidación respectivamente. Dos ventiladores centrífugos se encargan de aportar estos aires a velocidades adecuadas.

A continuación, se muestran dos tipos de ventiladores que pueden ser utilizados.

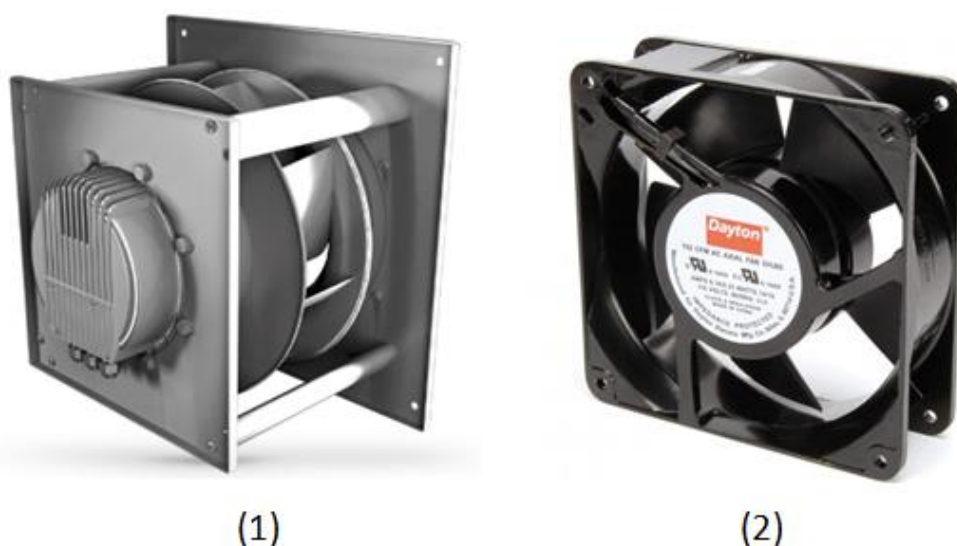


Figura 5.2.2.5.1. (1) Ventilador con aspas curvadas hacia atrás. (2) Ventilador con álabes de punta radial.

Fuente: Proveedores industriales.

5.2.3. Chimenea de emergencia

El propósito de ubicar una chimenea de emergencia seguido de la cámara de postcombustión es para poder evacuar los gases calientes directamente a la atmósfera sin dañar el sistema de enfriamiento y la depuración de gases.

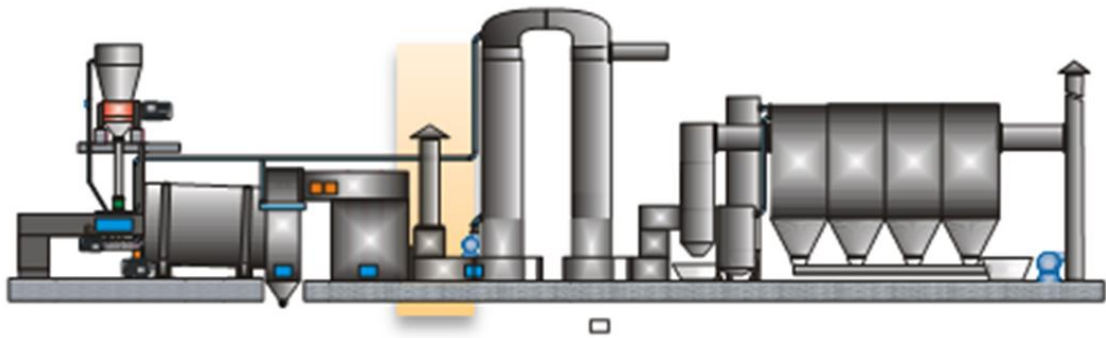


Figura 5.2.3.1. Etapa en caso de emergencia

Fuente: Termosun Energías.

A la salida de la cámara de postcombustión existe una válvula de mariposa que se abre de forma automática en caso de emergencia. Esto puede ser debido a una mala praxis de alimentación de combustible o de aire, o bien por un fallo en el suministro de energía eléctrica que provoquen un aumento excesivo de la temperatura de los gases a la entrada del intercambiador o en el sistema de depuración.

En estos casos, los gases calientes son conducidos directamente al exterior por medio de una chimenea de emergencia. Si esta entra en servicio por el motivo que sea, la alimentación se interrumpe inmediatamente y la línea de incineración entra en parada segura de forma automática.

A continuación, en la figura siguiente se pueden observar el sistema que forman la cámara de oxidación con el ventilador secundario, la cámara de postcombustión y la chimenea de emergencia.

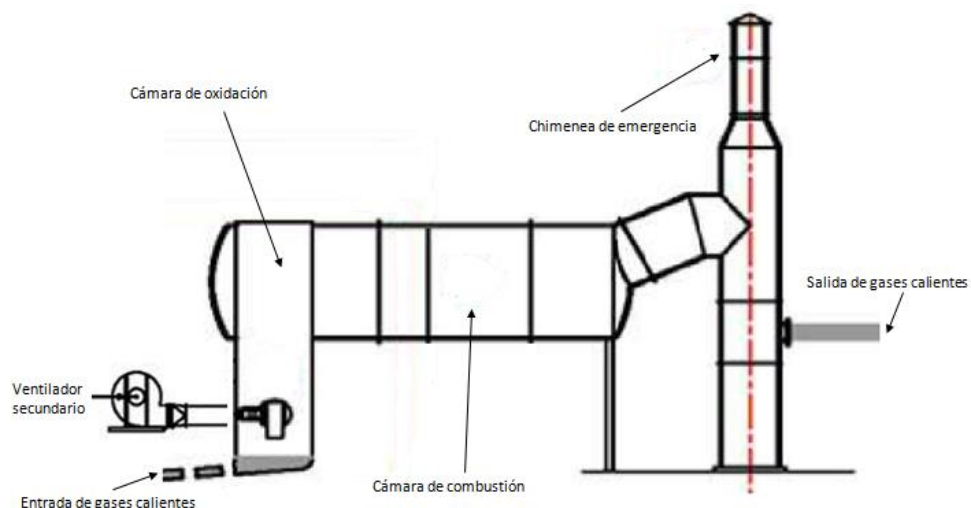


Figura 5.2.3.2. Cámara de oxidación, cámara de postcombustión y chimenea de emergencia interconectados

Fuente: Termosun Energías.

Como se puede ver, los gases de combustión entran en la cámara de oxidación por la parte inferior, dónde se incorpora aire con el ventilador secundario. Seguidamente, la mezcla de gases y aire se desplazan hacia la cámara de postcombustión para realizar un compuesto homogéneo y reducir al máximo los gases inadecuados. Por último, como norma general los gases calientes son dirigidos a la siguiente etapa, es decir, al intercambiador de calor. En caso de que se produzca algún fallo técnico se abrirá la válvula de la chimenea de emergencia para expulsar los gases calientes generados y evitar cualquier tipo de afección a los equipos utilizados para las etapas posteriores.

Acorde con todos los equipos presentados se muestra una figura en la que se engloba la conexión de la cámara de combustión, la cámara de oxidación y la cámara de postcombustión.

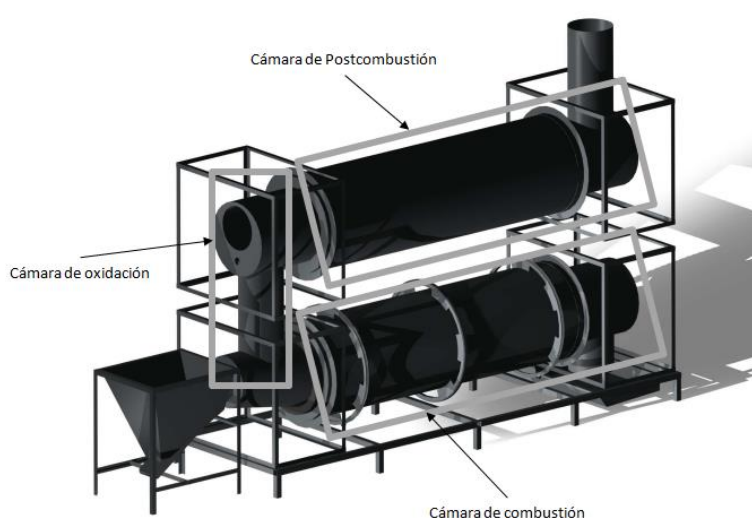


Figura 5.2.3.3. Incineración de residuos con horno rotativo

Fuente: Termosun Energías.

A continuación, se muestra una tabla en la que se recoge el dimensionamiento del módulo de combustión.

Tabla 5.2.3.1. Recolección de datos del módulo de combustión

CÁMARA DE COMBUSTIÓN		
Temperatura de trabajo	600-800	°C
CÁMARA DE POSTCOMBUSTIÓN		
Temperatura de trabajo	1000-1200	°C
Contenido de oxígeno	6	%
Tiempo de residencia	2	s

Fuente: Elaboración propia.

5.3. Recuperación energética

La planta se complementará con una etapa para la recuperación de energía térmica que se utilizará para calentar el aire del proceso de secado. Como bien se ha indicado en apartados anteriores, la empresa en cuestión tiene una demanda de energía térmica muy elevada debido a la gran demanda de los procesos de secado de la materia orgánica. De esta manera, además de reducir las cantidades de residuos sólidos acumulados, también se reduce el consumo de energía térmica.

En este caso se instalará un intercambiador de calor para transmitir la energía térmica contenida en los gases de alta temperatura a aire. Este último estará inicialmente a temperatura ambiente (aproximadamente 25 °C) y se aumentará su temperatura hasta la requerida por los procesos de la fábrica (temperatura del aire caliente a 450 °C).

Adicionalmente, como los gases de salida seguirán estando a alta temperatura, se utilizarán para precalentar el aire de combustión introducido en la cámara de combustión y en la cámara de oxidación.

Por consiguiente, el intercambiador estará formado por un área de intercambio entre los gases a alta temperatura y el aire requerido para los procesos de secado y una segunda área en la que se calentará el aire de combustión.

5.3.1. Intercambiador de calor

Una vez los gases han salido de la cámara de postcombustión, pasan directamente al intercambiador de calor. El propósito de esta etapa es enfriar los gases y, a su misma vez, entregar energía al aire que se utilizará como aire secante en los procesos de producción de la empresa.

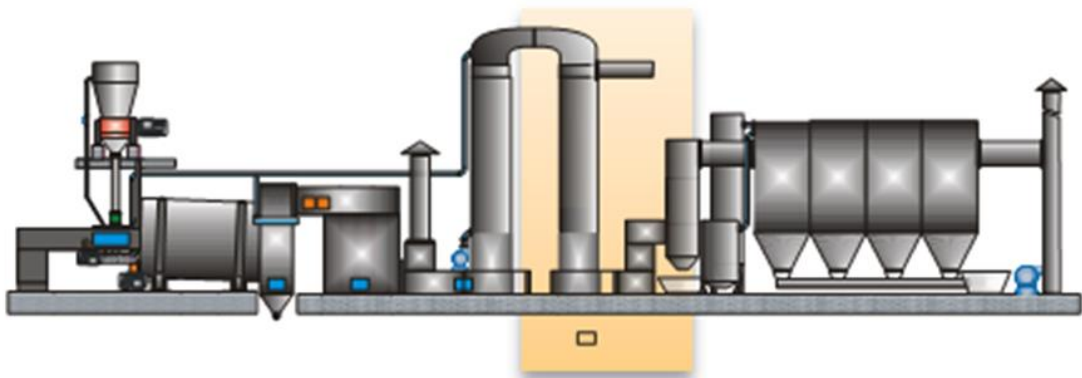


Figura 5.3.1.1. Etapa de intercambio entre los gases y aire

Fuente: Termosun Energías.

Un intercambiador de calor es uno de los equipos más utilizados a nivel de instalaciones térmicas, tanto a nivel edificatorio, terciario como industrial. Como bien se ha comentado, un intercambiador de calor es un equipo diseñado para transferir calor entre dos fluidos. Estos dos fluidos pueden ser líquidos o gases y pueden estar en contacto o separados por un material sólido.

5.3.1.1. Tipos de transferencia de calor

Entre los diferentes tipos de transferencia de calor están la conducción, la convección y la radiación. En todo caso puede aplicarse un solo método o bien una combinación de ellos.

- ❖ **Conducción:** Cuando en un medio sólido existe un gradiente de temperatura, el calor se transmite de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura. Por consiguiente, si se calienta una placa por un lado y el otro está frío, el calor fluirá a través de la placa desde el lado caliente al lado frío. Para tener una buena eficiencia en el proceso de intercambio el material entre ellos tiene que ser buen conductor. Los materiales como la plata o el metal tienen altas conductividades, en cambio, materiales como el amianto tienen una conductividad baja.

- ❖ **Convección:** La convección es el mecanismo de transferencia de calor por movimiento de masa o circulación dentro de la sustancia. Puede ser natural, producida solo por las diferencias de densidades de la materia o forzada, cuando la materia es obligada a moverse de un lugar a otro. Un ejemplo básico es el desplazamiento del aire con un ventilador. El movimiento del fluido mejora la transferencia de calor, ya que pone en contacto porciones más calientes con porciones más frías del fluido.

- ❖ **Radiación:** La radiación térmica es energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura dada. Esta transferencia se produce desde la fuente hacia afuera en todas las direcciones. A diferencia de la conducción y la convección, o de otros tipos de ondas, la radiación electromagnética es independiente de la materia para su propagación.

Para el caso de estudio se aplicará el tipo de transferencia de calor mediante conducción. No existirá ningún tipo de contacto ni desplazamiento apreciable de partículas de un cuerpo a otro, cosa muy importante ya que uno de los fluidos está altamente contaminado.

5.3.1.2. Tipos intercambiadores según su construcción

Por otro lado, existen diferentes tipos de intercambiadores de calor, los cuales varían dependiendo de la configuración geométrica del flujo y el tipo de construcción.

A continuación, se presentan los tres tipos de configuraciones de flujo posibles

Flujo paralelo

Se presenta un intercambio de flujo en paralelo, cuando los dos fluidos se mueven en la misma dirección, entrando por el mismo extremo del intercambiador. En esta configuración, la temperatura de salida de los fluidos se aproxima la una de la otra, pero el fluido frío nunca alcanzará la temperatura del fluido caliente.

En la figura siguiente se puede observar como la dirección de los dos flujos va de izquierda a derecha y que las temperaturas de los dos flujos nunca llegan a ser las mismas.

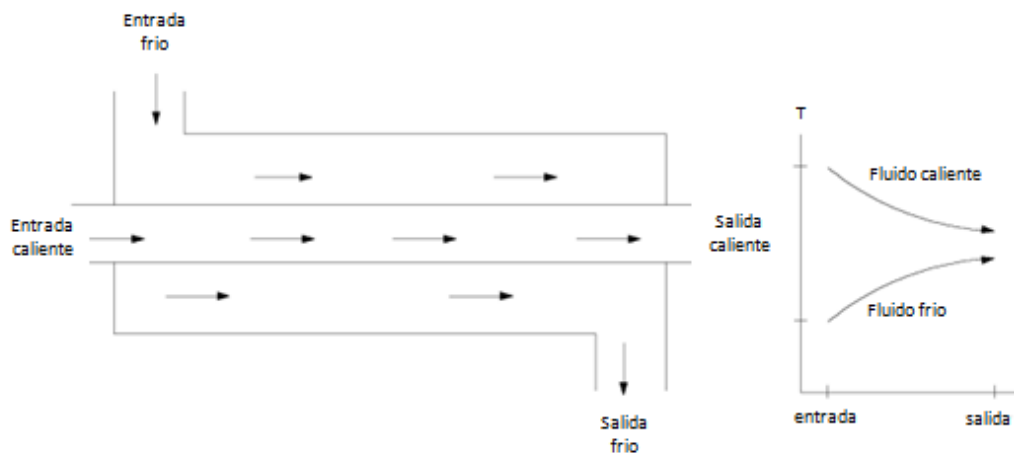


Figura 5.3.1.2.1. Perfil de temperaturas y configuración de flujo paralelo

Fuente: Universidad Nacional Autónoma de México.

Flujo contracorriente

Seguidamente, se presenta un flujo en contracorriente cuando los dos fluidos entran al intercambiador por extremos opuestos moviéndose en direcciones contrarias. A diferencia del intercambiador de calor de flujo paralelo, en la figura siguiente se puede ver como en un intercambiador a contracorriente se puede presentar la temperatura más alta en el fluido frío y la más baja temperatura en el fluido caliente una vez realizada la transferencia de calor en la salida del equipo.

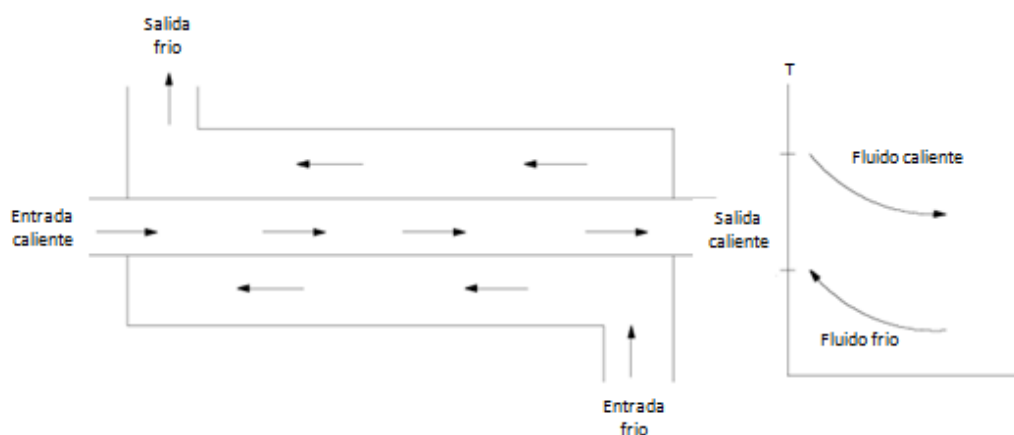


Figura 5.3.1.2.2. Perfil de temperaturas y configuración de flujo contracorriente

Fuente: Universidad Nacional Autónoma de México.

Flujo cruzado

En este caso, uno de los fluidos fluye de manera perpendicular al otro fluido. Dicho de otro modo, uno de los fluidos fluye por el interior de los tubos mientras que el otro pasa alrededor de dichos tubos formando un ángulo de 90° . Los intercambiadores de flujo cruzado se utilizan normalmente cuando uno de los dos fluidos presenta un cambio de fase. Un ejemplo típico sería un intercambiador para un sistema de condensación de vapor.

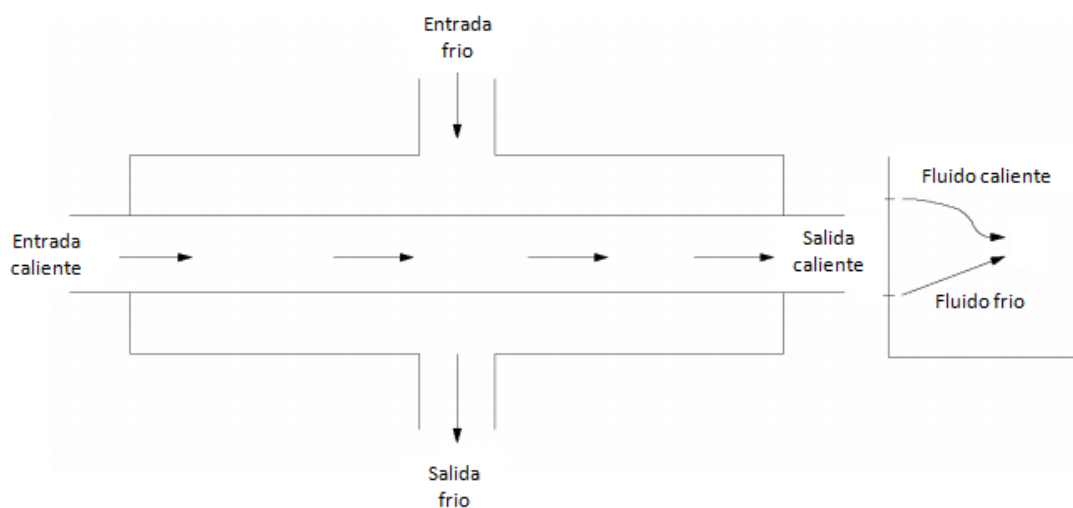


Figura 5.3.1.2.3. Perfil de temperaturas y configuración de flujo cruzado

Fuente: Universidad Nacional Autónoma de México.

En la actualidad, la mayoría de los intercambiadores de calor no son puramente paralelos a contracorriente o cruzados, estos son comúnmente una combinación de dos o tres tipos.

Como el objetivo es realizar un intercambio entre un fluido a muy alta temperatura y otro a temperatura ambiente, la configuración más viable y adecuada es la de los flujos a contracorriente. Con posibilidad de aplicar algún elemento para crear a la vez un flujo cruzado. De esta manera el intercambio de calor sería mucho más eficiente.

Una vez determinada la configuración de la geometría del flujo, deben estudiarse las diferentes tecnologías y tipos de construcciones existentes para determinar aquella que encaje más con las necesidades del proyecto.

Intercambiadores concéntricos

Se trata del tipo más simple de intercambiador de calor, consta de dos tubos concéntricos de diámetros diferentes ensamblados uno dentro del otro. En este tipo de dispositivos el fluido caliente pierde calor entrando al intercambiador por el tubo interno y, a su vez, el fluido frío adquiere calor pasando por la sección anular. Están principalmente compuestos por horquillas las cuales son arreglos de tubos en forma de U.

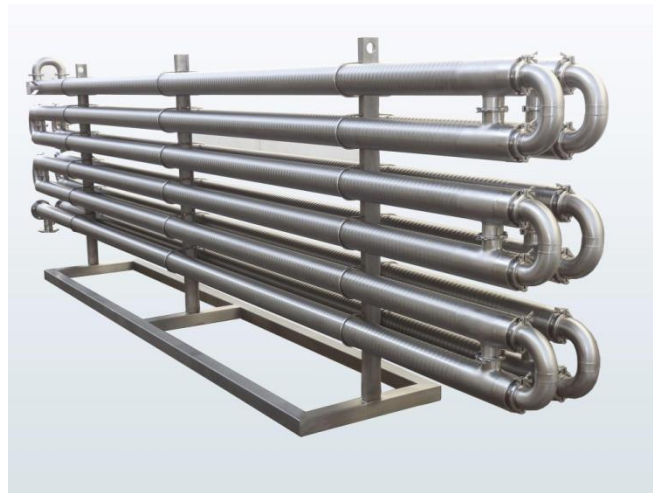


Imagen 5.3.1.2.1. Representación de un intercambiador de tubos concéntricos

Fuente: Direcindustry.

Haciendo un análisis entre las ventajas y desventajas de esta tecnología se puede determinar su viabilidad en el proyecto.

Tabla 5.3.1.2.1. Balance de ventajas e inconvenientes de un intercambiador de tubos concéntricos

Ventajas	Inconvenientes
- Fácil de realizar y de montar	- Pequeña superficie de transferencia de calor
- Fácil mantenimiento y control	- Existe posibilidad de fuga de flujo en cada horquilla
- Bajo coste de operación y de construcción	- Se necesitan gran número de equipos para grandes transferencias
	- Precio elevado por unidad de área

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de transferencia de calor para procesos industriales, como en el caso de estudio, la superficie de intercambio será bastante grande. Por consiguiente, se necesitarían un gran número de equipos para obtener las temperaturas deseadas.

Intercambiador de coraza y tubos

Las unidades conocidas con este nombre están compuestas en esencia por tubos de sección circular montados dentro de una coraza cilíndrica con sus ejes paralelos al aire de la coraza. La transferencia de calor tiene lugar a medida que uno de los fluidos se mueve por dentro de los tubos, en tanto que el otro se mueve por fuera de éstos, pasando por la coraza.

**Imagen 5.3.1.2.2.** Representación de un intercambiador de coraza y tubos

Fuente: Direcindustry.

Los intercambiadores de calor de coraza y tubos pueden encontrarse en el mercado en diferentes tamaños estandarizados, en función del área de transferencia requerida para un proceso en concreto.

Normalmente, en este tipo de intercambiadores se disponen diferentes componentes internos en la coraza, como por ejemplo placas deflectores, con el objetivo de distribuir el fluido por todo el intercambiador. De esta manera se cambia la dirección del flujo forzando movimientos transversales en el interior de la corza. Como se ha comentado en el apartado anterior, se generará un régimen turbulento con el fin de mejorar la transferencia de calor.

A continuación, se muestra una figura en la que se puede ver como el intercambio de flujos es principalmente a contracorriente, pero se fuerza a que el flujo sea lo más turbulento posible para promover un mejor intercambio.

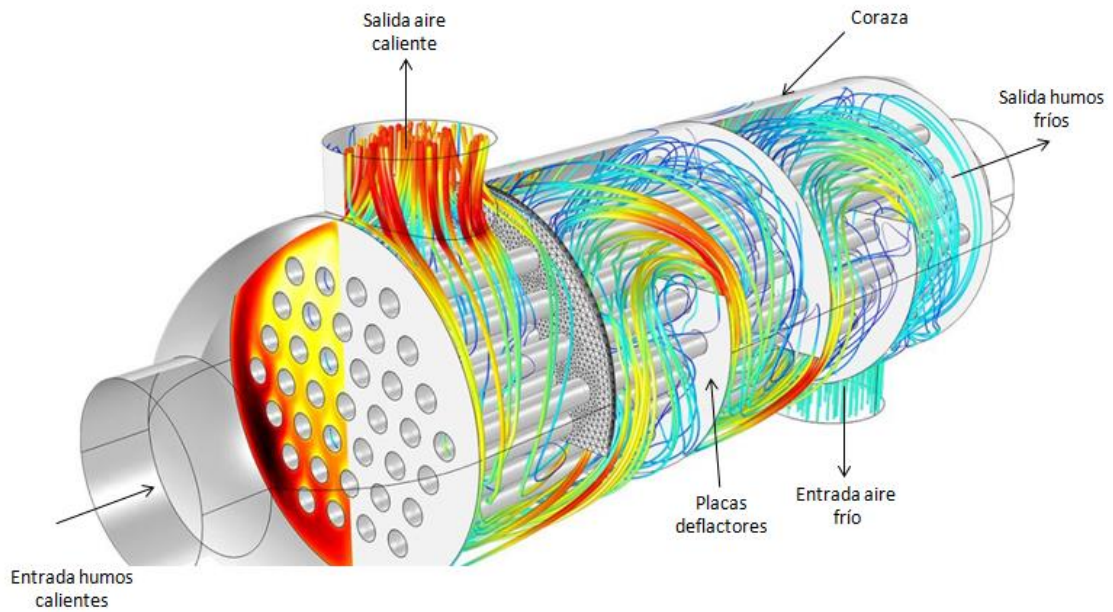


Figura 5.3.1.2.4. Esquema de funcionamiento de un intercambiador de coraza y tubos

Fuente: Ingeniero Marino

Cabe añadir que, como norma general, el flujo caliente circulará por el interior de los tubos y el flujo frío circulará por la coraza de recubrimiento.

Analizando las ventajas e inconvenientes de este tipo de construcción se ha podido realizar la tabla siguiente:

Tabla 5.3.1.2.2. Balance de ventajas e inconvenientes de un intercambiador de coraza y tubos

Ventajas	Inconvenientes
- Alta eficiencia debido a la turbulencia	- Elevado factor de ensuciamiento
- Altas temperaturas	- Equipos muy grandes
- Altas presiones	- Equipos muy pesados
- Sin sellos	- Inflexibles una vez instalados
	- Precio no muy alto

Fuente: Elaboración propia.

Intercambiador de placas

Los intercambiadores de placa son de uso frecuente en fluidos que contienen una viscosidad baja y demandas de temperatura y presión moderadas. A diferencia de los demás intercambiadores, consta de placas en lugar de tubos para separar los dos fluidos caliente y frío.

Un conjunto de placas metálicas acanaladas, con orificios para permitir el paso de dos fluidos entre los que se realiza el intercambio de calor. El conjunto de placas está montado entre una placa bastidor y otra de presión. La disposición de las juntas en los orificios de paso de fluidos en el paquete de placas de intercambio crea un sistema de canales separados posibilitando que los fluidos se interrelacionen en contacto físico entre ellos.

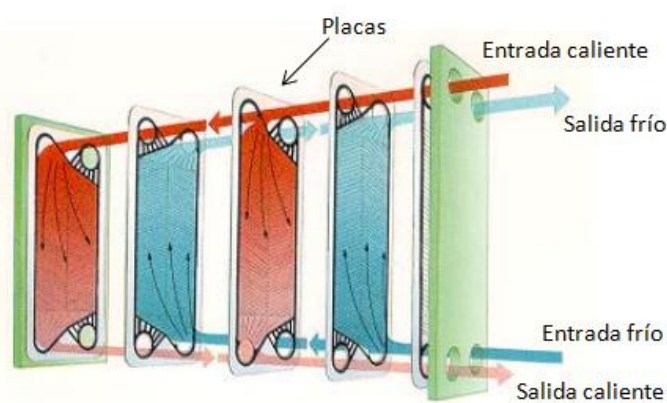


Figura 5.3.1.2.5. Esquema de funcionamiento de un intercambiador de placas

Fuente: alfalval

Tras analizar el funcionamiento de este sistema se determinarán las ventajas e inconvenientes:

Tabla 5.3.1.2.3. Balance de ventajas e inconvenientes de un intercambiador de placas

Ventajas	Inconvenientes
- Alta transferencia de calor	- Difícil mantenimiento
- Área de contacto directa	- Bajas presiones
- Baja incrustación	- Bajas temperaturas
- Diferenciales de temperatura pequeños	- Muchos sellos y juntas
	- Difícil mantenimiento

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, tras analizar los diferentes tipos de intercambiadores y su principal funcionamiento se decide optar por implementar un intercambiador de coraza y tubos ya que es el que presenta las mejores propiedades para el sistema de estudio. Además, es el tipo de intercambiador más utilizado para aplicaciones industriales.

5.3.1.3. Dimensionamiento

Para el dimensionamiento del intercambiador es muy importante tener en cuenta el material de construcción. Es posible utilizar diferentes tipos de materiales, desde elementos metálicos hasta polímeros, los cuales se seleccionan dependiendo de las necesidades o de la aplicación destinada del equipo. En el caso de estudio, teniendo en cuenta que será un equipo pesado, en el que circularán fluidos a altas temperaturas y un caudal másico de intercambio grande se utilizará acero inoxidable. Este tiene una gran resistencia mecánica bastante superior a la del acero de carbono, es resistente a temperaturas elevadas y son fáciles de transformar en gran variedad de productos sometándolo a tratamientos superficiales. Su principal debilidad es que tiene un coste elevado y una mano de obra complicada.

Como bien se ha indicado anteriormente, la geometría y la construcción ayudarán a asegurar el máximo intercambio de calor y rendimiento. El diseño del intercambiador y el sistema constructivo, además de tener una gran eficiencia, permiten una gran reducción de la temperatura de los gases de combustión, recuperando la mayor parte del calor latente del humo. Aun así este sistema aprovechara el calor residual instalando un economizador.

El economizador es la segunda etapa del intercambiador con el que se pretende reducir el consumo de energía precalentando el aire de combustión a introducir en la cámara de combustión y oxidación. El objetivo principal es conseguir una instalación más eficiente reduciendo el consumo de

combustibles. Para simplificar el dimensionamiento del proyecto se utilizará como economizador el mismo sistema que en la primera fase de intercambio entre gases de combustión y aire para el proceso de la fábrica.

Resumiendo todo lo dicho hasta ahora, en el intercambiador de calor propiamente dicho, entrarán los humos a alta temperatura directamente desde la cámara de postcombustión sin ningún cambio de dirección. El humo a alta temperatura cambia el calor latente con el aire destinado al proceso. Como la temperatura de los humos a la salida seguirá siendo bastante alta, por el mismo principio se realizará un intercambio con el aire de combustión. La temperatura final de los gases a la salida del economizador será obviamente inferior a la temperatura de entrada y, por consiguiente, un aumento de la eficiencia del sistema.

Para entender mejor el funcionamiento se ha realizado una representación esquemática del intercambiador de calor

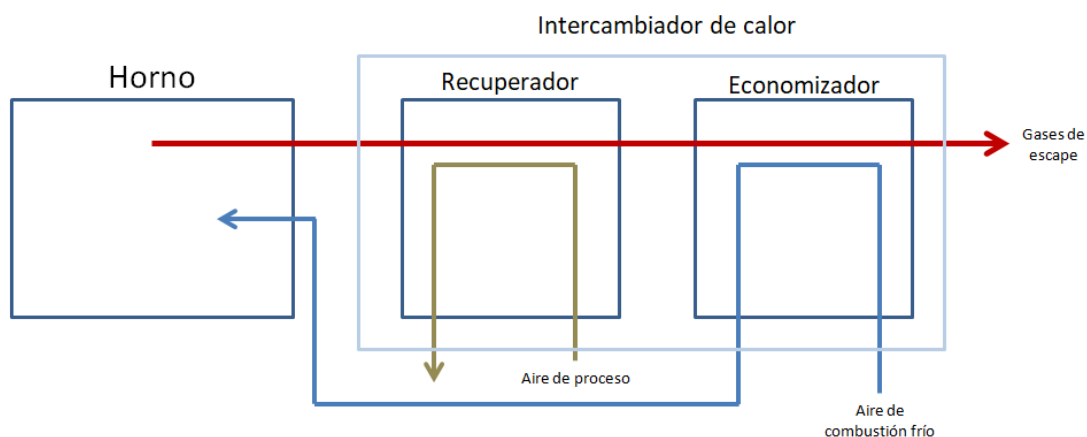


Figura 5.3.1.3.1. Intercambio gases de escape – aire

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra una tabla en la que se recoge el dimensionamiento del intercambiador de calor.

Tabla 5.3.1.3.1. Recolección de datos del intercambiador

RECUPERADOR		
Temperatura entrada gases	1.162	°C
Temperatura salida gases	275	°C
Temperatura entrada aire proceso	25	°C
Temperatura salida aire proceso	450	°C
Potencia brutal	6.538	kW
Superficie de intercambio	645	m ²
ECONOMIZADOR		
Temperatura entrada gases	275	°C
Temperatura salida gases	234	°C
Temperatura entrada aire combustión	25	°C
Temperatura salida aire combustión	75	°C
Potencia brutal	259	kW
Superficie de intercambio	126	m ²

Fuente: Elaboración propia.

5.4. Tratamiento de gases

Una vez los gases han salido del intercambiador, deben ser preparados para ser emitidos a la atmósfera. Estos deben pasar por una serie de técnicas capaces de destruir o retener los diferentes tipos de contaminantes presentes con tal de cumplir con los límites de emisión explicados anteriormente en el apartado de normativa.

A medida que van disminuyendo los límites de las emisiones aumenta la complejidad del proceso de depuración. Independientemente de los niveles fijados es preciso disminuir la concentración de un conjunto de contaminantes.

Producto de la incineración de los residuos se pueden encontrar partículas. Forman parte de estas partículas las cenizas volantes y los finos arrastrados en el horno, compuestos orgánicos tales como dioxinas e hidrocarburos, metales pesados en el flujo de residuos como el plomo o el cobre y los componentes condensados, los reactivos y productos de reacción formados por consecuencia de los compuestos empleados en la depuración para otros contaminantes.

Como norma general en los gases calientes pueden encontrarse óxidos de azufre (como por ejemplo el SO₂ y el SO₃), ácido clorhídrico (HCl), monóxido de carbono (CO) que se genera a causa de una combustión incompleta de los residuos y finalmente óxidos de nitrógeno (NO_x). La generación de estos últimos puede ser debido a un aspecto térmico, originado tras la reacción entre el nitrógeno y el

oxígeno presentes en el aire de combustión a altas temperaturas, o bien una reacción con el combustible, producto de la reacción ocasionada por la mezcla entre el aire de combustión y el nitrógeno presente en el combustible introducido.

Para llevar a cabo la limpieza de los gases de escape y cumplir con la normativa aplicada se dispondrá de diferentes procesos. A continuación, se describen los equipos utilizados para cada uno de ellos y su principal funcionamiento.

5.4.1. Sistema de inyección de urea

El primer proceso destinado al tratamiento de gases se realiza en la misma cámara de combustión. Para no dañar los equipos que la siguen y para asegurar el buen funcionamiento de la planta debe implementarse este sistema con el propósito de reducir la cantidad de NO_x contenidos en el gas de combustión.

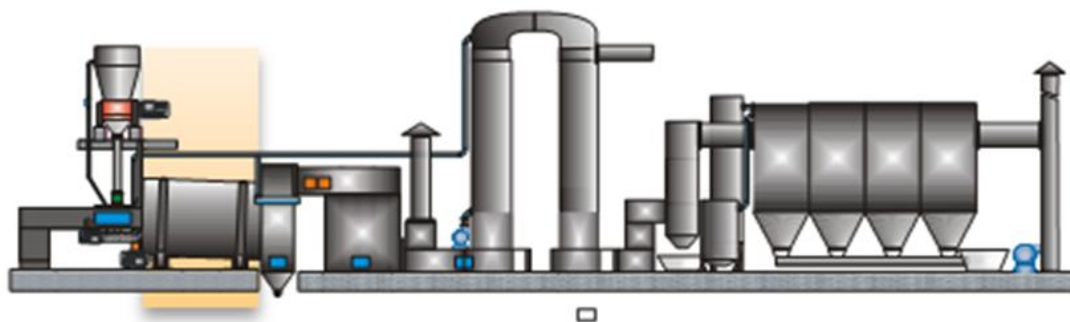


Figura 5.4.1.1. Inyección de Urea en la etapa de combustión

Fuente: Termosun Energías.

Para ello se procede a inyectar unas cantidades concretas de urea ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$), que se trata de un agente reductor con base de amonio.

El sistema de inyección de control de NO_x consta de tres partes: la primera de ellas son las lanzas de pulverización a través de las cuales se inyecta la solución de urea, la segunda son las bombas y sistemas de regulación y control y finalmente todo esto montado en un bastidor encapsulado. Está diseñado para pulverizar una cantidad máxima en la corriente de gas usando un lazo de control cerrado para mantener la cantidad de NO_x al valor consigna prefijada.

A diferencia de la inyección del aire de combustión, la solución de urea aproximadamente al 40% es inyectada mediante aire a presión y no boquillas. Como se trata de una solución líquida, mediante boquillas podría producirse una solidificación en el punto de expulsión y bloquear todo el conducto.

El depósito de almacenamiento de urea está ubicado cerca del horno rotatorio y el sistema está operado mediante un panel de control local. A continuación, se presentan los diferentes equipos implementados:

- ❖ Un tanque de almacenamiento de la solución. Este tanque proporciona a las lanzas la solución diluida de urea necesaria para la pulverización a una presión determinada y con un caudal establecido. Para ello se utiliza una bomba y válvula de bypass que dan paso a la distribución a través de toberas de automatización sobre toda la sección de la cámara de combustión.
- ❖ Por otro lado, es necesario un sistema para el control del aire. Es importante automatizar la proporción de aire inyectado en las lanzas para controlar el grado de urea en finas gotas a una temperatura relativa.
- ❖ Una línea de aire de refrigeración para refrigerar constantemente la lanza y que no aumente demasiado de temperatura lo que podría crear solidificación del líquido.
- ❖ Un sistema de purgación con agua para purgar las lanzas después de cada operación. Existen muchos factores por los que una tubería o conducto puede tender a absorber y acumular aire. Esto puede provocar complicaciones en el sistema y ocasionar un sobre esfuerzo que reducirán el rendimiento del sistema. Es por ello que se decide realizar un proceso de limpieza después de cada inyección de urea.
- ❖ Un panel eléctrico conteniendo los actuadores de la bomba y las conexiones eléctricas de los sensores y las conexiones al panel de control remoto. En ese su encuentras la señal de analizador de NO_x y del caudal de gas que permiten determinar las cantidades necesarias en cada instante de tiempo.

5.4.2. Ciclón de depuración

Los ciclones son productos que tienen como objetivo limpiar los gases aprovechando el proceso de rotación, centrifugación e inversión de sentido que sufren los gases al entrar en el ciclón, ofreciendo como norma generar emisiones inferiores por debajo de 150 mg/Nm^3 .

Este equipo se utiliza principalmente para separar las partículas sólidas suspendidas en el aire. Una alta velocidad del flujo de aire se establece dentro del equipo cilíndrico o cónico. El aire empieza a fluir de forma helicoidal comenzando desde el punto más alto hasta el punto más bajo y finalizando por un movimiento ascendente por la parte central hasta la salida del tubo. Las partículas más grandes y con una densidad mayor tienen demasiada inercia en el tubo rotatorio para seguir la fuerte curva y tienden a caer hacia la parte más baja del ciclón donde pueden ser retiradas.

En el sistema cónico que se presenta a continuación el flujo de rotación se hace cada vez más pequeño reduciendo a su vez el radio del flujo. De esta manera se consigue remover más partículas pequeñas y aumentar la eficiencia del sistema.

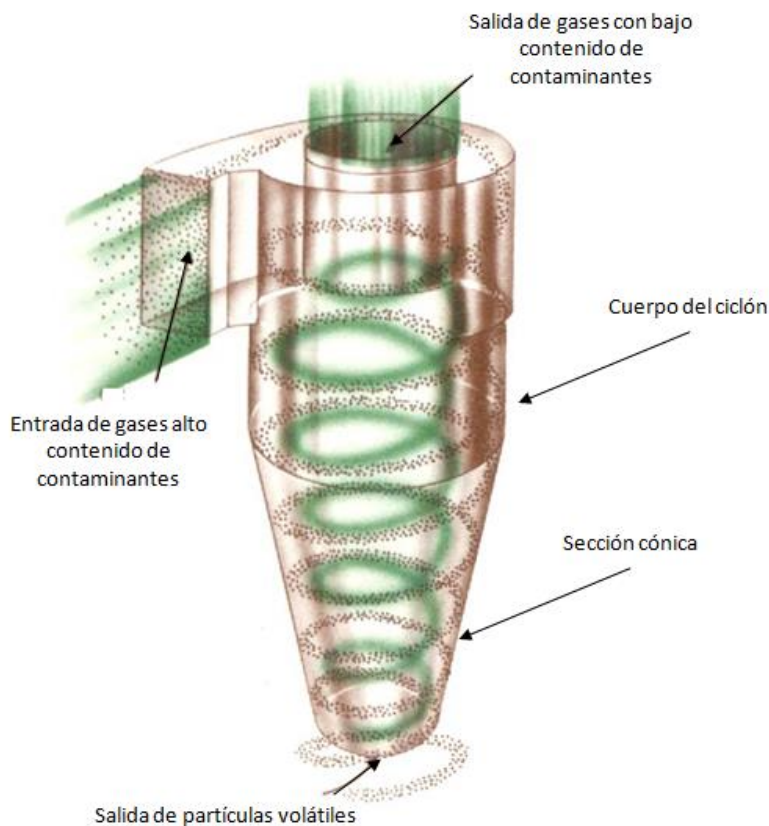


Figura 5.4.2.1. Separador ciclónico

Fuente: Desconocida

Este equipo se instalará a la salida del intercambiador para recoger la mayor parte de partículas que contiene el gas de escape. Como bien se ha explicado, este método permitirá reducir la cantidad de cenizas que serán recogidas en procesos posteriores.

A continuación, se muestra una tabla en la que se recoge el dimensionamiento del ciclón.

Tabla 5.4.2.1. Recolección de datos del ciclón de depuración

CICLÓN		
Tiempo de contacto	2	s
Velocidad de los gases	15	m/s

Fuente: Elaboración propia.

5.4.3. Reactor de neutralización

A continuación, se presenta el reactor de neutralización. El propósito de este sistema es conseguir la neutralización y adsorción de los gases ácidos aún presentes.

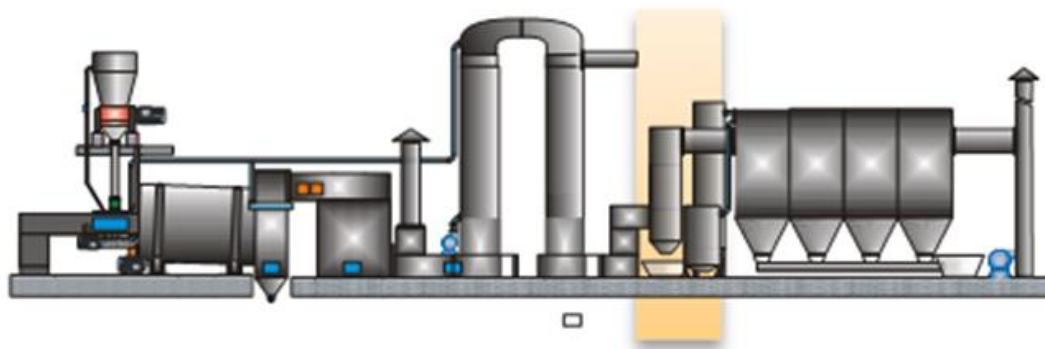


Figura 5.4.3.1. Etapa de limpieza en el ciclón y del reactor de neutralización

Fuente: Termosun Energías.

Los gases procedentes del intercambiador pasan a un reactor donde se procede a neutralizar los componentes como el HCl, el SO₂, los metales pesados, las dioxinas, furanos, ... inyectando hidróxido cálcico (Ca(OH)₂) y carbón activo.

La neutralización en el interior del reactor se consigue mediante una mezcla homogénea de los reactivos con el gas durante el tiempo necesario para que se efectúen las reacciones químicas de adsorción. El tiempo mínimo de contacto considerado debe ser de 2 segundos para obtener el 99,99% de la adsorción.

Dada la composición de gases en la que aparece el SO₂ como componente a absorber, se ha considerado como reactivo adecuado el hidróxido cálcico.

A continuación, se muestran las diferentes reacciones que se producen:

Tabla 5.4.3.1. Reacciones en el interior del neutralizador

Componentes nocivos en los gases	Hidróxido cálcico	Reacción entre los dos compuestos en forma seca
2HCl	Ca(OH) ₂	CaSO ₃ + H ₂ O
SO ₂	Ca(OH) ₂	CaCl ₂ + H ₂ O
2HF	Ca(OH) ₂	CaF ₂ + H ₂ O

Fuente: Elaboración propia.

Principio de funcionamiento

Los gases llegan al reactor mediante unos conductos ajustables que provocan una turbulencia para asegurar que el líquido pulverizado en finas gotas se mezcle bien. Como se ha podido ver durante todos los procesos, la turbulencia y las buenas condiciones de mezcla son imprescindibles para un buen funcionamiento.

La eficiencia de esta mezcla depende de varios factores, como la temperatura y la concentración de los gases contaminados.

Por otro lado, los productos que se generan con la reacción (principalmente las sales a base de sodio) se recogen en la descarga del filtro del reactor. Debido a la evaporación del agua, los productos de reacción son menores que el reactivo inyectado.

El sistema está compuesto por un mezclador y un reactor. El mezclador se utiliza para crear un componente homogéneo junto a la corriente gaseosa. El reactor es una cámara dimensionada para garantizar la permanencia de los gases de combustión durante el periodo de tiempo establecido (superior a 2 segundos).

El almacenamiento se realiza en silos con una base vibrante. El producto se descarga en la tolva que está justo debajo del silo y seguidamente, a través de un transportador de tornillo sinfín se traslada hasta el sistema de dosificación donde se refinan los reactivos antes de ser inyectados. Este debe ser refinado para obtener una granulometría óptima utilizando un molino selector. Normalmente el producto a inyectar se refina hasta obtener aproximadamente un tamaño de 40 micras. Finalmente, el producto es inyectado mediante un ventilador.

Por último, justo después de la adsorción realizada con el hidróxido cálcico y antes de introducir la corriente de gas al filtro de mangas, debe emplearse un sistema que se encargará de eliminar las dioxinas, cadmio, posible contenido en mercurio y furanos. Se procederá entonces a inyectar carbón activo.

El sistema de inyección es idéntico al del hidróxido cálcico, pero sin necesidad de ser refinado. El producto está almacenado en un Big-Bag sobre una tolva que dosifica las cantidades a inyectar mediante una válvula rotativa.

A continuación, se muestra un ejemplo de una estructura de descarga de Big-Bags. La introducción y extracción de la bolsa en el marco, así como el vaciado son extremadamente fáciles y rápidas.

Siendo uno de los puntos clave para la neutralización de los gases contaminados, podría proveerse una segunda inyección colocada en serie para permitir el cambio de Big-Bag sin interrupciones en los procesos de la planta.



Figura 5.4.3.2. Soporte Big-Bag y tolva de alimentación

Fuente: Agierre.

A continuación, se muestra una tabla en la que se recoge el dimensionamiento de los reactivos a introducir.

Tabla 5.4.3.2. Recolección de datos de los reactivos

REACTIVOS		
Hidróxido cálcico	6,28	kg/h
Urea	11,4	kg/h
Carbón activo	A determinar experimentalmente	kg/h

Fuente: Elaboración propia.

5.4.4. Filtro de mangas

Una vez han sido adsorbidos los gases ácidos por el reactor de neutralización, el siguiente paso es limpiar los gases residuales de sales y partículas de polvo.

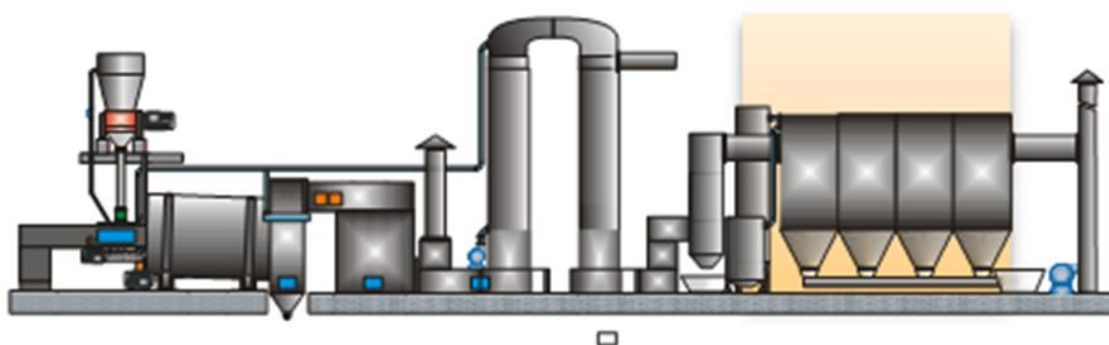


Figura 5.4.4.1. Etapa del filtro de mangas

Fuente: Termosun Energías.

Los filtros de mangas son uno de los equipos más representativos de la separación entre sólidos y gases mediante un medio poroso. En el caso de estudio, son necesarios ya que siguen existiendo partículas sólidas arrastradas por la corriente gaseosa.

La eliminación de polvo o pequeñas gotas que son arrastradas por un gas es principalmente necesaria por motivos de contaminación y por el cumplimiento de la normativa de valores límite de emisión. Por consiguiente, es imprescindible utilizar un filtro de mangas ya que es un equipo capaz de recoger altas cargas de partículas resultantes del proceso.

Principio de funcionamiento

La separación del sólido se realiza introduciendo el aire con partículas en suspensión mediante un ventilador. El gas cargado de polvo se introduce en la tolva del filtro mediante un canal de entrada situado en la parte central inferior. Este circula a través de una serie de mangas, de forma que las partículas quedan retenidas entre los intersticios de la tela por la parte externa permitiendo pasar el aire limpio para posteriormente salir por la parte superior. De esta manera la cantidad de partículas se van acumulando y creando una capa sobre las mangas con lo que aumenta la pérdida de carga del sistema. Para evitar que el caudal introducido disminuya se procede a efectuar una limpieza periódica por el medio de breves impulsos de aire comprimido en cada fila de mangas en sentido contrario. De esta manera la acumulación de polvo cae directamente a la tolva. Los filtros son completamente automáticos y están diseñados para trabajar en continuo con alta eficiencia.

Los filtros de mangas constan de una serie de bolsas con forma de mangas como bien indica su nombre. Normalmente están hechos de fibra sintética o natural, colocados en un soporte y encerrados en una carcasa para darles resistencia. El gas aún sucio, al entrar en este equipo, fluye hacia la parte superior por el interior de la manga dejando atrás todas las partículas sólidas.

Además de realizar una recolección intensiva de polvo y una reducción eficiente de las partículas submicrométricas, el filtro de mangas también mejora la utilización de los reactivos ya que se acumulan en las mangas asegurando la reacción final con los gases ácidos.

Proceso de limpieza

Como bien se ha comentado, para limpiar las mangas del filtro debe abrirse durante un periodo de tiempo relativamente corto una válvula de modo que el aire comprimido sea introducido en cada una de las filas de las mangas.

La cámara externa de aire comprimido se conecta a los tubos que van en el interior del filtro, en la cámara limpia en la parte superior del filtro, es decir, encima de cada fila de mangas. Los agujeros de estos conductos están posicionados concéntricamente por encima de cada Venturi para la salida del aire comprimido.

Respecto al mantenimiento no hay mucha complicación. El filtro no tiene partes internas móviles, no siendo necesarias herramientas especiales para cambiar las mangas. Por otro lado, los controles, válvulas de diafragma y solenoides no requieren un mantenimiento rutinario. El reemplazamiento de estos componentes es rápido y sencillo.

A continuación, se muestra una figura en la que se puede observar un corte transversal de un filtro de mangas y todos sus componentes. A mano izquierda se puede ver el proceso de purificación de los gases y a mano derecha se muestra cómo se invierte el sentido del flujo para realizar una limpieza de las mangas.

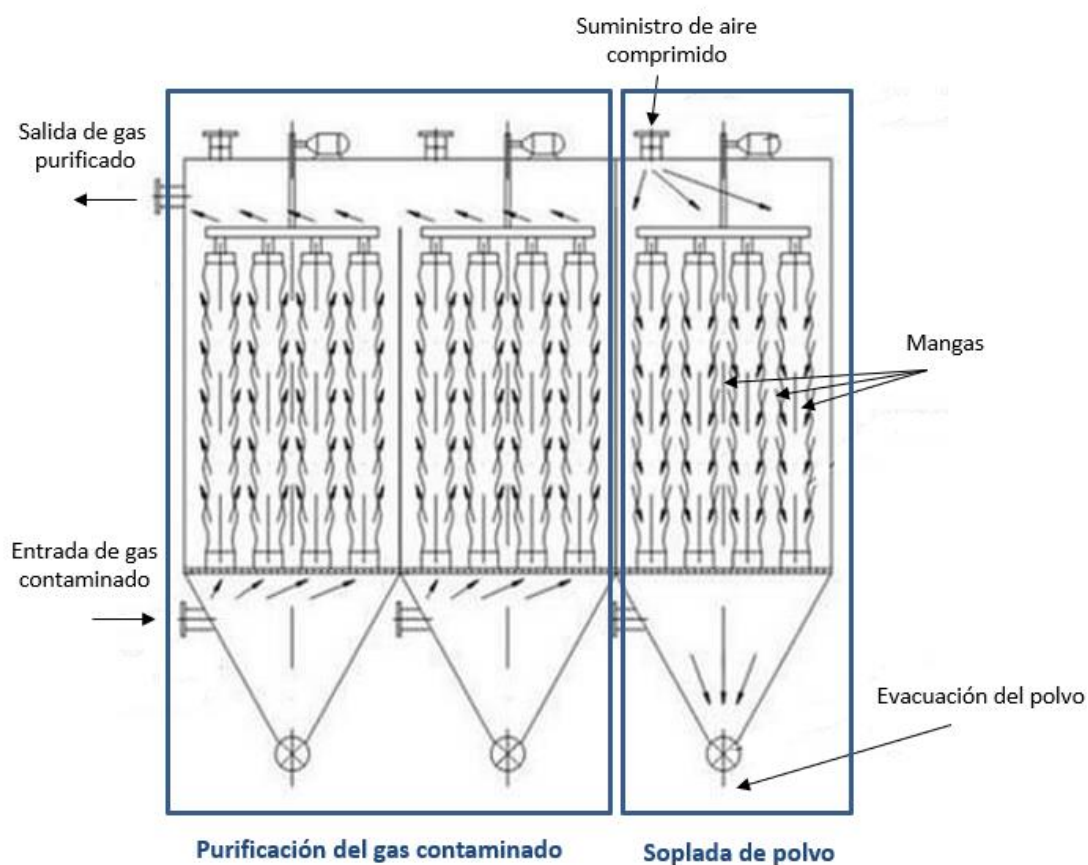


Figura 5.4.4.1. Corte transversal de un filtro de mangas

Fuente: Termosun Energías.

Por último, se muestra un plano de lo que sería un filtro de mangas visto desde el exterior y algunas fotografías representativas.



Figura 5.4.4.2. Vista exterior de un filtro de mangas

Fuente: Catálogo Binder.



Imagen 5.4.4.1. Recopilación de fotografías de filtro de mangas

Fuente: Catálogo Binder

5.4.5. Ventilador de tiro

Una vez se han explicado la mayoría de las etapas y equipos de toda la planta, es necesario explicar la importancia de la depresión que se requiere para evacuar los gases limpios al exterior.

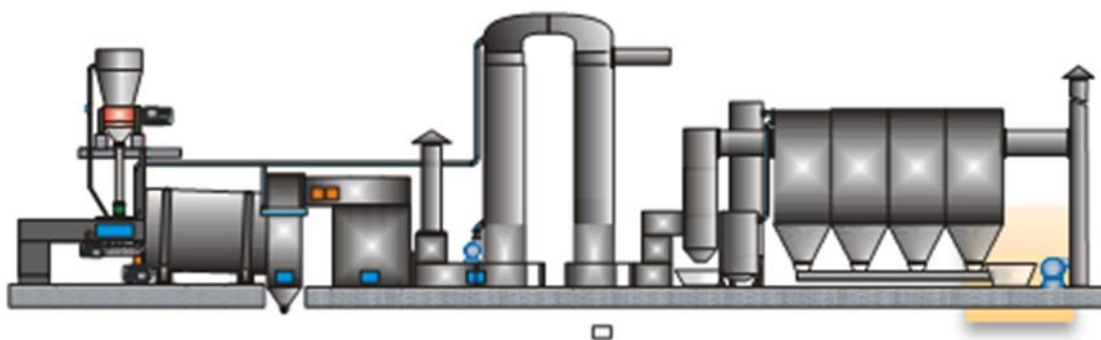


Figura 5.4.5.1. Ventilador de tiro inducido

Fuente: Termosun Energías.

El ventilador de tiro inducido sirve principalmente para equilibrar la pérdida de presión durante todo el proceso.

Este estará formado por una carcasa compuesta por dos laterales de construcción soldada y reforzada convenientemente con todas las bridas necesarias. La carcasa va partida y unida mediante bridas, de tal manera que permite fácilmente el desmontaje del rodee y el eje. Tiene una puerta de limpieza para poder realizar el mantenimiento.

Seguidamente se muestra una imagen de cómo es un ventilador de tiro inducido.



Imagen 5.4.5.1. Ventilador de tiro

Fuente: Proveedor Factory.

5.4.6. Chimenea y conductos

Para la evacuación y salida de los gases la planta estará dotada de con una chimenea con conductos de expulsión.

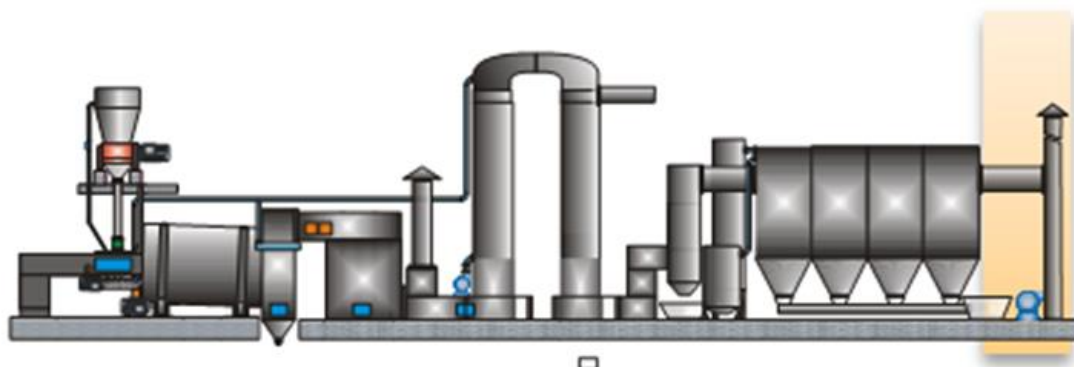


Figura 5.4.6.1. Chimenea de expulsión

Fuente: Termosun Energías.

Este equipo será necesario para dar la dispersión a los gases (emisiones e inmisiones) a su salida al medio exterior.

Esta chimenea estará fabricada en chapa de acero al carbono previsto con uniones embridadas, base soporte y refuerzo. Con tres nervios superiores helicoidales para minimizar la vibración debida al empuje del viento.

Es muy importante realizar un buen dimensionamiento de la altura de la chimenea ya que los focos emisores a la atmósfera deben tener una altura suficiente para garantizar una buena dispersión de los contaminantes y a la vez estar adecuado para una correcta toma de valores.

5.4.7. Sistema de control de emisiones

De acuerdo con las Directivas Europeas analizadas anteriormente, la planta contará con un sistema de control de emisiones en continuo en el punto de salida de la chimenea.

Este sistema consiste en lo siguiente:

- ❖ Control de la potencia eléctrica de los motores y quemadores
- ❖ Sensores y transductores (Termopares, medidores de presión diferencial)
- ❖ Microprocesadores PLC para la gestión de:
 - Alarmas
 - Secuencias de parada y arranque
 - Algoritmo de control

- Gestión de supervisión
- Visualización de mediciones y estimaciones de cantidades que se pueden medir directamente con una unidad de ingeniería.
- ❖ Sistema de detección de oxígeno, monóxido de carbono y temperatura con un registro continuo

La panta estará diseñada para tener varios sensores de detección y elementos de control para facilitar la implementación de los procesos de eliminación.

- ❖ Termopares de temperatura en la cámara de combustión, en la cámara de cenizas, en la cámara de postcombustión y en el intercambiador.
- ❖ Interruptores analógicos de presión diferencial en la cámara de combustión y en el intercambiador de calor.
- ❖ Sistema inversor para regular la velocidad del sinfín de dosificación, rotación de la cámara de combustión, ventilador de aire primario y secundario y extractor de humos del filtro.

Así mismo, se realizarán mediciones continuas de la concentración de O_2 , de la presión, de la temperatura y de la humedad de los gases. El resultado de los análisis de cada uno de los productos en el gas se expresará en mg/Nm^3 como indica la Directiva Europea de regulación. Estos valores estarán referidos a las condiciones normalizadas: Gas seco, temperatura de 273 K, presión absoluta de 1,013 bar y contenido de oxígeno del 11% en volumen.

Los equipos utilizados son los siguientes:



Imagen 5.4.7.1. Panel de control y diferentes sensores

Fuente: Termosun Energías.

5.5. Sistema eléctrico y de control de la planta

En primer lugar, se realizará una lista de los elementos que componen el sistema de control de la planta. Estos son o alarmas o bien procesos de supervisión.

- ❖ Fuente de alimentación para motores, servomotores y quemadores.
- ❖ Sensores y transductores (termopares, presostatos diferenciales, ...)
- ❖ Acondicionamiento de señales analógicas y digitales.
- ❖ Sistema de microprocesador PLC para la gestión de:
 - Alarmas
 - Secuencias de arranque y parada
 - Algoritmos de control
 - Gestión de supervisión (interacción con el operador, ajuste de puntos de ajuste)
 - Unidad de visualización para mediciones y estimaciones de mediciones que no pueden medirse directamente con las unidades de ingeniería
- ❖ Sistema de registro continuo de oxígeno, óxido de carbono y temperatura.
- ❖ Controles manuales.

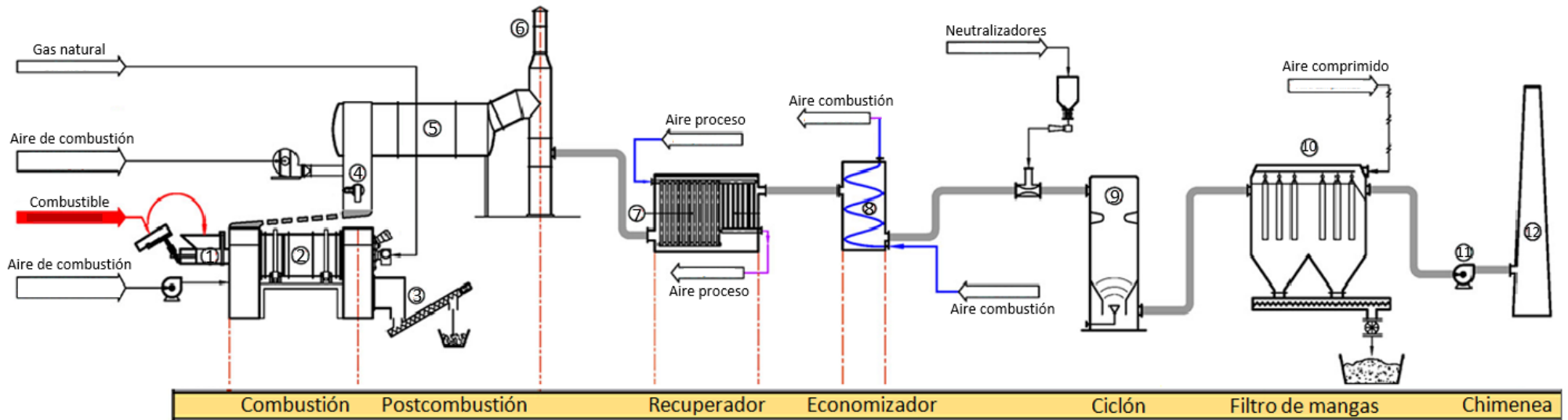
En segundo lugar, la planta debe estar controlada mediante sensores de detección y control para facilitar la operación y estabilizar cualquier proceso de eliminación. Estos equipos ya se han descrito en el apartado de sistema de control de emisiones. Se podrían añadir los dos controles siguientes:

- ❖ Diferencial de presión digital en el circuito de la caldera.
- ❖ Analizadores de Oxígeno y Óxido de Carbono.

Por último, deben añadirse controles operativos:

- ❖ Moduladores de los quemadores en la cámara de combustión y en la cámara de postcombustión.
- ❖ Motores de velocidad variable (sistema inversor), barrena dosificadora, rotación de la cámara de combustión, ventilador de aire adicional y en el ventilador de extracción de humo del filtro.
- ❖ Actuadores neumáticos que permiten la chimenea de seguridad y la captura de los humos calientes en la caldera.

5.6. Esquema general de la instalación



- | | |
|-----------------------------|------------------------------|
| 1. Alimentador | 7. Recuperador |
| 2. Cámara de combustión | 8. Economizador |
| 3. Extractor de cenizas | 9. Ciclón |
| 4. Cámara de oxidación | 10. Filtro de mangas |
| 5. Cámara de postcombustión | 11. Ventilador de tiro |
| 6. Chimenea de emergencia | 12. Chimenea gases de escape |

Gráfico 5.6.1. Representación esquemática de todos los equipos que componen la planta (Fuente: Termosun Energías.)

6. Cálculos

6.1. Depósito de almacenamiento

En primer lugar, se ha decidido dimensionar un posible foso de almacenamiento. Las características de este dependen de las prestaciones establecidas y de los objetivos marcados. Como bien se ha indicado en el primer apartado de las características técnicas, el foso de almacenamiento será diseñado para poder proporcionar una autonomía de 5 días sin interrupción a la planta.

Para poder realizar los cálculos correspondientes debe calcularse la densidad aparente de todos los materiales que van a ser almacenados. Los factores que pueden afectar a la densidad aparente son la composición y la estructura.

Tabla 6.1.1. Estimación de la densidad aparente de cada material

COMPOSICIÓN	% EN PESO	Densidad cuerpo compacto	Densidad cuerpo extendido
Papel	15,00%	750,0 kg/m ³	500,0 kg/m ³
PET (Tereftalato de polietileno)	60,00%	1380,0 kg/m ³	920,0 kg/m ³
Cartón	20,00%	152,1 kg/m ³	101,4 kg/m ³
Materia orgánica	5,00%	220,0 kg/m ³	220,0 kg/m ³

Fuente: Elaboración propia.

A partir de un portal Web se han podido estimar tanto la densidad de un cuerpo compacto como la densidad de un cuerpo extendido. Se trata de una relación considerable ya que después de la separación de la materia orgánica utilizada como materia prima y el residuo, este último tiene unas características extendidas con posibles huecos y poros en los que puede circular aire y afectar a la densidad.

A continuación, se estima la densidad aparente media del combustible:

$$\rho_{\text{media}} = 0,15 \cdot 500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} + 0,6 \cdot 920 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} + 0,2 \cdot 101,4 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} + 0,05 \cdot 220 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 658,28 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Eq. 6.1.1}$$

Es importante considerar que la fábrica realizará el mínimo de paradas posibles. Por lo tanto, se considerará que trabaja todas las horas del día durante 5 días seguidos.

$$\text{Consumo}_{\text{diario}} = 1151,281 \frac{\text{kg}}{\text{hora}} \cdot 24 \frac{\text{horas}}{\text{día}} = 27.630,75 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \quad \text{Eq. 6.1.2}$$

Seguidamente se calcula el volumen total que debe ser almacenado para una autonomía de suministro de 5 días:

$$\text{Volumen}_{\text{total}} = \frac{27.630,75 \frac{\text{kg}}{\text{día}}}{658,28 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \cdot 5 \text{ días} = 210 \text{ m}^3 \quad \text{Eq. 6.1.3}$$

Finalmente, teniendo en cuenta el volumen necesario para alimentar la planta durante 5 días, se ha considerado un depósito de 10 m de longitud, 7 m de ancho y 3 m de alto.

6.2. Cálculos iniciales

6.2.1. Cálculo del poder calorífico inferior (PCI)

Para determinar el poder calorífico de cualquier combustible, el método más satisfactorio y adoptado universalmente es mediante la medición directa, se utiliza un calorímetro para calcular el calor que se ha desprendió durante la combustión.

Para los combustibles sólidos y la mayoría de los combustibles líquidos, los calorímetros de tipo bomba, en los cuales las sustancias de los combustibles se queman con un volumen constante de oxígeno, dan los resultados más satisfactorios. Con los calorímetros de bomba operados correctamente, la combustión está completa, todo el calor generado es absorbido y se puede medir. Además, se puede excluir el calor de fuentes externas o aplicar las correcciones necesarias.

La precisión de la determinación del poder calorífico de un combustible por calorímetro depende de la manipulación cuidadosa de los instrumentos. Es importante ser minucioso con los resultados ya que la precisión debe estar dentro de una fracción del 1%.

En función del tipo de combustible que se desee analizar es necesario determinar separadamente el poder calorífico de cada uno de los combustibles. Como bien se ha comentado, es preferible para una mayor precisión, determinar el valor del poder calorífico de un combustible mediante una prueba real en un calorímetro.

En este caso, al no disponer de esta posibilidad, los valores de calor aproximados pueden calcularse mediante un cálculo de análisis químico de una serie de combustibles. La fórmula de Dulong, a continuación, presentada, es la utilizada generalmente para calcular o verificar los datos del poder calorífico.

En apartados anteriores se ha obtenido la siguiente composición química del compuesto de residuos:

Tabla 6.2.1.1. Composición del combustible

Componentes	% (en base húmeda)
C (Carbono)	51,63%
H (Hidrógeno)	11,10%
O (Oxígeno)	22,24%
S (Azufre)	0,10%
N (Nitrógeno)	0,27%
Cl (Cloro)	0,03%
F (Flúor)	0,00%
H₂O (Agua)	12,40%
Cenizas	2,24%
TOTAL	100,00%

Fuente: Elaboración propia.

Una vez determinada la composición química del combustible se puede calcular de forma teórica el poder calorífico inferior.

En primer lugar, según el principio de conservación de la energía debe calcularse el poder calorífico superior con la expresión siguiente:

$$PCS = 81,4 \cdot (\%C) + 344 \cdot \left((\%H_2) - \frac{(\%O_2)}{8} \right) + 22,2 \cdot (\%S) \quad \text{Eq. 6.2.1}$$

$$PCS = 81,4 \cdot 51,63 + 344 \cdot \left(11,10 - \frac{22,24}{8} \right) + 22,2 \cdot 0,10 = 7.066 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

Seguidamente, se expone la fórmula que permite calcular el poder calorífico inferior:

$$PCI = PCS - 5,97 \cdot ((\%H_2O) + 9 \cdot (\%H_2)) \quad \text{Eq. 6.2.3}$$

$$PCI = 7.066 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} - 5,97 \cdot (12,40\% + 9 \cdot 11,10\%) = 6.396 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

Para asegurar los cálculos realizados se decide comparar los resultados obtenidos mediante las ecuaciones 6.2.1 y 6.2.3 con la fórmula empírica siguiente que permite calcular el poder calorífico inferior de un combustible húmedo.

$$PCI = 81,4 \cdot (\%C) + 290 \cdot \left((\%H_2) - \frac{(\%O_2)}{8} \right) + 22,2 \cdot (\%S) - 6 \cdot (\%H_2O) \quad \text{Eq. 6.2.4}$$

$$PCI = 81,4 \cdot 51,63 + 290 \cdot \left(11,10 - \frac{22,24}{8}\right) + 22,2 \cdot 0,10 - 6 \cdot 12,40 = 6.543 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

Viendo que la diferencia entre ambas fórmulas no es muy grande se decide continuar los cálculos con los resultados obtenidos mediante la fórmula de Dulong.

6.2.2. Datos requeridos

A continuación, se presentan los datos proporcionados por la empresa que permitirán realizar el dimensionamiento de todos los equipos.

(Esta tabla ya ha sido presentada anteriormente con la presentación de la empresa).

Tabla 6.2.2.1. Datos necesarios para la realización del proyecto

DATOS REQUERIDOS		
Horas anuales de funcionamiento	4.576	h/año
Horas trabajadas al día	24	h/día
Disponibilidad de la planta	52,22	%
Toneladas de residuo anual	5.266,420	Tn/año
Consumo horario de combustible global	1.151,281	kg/h
Margen de seguridad aplicado	0	%
Energía total requerida para el secado	28.606.174	kWh/año
Potencia térmica por hora requerida para el secado	6.251	kWh

Fuente: Elaboración propia.

6.3. Cálculos de la combustión

Los principios involucrados en el desarrollo de calor por combustión son de principal interés para entender el funcionamiento.

En un horno de caldera, donde se realiza un trabajo no mecánico, la energía térmica generada deriva de la unión entre los elementos de combustión con el oxígeno dependiendo exclusivamente de los productos finales de combustión y no de combinaciones intermedias que puedan ocurrir en el proceso de alcanzar el resultado final.

La unión de una molécula de carbono con oxígeno para producir una cantidad específica de calor es un simple ejemplo de lo que sucede. La unión puede realizarse en un solo paso para formar un producto gaseoso de la combustión, el CO₂. Bajo ciertas condiciones, la unión puede ser en dos etapas,

inicialmente se forma CO, produciendo una cantidad de calor mucho menor y, seguidamente, se unifican las moléculas de CO para así obtener CO₂.

Es muy importante saber que el carbono puede entrar en estos dos tipos de combinaciones con el oxígeno. Los métodos de cocción deben asegurar una mezcla adecuada y completa del combustible y del oxígeno. El incumplimiento de este requisito dará como resultado pérdidas considerables en la eficiencia de la combustión y los potenciales de calor debido a los combustibles que no serán quemados.

Siendo el combustible obtenido una mezcla de residuos con estructuras ligeramente diferentes se considerará que:

- Gran parte del hidrógeno (H) se convertirá en vapor de agua (H₂O).
- Todo el carbono (C) se convertirá a dióxido de carbono (CO₂).
- Todo el azufre (S) se convertirá en dióxido de azufre (SO₂).
- El cloro (Cl) reaccionará con el hidrógeno formando cloruro de hidrógeno (HCl)
- Todo el nitrógeno presente (N) reaccionará con el oxígeno creando (NO_x)

6.3.1. Oxígeno requerido en la combustión

Como norma general, es fácil suponer que hay suficiente oxígeno presente para la reacción con los combustibles y que se puede alcanzar la temperatura requerida para provocar las reacciones químicas de la combustión. Sin embargo, incluso con las condiciones de temperatura adecuadas, es necesario introducir una cantidad extra de aire. Es importante conocer qué cantidad de aire es necesario para la quema de todos los combustibles y poder efectuar la oxidación completa.

Generalmente, en la generación de calor, el oxígeno requerido para la combustión se suministra utilizando aire, y los otros componentes del aire actúan como diluyentes.

El aire atmosférico es una mezcla de diferentes compuestos químicos. Estos son oxígeno, nitrógeno y pequeñas cantidades de dióxido de carbono, agua, vapor, argón y otros gases inertes. En la mayoría de los casos de combustión los gases inertes son despreciables, será suficiente considerar que el aire está compuesto principalmente de nitrógeno con un 79% y de oxígeno con un 21% (en 4,76 moles hay 1 mol de oxígeno y 3,76 moles de nitrógeno).

A continuación, se presenta la tabla en la que se recoge cada componente químico del combustible con sus respectivas características.

Tabla 6.3.1.1. Composición química en peso en 100 kg de los componentes combustibles (*) del CSS
(Combustible Sólido Secundario)

Componentes Combustibles	Peso (kg)	Masa molecular (kg/kmol)	kmol	kmol/1 kmol CSS
Carbono - C	51,63	12,01	4,2987	0,3838
Hidrógeno - H	11,10	2,01	5,5053	0,4915
Oxígeno - O ₂	22,24	31,99	0,6950	0,0621
Nitrógeno - N ₂	0,27	28,01	0,0096	0,0009
Cloro - Cl ₂	0,03	70,90	0,0004	0,0000
Azufre - S	0,10	32,06	0,0032	0,0003
Agua - H ₂ O	12,40	18,01	0,6883	0,0615
Cenizas	2,24	-	-	-
TOTAL	100		11,2006	

(*) En el caso de los elementos gaseosos se ha realizado el cálculo estequiométrico referido a la molécula diatómica en el gas

Fuente: elaboración propia

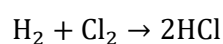
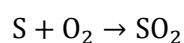
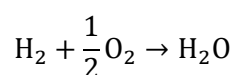
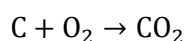
Con estos datos se puede obtener la masa molecular aparente del combustible sin considerar las cenizas:

$$M_{\text{comb}} = \frac{100 \text{ kg}}{11,2006 \text{ Kmol (sin cenizas)}} = 8,928 \frac{\text{kg}}{\text{Kmol (sin cenizas)}} \quad \text{Eq. 6.3.1.1}$$

Por otro lado, sabiendo la composición del aire se puede obtener la masa molecular de este:

$$M_{\text{aire}} = \frac{1 \cdot 32 (\text{O}_2) + 3,76 \cdot 28 (\text{N}_2)}{4,76 (\text{sin cenizas})} = 28,840 \frac{\text{kg}}{\text{Kmol (sin cenizas)}} \quad \text{Eq. 6.3.1.2}$$

Cada uno de estos componentes reacciona con el oxígeno como se ha comentado anteriormente, obteniéndose los compuestos siguientes (según las ecuaciones químicas simplificadas relacionadas a continuación):



A partir de estas ecuaciones y de la cantidad de oxígeno necesario para cada reacción se obtiene la tabla siguiente:

Tabla 6.3.1.2. Composición de oxígeno en los componentes químicos del combustible

Reacción oxidación	Cantidad (kmol/100 kg CSS)	Coefficiente O ₂	kmol O ₂ / 100 kg CSS
CO ₂	4,2987	1,0	4,2987
H ₂ O	5,5053	0,5	2,7527
O ₂	0,6950	1,0	-0,6950
N ₂	0,0096	0,0	0,0000
SO ₂	0,0032	1,0	0,0032
2HCL	0,0004	0,0	0,0000
H ₂ O	0,6883	0,0	0,0000
Cenizas	-	-	-
TOTAL	11,2006		6,3595

Fuente: Elaboración propia.

En el cálculo del oxígeno requerido para la combustión es importante tener en cuenta el oxígeno ya presente. Es por este mismo motivo que en los cálculos realizados en la Tabla 6.3.1.2. se ha considerado que dicho oxígeno adquiere un valor negativo.

Así mismo, se considerará un exceso de oxígeno del 80% para asegurar una combustión completa.

Por consiguiente:

$$\text{exceso}_{\text{aire}} = \text{TOTAL} \cdot 1,8 \quad \text{Eq. 6.3.1.3}$$

$$\text{exceso}_{\text{aire}} = 6,3595 \frac{\text{kmol O}_2}{100 \text{ kg CSS}} \cdot 1,8 = 11,447 \frac{\text{kmol O}_2}{100 \text{ kg CSS}}$$

Teniendo en cuenta el peso molecular del oxígeno, se puede obtener el exceso requerido para un kilogramo de CSS (combustible Sólido Secundario).

$$\text{exceso}_{\text{aire}}' = \frac{\text{exceso}_{\text{aire}}}{100} \cdot M_{\text{O}_2} \quad \text{Eq. 6.3.1.4}$$

$$\text{exceso}_{\text{aire}}' = \frac{11,447 \frac{\text{kmol O}_2}{100 \text{ kg CSS}}}{100} \cdot 31,99 \frac{\text{kg O}_2}{\text{kmol}} = 3,663 \frac{\text{kg O}_2}{\text{kg CSS}}$$

Una vez se ha determinado el exceso de oxígeno necesario por cada kilogramo de combustible introducido debe calcularse la cantidad de aire seco a inyectar.

Tabla 6.3.1.3. Composición del aire seco

	O₂ %	N₂%
Masa	23,3	76,7
Volumen	21	79

Fuente: Elaboración propia.

El cálculo es el siguiente:

$$M_{\text{aire seco}} = \frac{\text{exceso}'_{\text{aire}}}{M_{\text{O}_2}(\%)} \quad \text{Eq. 6.3.1.5}$$

$$M_{\text{aire seco}} = \frac{3,663 \frac{\text{kg O}_2}{\text{kg CSS}}}{0,233} = 15,721 \frac{\text{kg aire seco}}{\text{kg CSS}}$$

Es importante tener en cuenta que el aire que se introducirá en la combustión es un aire atmosférico por lo tanto no será seco. Deben tenerse en cuenta las condiciones atmosféricas y la humedad presente en el entorno.

Las condiciones que se considerarán para el caso de estudio son las siguientes:

- Temperatura: 25 °C (Temperatura ambiente de la fábrica)
- Presión: 1 atmósfera
- Humedad: 80% (humedad relativa).

A partir del ábaco psicrométrico presentado a continuación se puede determinar la humedad específica del aire atmosférico y el volumen específico.

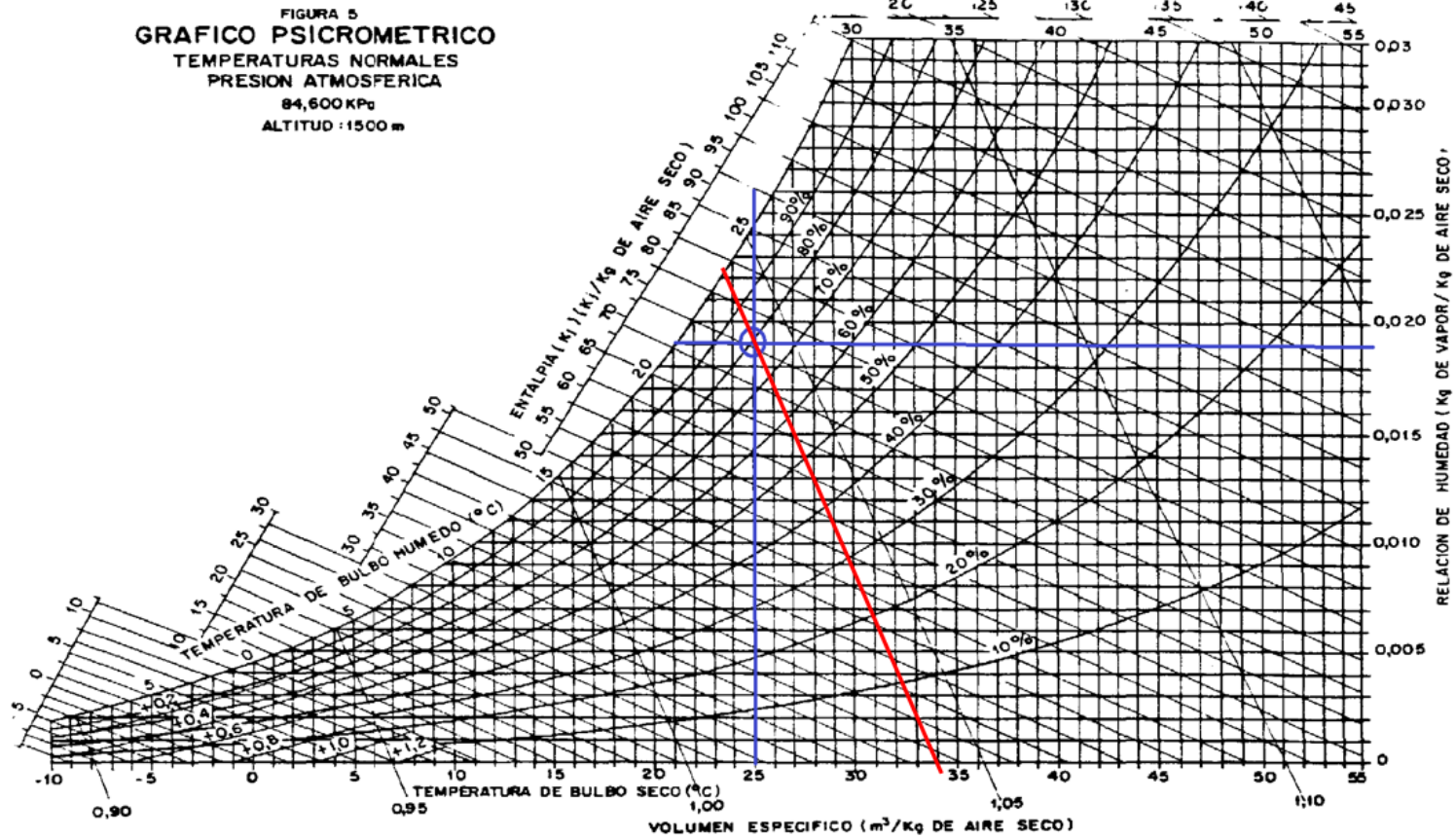


Gráfico 6.3.1.1. Análisis a partir de un gráfico estequiométrico

La humedad específica que se ha obtenido es:

$$\text{Humedad específica} = 0,019 \frac{\text{kg vapor}}{\text{kg aire seco}}$$

El volumen específico no se puede determinar con tanta precisión, el valor de este es aproximadamente:

$$\text{Volumen específico} = 1,042 \frac{\text{m}^3}{\text{kg aire seco}}$$

Sabiendo el valor de la cantidad de aire seco a inyectar en el proceso y la humedad específica determinada a partir del ábaco psicométrico se puede determinar la cantidad de agua en el aire a inyectar para un kilogramo de CSS.

$$M_{\text{agua en aire}} = M_{\text{aire seco}} \cdot \text{Humedad específica} \quad \text{Eq. 6.3.1.6}$$

$$M_{\text{agua en aire}} = 15,721 \frac{\text{kg aire seco}}{\text{kg CSS}} \cdot 0,019 \frac{\text{kg vapor}}{\text{kg aire seco}} = 0,299 \frac{\text{kg vapor}}{\text{kg CSS}}$$

Con los valores obtenidos en las ecuaciones 6.3.1.6 y 6.3.1.7 ya se puede calcular la masa total de aire húmedo que se debe inyectar para el proceso de combustión.

$$M_{\text{aire húmedo}} = M_{\text{aire seco}} + M_{\text{agua en aire}} \quad \text{Eq. 6.3.1.7}$$

$$M_{\text{aire húmedo}} = 15,721 \frac{\text{kg Aire seco}}{\text{kg CSS}} + 0,299 \frac{\text{kg vapor}}{\text{kg CSS}} = 16,019 \frac{\text{kg Aire Humedo}}{\text{kg CSS}}$$

Finalmente, una vez se ha obtenido la cantidad de aire húmedo a inyectar por kilogramo de CSS es posible determinar el caudal másico de aire atmosférico necesario en función de la cantidad de combustible quemado por hora.

$$m_{\text{aire húmedo}} = m_{\text{combustible}} \cdot M_{\text{aire húmedo}} \quad \text{Eq. 6.3.1.8}$$

$$m_{\text{aire.húmedo}} = 1151,281 \frac{\text{kg CSS}}{\text{hora}} \cdot 16,019 \frac{\text{kg aire húmedo}}{\text{kg CSS}} = 18.442,849 \frac{\text{kg aire húmedo}}{\text{hora}}$$

A continuación, a partir del caudal másico de aire seco y el volumen específico se puede calcular el caudal volumétrico de aire húmedo a inyectar.

Con el valor obtenido en la ecuación 6.3.1.5 y el caudal másico de combustible introducido se obtiene el caudal másico de aire seco.

$$m_{\text{aire seco}} = M_{\text{aire seco}} \cdot m_{\text{combustible}} \quad \text{Eq. 6.3.1.9}$$

$$m_{\text{aire seco}} = 15,721 \frac{\text{kg aire seco}}{\text{kg CSS}} \cdot 1151,281 \frac{\text{kg CSS}}{\text{hora}} = 18.099,29 \frac{\text{kg aire seco}}{\text{hora}}$$

Caudal volumétrico de aire húmedo:

$$V_{\text{aire húmedo}} = m_{\text{aire seco}} \cdot V_e \quad \text{Eq. 6.3.1.9}$$

$$V_{\text{aire húmedo}} = 18099,29 \frac{\text{kg aire seco}}{\text{hora}} \cdot 1,042 \frac{\text{m}^3 \text{ aire húmedo}}{\text{kg aire seco}} = 18.859,46 \frac{\text{Nm}^3 \text{ aire húmedo}}{\text{hora}}$$

6.3.2. Composición de los gases de combustión

Para el cálculo de los gases de combustión es necesario calcular la reacción completa con el aire húmedo.

Entre el horno de incineración rotatorio y la cámara de postcombustión se producirá la reacción completa entre los compuestos químicos del combustible y el aire húmedo inyectado.

A continuación, a partir del peso molecular de cada uno de los componentes químicos presentes antes y después de la reacción y del porcentaje de cada uno de ellos en el combustible, se puede obtener la cantidad másica de los gases de combustión en base seca y en base húmeda.

Tabla 6.3.2.1. Balance másico entre reactivos y productos

	REACTIVOS		PRODUCTOS		
C	12,01	kg/kmol	CO₂	44,01	kg/kmol
H	1,01	kg/kmol	H₂O	18,01	kg/kmol
S	32,07	kg/kmol	SO₂	64,06	kg/kmol
N	14,01	kg/kmol	N₂	28,01	kg/kmol
Cl	35,45	kg/kmol	HCl	36,46	kg/kmol
O	16,00	kg/kmol	O₂	32,00	kg/kmol

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestran los cálculos realizados para cada uno de los productos obtenidos sin considerar el agua presente en el aire atmosférico.

- **CO₂**

$$M_{\text{CO}_2} = \frac{\text{Producto CO}_2}{\text{Reactivo C}} \cdot \frac{\text{Peso del C}}{100} \quad \text{Eq. 6.3.2.1}$$

$$M_{CO_2} = \frac{44,01 \text{ kg}_{CO_2}}{12,01 \text{ kg}_C} \cdot \frac{51,63 (\%C)}{100} = 1,892 \frac{\text{kg}_{CO_2}}{\text{kg CSS}}$$

- **H₂O**

$$M_{H_2O} = \frac{\text{Producto } H_2O}{\text{Reactivo } 2H} \cdot \frac{\text{Peso del } H_2}{100} + \frac{\text{Peso del } H_2O}{100} + M_{\text{agua en aire}} \quad \text{Eq. 6.3.2.2}$$

$$M_{H_2O} = \frac{18,01 \text{ kg}_{H_2O}}{2,01 \text{ kg}_{H_2}} \cdot \frac{11,10 (\%H_2)}{100} + \frac{12,40 (\% H_2O)}{100} + 0,299 \frac{\text{kg}_{H_2O}}{\text{kg CSS}} = 2,406 \frac{\text{kg}_{H_2O}}{\text{kg CSS}}$$

- **SO₂**

$$M_{SO_2} = \frac{\text{Producto } SO_2}{\text{Reactivo } S} \cdot \frac{\text{Peso del } S}{100} \quad \text{Eq. 6.3.2.3}$$

$$M_{SO_2} = \frac{64,06 \text{ kg}_{SO_2}}{32,07 \text{ kg}_S} \cdot \frac{0,10 (\%S)}{100} = 0,002 \frac{\text{kg}_{SO_2}}{\text{kg CSS}}$$

- **N₂**

$$M_{N_2} = \frac{\text{Producto } N_2}{\text{Reactivo } 2N} \cdot \frac{\text{Peso del } N_2}{100} + \frac{M_{N_2}(\%) \text{ aire seco}}{100} \cdot M_{\text{aire seco}} \frac{\text{kg aire seco}}{\text{kg CSS}} \quad \text{Eq. 6.3.2.4}$$

$$M_{N_2} = \frac{28,01 \text{ kg}_{N_2}}{28,01 \text{ kg}_{N_2}} \cdot \frac{0,27 (\%N_2)}{100} + \frac{76,7}{100} \cdot 15,721 \frac{\text{kg Aire seco}}{\text{kg CSS}} = 12,060 \frac{\text{kg}_S}{\text{kg CSS}}$$

- **HCl**

$$M_{HCl} = \frac{\text{Producto } HCl}{\text{Reactivo } 2Cl} \cdot \frac{\text{Peso del } Cl_2}{100} \quad \text{Eq. 6.3.2.5}$$

$$M_{HCl} = \frac{36,45 \text{ kg}_{HCl}}{35,45 \text{ kg}_{Cl_2}} \cdot \frac{0,03 (\%Cl_2)}{100} = 0,000 \frac{\text{kg}_{HCl}}{\text{kg CSS}}$$

- **O₂**

$$M_{O_2} = \frac{M_{\text{aire seco}}}{1,8} \cdot \frac{M_{O_2}(\%) \text{ en aire seco}}{100} \cdot 0,8 \quad \text{Eq. 6.3.2.6}$$

$$M_{O_2} = \frac{15,721 \frac{\text{kg aire seco}}{\text{kg CSS}}}{1,8} \cdot \frac{23,3}{100} \cdot 0,8 = 1,628 \frac{\text{kg}_{O_2}}{\text{kg CSS}}$$

Tabla 6.3.2.2. Cantidad mássica y porcentaje de los gases de combustión en base húmeda

	Cantidad mássica		Porcentaje	
mCO₂	1,892	kg/kgCSS	10,52	%
mH₂O	2,406	kg/kgCSS	13,38	%
mSO₂	0,002	kg/kgCSS	0,01	%
mN₂	12,060	kg/kgCSS	67,04	%
mHCl	0,000	kg/kgCSS	0,002	%
mO₂	1,628	kg/kgCSS	9,05	%
TOTAL	17,989	kg/kgCSS	100	%

Fuente: Elaboración propia.

Seguidamente se han realizado los cálculos volumétricos. Se deberán tener en cuenta el peso molecular y el volumen que ocupan por un kmol cada uno de ellos.

Sabiendo que el volumen que ocupa un mol de cualquier gas ideal en condiciones normales (es decir, una temperatura de 273 K y una presión de 1 bar) es de 22,7 litros. Si se utiliza como presión 1 atm en vez de 1 bar, este valor varía y es 22,4 litros. A Este valor se le llama volumen molar normal de un gas.

Considerando este valor constante para todos los gases se obtienen los siguientes resultados:

- **CO₂**

$$V_{CO_2} = m_{CO_2} \cdot \frac{1}{M_{mol.CO_2}} \cdot 22,4 \quad \text{Eq. 6.3.2.7}$$

$$V_{CO_2} = 1,892 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{kg CSS}} \cdot \frac{1}{44,01 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{kmol CO}_2}} \cdot 22,4 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kmol}_{\text{combustible}}} = 0,963 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg CSS}}$$

- **H₂O**

$$V_{H_2O} = m_{H_2O} \cdot \frac{1}{M_{mol.H_2O}} \cdot 22,4 \quad \text{Eq. 6.3.2.8}$$

$$V_{H_2O} = 2,406 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg CSS}} \cdot \frac{1}{18,01 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kmol H}_2\text{O}}} \cdot 22,4 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kmol}_{\text{combustible}}} = 2,992 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg CSS}}$$

- **SO₂**

$$V_{\text{SO}_2} = m_{\text{SO}_2} \cdot \frac{1}{M_{\text{mol.SO}_2}} \cdot 22,4 \quad \text{Eq. 6.3.2.9}$$

$$V_{\text{SO}_2} = 0,002 \frac{\text{kg SO}_2}{\text{kg CSS}} \cdot \frac{1}{64,06 \frac{\text{kg SO}_2}{\text{kmol SO}_2}} \cdot 22,4 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kmol}_{\text{combustible}}} = 0,001 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg CSS}}$$

- **N₂**

$$V_{\text{N}_2} = m_{\text{N}_2} \cdot \frac{1}{M_{\text{mol.N}_2}} \cdot 22,4 \quad \text{Eq. 6.3.2.10}$$

$$V_{\text{N}_2} = 12,060 \frac{\text{kg N}_2}{\text{kg CSS}} \cdot \frac{1}{28,01 \frac{\text{kg N}_2}{\text{kmol N}_2}} \cdot 22,4 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kmol}_{\text{combustible}}} = 9,644 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg CSS}}$$

- **HCl**

$$V_{\text{HCl}} = m_{\text{HCl}} \cdot \frac{1}{M_{\text{mol.HCl}}} \cdot 22,4 \quad \text{Eq. 6.3.2.11}$$

$$V_{\text{HCl}} = 0,00 \frac{\text{kg HCl}}{\text{kg CSS}} \cdot \frac{1}{36,46 \frac{\text{kg HCl}}{\text{kmol HCl}}} \cdot 22,4 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kmol}_{\text{combustible}}} = 0,000 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg CSS}}$$

- **O₂**

$$V_{\text{O}_2} = m_{\text{O}_2} \cdot \frac{1}{M_{\text{mol.O}_2}} \cdot 22,4 \quad \text{Eq. 6.3.2.12}$$

$$V_{\text{O}_2} = 1,628 \frac{\text{kg O}_2}{\text{kg CSS}} \cdot \frac{1}{32,46 \frac{\text{kg O}_2}{\text{kmol O}_2}} \cdot 22,4 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kmol}_{\text{combustible}}} = 1,140 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg CSS}}$$

Por lo tanto, la tabla de recopilación de resultados y de porcentajes queda de la manera siguiente:

Tabla 6.3.2.3. Cantidades volumétricas y porcentaje de los gases de combustión en base húmeda

	Cantidad volumétrica		Porcentaje	
vCO₂	0,963	Nm ³ /kgCSS	6,53	%
vH₂O	2,992	Nm ³ /kgCSS	20,30	%
vSO₂	0,001	Nm ³ /kgCSS	0,00	%
vN₂	9,644	Nm ³ /kgCSS	65,43	%
vHCl	0,000	Nm ³ /kgCSS	0,00	%
vO₂	1,140	Nm ³ /kgCSS	7,73	%
TOTAL	14,739	Nm ³ /kgCSS	100,00	%

Fuente: Elaboración propia.

Siguiendo los mismos pasos para el cálculo de base seca se obtienen las dos tablas siguientes:

Tabla 6.3.2.4. Cantidad másica y porcentaje de los gases de combustión en base seca

	Cantidad másica		Porcentaje	
mCO₂	1,892	kg/kgCSS	12,14	%
m SO₂	0,002	kg/kgCSS	0,01	%
mN₂	12,060	kg/kgCSS	77,40	%
mHCl	0,000	kg/kgCSS	0,00	%
mO₂	1,628	kg/kgCSS	10,45	%
TOTAL	15,583	kg/kgCSS	100	%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6.3.2.5. Cantidades volumétricas y porcentaje de los gases de combustión en base seca

	Cantidad volumétrica		Porcentaje	
vCO₂	0,963	Nm ³ /kgCSS	8,20	%
vH₂O	0,001	Nm ³ /kgCSS	0,01	%
vSO₂	9,644	Nm ³ /kgCSS	82,09	%
vN₂	0,000	Nm ³ /kgCSS	0,00	%
vHCl	1,140	Nm ³ /kgCSS	9,70	%
TOTAL	11,747	Nm ³ /kgCSS	100,00	%

Fuente: Elaboración propia.

6.4. Cálculo de las emisiones

A continuación, se realizarán los cálculos correspondientes a las emisiones para cumplir con la normativa europea. Es muy importante que las emisiones de la planta estén en todo momento dentro de los límites establecidos para cada uno de los posibles componentes químicos presentes en los gases.

6.4.1. Contaminantes

Para realizar los cálculos deben tenerse en cuenta todos los contaminantes que pueden existir en los gases de escape de la chimenea. Como norma general los datos de medición se obtienen de manera experimental. Como en este caso no será posible obtener los valores de manera experimental se considerarán unos datos teóricos para una incineración de residuos.

Habiendo obtenido anteriormente una concentración de los humos secos al 9,7% de O₂ en cantidades volumétricas se obtiene la tabla siguiente:

Tabla 6.4.1.1. Concentración de humos secos a la salida de la chimenea (Valores teóricos)

Al 9,7% de O ₂		
SO₂	275,3	mg/Nm ³
HCl	0,0	mg/Nm ³
HF	0,0	mg/Nm ³
NO_x	557,5	mg/Nm ³

Fuente: Elaboración propia.

Según la Directiva 2010/75/UE del parlamento europeo, los límites de emisiones correspondientes al 6% de O₂ en humos secos de los componentes químicos en cuestión son:

Tabla 6.4.1.2. Concentración de humos secos según la Directiva Europea

Al 6% de O ₂		
SO₂	200,0	mg/Nm ³
HCl	60,0	mg/Nm ³
HF	4,0	mg/Nm ³
NO_x	400,0	mg/Nm ³

Fuente: Elaboración propia.

Como las condiciones del oxígeno no son idénticas a las utilizadas en la directiva deben realizarse una serie de cálculos que permitan hacer una comparación proporcional entre el porcentaje de O₂ y la concentración de cada uno de los componentes. Para ello se considerará que la concentración de SO₂, HCl, HF i NO_x es nula en el aire atmosférico.

En primer lugar, se calculará la concentración de SO₂:

Tabla 6.4.1.3. Tabla de proporcionalidad para determinar la concentración de SO₂

Concentración de SO ₂	Porcentaje de O ₂
X mg/Nm ³	6%
275,3 mg/Nm ³	9,7%
0,0 mg/Nm ³	21%

Fuente: Elaboración propia.

$$\frac{0,0 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} - 275,3 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}}{0,0 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} - X \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}} = \frac{21\% - 9,7\%}{21\% - 6\%} \quad \text{Eq. 7.4.1.1}$$

$$X \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} = \frac{275,3 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}}{\frac{21\% - 9,7\%}{21\% - 6\%}} = 365,44 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}$$

Por consiguiente, la concentración de SO₂ en un 6% de oxígeno a la salida de la chimenea sería de 365,44 mg/Nm³.

A continuación, se calculará la concentración de NO_x presente en 6% de oxígeno:

Tabla 6.4.1.4. Tabla de proporcionalidad para determinar la concentración de NO_x

Concentración de NO _x	Porcentaje de O ₂
X mg/Nm ³	6%
557,5 mg/Nm ³	9,7%
0,0 mg/Nm ³	0%

Fuente: Elaboración propia.

$$\frac{0,0 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} - 557,5 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}}{0,0 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} - X \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}} = \frac{21\% - 9,7\%}{21\% - 6\%} \quad \text{Eq. 7.4.1.2}$$

$$X \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} = \frac{557,5 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}}{\frac{21\% - 9,7\%}{21\% - 6\%}} = 740,04 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}$$

La concentración de NO_x en un 6% de oxígeno a la salida de la chimenea sería de 740,04 mg/Nm³.

Por otro lado, como no hay presencia de HCl ni de HF en los humos de escape no es necesario realizar los cálculos pertinentes.

Por último, se recogen los valores obtenidos con los valores límite establecidos por la normativa en una misma tabla.

Tabla 6.4.1.5. Comparación entre concentración de humos de escape y límites establecidos por la Directiva europea

	Concentración en los humos de escape		Límites establecidos por la Directiva	
	Valores obtenidos al 6% de O ₂			
SO ₂	365,44	mg/Nm ³	200,0	mg/Nm ³
HCl	0,0	mg/Nm ³	60,0	mg/Nm ³
HF	0,0	mg/Nm ³	4,0	mg/Nm ³
NO _x	740,04	mg/Nm ³	400,0	mg/Nm ³

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede ver los valores obtenidos están lejos de estar dentro del límite establecido. En estas condiciones la planta no podría operar. Por consiguiente, debe encontrarse el modo de reducir estos valores hasta que estén por debajo del límite marcado.

6.4.2. Equiparación con los valores de la Directiva

Dicho lo anterior, deben realizarse los cálculos pertinentes para determinar la concentración de cada uno de los componentes de los gases de escape que estarían permitidos teniendo en cuenta que el contenido de O₂ es del 9,7%.

Realizando una simple diferencia entre los límites establecidos y los valores calculados se obtiene la tabla siguiente:

Tabla 6.4.2.1. Excedente en la concentración de humos al 6% de O₂

	Al 6% de O ₂	
SO ₂	165,44	mg/Nm ³
HCl	0,0	mg/Nm ³
HF	0,0	mg/Nm ³
NO _x	340,04	mg/Nm ³

Fuente: Elaboración propia.

Seguidamente, aplicando los mismos cálculos que se han realizado para obtener la Tabla 6.4.1.5 se determina el excedente de la concentración de humos al 9,7% de O₂.

Tabla 6.4.2.12. Excedente en la concentración de humos al 9,7% de O₂

Al 9,7% de O ₂		
SO ₂	124,63	mg/Nm ³
HCl	0,0	mg/Nm ³
HF	0,0	mg/Nm ³
NO _x	256,17	mg/Nm ³

Fuente: elaboración propia

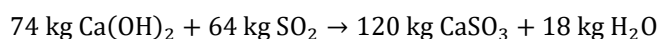
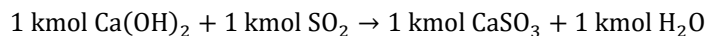
De modo que, estas cantidades son las que deben ser eliminadas para que los gases de escape puedan ser emitidos a la atmósfera y cumplan con todos los requerimientos establecidos.

6.4.3. Reducción de gases ácidos

Una vez han sido determinados los gases ácidos a eliminar deben determinarse las cantidades de hidróxido cálcico necesario para cumplir la normativa.

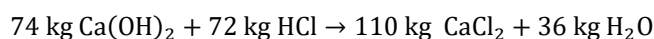
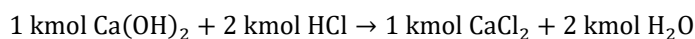
A continuación, se presentan las ecuaciones a realizar:

-SO₂



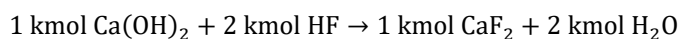
Para eliminar 1 kg de SO₂ serán necesarios 74/64 kg de Ca(OH)₂

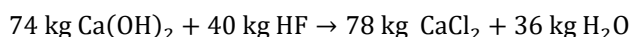
-HCl



Para eliminar 1 kg de HCl serán necesarios 74/72 kg de Ca(OH)₂

-HF





Para eliminar 1 kg de HF serán necesarios 74/40 kg de Ca(OH)₂

Una vez más, al no existir prácticamente ácido clorhídrico (HCl) ni Flúor de hidrógeno (HF), el único componente a tratar es el dióxido de azufre (SO₂).

Aplicando las ecuaciones estequiométricas anteriores se obtiene la concentración de hidróxido cálcico necesaria para 1 Nm³ de humos secos.

$$\text{Concentración Ca(OH)}_2 = \text{Concentración}_{\text{SO}_2} \text{ al } 9,7\% \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \cdot \frac{74 \text{ kmol Ca(OH)}_2}{64 \text{ kmol SO}_2} \quad \text{Eq. 6.4.3.4}$$

$$\text{Concentración Ca(OH)}_2 = 124,63 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \cdot \frac{74 \text{ kmol Ca(OH)}_2}{64 \text{ kmol SO}_2} = 144,11 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}$$

Para que esta cantidad sea efectiva debe considerarse una concentración 250% superior a la determinada:

$$\text{Concentración Ca(OH)}'_2 = \text{Concentración Ca(OH)}_2 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} * (1 + 250\%) \quad \text{Eq. 6.4.3.5}$$

$$\text{Concentración Ca(OH)}'_2 = 144,11 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} * (1 + 250\%) = 504,38 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}$$

Por último, a partir del caudal volumétrico de gases secos se obtiene el caudal másico de hidróxido cálcico a introducir en el reactor.

$$V_{\text{humos secos}} = m_{\text{combustible}} \frac{\text{kg CSS}}{\text{h}} \cdot V_{\text{TOTAL humos secos}} \frac{\text{Nm}^3}{\text{Kg CSS}} \quad \text{Eq. 6.4.3.6}$$

$$V_{\text{humos secos}} = 1.1151,281 \frac{\text{kg CSS}}{\text{h}} \cdot 11,7527 \frac{\text{Nm}^3}{\text{Kg CSS}} = 13.530,6051 \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}}$$

Por consiguiente, el caudal másico a introducir es:

$$m_{\text{Ca(OH)}_2} = V_{\text{humos secos}} \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \cdot \text{Concentración Ca(OH)}'_2 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \quad \text{Eq. 6.4.3.7}$$

$$m_{\text{Ca(OH)}_2} = 13.530,6051 \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \cdot 504,38 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{Nm}^3} = 6,28245 \frac{\text{kgCa(OH)}_2}{\text{h}}$$

6.4.4. Eliminación del óxido de nitrógeno

Como se ha comentado anteriormente, será necesario introducir unas cantidades específicas de urea en la etapa de la combustión para reducir el óxido de nitrógeno presente.

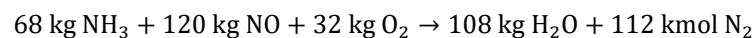
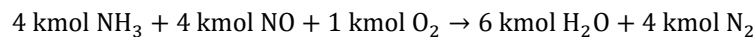
Para hacer los cálculos pertinentes se considerará que el NO_x estará repartido de la siguiente manera:

- ❖ 10% de NO₂
- ❖ 90% de NO

La urea elimina los NO_x mediante reacciones de reducción. En el sector se aplica un procedimiento de cálculo simplificado, que se basa en considerar las reacciones de reducción de NO₂ y de NO por parte del amoníaco (NH₃), componente de la molécula de urea.

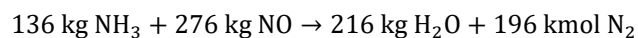
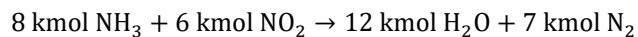
Las ecuaciones que deben plantearse son las siguientes:

-NO



Para eliminar 1 kg de NO serán necesarios 68/120 kg de NH₃

-NO₂



Para eliminar 1 kg de NO serán necesarios 136/276 kg de NH₃

Aplicando el mismo método de cálculo utilizado para determinar la concentración de hidróxido cálcico necesario se obtienen las siguientes concentraciones de amoníaco.

$$\text{Concentración NH}_3 \text{ TOTAL} = \text{Concentración NH}_3(1) + \text{Concentración NH}_3(2) \quad \text{Eq. 6.4.4.3}$$

$$\text{Concentración NH}_3(1) = \text{Concentración}_{\text{NO}} \text{ al } 9,7\% \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \cdot \frac{68 \text{ kmol NH}_3}{120 \text{ kmol NO}} \cdot \% \text{NO}_{\text{en NO}_x} \quad \text{Eq. 6.4.4.4}$$

$$\text{Concentraci3n NH}_3(1) = 256,17 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \cdot \frac{68 \text{ kmol Ca(OH)}_2}{120 \text{ kmol SO}_2} \cdot 0,9 = 130,64 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}$$

$$\text{Concentraci3n NH}_3(2) = \text{Concentraci3n}_{\text{NO}} \text{ al } 9,7\% \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \cdot \frac{136 \text{ kmol NH}_3}{276 \text{ kmol NO}_2} \cdot \% \text{NO}_2 \text{ en NO}_x \quad \text{Eq. 6.4.4.5}$$

$$\text{Concentraci3n NH}_3(2) = 256,17 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \cdot \frac{136 \text{ kmol Ca(OH)}_2}{276 \text{ kmol SO}_2} \cdot 0,1 = 12,62 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}$$

$$\text{Concentraci3n NH}_3 \text{ TOTAL} = 130,64 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} + 12,63 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} = 143,27 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}$$

Para favorecer la cin3tica y el rendimiento de la reacci3n con los humos a purificar, el reactivo debe estar en disoluci3n acuosa (se aplica con rociadores). As3, la concentraci3n estequi3mica del amoniaco en los humos secos debe ser diluida al 30% con agua. Por consiguiente, los valores efectivos de concentraci3n en estas condiciones son:

$$\text{Concentraci3n NH}_3 \text{ TOTAL}' = \frac{\text{Concentraci3n NH}_3 \text{ TOTAL}}{30\%} \quad \text{Eq. 6.4.4.6}$$

$$\text{Concentraci3n NH}_3 \text{ TOTAL}' = \frac{143,27 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}}{30\%} = 477,56 \frac{\text{mg NH}_3 \text{ diluido}}{\text{Nm}^3}$$

Finalmente, a partir del caudal volum3trico de humos secos calculado anteriormente se puede determinar el caudal m3sico de amoniaco necesario para eliminar aquellos grupos de gases que contienen nitr3geno y ox3geno en diversas proporciones (NO_x).

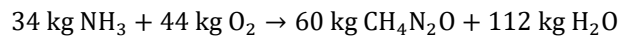
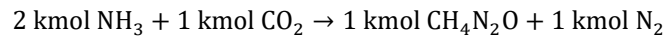
$$\dot{m}_{\text{NH}_3} = V_{\text{humos secos}} \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \cdot \text{Concentraci3n NH}_3 \text{ TOTAL}' \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \quad \text{Eq. 6.4.4.7}$$

$$\dot{m}_{\text{NH}_3} = 13.530,6051 \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \cdot 477,56 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg NH}_3 \text{ diluido}}{\text{Nm}^3} = 6,46 \frac{\text{kg NH}_3 \text{ diluido}}{\text{h}}$$

Ahora bien, el reactivo que realmente estar3 disuelto en agua ser3 la urea, en lugar del amoniaco. Por consiguiente, debe realizarse la equivalencia estequi3mica correspondiente.

A partir de la reacci3n de obtenci3n de urea:





Para obtener 1 kg de Urea diluida al 30% se necesitan 60/34 kg de amoníaco

Por lo tanto,

$$m_{\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}} = m_{\text{NH}_3} \cdot \frac{60 \text{ kg CH}_4\text{N}_2\text{O}}{34 \text{ kg NH}_3} \quad \text{Eq. 6.4.4.9}$$

$$m_{\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}} = 6,46 \frac{\text{kg NH}_3 \text{ diluido}}{\text{h}} \cdot \frac{60 \text{ kg CH}_4\text{N}_2\text{O}}{34 \text{ kg NH}_3} = 11,40 \frac{\text{kg Urea diluida}}{\text{h}}$$

6.4.5. Eliminación de dioxinas y furanos

Para la eliminación de dioxinas y furanos se utilizará como bien se ha dicho anteriormente el carbón activo. Las cantidades de este dependen de la sustancia que encontremos en la chimenea. En la etapa de combustión se crean más de 1.000.000 de compuestos solo en dioxinas. En la medida que transcurre la combustión la temperatura de los gases alcanza valores por encima de 850° C lo que promueve la aparición y desaparición de ciertas sustancias.

Con esta información es imposible determinar la cantidad de carbón activo necesario para eliminar estos componentes. Sería necesario obtener una analítica de los gases a la salida de la chimenea.

6.5. Cálculos del intercambiador

En este apartado se realizarán los cálculos correspondientes al dimensionamiento de un intercambiador. Este último estará formado por un recuperador seguido de un economizador. Como se ha explicado anteriormente, en el recuperador se realizará el intercambio de calor entre los gases de combustión y el aire necesario para los procesos de la fábrica y seguidamente, con los gases salientes del recuperador se realizará un intercambio de calor en el economizador para calentar el aire de combustión.

En primer lugar, se aplicará la ley de la conservación de la masa para encontrar el caudal másico de humos que se han obtenidos mediante la combustión del residuo y el aire.

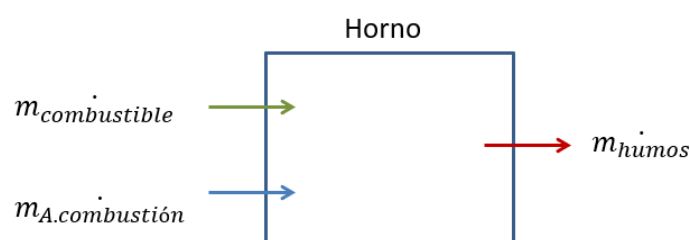


Figura 6.5.1. Conservación de la masa en el horno incinerador

Fuente: Elaboración propia.

$$\sum m_{\text{entrada}} = \sum m_{\text{salida}} \quad \text{Eq. 6.5.1}$$

$$m_{\text{combustible}} + m_{\text{A.combustión}} = m_{\text{humos}} \quad \text{Eq. 6.5.2}$$

$$m_{\text{humos}} = 1151,281 \frac{\text{kg CSS}}{\text{h}} + 18.443,85 \frac{\text{kg Aire húmedo}}{\text{h}} = 19.594,13 \frac{\text{kg humos}}{\text{h}}$$

Para los siguientes cálculos, se ha utilizado información técnica de un experto sobre intercambiadores de calor.

Para empezar, debe determinarse la temperatura de los gases de combustión a la salida de la cámara de postcombustión. Para ello se aplicará la ley de la conservación de la energía.

$$m_{\text{combustible}} \cdot \text{PCI} + m_{\text{A.combustión}} \cdot C_{pA} \cdot T_A - P = m_{\text{humos}} \cdot C_{ph} \cdot T_h \quad \text{Eq. 6.5.3}$$

Donde PCI es el poder calorífico inferior del combustible calculado en apartados anteriores, C_{pA} es el calor específico del aire en función de la temperatura, T_A es la temperatura a la que se introduce el aire de combustión en las cámara, C_{ph} es el poder calorífico de los humos en función de la temperatura, T_h es la temperatura de los humos a la salida de la cámara de postcombustión y por último P corresponde al porcentaje de pérdidas que se producen entre las tres cámaras.

En este caso, el ingeniero en cuestión ha considerado la fórmula siguiente como idónea para calcular el calor específico del aire en función de la temperatura.

$$C_{p\text{Aire}} = \frac{\left(1003,8 + 53 \cdot \frac{T}{1000} + 308,9 \cdot \left(\frac{T}{1000}\right)^2\right)}{1000} \quad \text{Eq. 6.5.4}$$

Por otro lado, mediante unos programas de cálculo se ha generado una tabla en la que se puede determinar el calor específico de los gases de combustión en función de la temperatura.

La tabla es la siguiente:

Tabla 6.5.1. Propiedades de los gases de combustión

Temperatura	Entalpía	Calor específico	Conductividad térmica	Viscosidad dinámica
°C	kJ/kg	kJ/(kg·°C)	kJ/(h·m·°C)	kg/(h·m)
50	53,227	1,06751	0,09529	0,27461
100	106,851	1,07597	0,10764	0,30601
150	160,773	1,08635	0,11974	0,33612
200	215,172	1,09824	0,13176	0,36496
250	270,174	1,11134	0,14373	0,39260
300	325,880	1,12524	0,15571	0,41914
350	382,355	1,13969	0,16772	0,44464
400	439,635	1,15438	0,17978	0,46913
450	497,731	1,16912	0,19180	0,49274
500	556,639	1,18373	0,20377	0,51548
550	616,335	1,19805	0,21570	0,53746
600	676,779	1,21195	0,22755	0,55869
650	737,924	1,22535	0,23928	0,57924
700	799,712	1,23820	0,25091	0,59926
750	862,100	1,25043	0,26243	0,61868
800	925,032	1,26211	0,27386	0,63769
850	988,453	1,27312	0,28525	0,65628
900	1052,340	1,28359	0,29659	0,67449
950	1116,661	1,29351	0,30794	0,69245
1000	1181,410	1,30289	0,31933	0,71021
1050	1246,607	1,31181	0,33072	0,72779
1100	1312,285	1,32022	0,34215	0,74529
1150	1378,521	1,32822	0,35362	0,76275
1200	1445,405	1,33576	0,36501	0,78021
1250	1513,084	1,34283	0,37623	0,79779
1300	1581,727	1,34932	0,38711	0,81555
1350	1651,559	1,35518	0,39741	0,83351
1400	1722,843	1,36021	0,40683	0,85176
1450	1795,903	1,36423	0,41487	0,87035
1500	1871,110	1,36691	0,42098	0,88936
1550	1948,897	1,36800	0,42450	0,90883
1600	2029,756	1,36695	0,42454	0,92888
1650	2114,254	1,36335	0,42006	0,94952
1700	2203,023	1,35644	0,40985	0,97084
1750	2296,765	1,34555	0,39243	0,99290
1800	2396,265	1,32977	0,36609	1,01576
1850	2502,388	1,30808	0,32883	1,03954
1900	2616,080112	1,27936	0,27834	1,06428

Para determinar con exactitud el poder calorífico de los gases de combustión a la temperatura aún desconocida, se ha utilizado el sistema de iteración. De esta manera se ha obtenido mediante la tabla un valor de 1,3306 kJ/(kg °C).

Aplicando la fórmula presentada para el cálculo del calor específico del aire de combustión (Eq. 6.5.4) se obtiene el valor siguiente:

$$C_{p\text{Aire}} = \frac{\left(1003,8 + 53 \cdot \frac{75}{1000} + 308,9 \cdot \left(\frac{75}{1000}\right)^2\right)}{1000} = 1,0095 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$$

Una de las condiciones que se ha establecido es que el aire de combustión a introducir mediante el ventilador primario y secundario tendrá una temperatura de 75°C gracias al intercambio que se produce en el economizador con los gases de escape. Se introduce aire a una temperatura ligeramente más elevada que la temperatura atmosférica para facilitar la combustión con los gases generados.

Por último, al tratarse de una cámara de combustión rotatoria, se considerarán un total de un 6% de pérdidas. En estas estarán incluidas las pérdidas por radiación, por convección, calor sensible en las cenizas, por calor sensible en los gases de escape y por vapor de agua contenido en el combustible. Por consiguiente, aislando la temperatura de los gases a la salida de la cámara de postcombustión de la ecuación 7.5.3 se obtiene:

$$T_h = \frac{\left(\left(1151,28 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 6396 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \cdot 4,1868 \frac{\text{kJ}}{\text{kcal}} \cdot \frac{1}{3600} \frac{\text{h}}{\text{s}} \right) + \left(5,097 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1,0095 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 75 ^\circ\text{C} \right) \right) \cdot (1 - 6\%)}{5,443 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1,33 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}}$$

$$T_h = 1162 ^\circ\text{C}$$

Recuperador

Una vez encontrado este valor, se pueden calcular las temperaturas y el caudal de aire a introducir en el recuperador para cubrir la demanda de la fábrica.

Llegados a este punto, es necesario conocer el valor de la temperatura de los gases de salida del recuperador. En este tipo de casos, se supone que la temperatura de los humos a la salida esta entra 200 °C y 250 °C por encima de la temperatura de entrada del flujo de intercambio. Esta aproximación, como bien se ha dicho, se realiza en los casos en los que faltan valores. Se considera que en estas condiciones los valores que se obtienen son bastante próximos a los óptimos desde un punto de vista económico y técnico.

Con respecto a las necesidades de la fábrica, los operarios han indicado que la temperatura necesaria del aire requerido para los procesos de secado de la materia orgánica es de 450 °C.

Por último, se considerará un 3% de pérdidas por radiación y por convección.

$$m_{\text{humos}} \cdot (C_{p_{hi}} \cdot T_{hi} - C_{p_{ho}} \cdot T_{ho}) - P = m_{A,\text{proceso}} \cdot (C_{p_{ao}} \cdot T_{ao} - C_{p_{ai}} \cdot T_{ai}) \quad \text{Eq. 6.5.5}$$

Donde $C_{p_{hi}}$ es el calor específico de los humos a la entrada, T_{hi} es la temperatura de los gases a la entrada, $C_{p_{ho}}$ es el calor específico de los humos a la salida del intercambiador, T_{ho} es la temperatura de los humos a la salida, $C_{p_{ao}}$ es el calor específico del aire de proceso a la salida, T_{ao} es la temperatura a la salida, $C_{p_{ai}}$ es el calor específico del aire de proceso a la entrada y T_{ai} es la temperatura del aire de proceso a la entrada del intercambiador.

Utilizando el mismo método de iteración que se ha utilizado anteriormente se pueden determinar los valores del calor específico de los humos a la entrada y a la salida del intercambiador ya que se conocen las temperaturas. De igual modo que, utilizando la fórmula del calor específico del aire se puede calcular el calor específico en función de la temperatura.

Por consiguiente, el caudal másico de aire para el proceso de la fábrica es:

$$m_{A,\text{proceso}} = \frac{\left(5,443 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot \left(1,330 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 1167^\circ\text{C} - 1,1183 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 275^\circ\text{C} \right) \right) \cdot (1 - 3\%)}{1,0902 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 450^\circ\text{C} - 1,005 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 25^\circ\text{C}} = 14,047 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Considerando el caudal en horas se obtiene un valor de 50.570,67 kg/h necesario para el proceso.

Por último, para saber si los cálculos y el dimensionamiento del intercambiador y del resto de la planta son satisfactorios debe calcularse el calor transferido entre los dos flujos y ver si es suficiente para la demanda establecida.

$$Q = m_{A,\text{proceso}} \cdot (C_{p_{ao}} \cdot T_{ao} - C_{p_{ai}} \cdot T_{ai}) \quad \text{Eq. 6.5.6}$$

$$Q = 14,047 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot \left(1,0902 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 450^\circ\text{C} - 1,005 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 25^\circ\text{C} \right) = 6.538 \text{ kW}$$

Comparando este valor con la energía total requerida para el secado se puede observar cómo efectivamente, el calor producido con el intercambio es suficiente para la demanda de la fábrica.

Llegados a este punto, realizando un análisis térmico se puede calcular el área de intercambio necesaria en el recuperador. Para ello deberá aplicarse la fórmula siguiente:

$$Q = U_m \cdot S \cdot \Delta T_{ml} \quad \text{Eq. 6.5.6}$$

Q corresponde al calor transferido en el intercambio, U_m es el coeficiente global promedio de transferencia de calor, S es el área de intercambio y ΔT_{ml} es la diferencia media logarítmica de las temperaturas de entrada y salida de los dos flujos de intercambio.

Al tratarse de un intercambio a contraflujo, la diferencia logarítmica de temperatura se calcula de la siguiente manera:

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_{ho} - T_{ai}) - (T_{hi} - T_{ao})}{\ln\left(\frac{T_{ho} - T_{ai}}{T_{hi} - T_{ao}}\right)} \quad \text{Eq. 6.5.7}$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{(275 - 25) - (1162 - 450)}{\ln\left(\frac{275 - 25}{1162 - 450}\right)} = 441,36^\circ\text{C}$$

Para determinar el coeficiente global debe tenerse en cuenta que el intercambio es a contraflujo. Siguiendo esta condición la fórmula a utilizar es la siguiente:

$$U_m = 5,030 + 0,025 \cdot (T_{hi} - T_{ao}) \quad \text{Eq. 6.5.8}$$

$$U_m = 5,030 + 0,025 \cdot (1162 - 450) = 22,955 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$$

Finalmente, aislando el área de intercambio de la fórmula presentada anteriormente se obtiene:

$$S = \frac{6.538 \text{ kW}}{22,955 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 441,36^\circ\text{C}} = 645,078 \text{ m}^2$$

Economizador

Para dimensionar el economizador se seguirá prácticamente el mismo método que para el recuperador.

En este caso, al conocer el caudal másico de aire para la combustión, la temperatura a que debe estar y su temperatura de entrada, el único valor que debe determinarse es la temperatura de los gases de combustión a la salida de las dos etapas.

Como se utilizará el mismo equipo para los dos intercambios se mantendrá el porcentaje de pérdidas.

$$m_{\text{húmos}} \cdot (C_{p_{hi}} \cdot T_{hi} - C_{p_{ho}} \cdot T_{ho}) - P = m_{A.\text{combustión}} \cdot (C_{p_{ao}} \cdot T_{ao} - C_{p_{ai}} \cdot T_{ai}) \quad \text{Eq. 6.5.9}$$

Aplicando la misma fórmula se obtiene el valor de la temperatura de los gases de combustión a la salida.

$$T_{ho} = \frac{\left(\frac{\left(5,443 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot \left(1,0095 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 75 \text{ }^\circ\text{C} - 1,0053 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 25 \text{ }^\circ\text{C} \right) \right)}{5,123 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot (1 - 0,03)} - \left(1,1183 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 275 \text{ }^\circ\text{C} \right) \right)}{1,1055 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}} = 234 \text{ }^\circ\text{C}$$

Seguidamente, de la misma manera que en el recuperador se puede obtener el área de intercambio necesaria.

Primero se calculará el calor transferido en el intercambio:

$$Q = 5,123 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot \left(1,0095 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 75 \text{ }^\circ\text{C} - 1,005 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 25 \text{ }^\circ\text{C} \right) = 259 \text{ kW}$$

Seguidamente se determinará la diferencia logarítmica de la temperatura:

$$\Delta T_{ml} = \frac{(234 - 25) - (275 - 75)}{\ln \left(\frac{234 - 25}{275 - 75} \right)} = 204,36 \text{ }^\circ\text{C}$$

Calculando una vez más el coeficiente promedio de transferencia de calor:

$$U_m = 5,030 + 0,025 \cdot (275 - 75) = 10,03 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$$

Por último, aplicando la fórmula del análisis térmico se puede obtener el área necesaria para el economizador.

$$S = \frac{259 \text{ kW}}{10,03 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 204,36 \text{ }^\circ\text{C}} = 126,417 \text{ m}^2$$

6.6. Balance

A continuación, se ha decidió realizar el balance de temperaturas y de masas a lo largo de todo el proceso a régimen de trabajo.

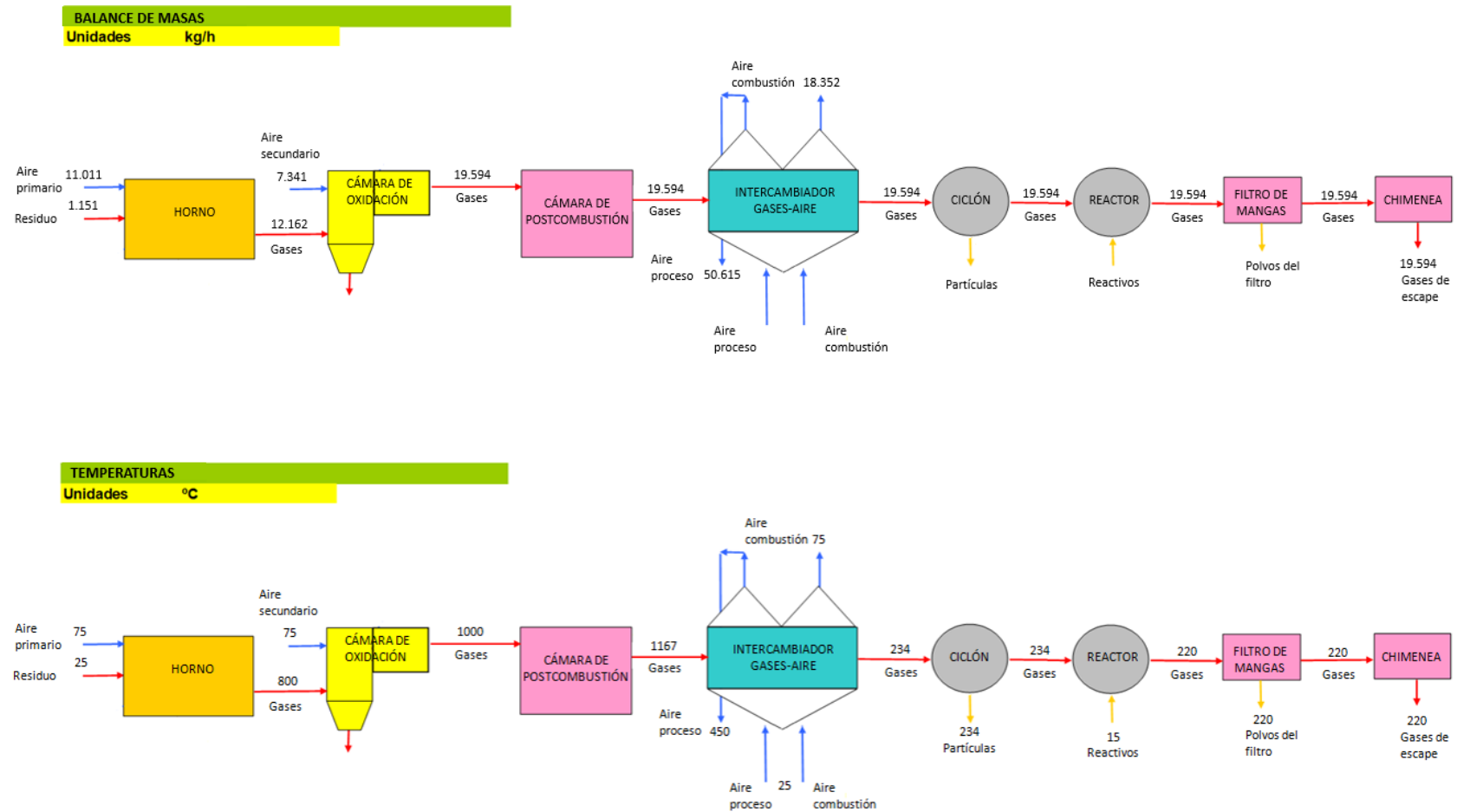


Gráfico 6.6.1. Balance de masas y de temperaturas en régimen de trabajo (Fuente: elaboración propia.)

7. Estudio económico

El presente estudio económico tiene por objeto analizar la viabilidad de la instalación de una planta de valorización energética, así como determinar el ahorro que esta supondría respecto a otros costes de la empresa.

7.1. Metodología

La metodología usada en este estudio se basa en determinar la rentabilidad del proyecto. Para ello se tendrán en cuenta los factores más importantes como las inversiones a realizar y el número de plazos, los gastos y ahorros que aportará la planta, los impuestos y la influencia que todo esto tiene en el medio ambiente.

7.2. Análisis de la situación actual de la empresa

En primer lugar, se realizará un análisis de la situación actual de la empresa para poder determinar el consumo energético del cual disponen y el coste que tiene la gestión de residuos generados.

La empresa de la cual se ha decidió realizar la propuesta de proyecto a considerado conveniente entregar y facilitar sus facturas energéticas con tal de poder realizar un mejor estudio.

Consumo de gas natural

A continuación, mediante toda la información recogida se han podido realizar las tablas y gráficos siguientes:

Enero	19,592	€/MWh
Febrero	21,034	€/MWh
Marzo	25,402	€/MWh
Abril	20,658	€/MWh
Mayo	22,446	€/MWh
Junio	22,895	€/MWh
Julio	23,146	€/MWh
Agosto	24,655	€/MWh
Septiembre	28,614	€/MWh
Octubre	26,711	€/MWh
Noviembre	24,536	€/MWh
Diciembre	16,35	€/MWh

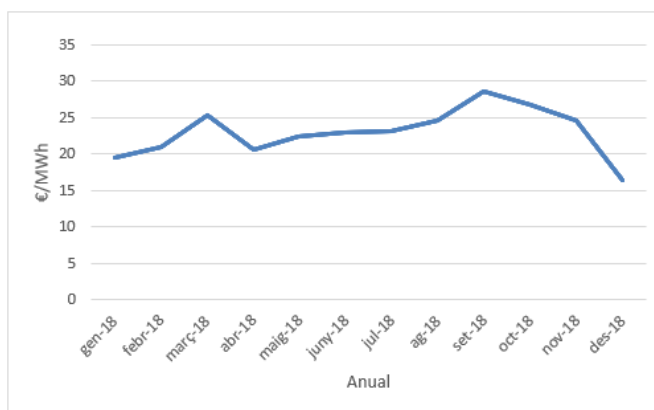


Figura 7.2.1. Variación del precio del gas natural durante el año 2018

Fuente: Elaboración propia.

Enero	2.720.459	kWh
Febrero	2.730.226	kWh
Marzo	3.069.383	kWh
Abril	2.146.357	kWh
Mayo	2.478.476	kWh
Junio	1.852.859	kWh
Julio	1.864.903	kWh
Agosto	2.166.852	kWh
Septiembre	2.014.339	kWh
Octubre	2.461.384	kWh
Noviembre	2.612.388	kWh
Diciembre	2.488.548	kWh
TOTAL	28.606.174	kWh

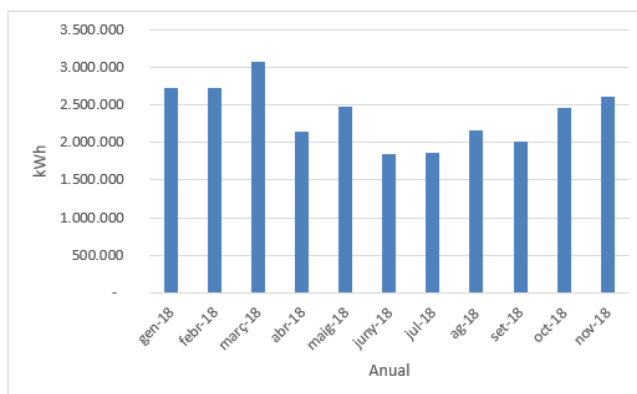


Figura 7.2.2. Variación del consumo de gas natural durante el año 2018

Fuente: Elaboración propia.

Enero	56.697	€
Febrero	61.154	€
Marzo	82.158	€
Abril	47.269	€
Mayo	59.015	€
Junio	44.950	€
Julio	45.494	€
Agosto	56.381	€
Septiembre	60.388	€
Octubre	69.106	€
Noviembre	70.276	€
Diciembre	40.688	€
TOTAL	693.576,61	€

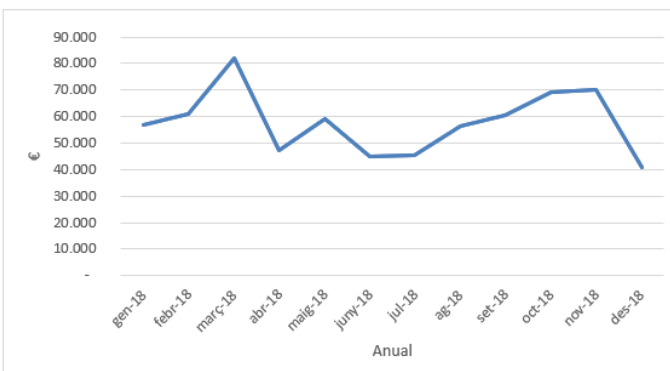


Figura 7.2.3. Coste mensual respecto al gas natural consumido durante el año 2018

Fuente: Elaboración propia.

Estudiando los datos obtenidos se puede ver como el precio por MWh de gas natural y el consumo mensual del cual la empresa dispone son relativamente constantes. Respecto al precio, este oscila entre los 20€/MWh y los 25€/MWh. Por otro lado, el consumo mensual de media es de aproximadamente 2.500 kWh acumulando a final de año 28.606 MWh.

Estos valores tan elevados son debidos a que actualmente la empresa realiza su proceso de secado mediante aire seco calentado a base de combustión de gas natural. Visto lo visto, reducir considerablemente el consumo del gas natural teniendo en cuenta que solo se utilizará para el encendido de la cámara de combustión es un punto a tener en cuenta respecto al ahorro económico.

Analizando las facturas de gas natural se puede ver como la empresa tiene un coste mensual de aproximadamente 50.000€ en gas natural, teniendo en cuenta términos fijos y variables. A final de año el coste acumulado de gas natural es casi de 700.000€. Tanta dependencia del gas natural para la realización de sus procesos no es buena ya que la empresa depende en todo momento de terceros. Si por algún caso, el precio del gas natural se disparara, los servicios ofrecidos podrían ser inviables.

Consumo eléctrico

Seguidamente se analizará la factura eléctrica de la empresa y se estudiarán los posibles cambios que existirían si se lleva a cabo la propuesta de proyecto.

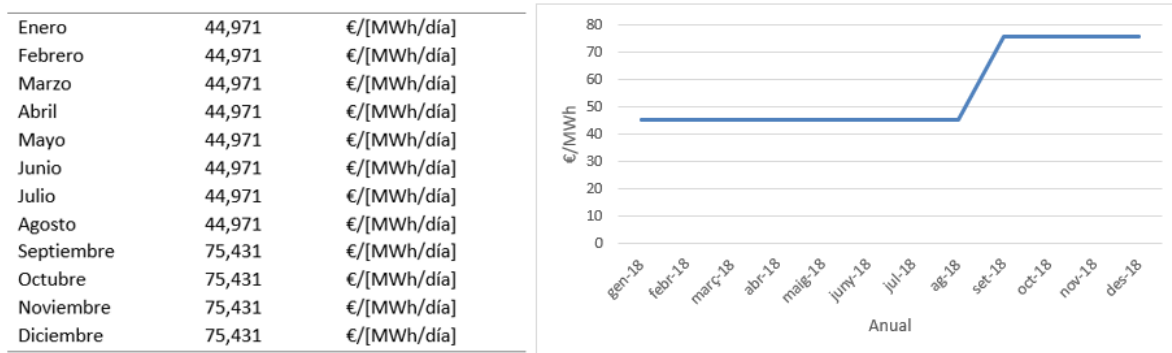


Figura 7.2.4. Variación del precio de la electricidad durante el año 2018

Fuente: Elaboración propia.

Enero	219,129	MWh
Febrero	217,733	MWh
Marzo	212,415	MWh
Abril	221,616	MWh
Mayo	141,153	MWh
Junio	117,617	MWh
Julio	123,549	MWh
Agosto	119,000	MWh
Septiembre	119,000	MWh
Octubre	128,131	MWh
Noviembre	144,753	MWh
Diciembre	188,974	MWh
TOTAL	1.953,070	MWh

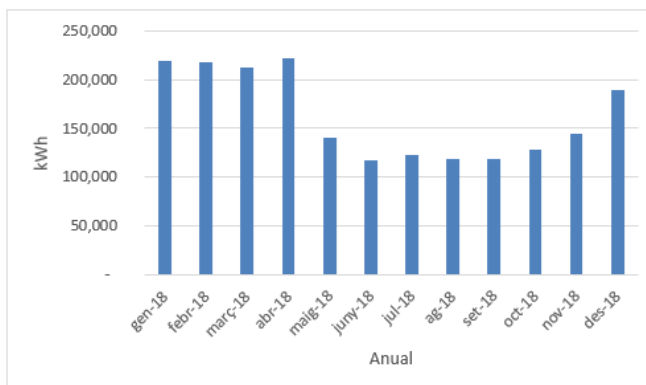


Figura 7.2.5. Variación del consumo de electricidad durante el año 2018

Fuente: Elaboración propia.

Enero	11.294	€
Febrero	11.232	€
Marzo	10.993	€
Abril	11.406	€
Mayo	7.788	€
Junio	6.729	€
Julio	6.996	€
Agosto	6.792	€
Septiembre	10.416	€
Octubre	11.105	€
Noviembre	12.359	€
Diciembre	15.694	€
TOTAL	122.804	€

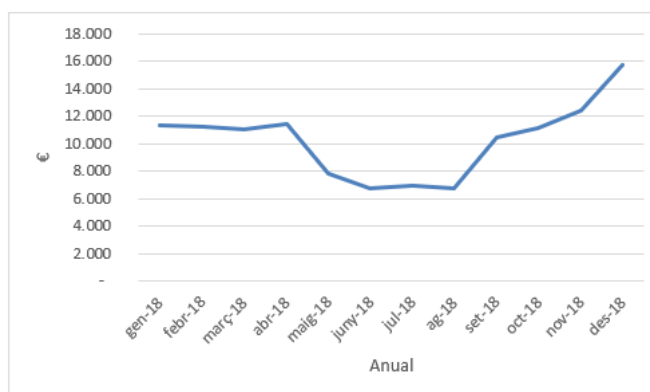


Figura 7.2.6. Coste mensual respecto a la electricidad consumida durante el año 2018

Fuente: Elaboración propia.

Respecto al análisis del consumo eléctrico se pueden destacar algunas diferencias. En primer lugar, se puede ver como el precio del MWh/día es totalmente constante durante las dos primeras tercias partes del año. A partir de septiembre el precio de la electricidad para la empresa en cuestión aumenta en 30€/(MWh/día) respecto al resto del año. Este dato afecta considerablemente la factura eléctrica aumentando considerablemente el montante a pagar.

Por otro lado, analizando la gráfica de consumo anual se puede ver como durante los meses de primavera y verano, el consumo energético es prácticamente la mitad que durante los meses de invierno. Esto es debido a la baja demanda del mercado y a los meses en los que la empresa permanece cerrada.

Por lo tanto, se puede ver como el precio de la electricidad puede variar considerablemente y puede hacer aumentar la factura eléctrica. Aun así, el consumo eléctrico por parte de la empresa es muy inferior al consumo de gas natural. En el año 2018, la empresa tuvo que pagar una factura anual de electricidad de 122.804€ considerando costes fijos y variables. En el caso de que se llevara a cabo el proyecto, la empresa pasaría a aumentar su consumo eléctrico debido a la instalación de numerosos equipos consumidores de energía eléctrica como pueden ser los ventiladores o el alimentador entre otros.

Coste de gestión de residuos

Otro coste que debe tenerse muy en cuenta a la hora de realizar el estudio es el de gestión y reciclaje de los residuos generados por una empresa. Es evidente que en la actualidad todo tiene un precio y, en este caso, depositar los residuos en un vertedero o en una planta de reciclaje no es gratis. Aunque se trata de un coste particular y personalizado en función del tipo de residuos, la cantidad de residuos y la empresa, se ha realizado una aproximación al respecto.

Considerando que los residuos generados son plástico sucio, acumulación de papel y cartón y en algunos casos materia orgánica que no se ha podido utilizar, como se puede observar en la analítica presentada anteriormente. El precio medio por tonelada de residuo es de aproximadamente 35,00€/Tn. Teniendo en cuenta que la empresa en cuestión genera una cantidad de 5.266,42 Tn/año de residuo, el total a pagar en el año 2018 ha sido de 184.324,70€.

Finalmente, agrupando los tres costes principales de la empresa se puede determinar el montante total a pagar en el año 2018.

Tabla 7.2.1. Coste energético y de gestión de residuos el año 2018

Consumo gas natural	693.576,61 €
Consumo electricidad	122.804,45 €
Coste de gestión de residuos	184.324,70 €
TOTAL	1.000.705,76 €

Fuente: Elaboración propia.

Reduciendo considerablemente el consumo de gas natural y las toneladas de residuos a gestionar durante todo el año se podría conseguir un ahorro económico considerable sin perder de vista el punto de vista medioambiental.

7.3. Inversión para una mejora energética y de gestión

Tras realizar todo el dimensionamiento técnico del proyecto debe realizarse el presupuesto económico que comporta el montaje y la adquisición de todos los equipos necesarios.

Para ello se tendrá en cuenta el concepto CAPEX que proviene del inglés *Capital Expenditure*. Este concepto representa el gasto que una empresa realiza en bienes de equipo y que genera beneficios para una compañía. Dicho de otro modo, el CAPEX constituye la caja que una empresa dedica a mantener su inmovilizado en condiciones de producción y funcionamiento estables.

A continuación, se realizará el presupuesto de ejecución de todo el proyecto.

1. FASE I

1.1. Movimiento de tierra y obra civil	41.630 €
1.1.1. Movimiento de tierra	
1.1.2. Cimentación, estructura y losas	
1.1.3. Cubierta y revestimiento	
1.1.4. Aberturas y puertas	
1.1.5. Condicionamiento exterior	
1.2. Elementos y trabajos de conexión en la planta	8.000 €
1.2.1. Protección contra incendios	
1.2.2. Instalación eléctrica	
1.2.3. Control de calidad	
1.2.4. Seguridad y salud	
1.3. Proyecto y dirección facultativa (*)	70.200 €
1.3.1. Jefe dirección de proyecto	
1.3.2. Jefe dirección de obra	
1.3.3. Cabeza de proyecto	
1.3.4. Tasa de tramitación ambiental	
1.3.5. Tasa de licencia de obras	

----- **119.839 €**

(*) Considerando que la duración del proyecto es de 6 meses

2. FASE II

2.1. Equipos Alimentación	197.000 €
2.1.1. Triturador secundario CSS	
2.1.2. Empujador hidráulico	

2.1.3. Tolva de alimentación	
2.1.4. Sinfín transportador	
2.2. Horno	1.200.000 €
2.2.1. Cámara de combustión	
2.2.2. Quemador de gas auxiliar	
2.2.3. Cámara de oxidación	
2.2.4. Cámara de postcombustión	
2.2.5. Aislamiento	
2.3. Chimenea de emergencia	20.000 €
2.4. Reducción NO _x	35.000 €
2.4.1. Sistema catalítico	
2.4.2. Tanque de Urea	
2.5. Gestión y control	86.500 €
2.5.1. Sistema de recolección de cenizas y escoria	
2.5.2. Conductos de transporte de gases y conexión	
2.5.3. Aislamiento de conductos y conexiones	
2.5.4. Sistema de control de combustión	
2.6. Ventiladores	25.000 €
2.6.1. Ventilador de aire primario	
2.6.2. Ventilador de aire secundario	

	1.563.500 €

3. Fase III

3.1. Intercambiador de calor	290.000 €
3.1.1. Recuperador	
3.1.2. Economizador	
3.1.3. Sistema de limpieza	
3.2. Conductos de transporte de aire seco	6.000 €

	296.000 €

4. FASE IV

4.1. Ciclón de partículas	59.000 €
4.2. Reactor de neutralización	66.000 €
4.3. Filtro de mangas	247.000 €
4.3.1. Compresor de aire comprimido	
4.3.2. Estructura filtro de mangas	
4.3.3. Aislamiento térmico	
4.4. Reactivos	9.500 €
4.4.1. Sistema dosificación de reactivo en los gases	
4.4.2. Almacenamiento de reactivos	
4.5. Ventilador de tiro	29.000 €
4.6. Chimenea	35.000 €
4.6.1. Accesorios conductos de bypass chimenea	
4.7. Sistema de transporte de cenizas y almacenamiento	26.000 €
<hr style="border-top: 1px dashed black;"/>	
	471.500 €

5. FASE V

5.1. Instalación eléctrica y control	59.000 €
5.2. Analizador de NO _x , SO ₂ , CO y polvos en la salida de la chimenea	66.000 €
5.3. Sala de control y sistema de mediciones	247.000 €
<hr style="border-top: 1px dashed black;"/>	
	241.000 €

Cualquier otro equipo que no esté especificado anteriormente estará excluido y deberá valorarse como accesorio aparte. Dicho esto, se enumerarán una serie de condiciones para tener en cuenta respecto a lo que está incluido en el presupuesto del proyecto.

Tabla 7.3.1. Aspectos incluidos y excluidos en el presupuesto del proyecto

INCLUIDO	EXCLUIDO
- Arranque	- Edificio almacenamiento de combustible
- Pruebas	- Instalaciones auxiliares si no están explícitamente
- Formación	- Sistema centralizado de cenizas
- Puesta en marcha	- Plataformas y escaleras
- Garantías	- Red primaria de puesta a tierra de los equipos
- Transporte de los equipos in situ	- Acometida de aire
- Descarga de los equipos y medios de montaje	- Acometida de agua
- Montaje mecánico	- Acometido eléctrica de emergencia

Fuente: Elaboración propia.

Normalmente, cuando una empresa emprende un nuevo proyecto o decide iniciar una nueva etapa, el CAPEX será alto, ya que toda reorientación empresarial necesita bienes de equipo que contribuyan al correcto desarrollo de la actividad.

Como resultado, para que la empresa pueda realizar una reorientación a nivel ambiental, energético y económico, deberá realizar una inversión inicial de **2.691.839 €**.

7.4. Aplicación de la mejora energética

Una vez se han adquirido los equipos, la maquinaria y se ha realizado toda la instalación, debe calcularse el coste que tiene el mantenimiento de la planta. Para ello se utilizará el concepto de OPEX que proviene del inglés *Operational Expenditure*. Este concepto hace referencia más concretamente a la cantidad de dinero que debe destinarse a mantener en funcionamiento los bienes de capital de una determinada actividad de una empresa, en particular sus equipamientos e instalaciones. El OPEX es, por lo tanto, el dinero invertido continuamente en mantener la producción de un producto o un servicio.

A continuación, se muestran los gastos principales que tiene anualmente operar una planta de recuperación energética.

1. FASE I

1.1. Costes operacionales

310.000 €

- 1.1.1. Jefe de operación
- 1.1.2. Operario auxiliar
- 1.1.3. Reactivos
- 1.1.4. Gas natural
- 1.1.5. Gestión de cenizas
- 1.1.6. Electricidad
- 1.1.7. Mantenimiento
- 1.1.8. Controles ambientales
- 1.1.9. Calibración de elementos de medición de emisiones

----- **310.000 €**

Para realizar este coste aproximado se ha considerado que la planta deberá estar operada y controlada en todo momento por un jefe de operación y un auxiliar con sus respectivos sueldos. Seguidamente, se ha aproximado un precio de los tres reactivos a introducir con sus respectivas cantidades. Como bien se ha comentado anteriormente, la planta no estará exenta de consumir gas natural, por lo tanto, se ha considerado que consumirá aproximadamente el 10% del que consume actualmente. Por otro lado, debe considerarse un coste aparte la electricidad que consumirán estos nuevos equipos. Aunque la cantidad de residuos generados sea muy inferior, debe considerarse un coste de gestión de cenizas. También existe un coste bastante elevado de mantenimiento, como norma general se aproxima un 1,5% de la inversión inicial. Por último, calibración de elementos de medición de emisiones.

En definitiva, el buen funcionamiento de la instalación y el aprovisionamiento de material tiene un coste anual de **310.000 €**.

7.4.1. Rentabilidad

Con el propósito de realizar un proyecto rentable deben considerarse todos los ahorros que conlleva realizar este tipo de inversión a la vez que todos los gastos de operación. Por lo tanto, se considerarán como costes negativos el actual coste de gestión de residuos, y el actual coste de gas natural.

Tabla 7.4.1.1. Periodo de retorno del proyecto

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Inversión inicial	2.691.839,00 €					
Coste de operación		310.000,00 €	310.000,0 €	310.000,00 €	310.000,00 €	310.000,00 €
Coste de gestión de residuos		184.324,70 €	184.324,70 €	184.324,70 €	184.324,70 €	184.324,70 €
Coste de gas natural		693.576,61 €	693.576,61 €	693.576,61 €	693.576,61 €	693.576,61 €
TOTAL	- 2.691.839,00 €	- 2.123.937,69 €	- 1.556.036,380 €	- 988.135,07 €	- 420.233,76 €	147.667,55 €

	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10	Año 11
Inversión inicial						
Coste de operación	310.000,00 €	310.000,00 €	310.000,00 €	310.000,00 €	310.000,00 €	310.000,00 €
Coste de gestión de residuos	184.324,70 €	184.324,70 €	184.324,70 €	184.324,70 €	184.324,70 €	184.324,70 €
Coste de gas natural	693.576,61 €	693.576,61 €	693.576,61 €	693.576,61 €	693.576,61 €	693.576,61 €
TOTAL	567.901,31 €	1.135.802,62 €	1.703.703,93 €	2.271.605,24 €	2.839.506,55 €	3.407.407,86 €

Fuente: Elaboración propia.

Considerando que los precios del gas natural y el de gestión de residuos no varían en los próximos años y se añade al coste anual la gestión de la planta, se obtendría un retorno a los **5 años**.

Es difícil determinar si es un proyecto rentable o no ya que depende de muchos factores que afectarían a los resultados obtenidos. Como bien se ha dicho anteriormente, el coste de gestión de residuos y de gas natural se mantienen constantes a lo largo de los años para realizar el estudio. Esta suposición puede ser muy perjudicial para extraer conclusiones respecto al proyecto.

En este caso en concreto, la gestión de residuos es un tema polémico y a la vez muy actual. Según muchas fuentes, el precio de gestión de residuos aumentará de manera considerable los próximos años. Por otro lado, el precio del gas natural también debe tenerse en cuenta con pinzas. Si este se dispara y aumenta considerablemente, el proyecto tendría una rentabilidad mayor, en el caso de que este disminuya podría ponerse en duda la necesidad de poner en marcha el proyecto.

Teniendo en cuenta estos dos factores, se considera que una rentabilidad de 5 años es suficientemente buena para plantearse seriamente llevar el proyecto a cabo.

8. Conclusiones

El sector agroalimentario supone una de las principales actividades manufactureras a nivel mundial. En los últimos años ha evolucionado de forma notable, desarrollando la actividad industrial por encima de la actividad agrícola. Esta situación conlleva a que las actividades y procesos para la fabricación y elaboración de alimentos progrese de la mano de la tecnología, utilizando equipos mucho más sofisticados y a su vez, grandes consumidores de energía.

El consumo energético en el sector representa más del 30% de la energía mundial consumida, basado principalmente en la electricidad y gas natural con un 53% y un 25% respectivamente. Considerando que la producción mundial de alimentos se duplicará en el año 2050, es de prever que la demanda energética irá de la mano.

Atendiendo a la dificultad de utilizar energía renovable en los procesos productivos, el sector agroalimentario puede llegar a cuestionar su rentabilidad debido a las medidas legislativas que se están tomando respecto al cambio climático.

Otro de los grandes problemas que presenta la industria alimentaria es la generación de residuos y desperdicio de alimentos. Más de un tercio de los alimentos son desperdiciados, sin tener en cuenta las grandes cantidades de materia orgánica y plástico que se desechan en los procesos de producción.

El cumplimiento de objetivos transversales ligados a las nuevas Directivas de la UE promueve el reciclado del 75% de los residuos de envase y una reducción de la eliminación en vertedero a un máximo del 10% de todos los residuos de aquí a 2030.

En definitiva, el sector agroalimentario debe promover cambios muy significativos contribuyendo a la seguridad alimentaria a nivel mundial y a la protección del medioambiente. Es por ello, que todos los alimentos producidos deben ser mayoritariamente consumidos y en el caso de lo contrario deben ser gestionados de la mejor manera posible.

Si aplicamos al sector el concepto de economía circular implica que los sistemas productivos se asemejen a un ecosistema en el que los materiales y los recursos se mantengan en la economía con un cierto valor el mayor tiempo posible reduciendo así la generación de residuos.

Desde un punto de vista tecnológico se estudia con detalle la viabilidad de que todos los residuos que no puedan ser reciclados o gestionados correctamente sean valorizados energéticamente generando recursos para la propia industria alimentaria. Es desde esta óptica cuando se ha considerado la opción de realizar una coincineración con los residuos no reciclables, aportando un gran valor al sector descartando la eliminación de éstos en vertederos.

Con todo ello, se ha querido demostrar la existencia de una vía hacia la descarbonización del sector agroalimentario promoviendo el desarrollo sostenible como un sistema global, en el cual se conjugan e integran los objetivos medioambientales, sociales y económicos en una sola propuesta.

Desde el punto de vista **medioambiental**, se pretende reducir las emisiones de CO₂ a la atmósfera y un cambio de dirección hacia un nuevo modelo energético basado fuentes de energía renovables.

Por otro lado, se entiende como sostenibilidad **social** el mantenimiento de la cohesión y de su habilidad para trabajar en la persecución de objetivos comunes en equidad. El objetivo es contribuir en cambios positivos y sostenibles en beneficio de la sociedad. Poder ser considerada como una empresa a favor de la protección del medioambiente, poder poner una etiqueta verde en todos sus productos y mejorar su filosofía es un cambio muy positivo que puede tener una gran repercusión a nivel cultural y económico.

El tercer pilar de la sostenibilidad es el aspecto **económico**. Este es el aspecto más importante para cualquier empresa que implica el uso de prácticas económicamente rentables para su progreso y beneficio. Difícilmente una empresa decidirá realizar una inversión en un nuevo proyecto que no sea viable desde un punto de vista económico. Deben considerarse los índices de rentabilidad financiera, el análisis de sostenibilidad y los cambios previstos en los indicadores económicos. Dicho esto, con la propuesta de proyecto planteada se puede ver como existe una rentabilidad económica que permite la posibilidad de plantear seriamente el desarrollo de éste.

A modo de conclusión se analiza la evolución que tendría una empresa del sector agroalimentario que decidiera apostar por la valorización energética como posible solución a la gestión de residuos y al uso de combustibles fósiles.

Del análisis del estado actual que se ha realizado en las empresas del sector se puede concluir que su situación se está volviendo cada vez más insostenible. Parece evidente que los costes de gestión serán cada vez más altos. Determinados residuos estarán prohibidos y forzarán a que las empresas encuentren otros métodos de gestión probablemente menos económicos. Por consiguiente, los ingresos de la empresa pueden descender de manera considerable hasta llegar a un punto que no sea rentable.

Otro aspecto que debe ser considerado es la utilización de combustibles fósiles. La evolución del mercado de gas natural no dejará de ser un problema; su precio irá aumentando cada vez más y se limitará su uso a causa de las emisiones de CO₂. Como se ha visto, la industria del sector agroalimentario está caracterizada por requerir grandes cantidades de energía térmica. Si el precio por tonelada de emisión de CO₂ aumenta será un problema más para tener en cuenta.

Por lo tanto, sea o no la solución propuesta la mejor desde un punto de vista económico o medioambiental es una de las posibilidades que la industria alimentaria debe considerar. La generación de grandes cantidades de residuos y la gran demanda de energía tiene que cambiar. Promover un sistema circular en el que los residuos dejen de ser un simple desecho y tengan cierto valor energético es algo necesario y posible.

Visto esto, apostar por una tecnología en la que, se pueda valorizar energéticamente un residuo mediante la combustión controlada y la generación de energía térmica puede aportar mucho valor añadido.

Una de las principales ventajas con la que nos encontramos es que el coste de gestión de residuos será mucho menor ya que el volumen de éstos se reducirá considerablemente. Por otro lado, el hecho que estos residuos sean cenizas y polvo el nivel de contaminación es inferior. En función del tipo de residuos quemados y de sus características químicas, las cenizas pueden ser utilizadas como materia prima para abono o como materia prima para productos aplicables en la construcción.

Otra de las ventajas que presenta este sistema es que la recuperación energética permite reducir considerablemente el consumo de gas natural. Esta reducción se verá reflejada a nivel económico y sobre todo a nivel ambiental.

Por último, las emisiones de gases contaminantes respecto a la situación actual, en la que se encuentran la mayoría de las empresas del sector, estarían limitadas mediante varios procesos de filtraje. Como se ha podido ver en el apartado de características técnicas, gran parte de la planta de incineración está formada por equipos y procesos de filtrado de los gases de escape para reducir al máximo sus componentes no deseados a la salida de la chimenea.

Aunque la mejora expuesta es una posible solución al problema, no es ni de lejos la mejor. Como se ha comentado, la mejor solución por encima del reciclaje o la reutilización es la prevención. En este caso, uno de los residuos más problemáticos y a la vez uno de los que más se genera por parte de la industria agroalimentaria es el plástico.

La mayoría de los envases plásticos no son reciclables y se está poniendo bastante énfasis en encontrar alguna solución y alternativa al uso de este tipo de materiales. Si en un futuro la sociedad encuentra una solución para sustituir la mayoría de los materiales no reciclables por materiales biodegradables o reutilizables la planta en cuestión deberá realizar una reorientación.

Como escenario de futuro, el objetivo debería ser que las empresas del sector agroalimentario pasen a no tener ningún coste respecto a la gestión de residuos. Por consiguiente, la planta podría operar a base de biomasa combustible renovable. A diferencia de otros posibles combustibles, el poder calorífico de la biomasa es muy elevado, el consumo de gas natural para la puesta en marcha es mínimo

y las emisiones de CO₂ son neutras y no computan como contaminantes para el medioambiente. De esta manera la planta funcionará de una manera totalmente renovable.

Incinerar o quemar residuos plásticos es lo mismo que quemar petróleo. A diferencia de la biomasa, el petróleo se crea en el interior de la tierra, por lo tanto, las emisiones generadas crean una saturación de CO₂ a nivel atmosférico. En cambio, el efecto de la biomasa es totalmente contrario. La vegetación y la materia agrícola requieren presencia de CO₂ en el ambiente para su crecimiento. Al utilizar este material como combustible se emiten las mismas cantidades ya existentes de CO₂ a la atmósfera para que puedan ser metabolizadas a través de la captura de nuevas masas forestales y agrícolas.

Como se ha podido ver a lo largo del proyecto, un cambio en el sector agroalimentario es posible. Reducir las cantidades de residuos destinados a vertederos dotándolos de un valor adicional aprovechando el calor desprendido durante su proceso de tratamiento permite la reducción de emisiones contaminantes y la utilización de combustibles fósiles. La descarbonización es viable en un entorno de crisis energética global. La dependencia de recursos fósiles como el petróleo o el carbón puede ser sustituida por otro tipo de materiales y composiciones químicas. Este tipo de instalaciones ocupan menos espacio que los vertederos y reducen casi el 90% de los residuos. Además, las dioxinas y partículas no son un problema gracias al sistema de depuración que se ha conseguido implementar. Resumiendo, una planta de recuperación energética es una posible alternativa a la gestión actual que realizan la mayoría de las empresas del sector agroalimentario.

Análisis del impacto ambiental del proyecto

En este último apartado se analizará el impacto sobre el medio ambiente que ha podido causar el hecho de elaborar este proyecto de final de grado. Dadas las características que presenta la elaboración de este informe, el impacto medioambiental es muy bajo. Aun así se pueden considerar los siguientes factores:

- **Ordenador:** Este trabajo se ha realizado principalmente con un ordenador portátil y un ordenador de mesa. Gran parte de la información utilizada se encuentra en directivas y páginas web en internet. Por otro lado, los programas y softwares utilizados son principalmente Microsoft Word i Microsoft Excel. Considerando que la potencia del portátil utilizado es de 60 W y la potencia del ordenador de sobremesa es de 180 W, a partir de las horas trabajadas se puede calcular la energía eléctrica consumida. Como no se pueden saber con exactitud las horas dedicadas en cada uno de los equipos se considerará una media entre los dos. Por lo tanto, si se considera una potencia media de 120 W y un total de 385 horas dedicadas a la redacción y a los cálculos, se puede deducir que la energía consumida es de 46,2 kWh. Según el OCCC (Oficina Catalana del Cambio Climático), para el año 2018 las emisiones de CO₂ por unidad de energía eléctrica que no provenga de fuentes renovables es de 321 g CO₂/kWh. Esto supone unas emisiones de 14,83 kg de CO₂.
- **Papel/libreta:** Se han utilizado una serie de papeles para algunas reuniones y visitas, pero en la mayoría de los casos se han tomado apuntes en una libreta.
- **Transporte:** Los desplazamientos físicos a la universidad, a las reuniones y a las visitas se han realizado mediante vehículo propio. Siendo consciente que el impacto de este es mucho mayor que utilizando el transporte público, por temas de horarios y localización ha sido prácticamente imposible sustituir el vehículo propio por el tren o el autobús. Considerando que se han realizado una media de 35 km diarios, a partir de las características del vehículo y de las tablas expuestas en el catálogo de la OCCC se han obtenido unas emisiones de 406,33 kg de CO₂.

Presupuesto del proyecto

Para finalizar el trabajo se calculará el presupuesto económico que ha sido necesario para la realización del trabajo.

Para ello, se calcularán las horas dedicadas a la realización del trabajo y del informe. En este caso se tendrán en cuenta las horas de desplazamiento, las horas de reuniones y visitas y las horas de redacción y cálculos.

Tabla 1. Determinación del número de días trabajados

Días dedicados al proyecto	
Inicio de la elaboración del TFG	14 de enero de 2019
Fin de la elaboración del TFG	4 de junio de 2019
Total de días trabajados	110 días

Para determinar el número de horas diarias dedicadas al proyecto se ha decidido realizar una aproximación para un día tipo.

Tabla 2. Determinación de la media de horas trabajadas

Desglose de horas dedicadas al proyecto	
Transporte	30 min
Reuniones/ visitas	30 min
Redacción y cálculos	3h 30 min
Total de horas diarias	4h 30 min

Por consiguiente, a este trabajo se le han dedicado un total de **495 horas**.

Para determinar el coste económico se han despreciado los costes de ingeniería. Dicho esto, en la tabla siguiente se encuentran los gastos correspondientes a la realización del proyecto.

Tabla 3. Coste económico de la realización del proyecto

Desglose del presupuesto	
Consumo de gasolina	409,64 €
Gastos del vehículo	377,50 €
Gastos electrónicos	110 €
Gastos de material de oficina	30 €
Total	927,14 €

Para obtener estos resultados se ha considerado un precio medio de la gasolina, unos costes fijos por kilómetro del vehículo, un desgaste de los equipos electrónicos como pueden ser el ordenador portátil o el teléfono móvil y unos costes de material de oficina que incluyen la libreta utilizada, los folios y bolígrafos.

En definitiva, considerando que se le han dedicado un total de 495 horas a la realización del proyecto, el coste correspondiente es de 927, 14 €.



Bibliografia

Marco conceptual

- [1] SALIM, C.H., 2015. La industria alimentaria. [en línea], Disponible en: http://www.faca.es/apps/residuos/app/content/docs/Guia_residuos_ARAGON.pdf.
- [2] DRA. PAULA JULIARENA - DR. ROBERTO GRATTON, [en línea]. Capítulo 3. Conservación de los alimentos. [en línea], pp. 12. Disponible en: <http://www.exa.unicen.edu.ar/catedras/tecnoambiente/CAP03.pdf>.
- [3] Irena_Water_Energy_Food_Nexus_2015 (1). [en línea], no. January. Disponible en: https://www.irena.org/documentdownloads/publications/irena_water_energy_food_nexus_2015.pdf.
- [4] ESCOLA, L.- y AGR, E., [sin fecha]. 6. Procesos en la industria alimentaria. [en línea], pp. 89-133. Disponible en: <http://www.todofp.es/en/dam/jcr:7ca87dfa-681c-463d-8713-fe1d0b54d04e/procesos-en-la-industria-alimentaria-ok-pdf.pdf>.
- [5] WENDEN, A.L., 1981. Eficiencia energética en empresas del sector agroalimentario. [en línea], vol. 3, no. Septiembre. Disponible en: http://www.agenex.net/guias-altercexa/2_EF_ENERG_EN_EMPRESAS_DEL_SECTOR_AGROALIMENTARIO.pdf.
- [6] WENDEN, A.L., 1981. Situación y potencial de valorización energética directa de residuos. [en línea], vol. 3, no. Septiembre. Disponible en: https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11227_e15_residuos_c3ead071.pdf.
- [7] FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 2011. "ENERGY-SMART"; - Food for People and Climate. [en línea], pp. 78. Disponible en: <http://www.fao.org/3/i2454e/i2454e00.pdf>.
- [8] RESTREPO GALLEGO, M., 2006. Cleaner Production in Food Industry Artículo de Revisión. *Produccion + Limpia* [en línea], vol. 1, no. 2, pp. 87-101. Disponible en: http://repository.lasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/217/1/PL_V1_N1_87_PL_INDUSTRIA_ALIMENTARIA.pdf.
- [9] *Industria Alimentaria @ www.ecured.cu* [en línea], [sin fecha]. S.l.: s.n. Disponible en: https://www.ecured.cu/Industria_Alimentaria.
- [10] *La industria alimentaria y el medio ambiente* [en línea], [sin fecha]. S.l.: s.n. Disponible en: https://cincodias.elpais.com/cincodias/2014/06/13/empresas/1402687653_251085.html.
- [11] *Los combustibles fósiles en el horizonte 2040* [en línea], [sin fecha]. S.l.: s.n. Disponible en: <https://elperiodicodelaenergia.com/los-combustibles-fosiles-en-el-horizonte-2040/>.
- [12] *La industria alimentaria avanza hacia la reducción de las emisiones de carbono fósil* [en línea], [sin fecha]. S.l.: s.n. Disponible en: <https://www.ainia.es/insights/la-industria-alimentaria-avanza-hacia-la-reduccion-de-las-emisiones-de-carbono-fosil/>.

- [13] *la-industria-alimentaria-y-sus-necesidades-energeticas* [en línea], [sin fecha]. S.l.: s.n. Disponible en: <https://es.slideshare.net/AVEBIOM/la-industria-alimentaria-y-sus-necesidades-energeticas>.
- [14] *Balance del consumo de energía final en la industria* [en línea], [sin fecha]. S.l.: s.n. Disponible en: <http://sieeweb.idae.es/consumofinal/bal.asp?txt=2016&tipbal=t>.
- [15] *De la producción a los residuos: el sistema alimentario* [en línea], [sin fecha]. S.l.: s.n. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/es/senales/senales-2014/articulos/de-la-produccion-a-los>.

Economía circular

- [16] MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, E., 2013. Real Decreto 1481/2001 , de 27 de diciembre , por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero. *Boletín Oficial Del Estado* [en línea], vol. 25, pp. 1-46. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/pdf/2002/BOE-A-2002-1697-consolidado.pdf>.
- [17] COMISIÓN EUROPEA, 2000. Perspectivas de la evolución mundial hasta 2030 en los ámbitos de la energía, la tecnología y la política climática. [en línea], pp. 1-5. Disponible en: https://ec.europa.eu/research/energy/pdf/key_messages_es.pdf.
- [18] CONSEJO, A.L., 2017. ES- sobre la aplicación del plan de acción para la economía circular. [en línea], pp. 1-15. Disponible en: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:391fd22b-e3ae-11e6-ad7c-01aa75ed71a1.0007.02/DOC_1&format=PDF.
- [19] *Publicadas las nuevas directivas europeas del paquete de economía circular* [en línea], [sin fecha]. S.l.: s.n. Disponible en: <https://www.residuosprofesional.com/nuevas-directivas-economia-circular/>.
- [20] *La industria alimentaria y la economía circular* [en línea], [sin fecha]. S.l.: s.n. Disponible en: <https://alimentandolainocuidad.com/la-industria-alimentaria-y-la-economia-circular/>.
- [21] *Revalorización de subproductos y economía circular en sistemas de producción agroalimentarios* [en línea], [sin fecha]. S.l.: s.n. Disponible en: <https://www.innofood.es/revalorizacion-subproductos-economia-circular-sistemas-produccion-agroalimentarios/>.
- [22] *Aprovechamiento y revalorización de subproductos de la industria alimentaria* [en línea], [sin fecha]. S.l.: s.n. Disponible en: <https://sigmabiotech.es/aprovechamiento-y-revalorizacion-de-subproductos-de-la-industria-alimentaria/>.
- [23] *Revalorización de subproductos y economía circular en sistemas de producción agroalimentarios* [en línea], [sin fecha]. S.l.: s.n. Disponible en: <https://www.innofood.es/revalorizacion-subproductos-economia-circular-sistemas-produccion-agroalimentarios/>.
- [24] *Vertederos controlados* [en línea], [sin fecha]. S.l.: s.n. Disponible en: <http://www.reciclame.info/gestion-de-residuos-2/vertederos-controlados/>.

[25] *Compostaje* [en línea], [sin fecha]. S.l.: s.n. Disponible en: <http://www.reciclame.info/gestion-de-residuos-2/compostaje/>.

[26] *Incineración* [en línea], [sin fecha]. S.l.: s.n. Disponible en: <http://www.reciclame.info/gestion-de-residuos-2/incineracion/>.

Propuesta de proyecto

[27] *Phyllis2 browser classification* [en línea], [sin fecha]. S.l.: s.n. Disponible en: <https://phyllis.nl/Browse/Standard/ECN-Phyllis>.

[28] *tolvas-de-alimentacion* [en línea], [sin fecha]. S.l.: s.n. Disponible en: <https://www.mtb-recycling.fr/es/tolvas-de-alimentacion.html>.

[29] *Transportador_de_tornillo_sin_fin* [en línea], [sin fecha]. S.l.: s.n. Disponible en: https://www.ecured.cu/Transportador_de_tornillo_sin_fin.

[30] ELÍAS, X., 2011. EMISIONES A LA ATMOSFERA Y CORRECCIONES. TIPOS DE HORNOS. Capítulo 4: Tipos de hornos. Emisiones a la atmósfera y correcciones. [en línea], pp. 1-31. Disponible en: http://www.bvsde.paho.org/cursoa_reas/e/fulltext/Ponencias-ID55.pdf.

[31] *Requerimientos Técnicos y Normativos para Hornos Incineradores CORANTIOQUIA*. [en línea], [sin fecha]. Disponible en: http://www.corantioquia.gov.co/SiteAssets/PDF/Gestión_ambiental/Residuos/Peligrosos/Cartillas/Protocolo_requerimientos_tecnicos_y_normativos_para_hornos_incineradores.pdf.

[32] ALONSO, D.A.L., 2008. Tratamiento térmico de residuos. [en línea], pp. 62. Disponible en: http://www.cma.gva.es/comunes_asp/documentos/agenda/cas/56887-CONFERENCIA_Alberto_Lleó_2.pdf.

[33] IN, S., 2014. Hornos rotativos. [en línea], pp. 1-8. Disponible en: http://www.emison.es/medioambiente/pdf/incineracion/horno_de_incineracion_rotativo.pdf.

[34] *filtrado-gases*. (n.d.). Retrieved from <https://innergy-global.com/es/divisiones/innergy-heavy-industries/soluciones/equipos-auxiliares/filtraje-gases>

[35] *Filtro de mangas* [en línea], [sin fecha]. S.l.: s.n. Disponible en: <http://www.irma-ps.com/spa/vrecastifilteri.html>.

[36] *1183 Filtro de mangas* [en línea], [sin fecha]. S.l.: s.n. Disponible en: <http://www.emison.com/1183.htm>.

[37] *dimensionamiento-intercambiadores-calor-tubulares* [en línea], [sin fecha]. S.l.: s.n. Disponible en: <https://www.monografias.com/docs113/dimensionamiento-intercambiadores-calor-tubulares/dimensionamiento-intercambiadores-calor-tubulares.shtml>.

[38] *Funcionamiento del intercambiador de calor* [en línea], [sin fecha]. S.l.: s.n. Disponible en: <http://www.recair.es/tags/funcionamiento-del-intercambiador-de-calor/>.

- [39] *Intercambiador de calor: tipos y cómo usarlos en sistemas de recuperación de energía* [en línea], [sin fecha]. S.l.: s.n. Disponible en: <https://www.empresaeiciente.com/blog/intercambiador-de-calor-tipos-y-como-usarlos-en-sistemas-de-recuperacion-de-energia/>.
- [40] *Soluciona-intercambiador-de-calor* [en línea], [sin fecha]. S.l.: s.n. Disponible en: <https://t-solucion.com/noticias/intercambiadores-calor-que-son-sirven/>.
- [41] JARAMILLO, O.A., 2006. List of Figures. *Turbulence in Porous Media* [en línea], vol. 2007, pp. xiii-xxi. DOI 10.1016/B978-008044491-8/50002-3. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780080444918500023>.
- [42] *INTERCAMBIADORES-DE-CALOR @ es.scribd.com* [en línea], [sin fecha]. S.l.: s.n. Disponible en: https://es.scribd.com/doc/29646209/INTERCAMBIADORES-DE-CALOR#fullscreen&from_embed.
- [43] JORGE RUBINSTEIN, [sin fecha]. *Energía En Los Procesos Térmicos*. [en línea], Disponible en: [http://www.unsam.edu.ar/profesores/jorgerubinstein/Transmision de calor.pdf](http://www.unsam.edu.ar/profesores/jorgerubinstein/Transmision%20de%20calor.pdf).
- [44] CORONEL TORO, J.F., PEREZ, L. y DE OLIVA, L.M., 2016. *Gráficas y Ecuaciones de Transmisión de Calor* [en línea]. S.l.: s.n. ISBN 9701701704. Disponible en: [http://www.esi2.us.es/~jfc/Descargas/TC/Coleccion tablas graficas TC.pdf](http://www.esi2.us.es/~jfc/Descargas/TC/Coleccion_tablas_graficas_TC.pdf).
- [45] RANZI, E., PIERUCCI, S., ALIPRANDI, P.C. y STRINGA, S., 2011. Comprehensive and detailed kinetic model of a traveling grate combustor of biomass. *Energy and Fuels*, vol. 25, no. 9, pp. 4195-4205. ISSN 08870624. DOI 10.1021/ef200902v.
- [46] *STEAM ITS GENERATION AND USE*.
- [47] *Asignatura de GETF a la Universidad Politécnica de Barcelona*
- [48] FERNANDEZ, J.F., 2018. Poder calorífico. [en línea], pp. 1-22. Disponible en: [http://www.edutecne.utn.edu.ar/maquinas termicas/01-poder calorifico.pdf](http://www.edutecne.utn.edu.ar/maquinas_termicas/01-poder_calorifico.pdf).

Viabilidad económica

Concepto de OPEX [en línea], [sin fecha]. S.l.: s.n. Disponible en: <http://knoow.net/es/cieeconcom/gestion/opex/>.

Concepto de CAPEX [en línea], [sin fecha]. S.l.: s.n. Disponible en: <https://www.pymesyautonomos.com/fiscalidad-y-contabilidad/en-que-consiste-el-capex-y-por-que-es-una-magnitud-tan-importante-para-la-pyme>.