

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Química

Estudio Tecno-Económico de una Planta de  
Producción de Carbón Activo a partir de Hueso de  
Aceituna

Autor: Rubén Arteaga Martínez

Tutor: D. Diego Fuentes Cano

Dep. Ingeniería Química y Ambiental  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018





Proyecto Fin de Grado  
Ingeniería Química

# **Estudio Tecno-Económico de una Planta de Producción de Carbón Activo a partir de Hueso de Aceituna**

Autor:

Rubén Arteaga Martínez

Tutor:

Diego Fuentes Cano

Dep. de Ingeniería Química y Ambiental  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018



Proyecto Fin de Grado: Estudio Tecno-Económico de una Planta de Producción de Carbón Activo a partir de Hueso de Aceituna

Autor: Rubén Arteaga Martínez

Tutor: Diego Fuentes Cano

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal

*A mi familia*

*A mis maestros*

# Agradecimientos

---

A mi familia, por su apoyo incondicional desde el primer año hasta el último, por sus ánimos constantes, generosidad y en muchos casos sacrificio por ayudarme a que pueda dedicarme plenamente a mis estudios. Sin ellos, nada de esto hubiera sido posible. Gracias.

A mis amigos, a los que ya estaban, a los que ya no y a los que he conocido en esta etapa. Por tantas horas de sacrificio, diversión y momentos increíbles, que harán que esta etapa de mi vida sea inolvidable para mí. Les debo mucho. Gracias.

A mi tutor, Diego, por guiarme y tratar de ayudarme en todo momento. Gracias.

*Rubén Arteaga Martínez*

*Sevilla, 2018*

# Resumen

---

En el presente trabajo se realiza un estudio que tiene la función de determinar la factibilidad tanto a nivel técnico como económico, de una planta de producción de 2000 toneladas anuales de carbón activo granular con un rendimiento global del 20% en peso respecto al precursor inicial.

Para dicha planta se empleará como precursor el hueso de aceituna, que aporta unas aceptables características en el producto final para su comercialización. Es un subproducto de la industria del olivar generado especialmente en el proceso de obtención de aceite de oliva. La instalación se situará en la comunidad autónoma de Andalucía, concretamente en la provincia de Jaén, municipio de Jaén, donde existe un gran potencial de la industria del olivar.

Para la producción del carbón activo granular se ha empleado el método de activación física con vapor de agua, siendo además del más común, el más sencillo y respetuoso con el medio ambiente. Estudiando previamente las diferentes alternativas, el equipo principal empleado para la carbonización y activación del carbón activo ha sido el horno rotatorio, donde el control de temperatura y tiempos de residencia se realizan con mayor facilidad, obteniendo una calidad de producto final muy homogénea. Se describe también el proceso de obtención completo, dimensionando los diferentes equipos necesarios y calculando los principales requerimientos en términos de suministro de vapor y energía.

También se ha realizado un estudio económico, donde se ha elaborado un análisis de la inversión para determinar si el proyecto es rentable económicamente. Para ello, se han calculado los parámetros económicos del Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Rentabilidad (TIR) y el plazo de recuperación del capital o PayBack (PB). Para su cálculo se han necesitado determinar los costes e ingresos del proyecto, teniendo en cuenta los diferentes precios de venta del carbón activo en el mercado, así como un desglose de las necesidades de personal y de suministros necesarios para la instalación.

Mediante el cálculo de estos parámetros económicos se ha llegado a la determinación de que el proyecto es rentable en términos económicos, obteniéndose un VAN positivo elevado, una TIR superior a la tasa de descuento y un PB lo suficientemente atractivo.





# Abstract

---

In the present work, a study is carried out that has the function of determining the feasibility, both technically and economically, of a production plant of 2000 tons per year of granular activated carbon with an overall yield of 20% by weight with respect to the initial precursor.

For this plant the olive bone will be used as a precursor, which provides acceptable characteristics in the final product for commercialization. It is a by-product of the olive industry generated especially in the process of obtaining olive oil. The installation will be located in the autonomous community of Andalusia, specifically in the province of Jaén, where there is great potential for the olive industry.

For the production of granular activated carbon, the method of physical activation with water vapor has been used, being the most common, the simplest and most respectful with the environment. Studying previously the different alternatives, the main equipment used for the carbonization and activation of activated carbon has been the rotary kiln, where the control of temperature and residence times are made with greater ease, obtaining a very homogeneous final product quality. The complete procurement process is also described, sizing the different necessary equipment and calculating the main requirements in terms of steam and energy supply.

An economic study has also been carried out, where an analysis of the investment has been made to determine if the project is economically profitable. For this, the economic parameters of the Net Present Value (NPV), the Internal Rate of Profitability (IRR) and the term of recovery of the capital or PayBack (PB) have been calculated. For its calculation, it has been necessary to determine the costs and revenues of the project, taking into account the different selling prices of activated carbon in the market, as well as a breakdown of personnel and supply needs necessary for the installation.

By calculating these economic parameters it has been determined that the project is profitable in economic terms, obtaining a high positive NPV, an IRR higher than the discount rate and a sufficiently attractive PB.

Agradecimientos .....	vii
Resumen .....	viii
Abstract .....	x
Índice .....	xi
Índice de Tablas .....	xiii
Índice de Figuras .....	xiv
Índice de Ilustraciones .....	xv
Índice de Gráficas .....	xvi
Notación .....	xvii
<b>1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>19</b>
1.1. ¿Qué es el carbón activo? .....	20
1.1.1 Definición .....	20
1.1.2 Características físico-químicas .....	21
1.1.3 Tipos de carbón activo .....	22
1.1.4 Tipos de activación .....	23
1.1.4.1 Activación física o térmica .....	23
1.1.4.2 Activación química .....	25
1.1.5 USOS .....	26
1.2. MERCADO DEL CARBÓN ACTIVO .....	27
1.2.1 Principales productores .....	28
1.2.1.1 Exportadores .....	29
1.2.1.2 Importadores .....	29
1.2.2 Precio del carbón activo .....	29
1.2.3 Materias primas .....	30
1.3. PRODUCCION INDUSTRIAL DE CARBÓN ACTIVO .....	31
1.3.1 Pretratamientos .....	31
1.3.2 Etapas principales .....	32
1.3.3 REACTORES .....	33
1.3.4 Condiciones de operación .....	35
1.4. SECTOR OLIVARERO ANDALUZ .....	36
1.4.1 Producción .....	36
1.4.2 Subproductos de las industrias del sector del olivar [10] .....	36
1.4.3 Distribución geográfica en Andalucía .....	37
1.4.4 Precios del hueso de aceituna .....	38
<b>2 ESTUDIO TÉCNICO .....</b>	<b>40</b>
2.1. Bases de partida .....	40
2.1.1 Selección de la materia prima .....	40
2.1.2 Selección del emplazamiento .....	41
2.1.3 Selección del método de producción y tipo de producto obtenido .....	42
2.2. Descripción del proceso .....	42
2.3. Descripción de la instalación .....	43
2.3.1 Situación y emplazamiento .....	43
2.3.2 Diagrama de flujo (PFD) .....	45
2.3.3 Balance de materia .....	46
2.3.4 Balance de Energía .....	51

2.4.	<i>Descripción de equipos y dimensionado</i> .....	55
2.4.1	Descripción de equipos .....	55
2.4.1.1	Horno rotatorio .....	56
2.4.1.2	Cámara de enfriamiento .....	56
2.4.1.3	Elementos transportadores .....	57
2.4.1.4	Silos de almacenamiento y patio.....	58
2.4.1.5	Tamizado .....	59
2.4.2	DIMENSIONADO GENERAL DE LOS EQUIPOS.....	59
2.4.2.1	Patio de almacenamiento .....	60
2.4.2.2	Horno rotatorio.....	60
2.4.2.3	Silos de almacenamiento y almacenamiento final.....	61
2.4.2.4	Enfriador y precalentador .....	62
2.5.	<i>Carbón activo obtenido</i> .....	66
<b>3</b>	<b>ESTUDIO ECONÓMICO</b> .....	<b>69</b>
3.1.	<i>Definiciones</i> .....	69
3.1.1	Caracterización de la inversión .....	69
3.1.2	Valor Actual Neto (VAN).....	70
3.1.3	Tasa Interna de Rentabilidad (TIR) .....	70
3.1.4	PAYBACK (PB) o plazo de recuperación .....	71
3.2.	<i>Flujos de caja</i> .....	72
3.2.1	Ingresos .....	72
3.2.2	Costes .....	72
3.2.3	Cálculo de Flujos de caja .....	75
3.3.	<i>Resultados de VAN, TIR y PB</i> .....	76
3.3.1	VAN .....	76
3.3.2	TIR .....	76
3.3.3	PB .....	77
<b>4</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>78</b>
<b>5</b>	<b>Anexos</b> .....	<b>79</b>
5.1.	<i>NORMATIVA</i> .....	79
5.1.1	Pruebas físicas para determinación de parámetros principales .....	79
5.1.2	Otras normativas y estándares de interés.....	81
5.1.3	Ficha de seguridad del carbón activo [44, 45, 46].....	84
5.2.	<i>Cálculos balance de materia y energía</i> .....	85
<b>6</b>	<b>Referencias</b> .....	<b>91</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1: Características comerciales del carbón activo [57]	21
Tabla 2: Usos del carbón activo	27
Tabla 3: Propiedades del carbón según la procedencia	31
Tabla 4: Condiciones de operación [28]	35
Tabla 5: Composición residuos de la aceituna [19]	41
Tabla 6: Experiencias y resultados de activación física para hueso de aceituna [20]	42
Tabla 7: Composición gases devolatilizados	47
Tabla 8. Caudales de gases en horno	50
Tabla 9: Composición gases de salida del horno	55
Tabla 10: Condiciones del carbón activo a estudiar	66
Tabla 11: Variables estudiadas en el trabajo	67
Tabla 12: Valores de contenidos en ceniza y rendimientos en base seca de los carbones activados	67
Tabla 13: Caracterización de pruebas a carbón activo	67
Tabla 14: Caracterización carbón activo	68
Tabla 15: Desglose del desembolso inicial [Elaboración propia]	73
Tabla 16: Desglose de costes de producción [Elaboración propia]	73
Tabla 17: Costes de electricidad	74
Tabla 18: Desglose costes de personal [Elaboración propia]	75
Tabla 19: Flujos de caja	76
Tabla 20: Estándares para la caracterización del carbón activo	81
Tabla 21: Reglamento UE 432 [33]	81
Tabla 22: Propiedades de carbones activos comerciales en aplicaciones líquidas	83
Tabla 23: Propiedades de carbones activos comerciales en aplicaciones gaseosas	83

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1: Estructura interna del carbón activo [2]	20
Figura 2: Catálisis del carbón activo	24
Figura 3: Evolución del volumen total de microporos y mesoporos con burn-off para carbones activados obtenidos de cáscaras de almendras (círculos) y hueso de aceitunas (cuadrados): (a) por peso unitario de carbón activado; (b) por peso unitario de carbón original [3].	25
Figura 4: Principales exportadores de carbón activo [15]	29
Figura 5: Principales importadores de carbón activo [15]	29
Figura 6: Diagrama de bloques general	32
Figura 7: Horno rotatorio	34
Figura 8: Horno de múltiples etapas	34
Figura 9: Lecho fluidizado. A) Silo de materia prima; b) entrada; c) cámara de combustión; d) quemador; e) Plato de distribución de gas; f) salida de carbón activado g) intercambiador de calor [18].	35
Figura 10: Balance y composición del hueso de aceituna	37
Figura 11: Diagrama de flujo del proceso carbón activo granular [18]	43
Figura 12: Esquema del balance	47
Figura 13: Resultados obtenidos en EES	54
Figura 14: Horno rotatorio para el proceso de activación con vapor. a) vapor; b) gas ; c) aire; d) quemador; e) recubrimiento de ladrillo ; f) elevadores [18]	56
Figura 15: Enfriador multicámara [24]	57
Figura 16: Diagrama Temperatura-Calor para el proceso [Elaboración propia]	63
Figura 17: Resultados del balance con precalentamiento de agua	64
Figura 18: Resultados del balance con integración energética completa	65
Figura 19: Diagrama general del proceso. En azul caudal másico, en rojo temperatura. [Elaboración propia]	66

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

---

Ilustración 1: Carbón activo en polvo	22
Ilustración 2: Carbon activo granular sin forma	22
Ilustración 3: Carbón activo granular conformado	23
Ilustración 4: Esquema de la carbonización	33
Ilustración 5: Distribución de las parcelas de olivar en Andalucía	37
Ilustración 6: Distribución olivarera en Jaén	38
Ilustración 7: Granulometría precursor hueso de aceituna [58]	41
Ilustración 8: Emplazamiento de la planta	44
Ilustración 9: Emplazamiento	44
Ilustración 10: Situación frente a empresa suministradora	45
Ilustración 11: Diagrama de flujo del proceso	46
Ilustración 12: Cinta transportadora	57
Ilustración 13: Tornillo sin fin	58
Ilustración 14: Silos de almacenamiento	58
Ilustración 15: Patio de almacenamiento	59
Ilustración 16: Tamiz industrial	59
Ilustración 17: Parva de almacenamiento. B: base; H: altura; $\alpha$ : ángulo de reposo	60

# ÍNDICE DE GRÁFICAS

---

Gráfica 1: Predicción del mercado de carbón activo en EEUU [53]	28
Gráfica 2: Proporción de almazaras en las que se produce, vende y consume hueso de aceituna [13]	39
Gráfica 3: Evolución de los flujos de caja frente al tiempo	78



# Notación

CA	Carbón activo
PAC	Carbón activo en polvo
GAC	Carbón activo granular
Char	Material carbonizado sin activar
Precursor	Materia prima para la fabricación de carbón activo
PFD	Diagrama de procesos
$H_d$	Hidrógeno disponible del combustible
a	Composición del combustible que se transforma en $CO_2$
$O_T$	Oxígeno teórico
$m_{cble}$	Caudal de combustible
PCI	Poder Calorífico Inferior
$Q_{entra}$	Calor que entra en el horno rotatorio
$Q_{cble}$	Calor que aporta el combustible
$Q_{hueso}$	Calor que aporta el hueso de aceituna a la entrada del horno
$Q_{agua}$	Calor que aporta el agua
$Q_{aire}$	Calor aportado por el aire
$Q_{generado}$	Calor generado por las reacciones
$Q_{consumido}$	Calor que consumen las reacciones
$Q_{sale}$	Calor que sale del horno
$Q_{pérdidas}$	Calor que se pierde por transmisión
$Q_{CH_4}$	Calor aportado por la combustión del metano procedente de la devolatización
$Q_{CO}$	Calor aportado por la combustión del monóxido de carbono procedente de la devolatización
$Q_{H_2}$	Calor aportado por la combustión del hidrógeno procedente de la devolatización
$Q_{C_6H_6}$	Calor aportado por la combustión del benceno procedente de la devolatización
$Q_{r3,r4}$	Calor aportado por las reacciones 3 y 4, respectivamente
$Q_{carb}$	Calor necesario para la reacción de carbonización
$Q_{r2}$	Calor que consume la reacción de activación
$Q_{gases}$	Calor que sale debido a la temperatura de los gases
$Q_{CA}$	Calor que sale con el carbón activo
$\Delta H_i$	Entalpía de reacción de la sustancia i correspondiente
$F_i$	Caudal molar de la sustancia i
$C_{p_i}$	Calor específico de la sustancia i correspondiente
$T_{ent}$	Temperatura de entrada al horno
$T_{ref}$	Temperatura de referencia (25 grados centígrados)
$T_{sal}$	Temperatura de salida del horno
$m_i$	Caudal másico de la sustancia i correspondiente
B	Longitud de la base de la parva de almacenamiento
H	Altura de la parva
$\alpha$	Ángulo de reposo del hueso de aceituna
$\dot{m}$	Caudal de alimentación del hueso de aceituna

t	Tiempo de residencia
n	Revoluciones por minuto
$\phi$	Fracción del material ocupado en la sección transversal
$\varphi$	Ángulo de inclinación del horno
L	Longitud del horno
D	Diámetro del horno
V	Volumen del horno
r	Radio del cilindro
h	Altura del cilindro
VAN	Valor Actual Neto
TIR	Tassa Interna de Retorno
PB	PayBack
CF <sub>i</sub>	Flujos de caja operacionales
A	Desembolso inicial
i	Año de análisis
n	Años de vida útil de la instalación
k	Tasa de descuento
BAI	Beneficio Antes de Impuestos
BN	Beneficio Neto

# 1 INTRODUCCIÓN

La necesidad de conservar el medio ambiente en buenas condiciones es una motivación para el desarrollo de tecnologías limpias, donde la disminución de emisiones que puedan provocar efectos nocivos sobre el medio ambiente o la salud ocupan gran parte de la investigación y desarrollo de la tecnología.

El carbón activo es un concepto que se aplica a una serie de carbones preparados artificialmente de manera que exhiban una alta porosidad y una superficie específica por encima de los 500 m<sup>2</sup>/g.

El carbón activo es un adsorbente muy versátil debido a la distribución de los poros en su estructura porosa. Estas características pueden ser controladas para satisfacer las necesidades comerciales.

Comercialmente, el carbón activo es preparado a partir de materias primas, o precursores, con un alto contenido en carbono, especialmente procedente de materiales orgánicos como madera, huesos, residuos agrícolas, carbones, etc. La elección de dicho material se basa fundamentalmente en la disponibilidad, precio y características que ofrece el producto final.

La producción de carbón activo se realiza principalmente a través de dos rutas principales, llamados comúnmente activación física y activación química. Siendo el primero de ellos el empleado para producción del carbón activo para el presente trabajo.

El proceso estándar a nivel mundial para producir carbón activo por medio de activación física incluye previamente una etapa carbonización de la materia prima en una atmósfera inerte, seguida de la activación (mediante gasificación). Estas dos etapas del proceso se realizan en reactores del tipo hornos rotatorios, reactores de lecho fluidizado y hornos o reactores verticales de múltiples etapas.

La activación con el gas activante se realiza principalmente por medio del vapor de agua o con dióxido de carbono, siendo el primero de ellos el más utilizado a nivel industrial, a pesar de obtener unas características finales del producto similares. En este caso, también será el vapor de agua el agente de activación empleado.

Los carbones activos contribuyen en labores de separación o captura de ciertas sustancias o componentes habidos en corrientes tanto gaseosas como líquidas. Es por eso que la gran versatilidad de uso de este producto permite su aplicación en industrias de tratamiento de aguas residuales, tratamientos de agua potable, industrias de alimentación y bebidas, usos médicos, captura de solventes de diferentes corrientes, minería, reducción de emisiones en corrientes gaseosas o la industria farmacéutica son algunas de sus aplicaciones más sonadas.

De todos los precursores posibles, se ha estudiado el hueso de aceituna, debido a su disponibilidad en la comunidad autónoma de estudio, Andalucía. Esto provoca que la disponibilidad y coste sean los más óptimos, unidos a una buena caracterización del producto final. Se explica también más en detalle el sector olivarero andaluz, tanto los subproductos producidos en esta industria, como las características que poseen, mostrando mayor atención al hueso de aceituna, del cual se estudiará su valor del mercado.

Por último y no menos importante, se analizará el mercado del carbón activo, tanto la evolución de precios, como principales productores, exportadores e importadores de dicho producto. Cabe destacar que los principales países involucrados en el mercado de carbón activo son Estados Unidos, China y algunos países en desarrollo. Un producto muy atractivo que aumenta su producción cada año.

A partir de aquí se podrá determinar un precio acorde del producto obtenido en la planta de estudio para, finalmente, poder establecer si el proceso es rentable en su totalidad.

## 1.1. ¿Qué es el carbón activo?

En este apartado se tratará de dar un conocimiento general en materia de carbón activo, partiendo desde su definición, entrando en sus características físico-químicas y tipos de carbón activo producidos mundialmente, hasta desarrollar el campo de aplicaciones en las que se emplea.

### 1.1.1 Definición

El carbón activo o activado, es un material adsorbente producido artificialmente que presenta un elevado grado de porosidad y una alta superficie, en el entorno de 500 a 1 500 m<sup>2</sup>/g. Estas características junto con la naturaleza química de los átomos de carbono que lo conforman, le dan la propiedad de atraer y atrapar una alta gama de moléculas del fluido que rodea al carbón. A esta propiedad se le denomina capacidad de “adsorción”; el sólido que adsorbe se le denomina adsorbente y al compuesto atrapado adsorbato. La unión entre el carbón y el adsorbato se lleva a cabo por medio de fuerzas de Van der Waals, concretamente, fuerzas de London, las cuales son relativamente débiles y, por lo tanto, reversibles.

El carbón activo se puede producir a partir de cualquier material que tenga un alto contenido de carbono y baja proporción de material inorgánico. En la práctica, la economía y las propiedades del producto objetivo son los factores determinantes en la selección de las materias primas. La materia prima base tiene un impacto significativo en las propiedades del producto final, incluida la distribución del tamaño de poro y el volumen, la dureza y la pureza [1].

Su elevada superficie y porosidad son el resultado del proceso de activación, que puede ser física o térmica. Normalmente es común realizar un paso previo a la activación, llamado carbonización o pirolisis. Al carbón sin activar y carbonizado se le denomina “char”.

La gran mayoría del área superficial de los carbones activados (alrededor del 90%) se debe a los microporos, que son aquellos orificios con diámetro inferior a los 2 nm. Los poros con diámetro entre 2 y 50 nm se denominan mesoporos y los que poseen un diámetro superior a 50 nm son los denominados macroporos (Figura 1) [2].

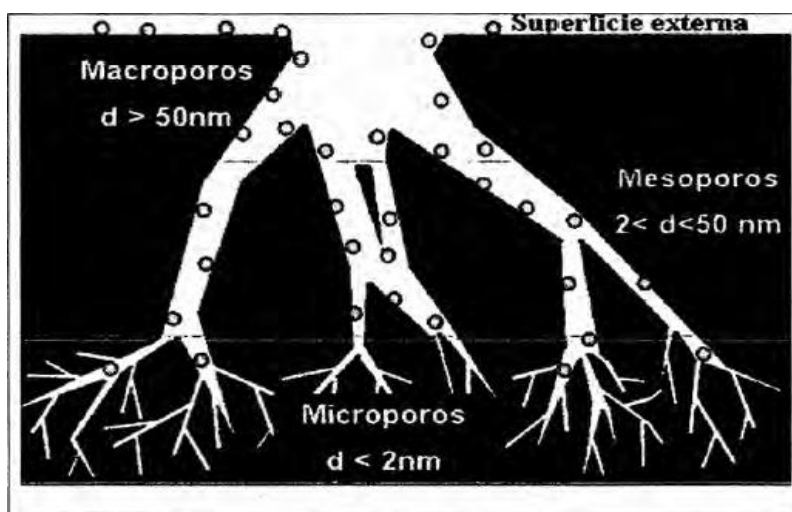


Figura 1: Estructura interna del carbón activo [2]

Sin importar el precursor (material inicial) utilizado para la producción de carbón activo, la activación se puede llevar a cabo de dos maneras diferentes, denominadas activación química y activación física o térmica. Los dos métodos de activación son precedidos por una etapa de carbonización, por la cual se libera el material volátil, aumenta el carbono fijo y desarrollándose una porosidad primitiva. Es decir, su capacidad de adsorción, medido como un volumen de microporos o área superficial, es demasiado bajo para aplicaciones comerciales y por ello se necesita la etapa de activación.

### 1.1.2 Características físico-químicas

El carbón activo posee una estructura cristalina laminar, la cual está formada por capas paralelas de átomos de carbono ordenados de manera hexagonal, similar a la estructura del grafito. Sin embargo, la estructura consta de un desordenamiento que trae consigo la presencia de huecos de diferentes tamaños (poros) que son los que permiten la captura de las diferentes moléculas.

Es por eso que posee una **alta capacidad de adsorción** de sustancias y una **baja selectividad** de retención. Además, estas son las propiedades fundamentales en las que se basan el empleo de carbón activo. La elevada capacidad de retención se debe a la elevada superficie interna que posee. Esta superficie se determina generalmente con los parámetros de número de yodo y la obtenida por el método BET.

Las propiedades adsorbentes de un carbón activo no dependen únicamente de la superficie y la porosidad, si no de la concentración del adsorbato en el medio, temperatura, polaridad, etc. Una sustancia polar tendrá dificultades para ser adsorbida por el carbón activo.

La mayoría de carbones activos presentan carácter **hidrófobo**, útil para la mayoría de aplicaciones, aunque esta característica puede ser modificada parcialmente [57].

Muy importante es la **naturaleza química** de un carbón activo, que puede ser ácida o básica, es decir, presenta un carácter anfótero. Que un carbón sea globalmente ácido o básico dependerá de la concentración de los grupos funcionales presentes en la superficie. Es importante conocer este parámetro ya que, de manera intuitiva, un carbón de tipo básico será preferible para la adsorción de compuestos ácidos y viceversa.

PARÁMETRO	UNIDADES EN LAS QUE SE EXPRESA	RANGO DE VALORES TÍPICOS
Número de yodo	mg/g de carbón	500 a 1,200
Área superficial	m <sup>2</sup> /g	500 a 1,200
Radio medio de poro y volumen total de poro	nm y cm <sup>3</sup>	0.7 a 500.0 y 0.2 a 1.0
Densidad aparente	g/cm <sup>3</sup>	0.26 a 0.65
Dureza	Adimensional	30 a 99
Rango de tamaño de partícula	Malla estándar americana (U.S. Std Sieve)	4x8 a 20x50
Tamaño efectivo de partícula	mm	0.4 a 3.3
Coefficiente de uniformidad	Adimensional	menor a 2.1
Contenido de cenizas totales	% base seca	3 a 15
Solubles en agua	% base seca	0.5 a 7
pH del extracto acuoso	pH	2 a 11
Humedad (al empacar)	%	2 a 15
Longitud de semidecloración	cm	2 a 10

Tabla 1: Características comerciales del carbón activo [57]

### 1.1.3 Tipos de carbón activo

Independientemente del precursor empleado de partida y del método de obtención, los productos de carbón activo se clasifican en función de su granulometría en dos tipos distintos principales, que son en polvo y granular:

- Carbón activo en polvo (**PAC**): que posee una granulometría típicamente inferior a las 300 micras. El polvo se produce mediante técnicas de impacto, como la trituración y la molienda. La diferencia en la distribución de tamaño dependen de la aplicación que se le dará al carbón activo.

Las ventajas principales que presentan frente al granular son su menor coste, posibilidad de dosificarse en exceso y poseen una cinética de adsorción alta.



Ilustración 1: Carbón activo en polvo

- Carbón activo granular (**GAC**): caracterizado con un tamaño habitual de entre 1 y 5 mm.

Las ventajas que presenta son la dureza, en los cuales existen menos pérdidas debido a esta característica, y el tamaño de partícula, a partir de la cual alcanza a una mayor cantidad de aplicaciones.

El carbón activo granular se puede dividir a su vez en los siguientes:

- Carbón activo troceado o sin forma: obtenidos por proceso de molienda, tamizado y una posterior clasificación según tamaño (Ilustración 2).



Ilustración 2: Carbon activo granular sin forma

- Carbón activo conformado: posee una forma específica, como puede ser cilíndrica, discos, etc. Pueden obtenerse por peletización o por extrusión (Ilustración 3) de carbón activo en polvo combinado con diferentes tipos de aglomerantes [21].



Ilustración 3: Carbón activo granular conformado

#### 1.1.4 Tipos de activación

Es el proceso en el cual se desarrolla la mayor parte de la porosidad del carbón activo, que le da el salto cualitativo para que sea adecuado para sus múltiples aplicaciones.

Existen dos métodos de activación descritos a continuación.

##### 1.1.4.1 Activación física o térmica

El primero de los métodos de activación consiste en producir modificaciones en el carbón, haciendo uso de dos agentes gasificantes, típicamente vapor de agua y dióxido de carbono, ya sea de manera individual o conjunta. Estos agentes “extraen” átomos de carbono de su estructura porosa. Las reacciones que se llevan a cabo en la gasificación, son en su mayoría endotérmicas, siguiendo las siguientes reacciones globales.



Este método de activación es conocido como **activación física o térmica**.

El uso de dióxido de carbono o vapor para eliminar átomos de carbono como monóxido de carbono, no produce resultados idénticos. La diferencia principal entre los dos agentes activadores es que el dióxido de carbono desarrolla una microporosidad estrecha, con una estrecha distribución de tamaño de poro, mientras que el vapor inicialmente amplía la microporosidad y luego produce una distribución de tamaño de microporos más amplia. Sin embargo, ambos valores de los volúmenes de microporos son coincidentes hasta aproximadamente 20% en burn-off, la diferencia entre ambas microporosidades total aumenta con la activación, especialmente por encima del 40% en burn-off [4].

La gasificación por oxígeno molecular es una reacción exotérmica con tasas de reacción que son difíciles de controlar. Como resultado, oxígeno molecular a presión atmosférica (incluso aire) simplemente consume el material de carbono (causando ignición y quemaduras, incluso llamas). Esto ocurre sobre la superficie exterior y no penetra en el interior del carbono y por lo tanto, sin mejora de los resultados de porosidad.

La gasificación de un carbón se lleva a cabo principalmente a **800-1000 °C con dióxido de carbono, vapor o mezcla de ambos**. Por debajo de 800 °C, la velocidad de reacción se reduce tan seriamente que el proceso de activación cesa para todos los propósitos prácticos. Las reacciones de carbono con dióxido de carbono y vapor son endotérmicas y fáciles de controlar [4], contrariamente a lo explicado anteriormente en el empleo de oxígeno molecular.

Los compuestos inorgánicos presentes en la materia no son inertes durante los procesos de activación térmica, sino que influyen en el desarrollo de los poros. Puede haber ventajas que se obtienen de estos efectos.

De estos **materiales inorgánicos** como las sales, óxidos y metales alcalinos, metales alcalinotérreos y metales de transición son particularmente efectivos como **catalizadores**. La eficiencia de un catalizador depende del tamaño de la partícula de catalizador y su modo de distribución dentro del carbono. Para enfatizar la importancia de la catálisis se puede decir que aproximadamente 100 ppm de, por ejemplo, una sal de plomo aumenta la velocidad de oxidación del carbono por oxígeno molecular por un factor de aproximadamente  $10^4$  en comparación con un carbono "puro". El mecanismo básico puede apreciarse en la Figura 2, donde una molécula del gas a reaccionar, pudiendo ser oxígeno, dióxido de carbono o vapor de agua, se acerca a la superficie del catalizador, se disocia para proporcionar especies móviles de oxígeno atómico y estos se mueven a la superficie de carbono para formar óxidos de carbono.

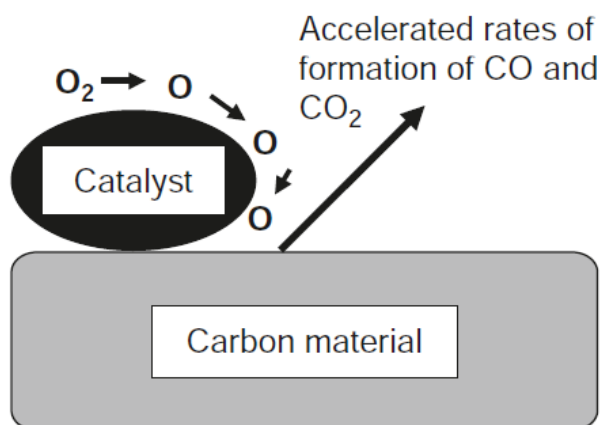


Figura 2: Catálisis del carbón activo

Este mecanismo actúa en la gasificación del carbono solo en el punto de contacto entre la superficie del catalizador y el carbono [4].

Diagramas típicos de la evolución del volumen de microporos con activación creciente (burn-off) se representan en la Figura 3 (a, b), para dos chars (carbones sin activación), uno obtenido del hueso de aceituna y el segundo a partir de cáscaras de almendras (ambas con muy bajo contenido de ceniza) activadas por gasificación con dióxido de carbono[3]. El volumen de poro, expresado por peso unitario de carbón activado (Figura 3 (a)), aumenta continuamente con el burn-off, obteniéndose una gráfica similar para el desarrollo del área superficial. Desde el punto de vista industrial, es más importante trazar los parámetros relacionados con la porosidad expresada por unidad de peso del carbón original, como se establece en la Figura 3 (b) a partir de los datos de la Figura 3 (a). Este es el comportamiento general encontrado para la mayoría de los carbones activados preparados mediante activación térmica (física) de diferentes precursores [3].



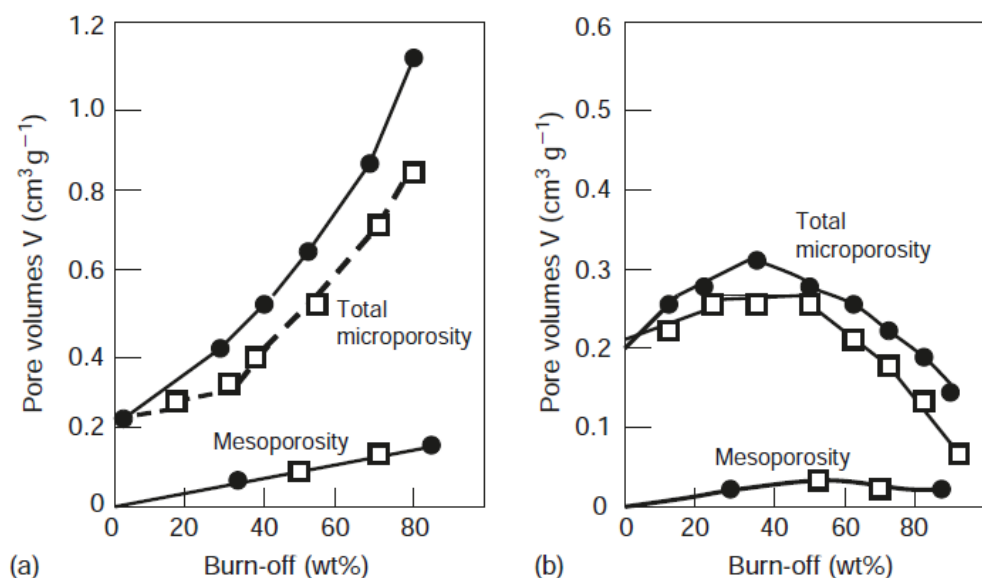


Figura 3: Evolución del volumen total de microporos y mesoporos con burn-off para carbones activados obtenidos de cáscaras de almendras (círculos) y hueso de aceitunas (cuadrados): (a) por peso unitario de carbón activado: (b) por peso unitario de carbón original [3].

En el momento inicial hay un aumento en el volumen de microporos de hasta aproximadamente 20% en burn-off, producido principalmente por la creación de nueva microporosidad y la ampliación de la microporosidad existente. A partir de entonces, el aumento en el volumen de poro es más pequeño y después de 40-50% en peso de burn-off, el volumen de microporos disminuye progresivamente respecto al carbón original. Este comportamiento indica que durante la activación se amplían aun mas los poros, y por lo tanto, se produce un cambio de microporosidad a meso o incluso la macroporosidad. En niveles altos de burn-off, no solo hay una ampliación de la porosidad sino también el ablandamiento del exterior de las partículas de carbono. Como consecuencia, la gasificación industrial de cualquier char rara vez supera el 40-50% en peso, porque la producción está dominada por el compromiso entre el desarrollo de la porosidad y el rendimiento del proceso [4].

#### 1.1.4.2 Activación química

De manera general, este proceso consiste en la puesta en contacto del precursor con un agente activante diluido que lo impregnará completamente. El agente activante se deja actuar para un tiempo determinado para que el agente activante penetre todo lo posible en el precursor, para posteriormente realizar un proceso térmico en ausencia de oxígeno, para deshidratar el precursor con el desarrollo de la porosidad que conlleva debido a la eliminación de moléculas de carbono.

Dado que, en las activaciones térmicas, variables tales como la temperatura, la presión, la velocidad de calentamiento, etc. no influyen mucho en la distribución del tamaño de microporos (González et al., 1997), el uso alternativo de activaciones químicas bien controladas es interesante porque, aquí, el desarrollo de la porosidad es sustancialmente modificado[4]. Por lo tanto, es comprensible que se haya llevado a cabo una amplia investigación para proporcionar métodos de activación para desarrollar distribuciones óptimas de tamaño de poro para satisfacer la amplia gama de requisitos industriales. A medida que las aplicaciones se vuelven más específicas, se requiere un control más específico de las distribuciones de tamaño de poro.

La activación química de materiales lignocelulósicos se dirige principalmente a la preparación de carbones activados en polvo. Sin embargo, si el objetivo es preparar carbón activado granular, la etapa de impregnación debe llevarse a cabo con especial cuidado para garantizar un contacto íntimo entre el precursor y el reactivo.

Como la transformación a carbón requiere la eliminación de O y H, el grado de conversión a carbono (rendimiento de carbonización) varía ampliamente en función de la cantidad de carbono que se elimina con O y H (como  $\text{CO}_x$  o hidrocarburos). En la activación química, el agente activador es un compuesto deshidratante que

aumentará el rendimiento pero también cambiará la degradación térmica del precursor, llevando a un cambio posterior en la evolución de la porosidad.

La activación química, usando  $\text{ZnCl}_2$ ,  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , se lleva a cabo comúnmente a 450-600 ° C. A estas temperaturas, la carbonización no es completa y, por lo tanto, la composición química del carbón activado obtenido (después de la eliminación del producto químico mediante lavado) se encuentra entre la del precursor y la del char (carbono sin activación) (Almansa et al., 2004).

Hay una contracción en las dimensiones del precursor lignocelulósico durante el proceso de carbonización. Este cambio de dimensión durante la carbonización es importante en las activaciones químicas, ya que el reactivo debe incorporarse en el interior de las partículas donde inhibe la contracción esperada al aumentar la temperatura. Esto significa que el reactivo puede actuar como un molde para la creación de microporosidad.

De los muchos reactivos propuestos para la activación química los más comúnmente utilizados, industrialmente, son  $\text{ZnCl}_2$ ,  $\text{H}_3\text{PO}_4$  y  $\text{KOH}$ .

Cuando la activación química se considera como una reacción entre un precursor sólido y el químico, la concentración, la intimidad de la mezcla, la temperatura y el tiempo de activación determinan el grado de reacción. Para los tres agentes activadores,  $\text{ZnCl}_2$ ,  $\text{H}_3\text{PO}_4$  y  $\text{KOH}$ , las condiciones optimizadas conducen a carbones activados con volúmenes de microporos de 0.5, 0.6 y 0.4 $\text{cm}^3/\text{g}$ , respectivamente.

La metodología llevada a cabo consiste en disolver el reactivo en agua, mezclándose con el precursor a 85 ° C sin evaporación. De esta manera, se facilita la hidratación del precursor, y la hinchazón de los canales interiores de la estructura carbonosa permite un mejor acceso del reactivo al interior de la partícula. Una vez que se completa el paso de impregnación, la carbonización se lleva a cabo bajo un flujo de nitrógeno y el carbón resultante se lava para eliminar el químico restante [4].

### 1.1.5 USOS

El carbón activado se utiliza en una amplia gama de aplicaciones para usos industriales y residenciales que incluyen la purificación de agua potable, tratamiento de aguas municipales, emisiones de plantas de energía y vertederos, recuperación de metales preciosos, etc. Las soluciones de purificación de aire incluyen eliminación de COV y control de olores.

Considerado el adsorbente más poderoso del mundo, el rango de carbón activado utilizado abarca desde los filtros diarios de jarras de agua hasta la recuperación de oro del mineral en carbono en pulpa / carbón en sistemas de lixiviación.

#### Agua

El agua es la mayor aplicación del carbón activo, tanto como agua de proceso, utilizado como parte del proceso industrial, incluyendo agua potable, como la que se agrega a las bebidas de zumo y se consume, y agua como el agua de lavado que se desecha o se recicla. El carbón activado está disponible en varias formas, tamaños e impregnaciones para satisfacer mejor las diferentes necesidades de agua de proceso.

Como tratamiento de aguas residuales, el carbón activo es utilizado para la recuperación de pesticidas, hidrocarburos, disolventes orgánicos y metales pesados, así como su uso en la industria minera para la recuperación de oro [5].

#### Gases

La otra gran parte del uso del carbón activo se centra en el empleo de diferentes tratamientos de gases. Algunos ejemplos pueden ser la purificación de corrientes gaseosas, tanto para la retención de olores como de impurezas presentes en la corriente, tales como compuestos orgánicos volátiles, eliminación de mercurio y ácido sulfhídrico [5].

#### Usos médicos

El carbón activado se usa en el tratamiento de la colestasis durante el embarazo y para reducir los niveles de colesterol. Antes de los procedimientos de radiografía abdominal, los carbones activados desempeñan un papel importante como antiflatulentos. Incluso después de la radiografía en sí, tiene un papel que desempeñar en la eliminación de los colorantes radiopacos descargados en el sistema de alcantarillado

Aquí la ingestión del carbón activo ayuda en la purificación de líquidos del tracto digestivo, ayuda en el control de la flatulencia, la diarrea y se afirma que generalmente reduce los niveles de toxinas en todo el cuerpo. Y para el cuidado de heridas, el carbón activado se incorpora a los apósitos para controlar el olor y, en algunos casos, para prevenir la sepsis [6].

### **Alimentos y bebidas**

Los productos de carbón activado son ampliamente utilizados en la industria de alimentos y bebidas para mejorar la pureza y la conveniencia. Desde la decoloración de jarabes y jugos líquidos y la purificación de aceites comestibles hasta la desodorización de proteínas, el carbón activado juega un papel fundamental en la entrega de resultados consistentes y de alta calidad. Los carbonos activados ayudan a que los productos alimenticios sean más seguros, atractivos y apetitosos.

Los carbonos activados eliminan contaminantes e impurezas como el color y el olor de edulcorantes, líquidos alimentarios, jarabes, bebidas, glicerina y aminoácidos y ácidos orgánicos [7].

### **Otros**

Debido a su amplia aplicabilidad el carbón activo puede estar presente en productos de bienestar, como relleno de almohadas en el mercado japonés, productos de uso en Spa y decoración de hoteles [8].

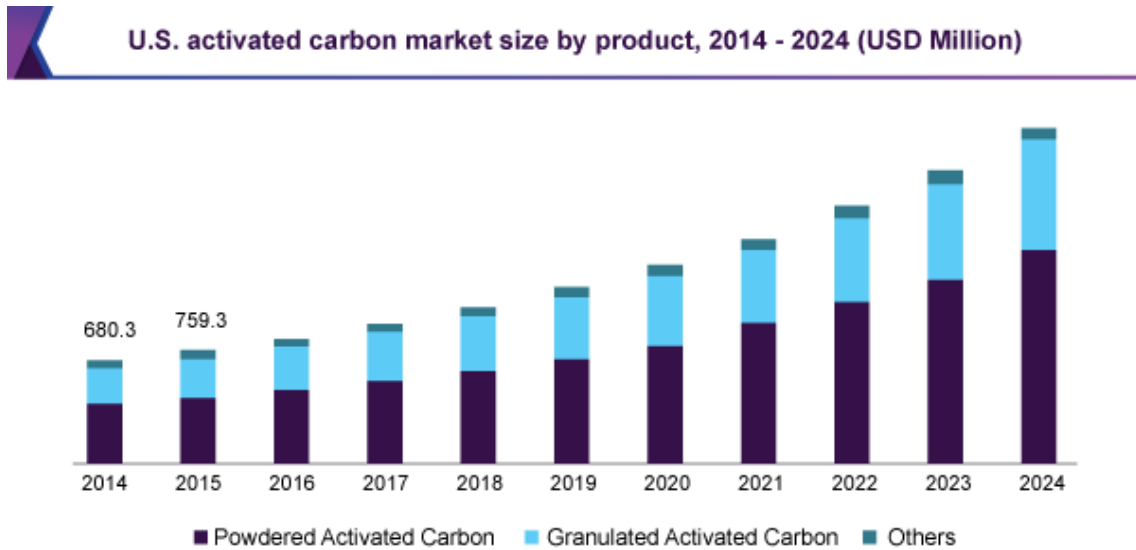
A modo de resumen, la proporción de cada uso se recoge en la Tabla 2:

<b>Requerimientos</b>	<b>Consumo, %</b>
Tratamiento de aguas	35
Purificación de gases	25
Recuperación de oro	16
Procesamiento de alimentos	15
Recuperación de solvents	3
Otros	6
<b>Total</b>	<b>100</b>

Tabla 2: Usos del carbón activo

## **1.2. MERCADO DEL CARBÓN ACTIVO**

El mercado mundial de carbono activado se valoró en más de USD 3.000 millones en 2015. Se prevé que la creciente conciencia del consumo de agua limpia junto con el aumento del número de plantas de tratamiento de agua beneficie el crecimiento general del mercado durante el período de pronóstico [53]. Un informe reciente de Research and Markets estimó que para 2022, se espera que el mercado mundial de carbón activado alcance los 6.200 millones de dólares, frente a los 3.000 millones de dólares en 2015, con una serie de factores que aumentan la demanda de este versátil producto [54].



Gráfica 1: Predicción del mercado de carbón activo en EEUU [53]

Como se mencionó anteriormente, los principales mercados de carbón son: tratamiento del agua, decoloración, procesamiento químico y farmacéutico, procesamiento de alimentos, purificación de aire y gas y recuperación de solvente. El mercado ha estado aumentando constantemente como consecuencia de problemas ambientales, especialmente para la purificación de agua y aire, siendo útil en la mayoría de procesos industriales de purificación.

Además, a medida que más y más países se están industrializando, la necesidad del empleo de carbón activado para cumplir con la regulación ambiental crecerá a un ritmo más rápido. Se espera que el GAC contenga más del 30% del consumo total del mercado en 2024. El GAC se usa ampliamente para la eliminación de compuestos orgánicos volátiles (VOC) y cloro [53].

### 1.2.1 Principales productores

Así, mientras que el consumo de carbón activado está creciendo a una tasa entre 1% y 5% por año en áreas como Estados Unidos, Europa y Japón, el crecimiento es mucho más rápido en los países en desarrollo.

El mayor productor en los Estados Unidos es Calgon Carbon Corporation, con plantas en varios lugares. Su capacidad anual representa alrededor del 42% de la capacidad total de producción del país; el principal proceso de activación térmica y los precursores utilizados son carbones bituminosos, cáscara de coco y carbón vegetal. El segundo mayor productor es Norit Americas, Inc., con alrededor del 23% de la capacidad total. La activación térmica se lleva a cabo con lignito y carbón bituminoso, empleando en este caso la activación química (con ácido fosfórico) cabo con madera y turba.

El mayor productor en Europa Occidental es Norit NV (plantas en los Países Bajos y el Reino Unido), con una capacidad de capacidad anual de casi el 50% de la capacidad total. Turba para la activación térmica y serrín para la activación química (con ácido fosfórico) son los principales precursores usados. En 2012, Norit fue adquirida por Cabot Corporation, líder mundial en especialidades químicas y materiales de alto rendimiento. Negocio que ahora se conoce como Cabot Norit Activated Carbon. Otros productores son Chemviron (alrededor del 20% de la capacidad total) [4].

### 1.2.1.1 Exportadores

Los principales exportadores de Carbón activo son los Estados Unidos (441 Millones \$), Mozambique (428 Millones \$), China (409 Millones \$), Alemania (154 Millones \$) y la India (152 Millones \$). Los principales importadores son la India (407 Millones \$), Alemania (227 Millones \$), Japón (211 Millones \$), los Estados Unidos (194 Millones \$) y China (160 Millones \$). Todo esto queda recogido en tanto por ciento en la Figura 4:



Figura 4: Principales exportadores de carbón activo [15]

Donde cabe mencionar el crecimiento de Estados Unidos y Mozambique en los últimos 5 años, con especial atención a este último, el cual ha llegado a ser uno de los principales exportadores mundiales en solo un año [15].

### 1.2.1.2 Importadores

Los principales importadores de los últimos 5 años quedan recogidos en la Figura 5, la cual no ha cambiado sensiblemente, pero se aprecia lo comentado anteriormente con países en vías de industrialización, como en el caso de la India.

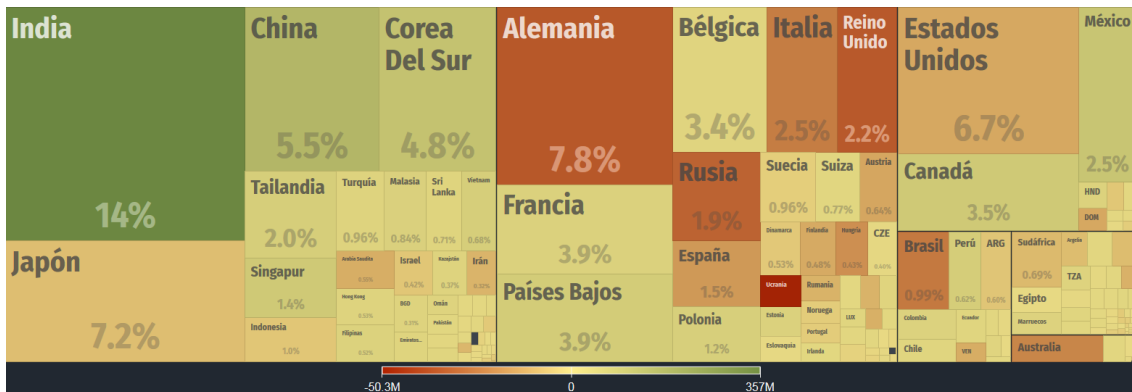


Figura 5: Principales importadores de carbón activo [15]

### 1.2.2 Precio del carbón activo

El precio de mercado del carbón activo varía ampliamente porque es una función de la demanda, la calidad del producto, el costo de producción, etc. El exceso de oferta, como en los EE. UU. A principios de la década de 1980, provocó una disminución del precio, pero la creciente demanda subsiguiente mejoró el precio a principios de la década de 1990 y ha aumentado sustancialmente desde entonces.

En los EE. UU., El precio del carbón activo granular varió en 1995 de 1.65 \$ a 9.90 \$/kg, mientras que la mayoría del carbón activado en polvo tuvo un precio en el rango de 0.80-2.00 \$/kg. La mayor diferencia en el precio es para los carbones utilizados en el tratamiento del agua, con carbonos granulares que son hasta tres veces más

caros. Sin embargo, en aplicaciones tales como la purificación de gas y aire, los costos del carbón activado granular y en polvo son similares [4].

El rango de precios del carbón activado en Europa es amplio debido a la gran cantidad de calidades disponibles. La fluctuación del precio en los últimos 20 años ha sido mucho menor que en los EE. UU. Y, en términos generales, los costos son más altos en Europa. Como ejemplo típico, los precios del carbón activado en polvo para el tratamiento del agua variaron, en 1995, de 0.70 \$ a 1.50 \$/kg, mientras que para alimentos y aplicaciones farmacéuticas el rango es de 1.40-5.00 \$/kg. El carbón activado granular es más costoso, 1.60-1.75 \$/kg para el tratamiento de agua y 2.50-5.00 \$ para aplicaciones en fase gaseosa. El carbón activado extruido estaba en el rango de precio de 4.00-6.00\$/kg. Los costos promedio de regeneración total fueron de alrededor de 0.70-0.85 \$/kg [4].

El precio del carbón activado en Japón no ha cambiado mucho en los últimos 10 años, muy probablemente debido a las importaciones de carbonos más baratos de la región de Asia y el Pacífico. Sin embargo, el precio del carbón activado en Japón es en general más alto que en EE. UU. Y Europa [4].

Sin embargo, el aumento de precio en los últimos años en las materias primas puede repercutir en un 5-15% el precio final del carbón activo [16]. Es más, el **precio** del carbón activado ha estado **creciendo** a una tasa anualizada estimada de **1.9% en los tres años hasta 2018** para llegar a \$ 1,440 por tonelada. El aumento de la demanda derivado del crecimiento de la producción industrial y la construcción de servicios públicos, junto con los crecientes costos de los insumos, es decir, el precio del carbón, ha estimulado el crecimiento de los precios durante el período. La producción industrial, un indicador principal de la demanda [56].

En el mercado **chino**, el carbón activado a base de cáscara de coco se sitúa con el precio más alto, por encima de 1260€ / t, en comparación con 880€ / t para el carbón activado a base de cáscara de nuez y 630€ / t para el carbón activado a base de carbón. El precio del carbón activado a base de cáscara de coco ha comenzado a disminuir desde julio de 2016 debido a la mayor capacidad de suministro de las empresas de carbón activado con cáscara de coco y una competencia de mercado más feroz [55].

En Colombia, los precios del carbón activo se encuentran entre 0,5 USD/kg para carbonos activados de fabricación china para aplicaciones corrientes y 3,0 USD/kg para carbonos activados usados en aplicaciones especiales fabricados en Alemania [61].

A pesar de los precios indicados, la gran horquilla de precios entre unos y otros puede variar entre 600 hasta 3000€ /t, por lo que las características del carbón activo serán el factor controlante.

### 1.2.3 Materias primas

El carbón activo puede fabricarse a partir de un sinnúmero de materiales aunque, únicamente se utilizan unos pocos a nivel comercial, debido a su disponibilidad, bajo costo y productos finales obtenidos.

Prácticamente cualquier material orgánico con altas composiciones de carbono es susceptible de ser convertido en carbón activo. Normalmente los carbonos activos obtenidos industrialmente provienen de madera, residuos agrícolas y forestales, diferentes tipos de carbón como turba y lignito e incluso diferentes polímeros y fibras sintéticas o naturales.

Las principales características que deben reunir los precursores se agrupan en las siguientes:

- Fácil disponibilidad y bajo coste.
- Bajo contenido en materia mineral.
- Producto resultante con buenas propiedades.

Características de los carbonos activos a partir de algunos de los precursores más comunes quedan recogidas en la siguiente tabla:

<i>Propiedad</i>	<i>Coco</i>	<i>Carbón bituminoso</i>	<i>Lignita</i>	<i>Madera</i>
<b>Microporos</b>	Altos	Altos	Medianos	Bajos
<b>Macroporos</b>	Bajos	Medianos	Altos	Altos
<b>Dureza</b>	Alta	Alta	Baja	Mediana
<b>Cenizas</b>	5%	10%	20%	5%
<b>Cenizas solubles en agua</b>	Altas	Bajas	Altas	Medianas
<b>Polvo</b>	Bajo	Mediano	Alto	Mediano
<b>Regeneración</b>	Buena	Buena	Pobre	Regular
<b>Densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>	0.48	0.48	0.30	0.35
<b>Número de Lodos (g/m<sup>2</sup>)</b>	1100	1000	600	1000

Tabla 3: Propiedades del carbón según la procedencia

Los materiales lignocelulósicos constituyen el precursor más comúnmente utilizado y representan alrededor del 45% en peso de las materias primas totales utilizadas para la fabricación de carbón activado. Los bajos contenidos de materiales inorgánicos son importantes para producir carbonos activados con bajo contenido de cenizas, pero también se necesita un contenido en materia volátil relativamente alto para el control del proceso de fabricación. Ambas características son comunes a la mayoría de los materiales lignocelulósicos utilizados para la producción de carbón activado.

### 1.3. PRODUCCION INDUSTRIAL DE CARBÓN ACTIVO

En este apartado se estudiarán los principales tratamientos realizados a los precursores, así como los diferentes reactores empleados para la activación.

Este apartado sigue teniendo carácter general aunque, nótese que se profundiza en mayor medida en la activación física, que será la elegida a la hora de realizar el estudio técnico, donde se detallarán las condiciones de la producción del carbón activo.

#### 1.3.1 Pretratamientos

Para lograr la producción de un carbón activo competitivo en el mercado, el precursor debe cumplir con ciertas condiciones básicas antes de iniciar el proceso de activación; por esta razón la materia prima se acondiciona, donde es sometida a los procesos descritos a continuación:

- **Reducción de tamaño:** el objeto de la reducción de tamaño es llevar al material de partida a una distribución de tamaño de partícula inferior a la inicial, para tener un producto en el entorno de la granulometría deseada. El proceso se realiza llevando al precursor a un equipo de reducción de tamaño. Según la granulometría del precursor y del uso final del carbón activo, la etapa de reducción de tamaño puede no realizarse o, incluso realizarse en dos partes, es decir, una primera trituración primaria para una posterior molienda secundaria, con un tamaño de partícula menor.

Para reducir el tamaño en una granulometría relativamente grande se emplearán equipos de **trituration** de la tipología más adecuada para cada caso en particular. Ejemplo de trituradoras son de mandíbulas, de conos, cilíndricas, de tambor.

Para obtener una granulometría más fina se emplearían equipos de **molienda**, como molinos de bolas o por rodadura.

- **Tamizado:** el tamizado tiene como objetivo separar las partículas de diferentes tamaños obtenidas después de que el precursor ha sido sometido al proceso de molienda.

Esta etapa juega un papel importante en la activación química, pues el tamaño de partícula determina el área expuesta al agente activante y el tiempo de penetración del mismo en el precursor.

El tamizado no solo es empleado como pretratamiento, sino que también es empleado como método de clasificación final, imprescindible para cumplir con un producto de una granulometría deseada, tamaños clasificados normalmente en tamiz estándar de EEUU.

Equipos industriales pueden ser tamices y parrillas estacionarias, tamices giratorios o tamices vibratorios.

- **Secado:** Si fuera necesario, el precursor podría ser sometido a calentamiento en un horno a temperaturas que oscilan entre 100 y 120 °C con el fin de eliminar el exceso de agua y compuestos volátiles presentes en el mismo [17].

Típicamente se emplean secadores en tambor de manera industrial.

### 1.3.2 Etapas principales

Aquí se comentarán las principales etapas del proceso de producción del carbón activo, tanto de la activación física como química.

Las siguientes etapas se llevarán a cabo de manera posterior al pretratamiento.

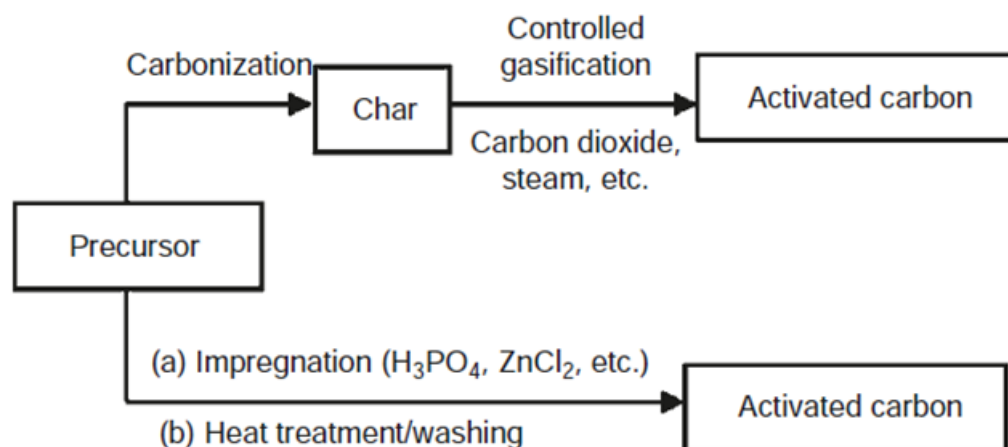


Figura 6: Diagrama de bloques general

- **Carbonización:** Es un paso fundamental previo a la activación, ya que aquí se forma la estructura principal del char, que posteriormente dará lugar al carbón activo.

Consiste en una descomposición térmica en una atmósfera inerte donde se somete al precursor a una elevada temperatura para un tiempo de residencia dado, teniendo lugar la eliminación de materias volátiles y los productos de la descomposición pirolítica y dando como resultado una masa carbonosa con alto contenido de carbono fijo y una estructura muy porosa.

La carbonización industrial, se realiza principalmente en hornos rotatorios construidos en acero inoxidable y revestido con materiales refractarios para soportar las temperaturas de carbonización.



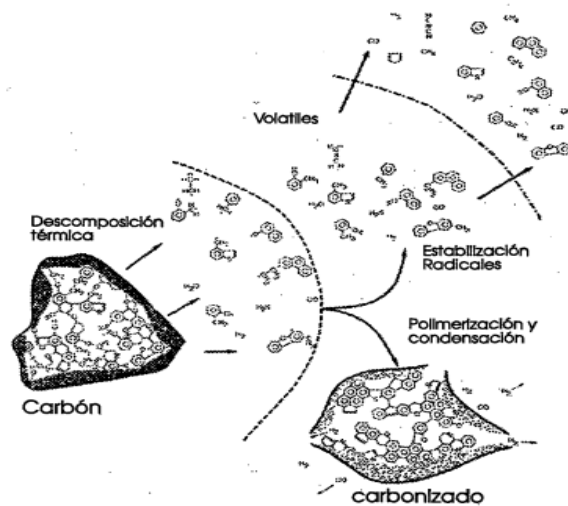


Ilustración 4: Esquema de la carbonización

- **Impregnación:** Es la fase de degradación química del precursor elegido. En esta fase, el material de partida se mezclará con el agente activante (diluido) seleccionado en un mezclador.  
En esta etapa, fundamentalmente se produce la deshidratación del precursor por la acción del agente activante [57].
- **Activación:** Es la etapa donde se produce una gasificación del char mediante un agente activante, típicamente vapor de agua o dióxido de carbono (en activación física). Esto provocará una reordenación de átomos que dará lugar a una producción creciente de poros.

**En la activación química, se realizará un tratamiento térmico posterior a la impregnación que provocará la deshidratación y, con ella, la producción de poros en el carbón.** En este tipo de activación se suele necesitar un lavado posterior para eliminar cualquier tipo de residuo que pudiera quedar después del empleo del agente activante.

### 1.3.3 REACTORES

Aunque se describen varios tipos de hornos en la literatura, tres son los más utilizados por los productores de carbón activo, es decir, hornos rotatorios, hornos de múltiples etapas y, en menor medida, hornos de lecho fluidizado. Debe entenderse que la carbonización puede llevarse a cabo en cualquiera de estos hornos. Los hornos rotatorios son los más populares entre los productores porque, en términos generales, producen carbones activados con una estructura porosa más controlada. El tiempo de residencia es mayor que para otros hornos, y debido a que su longitud es grande, varios quemadores y líneas de suministro de gas (gas natural, propano o los gases de la unidad de carbonización) se distribuyen a lo largo del horno para mejorar el control de la temperatura y perfil de temperatura. Los levantadores colocados a lo largo del interior del horno mejoran la mezcla del material proporcionando así una gasificación más homogénea [4].

La velocidad de producción se define por la velocidad de rotación, el ángulo del horno, la inyección de vapor y la velocidad de dosificación y extracción del carbono. En general, se admite que se pueden fabricar más carbones microporosos, con menor proporción de mesoporos, utilizando hornos rotatorios (Figura 7).

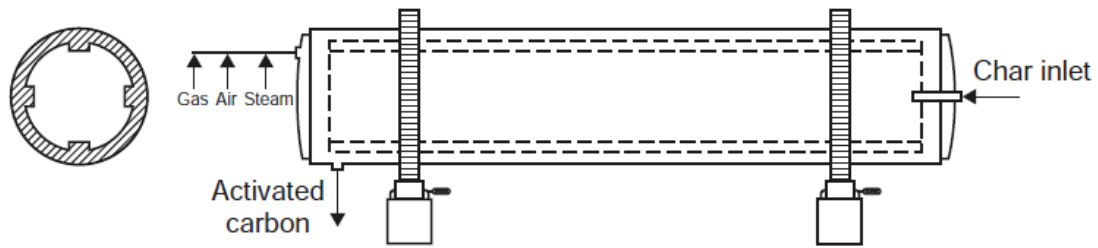


Figura 7: Horno rotatorio

Se usan hornos de múltiples etapas como hornos de activación (Figura 8). Hay un eje vertical central que mueve los brazos giratorios del piso estacionario en cada etapa, y el material se transporta hacia abajo, cayendo alternativamente cerca del eje en una etapa y cerca de la pared en la siguiente etapa. Como hay varios suministros de calor y vapor a diferentes niveles (en cada etapa en algunos hornos), la regulación de la temperatura es relativamente simple. Sin embargo, la altura relativamente baja del lecho de carbón hace que el tiempo de residencia sea más corto que en los hornos rotatorios y la calidad del carbono puede ser ligeramente menor, con más desarrollo de mesoporosidad. Este tipo de horno también se usa para la regeneración de carbón activado agotado.

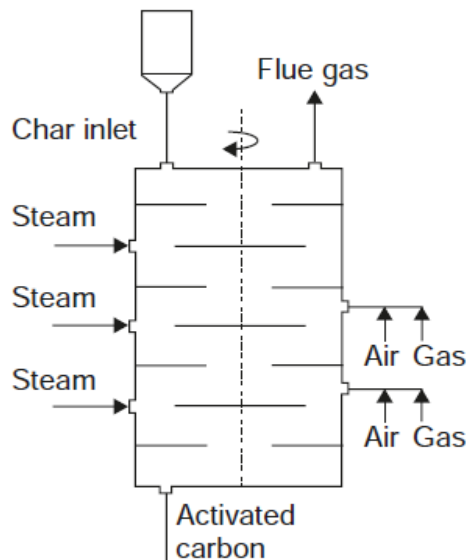


Figura 8: Horno de múltiples etapas

Los hornos de lecho fluidizado (Figura 9) se caracterizan por una buena transferencia de calor y masa, ya que los gases están en excelente contacto con las partículas de carbono. Esto significa que el tiempo de residencia es el más corto de todos los hornos de activación. La industria utiliza hornos fluidizados que se operan continuamente, con varios lechos fluidizados funcionando en serie. De esta manera, las condiciones experimentales pueden ser diferentes en cada lecho, para favorecer una activación más controlada.

El principal problema con este tipo de horno es que la reacción es muy rápida y hay mucho desprendimiento del material en la capa externa de las partículas, con el resultado final de carbones activados de calidad relativamente pobre, utilizados principalmente en forma de polvo para decolorar. Sin embargo, ha habido algunos desarrollos recientes en el diseño de hornos de lecho fluidizado, que ahora son más comúnmente utilizados por los productores.

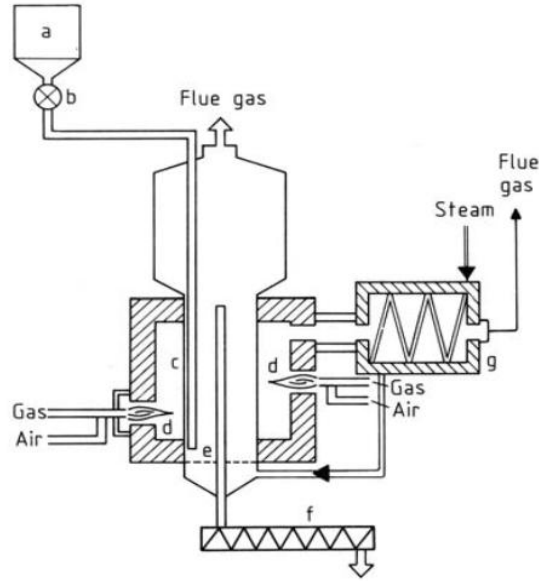


Figura 9: Lecho fluidizado. A) Silo de materia prima; b) entrada; c) cámara de combustión; d) quemador; e) Plato de distribución de gas; f) salida de carbón activado g) intercambiador de calor [18].

### 1.3.4 Condiciones de operación

A continuación, se muestra una tabla resumen en la que se aporta información relativa a las condiciones típicas de operación según el tipo de activación seleccionada [28]:

Activación Física	Activación Química
<ul style="list-style-type: none"> <li>Se realiza en dos etapas generales, carbonización y activación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se produce en tres etapas. Deshidratación, tratamiento térmico (activación) y lavado.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Puede emplearse para compuestos de origen vegetal o mineral.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Empleado principalmente para materias primas de origen vegetal.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Temperatura de carbonización variable, en torno a 500-900°C. Para la activación suelen ser algo más elevadas, típicamente entre 700-1100°C.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Las temperaturas de operación menores que en la activación física. 400-600°C para la deshidratación y 400-900 °C para la activación.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Agentes oxidantes pueden ser diversos, generalmente vapor de agua o dióxido de carbono.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Los agentes oxidantes más empleados a nivel industrial son el cloruro de zinc (ZnCl<sub>2</sub>), ácido fosfórico (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) e hidróxido de potasio (KOH).</li> </ul>

Tabla 4: Condiciones de operación [28]

## 1.4. SECTOR OLIVARERO ANDALUZ

La industria olivarera tiene una gran relevancia en Andalucía, tanto por el número de instalaciones que existen como por su gran capacidad de producción; en Andalucía se encuentra representado la mayor parte del sector existente a nivel nacional.

El objetivo principal es estimar y caracterizar territorialmente el potencial de producción de subproductos de las industrias del olivar. Su alcance comprende por tanto a las almazaras, las extractoras de aceite de orujo de oliva y las entamadoras, incluyendo los siguientes subproductos: restos de hojas y ramas finas (hojín), hueso de aceituna y orujillo.

### 1.4.1 Producción

Andalucía mantiene una superficie de cultivo de olivar prácticamente constante y que alcanza aproximadamente las 1.500.000 hectáreas de olivar [9].

Concretamente en Andalucía se procesan actualmente en torno a 4.700.000 toneladas de aceitunas al año en 821 almazaras (el 47% del total nacional) y 223 entamadoras (55% de las que hay en España), existiendo además 33 extractoras de aceite de orujo (el 60% del total nacional).

### 1.4.2 Subproductos de las industrias del sector del olivar [10]

- **Restos de hojas y ramas finas (hojín)**

Son los restos de hojas y ramas finas, material comúnmente denominado hojín, y se generan como resultado de la limpieza de la aceituna antes de su procesado, tanto en las almazaras como en las entamadoras.

- **Orujo o alperujo**

El orujo o alperujo es el subproducto que se genera en las almazaras en el proceso de obtención de aceite de oliva, principalmente por centrifugación y en un reducido número por prensado.

- **Orujillo**

El orujillo es el subproducto que se produce en las extractoras como resultado del proceso de secado y extracción de aceite del orujo graso. Su fracción seca está compuesta por piel (15- 30%), hueso (30-45%) y sólidos finos de pulpa (30-50%) [10].

- **Hueso de aceituna**

El hueso de aceituna es uno de los componentes sólidos que contiene el orujo generado en las almazaras, pudiéndose extraer del mismo mediante procedimientos físicos.

Su combustión es muy eficiente en términos de energía, coste e impacto ambiental debido a su bajo contenido en cenizas y tipo de combustión [10].

El balance de masas del proceso de la industria del aceite se muestra en la siguiente Figura 10:

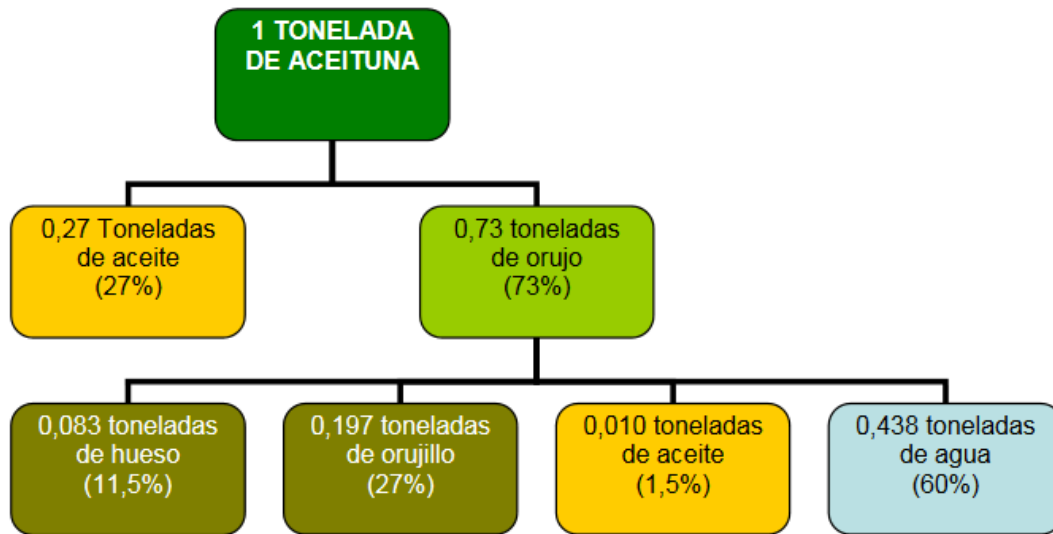


Figura 10: Balance y composición del hueso de aceituna

### 1.4.3 Distribución geográfica en Andalucía

Andalucía cuenta con aproximadamente el 60% de las hectáreas de olivo de la península, con algo más de 1,52 millones de hectáreas, en el que el cultivo del olivo ocupa más del 30% de la superficie agraria de Andalucía, adquiriendo una importancia relevante en la provincia de Jaén, el sur de Córdoba, el noroeste de Granada, el norte de Málaga y el sudeste de Sevilla.

La distribución del olivar queda recogida en la siguiente ilustración 5 [12]:

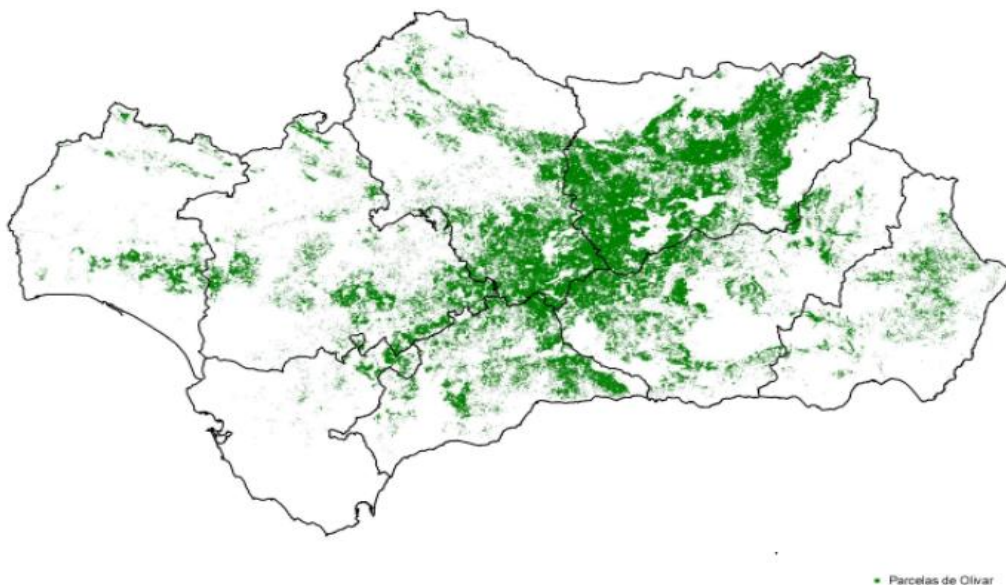


Ilustración 5: Distribución de las parcelas de olivar en Andalucía

Como resultado sinérgico de las favorables condiciones edafo-climáticas y políticoeconómicas, en la provincia de Jaén se ha conformado durante las últimas décadas el que puede ser el ejemplo más exagerado de especialización productiva regional de toda la Unión Europea. En el momento presente este monocultivo olivarero ha avanzado hasta ocupar el 91% de la superficie agrícola (Ilustración 6) [11].

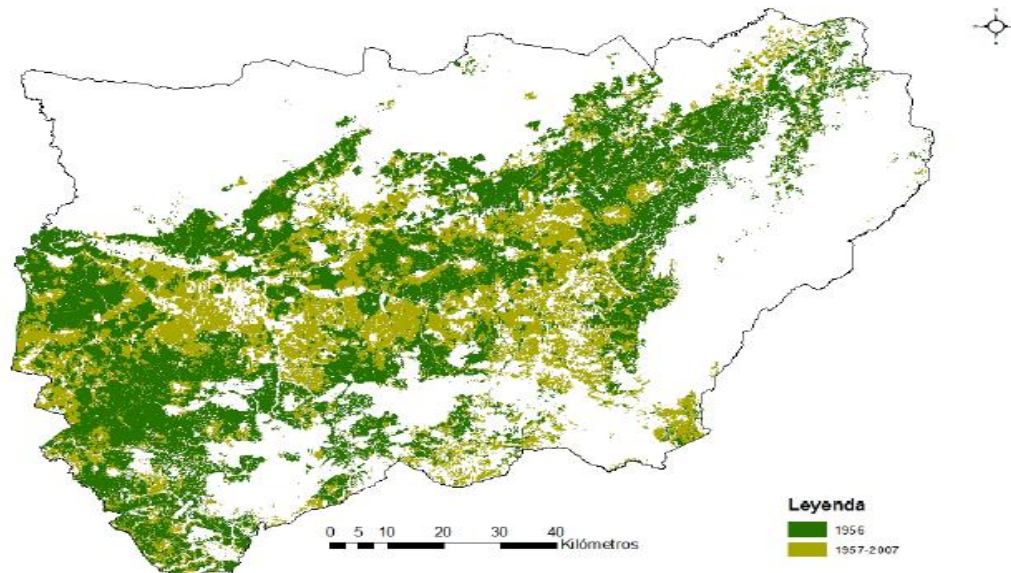
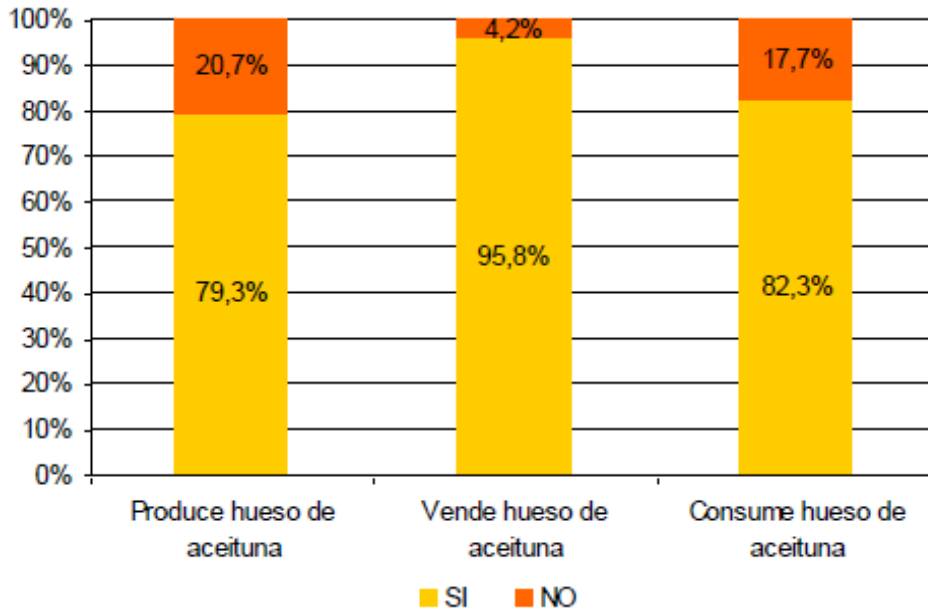


Ilustración 6: Distribución olivarera en Jaén

#### 1.4.4 Precios del hueso de aceituna

La extracción de hueso de aceituna se realiza en la mayor parte de las almazaras, en concreto, en el 79,3% de las almazaras encuestadas (Gráfica 2). Este porcentaje no ha aumentado respecto al periodo 2006/07 – 2007/08 (CAP, 2010). La mayor parte de las almazaras vende parte del hueso de aceituna que produce, en concreto el 95,8%, de modo que se puede considerar que el hueso constituye un co-producto de este sector. De hecho, este porcentaje ha aumentado respecto al periodo anterior, en el que las almazaras que vendían hueso representaban el 69,0%. El autoconsumo de hueso para la obtención de calor de proceso se realiza en el 82,3% de las almazaras encuestadas [13].



Gráfica 2: Proporción de almazaras en las que se produce, vende y consume hueso de aceituna [13]

La producción media de hueso respecto al total de aceituna procesada es del 8,1%. En el periodo 2006/07 – 2007/08 este porcentaje se encontraba en el 5,2%, lo que indica que ha aumentado el interés por la extracción del hueso de aceituna en las almazaras.

El **precio** medio percibido por la venta de hueso de aceituna ha sido de 73,16 €/t (impuestos no incluidos). El precio percibido varía en función del tipo de venta, siendo superior en la venta directa (76,92 €/t) que en la venta a intermediarios (64,35 €/t). El precio medio ha aumentado notablemente respecto al periodo 2006/07 – 2007/08, en el que éste se situaba en 51,70 €/t, lo que supone un incremento del 41,5% [13].

Los precios de empresas distribuidoras, como Pellets del sur son los siguientes [14]:

Venta de Hueso de Aceituna Seco y Limpio:

GRANEL: 110 €/tonelada, BIG BAG: 115 €/tonelada y SACOS 20kg: 130 €/tonelada

**Venta de Hueso de Almazara sin tratar:**

GRANEL: 65€/tn- 0,065€/kg

## 2 ESTUDIO TÉCNICO

En este apartado se realizará el estudio técnico de la planta de producción de carbón activo, donde se incluirán las bases de partida en dicho proceso, ya sea la materia prima utilizada, las características del proceso, la forma de activación o las características del producto final obtenido. Además, se describirán los cálculos necesarios para obtener los consumos en la planta, así como el dimensionado de los equipos principales. Respecto a la planta, también se dispondrá del emplazamiento en el que se ubica.

### 2.1. Bases de partida

En este apartado se recogen los aspectos más determinantes a la hora de elegir las características del proceso, pudiendo ser estas referidas al precursor, ubicación o empleo de equipos en concreto, siendo la primera de ellas, que se realizará una instalación para que produzca 2000 toneladas anuales de carbón activo, repartidos en 7200 horas de trabajo al año, concretamente, en 300 días de 24 horas.

#### 2.1.1 Selección de la materia prima

Un precursor óptimo para obtener carbones activos debe tener un elevado contenido de carbono fijo y materia volátil, alta densidad y bajo contenido de cenizas [21]. De la gran variedad de posibles precursores a los que recurrir, el precursor empleado es un residuo del olivo, concretamente el hueso de aceituna, del cual se tomará una composición mostrada en la Tabla 5.

En comparación con otras materias primas lignocelulósicas empleadas para la producción de carbón activo, es de destacar su elevado grado de empaquetamiento ( $0,76 \text{ g/cm}^3$ ).

De manera general, el hueso de aceituna cumple tres de los principales requisitos para su elección:

- Bajo costo
- Que haya sido objeto de estudio con anterioridad en estudios experimentales que aseguren una buena calidad del producto final.
- Disponibilidad de la materia prima. Requisito que se cumple con creces.



	Poda de olivar	Orujo	Orujillo	Hueso
Análisis inmediato (% peso)				
Carbono	14,67	7,31	22,13	21,98
Volátiles	72,83	30,65	72,29	76,40
Cenizas	1,55	6,75	4,58	1,62
Humedad	10,95	55,29	12,69	13,12
Análisis elemental (% peso)				
Carbono	49,52	47,03	50,54	50,79
Hidrogeno	5,9	5,64	5,86	5,95
Nitrógeno	0,39	0,97	0,97	0,48
Azufre	<0,05	0,09	0,07	0,04
Oxigeno	44,19	46,27	42,56	42,74

Tabla 5: Composición residuos de la aceituna [19]

El precursor elegido presenta una granulometría de entre 2 y 4,5 mm [58], la cual es óptima para la producción activo granular (Ilustración 7).



Ilustración 7: Granulometría precursor hueso de aceituna [58]

### 2.1.2 Selección del emplazamiento

En este pequeño apartado, como base de partida, se introducen las razones por las que ha sido seleccionado el emplazamiento y su idoneidad como ubicación de la instalación de estudio.

Se ha tomado este precursor debido a que el emplazamiento de la planta de estudio se situará en Andalucía, concretamente en la provincia y municipio de Jaén, donde se observó anteriormente la gran superficie y producción dedicadas al olivo, lo cual hace pensar que los costes de obtención de residuos del olivo debido al transporte serán mínimos, siendo este último factor un parámetro de gran importancia a la hora de evaluar económicamente la planta.

Las coordenadas del emplazamiento serán las siguientes:

- Latitud: **37°49'34.4" Norte**
- Longitud: **3°46'28.5" Oeste**

### 2.1.3 Selección del método de producción y tipo de producto obtenido

En el presente trabajo se estudiará la producción de carbón activo granular (GAC) debido a su polivalencia y mayor precio que, unido a una mayor demanda, provocará una mayor competitividad a la hora de vender el producto. Para un gran número de aplicaciones en purificación de gases y líquidos, el carbón activo debe tener la forma granular, como en las industrias de bebidas y alimentos, los productos de este tipo han encontrado una mayor aplicación debido a su naturaleza libre de polvo [18].

De manera relevante, el hueso de aceituna con la granulometría dada, resulta muy conveniente para su transformación en carbón activo granular no conformado (sin forma). Esta característica permitirá prescindir de equipos de molienda o peletización, provocando de esta manera un gran ahorro tanto energético como económico en el proceso.

El método de activación empleado será la física, ya que la química se suele emplear para la obtención de unas características más específicas cuando no se es capaz de llegar mediante métodos térmicos, siendo además más usual su aplicación en el carbón activo en polvo, debido a que la forma granular requiere una complicación adicional. Además, la activación física es más respetuosa con el medio ambiente por la no aplicación de diferentes sustancias químicas que posteriormente hay que retirar del carbón.

El agente activante empleado será el vapor de agua, donde puede apreciarse cómo en la reacción dada en la activación térmica con vapor (Reacción 2) produce hidrógeno y monóxido de carbono, los cuales son aprovechados térmicamente en la actualidad introduciendo un poco de oxígeno en esta etapa del proceso, de manera que el calor producido equivale al ahorro de combustible no empleado para producir dicho calor para suministrarlo en las reacciones endotérmicas generales.

Por último, el reactor empleado será el horno rotativo o rotatorio. A pesar de haber diferentes reactores disponibles para la activación, se toma el horno rotativo debido a la mayor homogeneidad de tiempos de residencia y fácil control de temperatura y composición del gas, lo que provoca una calidad de producto muy estable. Sin embargo, los últimos años se han desarrollado mucho los reactores de lecho fluidizado, debido a una mayor transferencia de calor y materia debido al gran contacto existente entre las partículas y los gases, aunque la calidad del producto es irregular, aunque muy a tener en cuenta en años venideros para la producción de carbón activo en polvo, ya que el carbón activo granular prácticamente queda restringido al uso de hornos rotatorios.

Para este trabajo en particular, se usarán unas condiciones de operación del reactor ya experimentadas con anterioridad [20] en el hueso de aceituna, obteniéndose un carbón de aceptable calidad y características mostradas en la Tabla 6, sin necesidad de realizar un pretratamiento de oxidación con aire, lo cual conseguirá una mayor economía del proceso.

Temperatura de carbonización (°C)	Tiempo de carbonización (h)	Agente activante	Temperatura de activación (°C)	Tiempo de activación (h)	Área superficial (m <sup>2</sup> /g)
850	1	Vapor	850	2	680

Tabla 6: Experiencias y resultados de activación física para hueso de aceituna [20]

## 2.2. Descripción del proceso

En la Figura 11 se muestra un diagrama de flujo simplificado de un proceso industrial típico para la producción de carbón activado granular peletizado, donde la alimentación del precursor se lleva a molienda para reducir el tamaño de las partículas, de donde pasa a la pre-oxidación con aire a aproximadamente unos 300 °C, que tiene como función acondicionar el precursor para obtener un mayor rendimiento en el producto final [4]. Posteriormente se mezcla con un aglutinante, agregado para producir una mezcla de carbón / aglutinante de

plástico que se puede usar para dar forma a los materiales extruidos conformando el diámetro deseado [18].

Una vez dada la forma deseado, el carbón pasa a carbonizarse en un horno rotatorio, que implica la descomposición térmica o pirólisis de la materia prima en ausencia de oxígeno eliminándose así la materia volátil, humedad junto con alquitranes, aceites y gases, dando como resultado una masa porosa con alto contenido de carbono fijo. En este material, "char", las moléculas que no son de carbono, como oxígeno, hidrógeno, nitrógeno y azufre son eliminados en su mayoría. Normalmente estas temperaturas suelen estar en torno a 600-900 °C, aunque pueden llegar a alcanzar los 1000 °C.

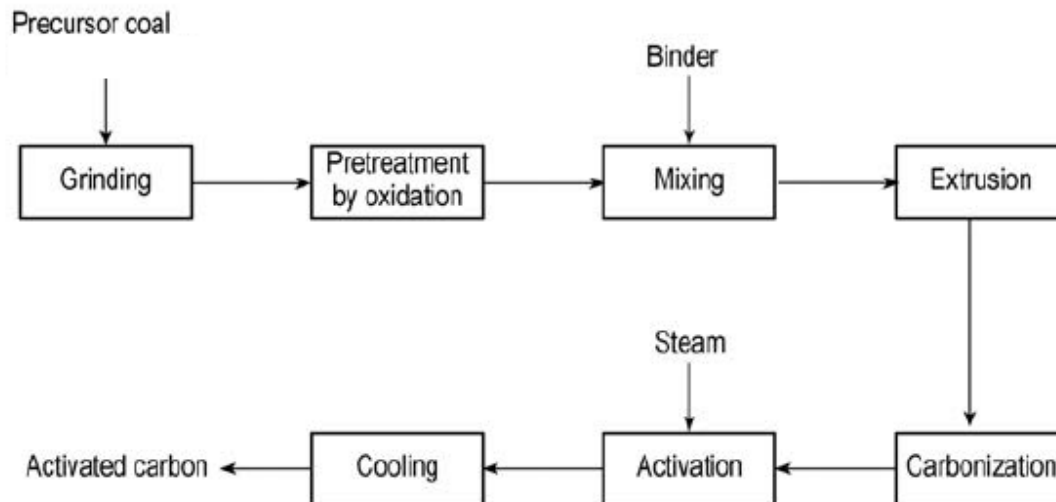


Figura 11: Diagrama de flujo del proceso carbón activo granular [18]

Una vez terminada la carbonización, se pasa luego a carbón activado en el mismo horno rotatorio a 900-1000°C, donde se desarrollará la mayor parte de la porosidad, lo que provocará la mejoría sustancial de su capacidad de adsorción. En este paso, el material será expuesto a una atmósfera oxidante, siendo este caso activación con vapor, ya que la diferencia de calidad entre el uso de vapor o dióxido de carbono no es apreciable para niveles de burn-off (rendimiento) empleados a nivel industrial [4].

Una vez termina la etapa de activación, es necesario un enfriamiento rápido para que la calidad del producto no se vea afectada, además de razones de seguridad en la planta, tanto para su manipulación como para su almacenamiento [21].

## 2.3. Descripción de la instalación

En este apartado se realizará una descripción detallada de la planta. En ella se incluirá la descripción de la instalación y sus equipos principales, emplazamiento exacto en la que se ubicará y cálculos referentes a los balances de materia y energía para determinar las necesidades energéticas y materiales del proceso.

### 2.3.1 Situación y emplazamiento

La instalación de producción de carbón activo se situará en la provincia y municipio de Jaén, concretamente en la calle Leonor Gutiérrez (Ilustración 8). Se sitúa en las afueras de la ciudad, a unos 6km del centro. Queda rodeada por un complejo de naves industriales, donde no se aprecian viviendas a menos de un radio de 1km.

Las coordenadas del emplazamiento serán las siguientes:

- Latitud: 37°49'34.4"Norte

- Longitud: 3°46'28.5" Oeste



Ilustración 8: Emplazamiento de la planta

Se ha tomado una superficie de terreno de 4.000 m<sup>2</sup>, suficientes para las necesidades de la planta.

La zona de acceso al emplazamiento es buena, debido a que es posible su entrada o salida desde diferentes zonas.

En cuanto a suministros de utilities, se asume una fácil disponibilidad debido a la cercanía con plantas y edificios industriales que la rodean.



Ilustración 9: Emplazamiento

Sin embargo, el factor más relevante para su emplazamiento, ha sido la cercanía con la empresa PELAEZ Renovables (Ilustración 10), supuesto suministrador principal del hueso de aceituna empleado como precursor del carbón activo.



Ilustración 10: Situación frente a empresa suministradora

Esta medida provocará un fuerte impacto en la economía global de la planta, reduciendo los costes de transporte al mínimo, siendo este último parámetro un factor importante en la gran parte de empresas que necesitan una gran cantidad de materias primas, como es este caso.

La distancia en carretera desde la empresa suministradora hasta el emplazamiento seleccionado son unos 600 metros.

### 2.3.2 Diagrama de flujo (PFD)

La llegada del precursor utilizado, en este caso hueso de aceituna, se realizará en camiones, que depositarán el precursor en un patio de almacenamiento cubierto habilitado para ello, con una capacidad de almacenamiento de 15 días.

El material se transportará y elevará, mediante un tornillo sin fin, hacia un silo de almacenamiento, donde se almacenará el material con una capacidad de almacenamiento de al menos 1 día.

En los silos de almacenamiento se distribuirá el hueso de aceituna a través de una tolva dosificadora que controla la cantidad de material que se suministra a las cintas transportadoras, que conducirán el material procedente del silo hasta el horno rotativo.

En el horno rotativo se produce la carbonización y la activación. En la primera parte de la longitud del horno se produce la carbonización y, cuando el material, que avanza en el horno en un modelo de flujo pistón, recorre una longitud determinada, comienza la etapa de activación.

Finalmente, el carbón ya activado se lleva a un equipo de enfriamiento para no perder la calidad del producto, así como velar por la seguridad de los trabajadores de la planta. La salida del carbón activo del horno se realizará mediante tornillos sin fin, ya que el material sale a una elevada temperatura, por lo que el uso de cintas transportadoras no es recomendable.

Una vez finalizado el proceso de enfriamiento, el material pasa por un tamizado para clasificar el producto final. Después de esto se vuelve a almacenar el producto final en silos para su almacenamiento o venta a granel, en sacos industriales (big bags) o paquetes de menor tamaño.

A continuación se muestra un diagrama de flujo (PFD) general de la instalación descrita anteriormente:

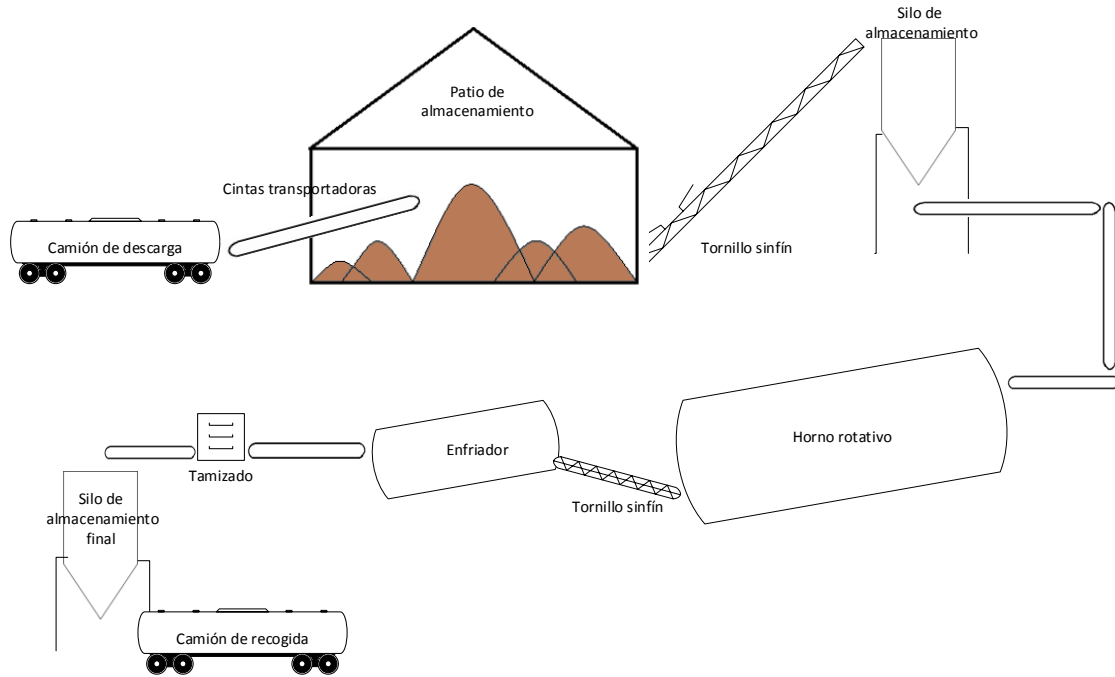


Ilustración 11: Diagrama de flujo del proceso

### 2.3.3 Balance de materia

El balance de materia se realizará a partir de la producción final de carbón activo, siendo esta de 2000 toneladas anuales. A partir de datos de bibliografía [4 y 50] se obtiene que un buen burn-off se encuentra en el 20% [4], donde a partir de ahí no experimenta mejoras sustanciales en la porosidad. En cuanto al porcentaje de char obtenido del hueso de aceituna, se obtiene que el hueso de aceituna se carboniza prácticamente por completo a partir de los 700 °C (siendo este el caso), obteniéndose un char con un 25% en peso del hueso de aceituna inicial.

Con estos datos es posible determinar la cantidad de materia prima (hueso de aceituna) que habrá que disponer para dicha producción:

$$\frac{2000 \text{ t de CA}}{\text{año}} \times \frac{100 \text{ t de char}}{80 \text{ t de CA}} \times \frac{100 \text{ t de hueso}}{25 \text{ t de char}} = \frac{10000 \text{ t de hueso}}{\text{año}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Por lo tanto, el consumo de hueso de aceituna del proceso estudiado será de 10000 toneladas anuales, con un rendimiento global del proceso del 20%.

A modo de **resumen**, se obtiene que son 10.000 toneladas de hueso anuales necesarias en el proceso, 7.500 que se devolatilizan, quedando 2.500 toneladas de char, en el cual se producen 500 toneladas de pérdidas anuales debido a la activación.

El equipo principal donde se producirán las reacciones principales es el horno rotatorio, ya que ahí es donde se produce la carbonización y la reacción de activación, que involucran un cambio en la estructura de la materia prima (Figura 12).

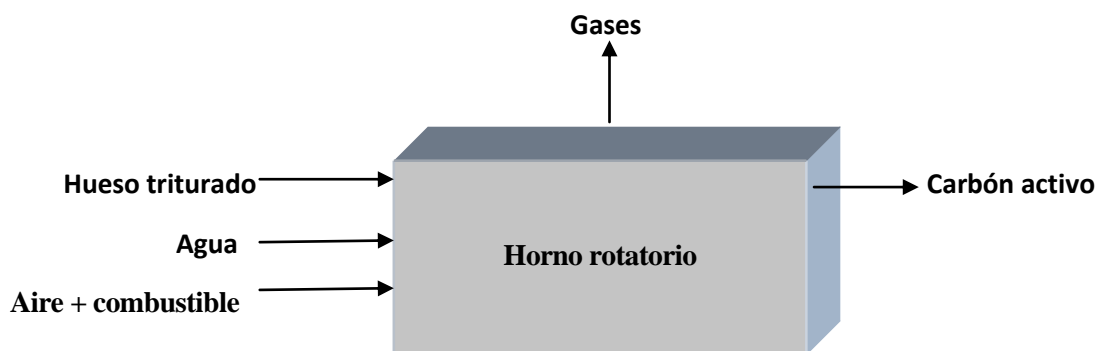


Figura 12: Esquema del balance

Los gases de salida del horno son  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$ , alquitranes (suponiendo benceno) y  $\text{N}_2$ , aunque fundamentalmente serán el nitrógeno, vapor y dióxido de carbono, aunque pueden quedar trazas del resto. Se introducirá una pequeña cantidad de aire de manera muy controlada, que permitirá la **oxidación de los volátiles** generados por el hueso de aceituna, como el  $\text{CO}$  en  $\text{CO}_2$  y de  $\text{H}_2$  y  $\text{CH}_4$  en  $\text{H}_2\text{O}$ .

También se supondrá a efectos de cálculo que la combustión del gas natural,  $\text{CO}$  y  $\text{H}_2$  es completa. A efectos prácticos, la composición de los gases de salida incluirá pequeñas cantidades de los gases anteriores que no hayan sido oxidados.

### Carbonización

A partir de los siguientes balances se obtienen las cantidades necesarias y generadas en la reacción de carbonización, donde cabe recordar que aproximadamente del 25% del hueso de aceituna es convertido en char para su posterior activación.

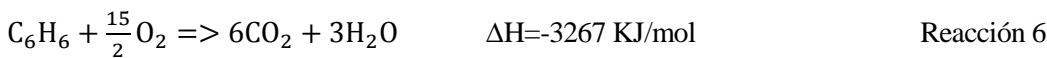
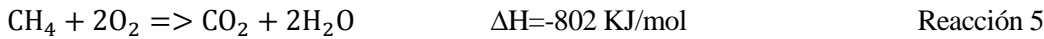
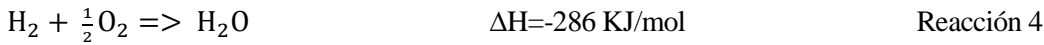
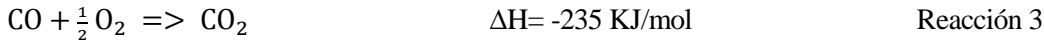
Puesto que el 25% del hueso es convertido a char, el 75% restante constará de los gases devolatilizados en el proceso de carbonización, es decir, 7500 toneladas anuales.

La composición de esta corriente viene dada por estudios realizados sobre la predicción de los productos generados en la pirolisis de la biomasa [51], dando a continuación un resultado aproximado para la temperatura de  $850\text{ }^\circ\text{C}$ :

Compuesto	Kg/kg hueso	Tonelada/año	Composición másica (p/p%)	Caudal molar (Kmol/h)
$\text{CH}_4$	0,049	490	6,54	4,25
$\text{CO}$	0,369	3690	49,27	18,3
$\text{H}_2$	0,012	120	1,6	8,33
$\text{CO}_2$	0,197	1970	26,3	6,22
$\text{H}_2\text{O}$	0,098	980	13,08	7,56
Alquitrán	0,024	240	3,2	0,43

Tabla 7: Composición gases devolatilizados

Sin embargo, no habría que confundir la composición de los gases de salida del horno con la anterior, puesto que habrá que sumar la cantidad de agua en exceso que será necesaria para la activación, además de los gases producidos por la combustión del gas natural y de las reacciones exotérmicas de la combustión de los productos devolatilizados, suponiendo la reacción total de los gases devolatilizados de la siguiente manera:



### **Combustible**

Suponiendo que el combustible es gas natural y, en su totalidad metano, se asume una composición elemental de 75% H y 25% C. A partir de las reacciones 4 y la 7 (mostrada a continuación), se puede obtener la cantidad de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  que se forma a partir de la combustión del gas natural mostrada en la Reacción 5.



El cálculo de la cantidad de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  formados se realiza a partir de la estequiometría de las reacciones 4 y 7, que dan lugar a las siguientes ecuaciones [52]:

$$\frac{\text{kg C a CO}_2}{\text{kg combustible}} = a \times \frac{32}{12} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$\frac{\text{kg H}_2 \text{ a H}_2\text{O}}{\text{kg combustible}} = \text{Hd} \times \frac{18}{2} \quad \text{Ecuación 3}$$

Siendo **a** y **Hd** la composición de C y  $\text{H}_2$  en el combustible (en tanto por 1), respectivamente.

Se obtiene así **0,917 kg  $\text{CO}_2$ /kg de combustible** y **6,75 kg  $\text{H}_2\text{O}$ / kg de combustible**, que se añaden a la composición de salida de los gases.

De igual manera, se obtienen a continuación el oxígeno teórico necesario para que se produzca la combustión [52]:

$$\text{O}_T = \left( \frac{a}{12} + \frac{\text{Hd}/2}{2} \right) \times 32 \quad \text{Ecuación 4}$$

Normalmente en cualquier combustión se introduce un exceso de aire (oxígeno) para que no se produzcan inquemados u oxidaciones parciales, sin embargo, se ha tenido en cuenta que en este caso en particular, un exceso de oxígeno haría reaccionar el carbón activo, produciéndose su combustión, por lo que, bajo ningún concepto se introducirá un exceso de oxígeno. Aunque a efectos de cálculo no serán tenidos en cuenta, será necesaria una inyección secundaria de aire a la salida del horno para eliminar estos inquemados.



De la Ecuación anterior resulta:  $O_T$ : **6,67 kg  $O_2$ /kg de combustible.**

Teniendo en cuenta que, además del aire necesario para el combustible, es necesaria la combustión de los productos de la devolatización, como se dijo anteriormente. Por lo tanto, hay que sumar a este oxígeno teórico el necesario para las reacciones 3, 4, 5 y 6 se den.

Sumando los moles por medio de la estequiometría de las reacciones 3 a 6 y ayudado de la Tabla 7, además de pasar el oxígeno teórico anterior a unidades molares, se tiene que el oxígeno teórico para las reacciones de devolatización y el combustible es:

$$O_T: \frac{6,67}{32} \times m_{\text{cble}} + 4,25 \times 2 + \frac{18,3}{2} + \frac{8,33}{2} + 0,43 \times \frac{15}{2} \quad \text{Ecuación 5}$$

Así, el **oxígeno teórico para la carbonización y el combustible** es  $O_T$ : **25,04 + 0,0208\*m<sub>cble</sub> Kmol  $O_2$ /h.**

Teniendo en cuenta que con el oxígeno entra nitrógeno, la cantidad de este será [52]:

$$N_2 = \frac{79}{21} \times O_T \quad \text{Ecuación 6}$$

El resultado de la ecuación anterior es  $N_2$ : **94,2 + 0,784\*m<sub>cble</sub> kmol  $N_2$ /h.**

### Activación

Una vez determinada la etapa de carbonización, se procede al cálculo de las necesidades y productos que intervienen en la etapa de activación.

En esta etapa se produce la gasificación del char con vapor de agua, según las reacciones 2, 3 y 4 dando como productos  $H_2$  y  $CO$ , los cuales reaccionan para producir vapor de agua y dióxido de carbono.



La cantidad de char que reacciona en esta etapa se determinó anteriormente, siendo esta de 500 toneladas anuales. Los balances necesarios se expresan a continuación:

$$500 \times 10^3 \frac{\text{Kg de C}}{\text{año}} \times \frac{1 \text{ Kmol C}}{12 \text{ Kg de C}} \times \frac{\text{año}}{300 \text{ días}} \times \frac{\text{días}}{24 \text{ horas}} = 5,79 \frac{\text{kmol de C}}{\text{h}} \quad \text{Ecuación 7}$$

Al ser la reacción mol a mol, el número de moles necesarios de agua y producidos de monóxido de carbono e hidrógeno por hora serán los mismos, que pasados a unidades de masa queda de la siguiente manera:

$$5,79 \text{ Kmol } H_2O \times \frac{18 \text{ Kg de } H_2O}{1 \text{ Kmol } H_2O} = 104,2 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \text{ de } H_2O \quad \text{Ecuación 8}$$

$$5,79 \text{ Kmol } CO \times \frac{28 \text{ Kg de } CO}{1 \text{ Kmol } CO} = 162,1 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \text{ de } CO \quad \text{Ecuación 9}$$

$$5,79 \text{ Kmol H}_2 \times \frac{2 \text{ Kg de H}_2}{1 \text{ Kmol H}_2} = 11,6 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \text{ de H}_2 \quad \text{Ecuación 10}$$

Como es sabido, el oxígeno estequiométrico es requerido en la **etapa de activación** para la oxidación de hidrógeno y monóxido de carbono según las reacciones 3 y 4, a partir de las cuales se determina la cantidad de oxígeno necesaria para la activación.

Para obtener este valor se toma la mitad de moles que se generaron como consecuencia de la reacción de activación, es decir, **5,79 kmol/h**, que son los **moles de oxígeno necesarios** para la oxidación del hidrógeno y monóxido generados en la activación. De manera equivalente, los moles obtenidos de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O son los mismos que los que se oxidan de CO y H<sub>2</sub>.

Para calcular el número de moles de nitrógeno introducidos al proceso, no hay más que tomar los moles de oxígeno introducidos al proceso y tomar la conocida proporción de 79 moles de nitrógeno por cada 21 de oxígeno en aire:

$$5,79 \frac{\text{Kmol}}{\text{h}} \text{ O}_2 \times \frac{79 \text{ Kmol N}_2}{21 \text{ Kmol O}_2} = 21,78 \frac{\text{Kmol}}{\text{h}} \text{ N}_2 \quad \text{Ecuación 11}$$

Estas cantidades, pasadas a unidades másicas se obtiene que:

**Oxígeno necesario es de 185,28 kg/h.**

**Nitrógeno introducido con el oxígeno: 609,84 kg/h.**

De esta manera, el balance de materia queda especificado en su totalidad, a falta de un último parámetro que se tendrá en cuenta, que es la presión parcial, o la composición que debe haber de vapor de agua en el horno. Este parámetro resulta útil debido a que la gasificación del char resulta muy lenta, por lo que para mejorar los tiempos de la reacción de activación, se aumentará la cantidad de agua de la estrictamente necesaria para ella. Este valor se tomará como un 40% en volumen de vapor.

A continuación, se resumen las composiciones y compuestos del horno rotatorio:

Compuestos	ENTRADA	SALIDA
	Caudal (Kmol/h)	Caudal (Kmol/h)
CO <sub>2</sub>	-	37,14+0,0208*m <sub>cble</sub>
CO	-	-
H <sub>2</sub>	-	-
H <sub>2</sub> O	5,79 + 6,75*m <sub>cble</sub> + X	19,89+0,375 *m <sub>cble</sub> + X
CH <sub>4</sub>	-	-
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	-	-
O <sub>2</sub>	25,04+0,0208*m <sub>cble</sub>	-
N <sub>2</sub>	94,2+0,782*m <sub>cble</sub>	94,2+0,784*m <sub>cble</sub>

Tabla 8. Caudales de gases en horno

En la Tabla 8, la variable “X” corresponde al agua requerida para que el volumen de vapor en el horno sea el pedido.

El caudal molar de  $\text{CO}_2$  se ha obtenido de las aportaciones de los compuestos que se oxidan en la **carbonización**: 4,25 kmol/h de  $\text{CH}_4$  a  $\text{CO}_2$ , 18,3 provenientes del  $\text{CO}$ , 6,22 del propio  $\text{CO}_2$  y 2,58 del benceno. Aportación que se suma a la del **combustible**,  $0,0208 \cdot m_{\text{cble}}$ , y por último, el  $\text{CO}_2$  debido a la **activación**, que son 5,79 kmol/h.

De igual manera, el caudal de agua de salida se obtiene de la aportación de la combustión de los productos de la carbonización del  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$  y benceno, siendo estas de 8,5 kmol/h, 8,33 y 1,29 respectivamente, a los que hay que sumar 7,56 del propio vapor desprendido. La aportación de agua debido al combustible es de  $0,375 \cdot m_{\text{cble}}$  Kmol/h. Por último, en el caso de la activación es agua **requerida**, por lo que es un término que resta a todos los demás, quedando como caudal final el recogido en la Tabla 8. El agua necesaria para la activación es de 5,79 kmol/h.

Se determina, por lo tanto, que las variables del balance de materia a conocer son el caudal de combustible y la variable X, que se determinarán simultáneamente al realizar el balance de energía.

### 2.3.4 Balance de Energía

A continuación se procederá a realizar el balance de energía en el horno rotativo para determinar la cantidad de gas natural a utilizar. Se tomará de base la presión de 1 atmósfera, una temperatura de 25 °C en la entrada de material y una temperatura de los gases de 850 °C, así como una temperatura de salida del carbón activo de 850 °C.

El combustible empleado es gas natural, por ser el más limpio de las energías fósiles, así como su fácil disponibilidad y alto poder calorífico.

La ecuación general empleada en el balance de energía es la Ecuación 8:

$$Q_{entra} + Q_{generado} - Q_{consumido} = Q_{sale} + Q_{pérdidas} \quad \text{Ecuación 8}$$

Esta ecuación se puede desglosar para realizar los cálculos pertinentes al cálculo del caudal de gas natural necesario en el proceso.

$$Q_{entra} = Q_{cble} + Q_{hueso} + Q_{agua} + Q_{aire} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$Q_{generado} = Q_{\text{CH}_4} + Q_{\text{CO}} + Q_{\text{H}_2} + Q_{\text{C}_6\text{H}_6} + Q_{r3} + Q_{r4} \quad \text{Ecuación 10}$$

$$Q_{consumido} = Q_{\text{carb}} + Q_{r2} \quad \text{Ecuación 11}$$

$$Q_{sale} = Q_{\text{gases}} + Q_{CA} \quad \text{Ecuación 12}$$

$$Q_{pérdidas} = PCI \times m_{\text{cble}} \times \%pérdidas$$

Siendo a su vez:

- $Q_{cble}$ : Calor aportado por el combustible, KJ/h. Calor que se obtiene de la multiplicación del poder calorífico inferior (PCI) en KJ/Kg por el caudal de combustible  $m_{\text{cble}}$  en Kg/h. (Ecuación 13).

$$Q_{cble} = PCI \times m_{\text{cble}} \quad \text{Ecuación 13}$$

- $Q_{hueso}$ : Calor aportado por el hueso de aceituna en la entrada tomada a 25° C y calculada como el producto del caudal de combustible, por el caudal de hueso a la entrada del reactor,  $m_{\text{hueso}}$ , en Kg/h, por el calor específico del hueso,  $Cp_{\text{hueso}}$ , por la diferencia de temperaturas entre la entrada ( $T_{\text{ent}}$ ) y la temperatura de referencia,  $T_{\text{ref}}$ , en grados. Todo esto queda recogido en la Ecuación 14:

$$Q_{hueso} = m_{\text{hueso}} \times Cp_{\text{hueso}} \times (T_{\text{enthueso}} - T_{\text{ref}}) \quad \text{Ecuación 14}$$

- $Q_{\text{agua}}$ : Calor aportado por el agua en la entrada al horno, calculada de manera similar a la anterior, donde  $m_{\text{agua}}$  es el caudal de agua necesario para la activación y  $Cp_{\text{agua}}$  es el calor específico del agua (Ecuación 15):

$$Q_{\text{agua}} = m_{\text{agua}} \times Cp_{\text{agua}} \times (T_{\text{entagua}} - T_{\text{ref}}) \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde cabe mencionar que, en el caudal de agua que entra al horno, se incluye la variable “x”, la cual indica la cantidad de agua necesaria (kg/h) para que a la salida de los gases del horno, la composición volumétrica del agua sea del 40%.

- $Q_{\text{aire}}$ : Calor aportado por el aire a la entrada del horno. En este caso hay que tener en cuenta el aire aportado por el combustible y el aire aportado para que sea posible que se produzcan las reacciones exotérmicas 3 y 4, siendo el caudal de gases para la reacción  $m_{\text{ar}}$  y  $m_{\text{ac}}$  para el aire necesario para el combustible:

$$Q_{\text{aire}} = m_{\text{ar}} \times Cp_{\text{aire}} \times (T_{\text{entaire}} - T_{\text{ref}}) + m_{\text{cble}} \times m_{\text{ac}} \times Cp_{\text{aire}} \times (T_{\text{entaire}} - T_{\text{ref}})$$

- $Q_{\text{CH}_4}$ : Calor que se genera por la combustión del metano desprendido en la etapa de carbonización. Se calcula mediante la entalpía de reacción (kJ/kmol) por el caudal molar del metano:

$$Q_{\text{CH}_4} = \Delta H_{\text{CH}_4} \times F_{\text{CH}_4} \quad \text{Ecuación 16}$$

- $Q_{\text{H}_2\text{c}}$ : Calor generado por la combustión del hidrógeno desprendido en la etapa de **carbonización**. Se calcula mediante la entalpía de reacción (kJ/kmol) por el caudal molar del hidrógeno producido en la carbonización:

$$Q_{\text{H}_2} = \Delta H_{\text{H}_2} \times F_{\text{H}_2\text{c}} \quad \text{Ecuación 17}$$

- $Q_{\text{COc}}$ : Calor generado por la combustión del monóxido de carbono desprendido en la etapa de **carbonización**. Se calcula mediante la entalpía de reacción (kJ/kmol) por el caudal molar del monóxido de carbono producido en la carbonización:

$$Q_{\text{CO}} = \Delta H_{\text{CO}} \times F_{\text{COc}} \quad \text{Ecuación 18}$$

- $Q_{\text{C}_6\text{H}_6}$ : Calor generado por la combustión del benceno desprendido en la etapa de carbonización. Se calcula mediante la entalpía de reacción (kJ/kmol) por el caudal molar del hidrógeno producido en la carbonización:

$$Q_{\text{C}_6\text{H}_6} = \Delta H_{\text{C}_6\text{H}_6} \times F_{\text{C}_6\text{H}_6} \quad \text{Ecuación 19}$$

- $Q_{\text{r3}}$ : Calor producido en la reacción exotérmica por el cual se produce  $\text{CO}_2$  a partir de  $\text{CO}$ . Para calcular este parámetro se multiplica la entalpía de reacción correspondiente,  $\Delta H_{\text{r3}}$  en KJ/kmol por el caudal molar de  $\text{CO}$  que reacciona,  $F_{\text{CO}}$  en Kmol /h, que en este caso son los mismos que el caudal de  $\text{H}_2$ ,  $F_{\text{H}_2}$ , o la mitad del caudal molar total de oxígeno,  $F_{\text{O}_2}$ . Todo esto queda demostrado por la estequiometría de las reacciones, por lo que se puede obtener que el calor producido en la reacción 3 (Ecuación 20):

$$Q_{r3} = \Delta H_{r3} \times F_{CO} \quad \text{Ecuación 20}$$

- $Q_{r4}$ : Calor producido por la reacción 4, es decir, la reacción exotérmica de la combustión de hidrógeno, que se calcula con la misma metodología empleada para el cálculo de  $Q_{r3}$  (Ecuación 21):

$$Q_{r4} = \Delta H_{r4} \times F_{H_2} \quad \text{Ecuación 21}$$

- $Q_{r2}$ : Calor que necesita la reacción de activación (endotérmica) para que se dé. El cálculo se realiza de igual manera a los anteriores (Ecuación 22), siendo  $F_C$  el caudal molar de carbón activo que participa en la reacción de activación, en Kmol/h.

$$Q_{r2} = \Delta H_{r2} \times F_C \quad \text{Ecuación 22}$$

- $Q_{carb}$ : Calor que necesita la reacción de carbonización. Se calcula de igual manera que los anteriores, con la salvedad de que no se tiene el dato de la entalpía de reacción. Ante esto, se tomará un valor que será aumentando en un 50% de la entalpía necesaria para calentar el hueso:

$$Q_{carb} = m_{hueso} \times Cp_{hueso} \times (T_{sal} - T_{ref}) \times 1,5 \quad \text{Ecuación 23}$$

- $Q_{gases}$ : Calor con el que salen los gases del horno rotatorio (KJ/h). Se calcula de manera similar al calor aportado por el hueso de aceituna. Aquí se tomará un calor específico de valor de 1,115 [36] para los gases secos, incluyendo  $N_2$  y  $CO_2$ . Para el vapor de agua se tomará un valor de 2,203 KJ/(kg\* °C). Cada calor específico se multiplica por su caudal molar correspondiente (de gases secos mgs y de vapor mv) y el gradiente de temperatura correspondiente (Ecuación 24).

Siendo  $m_{gc}$  el caudal de gases provenientes del combustible y  $m_{gr}$  el caudal de gases procedentes de las reacciones producidas en el horno, multiplicando cada caudal por su respectivo  $Cp$ .

$$Q_{gases} = m_{cble} \times [(m_{gc} \times Cp_{gc}) \times (T_{sal} - T_{ref})] + m_{gr} \times Cp_{gr} \times (T_{sal} - T_{ref})$$

Ecuación 24

- $Q_{CA}$ : Calor con el que sale el carbón activo del horno rotatorio. Se calcula igual que el de hueso a la entrada, teniendo en cuenta que la temperatura de salida del carbón activo son 850 °C (Ecuación 25).

$$Q_{CA} = m_{CA} \times Cp_{hueso} \times (T_{sal} - T_{ref}) \quad \text{Ecuación 25}$$

- $Q_{pérdidas}$ : Calor perdido debido a la transmisión de calor. Este porcentaje suele estar en torno al 2 y 5% [47, 48,49], por lo que se asumirá un 3% de pérdidas por transmisión.

Una vez conocidas todas las ecuaciones involucradas en el balance de energía del horno rotativo, se procede a agrupar los términos de las ecuaciones para posteriormente resolver, teniendo especial precaución en que todas las unidades de las ecuaciones sean consistentes, siendo en este caso kJ/h las unidades de cada término de calor.

Los valores de cada parámetro se resumen a continuación:

$$PCI=50000\text{kJ/kg}$$

$C_{p\text{hueso, CA}}=0,84 \text{ KJ/ (kg *°C)}$ , tomando como valor el del carbón vegetal.

$$T_{\text{ref}}= T_{\text{ent}}=25 \text{ °C}$$

$$T_{\text{sal}}= 850 \text{ °C}$$

Nótese que el calor aportado por el hueso de aceituna, el agua en la entrada y el aire son despreciables, puesto que la temperatura de referencia es la misma que la temperatura de cada una de ellas. En el caso de que se realizase una integración energética no sería despreciable, puesto que la temperatura de entrada del agua o del aire sería diferente (mayor) a la de referencia.

Las entalpías necesarias están dadas en las reacciones correspondientes.

Una vez agrupadas las ecuaciones y desarrolladas, se comprueba que la única incógnita es el caudal de combustible la variable X, que resolviendo el sistema de balance de materia y energía simultáneamente en el programa matemático EES, se obtienen los resultados siguientes:

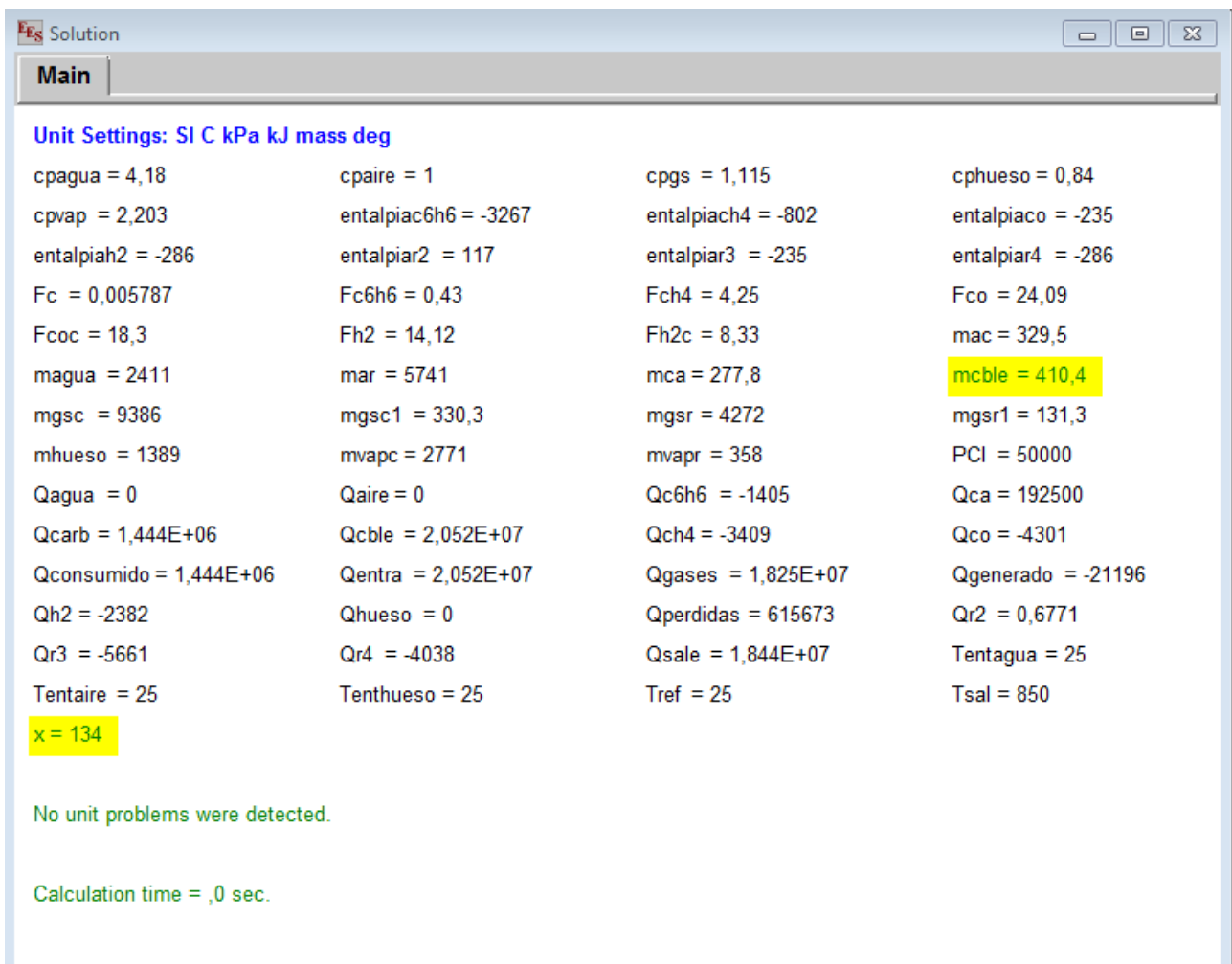


Figura 13: Resultados obtenidos en EES

Cabe destacar que los datos buscados principales son  $m_{\text{cble}}$  y  $x$ , que dan como resultado:

**Caudal de combustible: 410,4 kg/h.**

**Caudal de agua necesario (x): 134 kg/h.**

Los cálculos realizados al completo quedan recogidos en el **Anexo de cálculos**, donde se exponen todas las ecuaciones y anotaciones empleadas.

Todo esto, teniendo en cuenta la dificultad real de que las reacciones producidas se den idealmente con una conversión del 100% y con una selectividad total en las condiciones establecidas.

Obtenido ya el caudal de combustible y la cantidad de agua necesaria, se determina la composición del gas de salida previamente a la inyección de agua y a la obtenida finalmente con la adición de agua:

COMPONENTE	COMPOSICIÓN PREVIA(% V/V)	COMPOSICIÓN FINAL (%V/V)
CO <sub>2</sub>	7,2	6,32
H <sub>2</sub> O	27,24	40
N <sub>2</sub>	65,56	53,68

Tabla 9: Composición gases de salida del horno

Sin embargo, estos no serán los datos empleados a lo largo del trabajo, ya que se realizará **una integración energética** en la que se procederá a la realización de varias propuestas de ahorro que se tomarán en cuenta a la hora de realizar el estudio económico. Esta integración se realizará posterior a la obtención de los parámetros de los equipos de intercambio de calor.

A modo aclaración, una vez realizada la integración energética, con previo dimensionamiento y cálculo de los equipos, se incluye una figura en la que se recogen las corrientes que intervienen en el proceso, con sus respectivas temperaturas y caudales máxicos.

## 2.4. Descripción de equipos y dimensionado

Los equipos principales del proceso serán el horno rotatorio y la cámara de enfriamiento, que se describen en los siguientes apartados, además de los elementos transportadores y almacenadores.

### 2.4.1 Descripción de equipos

Aquí se describirán los equipos de manera detallada, sin entrar en el dimensionado de cada uno, que se analizará posteriormente.

### 2.4.1.1 Horno rotatorio

Este equipo es un cilindro de acero que rota sobre su eje longitudinal y opera como un intercambiador de calor. El cilindro está ligeramente inclinado ( $2-6^\circ$ ) para facilitar el desplazamiento de los sólidos, lo cual permite controlar el tiempo de residencia de las partículas que están en él [23].

Su interior está cubierto por material refractario para mejorar la transmisión de calor, así como un aislante térmico que cubre el exterior del cilindro. Su sistema de alimentación constará de una tolva que conducirá el material hacia una cámara hermética que evitará la entrada de oxígeno a su interior, así como también la salida del horno se encuentra hermética para dejar salir una cierta cantidad de carbón, impidiendo la entrada de aire.

Un elemento simple pero importante en este tipo de hornos son los elevadores, que son elementos que permiten que el carbón no quede apelmazado, provocando puntos calientes y una desigual gasificación, que llevaría a una calidad del producto muy pobre y poco homogénea.

El horno consta de varios quemadores y difusores a lo largo del horno (Figura 13) para mejorar el control de la temperatura y composición del gas. Los quemadores nombrados se encargan de aportar el calor necesario al horno mediante la combustión de gas natural. Los difusores tendrán la función de introducir el agua (agente activante) dentro del horno, donde el contacto inmediato del agua introducida a presión con el ambiente en el interior del horno hace que pase a fase vapor. Otra función del difusor es la introducción controlada de una pequeña cantidad de oxígeno en las zonas adecuadas para completar la combustión de los gases del proceso de activación

En la primera sección longitudinal del horno, el carbón eleva su temperatura hasta la temperatura de operación, donde liberará la mayor parte de los compuestos volátiles (carbonización) [21]. Una vez que el material pase una longitud determinada, se encontrará con el vapor proveniente de los difusores para su activación, los cuales deberán disponer sus boquillas en dirección a la salida del horno para no influir en el proceso previo de carbonización.

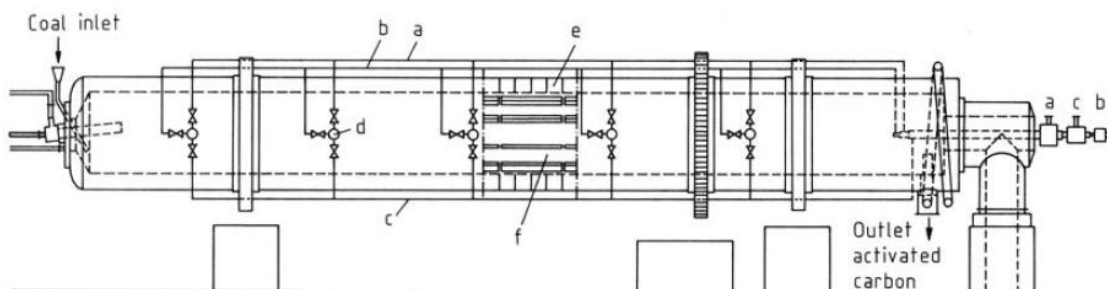


Figura 14: Horno rotatorio para el proceso de activación con vapor. a) vapor; b) gas ; c) aire; d) quemador; e) recubrimiento de ladrillo ; f) elevadores [18]

### 2.4.1.2 Cámara de enfriamiento

Se utilizará un enfriador multicámara (Figura 14), que consiste en un tambor rotativo dividido en cámaras longitudinales, envueltas por una camisa de agua. La rotación transporta el producto y asegura el contacto de ambos medios con las paredes de intercambio.

El agua de refrigeración entra y sale a través de un doble tubo central. La salida es por efecto de rebose, con lo que el aparato está sometido únicamente a la presión de la columna de agua propia del aparato.

Entre sus ventajas se encuentra la homogeneidad del enfriamiento, flexibilidad operativa, gran capacidad y la imposibilidad de pérdida de producto o contaminación. Además, es un equipo robusto y con un reducido coste energético [24]. Todo esto añadido a que tiene la capacidad de manejar temperaturas de hasta  $1000^\circ\text{C}$ , así como admisión de grandes saltos térmicos y fluctuaciones en caudal y propiedades de producto.

Para el presente caso, se realizará una sencilla integración energética que consistirá en que el caudal de salida del agua de refrigeración del equipo de enfriamiento, será el que entre como agua necesaria en el horno. Con esta



sencilla medida se consigue elevar la temperatura del agua de entrada al horno y ahorrar en combustible. Además, esta integración no necesitaría de la compra de otro equipo, por lo que parece una maniobra interesante.

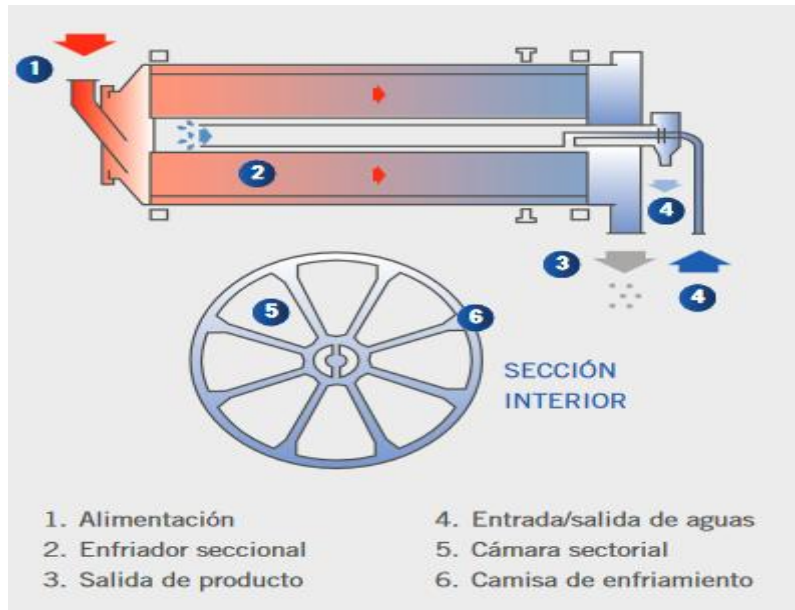


Figura 15: Enfriador multicámara [24]

#### 2.4.1.3 Elementos transportadores

Un conjunto de cintas se encargaran de transportar el producto a las diferentes localizaciones de la planta, como puede ser la descarga del camión al patio de almacenamiento, al horno rotativo, del propio horno hacia el enfriador multicámara o desde los silos hasta el proceso, así como el empleo de tornillos para elevar el material desde el procesos o los camiones de llegada del precursor hasta las tolvas de almacenamiento.



Ilustración 12: Cinta transportadora



Ilustración 13: Tornillo sin fin

#### 2.4.1.4 Silos de almacenamiento y patio

Son los elementos almacenadores de sólidos, fundamentales en cualquier proceso industrial, evitan la necesidad continua de entrada de materias primas o productos al proceso, lo que permiten un mayor margen de maniobra en la planta y reducir costes de transporte.

Referente a los silos, son habitualmente construidos de forma cilíndrica con diferentes materiales, como madera, hormigón o metal, dependiendo de las necesidades de almacenamiento de cada material.



Ilustración 14: Silos de almacenamiento

Respecto a los patios de almacenamiento, se utilizan igualmente para mantener el material para disponer de él en el momento que sea necesario. Normalmente están protegidos por una cubierta de chapa que protege de la lluvia o vientos que pudieran afectar al material. Su coste es relativamente bajo.



Ilustración 15: Patio de almacenamiento

#### 2.4.1.5 Tamizado

El tamiz es el equipo encargado de clasificar el material según su granulometría. Su importancia recae en la necesidad de proporcionar un producto con una granulometría acorde a las necesidades del proceso.

El tamizado es un método de separación de partículas que se basa únicamente en la diferencia del tamaño de partícula. En el tamizado industrial se vierten los sólidos sobre una superficie perforada o tamiz metálica, que solamente deja pasar las partículas que sean menores a esos “huecos” o luz de malla. El material que atraviesa se conoce normalmente como finos y el rechazo los que poseen un tamaño superior a una determinada luz de malla.

Existe una gran variedad de tamices industriales, a destacar los vibratorios, giratorios, parrillas estacionarias o centrífugos. La aplicabilidad de cada uno, como casi siempre, depende del proceso industrial en concreto.

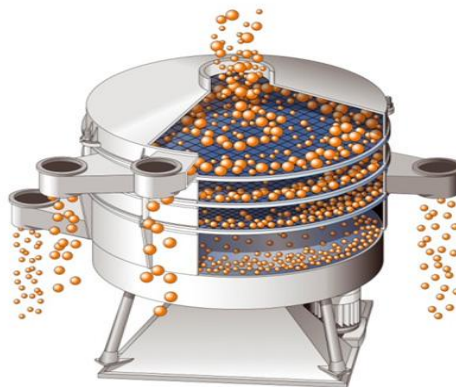


Ilustración 16: Tamiz industrial

#### 2.4.2 DIMENSIONADO GENERAL DE LOS EQUIPOS

A continuación, se desarrollan los cálculos para el dimensionado básico y general de los equipos principales de la planta.

### 2.4.2.1 Patio de almacenamiento

Para realizar el dimensionado básico del patio de almacenamiento se toma una garantía de 15 días de capacidad de almacenamiento de la materia prima. Así, para su capacidad se calculará de la siguiente forma:

$$\text{Capacidad del patio} = 15 \text{ días} \times 10000 \frac{t}{\text{año}} \times \frac{\text{año}}{300 \text{ días}} = 500 \text{ toneladas}$$

La densidad aparente del hueso de aceituna es  $573 \text{ Kg/m}^3$  [26] y su ángulo de reposo, asimilándolo al de los garbanzos es aproximadamente de 35 grados [27]. Estos datos se emplean en el cálculo de las parvas donde quedarán recogidos los huesos de aceituna.

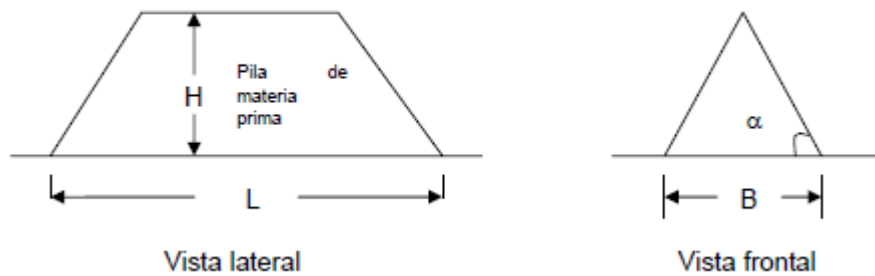


Ilustración 17: Parva de almacenamiento. B: base; H: altura;  $\alpha$ : ángulo de reposo

$$\text{Volumen de la parva} = \left( B \times \frac{H}{2} \right) \times L \quad \text{Ecuacion 26}$$

$$H = \left( \frac{B}{2} \right) \times \text{tg } \alpha \quad \text{Ecuacion 27}$$

Donde:

**B:** Longitud de la base de la parva de almacenamiento (m).

**H:** Altura de la parva (m).

**$\alpha$ :** Ángulo de reposo ( $^{\circ}$ )

Siendo el volumen de la parva de aproximadamente  $875 \text{ m}^3$ , obtenidos de la división de la capacidad total de almacenamiento entre su densidad aparente.

Asumiendo un valor de la base B de 15 metros, por ejemplo, los valores de L y H obtenidos son los siguientes:

$$\mathbf{H=5,25m \quad y \quad L=22,22m}$$

### 2.4.2.2 Horno rotatorio

Para el cálculo de las dimensiones del horno rotatorio, longitud y diámetro, se emplearán las Ecuaciones 28 y 29 [22] donde se utilizan el caudal de alimentación al horno y su tiempo de residencia.

$$\dot{m} = 148 \times n \times \phi \times V \times D^3 \times tg\varphi \quad \text{Ecuación 28}$$

$$t = \frac{L}{60\pi \times n \times D \times tg\varphi} \quad \text{Ecuación 29}$$

Donde:

**m:** Caudal de alimentación de hueso de aceituna al horno (t/d), supuesta operación de 24h:

$$\text{Caudal alimentación} = \frac{10000t \text{ hueso}}{\text{año}} \times \frac{\text{año}}{300 \text{ días}} = 33,33 \text{ t/d}$$

**n:** rpm, donde se tomará un valor usual de 0,75 rpm, siendo el intervalo común 0,25-5 [28].

**Φ:** fracción de sección transversal del material ocupada en el horno, típicamente entre 8-15%. Se tomará un valor de 0,12.

**V:** Volumen del horno (m<sup>3</sup>),  $(\pi D^2/4) \times L$

**φ:** Ángulo de inclinación del horno. Donde se tomará un valor de 2,5°, un valor dentro del rango establecido en bibliografía (2-6°) [23].

**t:** tiempo de residencia (h), que se toman 3h, 2 de ellas para la activación y una para la carbonización, aproximadamente.

Mediante una resolución simultánea de las ecuaciones se obtienen los siguientes resultados:

$$L=23,3\text{m} \quad \text{y} \quad D=1,26\text{m}$$

El resultado cumple la relación de longitud/diámetro establecida entre 10 y 35 [28], por lo que es aceptado como válido.

#### 2.4.2.3 Silos de almacenamiento y almacenamiento final

El silo de almacenamiento principal, que descarga el hueso de aceituna en una cinta transportadora para llevarlo hacia el horno, tendrá una capacidad de almacenamiento mínima de 3 días para prevenir posibles fallos operativos en las etapas anteriores (tornillo sin fin).

Por lo tanto, el almacenamiento de este silo será de al menos 100 toneladas.

El volumen total del silo se calcula mediante la densidad aparente, obteniéndose un volumen total de 174,5 m<sup>3</sup>, al cual se le aplica un porcentaje de llenado del 85% para así obtener un volumen de silo de aproximadamente 205m<sup>3</sup>.

Mediante el uso de las ecuaciones empleadas para calcular el volumen del cono y el cilindro (Ecuación 30) [29].

$$\text{Volumen del cono} = (\pi \times r^2 \times h)/3 \quad \text{Ecuación 30}$$

$$\text{Volumen del cilindro} = \pi \times r^2 \times h \quad \text{Ecuación 31}$$

$$\text{Volumen total del silo} = \text{Volumen del cilindro} + 2 \times \text{volumen del cono} \quad \text{Ecuación 32}$$

Siendo:

**r:** Radio del cilindro (m).

**h:** Altura del cilindro

Sustituyendo el volumen total del silo y suponiendo el radio o altura, se ha obtenido un valor coherente de las dimensiones del silo: **r=2m** y **h=9,79m**.

Para el silo o silos de almacenamiento final se empleará la misma metodología, salvo que la capacidad de estos deberá ser mayor a 3 días. En este caso se supondrá una capacidad de almacenamiento de 10 días, lo que llevará a necesitar un volumen total de almacenamiento de aproximadamente 684 m<sup>3</sup>, suponiendo igualmente un 85% de llenado.

Realizando los mismos cálculos anteriores, se puede obtener un único silo con unas dimensiones de **r=3,5m** y **h=10,66m**.

#### 2.4.2.4 Enfriador y precalentador

El enfriador será el que equipo encargado se retirará una gran cantidad de calor del carbón activo para que no afecte a la calidad del producto y pueda ser manipulado con total seguridad. Se supondrá una temperatura de salida del carbón activo del enfriador de 40 °C, tomando como temperatura de entrada unos 825°C debido a las pérdidas con el ambiente en el transporte a través del tornillo sin fin desde la salida del horno hasta la entrada al enfriador.

Se supondrá también un valor típico en la cercanía del intercambiador, siendo este de unos 20 °C, por lo que la temperatura del agua de entrada se asume 20°C (Figura 15).

Realizando un pequeño balance de energía (Ecuación 33) es posible determinar la cantidad de calor que debe retirarse en el equipo, así como obtener el caudal de agua de refrigeración necesario para retirar dicho calor.

$$Q = m_{CA} \times Cp_{hueso} \times (T_{ent} - T_{sal}) = m_{ar} \times Cp_{ar} \times (T_{sar} - T_{ear}) \quad \text{Ecuación 33}$$

Donde:

**Q**: Calor total transferido en el enfriador (kW).

**m<sub>CA</sub>** y **m<sub>ar</sub>**: Caudales de carbón activo y agua de refrigeración, respectivamente (kg/s).

**Cp<sub>CA</sub>** y **Cp<sub>ar</sub>**: Calor específico del carbón activo y del agua de refrigeración respectivamente (kJ/(kg\*°C)), siendo la de esta última de 4,18.

**T<sub>ent</sub>** y **T<sub>sal</sub>**: Temperaturas de entrada y salida del enfriador (°C).

**T<sub>sar</sub>** y **T<sub>ear</sub>**: Temperatura de salida y entrada del agua de refrigeración (°C).

Una vez realizado el balance de la Ecuación 33 se obtiene que el calor total intercambiado en el enfriador es: **Q= 50,9 kW**.

Con este dato y empleando la Ecuación 33 se tienen como incógnitas el caudal de agua de refrigeración o su temperatura de salida. Para la determinación de alguno de estos parámetros es necesario saber el que no es conocido.

Ante esta situación se ha optado por suponer la **temperatura de salida del agua de refrigeración de 95 °C**. Esto se ha impuesto así para que no se produzca cambio de fase en el enfriador, puesto que a unas temperaturas en torno a los 100 °C (depende de la presión) comienza a producirse la vaporización, situación en la que los enfriadores trabajan mal. Como en este equipo el agua de refrigeración no entra en contacto con ningún producto que la contamine o reduzca su pureza, se opta por introducir el agua de refrigeración necesaria de la salida del enfriador en el horno rotatorio como agua de activación en el proceso.

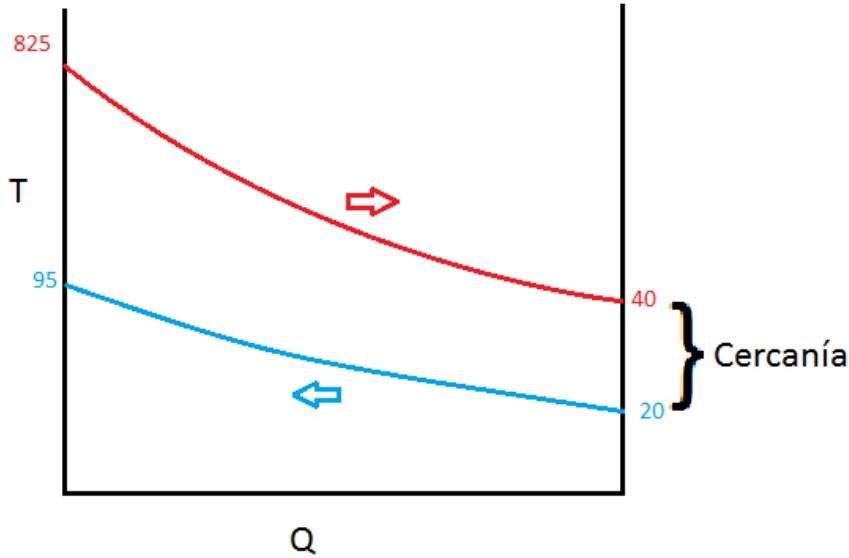


Figura 16: Diagrama Temperatura-Calor para el proceso [Elaboración propia]

Esta aplicación presenta dos ventajas en el proceso en términos de ahorro. La primera ventaja es el **ahorro de agua** en el proceso, puesto que el agua de activación necesaria será la proporcionada por la empleada en refrigeración. La segunda sería el **ahorro de combustible\***, debido a que el agua de entrada al horno se encuentra a una mayor temperatura, por lo que será una energía que no será necesaria por parte del combustible.

Finalmente, aplicando la Ecuación 33 con las unidades correctas, se determina que el caudal necesario para la refrigeración es  $m_{sar}$ , es de **584,5 kg/h**. Este caudal de refrigeración es mayor que el caudal de agua de refrigeración (necesario para la activación), por lo que parte de este caudal será el que entre en el horno para las necesidades de activación y mantener la composición de salida del 40%.

Para calcular la superficie de intercambio del enfriador, se utilizará la Ecuación 34:

$$Q = U \times A \times DTLM \tag{Ecuación 34}$$

Donde:

Q: Calor intercambiado en el enfriador (kW), siendo este valor 50,9 calculado anteriormente.

U: Coeficiente global de transferencia de calor (kW/(m<sup>2</sup>\*°C)). El valor se tomará de 0,005 , un orden de magnitud inferior a los valores referenciados en contacto vapor-aire [52].

A: Área de intercambio del enfriador (m<sup>2</sup>).

DTLM: Diferencia logarítmica media de temperatura: :

$$DTLM = \frac{(825-95)-(40-20)}{\ln\left(\frac{825-95}{40-20}\right)} \tag{Ecuación 35}$$

Resolviendo la ecuación 34, se tiene que el valor del área de intercambio del enfriador es: **A=51,6 m<sup>2</sup>**.

Para dar unas dimensiones del enfriador, es necesario acudir a un catálogo de fabricante para el equipo en cuestión. Debido a la imposibilidad de su acceso, se estimará mediante la interpolación de un enfriador de similares características [21].

Interpolando los valores se obtiene que el volumen del enfriador debe ser aproximadamente de 7,5m<sup>3</sup> con unas

dimensiones similares a las siguientes:

- Largo: Entre 7-8 metros.
- Diámetro interno: Entre 0,8-1 metros.
- Diámetro externo: Entre 1,2-1,3 metros.

En el caso del **precalentador**, se utilizará este equipo para aumentar la temperatura de entrada del aire al horno a costa de disminuir la de los gases de combustión de la salida del horno.

De manera análoga a la anterior, al introducir el aire de entrada a una mayor temperatura se reduce la cantidad de combustible que se empleaba para esta función. En los resultados posteriores podrá observarse que los resultados obtenidos no serán nada despreciables.

Como único punto negativo de ésta mejora, es que habría que aumentar el coste de la inmersión (para hacerse con el equipo), aunque por lo resultados obtenivos, se verá que su adquisición se torna de manera muy favorable.

Previo al cálculo, se tomará como suposición que la salida de los gases de combustión después de intercambiar calor sea de 350°C.

Calculando de nuevo la cantidad de combustible necesaria para el proceso introduciendo el precalentamiento del agua, se obtiene un caudal de **combustible de 366,5 kg/h**. Una cantidad de combustible que se reduce en un 10,7%, reduciendo las necesidades de **agua a 126,9 kg/h**. (Figura 17).

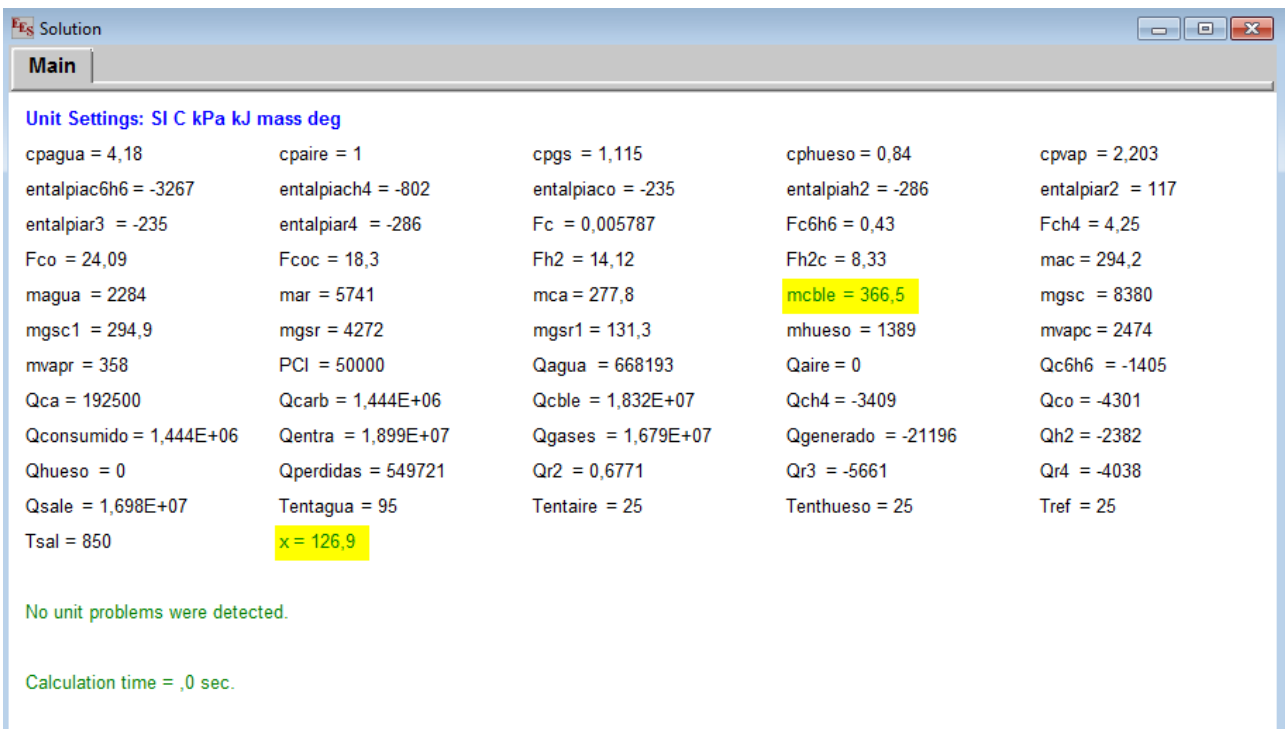


Figura 17: Resultados del balance con precalentamiento de agua

Si, además se añade el empleo del precalentador para aumentar la temperatura del aire a la entrada del proceso, se tiene que:



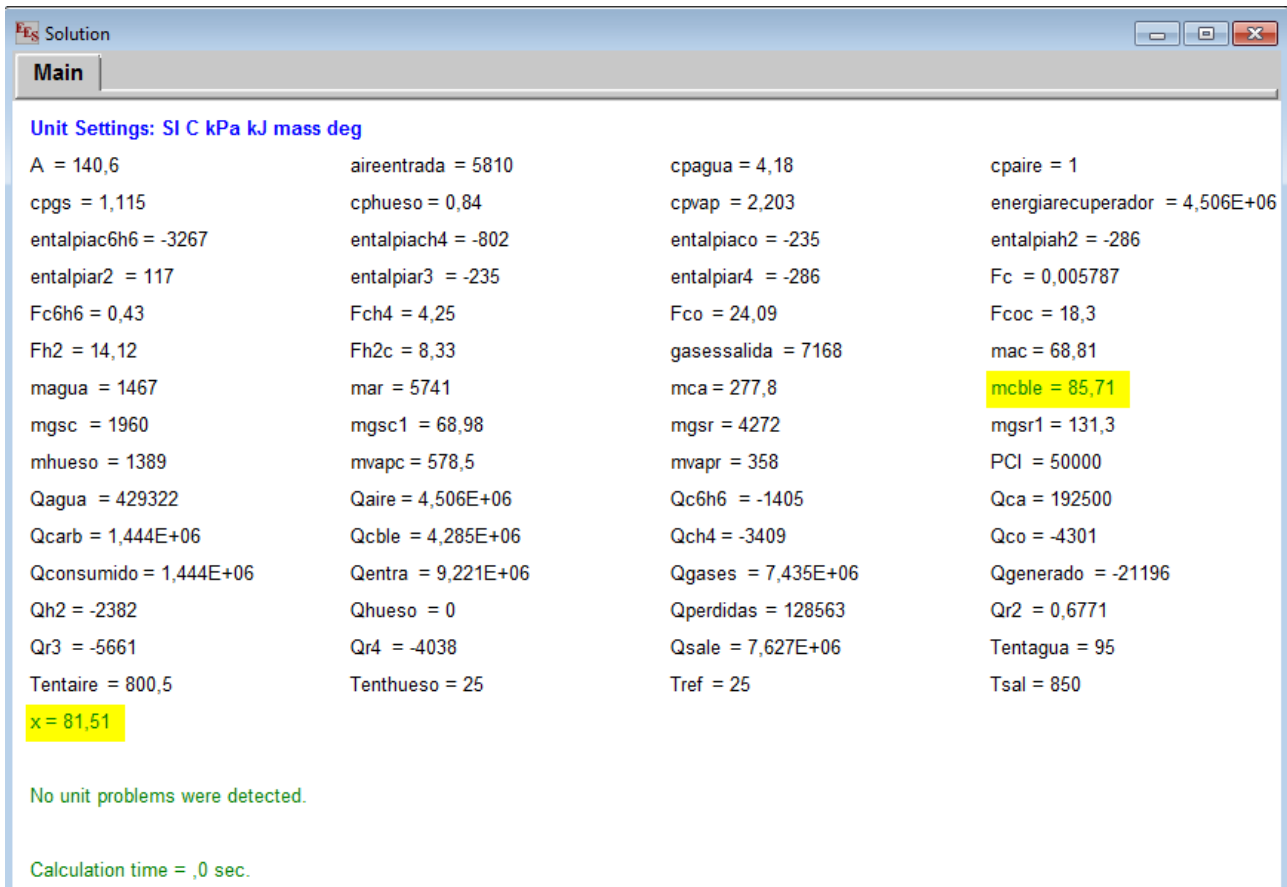


Figura 18: Resultados del balance con integración energética completa

El **combustible necesario** baja significativamente, siendo este de **85,71 kg/h**, con una necesidad de suministro de **agua** que también baja, llegando a **81,51 kg/h**. Esto es debido a que la temperatura de entrada del aire pasa a ser de **800°C**, aportando esta visible y sustancial disminución del caudal de combustible.

Con los cálculos obtenidos, esta integración tendría una repercusión importante en la viabilidad del proceso. Es esta última la razón por la cual se tendrá en consideración a lo largo del presente trabajo.

Por último se realiza el dimensionado del precalentador, de manera equivalente al enfriador, mediante la Ecuación 34, y sabiendo ya que los gases de entrada de aire son 800°C se llega a que el área de intercambio del precalentador es de **A=147m<sup>2</sup>**. Aplicando un coeficiente global de transferencia de 0,1 [52] asemejado al del intercambio aire-vapor.

Los cálculos al completo de las anteriores integraciones y área del precalentador se presentan en los anexos finales del trabajo.

Finalmente, como se comentó después del balance de energía, se muestra un diagrama general en el que se muestran las corrientes involucradas en el proceso. En ellas aparecen tanto el caudal másico (kg/h) en azul, y las temperaturas de cada corriente, en rojo.

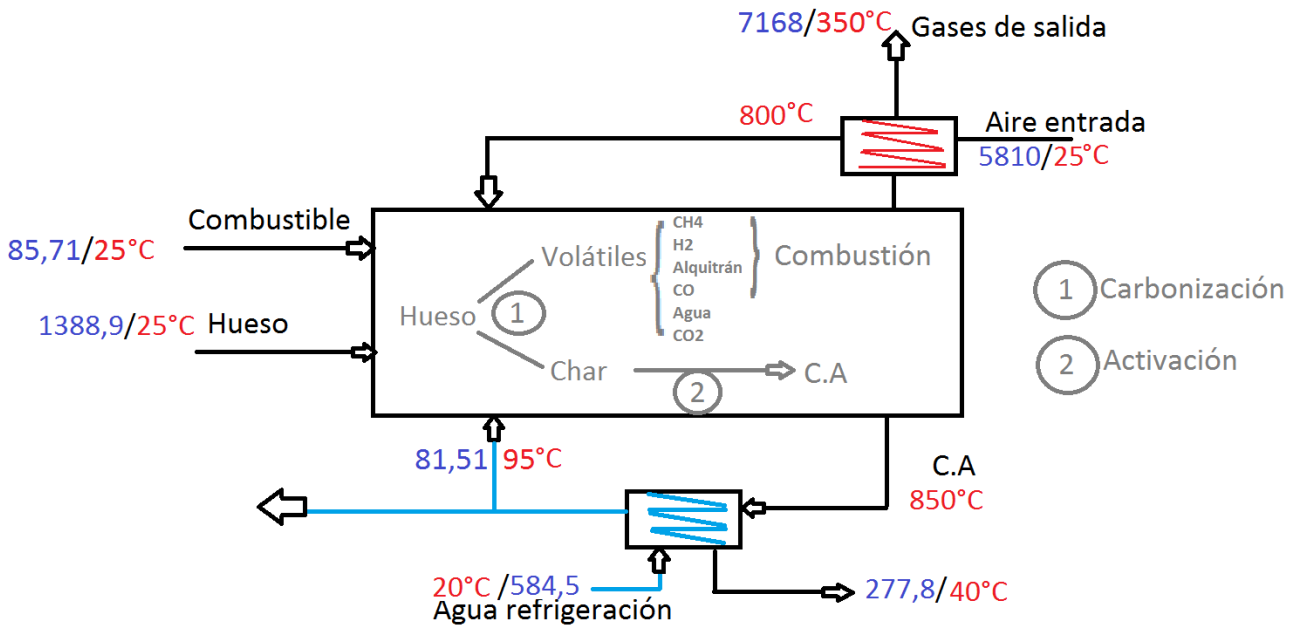


Figura 19: Diagrama general del proceso. En azul caudal másico, en rojo temperatura. [Elaboración propia]

## 2.5. Carbón activo obtenido

De principal importancia es determinar las características del carbón obtenido en el presente proyecto. De esta manera es posible clasificar el carbón activo granular obtenido en el mercado, para saber así a qué precio es posible colocar dicho producto en el mercado que, al fin y al cabo, es lo que determinará en mayor medida la rentabilidad y viabilidad de la planta.

Estos datos se obtienen de bibliografía, en la cual se han realizado multitud de pruebas a diferentes precursores y en diferentes condiciones para determinar las características finales de cada carbón activo.

En las condiciones elegidas se obtiene un carbón activado con una superficie de 680 m<sup>2</sup>, que será el parámetro principal, tal y como se recogió anteriormente [20]:

Temperatura de carbonización (°C)	Tiempo de carbonización (h)	Agente activante	Temperatura de activación (°C)	Tiempo de activación (h)	Área superficial (m <sup>2</sup> /g)
850	1	Vapor	850	2	680

Tabla 10: Condiciones del carbón activo a estudiar

Para obtener unas características más detalladas, se han encontrado datos bibliográficos [59] para unas condiciones similares a las realizadas en esta instalación, de las cuales se podrá deducir unas características finales para el carbón activo del presente trabajo.

En este trabajo [59] se evaluó la aplicación de biomasa de olivo para la elaboración de carbón activo, entre estos precursores, el hueso de aceituna.

La obtención de carbón activo se realizó en dos etapas, carbonización y activación, empleando los agentes

gasificantes de vapor de agua y dióxido de carbono. La temperatura de activación se varió desde los 280 hasta los 900 grados.

Factores	Niveles
Materia prima	Hueso de aceituna Madera de olivo
Tiempo	30 minutos 60 minutos 120 minutos
Temperatura	280 °C, 400 °C, 700 °C; 750 °C; 900 °C
Activante	Dióxido de carbono Vapor de agua Aire

Tabla 11: Variables estudiadas en el trabajo

A continuación, se dan los valores de contenidos en ceniza y rendimientos en base seca de los carbones activados:

Ensayos	Masa del precursor (g)	Masa de carbón activo (g)	Rendimiento en base seca (%)	Contenido en cenizas (%)
H-D-900-1	50	11,00 ± 0,15	20,85 ± 0,09	2,57 ± 0,18
H-D-700-2	50	35,00 ± 0,76	26,34 ± 0,34	2,02 ± 0,11
H-A-280-1/2	25	4,80 ± 0,12	17,32 ± 0,12	3,84 ± 0,22

Tabla 12: Valores de contenidos en ceniza y rendimientos en base seca de los carbones activados

Siendo en los ensayos H, referido al hueso de aceituna, D o A referido al agente activante dióxido de carbono o agua, respectivamente. El valor numérico hace referencia a la temperatura de activación. El último número indica el tiempo de activación (h) al que ha sido sometido.

Se analizan además otras características del carbón activo para caracterizarlo de una manera más exacta. Son valores de gran importancia para la comercialización del carbón activo, como por ejemplo el rango de partícula, índice de yodo, superficie específica y tamaño promedio de poro.

Ensayos	Rango de tamaño de partícula (mm)	Índice de yodo (mg yodo/g de c.a.)	Superficie específica	Tamaño promedio de poro (nm)
H-D-900-1	3,1-3,6	707	750	15,4112
H-D-700-2	2,2-2,38	540	360	16,9324
H-A-280-1/2	1,41-2,38	502	358,1	16,7297

Tabla 13: Caracterización de pruebas a carbón activo

Como no se tienen datos exactos para las condiciones exactas a las que se somete la materia prima utilizada, se utilizará un promedio de estas características ya que, resulta complicado conseguir unos datos que concuerden con exactitud.

A favor juega que, no se aprecian diferencias significantes en las características finales del carbón activo por la activación con dióxido de carbono y vapor de agua [4], por lo que se utilizarán los datos de la activación con dióxido de carbono en el **ensayo 1 y 2**, ya que el carbón activo buscado posee unas **características intermedias** en cuanto a tiempos y temperatura de activación.

Por lo tanto, se puede concluir que el carbón obtenido de la instalación del presente estudio, dada unas condiciones establecidas, presenta unas **características aproximadas** a las siguientes:

Condiciones	Rendimiento en base seca (%)	Contenido en cenizas (%)	Rango de tamaño de partícula (mm)	Índice de yodo (mg yodo/g de c.a.)	Superficie específica (m <sup>2</sup> /g)	Tamaño promedio de poro (nm)
H-D-850-2	23	2,3	3	650	680	16,1

Tabla 14: Caracterización carbón activo

Nótese que el valor de la superficie específica es el dado para las condiciones del carbón activo de manera directa, sin interpolación alguna. Además, incluso se adecua más para el índice de yodo dado, ya que normalmente suelen ser similar.

Cabe destacar previamente que, en cuanto a los valores de ceniza, el carbón activo se encuentra dentro de los valores exigidos para los carbones comerciales (menores a 12%).

El índice de yodo también se adecua a las normas para ser comercializados al superar el valor de 500 mg de yodo por gramo de carbón activo.

En base a estas características, añadidas a un precursor procedente de biomasa, lo cual se podría adaptar con mayor facilidad a aplicaciones alimentarias o en las que se dan una aplicación directa con el consumo humano, se podría estimar que **el precio de venta del producto esté en torno a 1200-1500€/t**, teniendo en cuenta las consideraciones y su precio en el mercado estudiadas con anterioridad.

# 3 ESTUDIO ECONÓMICO

En este apartado se procederá al análisis económico detallado del proceso de producción de carbón activo que se proyecta. Dicho análisis consistirá principalmente en un estudio de la inversión, rentabilidad y viabilidad del proceso, con unos parámetros económicos como son el plazo de recuperación (**PayBack**), el Valor Actual Neto (**VAN**) y la tasa interna de retorno (**TIR**). Estos dos últimos parámetros son métodos dinámicos para valorar una inversión, es decir, que tienen en cuenta el valor cronológico del dinero [37].

Para realizar estos cálculos se determinarán previamente parámetros como los ingresos, costes y flujos de caja asociados a la inversión, así como la evolución de alguno de ellos.

Finalmente se concluirá el estudio económico evaluando la rentabilidad de la instalación, necesitando previamente la obtención de los tres parámetros principales nombrados al comienzo.

Para el comienzo del estudio económico, serán necesarios unos **datos de partida** dados a continuación:

- La vida útil de la planta es de 15 años.\*
- El impuesto de sociedades es del 30%.
- Se tomará una tasa de descuento del 10%.
- Capital circulante de 50.000€.

Para determinar la vida útil, es común aproximarla a la vida útil de los equipos principales. En este caso, los equipos estáticos relacionados con procesos de intercambio de calor o combustión (hornos, intercambiadores, etc) bien diseñados y con un mantenimiento adecuado suelen alcanzar los 15 años de vida útil. Siendo este el caso de los equipos principales de la planta, como son el horno rotatorio y el enfriador [62].

## 3.1. Definiciones

En este apartado se expondrán de manera teórica la metodología de cálculo y explicación teórica de la caracterización de una inversión, VAN, TIR y PB.

### 3.1.1 Caracterización de la inversión

Para el cálculo de los tres parámetros principales que se van a determinar, es necesario realizar un paso previo para posteriormente aplicar las ecuaciones necesarias para calcular dichos parámetros. Este paso consiste en realizar una **caracterización de la inversión**, que viene dada por la siguiente metodología [37]:

1. En primer lugar, se determina la **inmovilización del recurso**, que comprende tanto la adquisición de activos fijos, aportaciones de circulante y unos gastos derivados de la inversión que se tomarán como un valor nulo en el presente proyecto. De una manera sencilla, se podría decir que es el capital que hay que aportar al proyecto en su inicio.
2. Cálculo de **flujos de caja** operacionales. Es un parámetro muy importante, que tiene en cuenta las entradas (ventas, ahorros, subvenciones, etc.) y las salidas (costes fijos y variables, impuestos sobre el beneficio, etc.) monetarias en el proyecto.
3. **Recuperación** de las inversiones. Son los valores que incluyen las posibles plusvalías o minusvalías en el caso de ventas del activo fijo, recuperación del capital circulante y valores residuales. En este caso, se tendrá en cuenta únicamente la recuperación del valor residual de los terrenos y el capital circulante.

Una vez caracterizada la inversión, se procede cálculo del VAN, TIR y PB, que a continuación se detallan con mayor profundidad.

### 3.1.2 Valor Actual Neto (VAN)

Es uno de los criterios más sencillos para analizar la rentabilidad de una inversión teniendo en cuenta el valor cronológico del dinero. Consiste en actualizar a valor presente los flujos de caja futuros que se van a generara como consecuencia del proyecto, descontados a un cierto tipo de interés (tasa de descuento), que se comparan con el importe que se realiza en el momento inicial de la inversión [37].

De manera simplificada, se podría decir que es la diferencia entre el desembolso inicial del proyecto y los flujos de caja actualizados al momento de hacer la inversión.

Si el sumatorio de los flujos de caja actualizados resulta mayor que el valor del desembolso inicial, entonces el proyecto se presenta como “rentable” en términos netos monetarios, es decir, se gana dinero por realizar la inversión (**VAN positivo**). Si **VAN es negativo** significa que el desembolso inicial es mayor que el obtenido en el sumatorio de los flujos de caja del proyecto, por lo que se pierde dinero. Si el **VAN es nulo**, la inversión no trae consecuencias monetarias, es indiferente.

De la realización o no del proyecto se emplean mas parámetros además del VAN, uno de ellos es implícito en el carácter del inversor, ya sea por aversión o propensión al riesgo.

La fórmula para determinar el VAN es la siguiente:

$$VAN = -A + \sum_{i=1}^n \frac{CF_i}{(1+k)^i} \quad \text{Ecuación 35}$$

Donde:

- **A**: Desembolso inicial (€).
- **i**: Año de análisis.
- **n**: Vida útil de la planta (años).
- **k**: Tipo de interés (tasa de descuento)(tanto por uno).
- $1/(1+k)^i$ : Factor de descuento para ese tipo de interés y ese número de años.
- **CF<sub>i</sub>**: Flujo de caja para el año i (€).

El empleo de este criterio tiene la gran ventaja de la facilidad de cálculo si se compara con la tasa interna de rentabilidad (TIR) y tiene en cuenta el valor del dinero en el tiempo.

Por otra parte, tiene el inconveniente de estimar el valor de la tasa de descuento, el cual es un valor difícil de obtener.

### 3.1.3 Tasa Interna de Rentabilidad (TIR)

La tasa de interés varía anualmente y depende del país o persona afectada, por lo que es conveniente contar con un criterio que sea independiente del interés, siendo este criterio la TIR.

Se define como la tasa de interés que hace que el VAN sea nulo para la vida útil del proyecto. Su importancia radica en que permite la comparación de la inversión estudiada con otras completamente diferentes.

Como el VAN depende de k, existirán valores de k para los que el VAN sea positivo y otros para que sea

negativo, por lo que el valor de  $k$  en el que el VAN es cero es el límite entre estos dos casos.

Se calcula con la misma fórmula del VAN, igualándolo a cero y sustituyendo la tasa de descuento  $k$ , por la variable TIR (tanto por uno):

$$0 = -A + \sum_{i=1}^n \frac{CF_i}{(1 + TIR)^n} \quad \text{Ecuación 36}$$

La conveniencia del proyecto viene dado por el valor de TIR. Si TIR es mayor que la tasa de descuento el proyecto es aceptable y viceversa.

De manera simplificada, se puede decir que el VAN dice la cantidad monetaria que vas a ganar o perder en esos  $n$  años y la TIR dice el porcentaje que es posible obtener de la inversión.

### 3.1.4 PAYBACK (PB) o plazo de recuperación

Este valor es un **parámetro de liquidez**, concretamente, mide la rapidez con la que se recupera la inversión. Es el periodo que tarda en recuperarse la inversión inicial a través de los flujos de caja generados en el proyecto.

La inversión inicial se recupera en el año que los flujos de caja acumulados superan el valor del desembolso inicial.

No se considera un método adecuado si se toma como criterio único, pero puede utilizarse de manera complementaria con el VAN y TIR.

Como inconveniente, considera que el valor de un euro futuro es el mismo que el de un euro (o unidad monetaria) presente, es decir, no tiene en consideración el valor cronológico del dinero.

Se calcula de manera muy sencilla y atiende a la siguiente fórmula:

$$PB = \frac{A}{CF_i} \quad \text{Ecuación 37}$$

Donde:

- **PB:** Payback (años).
- **A:** Desembolso inicial (€).
- **CF<sub>i</sub>:** Flujo de caja (€) de cada año.

Esta fórmula es aplicable cuando los flujos de caja son constantes. Si el valor de cada flujo de caja es diferente cada año habría que sumar el flujo de caja de cada año hasta se llegue al valor inmediatamente inferior que haga que la suma de los flujos de caja sea mayor que el desembolso inicial. El número de flujos de caja sumados será el número de años que tardará la inversión en recuperarse. Además, haría falta obtener con más exactitud este periodo, que se terminaría añadiendo al número anterior, el valor del flujo de caja que hace superar el desembolso inicial dividido por el valor monetario que hace falta para llegar al desembolso inicial.

## 3.2. Flujos de caja

Son el parámetro principal en el análisis de la inversión. Se entiende por flujo de caja a los flujos de entradas y salidas efectivo en un periodo dado.

Para su determinación, es necesario saber los ingresos y costes derivados de la inversión. Estos se calcularán de manera aproximada como una etapa de prediseño.

### 3.2.1 Ingresos

Los ingresos obtenidos de la explotación del proyecto será la venta del carbón activo granular.

En este caso, la producción de GAC es de 2000 toneladas anuales, con un precio de mercado muy variable en torno a 1000-2500€ [4, 38, 39, 40] cada tonelada, por lo que se tomará un **precio** razonablemente competitivo de **1300€ la tonelada**, teniendo en cuenta las características del producto obtenido en la instalación.

Los ingresos anuales serían por tanto:

$$2000 \frac{\text{toneladas}}{\text{año}} \times 1300 \frac{\text{€}}{\text{tonelada}} = 2,6 \frac{\text{M€}}{\text{año}}$$

### 3.2.2 Costes

Las estimaciones de los **costes** para este estudio preliminar no requieren de una información excesivamente detallada, aunque son sumamente importantes para decidir si un proyecto determinado se lleva a cabo o no.

Existen costes fijos y costes variables. Estos últimos dependen del nivel de actividad por lo que los gastos de producción (personal, materias primas, electricidad...) serán constantes por ser la actividad productiva de la planta constante.

Para simplificar la nomenclatura se hablará de gastos de manera general para abarcar tanto los gastos o costes fijos y variables, ya que posteriormente se sumarán independientemente de la nomenclatura que tengan.

El **desembolso inicial** vendrá dado por la suma del valor de adquisición de los equipos principales de la planta y las obras civiles (Tabla 15):

Desembolso inicial	Precio (€)
Horno rotativo	350.000
Enfriador	25.000
Pre calentador	40.000
Cintas transportadoras	3.000 x 6
Tornillo sin fin	15.000 x 2
Silos de almacenamiento (hueso y GAC)	9.000 + 10.000
Tamiz vibratorio	15.000
<b>Total equipos</b>	<b>497.000</b>
Obras civiles	70.000



Instalación de equipos y servicios (+20% equipos)	91.400
Edificio	100.000
Terreno	300.000
10% equipos no considerados e incertidumbre	106.640
<b>TOTAL</b>	<b>1.173.040</b>

Tabla 15: Desglose del desembolso inicial [Elaboración propia]

Para completar la **inmovilización del recurso**, se suma el capital circulante al desembolso inicial, obteniendo un valor **A** de **1.223.040€**.

Continuando con los costes, únicamente queda por conocer los gastos anuales del proyecto, es decir, los **costes de producción**, que vienen dados en la Tabla 16:

Elementos del coste	Coste anual (€)
Hueso de aceituna	1,1 M€
Combustible (gas natural)	420.064
Electricidad	56.052
Agua refrigeración	1.907
Personal	400.000
Mantenimiento	10.000
Transporte	-
+5% incertidumbre	99.401
<b>TOTAL</b>	<b>2.087.424</b>

Tabla 16: Desglose de costes de producción [Elaboración propia]

Estos costes de producción se justifican a continuación:

- **Hueso de aceituna:** se obtiene de multiplicar el precio del hueso de aceituna necesario en la planta por su precio [14]:

$$10000 \frac{\text{toneladas}}{\text{año}} \times 110 \frac{\text{€}}{\text{tonelada}} = 1.100.000 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

- **Combustible:** se obtiene de multiplicar la cantidad de combustible necesaria en el proceso por su precio [42], en las unidades correspondientes:

$$85,71 \frac{kg}{h} \times \frac{m^3}{0,808kg} \times 0,55 \frac{€}{m^3} \times 7200 \frac{h}{año} = 420.064 \frac{€}{año}$$

- **Electricidad:** El coste de la electricidad se obtiene del sumatorio de las potencias de los diferentes equipos multiplicado por el precio de la energía [42], quedando recogido en la Tabla 16:

Equipo	Consumo (kW)
Horno	28
Enfriador	1,5
Cintas transportadoras	6,6
Tornillo sin fin	4,2
Tamiz vibratorio	5,5
Suma	45,8
Energía (kWh/año)	329.760
Equipos secundarios e incertidumbre (+10%)	362.736

Tabla 17: Costes de electricidad

Donde el consumo de cada equipo se ha obtenido por bibliografía [21, 38,19], siendo el precio de la energía **0,154525 kWh** [42] y las horas de operación anuales 7200.

Así, el precio que habría que pagar por la electricidad es de **56.052€** anuales.

- **Agua de refrigeración:** El coste de agua de refrigeración se obtiene al multiplicar el caudal de agua demandado por el precio de esta [43], suponiendo caudal de agua con integración energética y una densidad de 1000kg/m<sup>3</sup>.

$$1467,18 \frac{m^3}{año} \times 1,3 \frac{€}{m^3} = 1.907 \frac{€}{año}$$

- **Personal:** Se detallan a continuación la asignación de personal mínima necesaria en la Tabla 17 [21]:

Cantidad	Mano de obra directa	Coste unitario anual (€/año)
1	Jefe de planta	35.000
3	Jefes de turno	25.000
2	Técnicos químicos	20.000
6	Operadores	18.000
<b>Mano de obra indirecta</b>		
1	Vigilante	15.000
2	Almacenero	16.000
1	Limpieza	15.000
2	Técnico mantenimiento	20.000
2	Administración	16.000
1	Secretaría	15.000
22	<b>TOTAL</b>	<b>404.000</b>

Tabla 18: Desglose costes de personal [Elaboración propia]

- **Mantenimiento:** Simplemente se ha tomado un valor representativo para tener una información de costes lo más comedido posible, ya que posibles costes para comprar equipos que se averíen o similares son de difícil predicción.
- Se ha supuesto un transporte nulo debido al emplazamiento elegido, ya que también es fácil entablar acuerdos comprador-vendedor para este tipo de casos en las que las dos partes salen beneficiadas.

Resumiendo, se obtiene que el coste anual del proyecto es de **2.087.424€**. Un valor que será constante para cada año de la vida útil de la instalación, debido a que, como se dijo anteriormente, la producción anual de carbón activo también es constante.

### 3.2.3 Cálculo de Flujos de caja

Una vez determinados los ingresos y costes, se puede proceder al cálculo de los flujos de caja del proyecto.

Una forma sencilla de representar el cálculo de los flujos de caja de una inversión para cada año de la vida útil del proyecto viene dado por la siguiente metodología:

- + Ingresos (Ventas)
- Costes (Fijos y variables)
- = **Beneficio antes de impuestos (BAI)**
- Impuestos (30%)
- = **Beneficio Neto (BN) o flujo de caja (CF)**

Dicho proceso queda recogido en su totalidad en la Tabla 19:

Año	1	2	n-1	n
Ingresos	2.600.000	2.600.000	2.600.000	2.600.000
Costes	2.087.424	2.087.424	2.087.424	2.087.424
BAI	512.576	512.576	512.576	512.576
Impuestos (30%)	153.773	153.773	153.773	153.773
<b>CF</b>	<b>358.803</b>	<b>358.803</b>	<b>358.803</b>	<b>708.803</b>

Tabla 19: Flujos de caja

Los flujos de caja constantes, únicamente sería necesario el cálculo de un año cualquiera de la vida útil de la instalación, que será el mismo valor en los “n” años de la vida útil de la instalación a excepción del último año, donde se suma el valor de las recuperaciones, en este caso, la recuperación de los 50.000€ de capital circulante más el valor residual de los terrenos, supuesta venta al mismo precio de compra.

### 3.3. Resultados de VAN, TIR y PB

En este apartado se procederá al cálculo numérico de los valores del VAN, TIR y PB mediante el empleo de las ecuaciones mostradas anteriormente.

#### 3.3.1 VAN

Para la Ecuación 34 ya se tienen todos los datos, siendo  $A=1.223.040$ ,  $CF_{1-14}=358.803$  y  $CF_{15}=708.803$  La vida útil del proyecto es de **15 años** y la **tasa de descuento 0,1**.

Realizando el cálculo a mano o cualquier programa matemático, como por ejemplo Excel, se obtiene que:

- **VAN=1.589.831,36€**

#### 3.3.2 TIR

Al igual que para el caso anterior, los valores de la Ecuación 35, son los mismos para A, CF y la vida útil.

En este caso no hay tasa de descuento y aparece la variable TIR, pero al igualar VAN a cero es posible la obtención de este último valor, dando como resultado:

- **TIR= 29%**

### 3.3.3 PB

Los sencillos cálculos realizados para calcular este valor indican que el plazo de recuperación de la inversión es de:

- **PB=3,4 años**

Es decir, aproximadamente **3 años y 5 meses** es el periodo en que comienza a haber beneficios respecto a la inversión inicial realizada.

Teniendo en cuenta estos tres parámetros, se puede concluir con el que proceso es económicamente **rentable**, dado que cumple que **VAN > 0**, **TIR > k** y **PB** se recupera relativamente pronto, ya que ni siquiera llega a la cuarta parte del periodo de vida de la planta cuando ya se empiezan a obtener beneficios.

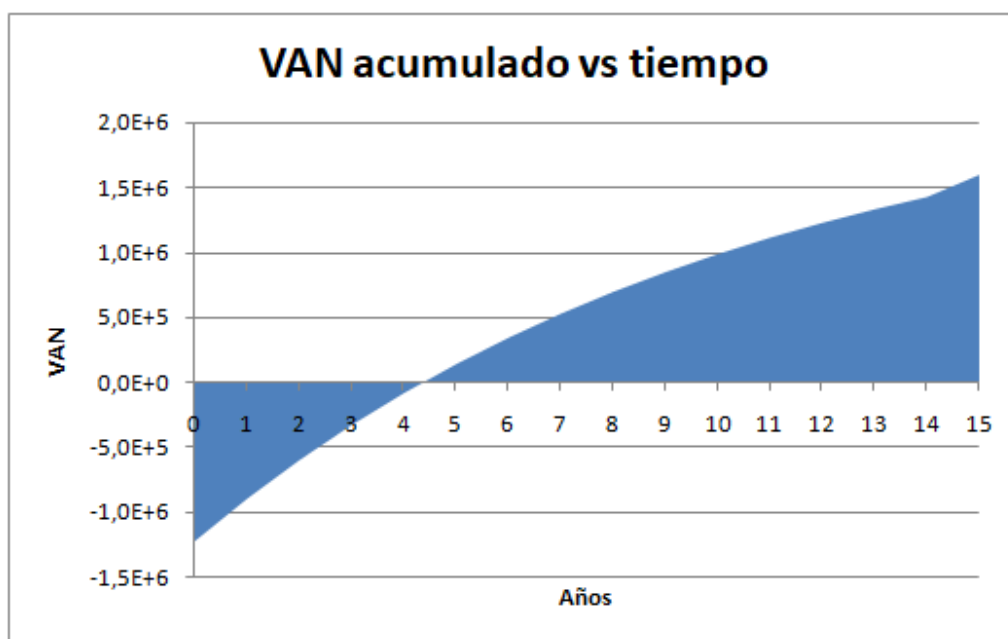
## 4 CONCLUSIONES

Finalmente, se puede concluir con que el proyecto es muy interesante desde el punto de vista económico, ya que las ganancias generadas superan el millón y medio de euros mediante el cálculo del VAN.

Además, otro indicador de que el proyecto es rentable es la TIR, que indica que un proyecto es rentable si el valor de TIR es mayor que la tasa de descuento, que es el caso que se presenta en este proyecto (59% frente al 10%).

Como dato adicional, el capital invertido se recupera con anterioridad a los cuatro años, por lo que, aunque dependientemente de la visión del inversor, supone una inversión bastante atractiva.

De manera visual, se puede observar la evolución de los flujos de caja en el tiempo en la Gráfica 3, pudiendo observarse el momento en el que se recupera la inversión realizada (PayBack):



Gráfica 3: Evolución de los flujos de caja frente al tiempo

Cabe destacar los siguientes aspectos del proyecto:

- El carbón activo se presenta como un producto atractivo, del que año a año crece la demanda mundial. Su precio puede llegar a alcanzar cotas de hasta 3000€ la tonelada, con una fuerte dependencia de sus características y propiedades finales.
- El método de producción (tipo de activación, equipos, etc) juega un papel fundamental en las propiedades del producto.
- La integración energética del proceso es de suma importancia, siendo en este caso la que marca la diferencia entre tener una instalación rentable a otra que se aleja de la rentabilidad.
- El hueso de aceituna como precursor se ofrece como una alternativa interesante, siempre y cuando el precio de la materia prima se mantenga entre unos límites de precio determinados. Debido a su demanda, su precio ha aumentado los últimos años.
- En el proceso de activación física, destacar la importancia de la combustión de los volátiles producidos en la carbonización.

## 5 ANEXOS

Se recogen en el anexo información adicional utilizada o no, que puede resultar útil para el lector. Se incluye tanto información referente a normativa como al cálculo realizado para obtener el caudal de combustible en el balance de materia y energía.

### 5.1. NORMATIVA

#### 5.1.1 Pruebas físicas para determinación de parámetros principales

Desde el punto de vista del productor y el usuario, muchas propiedades del carbón activado necesitan ser conocidas. Las pruebas físicas más relevantes se resumen en las siguientes:

**Densidad aparente:** se define como la masa de un volumen unitario de la muestra en el aire, incluyendo tanto el conjunto de poros como los huecos existentes entre las partículas. Es muy útil para la estimación del volumen de empaquetamiento o para determinar el grado de carbono necesario para un sistema existente. Los carbonos granulares utilizados en la adsorción de gases tienen una densidad aparente de alrededor de 0.40-0.50 g/cm<sup>3</sup>.

La ASTM D2854-70 es la base para esta prueba.

**Densidad real:** también se llama densidad absoluta se define como la masa de un volumen unitario de la estructura de carbono sólido. En este método se supone que el helio ingresa a los poros más pequeños presentes, sin ser adsorbido. Sin embargo, está bien documentado que el helio puede ser adsorbido en carbonos microporosos y, en consecuencia, esta posibilidad debe ser revisada y tomada en consideración para dar un resultado realista.

**Tamaño de partícula:** es una propiedad importante porque influye en las características de flujo, filtrabilidad, cinética de adsorción, etc. La velocidad de adsorción del carbón activado depende inversamente del tamaño de partícula: las partículas pequeñas tienen la tasa de adsorción más rápida.

Los criterios de diseño específicos como la selección del tipo, tamaño y profundidad del lecho de GAC deben ser determinados por el ingeniero de diseño y son específicos para cada aplicación.

Los rangos de tamaños comúnmente fabricados para carbón activado granular se expresan en tamiz estándar de EE. UU. Que incluyen, pero no están limitados a 8x16, 8x20, 8x30, 10x30, 12x40, 14x40, 20x40 y 20x50.

**Resistencia mecánica:** es un factor importante para la mayoría de las aplicaciones técnicas del carbón activado granular y se determina para simular la resistencia a la abrasión o al desgaste bajo condiciones prácticas. El carbón activado necesita una alta resistencia mecánica y resistencia al desgaste donde la caída de presión y las pérdidas de carbono pueden ser significativas. La determinación de la dureza por abrasión de la bola se lleva a cabo siguiendo la prueba AWWA B604-74 (prueba de abrasión Ro-Tap) y la determinación de la dureza de desgaste según la prueba AWWAB694-74 (prueba de abrasión por agitación) [4].

Otras pruebas químicas y fisicoquímicas relevantes incluyen:

**Contenido de humedad:** se determina de forma convencional pesando antes y después de calentar a 100 ° C (ASTM D 2867099).

**Contenido de cenizas:** esta prueba proporciona el contenido total de cenizas, aunque en algunos casos, un contenido más detallado el análisis de la ceniza es necesario. El contenido de cenizas aumenta en proporción directa al grado de activación y se puede utilizar para determinar la materia prima utilizada para producir un carbón. La cantidad de ceniza y su composición puede influir en la adsorción y algunas propiedades del carbón.

En el caso de tratamiento de agua, la desventaja que presentan las cenizas consiste en que mientras mayor es su porcentaje, menor es la cantidad de carbón efectivo.

Algunas cenizas se disuelven fácilmente en agua. En ciertas aplicaciones, el producto tratado con el carbón puede verse afectado con la cantidad y tipo de cenizas, como puede ser el caso de la decoloración de glucosa y de la

descafeinación de café. En el caso de tratamiento de agua, esta propiedad puede cobrar importancia cuando afecta al pH.

Cuando el pH de las cenizas es diferente, solamente se modificará el pH de los primeros litros pasados por el filtro; sin embargo en algunas aplicaciones esta variación no se puede permitir. Para estos casos, algunos fabricantes ofrecen carbones activos con valores de pH similares al del líquido que va a tratarse. La determinación sigue la prueba ASTM 2866-70.

**Temperatura de ignición (punto de inflamación):** puede ser crítico en la recuperación de solventes u otras aplicaciones en el que el aire caliente está involucrado; debe ser lo suficientemente alto como para evitar la oxidación excesiva de carbono en la adsorción en fase gaseosa, donde se involucra una alta evolución de calor. Es fuertemente dependiente en el procedimiento de activación utilizado y, por lo tanto, generalmente se encuentran altas temperaturas de ignición en carbones activados a vapor. La prueba más comúnmente utilizada es ANSI / ASTM D3466.

**Prueba de autoignición:** dado que la autoignición (especialmente en el carbón activado en polvo) es un potencial peligro en el transporte a temperaturas ambiente elevadas, esta prueba se utiliza para determinar si una muestra de carbono se enciende a 140 ° C en condiciones específicas.

**Valor pH:** toma en consideración que los carbones activados llevan grupos inorgánicos y superficiales que puede alterar el pH de los líquidos a los que se agregan.

De todas las pruebas de adsorción necesarias para caracterizar las propiedades de adsorción del carbón activado, las más utilizadas por el productor y el usuario son las siguientes:

**Actividad de tetracloruro de carbono:** está destinado a determinar el nivel de activación del carbón activado. La actividad se define como la relación (en porcentaje) del peso de tetracloruro de carbono adsorbido por una muestra de carbón activado al peso de la muestra cuando el carbono está saturado con CCl<sub>4</sub>. El estándar utilizado es ASTM D3467-88.

**Adsorción de benceno:** es una prueba utilizada principalmente para carbones activados granulares. Proporciona información muy relevante sobre la capacidad de adsorción en fase gaseosa. En muchos casos, la isoterma de adsorción-desorción se determina con el fin de obtener la distribución del tamaño de poro del carbono. No hay una prueba estándar de referencia, y algunas industrias solo la utilizan como información para los usuarios.

**Adsorción de yodo:** es una prueba simple y rápida, dando una indicación del área de superficie interna del carbono; en muchos carbones activados, el índice de yodo (expresado en miligramos de yodo por gramo de carbono) se encuentra cerca del área superficial Brunauer-Emmett-Teller (BET). El estándar utilizado es AWWA B600-78.

**Decoloración de la melaza:** es una prueba específicamente dirigida hacia el uso de carbón activado en las industrias del azúcar y la glucosa, y cubre predominantemente el rango de poro de tamaño mediano.

**Adsorción de butano:** da una indicación de la aplicabilidad en la recuperación de solventes y otras aplicaciones en fase gaseosa.

Hay datos adicionales que algunos productores suministran a los usuarios para proporcionar un máximo de información sobre sus productos. El más común es el área superficial, como se deduce desde la aplicación de la ecuación BET a los datos de adsorción de nitrógeno a 77 K (puede también se aplicará a otros gases y vapores a diferentes temperaturas). Aunque el BET área superficial no tiene mucho significado físico en sólidos microporosos es ampliamente utilizado para dar una idea de la capacidad de adsorción del carbón activado.

Información más detallada sobre estas y otras pruebas comerciales para lata de carbón activado obtenerse de fuentes como ASTM, AWWA, DIN e ISO. [4]

De manera resumida, se recogen a continuación los principales estándares por los que se evalúan las propiedades del carbón activo:



Method number	Title
<b>Liquid-Phase Evaluation Tests</b>	
D3838 - 05(2011)	Standard Test Method for pH of Activated Carbon
D3860 - 98(2008)	Standard Practice for Determination of Adsorptive Capacity of Activated Carbon by Aqueous Phase Isotherm Technique
D4607 - 94(2011)	Standard Test Method for Determination of Iodine Number of Activated Carbon
D5029 - 98(2009)	Standard Test Method for Water Solubles in Activated Carbon
D5158 - 98(2005)	Standard Test Method for Determination of Particle Size of Powdered Activated Carbon by Air Jet Sieving
D5919 - 96(2011)	Standard Practice for Determination of Adsorptive Capacity of Activated Carbon by a Micro-Isotherm Technique for Adsorbates at ppb Concentrations
D6385 - 99(2011)	Standard Test Method for Determining Acid Extractable Content in Activated Carbon by Ashing
D6586 - 03(2008)	Standard Practice for the Prediction of Contaminant Adsorption On GAC In Aqueous Systems Using Rapid Small-Scale Column Tests
D6647 - 01(2011)	Standard Test Method for Determination of Acid Soluble Iron Via Atomic Absorption
D6781 - 02(2007)	Standard Guide for Carbon Reactivation
D6851 - 02(2011)	Standard Test Method for Determination of Contact pH with Activated Carbon
<b>Gas-Phase Evaluation Tests</b>	
D2854 - 09	Standard Test Method for Apparent Density of Activated Carbon
D2862 - 10	Standard Test Method for Particle Size Distribution of Granular Activated Carbon
D2866 - 11	Standard Test Method for Total Ash Content of Activated Carbon
D2867 - 09	Standard Test Methods for Moisture in Activated Carbon
D3466 - 06(2011)	Standard Test Method for Ignition Temperature of Granular Activated Carbon
D3467 - 04(2009)	Standard Test Method for Carbon Tetrachloride Activity of Activated Carbon
D3802 - 10	Standard Test Method for Ball-Pan Hardness of Activated Carbon
D3803 - 91(2009)	Standard Test Method for Nuclear-Grade Activated Carbon
D4069 - 95(2008)	Standard Specification for Impregnated Activated Carbon Used to Remove Gaseous Radio-Iodines from Gas Streams
D5159 - 04(2009)	Standard Guide for Dusting Attrition of Granular Activated Carbon
D5160 - 95(2008)	Standard Guide for Gas-Phase Adsorption Testing of Activated Carbon
D5228 - 92(2010)	Standard Test Method for Determination of Butane Working Capacity of Activated Carbon
D5742 - 95(2010)	Standard Test Method for Determination of Butane Activity of Activated Carbon
D5832 - 98(2008)	Standard Test Method for Volatile Matter Content of Activated Carbon Samples
D6646 - 03(2008)	Standard Test Method for Determination of the Accelerated Hydrogen Sulfide Breakthrough Capacity of Granular and Pelletized Activated Carbon
D7385 - 13	Standard Guide for Estimating Carbon Saturation by Temperature Rise upon Immersion

Tabla 20: Estándares para la caracterización del carbón activo

### 5.1.2 Otras normativas y estándares de interés

Se recoge a continuación información adicional sobre el carbón activo y sus posibles usos en aplicaciones de consumo humano.

Reglamento por el que se establece una declaración autorizada de propiedades saludables de los alimentos diferentes a la reducción del riesgo de enfermedades, desarrollo y salud de los niños:

Nutriente, sustancia, alimento o categoría de alimentos	Declaración	Condiciones de uso de la declaración	Condiciones o restricciones de uso del alimento o bien declaración o advertencia complementaria	Número del boletín de la EFSA (EFSA Journal)	Número de entrada en la lista consolidada que se remitió a la EFSA para su evaluación
Carbón activo	El carbón activo contribuye a reducir una flatulencia excesiva después de comer.	Esta declaración solo puede utilizarse con alimentos que contengan 1 g de carbón activo por porción cuantificada. Para que un producto pueda llevar esta declaración, se informará al consumidor de que el efecto beneficioso se obtiene tomando 1 g de carbón activo por lo menos 30 minutos antes de la comida y otro gramo poco después de la comida.		2011; 9(4):2049	1938

Tabla 21: Reglamento UE 432 [33]

También se puede mencionar el Real Decreto 1052/2003, donde se permite el carbón activo como medio filtrante en condiciones de uso de acuerdo con las buenas prácticas de fabricación, aprobando la reglamentación técnico-

sanitaria sobre determinados azúcares destinados al consumo humano. [34]

Además, los estándares sobre carbón activado han sido emitidos por el Deutsches Institut für Normung e.V (DIN) como la norma DIN EN 15799 que aborda el uso de PAC para el tratamiento del agua de piscinas.

En pruebas y evaluación de carbonos activados vírgenes y agotados, dependiendo del uso de carbón activado, los fabricantes a menudo siguen otras normas, como la FCC (Food Chemicals Codex) para aplicaciones de grado alimentario, CEFIC (Consejo Europeo de Federaciones de la Industria Química). ) (22), USP para aplicaciones de grado farmacéutico y NIOSH (Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional) para aplicaciones de respiradores [35].

### **Aplicación del carbón activo y tecnología**

Existe un gran rango de tipos de diferentes carbonos activados en el mercado adecuado para cada uso. La efectividad de adsorción en los diferentes carbonos activados depende de las características físicas y químicas del producto (método de activación, materia prima, tamaño de poro...), así como la afinidad de las especies químicas presentes en él.

La elección del grado de carbono activado y la tecnología están estrechamente relacionadas entre sí. En ese sentido, el primer tema a considerar son las características de la especie.

Además de la selección del grado de carbono activado que mejor adsorbe a la especie que se va a eliminar, una cuestión clave a abordar es el tipo de tecnología. Dependiendo de la necesidad, se puede elegir entre la producción de PAC o GAC y la operación de flujo discontinuo o continuo. Los criterios como la flexibilidad operativa, la confiabilidad del proceso, la economía y los costos de inversión también determinan qué tipo de tecnología se va a seleccionar.

La principal diferencia entre PAC y GAC es el tamaño de partícula. El pequeño tamaño de partícula en PAC permite una difusión más rápida y afecta la cinética de adsorción de una especie. De acuerdo con esto, las operaciones con tamaños de partícula más pequeños requieren un menor tiempo de contacto. Sin embargo, debido a su pequeño tamaño de artículo, el PAC no es preferible en los sistemas de filtración como los que se utilizan en el tratamiento de agua o aguas residuales, ya que los tamaños pequeños de partículas a menudo provocan obstrucciones y una alta caída de presión.

El uso de PAC permite una gran flexibilidad en la operación ya que puede dosificarse temporalmente cuando es necesario y la dosis puede ajustarse a las necesidades reales. Además, los costos de inversión de PAC como el almacenamiento y los equipos de dosificación son más bajos que en el caso del GAC. Sin embargo, la regeneración de PAC es bastante difícil, debido a que las partículas finas de PAC deben separarse primero de la corriente tratada. Por lo tanto, en las operaciones convencionales, los PAC gastados se eliminan en vertederos o se envían a unidades de incineración.

El GAC generalmente se aplica cuando hay una necesidad continua de tratamiento con carbón activado. Para este propósito, se utilizan con mayor frecuencia sistemas GAC que están compuestos por adsorbentes de carbón de flujo continuo, unidades de almacenamiento de carbón, transporte de carbón y sistemas de regeneración de carbón. El adsorbente de carbón consiste en un tanque en el que se coloca el carbón para formar un lecho de "filtro". El GAC se utiliza principalmente en lechos de filtros fijos (empaquetados) o alternativamente en lechos expandidos y fluidizados. Los adsorbentes GAC pueden diseñarse para funcionar en modo de flujo descendente o ascendente. En los adsorbentes GAC, se pueden lograr concentraciones residuales muy bajas de las especies objetivo. Por lo tanto, los adsorbentes GAC permiten un uso más completo de la capacidad de adsorción del carbono, reduciendo así los costos de reposición. Las partículas de GAC son duras y resistentes a la abrasión, lo que las hace adecuadas para aplicaciones vigorosas a largo plazo. [60]

Por último, se muestran algunos carbonos activos comerciales en aplicaciones tanto en fase líquida como en fase gaseosa, que pueden servir como referencia para las posibles aplicaciones del carbón activo producido en el presente trabajo.

Property	MD3545WB powder (47)	RES-KARB JCL-1240 (48)	NORIT PK1-3 (49)	AQUASORB 1000 (48)	NORIT RO 0.8 (48)	NORIT HYDRODARCO 3000 (48)	Calgon Filtrasorb 400 (50)
Type	Wood-based PAC	Coal-based GAC	Steam activated GAC	Coal-based GAC	Steam activated peat-based extruded carbon	Lignite coal-based GAC	Bituminous coal-based GAC
Suitability	Wastewater treatment	Dechlorination in pharmaceutical, and food processing industries	Purification of potable alcohol and vodka	Wide range of drinking water applications	Purification of foods and fine chemicals	Removal of large and small molecular pollutants from water and wastewater	Removal of dissolved organics from water, wastewater, industrial and food processing streams
apparent density, g/cm <sup>3</sup>		0.47	0.29	0.5		0.38	0.54
bulk density, g/cm <sup>3</sup>	0.29-0.39	0.41			0.38		
effective size, mm			1.2	0.4-1.8	0.8 (pellet diameter)	0.7-0.9	0.55-0.75
mean diameter ( $\mu$ m)	19.71						
uniformity coefficient (max)			1.8	1.2-1.7		2.1	1.9 (max)
moisture by weight, %	5 (max)	8	2	2	2	8	2 (max)
abrasion number						70	75 (min)
ash content, wt %	6 (max)	0.01	8		6		
pH of aqueous extract		6	Alkaline	8	Alkaline	4.5	
BET surface area, m <sup>2</sup> /g	882	1070	875	950	900		
iodine number, mg/g min	900	1000+	700	900	1050	500	1000
methylene blue adsorption, g/100 g			11	20	21		
carbon tetrachloride (CTC) activity, %		65					
pore volume, cm <sup>3</sup> /g		1.04		0.88	1.0		
micropore volume, cm <sup>3</sup> /g	0.34						

Tabla 22: Propiedades de carbones activos comerciales en aplicaciones líquidas

Name	Calgon Carbon HGR (51)	Calgon Carbon Fluepack <sup>®</sup> LMC+ (51)	Calgon Carbon Minotour <sup>™</sup> OC (51)	Donau Carbon Supersorb K42 (52)	Donau Carbon Desorex K3 (52)
Property	Sulfur-impregnated GAC	Brominated PAC	Extruded carbon pellet	Coal-based cylindrically shaped carbon	Coal-based cylindrically shaped carbon
Suitability	Removal of elemental and organic mercury from natural gas, air, and by-product hydrogen streams	Enhanced mercury capture in flue-gas treatment	Odor removal in sewage treatment operations (removal of H <sub>2</sub> S and VOCs)	Solvent recovery	Gas cleaning, solvent recovery
apparent density, g/cm <sup>3</sup>	0.58	0.5-0.8			
bulk density, g/cm <sup>3</sup>				0.42±0.03	0.47±0.03
sulfur content, % wt.	8-15 (min)				
BET surface area, m <sup>2</sup> /g				1250	1000
particle size, mm			4 (mean)	4	4
moisture by weight, %		8 (max)			
hardness/abrasion number			95 (min)	>99	
iodine number, mg/g min		400-600			
benzene adsorption from air at 20°C [wt.%]				48±2	38±2
p/ps+:9/10					
CCl <sub>4</sub> activity (wt.%)				80	>60
screen size by wt., US sieve series	On 4 mesh:8.0 % (max) Through 10 mesh: 5.0 % (max)	<100 US mesh: 100 % (min) <325 US mesh: 95 % (min)			
H <sub>2</sub> S breakthrough capacity (g H <sub>2</sub> S/cc carbon)			0.3		

Tabla 23: Propiedades de carbones activos comerciales en aplicaciones gaseosas

### 5.1.3 Ficha de seguridad del carbón activo [44, 45, 46]

#### Identificación del riesgo:

1. Es un producto combustible.
2. El carbón activo húmedo retiene oxígeno y puede provocar asfixias si queda almacenado en espacios confinados.
3. La inhalación del producto puede causar irritación moderada del tracto respiratorio.
4. Al contacto con los ojos causa irritación moderada, enrojecimiento y/o dolor.
5. No es considerado irritante de la piel.
6. No se considera una sustancia cancerígena, teratogénica o mutagénica.

#### Primeros auxilios

1. En caso de contacto con los ojos, lavar con abundante agua.
2. En caso de inhalación llevar a la persona afectada a un lugar al aire fresco, en caso de que no respire proporcionar respiración artificial y si respira con dificultad administrar oxígeno.
3. En caso de ingestión, beber abundante agua.

#### Medidas contra incendios

1. A temperaturas mayores a 450°C puede haber ignición.
2. El polvo disperso en el aire a altas concentraciones y en presencia de una fuente de ignición puede provocar una explosión.
3. El material arde en contacto con fuego, generando monóxido y dióxido de carbono.
4. El fuego puede controlarse con agua, espuma sintética, polvos de extinción o anhídrico carbónico.
5. Puede iniciar fuego en contacto con agentes oxidantes fuertes, como peróxido de hidrógeno, permanganatos o cloro gaseoso.

#### Control de exposición y protección personal

1. Empleo de gafas y mascarillas adecuadas para evitar el contacto con los ojos e inhalación respectivamente.
2. En espacios confinados se debe utilizar un suministro externo de aire (ventilación forzada o equipo autónomo de respiración).

#### Información toxicológica

El producto como tal no es tóxico, pero puede retener agentes tóxicos en ambientes específicos. Tampoco es tóxico para especies animales o vegetales.

### Consideraciones de disposición

El producto no es un producto peligroso. Su disposición en un relleno sanitario no es peligrosa. El material puede ser incinerado bajo unas condiciones controladas, sin embargo, puede haber absorbido sustancias que no deban ser incineradas.

### Información adicional

La utilización de este producto no está sujeta de controles específicos.

Este producto se ha clasificado de baja reactividad, inflamable bajo unas condiciones muy específicas e inofensiva para la salud.

### Precaución en almacenamiento y manejo

Las siguientes precauciones de seguridad deberían ejercerse para minimizar o eliminar peligros cuando se produce el manejo o almacenamiento de GAC.

La activación húmeda absorberá rápidamente el oxígeno del aire, creando un peligro de agotamiento de oxígeno agudo en áreas confinadas. Las medidas de seguridad apropiadas para atmósferas deficientes de oxígeno se deben cumplir estrictamente al ingresar a áreas cerradas o parcialmente cerradas que contengan carbón activado.

En el almacenamiento de carbón activo, las precauciones deben tomarse para evitar un contacto directo con agentes oxidantes fuertes, como cloruros, hipocloritos, permanganato potásico, ozono y peróxidos.

La mezcla de carbón con hidrocarburos podría causar la combustión espontánea. Además, el carbón activo debe mantenerse separado de almacenamiento de hidrocarburos [32].

## 5.2. Cálculos balance de materia y energía

A continuación se presenta el código del programa EES con el que se ha procedido a la resolución:

Cálculo principal general, sin integración energética:

{BALANCE DE MATERIA }

mca=277,7778 "en kg/h"

mhueso=1388,8889 "en kg/h"

Fch4=4,25 "en kmol/h"

Fcoc=18,3 "en kmol/h"

Fh2c=8,33 "en kmol/h"

Fc6h6=0,43 "en kmol/h"

mg<sub>sr</sub>=44\*(6,22+18,3+5,79+2,58+4,25)+28\*94,2

"Por términos, CO<sub>2</sub> de devolatización, CO<sub>2</sub> de CO de carbonización, CO<sub>2</sub> de activación, 2,58 del co<sub>2</sub> del benceno y N<sub>2</sub> para las reacciones" "en kg/h"

mg<sub>sc</sub>=m<sub>cble</sub>\*(44\*0,0208 +28\*0,784)

"Por términos, Co<sub>2</sub> desprendido del combustible y N<sub>2</sub> introducido por el combustible (kg/h)"

mv<sub>apr</sub>=18\*(7,56+8,33-5,79+4,25\*2+0,43\*3)

"h2o en hueso, h2 combustion volatiles, activación,ch4 devolatiz,c6h6 devolatiz "  
 $mvapc=6,75*mcble$  "los 6,75 kg H2O/kg cble"

$Fco=18,3+5,79$  "kmol/h""Co de la devolatización+Co activación"  
 $Fh2=8,33+5,79$  "H2 de devolat+H2 de activacion"  
 $Fc=0,005787$  "los 500kg/año de Carbón que reaccionan en la activación pasados a kmol/h"  
 $cpgs=1,115$   
 $cpvap=2,203$

$magua=18*(0+x)$  "agua que se produce por combustiones es mayor que la que se necesita, por lo que no se necesitaria agua, por eso se pone 0, habria que añadir x, que es lo que faltaria hasta que la composicion fuera 40% "

$mar=185,28+609,84+32*(25,04)+44*(94,2)$  "O2 para act+N2para act+O2devolatiz+N2devolat (kg/h)"  
 $mac=(0,0208+0,782)*mcble$  "O2 en cble+N2cble"

$mgsc1=(0,0208+0,784)*mcble$  "Pasado a kmol/h"  
 $mgsr1=6,22+18,3+5,79+94,2+2,58+4,25$  "igual pero en kmol/h para el cálculo del 40% "

$0,4=((mvapr+mvapc+magua)/18)/(mgsc1+mgsr1+(mvapr+mvapc+magua)/18)$  "todo el caudal molar de agua a la salida (en magua ya va incluido lo que se pierde por la activación) dividido entre los gases totales que salen del horno)"

{BALANCE DE ENERGIA }

"DATOS"

$PCI=50000$

$cphueso=0,84$

$cpagua=4,18$

$cpaire=1$

$Tref=25$

$Tsal=850$

$Tenthueso=25$

$Tentagua=347$

$Tentaire=25$

$entalpiach4=-802$

$entalpiaco=-235$

$entalpiah2=-286$

$$\text{entalpiac6h6} = -3267$$

$$\text{entalpiar2} = 117$$

$$\text{entalpiar3} = -235 \quad \text{"La mismas que entalpiaco"}$$

$$\text{entalpiar4} = -286 \quad \text{"La mismas que entalpia2"}$$

$$Q_{\text{entra}} + Q_{\text{generado}} - Q_{\text{consumido}} = Q_{\text{sale}} + Q_{\text{perdidas}}$$

$$Q_{\text{entra}} = Q_{\text{cble}} + Q_{\text{hueso}} + Q_{\text{agua}} + Q_{\text{aire}}$$

$$Q_{\text{generado}} = Q_{\text{ch4}} + Q_{\text{co}} + Q_{\text{h2}} + Q_{\text{c6h6}} + Q_{\text{r3}} + Q_{\text{r4}}$$

$$Q_{\text{consumido}} = Q_{\text{carb}} + Q_{\text{r2}}$$

$$Q_{\text{sale}} = Q_{\text{gases}} + Q_{\text{ca}}$$

$$Q_{\text{perdidas}} = \text{PCI} * m_{\text{cble}} * 0,03$$

"Qentra"

$$Q_{\text{cble}} = \text{PCI} * m_{\text{cble}}$$

$$Q_{\text{hueso}} = m_{\text{hueso}} * c_{\text{phueso}} * (\text{Tenthueso} - \text{Tref})$$

$$Q_{\text{agua}} = m_{\text{agua}} * c_{\text{pagua}} * (\text{Tentagua} - \text{Tref})$$

$$Q_{\text{aire}} = m_{\text{air}} * c_{\text{paire}} * (\text{Tentaire} - \text{Tref}) + m_{\text{ac}} * c_{\text{paire}} * (\text{Tentaire} - \text{Tref})$$

"Qgenerado"

$$Q_{\text{ch4}} = \text{entalpiach4} * F_{\text{ch4}} \quad \text{"Cuidado que es de reacción"}$$

$$Q_{\text{co}} = \text{entalpiaco} * F_{\text{coc}}$$

$$Q_{\text{h2}} = \text{entalpia2} * F_{\text{h2c}}$$

$$Q_{\text{c6h6}} = \text{entalpiac6h6} * F_{\text{c6h6}}$$

$$Q_{\text{r3}} = \text{entalpiar3} * F_{\text{co}} \quad \text{"Aqui esta todo el CO, cuidadito"}$$

$$Q_{\text{r4}} = \text{entalpiar4} * F_{\text{h2}} \quad \text{"Aqui esta todo el H2, cuidadito"}$$

"Qconsumido"

$$Q_{\text{carb}} = m_{\text{hueso}} * c_{\text{phueso}} * (\text{Tsal} - \text{Tenthueso}) * 1,5$$

$$Q_{\text{r2}} = \text{entalpiar2} * F_{\text{c}} \quad \text{"Para el carbón reaccionado"}$$

"Qsale"

$$Q_{\text{gases}} = ((m_{\text{vapr}} * c_{\text{pvap}} + m_{\text{gsc}} * c_{\text{pgs}}) * (\text{Tsal} - \text{Tref})) + ((m_{\text{vapr}} * c_{\text{pvap}} + m_{\text{gsr}} * c_{\text{pgs}}) * (\text{Tsal} - \text{Tref}))$$

$$Q_{\text{ca}} = m_{\text{ca}} * c_{\text{phueso}} * (\text{Tsal} - \text{Tref})$$

**Cálculo completo, integración energética incluida:**

{BALANCE DE MATERIA }

mca=277,7778 "en kg/h"

mhueso=1388,8889 "en kg/h"

Fch4=4,25 "en kmol/h"

Fcoc=18,3 "en kmol/h"

Fh2c=8,33 "en kmol/h"

Fc6h6=0,43 "en kmol/h"

mgsr=44\*(6,22+18,3+5,79+2,58+4,25)+28\*94,2 "Por términos, CO2 de devolatización, CO2 de CO de carbonización, CO2 de activación, 2,58 del co2 del benceno y N2 para las reacciones" "en kg/h"

mgsc=mcble\*(44\*0,0208 +28\*0,784) "Por términos, Co2 desprendido del combustible y N2 introducido por el combustible (kg/h)"

mvapr=18\*(7,56+8,33-5,79+4,25\*2+0,43\*3) "h2o en hueso, h2 combustion volatiles, activación, ch4 devolatiz, c6h6 devolatiz "

mvapc=6,75\*mcble "los 6,75 kg H2O/kg cble"

Fco=18,3+5,79 "kmol/h" "Co de la devolatización+Co activación"

Fh2=8,33+5,79 "H2 de devolat+H2 de activación"

Fc=0,005787 "los 500kg/año de Carbón que reaccionan en la activación pasados a kmol/h"

cpgs=1,115

cpvap=2,203

magua=18\*(0+x) "agua se produce por combustiones es mayor que la que se necesita, por lo que no se necesitaria agua, por eso se pone 0, habria que añadir x, que es lo que faltaria hasta que la composicion fuera 40%"

mar=185,28+609,84+32\*(25,04)+44\*(94,2) "O2 para act+N2 para act+O2 devolatiz+N2 devolat (kg/h)"

mac=(0,0208+0,782)\*mcble "O2 en cble+N2cble"

mgsc1=(0,0208+0,784)\*mcble "Pasado a kmol/h"

mgsr1=6,22+18,3+5,79+94,2+2,58+4,25 "igual pero en kmol/h para el cálculo del 40%"



$0,4 = ((mvapr + mvapc + magua) / 18) / (mgsc1 + mgsr1 + (mvapr + mvapc + magua) / 18)$  "todo el caudal molar de agua a la salida (en magua ya va incluido lo que se pierde por la activación) dividido entre los gases totales que salen del horno"

{BALANCE DE ENERGIA }

"DATOS"

PCI=50000

cphueso=0,84

cpagua=4,18

cpaire=1

Tref=25

Tsal=850

Tenthueso=25

Tentagua=95

{Tentaire=25}

entalpiach4=-802

entalpiaco=-235

entalpiah2=-286

entalpiac6h6=-3267

entalpiar2=117

entalpiar3=-235 "La misma que entalpiaco"

entalpiar4=-286 "La misma que entalpiah2"

$Qentra + Qgenerado - Qconsumido = Qsale + Qperdidas$

$Qentra = Qcble + Qhueso + Qagua + Qaire$

$Qgenerado = Qch4 + Qco + Qh2 + Qc6h6 + Qr3 + Qr4$

$Qconsumido = Qcarb + Qr2$

$Qsale = Qgases + Qca$

$Qperdidas = PCI * mcble * 0,03$

"Qentra"

$Qcble = PCI * mcble$

$Qhueso = mhueso * cphueso * (Tenthueso - Tref)$

$Qagua = magua * cpagua * (Tentagua - Tref)$

$$Q_{aire} = m_{ar} * c_{paire} * (T_{entaire} - T_{ref}) + m_{ac} * c_{paire} * (T_{entaire} - T_{ref})$$

"Qgenerado"

$$Q_{ch4} = \text{entalpiach4} * F_{ch4} \quad \text{"Cuidado que es de reacción"}$$

$$Q_{co} = \text{entalpiaco} * F_{coc}$$

$$Q_{h2} = \text{entalpiah2} * F_{h2c}$$

$$Q_{c6h6} = \text{entalpiac6h6} * F_{c6h6}$$

$$Q_{r3} = \text{entalpiar3} * F_{co} \quad \text{"Aqui esta todo el CO, cuidadito"}$$

$$Q_{r4} = \text{entalpiar4} * F_{h2} \quad \text{"Aqui esta todo el H2, cuidadito"}$$

"Qconsumido"

$$Q_{carb} = m_{hueso} * c_{phueso} * (T_{sal} - T_{enthueso}) * 1,5$$

$$Q_{r2} = \text{entalpiar2} * F_c \quad \text{"Para el carbón reaccionado"}$$

"Qsale"

$$Q_{gases} = ((m_{vapc} * c_{pvap} + m_{gsc} * c_{pgs}) * (T_{sal} - T_{ref})) + (m_{vap r} * c_{pvap} + m_{gsr} * c_{pgs}) * (T_{sal} - T_{ref})$$

$$Q_{ca} = m_{ca} * c_{phueso} * (T_{sal} - T_{ref})$$

{Rescuperador}

$$\text{energiarecuperador} = ((m_{vapc} + m_{vap r}) * c_{pvap} + (m_{gsc} + m_{gsr}) * c_{pgs}) * (850 - 350)$$

$$\text{energiarecuperador} = (m_{ar} + m_{ac}) * c_{paire} * (T_{entaire} - 25)$$

$$g_{essalida} = m_{vapc} + m_{vap r} + m_{gsc} + m_{gsr}$$

$$a_{ireentrada} = m_{ar} + m_{ac}$$

$$Q_{gases} / 3600 = 0,1 * A * 146,917$$

## 6 REFERENCIAS

- [1] Article chemical engineering, Activated carbon and New application, by Ken Koehlert.
- [2] Desarrollo de un carbón activado granular mediante activación física en un horno rotatorio, Tesis de investigación, 2014.
- [3] Rodríguez-Reinoso (1991)
- [4] Activated Carbon, Harry Marsh and Francisco Rodríguez-Reinoso, 2006.
- [5] <https://activatedcarbon.com/applications>
- [6] Activated carbon for medical and pharmaceutical processes; Jacobi, the carbon company
- [7] <http://www.cabotcorp.com/solutions/applications/food-and-beverage>
- [8] Charcolive, 2008
- [9] La biomasa en Andalucía, Agencia Andaluza de la Energía, Diciembre 2017.
- [10] Consejería de Agricultura y Pesca, Potencial energético de los subproductos de la industria olivarera en Andalucía, Agosto de 2010.
- [11] Análisis de la expansión del olivar en la provincia de Jaén a través de fuentes cartográficas (1956-2007), Universidad de Jaen, abril de 2015
- [12] El olivar andaluz, consejería de agricultura y pesca, noviembre de 2002
- [13] Evaluación de la producción y usos de los subproductos de las agroindustrias del olivar en Andalucía, Consejería de agricultura y pesca, Mayo 2015
- [14] <http://pelletsdelsur.com>
- [15] OEC, 2016
- [16] Jacobi carbons, abril 2017
- [17] Manual del carbón activado 2003.
- [18] Encyclopedia of industrial chemistry, Ullmann's,
- [19] Tesis doctoral Universidad de Granada, 2010 Aprovechamiento hueso de aceituna
- [20] Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2008
- [21] Tesis: Uso de los residuos de hueso de aceituna para obtener carbón activado, 2013. Escuela Académico Profesional de Ingeniería Metalúrgica
- [22] Perry, 2011.
- [23] OPTIMIZATION STUDY OF A PILOT ROTARY KILN FOR ACTIVATED CARBON PRODUCTION, artículo de la Universidad Nacional de San Juan, 2014
- [24] <http://www.ingetecsa.com//es/maquinaria/enfriadores-de-contacto/enfriador-multicamara.html?more=1>
- [25] <https://www.911metallurgist.com/metalurgia/molino-a-bolas/>
- [26] <http://www.olearum.com/huesodeaceituna.html>
- [27] Características Físico Mecánicas y Análisis de Calidad de Granos, Julio Ernesto Ospina Machado
- [28] Diseño preliminar de una planta para la obtención de carbón activado, Trabajo de Grado, Junio de 2011, Universidad de Oriente

- [29] <https://es.slideshare.net/andresjuve/calculo-de-capacidades-de-sistemas-de-almacenaje>
- [30] <https://www.911metallurgist.com/metallurgia/diseño-de-molinos-de-bolas-y-de-barras/>
- [31] <http://www.tecmaqsr.com/index.php?put=producto-amp&id=12>
- [32] AWWA STANDARD for GRANULAR ACTIVATED CARBON, ANSI/AWWA B604-96
- [33] REGLAMENTO (UE) N° 432/2012 DE LA COMISIÓN de 16 de mayo de 2012
- [34] Real Decreto 1052/2003, de 1 de agosto, por el que se aprueba la Reglamentación técnico-sanitaria sobre determinados azúcares destinados a la alimentación humana. Última modificación: 9 de octubre de 2009 (BOE)
- [35] Enciclopedia Kirk-Othmer de Tecnología Química, agosto de 2014.
- [36] Colección de Tablas, Gráficas y Ecuaciones de Eransmisión de Calor, Universidad de Sevilla, 2016.
- [37] Apuntes organización y gestión de empresas, Universidad de Sevilla, 2017.
- [38] <https://www.alibaba.com/>
- [39] <https://www.quiminet.com/productos/carbon-activado-granular-y-polvo-43702065737/precios.htm>
- [40] [https://es.made-in-china.com/category23\\_Chemicals/Artificial-Graphite-Active-Carbon\\_uisisssss\\_1.html](https://es.made-in-china.com/category23_Chemicals/Artificial-Graphite-Active-Carbon_uisisssss_1.html)
- [41] <https://preciogas.com/comparador/precios-energias>
- [42] <https://www.endesaclientes.com/static/iberia/empresas/condiciones/anexo-precio-electricidad-es.pdf>
- [43] <http://www.aqualia.com/es/web/aqualia-jaen/atencion-al-cliente/tarifas-de-agua>.
- [44] Ficha de seguridad empresa QUIMIPUR, S.L.U
- [45] Hoja de datos de seguridad DEL FABRICANTE KARAL S.A. de acuerdo a NOM-018-STPS-2000
- [46] Hoja de seguridad Sulfoquímica S.A. según la norma técnica NTC4435. Certificado ISO 9001.
- [47] DISEÑO MECÁNICO DE HORNO ROTATORIO DE FUNCIONAMIENTO HORIZONTAL, UNIVERSIDAD DEL VALLE, 2012.
- [48] Evaluation of the power efficiency of a furnace that uses like combustible husk of rice, Scientia et Technica, 2007.
- [49] ESTANDARIZACIÓN DE PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO POR ACTIVACIÓN FÍSICA A PARTIR DE CUESCO DE PALMA A ESCALA INDUSTRIAL, 2017.
- [50] Performance improvement in olive stone's combustion from a previous carbonization transformation, ELSEVIER 2018.
- [51] Characterization and prediction of biomass pyrolysis products, ELSEVIER, Progress in Energy and Combustion Science, 2011.
- [52] Apuntes de Tecnología Energética, Universidad de Sevilla.
- [53] GRAND VIEW RESEARCH, Activated Carbon Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product (Powdered Activated Carbon, Granular Activated Carbon), By Application, By End-use, And Segment Forecasts, 2018 – 2024. Published 2018.
- [54] Activated Carbon: A Growing Market of Opportunity, FEECO international.
- [55] <https://markets.businessinsider.com/news/stocks/global-and-china-activated-carbon-market-2017-2021-6-foreign-and-19-chinese-activated-carbon-enterprises-1002245569>
- [56] <https://www.procurementiq.com/procurement-research-reports/chemicals-fuels-wood-products/activated->

carbon.html

[57] PLANTA DE PRODUCCIÓN DE CARBÓN ACTIVO, Universidad de Zaragoza, 2013.

[58] Producto de la empresa Peláez renovables

[59] Artículo: OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE RESIDUOS OLIVÍCOLAS Y OLEÍCOLAS POR ACTIVACION FÍSICA, 2017

[60] Kirk-Othmer. Encyclopedia of Chemical Technology.

[61] Carbón activado de cuesco de palma, estudio de termogravimetría y estructura.

[62] <http://mantenimiento.renovetec.com/180-la-vida-util-de-una-planta-industrial>