



Trabajo Fin de máster en ingeniería industrial  
Especialidad en organización  
ICAI Curso 2017/18

## Diseño de una planta de elaboración de pellets a partir de residuos de café

Autor

Valeriano Torres Ordóñez

Director

Carmen Martínez García

Firma del autor

VºBº Director

Carmen  
Martínez  
García

Firmado digitalmente por Carmen Martínez García  
Nombre de reconocimiento (DN):  
cn=Carmen Martínez García,  
o=Universidad de Jaén,  
ou=Departamento Ingeniería  
Química Ambiental y de los  
Materiales,  
email=cmartin@ujaen.es, c=ES  
Fecha: 2018.07.01 22:21:19 +02'00'

Madrid

Julio de 2018

# Diseño de una planta de elaboración de pellets a partir de residuos de café

Valeriano  
Torres  
Ordóñez

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título "Diseño de una planta de elaboración de pellets a partir de residuos de café" en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2017/18 es de mi autoría, original e inédito y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Valeriano Torres Ordóñez

Fecha: 01/ 07/2018



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Carmen Martínez García

Fecha: 01/07/2018

Carmen  
Martínez  
García

Firmado digitalmente por Carmen Martínez García  
Nombre de reconocimiento (DN):  
cn=Carmen Martínez García,  
o=Universidad de Jaén,  
ou=Departamento Ingeniería  
Química Ambiental y de los  
Materiales,  
email=cmartin@ujaen.es, c=ES  
Fecha: 2018.07.01 22:21:19 +02'00'

## Índice

- 1. Introducción**
- 2. Estado de la cuestión**
- 3. Caracterización del residuo**
  - 3.1. Determinación cualitativa de las fases mineralógicas**
  - 3.2. Determinación de la composición química**
  - 3.3. Determinación de la composición química elemental**
  - 3.4. Análisis térmico**
  - 3.5. Poder calorífico**
  - 3.6. Humedad relativa**
  - 3.7. Densidad**
- 4. Descripción del sistema**
  - 4.1. Etapas productivas**
  - 4.2. Diseño de los procesos**
    - 4.2.1. Recepción de los posos del café y almacenamiento en silo**
    - 4.2.2. Transporte tornillo sin fin**
    - 4.2.3. Secado**
    - 4.2.4. Peletizado**
    - 4.2.5. Enfriado**
    - 4.2.6. Tamizado**
    - 4.2.7. Ensacado**
    - 4.2.8. Paletizado**
    - 4.2.9. Almacenaje**
- 5. Impacto medioambiental**
- 6. Conclusiones**
- 7. Bibliografía**

## 1. Introducción

La biomasa ha supuesto históricamente la principal fuente de energía para el ser humano. Sin embargo, a lo largo del siglo XX la generación de energía ha provenido principalmente de combustibles fósiles, debido a su bajo coste y alto poder calorífico. Dada la concienciación actual de la sociedad con respecto a la protección del medioambiente y al interés de los estados por incrementar su independencia de los países exportadores de crudo, se ha experimentado una marcada tendencia hacia el abastecimiento de energía por medio de fuentes renovables desde los años 80, radicada especialmente en la crisis del petróleo de 1973 (Joel Darmstadter, 2013).

En este contexto, se ha desarrollado con fuerza una transición hacia la conocida como biomasa moderna. Dicha biomasa se caracteriza por su adecuado acondicionamiento y por tecnologías apropiadas para su explotación, en contraposición con el consumo tradicional en países subdesarrollados, el cual además de ser peligroso por el riesgo de incendio, resulta perjudicial para la salud (Stephen Karekezi, 2004).

Entre estos tipos de biomasa moderna podemos encontrar tanto combustibles sólidos (pellets y briquetas), como biocarburantes (etanol y biodiesel). Además de suponer una fuente de energía renovables con emisiones de CO<sub>2</sub> neutras, brindan la oportunidad para avanzar hacia una economía más circular, gracias a la posibilidad de dar una segunda oportunidad a los residuos urbanos orgánicos.

Debido a que actualmente la mayoría de la biomasa en España proviene de actividades agrícolas, agroindustriales o silviculturales. Este proyecto tiene como objetivo ofrecer una alternativa para el aprovechamiento rentable de los posos del café, un residuo urbano que en la actualidad se desecha de forma ineficiente junto con cualquier otro residuo orgánico. Sin embargo, por medio de este proyecto, se demostrará su alta competitividad con respecto a otros combustibles, mediante la caracterización química del residuo. Así como ofrecer un modo específico de aprovecharlo, mediante una planta productora de pellets con capacidad para producir 25.000 toneladas al año. Lo cual supondría un reciclaje de unas 41.000 toneladas de posos de café desechadas en la hostelería.

El diseño de la planta se centrará exclusivamente en la línea de producción, aportando especificaciones del producto y ahondando en las distintas etapas necesarias para la producción de estos pellets. Aunque la idea del proyecto es arrojar luz sobre la instalación de una planta de este tipo en cualquier punto de la geografía española, la planta se supondrá instalada en el municipio de Valdaracete en la Comunidad de Madrid a la hora de tomar suponer las condiciones del aire para algunos procesos y para estimar la distancia media recorrida por los camiones que provisiones la planta con los residuos del café a la hora de estimar el impacto medioambiental.

Por último, se estimará el impacto medioambiental positivo producido por la instalación de esta planta, mediante el uso de una calculadora diseñada por la Asociación Española de la Biomasa.

## **2. Estado de la cuestión**

La acción sobre el clima, el medio ambiente y el empleo eficiente de materias primas y recursos son importantes desafíos a los que se tiene que enfrentar nuestra sociedad, así está también recogido como objetivo específico dentro de los retos del programa Marco de Investigación e Innovación de la Unión Europea, Horizonte 2020. Además, hay que repensar nuestras formas de vida, el uso de las materias primas y el destino final de los residuos generados en la actividad humana, ante el crecimiento que el coste de la energía está teniendo en los últimos años para minimizarlo en la medida de lo posible.

Cerca del 40% del total de energía consumida en Europa se debe al consumo en edificaciones. En España, cada grado de temperatura que incrementamos en una estancia supone un incremento del 4% en el coste energético.

Según datos del Centro Nacional de Energías Renovables (Cener), el 80% de los hogares españoles necesitan someterse a procesos de rehabilitación energética urgente. Además, ocupan el tercer lugar en la demanda energética, después del transporte y la industria, y son responsables del 19% del gasto nacional por sus sistemas antiguos de calefacción y aislamiento térmico. En este escenario se justifica el estudio de sistemas y/o fuentes de energía alternativas que puedan conducir al ahorro energético. La generación de las ideas debe ir en la línea de incorporar al mercado nuevos productos y/o procesos, mejorando la calidad de vida, el bienestar social y contribuyendo al desarrollo económico, tal como se recoge en el Plan Estatal de Investigación Científica. Desde que, a finales de los años 80, se introdujera el concepto de desarrollo sostenible, que fue definido por la ONU a través de la Comisión Brundlandt, surgen, desde las instituciones, numerosas iniciativas en cuanto a legislación relacionadas con la sostenibilidad, valorización de residuos y protección del medio ambiente.

La generación de residuos hace necesario no solo aplicar medidas para reducir dicha generación también su acumulación en vertederos y su liberación al medio ambiente, el cual se ve afectado negativamente.

La tecnología cerámica o la industria del cemento son idóneas ya que comprende diferentes tipos de procesos como puedes ser la combustión de estos residuos dado el poder calorífico que estos liberan aprovechado para la

ejecución de diferentes procesos que requieren alto valor de temperatura. También estos residuos pueden ser valorizados energéticamente, como es el caso que se plantea en este TFM.

La gestión de residuos es por tanto uno de los principales desafíos a los que se enfrentan las sociedades más adelantadas, dado su progresivo incremento en la producción y su impacto ambiental, económico y social.

La mayor parte de los residuos que generamos por nuestra actividad diaria continúan actualmente teniendo como destino final el vertedero, aunque sea ésta la opción menos sostenible a nivel ambiental.

En España, cada ciudadano genera –en promedio– un kilo y medio de basura al día aproximadamente (Residuos Sólidos Urbanos); a lo que habría que sumar los residuos asociados a la actividad industrial (Residuos Industriales).

El destino mayoritario de todos estos residuos es hoy en día su vertido. Las otras vías de gestión posibles son: el reciclaje o la valorización material o energética.

A nivel europeo, se ha impulsado que los residuos no se eliminen en vertederos así como el aumento al máximo posible del peso específico de las otras vías más sostenibles. Este impulso, viene originando sobre todo por la incorporación de dos leyes que pueden representar los pilares de la gestión de los residuos: por un lado la nueva Directiva Marco de Residuos de 2008, y por el otro, la Directiva Relativa al vertido de Residuos de 1999 (esta última ya transpuesta a la legislación española).

En la primera, cabe destacar que se introduce una jerarquía de gestión de los residuos clara donde se establece una prioridad a la hora de gestionar los residuos con el orden de:

- Prevención: reducir la generación de residuos, ya sea desincentivando la comercialización de artículos de un sólo uso, limitando el uso de plásticos,

potenciando la devolución de los envases de vidrio, etc.

- Reutilización: se podrá llevar a cabo en función del producto concreto (envases, cartuchos de tóner, bolsas de la compra, ropa, etc.)
- Reciclado: cuando el producto no puede reutilizarse tal cual, pero sí que se puede reciclar para que sea apto para otro uso distinto, como el caso del papel o el vidrio.
- Valorización material: consiste en la utilización del residuo como materia prima de otro proceso. Es el caso de las escorias de altos hornos, los escombros procedentes de la demolición de edificios, ..., que se utilizan en la producción de cemento, al contener los minerales presentes en las materias primas tradicionales.
- Valorización energética: los residuos se utilizan para la obtención de energía renovable a la vez que se soluciona un problema ambiental.
- Eliminación

Respecto a la segunda ley, se establecen una serie de medidas y procedimientos en el vertido de residuos con el objetivo de reducir sus efectos medioambientales y sobre la salud humana. A su vez, se fijan unos objetivos cuantitativos específicos de reducción de la cantidad máxima de residuos que se pueden destinar a su vertido en los próximos años.

El café es la semilla del cafeto, planta rubiácea del género *coffea* y es una de las bebidas más consumidas en el mundo. El café se cultiva prácticamente en todos los países comprendidos entre los dos trópicos, siendo la zona de mayor producción América Central y del Sur. En conjunto, la producción mundial anual se sitúa en torno a los 9,5 millones de Tm en 2017, según ICO (*International Coffe Organization*). La mayor parte del café es exportado, siendo los principales compradores de café los países desarrollados. EE. UU. absorbe un 30% de las importaciones mundiales y Europa Occidental otra gran consumidora de café

recibe el 33%. Debido al gran consumo de café en los países desarrollados, gran cantidad de residuos de posos de café se producen anualmente. Actualmente los residuos del café producidos en su mayor parte no se reciclan o bien en menor medida son usados como abono o se emplean en la fabricación de compost. Los principales componentes del café son cafeína ( $C_8H_{10}N_4O_2$ ) y lípidos (ésteres de ácidos grasos) y cantidades insignificantes de proteínas ( $NH_2-COOH$ ) hidratos de carbono, grasas saturadas fibra alimentaria y minerales como sodio, potasio y magnesio.

Los granos de café gastados son los residuos de la industria de café, obtenidos del tratamiento de café en polvo con agua caliente para preparar café instantáneo (Mebrahtu et al., 2013; Tokimoto et al., 2005). Teniendo en cuenta esta enorme cantidad de restos de café producido en el mundo, la reutilización de este material es un tema relevante. Se han realizado algunas investigaciones al respecto. Sin embargo, la mayoría de estos residuos no se utilizan, y son vertidos al medio ambiente causando contaminación y problemas de contaminación ambiental debido a la naturaleza tóxica (presencia de cafeína, taninos y polifenoles) (Leifa et al., 2000).

Destacar la obtención, a partir de posos de café, de biodiesel, obteniendo un producto con mayor estabilidad que biodiesel a partir de otras fuentes, debido a su alto contenido en antioxidantes (Campo et al., 2007; Yanagimoto et al., 2004). También se ha investigado su uso como adsorbente de bajo coste para la eliminación de colorantes catiónicos en los tratamientos de las aguas residuales (Franca et al., 2009).

Otra alternativa podría ser también su valorización energética, mediante la elaboración de pellets para calefacción a partir de estos posos, que es la planteada en este TFM. En Reino Unido, la empresa BioBean Ltd ya comercializa este tipo de pellets, con una tasa de reciclaje de 50.000 Tm de posos de café al año, con un sistema de recolección del residuo desplegado en la ciudad de Londres con la colaboración del propio ayuntamiento.

### **3. Caracterización del residuo**

#### **3.1. Determinación cualitativa de las fases mineralógicas**

La determinación cualitativa de las fases mineralógicas cristalinas principales presentes en el residuo de café ha sido realizada mediante Difracción de rayos X (DRX). Se ha recurrido a esta técnica, ya que cada difractograma de rayos X es característico del material analizado.

La difracción de rayos X es uno de los métodos físicos que existen en la actualidad para el estudio de los materiales. Junto con los métodos ópticos, y espectrométricos se mide la propiedad física de la interacción de la radiación electromagnética con la materia.

En función del tipo de fuente de partículas empleada se puede hablar de difracción de rayos X, difracción de neutrones y difracción de electrones. De estas, la difracción de rayos X, es sin duda, la técnica de aplicación más general y la más ampliamente utilizada para la identificación de especies cristalinas, determinación de estructuras cristalinas, etc.

El método más usual y práctico de producción de rayos X, se basa en el hecho de que cuando una partícula, con masa muy pequeña y dotada de una gran energía cinética, choca contra un material, una pequeña parte de dicha energía se invierte en la producción de rayos X, debido a la perturbación que el impacto produce en el estado energético de los átomos de dicho material.

Las partículas más utilizadas para este bombardeo son los electrones, y el dispositivo instrumental utilizado se conoce con el nombre de Tubo de rayos X. Existen distintos tipos de tubos de rayos X, pero los más usuales son los de cátodo incandescente, como el representado en la figura 1.

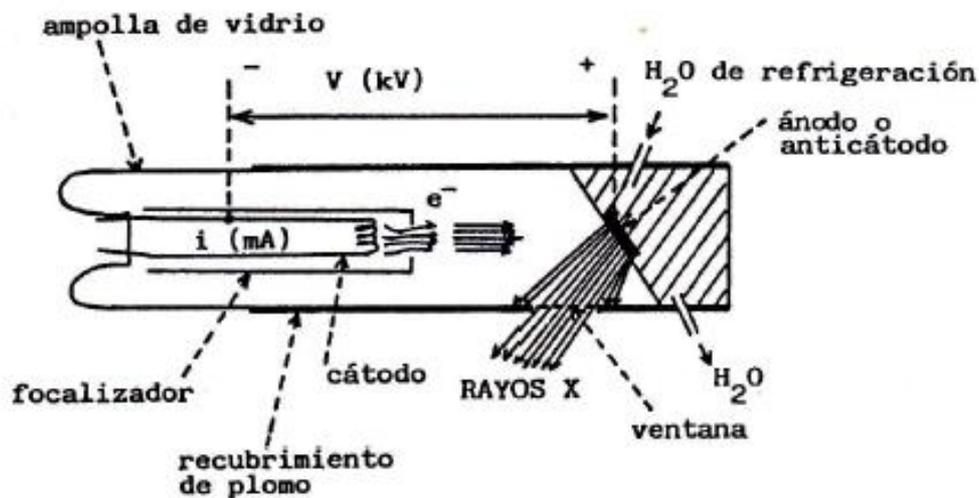


Figura 1. Esquema de un tubo de rayos X de cátodo incandescente.

Los elementos básicos de este tipo de tubos son: un filamento capaz de emitir electrones por calentamiento, que hace de cátodo, y un ánodo metálico, situados ambos dentro de una ampolla de vidrio en la que se ha hecho un vacío elevado. El calentamiento del cátodo, normalmente una espiral de wolframio, se logra haciendo pasar una corriente eléctrica de una cierta intensidad (10-60mA). Si entre el filamento y el ánodo se aplica una diferencia de potencia de varios kV (10-60kv), los electrones emitidos por el filamento incandescente son fuertemente acelerados hacia el ánodo, produciendo, en el choque con él, la emisión de rayos X en todas las direcciones.

La difracción de rayos X, está basada en el fenómeno de la dispersión (scattering), por el cual una parte de la radiación incidente, es desviada de su dirección original por la interacción con el material irradiado.

El fotón incidente es desviado de su dirección original de propagación con igual o menor energía, por colisión con un electrón.

Si el haz de rayos X incide sobre un cristal, las ondas dispersadas producen fenómenos de interferencia que en determinadas direcciones, y debido a la ordenación periódica de los átomos, puedan estar en fase y se refuercen mutuamente. Este fenómeno de refuerzo recibe el nombre de difracción.

Las condiciones necesarias para que se produzca difracción vienen determinadas por la ley de Bragg:

$$(n\lambda=2d_{hkl}\sin\Theta)$$

Dónde:

- $d_{hkl}$ : espaciado entre los planos del cristal
- $hkl$ : índices de Miller.
- $\Lambda$ : longitud de onda del haz de rayos X.
- $\Theta$ : Angulo que forma el haz de rayos X con la superficie de los planos.

Solo se producirá refuerzo cuando el ángulo de incidencia, la longitud de onda de la radiación, y el espaciado de la familia de planos cumplan con la relación.

Como en un cristal hay distintas familias de planos, con distintos espaciados, existirán también distintas direcciones de difracción. Al ser el conjunto de espaciados de un cristal característico para cada especie cristalina, si no hay dos sustancias cristalinas que tengan todos sus espaciados iguales, se puede afirmar que no existen dos sustancias cristalinas que tengan un diagrama de difracción idéntico.

En este ensayo se utilizó un difractómetro EMPYREAN de PANalytical que consta de un dispositivo portamuestras giratorio para muestras en polvo y cargador automático de 15 posiciones. En el camino del haz incidente el sistema óptico de este equipo, consta un juego de rendijas de divergencia y antivergencia que se fijaron a  $\frac{1}{2}^\circ$  y se utilizaron rendijas Soller (haz incidente y difractado) de 0.04 rad. El sistema de detección consiste en un detector de última generación PIXCEL con la longitud activa al máximo. Las medidas se realizaron de 5 a 80 grados durante 30 minutos con un tamaño de paso de  $0.0167^\circ$ . El tubo trabajó a 45 kV y 40 mA.



Figura 2 Detalle Equipo DRX.

Tras el ensayo realizado se obtuvieron los siguientes resultados:

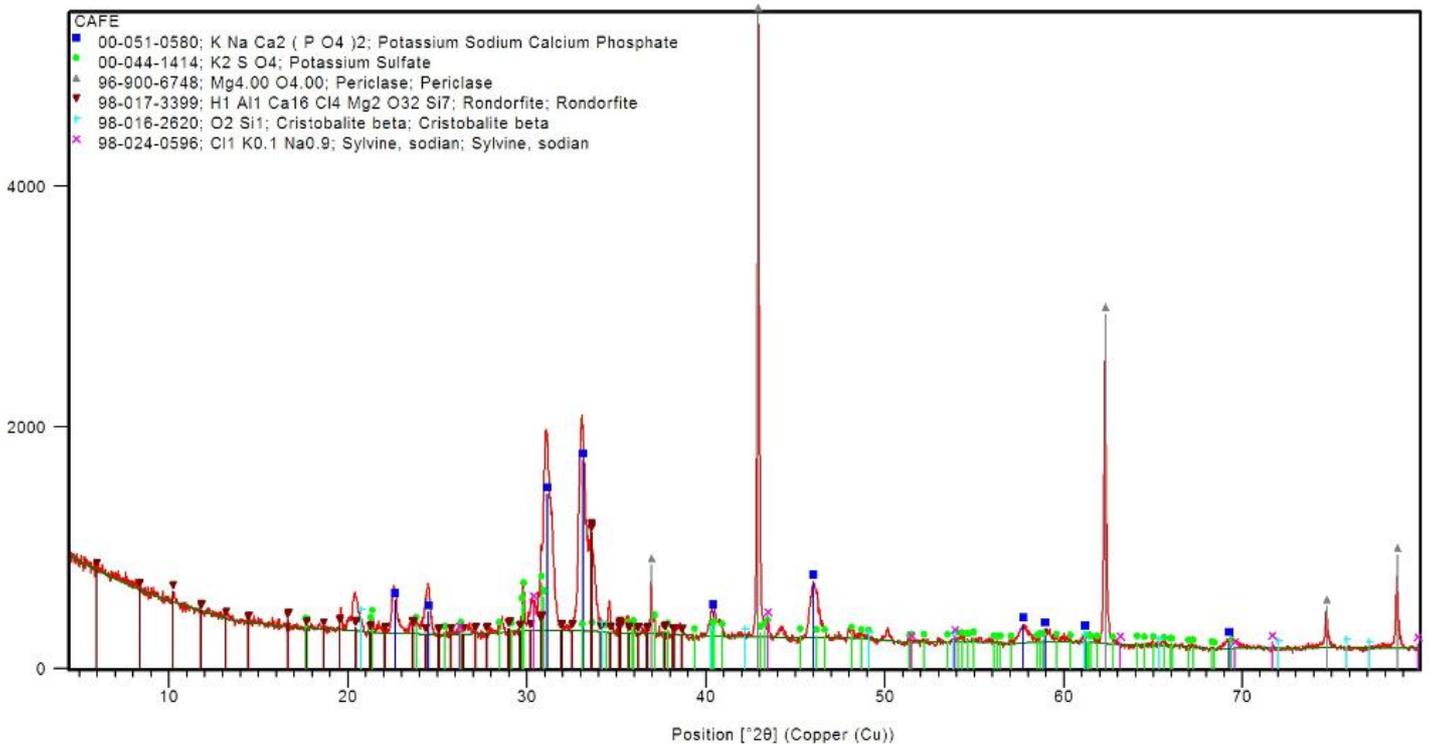


Figura 3. Resultados del ensayo de DRX con la muestra de residuos de café.

### 3.2. Determinación de la composición química

La determinación de la composición química del residuo de café ha sido determinada mediante Fluorescencia de Rayos X (FRX).

Esta técnica está basada en otro fenómeno de la interacción de los rayos X con la materia, el efecto fotoeléctrico.

La radiación incidente atenuada es debida a dos mecanismos fundamentales: uno es la absorción fotoeléctrica, que se traduce en la emisión, por la muestra irradiada de radiación de fluorescencia y de fotoelectrones.

La energía del fotón X incidente es la responsable de la expulsión de un electrón de una capa interna del átomo, produciéndose la consiguiente emisión de rayos X, al ocuparse la vacante electrónica con un electrón de un nivel más externo.

Al proceso de excitación con otra radiación X se le denomina Excitación secundaria, los electrones expulsados en este proceso reciben el nombre de fotoelectrones, y la radiación X producida por excitación con otra radiación X se le denomina radiación X secundaria o Radiación de Fluorescencia.

La aplicación práctica de este fenómeno es inmediata: si irradiamos con un haz de rayos X una muestra de composición desconocida, dicha muestra emitirá las radiaciones características de los elementos que la componen. Si se puede identificar la longitud de onda o energía de cada una de estas radiaciones características, se puede conocer los elementos que componen la muestra, y si se puede medir sus intensidades, se puede conocer sus respectivas concentraciones.

Los equipos que se utilizan para este fin son los Espectrómetros de Fluorescencia de rayos X.

En este estudio se ha utilizado un espectrómetro de fluorescencia de rayos X por dispersión de longitudes de onda, el cual pertenece a la clasificación de técnicas basadas en el efecto fotoeléctrico, y se basan en el estudio del espectro de fluorescencia de rayos X emitido.

El modelo utilizado es el PIONER S4 EXPLORER de Bruker, que permite el análisis químico cualitativo y cuantitativo desde el O al U en un amplio rango de concentraciones desde componentes mayoritarios a trazas.



Figura 4. Espectómetro de fluorescencia de rayos X.

El equipo está dotado de un sistema robotizado para la introducción de muestras en la cámara de medida que se encuentra a vacío.

La fuente para la excitación de la muestra es un tubo de rayos X con ánodo de rodio y ventana Be de 75  $\mu\text{m}$ . El tubo y el generador de rayos X están diseñados para proporcionar una salida máxima de 4 KW con un voltaje y corriente máximos aplicables de 60 KV y 150 mA.

El equipo dispone de un juego de filtros primarios (3 filtros de Cu de 200, 300 y 1000  $\mu\text{m}$  y 5 filtros de Al de 12.5, 100, 200, 500 y 800  $\mu\text{m}$ ), montados en un dispositivo que permite intercambiarlos automáticamente para eliminar componentes indeseados de la radiación del tubo, mejorando además la relación señal/ruido.

Máscara de 34 mm ("máscara del colimador", situada entre la muestra y el colimador) que elimina la radiación procedente del borde de la apertura del portamuestras.

Dos colimadores de 0,23° y 0,46°, y cinco cristales analizadores: OVO-55, PET, Ge, LiF200 y LiF220, montados en sendos dispositivos que permiten intercambiarlos automáticamente. El uso combinado de ambos componentes

estará en función del elemento a determinar teniendo en cuenta los requerimientos de intensidad y/o resolución de la señal.

El equipo está equipado con dos detectores (“Sealed Proportional Counter” y “Scintillation Counter”) cuyo movimiento está gobernado por un goniómetro de alta precisión que cubre la totalidad del rango de medida del instrumento. El uso de uno u otro estará en función del elemento a determinar.

En la siguiente imagen se puede ver la trayectoria que sigue el haz de rayos X a través de dichos componentes, así como una breve descripción de la función que desempeñan:

### Software SPECTRAPLUS

Es un paquete de programas específicos que permiten por un lado el control del equipo y por otro el desarrollo de métodos analíticos para la adquisición y posterior tratamiento de datos.

### Material Auxiliar

- Prensa hidráulica NANNETTI modelo MIGNON SS, para la preparación de muestras en forma de pastillas.
- Perladora CLAISSE FLUXY 30, para la obtención de perlas de vidrio a partir de la fusión de muestras en forma de polvo.

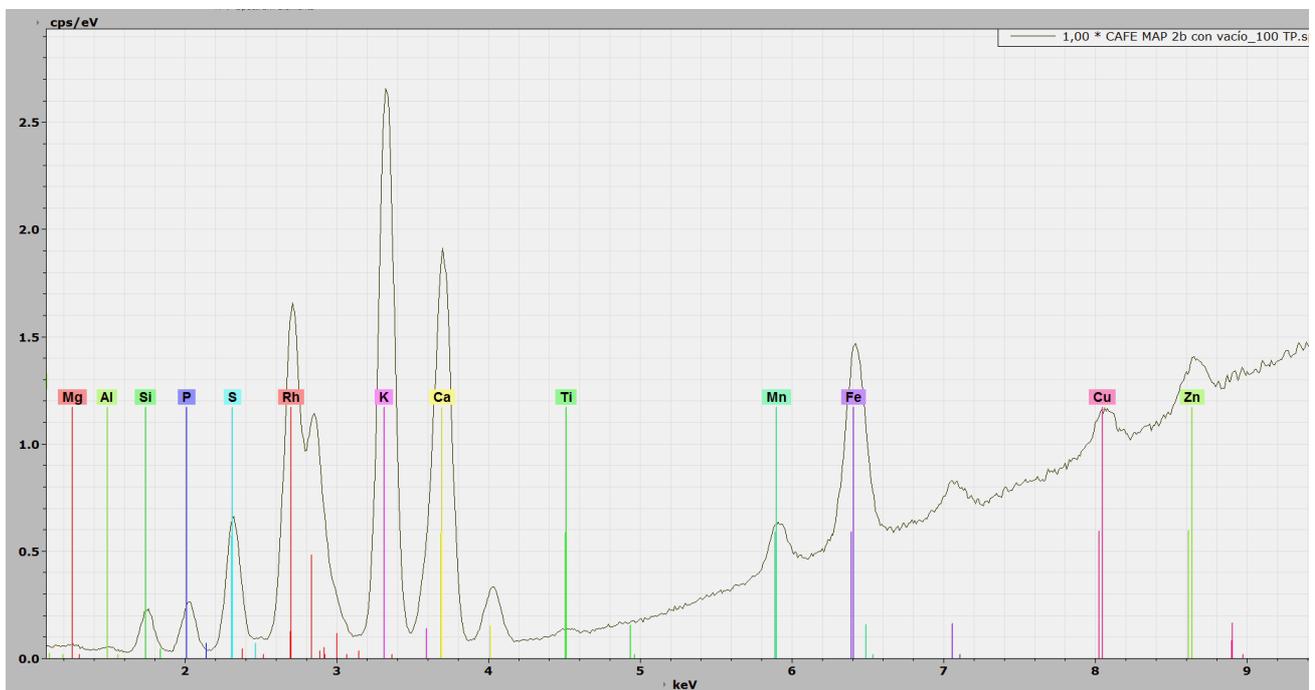
Como complemento del análisis se requiere determinar el % de pérdida por calcinación (LOI) con el objeto de cerrar el análisis al 100% en el proceso de evaluación de los resultados. Se trata de un método de optimización para forzar que la suma de todas las concentraciones se aproxime al 100%.

Las muestras se preparan en forma de pastillas mediante compactación en prensa.

El equipo utilizado, es llamado así porque el espectro de fluorescencia policromático emitido por la muestra al ser excitada por un haz de radiación producido por un tubo de rayos X, es descompuesto en sus componentes monocromáticas en función de sus longitudes de onda, al difractarse en un monocristal de espaciado conocido. El haz difractado para cada posición angular del monocristal incide sobre un detector, generalmente un detector de gas proporcional al flujo o de centello, que convierte los fotones en impulsos eléctricos.

De acuerdo con la ley de Bragg, anteriormente expuesta en el ensayo de DRX, midiendo el valor del ángulo  $\Theta$  al que se difracta cada una de las radiaciones que constituyen el espectro emitido por la muestra, como el espaciado del cristal analizador es conocido, se puede calcular la longitud de onda  $\lambda$  de cada una. Del análisis de estas longitudes de onda se puede conocer la composición cualitativa de la muestra, mientras que la medida de sus intensidades nos da la composición cuantitativa.

En el ensayo de FRX en laboratorio se obtuvieron los siguientes resultados:



**Figura 5. Representación gráfica de la composición química de la muestra de residuos de café obtenida mediante fluorescencia de rayos X.**

Los datos obtenidos vienen dados en la siguiente tabla:

| Stoich. conc.                  |              |              |              |             |             |             |              |              |              |             |             |             |      |
|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|------|
|                                | Mg           | Al           | Si           | P           | S           | K           | Ca           | Mn           | Fe           | Cu          | Zn          | Rh          | Sum  |
| CAFE MAP 5 con vacío_25 TP.spx | 0,16         | 0,04         | 0,06         | 0,12        | 0,19        | 1,65        | 1,11         | 0,05         | 0,27         | 0,04        | 0,04        | 0,00        | 3,73 |
| CAFE MAP 4 con vacío_25 TP.spx | 0,13         | 0,04         | 0,08         | 0,13        | 0,21        | 1,77        | 1,29         | 0,07         | 0,32         | 0,04        | 0,04        | 0,00        | 4,12 |
| CAFE MAP 3 con vacío_25 TP.spx | 0,13         | 0,03         | 0,06         | 0,13        | 0,20        | 1,71        | 1,39         | 0,06         | 0,25         | 0,04        | 0,04        | 0,00        | 4,03 |
| <b>Mean value:</b>             | <b>0,14</b>  | <b>0,04</b>  | <b>0,07</b>  | <b>0,13</b> | <b>0,20</b> | <b>1,71</b> | <b>1,26</b>  | <b>0,06</b>  | <b>0,28</b>  | <b>0,04</b> | <b>0,04</b> | <b>0,00</b> |      |
| <b>Std dev.:</b>               | <b>0,02</b>  | <b>0,01</b>  | <b>0,01</b>  | <b>0,00</b> | <b>0,01</b> | <b>0,06</b> | <b>0,14</b>  | <b>0,01</b>  | <b>0,04</b>  | <b>0,00</b> | <b>0,00</b> | <b>0,00</b> |      |
| <b>Std dev. rel. [%]:</b>      | <b>12,53</b> | <b>14,40</b> | <b>14,08</b> | <b>3,72</b> | <b>4,34</b> | <b>3,55</b> | <b>11,41</b> | <b>14,41</b> | <b>13,34</b> | <b>7,83</b> | <b>8,06</b> | <b>0,00</b> |      |

Tabla 1. Resultados obtenidos tras los ensayos realizados sobre muestras de residuos de café.

A continuación, se muestra la misma tabla que en la Figura 6 pero con los datos normalizados al 100%:

|                                | Mg           | Al           | Si           | P           | S           | K            | Ca           | Mn           | Fe           | Cu          | Zn          | Rh          | Sum    |
|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|--------|
| CAFE MAP 5 con vacío_25 TP.spx | 4,30         | 1,03         | 1,63         | 3,29        | 5,07        | 44,26        | 29,69        | 1,46         | 7,29         | 1,01        | 0,98        | 0,00        | 100,00 |
| CAFE MAP 4 con vacío_25 TP.spx | 3,15         | 0,99         | 1,86         | 3,21        | 5,01        | 42,99        | 31,28        | 1,71         | 7,82         | 1,02        | 0,97        | 0,00        | 100,00 |
| CAFE MAP 3 con vacío_25 TP.spx | 3,23         | 0,76         | 1,50         | 3,15        | 4,92        | 42,35        | 34,54        | 1,40         | 6,18         | 0,90        | 1,06        | 0,00        | 100,00 |
| <b>Mean value:</b>             | <b>3,56</b>  | <b>0,93</b>  | <b>1,66</b>  | <b>3,21</b> | <b>5,00</b> | <b>43,20</b> | <b>31,83</b> | <b>1,52</b>  | <b>7,10</b>  | <b>0,97</b> | <b>1,00</b> | <b>0,00</b> |        |
| <b>Std dev.:</b>               | <b>0,64</b>  | <b>0,15</b>  | <b>0,18</b>  | <b>0,07</b> | <b>0,07</b> | <b>0,97</b>  | <b>2,47</b>  | <b>0,16</b>  | <b>0,84</b>  | <b>0,07</b> | <b>0,05</b> | <b>0,00</b> |        |
| <b>Std dev. rel. [%]:</b>      | <b>18,05</b> | <b>15,66</b> | <b>10,96</b> | <b>2,23</b> | <b>1,50</b> | <b>2,24</b>  | <b>7,77</b>  | <b>10,74</b> | <b>11,79</b> | <b>6,83</b> | <b>5,20</b> | <b>0,00</b> |        |

Tabla 2. Resultados obtenidos tras los ensayos realizados sobre muestras de residuos de café y normalizados al 100%.

Cabe destacar que este método no detecta elementos químicos con número atómico inferior a 11.

### 3.3. Determinación de la composición química elemental (C, N, H, S)

La determinación de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre de las muestras de residuo de café se ha llevado a cabo por análisis químico elemental (C,N,H,S) mediante combustión en atmósfera rica en O<sub>2</sub>.

El equipo utilizado para la determinación es un Analizador Elemental modelo Flash EA1112 CHNS-O de Thermo Finnigan que permite el análisis químico cuantitativo de Nitrógeno, Carbono, Hidrógeno, Azufre y Oxígeno en muestras sólidas o líquidas, en un rango de concentraciones que abarca desde el 0.01% (100 ppm) al 100% del contenido total del elemento presente en la muestra.



Figura 6. Equipo de determinación de composición química elemental (CHNS).

El equipo dispone de dos canales, uno para la determinación NCHS y otro para la determinación de O, por los que, de forma continua y prefijada, pasa un flujo de He que actúa como gas portador. En cualquier configuración del equipo, uno de los canales actúa como canal analítico y el otro como canal de referencia. El canal analítico está conectado a un reactor de cuarzo, relleno de un material apropiado para cada tipo de determinación, que queda alojado dentro de un horno. Para la separación de los compuestos gaseosos resultantes, el equipo está dotado de columnas cromatográficas específicas para la determinación NCHS y O, alojadas en un horno a una temperatura de unos 65°C, cada una de las cuales a su vez está conectada a uno de los canales del detector de conductividad térmica.

La técnica instrumental de cromatografía utilizada por este equipo es la cromatografía de gases, la cual es adecuada para la separación de mezclas de sustancias gaseosas o fácilmente vaporizables. En esta técnica, una pequeña cantidad de la muestra a separar, se inyecta en la corriente de un gas inerte que atraviesa una columna cromatográfica capaz de separar los elementos de la mezcla, los cuales emergen de la columna a intervalos discretos y pasan a través del sistema de detección, en este caso de conductividad térmica.

Los componentes fundamentales de un cromatógrafo de gases son:

- Columna cromatografica.
- Fuentes de gas portador y sistema de control de gases.
- Sistema de control de temperatura.
- Sistema de introducción de muestras.

- Sistema de detección,
- Amplificador y sistema de recogida de datos.

El análisis cuantitativo se realiza a partir de la medición de las áreas de los picos del cromatograma, calculándose la concentración de un compuesto dado por interpolación en una curva concentración/área obtenida por inyección de concentraciones conocidas, diferentes de un patrón del compuesto que se trate de cuantificar.

El recurso está dotado del software necesario (software de interface de usuario Eager 300) para la selección de las condiciones de análisis y para la adquisición, tratamiento y evaluación de los datos obtenidos.

El equipo dispone de un muestreador para la introducción automatizada de muestras y para la pesada de muestras cuenta con una Microbalanza electrónica Mettler Toledo MX5 con un rango de pesada hasta 5.1g. y una precisión de +/- 1µg.

El Análisis Elemental es una técnica instrumental utilizada para la determinación del contenido total de Nitrógeno, Carbono, Hidrógeno, Azufre y Oxígeno (N, C, H, S y O) en muestras en estado sólido y líquido de muy diversa naturaleza.

La técnica permite, por un lado, la determinación simultánea de Nitrógeno, Carbono, Hidrógeno y Azufre, y por otro, la determinación de Oxígeno.

Tipos de análisis que se pueden llevar a cabo:

Determinación simultánea del porcentaje de Nitrógeno, Carbono, Hidrógeno y Azufre en muestra sólidas o líquidas (sustancias orgánicas, órgano metálicas, farmacéuticas, plásticos, polímeros, suelos y materiales agrícolas, sedimentos, aceites, fertilizantes, etc.) mediante el uso de patrones de concentración conocida

La cantidad de muestra necesaria para un análisis varía en función del tipo de material a analizar. Como guía: compuestos químicos, carbones, plásticos 2mg; muestras vegetales 5 mg; materiales refractarios 10 mg; suelos, sedimentos 20 mg; metales 50 mg.

La potencia calorífica superior (PCS) del residuo de café puede calcularse también a partir de la composición elemental mediante la ecuación de BOIE (ecuación X), que permite calcular el poder calorífico de un material a partir de su contenido en C, H, O, S, N:

$$PCS=84 [C] +227.65 [H] +26.5 [O]+25[S]+15[N]$$

La ecuación no tiene más de un 1,5 % de error, donde C y H son el porcentaje en peso de carbono e hidrogeno en el café seco y O= 100 –C-H- cenizas.

Esta ecuación se puede utilizar para determinar si la PCS del residuo puede contribuir significativamente a las necesidades de calor durante el proceso de fabricación.

Tras el ensayo se obtuvieron los siguientes resultados:

| ID | Muestra | Peso mgr | % C    | % H   | % N   | % S   | Peso mgr | % O    |
|----|---------|----------|--------|-------|-------|-------|----------|--------|
| 11 | Café    | 2,564    | 50,275 | 6,992 | 2,385 | 0,075 | 2,698    | 38,539 |

Tabla 3. Resultados obtenidos tras el ensayo de medición CHNSO sobre la muestra de residuos de café.

A continuación, se muestra una tabla comparativa de la composición elemental de los posos del café con otros tipos de biomasa y con carbón como representante de combustible fósil y alternativa directa en el mercado de generación térmica.

| (%) | Posos del café | Bagazo | Orujillo | Astilla de olivo | Algodón | Corteza de pino | Corteza de roble | Carbón |
|-----|----------------|--------|----------|------------------|---------|-----------------|------------------|--------|
| C   | 50,27          | 23,4   | 50,54    | 49,52            | 47,03   | 53,4            | 49,7             | 73     |
| H   | 6,99           | 2,8    | 5,86     | 5,9              | 5,42    | 5,6             | 5,4              | 5,38   |
| N   | 2,38           | 0,1    | 0,97     | 0,39             | 1,04    | 0,1             | 0,1              | 1,7    |
| S   | 0,075          | 0,6    | 0,07     | 0,05             | 0,13    | 0,1             | 0,2              | 0,85   |
| O   | 38,54          | 20     | 37,98    | 42,45            | 41,01   | 37,9            | 39,3             | 12,73  |

Tabla 4. Tabla comparativa de la composición elemental de distintos combustibles. Fuente: Elaboración propia con datos de IER para biomasa a excepción del café y datos extraídos de ThermoFischer Scientific (2017).

Como se puede apreciar, los posos del café destacan por su bajo contenido en azufre, fundamental a la hora de valorar el impacto medioambiental, puesto que, cuanto más azufre contenga el combustible, mayores serán las emisiones a la atmósfera de SO<sub>x</sub>. A su vez, es interesante hacer notar el alto contenido de carbono e hidrógeno del residuo, siendo su potencia calorífica elevada, parecida a la del coke de petróleo con la particularidad de que los posos de café tienen un contenido muy reducido en azufre.

### 3.4. Análisis Térmico

El análisis térmico engloba una serie de técnicas en las cuales, algún parámetro físico del sistema es medido de manera continua en función de la temperatura, mientras es sometido a una variación controlada de temperatura.

En el análisis térmico, los cambios en peso configuran la base de la Termogravimetría (TG), mientras que la medida de los cambios de energía constituye la base del Análisis Térmico Diferencial (DTA) y de la calorimetría diferencial de barrido (DSC). Estas dos técnicas son las más importantes del análisis térmico. Así, por ejemplo, la Termogravimetría nos dice cuándo una muestra pierde o gana peso y cuánto, mientras que el DSC nos dice si una reacción es endotérmica o exotérmica, y a menudo es capaz de medir la variación de calor.

La TG es una técnica en la cual el peso de una muestra se mide continuamente en función de la temperatura, mientras la muestra está sometida a un programa controlado de calentamiento o enfriamiento. En la curva TG se representa el peso (W) en el eje de ordenadas y la temperatura (T) en el eje de abcisas. A veces, se representa el tiempo (t) en lugar de T. La variación de peso se puede representar bien en mg o en porcentaje de muestra original.

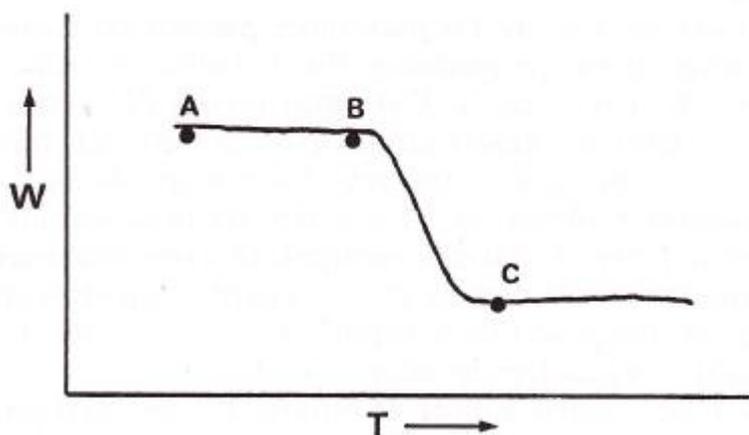


Figura 7. Curva característica de TG.

La Termogravimetría Derivada DTG, es una forma de expresar los resultados de TG por medio de la primera derivada de la curva, en función de la temperatura o el tiempo. La curva DTG representa por tanto  $dW/dt$ , esto es, la velocidad de variación de peso frente a la temperatura.

El DSC es una técnica muy similar al DTA y suministra un tipo de información semejante, por lo que se usa más a menudo para medidas cuantitativas de cambios de energía, por ello se denomina calorimetría diferencial. Se diferencia del DTA en que en lugar de medir la diferencia de temperatura entre la referencia y la muestra, el DSC mide la energía que es necesario suministrar a la muestra para mantenerla a idéntica temperatura que la referencia.

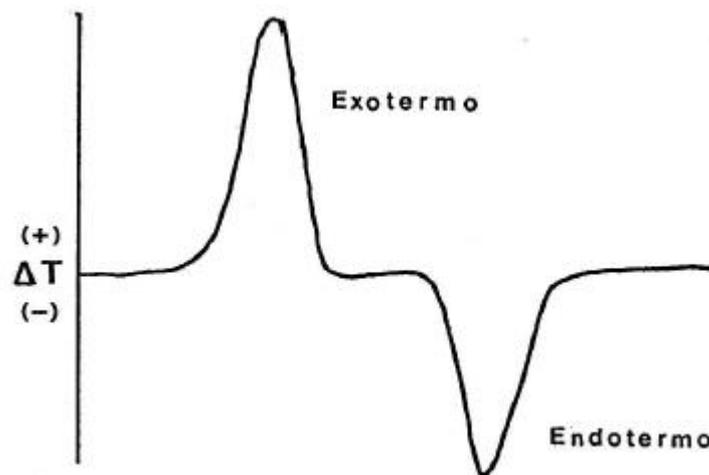


Figura 8. Curva característica DTA.

Existen una amplia serie de fenómenos que pueden ser estudiados por métodos térmicos, como por ejemplo:

- Determinación de datos térmicos: calor específico, conductividad térmica, calor de fusión, etc.
- Cambios estructurales. Los cambios estructurales que tienen lugar en transiciones solido-solido pueden ser endotérmicos o exotérmicos.
- Caracterización de materiales.
- Análisis cualitativo.
- Análisis cuantitativo.
- Control de calidad.

La instrumentación utilizada en TG, se denomina termobalanza. Básicamente consiste en una balanza de precisión, un horno controlado por un programador de temperatura, y un registro.

El método DSC detecta los cambios de entalpía que tienen lugar en una muestra cuando es calentada o enfriada en unas determinadas condiciones. En este método, el instrumento mantiene la muestra (S) y una referencia (R) a la misma temperatura. La cantidad de calor que hay que suministrar a S o a R para

mantener idénticas sus temperaturas, se mide de manera continua en todo el intervalo de temperaturas. Este registro de flujo de calor suministra una medida de la cantidad de energía absorbida o desprendida en una determinada transición, y por lo tanto suministra una medida calorimétrica directa. Por tanto, las técnicas DTA y DSC no son sinónimas, aunque sus campos de aplicación son prácticamente los mismos.

En las curvas DSC se representa en ordenadas el flujo de calor  $dH/dt$  expresado en  $mJ s^{-1}$  o  $mcal*s^{-1}$ , frente a la temperatura  $T$  o tiempo  $t$  en abscisas.

Las áreas de los picos DSC son proporcionales a los efectos térmicos que experimenta la muestra sometida a un programa de temperatura. Cuando una muestra se calienta a una velocidad programada, tanto en DSC como en DTA, la velocidad de flujo de calor en la muestra es proporcional a su capacidad calorífica  $C_p$ .

El instrumento utilizado en DSC se denomina analizador térmico diferencial y consta de los siguientes componentes:

- Bloque portamuestras, que incluye los portamuestras para la muestra y la referencia.
- Horno o dispositivo calefactor, con sensor de temperatura.
- Programador de temperatura, con sistema de control.
- Dispositivo para registro, con amplificador de señal.
- Control de atmósfera.
- Control de enfriamiento.

En cuanto a la descripción técnica del equipo utilizado, se describe a continuación.

El aparato utilizado para realizar el análisis térmico del residuo de café ha sido un analizador térmico de METTLER TOLEDO modelo TGA/DSC 1 capaz de medir simultáneamente valores TG y DSC de muestras de hasta 10  $\mu g$ . El módulo consta de un horno horizontal modelo HT1600 que trabaja entre RT-1600  $^{\circ}C$  y una ultramicrobalanza modelo MX5 que lleva conectado un sensor de Pt-Rh modelo DSC HSS2. La balanza está termostatizada mediante un baño a 22 $^{\circ}C$  y protegida por un flujo continuo de  $N_2$  de 20 ml/min.

El equipo dispone un robot de auto-muestreo con capacidad para 34 muestras y un controlador de gases modelo GC 200. La termobalanza lleva acoplada un espectrómetro de masas de PFEIFFER VACUUM, modelo THERMOSTAR GSD320. Los análisis se pueden realizar en aire, O<sub>2</sub> y N<sub>2</sub> en crisoles de Pt y alúmina de 30 y 70 µl. El software que controla el equipo y evalúa los resultados es el STARe versión 13.00 de METTLER TOLEDO STARe system. El equipo está acoplado a un espectrómetro de masa es de PFEIFFER VACUUM modelo ThermoStar TM GSD 320.

El rango de medida de la relación másica es 1-200. Consta de un detector Faraday y uno SEM. El capilar es de cuarzo y opera a 200 °C. La velocidad de escaneo es de 2-60 uma/s, dependiendo del tipo de escaneo que se realice. El vacío con una presión de trabajo en el orden de 10<sup>-6</sup> mbar se alcanza mediante una bomba de membrana y una turbo. El software que controla el equipo y evalúa los resultados es el Quadera® versión 4.5.

Los ensayos se realizaron en crisoles de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de 70 µl en el intervalo de temperaturas 30-1000 °C, con un flujo de O<sub>2</sub> de 50 ml/min y una velocidad de calentamiento de 10 °C/min. Se utilizaron masas de 25-27 mg.

En la siguiente gráfica se puede apreciar la curva TG junto con su primera derivada (DTG):

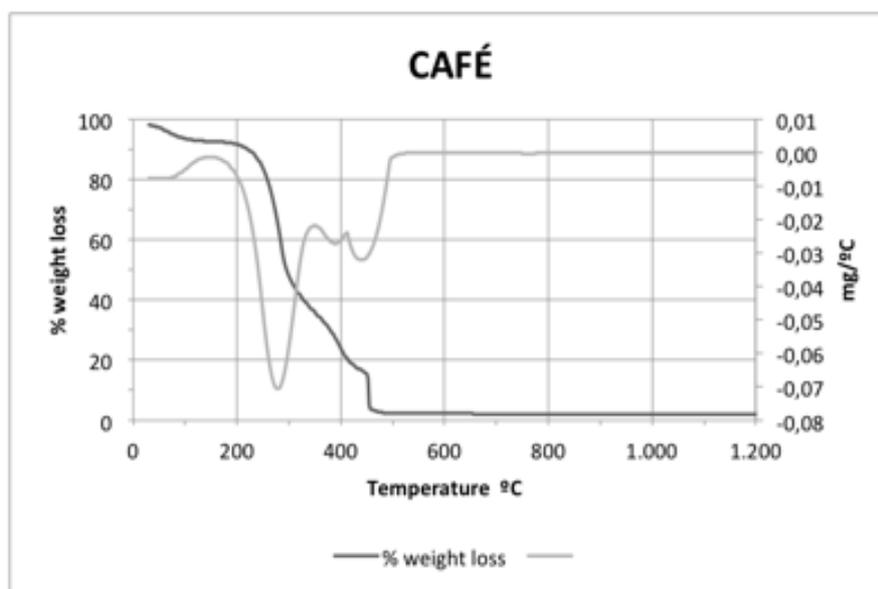


Figura 9. Curvas TG y DTG obtenidas en el ensayo sobre el residuo de café.

En la gráfica TG-DTG, se aprecian los picos asociados a pérdidas de masa. Se observa una pérdida inicial de materias volátiles de las muestras a temperatura inferior de 200 °C, donde tiene lugar la eliminación de la humedad y liberación de CO, CO<sub>2</sub>, y materiales extractables, estas pérdidas están de acuerdo a lo indicado por Mészáros et al, 2004. La combustión de la materia orgánica tuvo lugar a temperaturas entre 400 y 500 °C.

Asimismo, en la gráfica siguiente se pueden apreciar los resultados obtenidos tras el ensayo DSC junto con la TG anterior:

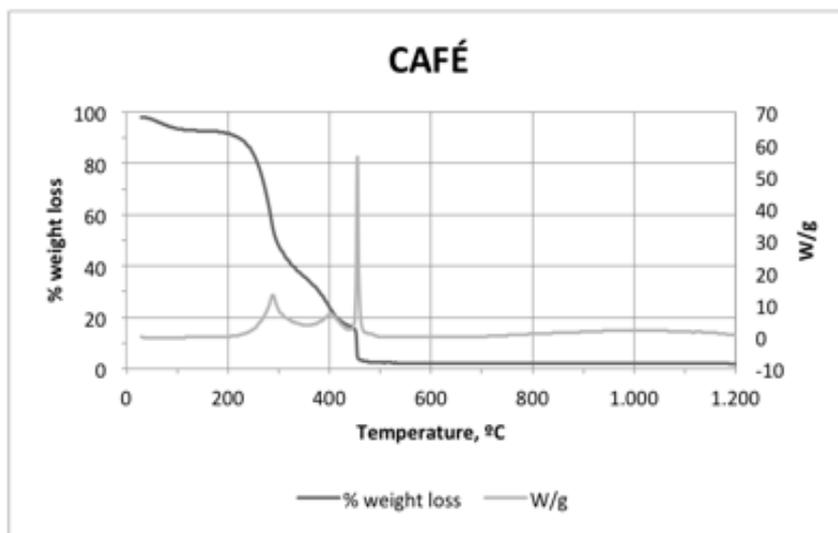


Figura 10. Curvas TG y DSC obtenidas en los ensayos con el residuo de café.

La curva de análisis térmico del residuo de café es típica de un combustible sólido. En ella podemos observar como el residuo puede ser totalmente combustionado a bajas temperaturas y en el amplio rango de 200-600 °C. Se observan dos picos exotérmicos acompañados de una pérdida total de peso asociados a combustiones. La pérdida total de peso es cercana al 100% lo cual indica que en su combustión apenas se producen cenizas.

### 3.5. Poder calorífico del residuo de café

La calidad de un combustible viene dada por la cantidad de energía que contiene y puede liberar cuando se le somete a un proceso de conversión energético.

El poder calorífico de un combustible es la cantidad de energía (KJ o Kcal) que produce la combustión de 1 kilo del mismo.

El poder calorífico superior (PCS) es el calor que desprende 1 kilo de combustible completamente seco. Contando con el calor latente de vaporización del agua formada por la combustión del hidrogeno (si lo hay).

El poder calorífico inferior (PCI) es el calor que desprende 1 kilo de combustible completamente seco. Sin contar con el calor latente de vaporización del agua formada por la combustión del hidrogeno (si lo hay).

La determinación del poder calorífico se ha realizado siguiendo la norma UNE-EN 14918 de febrero de 2011, para la determinación del poder calorífico de biocombustibles.

Esta norma europea especifica un método para la determinación del poder calorífico bruto de un biocombustible sólido a volumen constante y a una temperatura de referencia de 25 °C, usando una bomba calorimétrica calibrada mediante la combustión de ácido benzoico certificado.

El resultado obtenido es el poder calorífico bruto a volumen constante, con todo el agua de los productos de combustión como agua líquida. En la práctica, los biocombustibles se queman a presión constante (atmosférica) y el agua o bien no se condensa (se elimina como vapor con los gases de escape) o se condensa. En ambas condiciones, el calor de combustión clave que se usa es el poder calorífico neto del combustible a presión constante. También se puede usar el poder calorífico neto medido del combustible a volumen constante

El calorímetro consiste de una bomba de combustión montada, el vaso del calorímetro, el agitador del calorímetro, agua, sensor de temperatura y cables con conectores dentro del calorímetro que pueden ser necesarios para la ignición de la muestra o como parte del medidor de temperatura.

En la figura 11 se puede observar el esquema de una bomba calorimétrica.

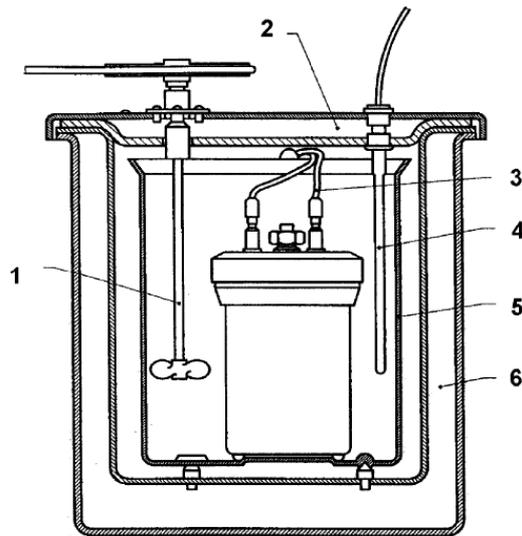


Figura 11. Bomba de combustión calorimétrica de tipo clásico con termostato.

1. Agitador.
2. Tapa del termostato
3. Conexiones para la ignición.
4. Termómetro.
5. Vaso del calorímetro.
6. termostato

La determinación calorimétrica consiste en dos experimentos separados, la combustión del material de calibración (ácido benzoico) y la combustión del biocombustible, ambas bajo las mismas condiciones.

El experimento consiste en llevar a cabo cuantitativamente una reacción de combustión (con una alta presión de oxígeno en la bomba) a productos de combustión definidos y en medir el cambio de temperatura provocado por el proceso total de la bomba.

Las mediciones de temperatura requeridas para la evaluación del aumento de temperatura corregido, se hacen mediante un periodo previo, un periodo principal (reacción) y un periodo posterior, tal y como se marca en la figura 12.

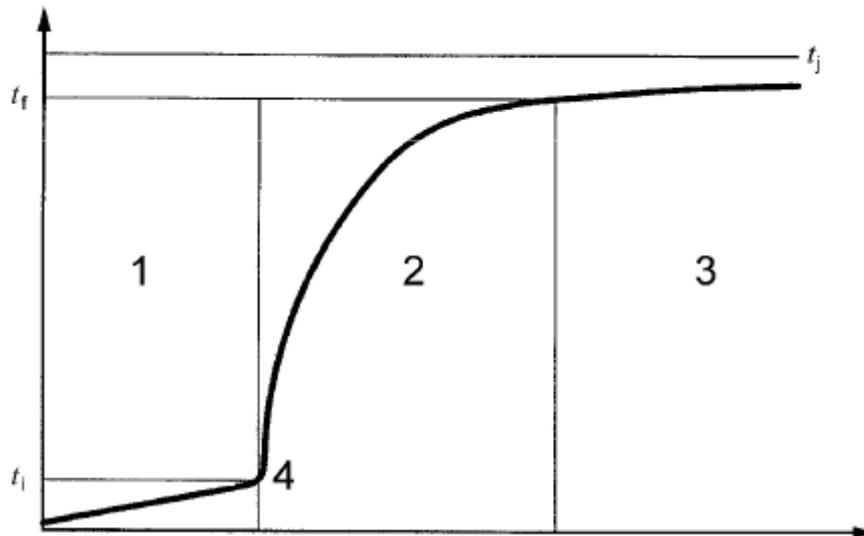


Figura 12. Curva de tiempo-temperatura (calorímetro isoperibólico)

1. Periodo previo.
2. Periodo principal.
3. Periodo posterior.
4. Ignición.

La potencia de agitación se debe mantener constante a lo largo de todo el ensayo.

El procedimiento general descrito en la norma es como sigue a continuación:

Consiste en pesar la pastilla de muestra, o cápsula en el crisol, con una resolución del 0,01 % y se pesa el hilo de ignición.

Después se conecta el trozo de hilo de ignición entre los electrodos de la bomba asegurándose que el hilo conductor establece el contacto adecuado, se coloca el crisol en su soporte y se coloca el hilo de manera que toque la pastilla de muestra o la cápsula.

Se añade una cantidad definida de agua destilada a la bomba, esta cantidad debe ser siempre exactamente la misma para la calibración y para los ensayos.

Se ensambla la bomba y se carga lentamente con oxígeno hasta una presión de  $3,0 \pm 0,2$  MPa, sin eliminar el aire inicial o se llena la bomba con oxígeno durante 30s, se cierra la válvula lentamente y se carga la bomba hasta una presión  $3,0 \pm 0,2$  MPa. Se usa el mismo procedimiento en la calibración y en los ensayos.

Se lleva el agua del calorímetro a la temperatura seleccionada y se llena el calorímetro con la cantidad necesaria, se monta la bomba en el vaso del calorímetro, después de colocar el vaso en el termostato.

Tan pronto como el calorímetro alcanza el estado estacionario, se comienza a tomar lectura de la temperatura. Normalmente, es suficiente con lecturas a intervalos de 1 min para verificar el funcionamiento adecuado de un sistema adiabático.

Al final del periodo previo, cuando se ha establecido la temperatura inicial,  $t_i$ , se inicia la combustión manteniendo pulsado el interruptor durante un tiempo.

Se continúa tomando lecturas de la temperatura a intervalos de 1 min. El tiempo correspondiente a  $t_i$  marca el comienzo del periodo principal.

Al final del periodo posterior, cuando se han completado todas las lecturas de temperaturas necesarias, se saca la bomba del calorímetro. Se libera lentamente la presión y se desarma la bomba. Se examina cuidadosamente el interior de la bomba, el crisol y cualquier residuo sólido en busca de signos de combustión incompleta. se quita y se mide cualquier resto del material de ignición que no haya reaccionado.

Se limpian los contenidos de la bomba cuantitativamente en un vaso de precipitado con agua destilada.



**Figura 13. Bomba calorimétrica de laboratorio empleada en la determinación del PC.**

Tras el ensayo realizado sobre diferentes muestras se obtuvieron los siguientes resultados:

|           | PCS, cal/g | PCI, cal/g |
|-----------|------------|------------|
| MUESTRA 1 | 4993.48    | 4610.13    |
| MUESTRA 2 | 4927.04    | 4543.70    |
| MUESTRA 3 | 4887.22    | 4503.88    |
| PROMEDIO  | 4935.91    | 4552.57    |
| DESV      | 53.68      | 53.68      |

Tabla 5. Resultados obtenidos en el ensayo de poder calorífico sobre las distintas muestras de residuo de café.

| cal/kg | Posos del café | Bagazo | Orujillo | Astilla de olivo | Algodón | Corteza de pino | Corteza de roble | Carbón |
|--------|----------------|--------|----------|------------------|---------|-----------------|------------------|--------|
| PCS    | 4936           | 2224   | 4819     | 4610             | 4297    | 5021            | 4654             | 5200   |

Tabla 6. Comparativa de PCS con otros tipos de biomasa y con el carbón.

De acuerdo a investigaciones de *Roa et al. (1999)*, los posos del café secos tienen un calor específico de 1,356 KJ/KgK, el cual será de utilidad a la hora de dimensionar el proceso de secado del residuo.

### 3.6. Humedad relativa en el residuo de café

Para el cálculo de la humedad relativa en el residuo de café se procedió a pesar una muestra húmeda y otra seca del residuo de café, obteniendo los siguientes resultados:

$$M1 = 172,6648 \text{ g}$$

$$M2 = 199,016 \text{ g}$$

$$M3 = 185,7354 \text{ g}$$

Dónde:

- M1: tara de la báscula
- M2: tara + muestra húmeda
- M3: tara + muestra seca

De este modo se puede calcular la humedad relativa en base húmeda:

$$H_R = \frac{M_2 - M_3}{M_2 - M_1} * 100 = \frac{199,016 - 185,7354}{199,016 - 172,6648} * 100 = 50,4\%$$

### 3.7. Densidad de los posos del café

Según el informe “*Preservation of roasted and ground coffee during storage*” publicado en Revista Brasileña de Ingeniería Agrícola y Ambiental, la densidad del café molido puede oscilar entre los 800 y 900 kg/m<sup>3</sup> aproximadamente (Figura 14).

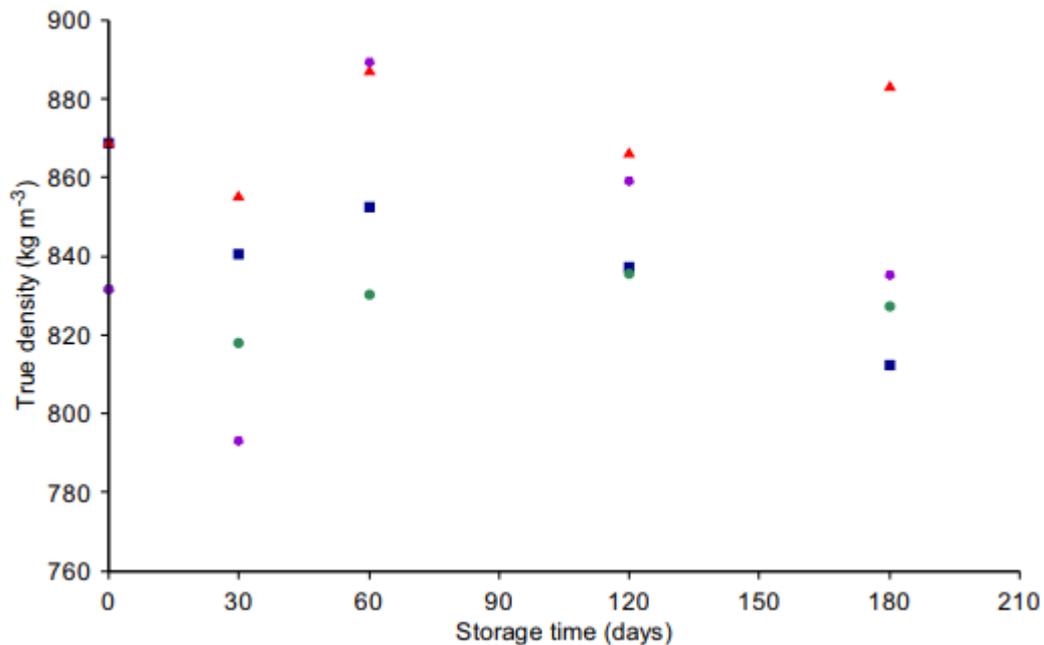


Figura 14. Densidad del café molido el función del periodo de almacenaje.

Con el objetivo de asegurar que el almacenamiento y transporte se diseñe con espacio suficiente, se asumirá un valor de densidad para el poso de café seco de 800 kg/m<sup>3</sup> en las distintas etapas.

## 4. Descripción del sistema

### 4.1. Etapas productivas

La producción de pellets en base a posos de café no difiere significativamente de otros procesos convencionales de producción de pellets de biomasa. El punto diferencial en la cadena de valor de los pellets de café viene en etapas previas de recolección, ya que los posos de café han de ser recogidos de desechos urbanos mediante un sistema de recolección diseñado *ad hoc* para ello.

Las etapas principales en una planta de producción de pellets son las siguientes (Veáse Figura “15”):

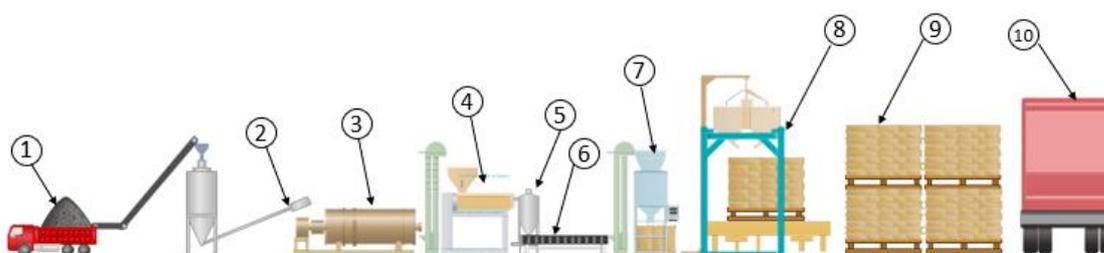


Figura 15. Esquema ilustrativo de las etapas del proceso. Esta representación es únicamente ilustrativa y no representa de forma exhaustiva todos los procesos a realizar ni la maquinaria a emplear. Fuente: Elaboración propia.

1º Recepción de los posos de café y almacenamiento en silo

2º Transporte tornillo infinito (spiral conveyer)

3º Secado

4º Peletizado

5º Enfriado

6º Tamizado

7º Ensacado

8º Paletizado

9º Almacenaje

10º Carga en camión para envío

## 4.2. Diseño de los procesos

La primera variable fundamental a la hora de diseñar los procesos es el ritmo de producción. Dicho ritmo de producción dependerá de las horas disponibles al año, la producción objetivo y la naturaleza de la producción (continua o en lotes). En este caso se ha decidido operar el máximo de horas posible para aumentar la eficiencia, con un ritmo de producción acorde con otras plantas de producción de biomasa y con una producción continua.

- **Producción anual**

De cara a establecer una producción anual concreta, se ha fijado una producción coherente con otras plantas del sector de la biomasa y posteriormente, se ha procedido a cotejarlo con el consumo de café en Madrid.

Según Avebiom, la Asociación Española de Valorización Energética de la Biomasa, las plantas productoras de pellets en España tienen una producción media de 17.500 tm/año. Algunas plantas como Naparpellets (Navarra) o Ecoforest (Madrid) cuentan con una capacidad instalada de 20.000 y 40.000 tm/año, respectivamente.

Por otro lado, en Reino Unido se encuentra la planta de producción de pellets de Biobean, en la localidad de Cambridgeshire, cuya capacidad de procesado de posos de café (nótese que esta cifra no es la producción final de pellets, sino el residuo de café recogido) de 50.000 tm/año.

En este trabajo se propone establecer una capacidad de producción anual de 25.000 toneladas de producto final, lo cual implicaría un procesado de residuos de café en forma de posos húmedos de 41.000 toneladas. A priori, estas cifras son coherentes con lo anterior mencionado.

Sin embargo, resulta inexcusable estimar si este volumen de recolección de posos de café es coherente con el consumo real de café en la Comunidad de Madrid.

Para esclarecer este punto, se ha hecho uso de un informe realizado por la cadena de cafeterías *Café & Té*: “Hábitos de Consumo de Café en España”. Este informe indica que, en Madrid, el 61% de la población es bebedora habitual de café. El informe entiende por bebedor habitual aquellas personas que beben una media de 3,6 tazas de café diarias entre semana y 2,7 los fines de semana. Dichas cifras equivalen a un consumo diario de 3,34 cafés al día.

Teniendo en cuenta que en la producción de una taza de café en cafetería se desechan una media de 30 g de posos de café húmedos. Se puede deducir que el procesado de 41.000 toneladas de posos de café al año, equivalen a 1.366 millones de tazas al año aproximadamente.

Consumo estimado de tazas de café al año en la comunidad de Madrid:

|   |         |
|---|---------|
| <b>Población (millones)</b>                     | 6,47    |
| <b>Bebedores habituales de café</b>             | 61%     |
| <b>Bebedores habituales de café (millones)</b>  | 3,94    |
| <b>Consumo medio diario (tazas/persona)</b>     | 3,34    |
| <b>Consumo total diario (millones de tazas)</b> | 13,18   |
| <b>Consumo anual (millones de tazas)</b>        | 4.809   |
| <b>Generación anual de posos húmedos (tm)</b>   | 144.276 |
| <b>Toneladas objetivo recolectadas</b>          | 41.000  |
| <b>Tasa de recolección</b>                      | 28%     |

**Tabla 7. Cálculo del consumo de tazas de café estimado en la Comunidad de Madrid.**

Como se puede apreciar en la tabla 7, la implementación de esta planta implicaría reciclar el 28% de los residuos del café generados en el sector de la hostelería en la Comunidad de Madrid. Aunque es un objetivo ambicioso, se considera un volumen congruente con la realidad del sector cafetero en España.

- **Horas disponibles**

A la hora de determinar las horas disponibles, se han de fijar en una primera instancia los días disponibles al año en base a festivos, periodos vacacionales, paradas por mantenimiento y unos días por imprevistos; y en segundo lugar las horas productivas reales en un día normal.

## Días disponibles

|   |     |
|---|-----|
| Días en un año                          | 365 |
| Festivos Comunidad de Madrid (días/año) | 14  |
| Vacaciones (días/año)                   | 20  |
| Parada mantenimiento (días/mes)         | 2   |
| Parada mantenimiento (días/año)         | 22  |
| Paradas extraordinarias (días/año)      | 3   |
| Días disponibles                        | 306 |

Tabla 8. Cálculo de días de producción disponibles en el transcurso de un año natural.

## Horas efectivas de producción diarias

|                              |    |
|------------------------------|----|
| Horas operativas / día       | 24 |
| Set up operativo (horas/día) | 3  |
| Coefficiente de seguridad    | 5% |
| Horas efectivas diarias      | 20 |

Tabla 9. Cálculo de horas productivas efectivas a lo largo de un día.

## Horas productivas anuales

$$\text{Horas productivas anuales} = \text{Días disponibles} * \text{Horas efectivas al día}$$

$$\text{Horas productivas anuales} = 306 * 20 = 6120 \text{ horas/año}$$

- Ritmo de producción

$$C_{\text{planta}} = \frac{\text{Producción anual}}{\text{Horas disponibles}}$$

$$C_{\text{planta}} = \frac{25.000 \text{ tm}}{6120 \text{ h}} = 4,08 \text{ tm/h}$$

Con el doble objetivo de evitar que la maquinaria de la planta opere al 100% de su capacidad, lo cual es muy desaconsejable en procesos continuos de producción, y de que haya margen para un posible aumento futuro de la producción, se ha decidido realizar el diseño del proceso productivo con un coeficiente de mayoración del 22,5%.

$$C_{\text{Mayorado}} = 4,08 * (1 + 22,5\%) = 5 \text{ tm/h}$$

Gracias al ritmo de producción mayorado empleado en el diseño, a la hora de seleccionar la maquinaria necesaria en las distintas etapas, se ha considerado flujo másico constante de 5 toneladas por hora a partir del proceso de secado; obviando así, pérdidas de masa en los demás procesos subsiguientes.

Sin embargo, debido al gran contenido de agua evaporado durante el proceso de secado, es necesario tener en cuenta esta variación del flujo másico en la línea de producción antes y después del secadero, para poder dimensionar correctamente las etapas previas. Conociendo las condiciones de humedad en la entrada y en la salida del proceso, podemos llegar a la siguiente ecuación.

Balance de materia a peso seco:

$$m_1 * X_1 = m_2 * X_2$$

Dónde,

$m_{1/2}$ : Flujos másicos a la entrada/salida del proceso de secado

$X_{1/2}$ : Fracciones másicas de peso seco a la entrada/salida del proceso de secado

Fijando un flujo másico del material a la salida de 5 tm/h y conociendo la humedad óptima para el proceso de peletizado del 18%, podemos hallar el flujo de alimentación al proceso de secado:

$$m_1 * 0,5 = 5 * 0,82$$

$$m_1 = 8,2 \text{ tm/h}$$

Dado que en las distintas etapas hay distintos niveles de humedad, a continuación se presenta una tabla con las distintas densidades del material procesado en función de su humedad.

|                                  | kg/m3  | Humedad |
|----------------------------------|--------|---------|
| Densidad del agua                | 997    | -       |
| Densidad del poso de café seco   | 800    | -       |
| Densidad del poso de café húmedo | 898,50 | 50%     |
| Densidad del poso de café húmedo | 835,46 | 18%     |

Tabla 10. Cálculo de la densidad de los posos de café en función de su humedad.

#### 4.2.1. Recepción de los posos de café y almacenamiento en silo

Aunque la logística de recolección queda fuera de este proyecto, se ha fijado un periodo de recolección de los posos de café y envío a planta de una vez por semana, en base a la operativa de *BioBean*, compañía que ya tiene implementado este sistema en Reino Unido.

Los posos de café recolectados llegarán a la planta y serán almacenados en silos. Se ha decidido emplear silos en estructura con techo, para resguardar el material de la lluvia, así como facilitar la carga y descarga del material. El silo a emplear estará automatizado para controlar de forma remota tanto los niveles como la descarga en el proceso de secado (Figura 16).

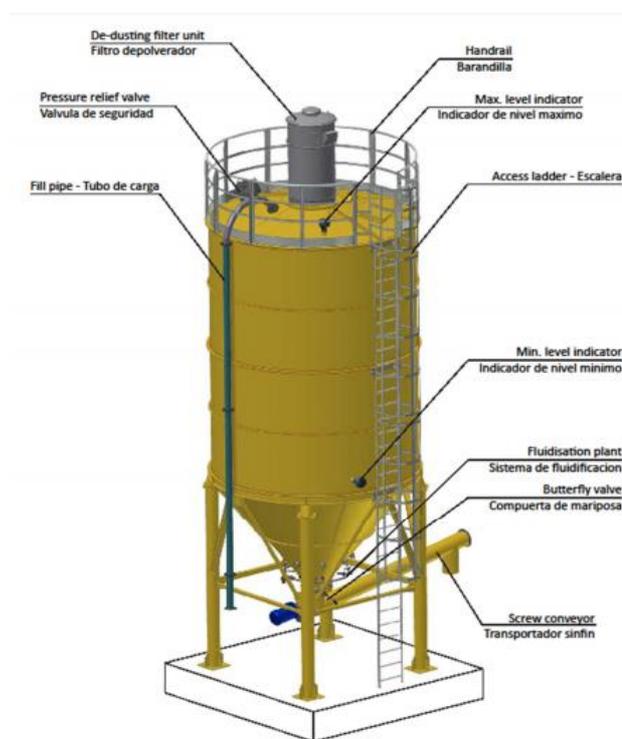


Figura 16. Silo de almacenamiento.

Con la producción diaria calculada y el periodo de recogida, podemos calcular cuánto material se recibe semanalmente y por tanto dimensionar los silos de almacenamiento de forma coherente.

|   |       |
|---|-------|
| Periodo de recogida (días)                          | 7     |
| Material procesado (tm/h)                           | 8,2   |
| Horas efectivas de producción (h/día)               | 20    |
| Material procesado (tm/día)                         | 164   |
| Material procesado (tm/sem)                         | 1.148 |
| Densidad material (kg/m <sup>3</sup> ; 50% Humedad) | 898,5 |
| Volumen requerido en silos (m <sup>3</sup> )        | 1.278 |

Tabla 11 Cálculo del volumen de posos de café a almacenar en silos.

Dado que los silos deben acoger residuos de café suficientes para abastecer una semana de producción, de acuerdo con la tabla 11, se obtiene un volumen adecuado para los silos. Nótese que este volumen de los silos no será mayorado con el fin de tener un stock de seguridad, ya que se considerada que dicho margen de seguridad ya se ha añadido al diseñar la planta para 5 toneladas de producción por hora, cuando la producción exacta objetivo es de 4,08 toneladas para el mismo periodo.

$$V_{Total\ silos} = n * V_{silos} = 1.278\ m^3$$

Dónde,

n: N° de silos a instalar

V<sub>silos</sub>: Volumen de almacenamiento de cada silo en particular

$$m_{Carga\ silos} = \rho * V_{Total\ silos} = 1.148\ tm$$

La decisión de dimensionado, número de silos y volumen de los silos, se ha decidido en base a catálogos disponibles, tomando en consideración el límite de carga de los mismos, y manteniendo un número de silos igual o inferior a 4.

## Detalles del silo empleado

|                  |              |
|------------------|--------------|
| Proceso          | Almacenado   |
| Producto         | Silo         |
| Marca            | TSE - Shelly |
| Modelo           | TCZK08206    |
| Capacidad (m3)   | 468          |
| Carga máx. (tm)  | 336          |
| Diámetro (m)     | 8,2          |
| Altura total (m) | 13,66        |
| Precio (\$)      | 20000        |

Tabla 12. Detalles del silo a emplear en planta.

Como se puede ver en la tabla 12, cada silo es capaz de alojar 468 m<sup>3</sup> de material o 336 tm. En este caso la condición más restrictiva es la de la carga máxima, por lo que se necesitarán 4 silos para albergar el material necesario para la producción de una semana.

|                       |      |
|-----------------------|------|
| Carga máx. (tm)       | 336  |
| Unidades              | 4    |
| Carga máx. Total (tm) | 1344 |
| Carga a almacenar     | 1148 |

Tabla 13. Cálculo de silos necesarios para el almacenaje de la materia prima.

En la tabla 13 se puede comprobar cómo los requisitos de almacenaje son cubiertos con estos 4 silos, quedando incluso un 17% de capacidad extra.

### 4.2.2. Transporte tornillo sin fin

Con el fin de garantizar un suministro homogéneo en la alimentación del proceso de secado, es necesario hacer uso de un tornillo sin fin (Figura 17) desde la descarga de la tolva en el silo hasta la entrada del secadero de la siguiente etapa.



Figura 17. Tornillo sin fin.

Para la aplicación en cuestión serán necesarios 5 de estos tornillos, uno por cada silo más uno central, cuya unión se realizará mediante un canalizador simple en forma de embudo.

$$Q_n = \frac{Q_{total}}{4} = \frac{m / \rho_{50\% Humedad}}{4} = \frac{8200 \text{ kg/h}}{4 \cdot 898,5 \text{ kg/m}^3} = \frac{9,12 \text{ m}^3/h}{4} = 2,2 \text{ m}^3/h$$

Una vez calculado el caudal por cada tornillo sin fin ( $Q_n$ ) y por el central ( $Q_{total}$ ), se procede a escoger un tornillo sin fin consultando el siguiente catálogo (Tabla 14) de tornillos sin fin de la marca Yongqing:

| Modelo | Diámetro espiral (Mm) | Paso (mm) | Velocidad giratoria espiral (r/min) | Capacidad (M3/h) | Potencia (kw) | Ángulo de inclinación (°) |
|--------|-----------------------|-----------|-------------------------------------|------------------|---------------|---------------------------|
| LS100  | 100                   | 100       | 140                                 | 2,2              | 2,2 --- 18,5  | ≤90°                      |
| LS125  | 125                   | 125       | 125                                 | 4,0              |               |                           |
| LS160  | 160                   | 160       | 112                                 | 8                |               |                           |
| LS200  | 200                   | 200       | 100                                 | 11               |               |                           |
| LS250  | 250                   | 250       | 90                                  | 22               |               |                           |
| LS315  | 315                   | 315       | 80                                  | 34               |               |                           |
| LS400  | 400                   | 355       | 71                                  | 64               |               |                           |
| LS500  | 500                   | 400       | 63                                  | 95               |               |                           |
| LS630  | 630                   | 450       | 50                                  | 150              |               |                           |
| LS800  | 800                   | 500       | 40                                  | 210              |               |                           |

Tabla 14. Catálogo de tornillos sin fin de la compañía Yongqing.

En base a lo anterior mencionado, las unidades escogidas para alimentar la etapa de secado desde los silos se muestran en la tabla 15:

|                               |                  |
|-------------------------------|------------------|
| Proceso                       | Transporte       |
| Productos                     | Tornillo sin fin |
| Marca                         | Yongqing         |
| Modelo                        | LS100            |
| Unidades                      | 4                |
| Capacidad (m <sup>3</sup> /h) | 2,2              |
| Potencia (kW)                 | 2,2              |
| Precio (\$)                   | 520              |
| Modelo                        | LS200            |
| Unidades                      | 1                |
| Capacidad (m <sup>3</sup> /h) | 12,4             |
| Potencia (kW)                 | 5                |
| Precio (\$)                   | 3000             |
| Precio Conjunto (\$)          | 5080             |

Tabla 15. Detalles de los tornillos sin fin necesarios.

### 4.2.3. Secado

A la hora de llevar a cabo el diseño de esta etapa, en primer lugar se ha de proceder a especificar el balance de materia que se producirá durante el mismo.

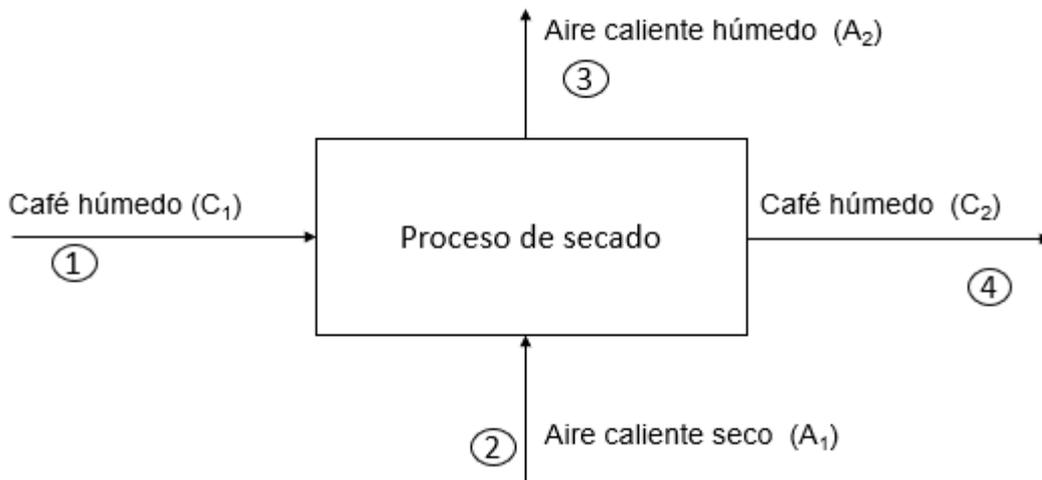


Figura 18. Diagrama de proceso de la etapa de secado.

Para el proceso de secado se empleará un secador de aire caliente, en el cual se introduce el material a secar, en este caso los posos del café, y mediante

transferencia de masa, calor o ambas se seca el material. El objetivo de este proceso será reducir la humedad de los posos que se encuentra al 50%, hasta el 18%, adecuada para el posterior proceso de peletizado. Para las propiedades del aire, se han empleado las medias de Valdaracete (Comunidad de Madrid), donde ya se encuentra una planta de producción de pellets.

Sin embargo, estos datos deberían ser modificados de acuerdo con el enclave final de implementación. Los parámetros clave para el establecimiento de los balances de materia y corrientes a determinar vienen dados en la siguiente tabla:

| Corriente           | C <sub>1</sub> | C <sub>2</sub> | A <sub>1</sub> | A <sub>2</sub> |
|---------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Caudal total (tm/h) | 8,2            | 5              |                |                |
| T (°C)              | 20             | 60             | 95             | 65             |
| P (bar)             | 1              | 1              | 1              | 1              |
| Fracción másica     | Poso seco X1   | 0,5            | 0,82           | -              |
|                     | Agua X2        | 0,5            | 0,18           | 0,1            |
|                     | Aire seco X3   | -              | -              | 0,9            |

Tabla 16. Detalle de las propiedades de las corrientes presentes en el proceso de secado.

- Balances de materia y energía

A continuación, se plantean los balances de materia relativos al conjunto del sistema con la materia total, el poso seco y el agua, durante un periodo de una hora.

Balance de material total:

$$m_1 + m_2 = m_3 + m_4$$

$$8200 + m_2 = m_3 + 5000$$

Balance de materia al agua:

$$m_1 * X_{2_1} + m_2 * X_{2_2} = m_3 * X_{2_3} + m_4 * X_{2_4}$$

$$8200 * 0,5 + m_2 * 0,1 = m_3 * X_{2_3} + 5000 * 0,18$$

De cara a proceder al balance de entalpías, resulta necesario fijar los calores específicos de cada material en el sistema. Dichos datos vienen dados en la siguiente tabla:

| Material      | Cp (KJ/KgK) |
|---------------|-------------|
| Agua          | 4,182       |
| Aire          | 1,012       |
| Posos de café | 1,356       |

Tabla 17 Valores de calor específico. Fuente: Elaboración propia.

Cálculo de las entalpías:

$$H_1 = X_{1_1} * H_{poso(20^{\circ}C)} + X_{2_1} * H_{Agua(20^{\circ}C)}$$

$$H_1 = 0,5 * 1,356 * (20 - 0) + 0,5 * 4,182 * (20 - 0)$$

$$H_1 = 55,38 \frac{KJ}{Kg}$$

$$H_4 = X_{1_4} * H_{poso(60^{\circ}C)} + X_{2_4} * H_{Agua(60^{\circ}C)}$$

$$H_4 = 0,82 * 1,356 * 60 + 0,18 * 4,182 * 60$$

$$H_4 = 111,88 \frac{KJ}{Kg}$$

$$H_2 = X_{3_2} * H_{aire\ seco(95^{\circ}C)} + X_{2_2} * H_{Agua(95^{\circ}C)}$$

$$H_2 = 0,9 * 1,012 * 95 + 0,1 * 4,120 * 95$$

$$H_2 = 126,22 \frac{KJ}{Kg}$$

$$H_3 = X_{3_3} * H_{aire\ seco(65^{\circ}C)} + X_{2_3} * H_{Agua(65^{\circ}C)}$$

$$H_3 = (1 - X_{2_3}) * 1,012 * 65 + X_{2_3} * 4,182 * (65 - 0)$$

Balance de energía:

$$m_1 * H_1 + m_2 * H_2 = m_3 * H_3 + m_4 * H_4$$

$$8200 * 55,43 + m_2 * 126,22 = m_3 * H_3 + 5000 * 111,88$$

Del sistema anterior se obtienen las siguientes incógnitas:

$$m_2, m_3, X_{2_3} \text{ y } H_3$$

Resolviendo el sistema anterior se obtienen los siguientes resultados:

$$m_2 = 418,3 \frac{kg}{h}$$

$$m_3 = 3618,3 \frac{kg}{h}$$

$$X_{2_3} = 0,9 \frac{kg}{kg}$$

$$H_3 = 458,2 \frac{KJ}{Kg}$$

Sabiendo las condiciones de las 4 corrientes, es conveniente afinar el cálculo teniendo en cuenta la ineficiencia del proceso de secado, ya que el proceso no es adiabático como se presupone en los balances de energía. Para ello, se mayorará la temperatura del aire de entrada en el proceso de secado de forma inversamente proporcional al rendimiento esperable en dicho proceso, y a continuación se mayorará el calor requerido para acondicionar el aire de entrada en un quemador previo.

$$n_{secadero} = 88\% \text{ (Nadia Cairo, 2012)}$$

$$n_{quemador} = 92\% \text{ (Catálogo Sedical)}$$

$$T'_2 = \frac{T_2}{n_{secadero}} = \frac{95 \text{ }^\circ\text{C}}{0,88} = 107,95 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$Q_{quemador} = \frac{m_2 * C_p * (T'_2 - T_{ambiente})}{n_{quemador}} = \frac{418,3 * 1,012 * (107,95 - 20)}{0,92}$$

$$Q_{quemador} = \frac{418,3 * 1,012 * (107,95 - 20)}{0,92} = 40,47 \text{ MJ/h}$$

Este calor necesario para acondicionar el aire de entrada en la etapa de secado puede ser obtenido mediante la propia producción de pellets con un consumo de 2,06 kg de pellets cada hora.

- Diseño del secadero a emplear

Para comenzar el diseño del equipo para el proceso de secado, es necesario escoger entre un formato de secado industrial de entre todos los posibles. La tabla 18, facilita la labor de decisión, estableciendo los diferentes criterios para la adecuada elección de un tipo de secadero para cada proceso de secado.

| Mode of operation | Generic type | Feed condition     |   |           | Specific dryer types         | Jacketed              | Suitable for heat-sensitive materials | Suitable for vacuum service | Retention or cycle time | Heat transfer method   | Capacity   | Typical evaporation capacity |        |
|-------------------|--------------|--------------------|---|-----------|------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|-----------------------------|-------------------------|------------------------|------------|------------------------------|--------|
|                   |              | 1                  | 2 | 3         |                              |                       |                                       |                             |                         |                        |            |                              |        |
| Batch             | Stationary   |                    |   |           | 1. Shelf                     | Yes                   | Yes                                   | Yes                         | 6.48 h                  | Radiant and conduction | Limited    | 0.15-1.0                     |        |
|                   |              |                    |   |           | 2. Cabinet                   | Yes                   | Yes                                   | Yes                         | 6.48 h                  | Convection             | Limited    | 0.15-1.0                     |        |
|                   |              |                    |   |           | 3. Compartment               | No                    | Yes                                   | No                          | 6.48 h                  | Conduction             | Limited    | 1.5-15                       |        |
|                   |              |                    |   |           | Truck                        | Yes                   | No                                    | Yes                         | 3.12 h                  | Conduction             | Limited    | 0.5-12                       |        |
|                   |              |                    |   |           | 1. Kettle                    | Yes                   | Yes                                   | Yes                         | 4.48 h                  | Conduction             | Limited    | 0.5-12                       |        |
|                   |              |                    |   |           | 2. Pan                       | Yes                   | Yes                                   | Yes                         | 3.12 h                  | Conduction             | Limited    | 0.5-12                       |        |
|                   |              | Drum               |   |           |                              | Rotary shell          | Yes                                   | Yes                         | Yes                     | 4.48 h                 | Conduction | Limited                      | 0.5-12 |
|                   |              |                    |   |           | Rotary internal              | Yes                   | Yes                                   | Yes                         | 4.48 h                  | Conduction             | Limited    | 0.5-12                       |        |
|                   |              |                    |   |           | Double cone                  | Yes                   | Yes                                   | Yes                         | 3.12 h                  | Conduction             | Limited    | 0.5-12                       |        |
|                   |              |                    |   |           | 1. Single drum               | No                    | Yes                                   | Yes                         | Very short              | Conduction             | Medium     | 5-50                         |        |
| Continuous        | Rotary       |                    |   |           | 2. Double drum               | No                    | Yes                                   | Yes                         | Very short              | Conduction             | Medium     | 5-50                         |        |
|                   |              |                    |   |           | 3. Twin drum                 | No                    | Yes                                   | Yes                         | Very short              | Conduction             | Medium     | 5-50                         |        |
|                   |              |                    |   |           | Rotary direct heat           | No                    | No                                    | No                          | Long                    | Convection             | High       | 3-110                        |        |
|                   |              | Conveyor           |   |           |                              | Rotary, indirect heat | No                                    | No                          | No                      | Long                   | Conduction | Medium                       | 15-200 |
|                   |              |                    |   |           | Rotary, steam tube           | No                    | Depends on material                   | No                          | Long                    | Conduction             | High       | 15-200                       |        |
|                   |              |                    |   |           | Rotary, direct-indirect heat | No                    | No                                    | No                          | Long                    | Conduction             | High       | 50-150                       |        |
|                   |              |                    |   |           | Louver                       | No                    | Depends on material                   | No                          | Long                    | Convection             | High       | 5-240                        |        |
|                   |              |                    |   |           | Tunnel belt, screen          | No                    | Yes                                   | No                          | Long                    | Convection             | Medium     | 1.5-35                       |        |
|                   |              | Suspended particle |   |           |                              | Rotary shelf          | Yes                                   | Depends on material         | No                      | Medium                 | Conduction | Medium                       | 0.5-10 |
|                   |              |                    |   |           | Trough                       | Yes                   | Depends on material                   | Yes                         | Varies                  | Conduction             | Medium     | 0.5-15                       |        |
|                   |              |                    |   | Vibrating | Yes                          | Depends on material   | No                                    | Medium                      | Convection              | Medium                 | 0.5-100    |                              |        |
|                   |              |                    |   | Turbo     | No                           | Depends on material   | No                                    | Medium                      | Convection              | Medium                 | 1-10       |                              |        |
|                   |              |                    |   | Spray     | No                           | Yes                   | No                                    | Short                       | Convection              | High                   | 1.5-50     |                              |        |
|                   |              |                    |   | Fluid bed | No                           | Yes                   | No                                    | Short                       | Convection              | High                   | -          |                              |        |
|                   |              |                    |   | bed       | No                           | Yes                   | No                                    | Short                       | Convection              | Medium                 | -          |                              |        |

Tabla 18. Selección de secadero. Fuente: Sinnott (2012).

De acuerdo con la tabla anterior y en base a las características del material a tratar y su producción, se ha decidido emplear un secadero de tipo rotatorio con corriente en paralelo.

Los secaderos rotatorios consisten en un cilindro rotatorio de grandes dimensiones, colocado con una ligera inclinación con respecto a la horizontal. A

través de estos secaderos se hace circular el material a secar que, gracias a aletas situadas en el interior del cilindro cae continuamente desde la parte superior del mismo propiciando el secado del material mediante convección. Esta convección se produce mediante el contacto con aire caliente que se inyecta desde una caldera, llevándose a cabo el proceso a presión ambiente. (Ver figura 19)

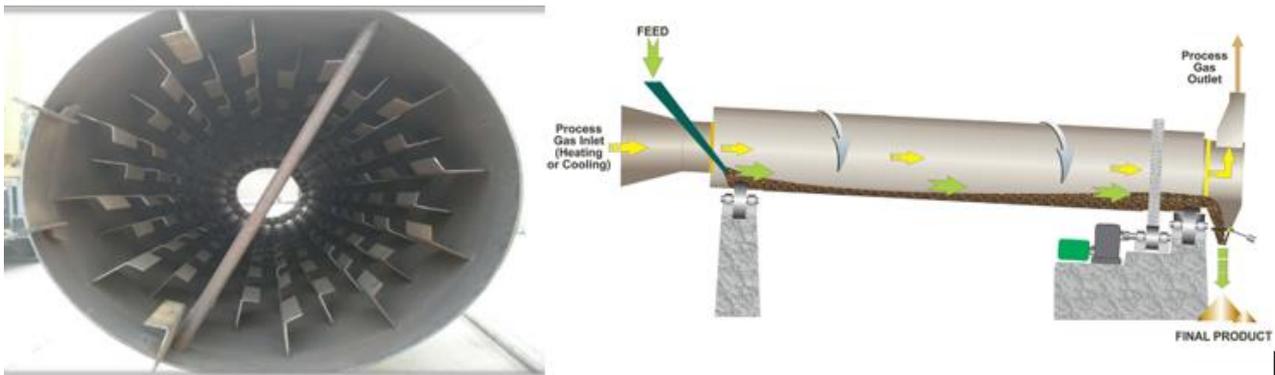


Figura 19. Interior de secador rotatorio y esquema genérico.

A partir de los requerimientos de evaporación calculados anteriormente (3,2 tm/h) y de las capacidades típicas de evaporación, se puede proceder a calcular el tamaño teórico, en términos de volumen del secador rotatorio necesario. Se ha decidido emplear el valor más intensivo en capacidad de secado de la tabla “18”:

$$C_{\text{secado}} = 150 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 * \text{h}}$$

Masa de agua a secar en régimen estacionario:

$$C_{\text{Agua}} = 3,2 \text{ tm/h}$$

Volumen de secadero requerido:

$$V_{\text{secado}} = \frac{C_{\text{Agua}}}{C_{\text{secado}}}$$

$$V_{\text{secado}} = \frac{3200}{150} = 21,33 \text{ m}^3$$

Consultando la siguiente tabla<sup>1</sup> de secaderos de la marca “Hongji”:

| Item (m)   | Productive capacity (t/h) | Revolution (r/min) | Motor power (Kw) | Install angle (.) | Temp.of final |
|------------|---------------------------|--------------------|------------------|-------------------|---------------|
| Φ1.0×5.0   | 0.5-1.2                   | 0.6-6              | 4                | 3-5               | ≤1.5%         |
| Φ1.2×6-10  | 1.5-3                     | 0.6-6              | 5.5              | 3-5               | ≤1.5%         |
| Φ1.5×12-18 | 3-5.5                     | 0.6-6              | 15               | 3-5               | ≤1.5%         |
| Φ1.8×12-18 | 5-6.5                     | 0.6-6              | 18.5             | 3-5               | ≤1.5%         |
| Φ2.2×12-22 | 7-12                      | 0.6-6              | 22               | 3-5               | ≤1.5%         |
| Φ2.4×15-20 | 9-15                      | 0.6-6              | 30               | 3-5               | ≤1.5%         |
| Φ3.0×25    | 16                        | 0.6-6              | 55               | 3-5               | ≤1.5%         |

Tabla 19. Especificaciones de secaderos. Fuente: Catálogo Hongji.

Por tanto, se decide escoger un secadero marca “Hongji” con las siguientes características:

$$D_{secadero} = 1,5 \text{ m}$$

$$L_{secadero} = 13 \text{ m}$$

$$V_{secadero} = 22,97 \text{ m}^3$$

### Resumen del equipo

|                |                   |
|----------------|-------------------|
| Proceso        | Secado            |
| Modelo         | Hongji (1,5mx13m) |
| Entrada (tm/h) | 8,2               |
| H (%)          | 50                |
| Salida (tm/h)  | 5                 |
| H (%)          | 18                |
| Potencia (kW)  | 15                |
| Precio (\$)    | 200.000           |

Tabla 20. Detalles del secadero escogido. Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.4. Peletizado

El proceso de peletizado es esencial para obtener un biocombustible fácil de manejar y con unas características adecuadas de tamaño y consistencia aptas para ser empleado en calderas de biomasa.

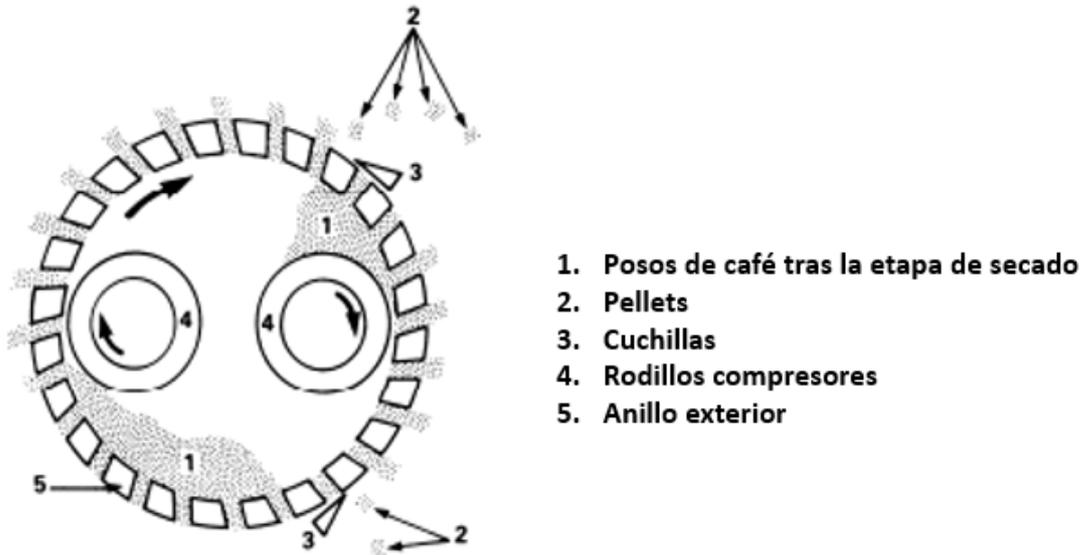


Figura 20. Representación del interior de una máquina de peletizado. Fuente: California Pellet Mill Co.

En el proceso de peletizado, tal y como se puede ver en la figura 20, los pellets se generan por la compresión del material (1) a través de cilindros situados en el anillo exterior (5) mediante los rodillos compresores (4). Para que este proceso resulte en unos pellets de calidad, es necesario que el material de alimentación tenga unas condiciones de humedad y temperatura adecuadas, lo cual se consigue gracias a la etapa anterior. La humedad y la temperatura favorecen la formación del pellet y su consistencia. Sin embargo, material de alimentación demasiado húmedo o caliente podría imposibilitar el funcionamiento de estos molinos. La humedad ideal en los procesos de peletizado suele estar comprendida entre el 10 y el 20%. En la figura 21 se muestra una ilustración del modo en que varía la consistencia del pellet en función de la humedad del material de alimentación.

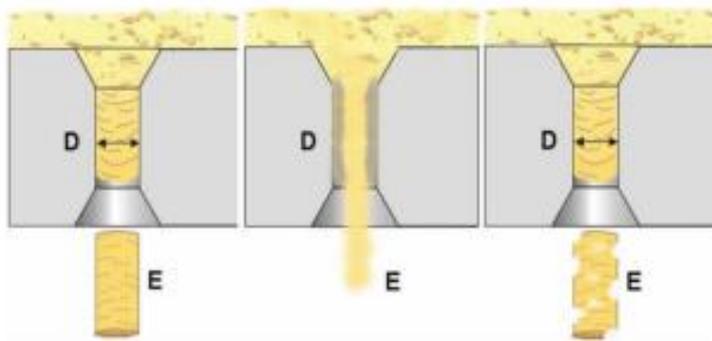


Figura 21. Ilustración de la consistencia del pellet en función de la humedad. Fuente: Ángela García-Maravar y Manuel Carpio, 2015.

En el caso de los pellets de café, se ha comprobado en laboratorio que con una humedad del 18% se consiguen los mejores resultados. Resulta fundamental filtrar el material de alimentación mediante imán para evitar entradas de metales en la máquina de peletizado.

|                                    | Units                         | A  | B                  |
|------------------------------------|-------------------------------|--|--------------------|
| Diameter and length, D and L       | mm                            | D06-10: $D \pm 1$ ; $3.15 \leq L \leq 40$<br>D12-25: $D \pm 1$ ; $3.15 \leq L \leq 50$ |                    |
| Moisture, M                        | % as received                 | M12 $\leq 12$  | M15 $\leq 15$      |
| Ash, A                             | % dry basis                   | A5.0 $\leq 5$  | A10 $\leq 10$      |
| Mechanical durability, DU          | % as received                 | DU97.5 $\geq 97.5$   | DU96.5 $\geq 96.5$ |
| Fines                              | % as received                 | F2.0 $\leq 2.0$  | F3.0 $\leq 3.0$    |
| Additives                          | % dry basis                   | Type and quantity  |                    |
| Lower heating value as received, Q | MJ/kg                         | Q14.1 $\geq 14.1$  | Q13.2 $\geq 13.2$  |
| Bulk density, BD                   | kg/m <sup>3</sup> as received | BD600 $\geq 600$   |                    |
| Nitrogen, N                        | % dry basis                   | N1.5 $\leq 1.5$  | N2.0 $\leq 2.0$    |
| Sulphur, S                         | % dry basis                   | S0.20 $\leq 0.20$  |                    |
| Chlorine, Cl                       | % dry basis                   | Cl0.20 $\leq 0.20$   | Cl0.30 $\leq 0.30$ |

Tabla 21. Normativa europea para la fabricación de pellets de alta calidad. Fuente: Ángela García-Maravar y Manuel Carpio, 2015.

Con las condiciones de la tabla 21 en cuanto a dimensiones del pellet y con el ritmo de producción dado (5 tm/h), se escoge una máquina de peletizado adecuada para el proceso consultando el catálogo de la marca TN-ORIENT (Tabla 22).

| Name         | Model   | Power (kw) | Capacity (Ton/Hour) | Pellet Diameter. (mm) | Ring Die's Diameter (mm) | Roller (Piece) |
|--------------|---|------------|---------------------|-----------------------|--------------------------|----------------|
| Pellet Mill  | MZLH420A  | 90         | 1-1.2               | 6-8                   | 420                      | 2              |
|              | MZLH420B  | 110        | 1.2-1.5             | 6-8                   | 420                      | 2              |
|              | MZLH420C  | 132        | 1.51-1.8            | 6-8                   | 420                      | 2              |
| Pellet Mill  | MZLH600A  | 160        | 2-2.5               | 6-8                   | 600                      | 2              |
|              | MZLH600B  | 190        | 2.5-3               | 6-8                   | 600                      | 3              |
|              | MZLH600C  | 240        | 3-3.5               | 6-8                   | 600                      | 3              |
| Pellet Mill  | MZLH800A  | 320        | 4-5                 | 6-8                   | 800                      | 4              |
|              | MZLH800B  | 440        | 6-7                 | 6-8                   | 800                      | 4              |
| <b>Other</b> | 2018 Carbon Black Pellet Machine/Wood Pellet Mill/Pellet Mill |            |                     |                       |                          |                |

Tabla 22. Especificaciones de maquinaria de peletizado. Fuente: Catálogo TN-Orient.

Dado que todas las peletizadoras del catálogo cumplen con las especificaciones de dimensiones de la normativa europea, se escoge la MZLH800A que es capaz de satisfacer el ritmo de producción.

### Resumen del equipo

|                       |            |
|-----------------------|------------|
| Proceso               | Peletizado |
| Marca                 | TN-ORIENTE |
| Modelo                | MZLH800A   |
| Capacidad (tm/h)      | 5          |
| Potencia (kW)         | 320        |
| Precio (\$)           | 80000      |
| Diámetro pellets (mm) | 6-8        |
| Longitud pellets (mm) | 30         |

Tabla 23. Detalles de la peletizadora escogida. Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.5. Enfriado

Desde la cámara de la máquina peletizadora, los pellets normalmente fluyen por gravedad a un dispositivo para enfriar y reducir un poco más la humedad de los

mismos para su correcto ensacado y posterior almacenado. Los pellets suelen abandonar la peletizadora a una temperatura máxima de unos 90°C, debido a lo que se conoce como fricción térmica (aumento de la temperatura en el proceso de peletizado debido al esfuerzo mecánico al que se someten los pellets). En la Figura 22 se puede ver el rango de dicha fricción térmica en el proceso de peletizado.

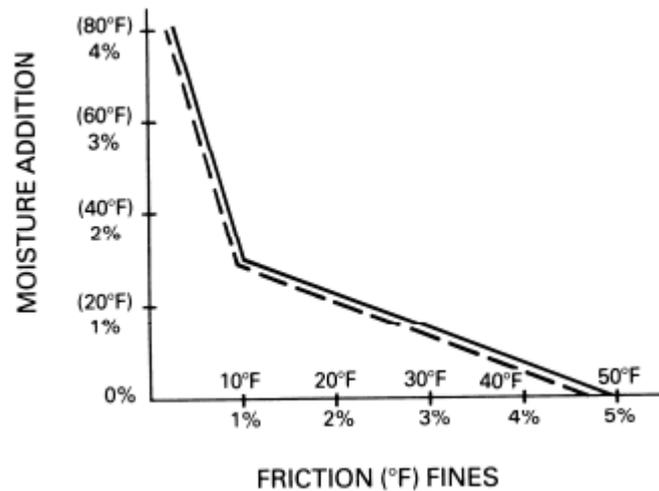


Figura 22. Curva humedad-fricción. Fuente: California Mill Co.

El incremento de temperatura durante el peletizado ha de ser determinado de forma experimental en planta, aunque suelen obtenerse valores máximos de unos 30°C de variación. Dado que los pellets salen de la etapa de peletizado con un 18% de humedad, siendo este nivel de humedad el máximo de los valores típicos en un proceso de esta naturaleza (California Pellet Mill), y teniendo en cuenta que la fricción térmica disminuye con la humedad, es posible asumir para el diseño de la etapa de enfriado una fricción térmica máxima de 30°C. Por tanto, la temperatura de los pellets recién fabricados será de 90°C, siendo la temperatura a la entrada de 60°C. Nótese que este valor de temperatura representa el máximo del rango, por lo que probablemente en la práctica esta temperatura no sea tan alta. Sin embargo, para el diseño es conveniente ser cautos en esta estimación.

Para el almacenamiento y manejo adecuado de los pellets, su humedad debe reducirse a 10-12% (-6/8%) y su temperatura aproximadamente hasta 15 °C por encima de la temperatura ambiente. En este caso de diseño, se ha considerado una temperatura objetivo en la etapa de enfriado de 35°C. Esto se logra pasando

una corriente de aire a través de un lecho de pellets. Esta corriente evapora el exceso de humedad, causando enfriamiento tanto por la evaporación del agua como por contacto con el aire. El aire duplica su capacidad de retener agua con cada 20 ° de aumento de temperatura. En otras palabras, cuanto más caliente es el aire, más humedad puede eliminar de los gránulos procesados. Por otro lado, su capacidad de enfriar los mismos será menor.

La mayoría de los refrigeradores se dividen en dos clases: vertical y horizontal. Para esta aplicación se hará uso de un refrigerador vertical, ya que es el de más extendido uso en la industria. El refrigerador vertical se compone de dos columnas de pellets, una al lado de la otra, sostenidas en posición por una malla de alambre en ambos lados. El aire se empuja a través de la columna de pellets por medio de un ventilador.

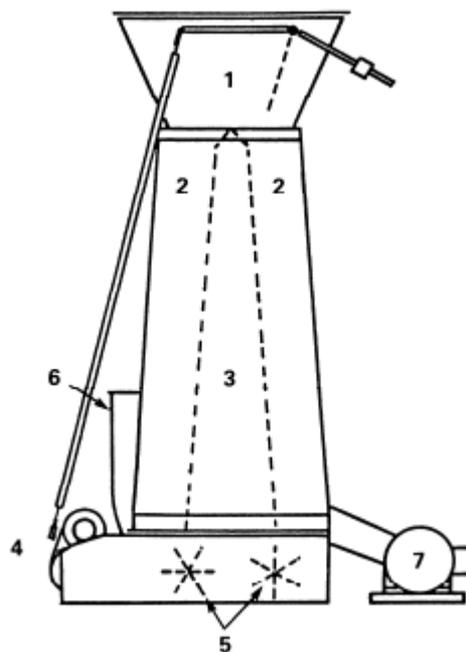


Figura 23. Estructura de enfriador. Fuente: California Pellet Mill Co.

1. Tolva y dispositivo de detección de nivel para mantener suministro de pellets por las columnas de enfriamiento
2. Columnas de enfriamiento
3. Cámara de aire
4. Control y accionamiento automático de las puertas de descarga

5. Puertas de descarga

6. Ventilador centrífugo

7. Motor de accionamiento del ventilador

La estructura típica de un refrigerador vertical es simple. Los pellets fluyen (generalmente por gravedad) desde la peletizadora hacia las columnas (Figura 23, elemento 2) y la tolva (Figura 23, elemento 1) por encima de las columnas hasta el dispositivo de detección de nivel cerca de la parte superior de la tolva. Los pellets que descansan en esta tolva actúan como sello de aire que obliga al aire de enfriamiento a pasar a través de la columna de pellets para alcanzar el ventilador (figura 23, elemento 6). Cuando la cantidad de pellets en la tolva alcanza el nivel adecuado del sensor se inicia el motor de accionamiento de la compuerta de descarga (Figura 23, elemento 4) que gira las compuertas de descarga (Figura 23, elemento 5) en la parte inferior de cada columna, con lo que se reduce el nivel de pellets en el enfriador casando el flujo continuo de acuerdo con el ritmo de producción de la planta.

Dado el ritmo de producción y los requisitos a la salida del enfriador se ha escogido el enfriador SKLB2.5 de la marca FDSP (Tabla 24).

| Type Model                | SKLB2.5                                    | SKLB4    | SKLB6    | SKLB8        | SKLB10       | SKLB12       |
|---------------------------|--|----------|----------|--------------|--------------|--------------|
| Output(t/h)               | 5  | 10       | 15       | 20           | 25           | 30           |
| Cooling volume ( m3)      | 2.5  | 4        | 6        | 8            | 10           | 12           |
| Cooling time(min)         | not shorter than 6-10 min                  |          |          |              |              |              |
| Temperature after cooling | not higher +3-5°C than chamber temperature |          |          |              |              |              |
| Power(kw)                 | 1.5+0.55                                   | 1.5+0.55 | 1.5+0.55 | 1.5+0.55+1.1 | 1.5+1.1+0.75 | 1.5+1.1+0.75 |

Tabla 24. Especificaciones del enfriador. Fuente: Catálogo FDSP.

## Resumen del equipo

|                         |          |
|-------------------------|----------|
| Proceso                 | Enfriado |
| Marca                   | FDSP     |
| Modelo                  | SKLB2.5  |
| Capacidad (tm/h)        | 5        |
| H salida(%)             | 12       |
| Temperatura salida (°C) | 35       |
| Potencia (kW)           | 2,25     |
| Precio (\$)             | 14.000   |

Tabla 25. Resumen del proceso de enfriado. Fuente: Elaboración propia.

### 4.2.6. Tamizado

El proceso de tamizado tiene como finalidad separar las distintas fracciones de un polvo o mezcla de polvos en función del tamaño de partícula. Tras la etapa de enfriado es necesario eliminar cualquier pellet que haya podido quebrarse o que no tenga las dimensiones adecuadas. Para ello, resulta necesario hacer pasar los pellets ya terminados y listos para ensacar por un proceso de tamizado. De todas las formas posibles de tamizado, ha sido necesario optar por un filtrado de tipo vibratorio lineal que permita la operación de la planta en continuo. La estructura clásica de este tipo de tamizadoras se puede ver en la figura 26.

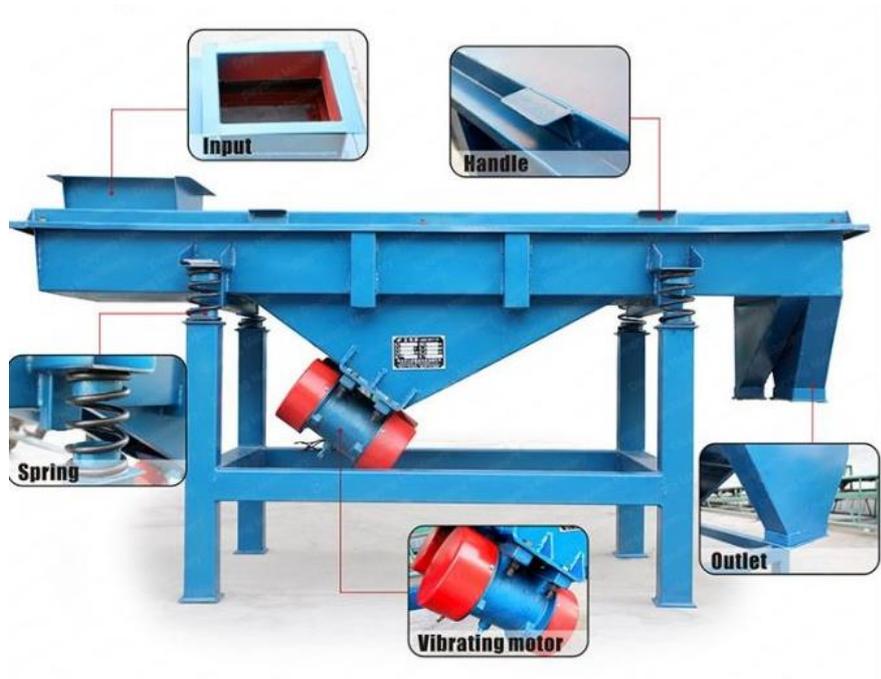


Tabla 26. Estructura de tamizadora. Fuente: DZSF.

Este tipo de máquinas puede contener en su interior hasta 5 capas para diferentes tipos de tamizados con diferentes tamaños de partículas. Para la aplicación en cuestión solo es necesaria una que nos permita dejar pasar únicamente los pellets en buen estado a un ritmo de 5 toneladas cada hora.

Con estos requerimientos se ha seleccionado la máquina de tamizado vibratorio lineal SFJH del catálogo de Leabon (Tabla 27), cuya maquinaria está específicamente diseñada para tamaño de malla acorde a la producción de pellets.

| Parámetro       | SFJH<br>80*2 | SFJH<br>100*2 | SFJH<br>110*2 | SFJH<br>125*2 | SFJH<br>130*2 | SFJH<br>150*2 | SFJH<br>155*2 |       |
|-----------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-------|
| Potencia (KW)   | 2,2          | 2,2           | 3             | 4             | 5             | 5,5           | 5,5           |       |
| Capacidad (T/h) | Pellets      | 5-8           | 8-10          | 10-12         | 12-15         | 12-16         | 16-22         | 22-30 |
|                 | Polvo        | 3-5           | 6-8           | 7-10          | 8-12          | 10-14         | 14-18         | 18-22 |

Tabla 27. Especificaciones de tamizadoras. Fuente: Leabon.

## Resumen del equipo

|                  |          |
|------------------|----------|
| Proceso          | Tamizado |
| Marca            | LEABON   |
| Modelo           | SFJH 80  |
| Capacidad (tm/h) | 5-8      |
| Potencia (kW)    | 2,2      |
| Precio (\$)      | 2.000    |

Tabla 28. Resumen del proceso de tamizado. Fuente: Elaboración propia.

### 4.2.7. Ensacado

Una vez finalizados los pellets, es necesario envasarlos de un modo adecuado para su uso final. Este tipo de pellets están orientadas principalmente a ser quemados en calderas de biomasa. La norma en este mercado es la compra de sacos de 15 kg (Carlos Antoranz Castro, 2013). Por tanto, el ritmo de ensacado ( $C_{sacos}$ ) dada la producción de pellets dada se puede calcular de la siguiente manera:

$$C_{sacos} = \frac{5.000 \text{ kg/h}}{15 \text{ kg}} = 333 \text{ sacos/hora}$$

Para las etapas relativas al empaquetado se ha decidido emplear maquinaria de la empresa MF Tecno, ya que proveen líneas automatizadas completas para estos procesos.

## Resumen del equipo

|                     |               |
|---------------------|---------------|
| Proceso             | Ensayado      |
| Marca               | MF Tecno      |
| Modelo              | MF IABA 600/F |
| Capacidad (sacos/h) | 500           |
| Sacos (mm x mm)     | 350 x 600     |
| Capacidad (kg/saco) | 15 kg         |
| Stack sacos         | 300           |
| Potencia (kW)       | 8             |
| Precio (\$)         | 2.000         |

Tabla 29. Resumen del proceso de ensacado. Fuente: Elaboración propia.

Debido a la capacidad reducida de la línea de ensacado para almacenar sacos vacíos (300 sacos), es necesario contar con un operario reponiendo los mismos cada hora si la producción es de 4 toneladas la hora o cada hora y 6 minutos si se cuenta con la producción mayorada de diseño de 5 toneladas por hora.

## 4.2.8. Paletizado

En el caso de la composición de los palés también se contará con una línea de paletización automática de la marca MF Tecno (Figura 24).



Figura 24. Estructura de la línea de paletizado. Fuente: Catálogo de MF Tecno.

El estándar en la industria de pellets es componer palés de 72 sacos de 15 kg, 1.080 kg por cada palé. Así, se puede calcular el ritmo requerido de paletizado ( $C_{\text{paletizado}}$ ):

$$C_{\text{palés}} = \frac{333 \text{ sacos}/h}{72 \text{ sacos}} = 4,62 \text{ palés}/\text{hora}$$

## Resumen del equipo

|                     |            |
|---------------------|------------|
| Proceso             | Paletizado |
| Marca               | MF Tecno   |
| Modelo              | MF PCA 700 |
| Capacidad (sacos/h) | 700        |
| Capacidad (palés/h) | 9,72       |
| Stack palés         | 15         |
| Potencia (kW)       | 12         |
| Precio (\$)         | 80.000     |

Tabla 30. Resumen del proceso de paletizado. Fuente: Elaboración propia.

Debido a la capacidad reducida de la línea de paletizado para almacenar palés vacíos (15 palés), es necesario contar con un operario reponiendo los mismos cada 3,25 horas.

### 4.2.9. Almacenaje

A la hora de almacenar los palés con el producto terminado en la planta se asumirá un periodo de distribución de una semana. Con el ritmo de producción y el tamaño de los palés, se puede dimensionar el área de almacenado (Tabla 31).

|                                     |           |
|-------------------------------------|-----------|
| Dimensiones palé (m)                | 1,1 x 1,4 |
| Altura palé (m)                     | 1,8       |
| Base palé (m <sup>2</sup> )         | 1,54      |
| Producción semanal (palés)          | 648       |
| Niveles                             | 2         |
| Altura apilamiento                  | 3,6       |
| Espacio requerido (m <sup>2</sup> ) | 498,96    |

Tabla 31. Dimensionado del área de almacenaje. Fuente: Elaboración propia.

Nótese que este espacio puede ser notablemente reducido aumentando la frecuencia de distribución. Por ejemplo, en caso de rellenar un camión con capacidad para 33 palés cada vez que hubiese stock necesario, harían falta menos de 26 m<sup>2</sup> de espacio de almacenamiento.

También resulta necesaria una carretilla transportadora eléctrica para transportar y apilar los palés. Los detalles de la carretilla escogida se muestran a continuación (Tabla 32)

|             |                           |
|-------------|---------------------------|
| Elemento    | Carretilla transportadora |
| Marca       | SNSC                      |
| Modelo      | FB 20                     |
| Precio (\$) | 11.000                    |

Tabla 32. Detalles de la carretilla transportadora a emplear en el almacenaje. Fuente: Elaboración propia.

## 5. Impacto medioambiental

Indudablemente, la biomasa térmica supone una reducción de las emisiones de GEI (Gases de Efecto Invernadero), con respecto a combustibles fósiles. Esto se debe a que el CO<sub>2</sub> liberado durante su combustión es el almacenado durante el crecimiento de la propia biomasa, por lo que se considera que tienen unas emisiones neutras de este gas. Además, la cantidad de partículas contaminantes, como el azufre, en el interior de estos combustibles es significativamente inferior a sus alternativas fósiles. Sin embargo, para computar debidamente el impacto generado por la biomasa, es necesario contabilizar la energía consumida en el tratamiento de la biomasa en el proceso de peletizado. Para ello, Avebiom ha desarrollado una herramienta de cálculo en formato Excel que se ha empleado para estimar el ahorro de emisiones de GEI gracias al uso de posos de café en lugar de combustibles fósiles.

A continuación, se explicarán detalladamente los distintos pasos requeridos por este instrumento de cálculo. En amarillo se muestran las celdas a completar por el usuario.

En primer lugar (Tabla 33), se ha de introducir la producción objetivo de pellets y el poder calorífico inferior de los mismos (PCI).

|  |        |  |
|--|--------|--|
| <b>Producción anual total</b>                    |        |  |
| Pellets  | 25.000 | [t/a]  |
| Poder Calorífico Inferior en Base Seca (PCI B.S) | 19,06  | [MJ/kg] (Valor del análisis de la inspección de los pellets) |

Tabla 33. Cálculo de la producción energética anual. Fuente: Calculadora Avebiom.

Posteriormente (Tabla 34), se han de introducir las emisiones relativas al abastecimiento de la planta. Dado que la logística de aprovisionamiento no está

comprendida en el objeto de este proyecto, la distancia media hasta la planta se ha estimado como la distancia entre Valderacete, dónde a priori se podría situar esta planta, y Collado Villalba, considerando esta distancia un rango máximo de recorrido del aprovisionamiento.

| Consumo de energía correspondiente al suministro de materia prima                       |        |                  |                        |
|---|--------|------------------|------------------------|
| Transporte / Suministro biomasa   | [t/a]  | media transporte | [gCO <sub>2-eq</sub> ] |
| Materia prima producida en el emplazamiento de la planta (sub-producto) desde el monte) |        |                  | No contribuye          |
| 40 t camión (Diesel)  | 41.000 | 110              | 369.594.500            |
| 12 t camión (Diesel)  |        |                  | 0                      |
| Transporte mat. Prima por barco pequeño   |        |                  | 0                      |
| Transporte en barco transoceanico   |        |                  | 0                      |
| Transporte por ferrocarril (mix eléctrico europeo)                                      |        |                  | 0                      |
| CO2 totales debidos al suministro de biomasa  |        |                  | 369.594.500            |

Tabla 34. Cálculo de la energía gastada en el abastecimiento de la planta. Fuente: Calculadora Avebiom.

En el siguiente paso se contabiliza el consumo eléctrico de la planta durante un año. Para ello, se ha realizado un presupuesto eléctrico de los distintos equipos de la línea de producción y se le ha aplicado un coeficiente de mayoración para tener en cuenta la alimentación de procesos secundarios no cubiertos en este trabajo y demás utilidades básicas.

| Consumo eléctrico                         | kW               |
|---|------------------|
| Tornillos sin fin                         | 4 x 2,2 + 1 x 5  |
| Secado                                    | 15               |
| Peletizado                                | 320              |
| Enfriado                                  | 2,25             |
| Tamizado                                  | 2,2              |
| Enzacado                                  | 8                |
| Paletizado                                | 12               |
| <b>Total potencia línea de producción</b> | <b>373,25</b>    |
| <b>Horas productivas anuales</b>          | <b>6.120</b>     |
|   | <b>kWh</b>       |
| <b>Consumo eléctrico anual</b>            | <b>2.284.290</b> |

Tabla 35. Estimación del consumo eléctrico anual en la línea principal de producción. Fuente: Elaboración propia.

Coeficiente de mayoración:

$$k = 1,5$$

Consumo eléctrico anual estimado:

$$E_{el\acute{e}ctrica} = k * (\text{Consumo l\acute{i}nea de producci\acute{o}n})$$

$$E_{el\acute{e}ctrica} = 1,5 * 2.284,29 = 3.426,43 \text{ MWh}$$

Para esta parte del proceso de c\`alculo, no solo es necesario estimar el consumo el\`ectrico, sino tambi\`en las emisiones medias de CO<sub>2</sub> asociadas a la producci\`on de cada MWh consumido. La informaci\`on estad\`istica relativa a estas emisiones puede ser encontrada en la tabla 36.



### Emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a la generaci\`on anual nacional

|   | 2015              | 2016              | 2017              | 2018              |
|---|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Carb\`on  | 50.149.589        | 35.616.709        | 42.936.455        | 11.869.514        |
| Fuel + Gas <sup>(1)</sup>   | 5.257.557         | 5.491.480         | 5.695.781         | 2.172.938         |
| Ciclo combinado <sup>(2)</sup>  | 12.154.925        | 12.069.345        | 15.036.167        | 4.253.053         |
| T\`ermica renovable <sup>(3)</sup>  | -                 | -                 | -                 | -                 |
| T\`ermica no renovable/Cogeneraci\`on y resto/Cogeneraci\`on <sup>(3)</sup> | 9.416.313         | 9.585.446         | 10.423.065        | 4.381.178         |
| Residuos no renovables  | 595.226           | 625.672           | 625.839           | 239.312           |
| Residuos renovables   | 196.332           | 188.495           | 210.482           | 80.801            |
| <b>Emisiones (tCO<sub>2</sub>)</b>  | <b>77.769.941</b> | <b>63.577.147</b> | <b>74.927.789</b> | <b>22.996.795</b> |
| <b>Factor de emisi\`on de CO<sub>2</sub> (tCO<sub>2</sub>/MWh)</b>          | <b>0,290</b>      | <b>0,242</b>      | <b>0,285</b>      | <b>0,209</b>      |

<sup>(1)</sup> En el sistema el\`ectrico de Baleares y Canarias se incluye la generaci\`on con grupos auxiliares.

<sup>(2)</sup> Incluye funcionamiento en ciclo abierto. En el sistema el\`ectrico de Canarias utiliza gasoil como combustible principal.

<sup>(3)</sup> Incluye residuos hasta el 31/12/2014.

Para el a\`no 2018 valores hasta mayo de 2018.

Tabla 36. Emisiones de CO<sub>2</sub> en la producci\`on de energ\`ia en Espa\`na. Fuente: REE.

Dado que hay una clara tendencia a aumentar el mix de renovables en la producci\`on de energ\`ia, se ha decidido coger el \`ultimo valor de la serie hist\`orica como el m\`as fiable, en lugar de calcular una media de los \`ultimos a\`nos.

Por tanto, las emisiones de GEI debidas al consumo el\`ectrico durante la producci\`on de los pellets es estimada seg\`un la tabla 37.

| Consumo de energía correspondiente a la producción del pellet          |                                |  |                                 |
|--|--------------------------------|--|---------------------------------|
| <b>Consumo eléctrico en el proceso de peletización combustible</b>     |                                |  |                                 |
| Consumo total de electricidad por año                                  | 3.426.435 [kWh]                |  | 12.335.166 [MJ]                 |
| Las emisiones de CO2 como se ha indicado en la factura                 | 209,00 [gCO <sub>2</sub> /kWh] |  | 58,06 [gCO <sub>2</sub> /MJ]    |
| Emisiones totales anuales de GEI derivadas del consumo de electricidad |                                |  | 716.124.915 [gCO <sub>2</sub> ] |

Tabla 37. Cálculo de las emisiones de CO2 debido a la electricidad consumida en la planta. Fuente: Calculadora Avebiom.

A continuación, la calculadora de Avebiom contabiliza el consumo térmico empleado en el proceso, el cual se produce principalmente en el acondicionamiento del aire de entrada en el secadero.

Como se ha visto anteriormente, el consumo del quemador de aire para alimentar el secadero, puede ser abastecido mediante la propia producción de pellets de la planta mediante una caldera de biomasa. Por ello, se ha procedido a contabilizar el consumo anual necesario de los pellets producidos para alimentar el proceso (Tabla 38).

|  |       |
|--|-------|
| Consumo pellets en etapa de secado (kg/h)          | 2,06  |
| Horas de producción efectivas al año               | 6.120 |
| Consumo anual de pellets para autoconsumo (tm/año) | 12,6  |

Tabla 38. Cálculo del consumo de pellets requerido en el secado de los posos de café. Fuente: Elaboración propia.

Con estos datos se estima el consumo térmico en la planta mediante la calculadora (Tabla 39).

| Consumo de calor en el proceso de peletización    |    | [MJ]    | [gCO <sub>2-eq</sub> ] |
|---|----|---------|------------------------|
| Biomasa de subproductos (madera, corteza, ..) [t] | 13 | 239.940 | 239.940                |
| Fuel oil [1000l]                                  |    | 0       | 0                      |
| Gas fósil [kWh]                                   |    | 0       | 0                      |
| Carbón (antracita) [t]                            |    | 0       | 0                      |
| Carbón (Lignito) [t]                              |    | 0       | 0                      |
| Calor distribuido (renovable) [kWh]               |    | 0       | 0                      |
| Calor distribuido (fosil) [kWh]                   |    | 0       | 0                      |
| Las emisiones totales anuales por calor           |    |         | 239.940                |

Tabla 39. Cálculo del consumo térmico de la planta. Fuente: Calculadora Avebiom.

El consumo establecido en la calculadora es ligeramente superior (13 tm). Esto es debido a que la calculadora tiene asociado un poder calorífico inferior al de los pellets de café para la biomasa. Por ello hay que incrementar el consumo

teórico para que la energía empleada sea la misma y los cálculos sean más realistas.

Por último, la calculadora tiene en consideración únicamente las emisiones de CO<sub>2</sub> durante el proceso de ensacado (Tabla 40), ya que los palés también son neutros en cuanto a emisiones de CO<sub>2</sub>.

| Suministro ensacado                      | Pellets ensacados [t/a] | [gCO <sub>2-eq</sub> ] |
|--|-------------------------|------------------------|
| 10-kg-bolsa                              |                         | 0                      |
| 15-kg-bolsa                              | 25.000                  | 199.500.000            |
| <b>Emisiones por el ensacado totales</b> |                         | <b>199500000</b>       |

Tabla 40. Cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub> producidas en la línea de ensacado. Fuente: Calculadora Avebiom.

En base a los inputs anteriores, se llega al resultado final de cálculo de emisiones de GEI y de ahorro con respecto a otras fuentes de energía no renovables (Tabla 41).

| <b>Resultados</b>                        |               |                           |
|--|---------------|---------------------------|
| Total emisiones                          | 1.285.459.355 | [gCO <sub>2-eq</sub> ]    |
| Total emisiones sin ensacado             | 1.085.959.355 | [gCO <sub>2-eq</sub> ]    |
| Total emisiones por MJ producto a granel | 2,28          | [gCO <sub>2-eq</sub> /MJ] |
| Total emisiones por kg producto a granel | 43,44         | [gCO <sub>2-eq</sub> /kg] |
| Total emisiones por MJ producto ensacado | 2,70          | [gCO <sub>2-eq</sub> /MJ] |
| Total emisiones por kg producto ensacado | 51,42         | [gCO <sub>2-eq</sub> /kg] |

| Reducción de emisiones de CO <sub>2</sub> basada en valores reales | Reducción de GEI con biomasa a granel | Reducción de GEI con biomasa ensacada |
|--|---------------------------------------|---------------------------------------|
| <b>Comparativas respecto a otros combust.</b>                      |                                       |                                       |
| Fuel oil   | 97%                                   | 97%                                   |
| Gas fósil (mix EU de calidad)                                      | 97%                                   | 96%                                   |
| Gasoil   | 97%                                   | 97%                                   |
| Carbón (antracita)   | 98%                                   | 98%                                   |
| Carbón (Lignito)   | 98%                                   | 98%                                   |
| Calor distribuido (fósil)  | 97%                                   | 97%                                   |

Tabla 41. Emisiones totales de CO<sub>2</sub> durante el procesado de los pellets y ahorro de GEI con respecto a combustibles fósiles. Fuente: Calculadora Avebiom.

Por tanto, podemos comprobar que el ahorro en emisiones de GEI, con estimaciones conservadoras, son en todo caso superiores al 95%. Cabe destacar que la tabla 41 es una comparativa con combustibles fósiles. Sin embargo, estos pellets también suponen un avance con respecto a biomasa de origen diferente debido a su mayor poder calorífico, menor contenido de azufre y reducción de la cantidad de cenizas (Robert Cubero-Abarca, 2014).

## 6. Conclusiones

Este trabajo teórico-experimental se ha desarrollado para estudiar la posibilidad de valorizar el residuo procedente de la producción de café a través de su valorización energética, empleándolo para la elaboración de pellets susceptibles de ser empleados para calefacción.

Esta posibilidad es muy rentable no solo económicamente, pues supone un ahorro en la compra de otras materias primas naturales y/o combustibles sino también medioambientalmente, ya que supone la eliminación de un residuo que en la actualidad es un problema no resuelto y conduce a un impacto ambiental físico-químico muy perjudicial que es necesario solventar de manera eficiente.

Como se ha podido observar a lo largo del proyecto, los residuos del consumo de café en hostelería en forma de posos suponen una fuente de energía de una calidad excelente. Como era de esperar, se ha demostrado que las especificaciones técnicas de esta fuente de biomasa superan en calidad a otras fuentes empleadas de biomasa en la actualidad, aportando más calor con unas emisiones de CO<sub>2</sub> y de otras partículas nocivas inferiores.

A la vista de los resultados se aprecia que el residuo se podría emplear para calefacción ya que aportaría una importante producción de energía térmica al combustionar el residuo estudiado y en consecuencia supondría un ahorro al proceder dicha energía de un residuo. Por tanto, podría usarse como combustible y evitar así en menor medida la extracción de materiales fósiles no renovables. Además, supondría la eliminación sostenible de este residuo.

Las características y composición de los posos de café analizados tienen mayor poder calorífico que otros biocombustibles y de acuerdo a lo obtenido en su análisis térmico-gravimétrico no generan prácticamente cenizas, por lo que lo convierten en un combustible alternativo viable.

Además, el uso del residuo de café para su valorización energética puede evitar la emisión a la atmósfera de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), procedente del transporte de dicho residuo.

El balance de CO<sub>2</sub> en su uso como combustible es neutro ya que el CO<sub>2</sub> emitido en su combustión se puede compensar con el CO<sub>2</sub> consumido por la propia planta de café.

Actualmente, el café no es reciclado de forma específica, por lo que termina desperdiciándose una fuente muy rica de energía, en vertederos o en procesos de recuperación energética contaminantes y de baja eficiencia.

En futuros estudios, resultaría interesante analizar la capacidad de la planta de producción de pellets para aprovechar los aceites vegetales contenidos en el poso del café para la fabricación de biocarburantes como el etanol o el biodiesel.

## 7. Bibliografía

1. "Comparative study of the thermal behavior of wood and bark of young shoots obtained from an energy plantation". MÉSZÁROS E., E. JAKAB, G. VÁRHEGYI, P. SZEPEŠVÁRY, B. MAROSVOLGYI. J. Anal. Appl. Pyrolysis 72. 2004.
2. "Producción de briquetas y pellet: Aspectos Técnicos". Roger Moya, ITCR.
3. "Propiedades térmicas y fisicoquímicas de pellets con fines energéticos elaborados a partir de residuos de aserradero". Pedro Casanova Treto. Universidad de Costa Rica, 2017.
4. "Use of coffee pulp for the production of briquettes and pellets for heat generation". Robert Cubero-Abarca, Roger Moya, Jorre Valaret, Mario Tomazello Filho. 2014.
5. "World Energy Resources. Bioenergy 2016". World Energy Council. 2016.
6. "Investigación del efecto de los parámetros de elaboración de pellets de cuesco de palma en el proceso de pirólisis". Andrés Jose Zapata Saad. Bogotá, Colombia. 2016.
7. "The pelleting process". California Mill Co.

8. "Preservation of roasted and ground coffee during storage". Paulo C. Correa. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. 2016.
9. "Fundamentals of Energy Analysis of Dryers". Ian C. Kemp.
10. "Biomass drying and dewatering for Clean Heat & Power". Carolyn J. Roos. 2008.
11. "Generación de Energía Térmica con Biomasa". Sodean.
12. "Manual de combustibles de madera". Avebiom.
13. "Biomass pelletization process". Ángela García-maraver y Manuel Carpio. Granada, España. 2015.
14. "Performance analysis of two industrial dryers (cross flow and rotary dryer for ligno-cellulosic biomass desiccation)". Nadia Cairo. 2012.
15. "Recalling the oil shock of 40 years ago". Joel Darmstadter. 2013.
16. "Estudio de viabilidad para la implantación de una fábrica de pellets en el entorno comarcal de Jerez de la Frontera". José Fuentes Rodríguez. 2015.
17. "Diseño de briquetas ecológicas para la generación de energía calórica y mejoramiento de ecosistemas en el corregimiento de Nabusimake, municipio de pueblo Bello-cesar". Alexander Vera Velasquez. 2014.
18. "El pellet como recurso energético en el sur de Europa. El caso de España y Portugal". Carlos Antoranz Castro. 2013.
19. "Planta de producción de nutracéuticos a partir de residuos agroalimentarios". Víctor Manuel Torres Agudo. 2015.
20. "Traditional Biomass Energy". Stephen Karekezi. 2004.
21. "Perry's Chemical Engineers' Handbook". Robert H. Perry.