



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

**ESTUDIO EXPERIMENTAL PARA LA
VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE
NEUMÁTICOS Y POSOS DE CAFÉ**

Alumno: Ramón Domínguez García

Tutor: Prof. D. Luis Pérez Villarejo

Depto.: Ingeniería de Materiales

Tutor: Prof. D. David Vera Candéas

Depto.: Ingeniería Eléctrica

Septiembre, 2019

Índice de contenido

1. Objetivos.....	8
2. Introducción.	9
2.1. Residuos.....	9
2.1.1. Residuos de neumático.	9
2.1.2. Residuos de posos de café.....	10
2.2. Producción de residuos.	12
2.2.1. Producción de residuos de neumáticos en España.	12
2.2.2. Producción de residuos de posos de café en España.....	14
2.3. Problemática.....	16
2.3.1. Problemática de los neumáticos.	16
2.3.2 Problemática de posos de café.....	17
2.4. Estudio bibliográfico de valorización de nuestros residuos en España.....	20
2.4.1. Estudio de valorización de neumáticos y posos de café en España.	20
2.5 Procesos y métodos de valorización de neumáticos y posos de café en España. ..	21
2.5.1. Procesos y métodos de valorización de neumáticos empleados en España....	21
2.5.2. Procesos y métodos de valorización de posos de café empleados en España.	29
2.6. Usos que tienen nuestros residuos una vez valorizados.	32
2.6.1. Uso de los residuos de neumáticos valorizados.	33
2.6.2. Uso de los residuos de los posos de café valorizados.	39
2.7 Ejemplos de plantas de valorización de neumáticos y posos de café en España. ..	40
2.7.1. Plantas de valorización de neumáticos en España.	40
2.7.2. Ejemplos de plantas de valorización de neumáticos en el mundo.	49
2.7.3. Ejemplos de plantas de valorización de posos de café en España.	49
2.7.4. Investigación sobre la valorización de posos de café en España.....	52
2.7.5. Plantas de valorización de posos de café en el mundo.....	54
2.7.6. Ejemplos singulares de valorización de posos de café.	55
3. Materiales y métodos.....	56

3.1. Caracterización de la biomasa empleada.	56
3.1.1. Granulado de neumáticos.....	56
3.1.2. Posos de café.....	56
3.2. Humedad de los posos de café.....	57
3.3. Pasos a seguir para procedimiento del ensayo de secado de posos de café.....	58
3.3.1. Recogida de residuos de posos de café de la cafetería de la escuela.	58
3.3.2. Pesado de los recipientes vacíos.	59
3.3.3. Llenado de los recipientes.	59
3.3.4. Primera pesada de los recipientes con los posos de café húmedos.	59
3.3.5. Introducción de los recipientes en horno.....	60
3.3.6. Segunda pesada de los recipientes con los posos de café.....	60
3.4. Análisis de los resultados obtenidos.	61
3.5. Obtención de la humedad inicial de los posos de café.....	61
4. Resultados.....	63
4.1. Análisis elemental de nuestros residuos para el cálculo de composición CHNS. ...	63
4.1.1. Análisis elemental de los residuos de posos de café (CHNS).	63
4.1.2. Análisis elemental de residuos de neumáticos (CHNS).	66
4.2. Poderes caloríficos (PCI y PCS).	70
4.3. Cálculo del PCI de nuestros residuos.	77
5. Conclusiones.	81
6. Anexos.....	83
6.1 Comparativa energéticas de los nuestros residuos con otros combustibles.....	83
7. Bibliografía.....	86

Índice de figuras y tablas

Figura 1 – Composición de las partes y materiales que contiene el neumático [1].	10
Figura 2 – Residuos del grano de café.	11
Figura 3 – Producción de posos de café en España en el año 2.013 [2].	11
Figura 4 – Valores de gestión de neumáticos fuera de uso en España (toneladas) (1998-2005) [8].	14
Figura 5 – Mapa de Europa con el consumo de café per cápita en el año 2.017.	15
Figura 6 – Ranking del consumo de café por persona en el año 2.017.	15
Figura 7 – Reparto del consumo de café en España entre 1.992 y 2.013.	16
Figura 8 – Exterior de un secador rotativo [13].	18
Figura 9 – Secador de banda continua [14].	18
Figura 10 – Secador solar cerrado (en el interior secado de madera) [15].	19
Figura 11 – Secador solar abierto (astillas de madera) [16].	19
Figura 12 – Secador con caldera de biomasa [17].	20
Figura 13 – Almacenamiento de neumáticos usados [18].	21
Figura 14 – Imagen de una planta trituradora de neumáticos [20].	22
Figura 15 – Esquema del proceso de gasificación.	23
Figura 16 – Equipo de destilación del aceite obtenido de los neumáticos [22].	24
Figura 17 – Planta incineradora de neumáticos en Maresme (Barcelona).	25
Figura 18 – Planta de pirólisis de neumáticos.	27
Figura 19 – Prototipo utilizado en la investigación [32].	28
Figura 20 – Diagrama de bloques del proceso de termólisis.	29
Figura 21 – Esquema de diversificación de los posos de café.	30
Figura 22 – Diagrama de bloques ubicando en el proceso de transesterificación para la generación de Biodiesel [34].	30
Figura 23 – Peletizado de posos de café [36].	32
Figura 24 – Capas disponibles en un césped artificial con relleno de neumático.	33
Figura 25 – Suelo de parque infantil fabricado a partir del reciclaje del neumático [38].	34
Figura 26 – Utilización de neumáticos para construcción de balsas [41].	35
Figura 27 – Utilización de neumáticos triturados como material drenante [42].	35
Figura 28 – Cementera que utiliza neumáticos como combustible ubicada en Castilla León [44].	37

Figura 29 – Relleno de terraplenes con neumáticos usados [46].	38
Figura 30 – Producción de biogás a partir de café.	39
Figura 31 – Tasas aplicadas a cada neumático cuando es sustituido en taller [8].	41
Figura 32 – Imagen del interior de la planta de reciclaje de neumáticos.	41
Figura 33 – Imagen aérea de la planta RNC ubicada en la provincia de Murcia. [4]	42
Figura 34 – Imagen del exterior de la planta RENEAN ubicada en la provincia de Jaén [47].	43
Figura 35 – Imagen del exterior de una fábrica de cemento preparada para la valorización energética [51].	44
Figura 36 – Imagen de la planta Recumatic para triturado de neumático ubicada en Burgos [52].	45
Tabla 1 – Intervalos granulométricos para distintas aplicaciones, [53].	46
Figura 37 – Tabla de empresas de reciclaje de neumáticos y sus datos de reciclaje [54].	47
Figura 38 – Empresas de reciclaje y valorización en España. [54]	48
Figura 39 – Imagen de la planta de Nestlé, ubicada en Girona [55].	50
Figura 40 – Imagen de los distintos contenedores “marrones” de la ciudad de Madrid [57].	50
Figura 41 – Ejemplo de tejido formado a partir de posos de café [62].	52
Figura 42 – Imagen de prototipo utilizado en las instalaciones de la universidad de Jaén para la investigación del secado de los posos de café [63].	53
Figura 43 – Imagen de autobús londinense con la campaña de biocombustible a partir del café [64].	54
Figura 44 – Muestra de neumático utilizado para el análisis realizado con la bomba calorimétrica, suministrado por el Departamento de Ingeniería de Materiales (Campus Científico Tecnológico de Linares).	56
Figura 45 – Muestras introducidas en el horno mufla.	57
Figura 46 – Temperatura seleccionada del horno.	58
Figura 47 – Pesado de recipiente vacío número 1.	59
Figura 48 – Pesado de recipiente 2 con muestras de café húmedo.	60
Tabla 2 – Pesado inicial de los posos de café.	61
Tabla 3 – Pesado realizado de las muestras de posos de café una vez sometidas a secado en horno.	61
Tabla 4 – Cálculo de la humedad inicial de nuestras muestras de posos de café.	62
Figura 49 – Residuos obtenidos de analizar 1kg de café [67].	64
Figura 50 – Análisis químico elemental de posos de café (%peso) [69].	64
Tabla 5 – Análisis químico próximo posos de café (referencia bibliográfica)	65

Tabla 6 – Análisis elemental CHNS posos de café (referencia bibliográfica).....	65
Tabla 7 – Análisis elemental CHNS posos de café (laboratorio Universidad de Jaén)	65
Figura 51 – Comparativa de los resultados obtenidos de los análisis de café.	66
Figura 52 – Datos bibliográficos del análisis elemental CHNS de los neumáticos [70].....	67
Tabla 8 – Análisis químico próximo características neumáticos [70].....	68
Tabla 9 – Análisis elemental CHNS neumáticos [70].....	68
Tabla 10 – Análisis elemental CHNS neumáticos (laboratorio Universidad de Jaén).	68
Figura 53 – Comparativa de los resultados obtenidos de los análisis de los neumáticos.....	69
Figura 54 – Comparativa de análisis de los resultados obtenidos de posos de café y neumáticos.	70
Figura 55 – Bomba calorimétrica que utilizaremos para nuestros ensayos.	71
Figuras 56 y 57 – Materiales a utilizar para el ensayo de la bomba calorimétrica.	72
Figura 58 – Pastilla de posos de café a introducir en la bomba calorimétrica.....	73
Figura 59 – Ejemplo de resultados obtenidos de un ensayo con la bomba calorimétrica.....	73
Tabla 11 – Resultados de PCS de la bomba calorimétrica posos de café.	74
Figura 60 - Comparativa de PCS para posos de café (KJ/kg).	74
Tabla 12 – Resultados de PCS de la bomba calorimétrica neumáticos.	75
Figura 61 – Comparativa de PCS para neumáticos (KJ/kg).	75
Tabla 13 – Análisis elemental CHNS de posos de café (referencia bibliográfica) [69].....	77
Tabla 14 – Análisis elemental CHNS de posos de café (referencia obtenida experimental) Universidad de Jaén.....	77
Tabla 15 – Análisis elemental CHNS neumáticos [70].	78
Tabla 16 – Análisis elemental CHNS neumáticos (referencia obtenida experimental)	78
Tabla 17 – Resultados obtenidos de aplicar la fórmula de Dulong a los datos de posos de café de publicaciones científicas [69].....	79
Tabla 18 – Resultados obtenidos de aplicar la fórmula de Dulong a los datos analizados de posos de café en la Universidad de Jaén.	79
Tabla 19 – Resultados medios obtenidos de realizar la media aritmética de los datos analizados de posos de café en la Universidad de Jaén.	79
Tabla 20 – Resultados obtenidos de aplicar la fórmula de Dulong a los datos analizados de neumáticos de otras publicaciones científicas [70].	80
Tabla 21 – Resultados obtenidos de aplicar la fórmula de Dulong a los datos analizados de neumáticos en la Universidad de Jaén.	80

Tabla 22 – Resultados medios obtenidos de realizar la media aritmética de los datos analizados de neumáticos en las instalaciones de la Universidad de Jaén.....	80
Figura 62 – Muestra de granulado de neumáticos cedido por el departamento de Ingeniería Eléctrica (Campus Tecnológico de Linares).	83
Figura 63 – Muestra de posos de café totalmente secos suministrados por el Departamento de Ingeniería Eléctrica (Campus Científico Tecnológico de Linares).	83
Tabla 23 – Comparativa de Posos de café con distintos tipos de biomasa [73].	84
Figura 64 – Comparativa de valores de PCI respecto a posos de café (kcal/kg).	84
Tabla 24 – Comparativa de PCI de neumáticos con otros combustibles [73].	85
Figura 65 – Comparativa de valores de PCI respecto a los neumáticos.	85

1. Objetivos.

Las finalidades de este proyecto experimental consistirán en el estudio bibliográfico y análisis en laboratorio de dos residuos, en concreto, neumáticos y posos de café y con ello obtener información y ver su valorización actualmente.

El estudio de estos residuos se realiza para obtener información de cómo son aprovechados en la actualidad, dónde se utilizan, para que procesos industriales son empleados, los tipos de potenciales alternativas posibles que puedan llevarse a cabo. Debido a que las muestras de los posos de café tal y como son recepcionadas, necesitan un proceso de secado previo a los ensayos. En cambio, los neumáticos no necesitan un acondicionamiento previo para ser estudiados en su valorización, pero si un tratamiento para conseguir los mejores resultados y objetivos de este TFG.

En este proyecto de investigación, se realizarán análisis experimentales para la determinación del poder energético, que se puede obtener con estos dos residuos, siendo de especial relevancia el estudio del procedimiento previo seguido para la obtención de la humedad deseada en el tratamiento de los posos de café, sin el cual no se podría conseguir este paso para poder valorizarlos y mejorar su rendimiento.

Por último, otro de los objetivos del TFG es realizar pruebas experimentales de laboratorio. Estas servirán para comparar los datos de los ensayos obtenidos, así como para ver las diferentes propuestas de valorización que hay llevadas a cabo en la actualidad con distintas empresas de nuestro país, y los prototipos utilizados en las universidades y empresas para la valorización energética de estos residuos.

2. Introducción.

Cuando mencionamos la palabra residuo, pensamos en un material que ya ha sido utilizado para el cual se fabricó, pudiendo ser de cualquier tipo de origen (animal, vegetal y mineral).

En la actualidad, se está convirtiendo en un problema la contaminación para el planeta, las emisiones y residuos producidos por materiales contaminantes, pero altamente rentables, siendo en estos momentos utilizados por la mayoría de la población.

En este proyecto se pretende reducir al mínimo esos deshechos consiguiendo de forma consecutiva un uso para producción de energía, materiales inertes u otros subproductos e incluso para volver a su forma primitiva y ser incorporados al ciclo de utilización. Pudiendo realizar con ellos diversas aplicaciones, como combustible alternativo a los combustibles convencionales.

En nuestro estudio, pretendemos conseguir el aprovechamiento de los residuos de neumáticos y posos de café, transcurridos una serie de procesos industriales.

2.1. Residuos.

2.1.1. Residuos de neumático.

Un neumático está formado por diversos materiales entre los que destacan el acero, el caucho, algunos textiles y el negro de carbono. En su valorización, las partes de estos residuos que no son utilizadas, se eliminan por distintos procesos industriales.

El neumático es un material con un gran poder energético, cuya fabricación consume una gran cantidad de energía que es aprovechada cuando el neumático se recicla o transforma, disminuyendo las emisiones de CO₂.

Una vez finalizado el uso de los neumáticos, pasan a la parte de reciclaje o revalorización, la cual se lleva estudiando, relativamente poco, aproximadamente unos 20 – 25 años. Ya que, este residuo anteriormente no se le daba ningún uso. Una vez finalizado su ciclo de vida útil en vehículos y maquinaria, era trasladado a vertederos o almacenes habilitados para ello. Cumpliendo las normas existentes para que no existiese un alto riesgo de incendio, lo que provocase un elevado índice de contaminación.

En la siguiente figura se muestran los distintos materiales de los que está compuesto el neumático (Figura 1).



Figura 1 – Composición de las partes y materiales que contiene el neumático [1].

2.1.2. Residuos de posos de café.

El café es el nombre de la semilla de cafeto, un árbol de la familia de las Rubiáceas originario de Etiopía. El termino café se ha extendido mundialmente como la bebida que se elabora a través de la infusión de la semilla tostada y molida.

Las diferentes estructuras del fruto del café dan lugar a la generación de subproductos y residuos. Dependiendo de si el procesado del café se realiza por vía húmeda o seca, podemos distinguir cuatro tipos de residuos:

- Pulpa: es el primer subproducto que se obtiene tras el procesado húmedo de los granos de café, representa el 29% del peso seco del grano.
- Cáscara: se obtiene a partir del procesado por vía seca de los granos de café, supone el 12% del peso seco del grano. La cáscara está constituida por un 72.3% de carbohidratos, 15% de humedad, 7% de proteína, 5.4% de ceniza, 0.3% lípidos.
- Piel de plata o cascarilla: es un subproducto que proviene del proceso de tostado. Principalmente está compuesto por celulosa y hemicelulosa.
- Posos de café (PDC): sedimento que queda como residuo tras la elaboración de la infusión del café. Por cada tonelada de café se generan 650 Kg de PDC.

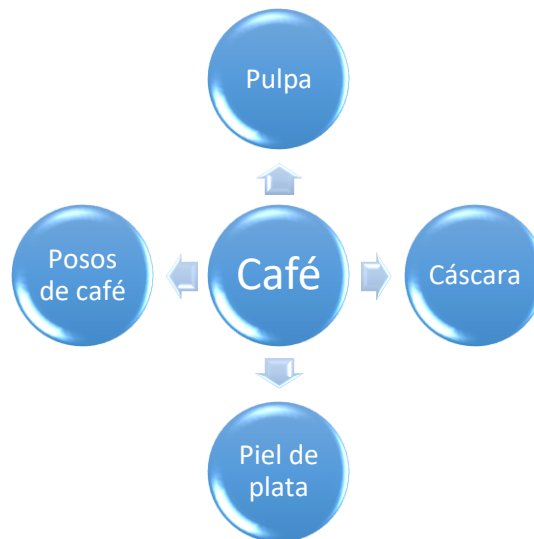


Figura 2 – Residuos del grano de café.

El promedio en España de consumo de café es de 188.940 toneladas al año. Con esta cifra tenemos una producción también elevada de posos de café como se muestra en la siguiente tabla (Figura 3).

PRODUCCIÓN DE POSOS DE CAFÉ (ton)	
CAFÉ TOSTADO	58.755
CAFÉ SOLUBLE	12.956
TOTAL	71.711

Figura 3 – Producción de posos de café en España en el año 2.013 [2].

“Por otro lado, los mismos posos pueden contener azúcares que por fermentación darían lugar al bioetanol, también podemos someterlos a un proceso de pirólisis para producir un bio-aceite que pueda ser posteriormente valorizado como biocombustible o biocarburante” [3].

2.2. Producción de residuos.

2.2.1. Producción de residuos de neumáticos en España.

Cada año 1.000 millones de neumáticos llegan al final de su vida útil en todo el mundo. Solo en España, anualmente se generan 300.000 toneladas de neumáticos usados [4].

La Unión Europea cuenta con una normativa legal y unos planes para la gestión de los neumáticos ya que están considerados como residuos tóxicos y peligrosos (Lista Europea de Residuos código 16.01.03) [5].

En España se introdujo esta norma hace unos años y existe un Plan Nacional de Gestión de Neumáticos fuera de uso que obliga a la recogida de los mismos e impone metas de reciclado a alcanzar a lo largo del tiempo. “Real Decreto 1619/2005, de 30 de diciembre (BOE num.2 de 3 de marzo de 2006), sobre gestión de neumáticos fuera de uso” [6].

Desde el año 2.006 todas las ruedas de España, de cualquier tipo de vehículo (tractores, camiones, coches...), deben acabar cuando son puestas fuera de circulación en manos de empresas tales como SIGNUS o TNU que son entidades autorizadas para retirar, procesar y reciclar las ruedas en el país.

Aun así, una parte de los neumáticos se almacena en vertederos (un 17% en Europa), se entenderán los esfuerzos que se realizan tanto en la gestión, la investigación y el desarrollo para buscar aplicaciones que permitan reutilizarlos y transformarlos en productos con un valor añadido.

La empresa malagueña, Neumáticos Adrián Moreno, dedicada al reciclaje del neumático usado en varias provincias andaluzas, gestiona en torno a 700 – 800 toneladas de neumáticos mensuales, y su diferenciación es que disponen de una máquina trituradora propia.

Una empresa de reciclajes de neumáticos ubicada en Ceutí (Murcia), RNC, recicla en la actualidad 13.000 toneladas de neumáticos anualmente.

El proceso de reciclado de la empresa RNC es el siguiente:

Esta planta comienza la valorización con la fase de recolección de neumáticos fuera de uso (NFU), llevada a cabo desde los puntos de producción, donde se trasladan a las instalaciones. El proceso de clasificación, en el que se separan los neumáticos de uso reciclable (NRU) y los NFU [7]. Obteniendo de este proceso una cifra del 7% de los

neumáticos que volverá a su mercado como NRU, mientras que el resto de ellos, continuará al siguiente proceso, el troceado, para su posterior valorización.

La planta ubicada en Guadalajara, es la de mayor capacidad de España para el reciclaje de neumáticos. En sus instalaciones se puede llegar a reciclar aproximadamente 40.000 toneladas de neumáticos al año, que llegan de distintas zonas del centro de España. En ella también se separan el contenido del neumático en tres elementos: textil, acero y caucho [8].

La empresa de Reciclados de neumáticos en Andalucía (RENEAN), situada en Jaén, presume de ser la única en el país en el reciclado 100% del neumático.

“Andalucía, Cataluña y la Comunidad de Madrid son las regiones donde más toneladas de neumáticos se recogieron en el año 2015, un incremento de años anteriores, según los datos autonómicos del informe anual del Sistema Integrado de Gestión de Neumáticos Usados” (SIGNUS) [9].

En España se recogieron en el año 2015 un total de 186.285 toneladas de neumáticos, incrementándose un 15% respecto al año 2014, y se distribuye geográficamente como sigue:

Andalucía (31.165 toneladas), Cataluña (25.327,9 toneladas), Comunidad de Madrid (17.005 toneladas), Castilla y León (17.047 toneladas), Galicia (15.051 toneladas), Comunidad Valenciana (12.306 toneladas), País Vasco (10.658 toneladas), Castilla-La Mancha (10.633 toneladas), Aragón (7.579 toneladas), Islas Canarias (7.483 toneladas), Extremadura (7.481 toneladas), Asturias (6.404 toneladas), Islas Baleares (4.265 toneladas), Navarra (3.822 toneladas), Cantabria (3.063 toneladas), La Rioja (1.658 toneladas), Melilla (351 toneladas), Ceuta (44 toneladas)” [10].

	1.998	1.999	2.000	2.001	2.002	2.003	2.004	2.005
<i>Exportación</i>	3.631	4.561	7.272	6.324	13.567	12.498	19.758	15.000
%	1.5	1.87	2.74	2.28	4.51	4.39	6.46	4.97
<i>Recauchutado</i>	32.840	26.377	34.139	38.646	42.092	40.300	37.173	45.000
%	13.62	10.81	12.87	13.94	13.99	14.14	12.16	14.90
<i>Material reciclado</i>	1.000	3.500	4.000	4.000	23.500	27.143	42.500	41.000
%	0.41	1.43	1.51	1.44	7.81	9.52	13.90	13.58
<i>Valorización energética</i>	8.000	11.000	20.000	17.000	30.000	35.000	52.500	50.000
%	3.32	4.51	7.54	6.13	9.97	12.28	17.17	16.56
<i>Vertido</i>	195.610	198.295	199.866	211.330	191.799	170.059	153.787	151.000
%	81.15	81.38	75.34	76.21	63.72	59.67	50.30	50.00
<i>Total generados</i>	241.081	243.733	265.277	277.300	300.958	285.000	305.718	302.000
%	100	100	100	100	100	100	100	100

Figura 4 – Valores de gestión de neumáticos fuera de uso en España (toneladas) (1998-2005) [11].

2.2.2. Producción de residuos de posos de café en España.

El café, es la segunda mercancía más comercializada en el mundo, después del petróleo. El consumo ha aumentado un 95% en los últimos 35 años, llegando a la cifra de casi 10.000 millones de kilos de café al año. Lo que trae consigo una generación de residuos de más de 2.000 millones de toneladas de posos de café.

En España, la media de consumo anual de cafés por habitante es de aproximadamente 4 kg al año. Lo que equivale una cantidad aproximada de 170.000 toneladas cada año de café consumido en España. Este dato indica que en España se tira a la basura una cifra que supera los 150 millones de kilos de restos de café cada año. Estimándose de la cifra anterior, una obtención de 8 millones de toneladas de posos de café, de los que aproximadamente la mitad es aprovechada en la industria del café soluble.

A continuación, se muestran las imágenes del mapa de Europa con el consumo per cápita y una gráfica del ranking de países que más café consumen en Europa.

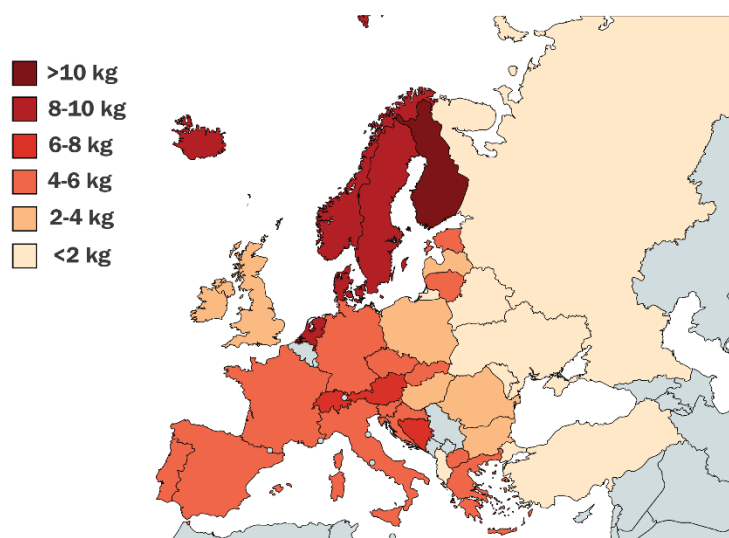


Figura 5 – Mapa de Europa con el consumo de café per cápita en el año 2.017.

Estando la media europea de consumo de café por habitante en 5 kg al año, España está un poco por debajo situándose en torno a los 4.25 kg, en el año 2.017 [12].

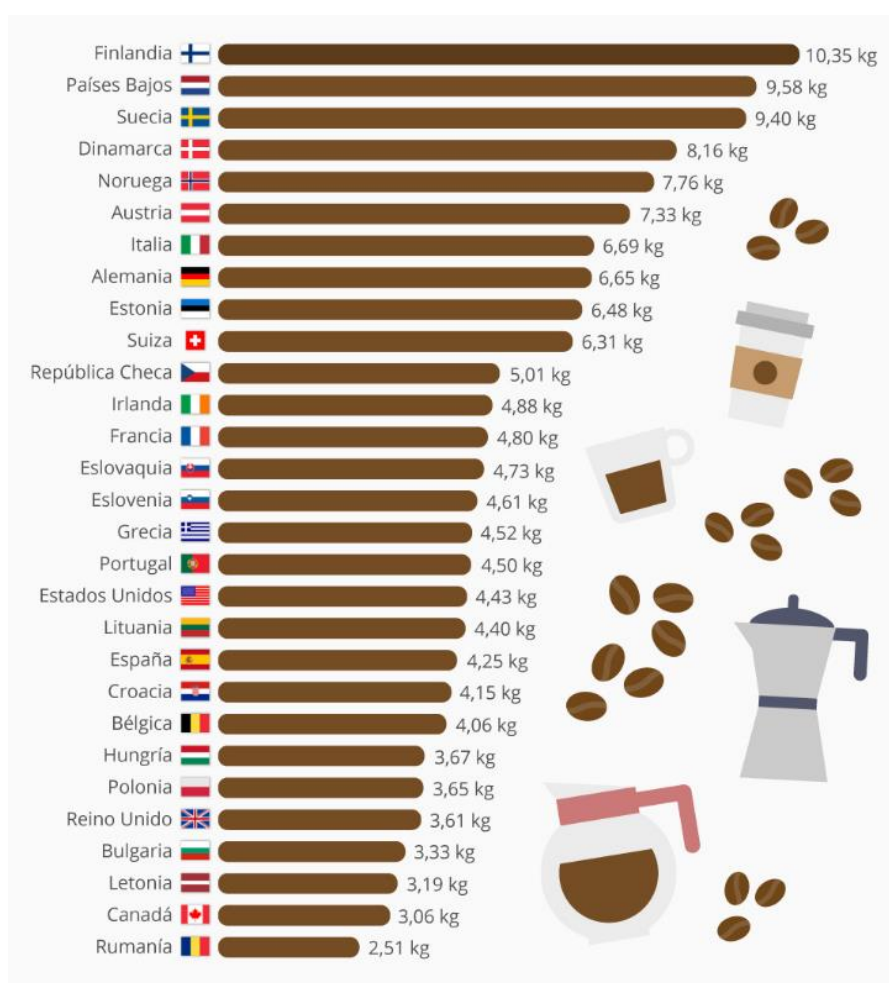


Figura 6 – Ranking del consumo de café por persona en el año 2.017.

A continuación, se muestra el reparto de consumo del café en España en los últimos años. Este consumo se reparte principalmente en consumo en el hogar y en hostelería, como muestra la siguiente grafica (Figura 7).

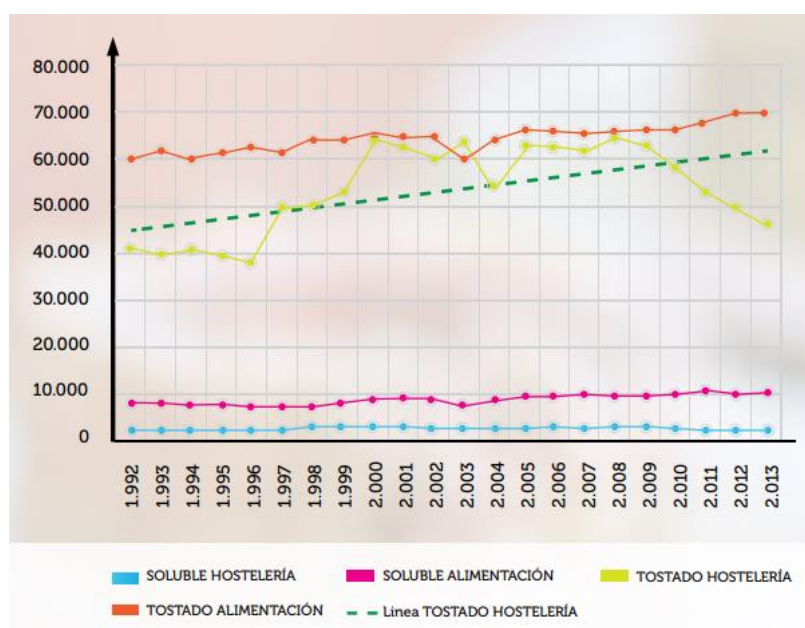


Figura 7 – Reparto del consumo de café en España entre 1.992 y 2.013.

2.3. Problemática.

2.3.1. Problemática de los neumáticos.

El principal problema de los neumáticos es el elevado número de neumáticos producidos, lo que conlleva a las dificultades para eliminarlos una vez que estén usados, constituyendo uno de los mayores problemas medioambientales de estos últimos años en todo el mundo” [13].

El número de neumáticos fuera de uso se incrementa debido al gran crecimiento de vehículos y maquinaria que existe en la actualidad. Están catalogados por la UE como tóxicos y peligrosos (Lista Europea de Residuos código 16.01.03) [5].

Uno de los mayores problemas de los neumáticos ya usados es donde almacenarlos. En España se aprobó el “Real Decreto 1619/2005, de 30 de diciembre (BOE num.2 de 3 de marzo de 2006), sobre gestión de neumáticos fuera de uso” [6], prohibiendo arrojarlos en los vertederos a partir de julio de 2.006.

Entre todas las autonomías españolas, cuatro de ellas han desarrollado normas específicas: Castilla León, País Vasco, Valencia y Aragón [14].

Como consecuencia de los problemas generados por los neumáticos y debido a la implantación de una normativa adecuada para su gestión. “Los fabricantes están investigando nuevos materiales para producir gomas que generen un impacto menor en el medioambiente” [15].

2.3.2 Problemática de posos de café.

El principal problema de los posos de café, es que contiene una elevada cantidad de agua, entre el 60 – 70 %, impidiendo así su aprovechamiento directo, ya que con este índice de humedad no podemos convertirlo en generación de energía eléctrica. Para su correcto aprovechamiento como generador de energía, necesita una etapa de secado, para obtener los elementos que sean de utilidad.

El alto contenido en humedad se debe a que, en el proceso de obtención del café, tenemos que pasarlo por agua en ebullición, a través de un filtro donde tenemos el café molido y así es como adquiere dicho contenido en humedad.

Además de esto, nuestro residuo, contiene un nivel de acidez elevado, siendo éste peligroso para los usos que se le están dando.

El residuo que nos queda, es fácil de almacenar, pero necesita un procedimiento de secado complejo para perder la mayor parte de humedad que tiene, ya sea secado al aire libre o en un horno a temperatura controlada. En el caso de secar al aire, se necesita cada cierto tiempo remover este material para que se obtenga un índice de humedad igual en toda la muestra. Mientras que, si realizamos secado en horno, tendremos que tener en cuenta varios factores a seguir, que describiremos en la parte de laboratorio, ya que así lo hemos realizado.

Uno de los objetivos de nuestro estudio, será secar en horno los posos de café, reduciendo el índice de humedad de estos, quedando útiles para la generación de energía. También pueden ser utilizados para el secado de los posos de café distintos tipos de secadores. A continuación, mostramos y describimos algunos de ellos.

a) Secador rotativo.

Este tipo de secador consta de un cilindro de diámetro y longitud determinados, girando sobre unas ruedas motrices que son accionadas por un motor. Dentro y en su longitud, hay unas palas que van separando la materia para su secado.

En la entrada del secador o trommel, se instala un horno para realizar el proceso de secado a una temperatura adecuada. En la salida se puede instalar una cámara de descompresión o tubo para que el producto se deposite en la zona de descarga [16].



Figura 8 – Exterior de un secador rotativo [17].

b) Secador de banda continua.

Proceso de alta eficiencia, que se emplea en segmentos industriales. Este tipo de secador se utiliza con baja temperatura para productos de biomasa entre los 60°C y 100°C, obteniendo un secado suave y homogéneo del producto.



Figura 9 – Secador de banda continua [18].

c) Secado solar.

Equipo destinado al secado total de cualquier tipo de biomasa, teniendo en cuenta la humedad inicial con la que se introduzca en el secador, hasta poder obtener unos resultados de humedad final en torno al 8 – 10%.

En la imagen aparece dentro del secador solar, madera, que también contiene un índice alto de humedad y se reduce hasta un 8%.



Figura 10 – Secador solar cerrado (en el interior secado de madera) [19].



Figura 11 – Secador solar abierto (astillas de madera) [20].

d) Secadores con caldera de biomasa.



Figura 12 – Secador con caldera de biomasa [21].

2.4. Estudio bibliográfico de valorización de nuestros residuos en España.

2.4.1. Estudio de valorización de neumáticos y posos de café en España.

En el estudio de valorización energética de neumáticos, debemos tener en cuenta un factor que es clave, el poder calorífico inferior. Entendiendo por poder calorífico inferior, la energía capaz de desprender cualquier combustible cuando se lleva a cabo su combustión.

Como hemos comentado anteriormente, este problema lo tiene uno de los residuos que vamos a utilizar, los posos de café. Su alto grado de humedad, implica que el poder calorífico sea más bajo, llevando consigo así una menor capacidad energética, originada por la pérdida generada por la humedad que tiene nuestro combustible.

Por lo cual, debemos llevar a cabo un secado, reduciendo considerablemente su porcentaje de humedad contenida. En nuestro residuo, los posos de café, contiene en torno

a un 60 – 70 % de humedad, hasta alcanzar un índice alrededor de un 7%. El resultado mostrará una reducción considerable de peso en nuestro residuo.

Una vez finalizado el proceso de secado, disminuyen los gastos de acondicionamiento, almacenamiento y transporte, así como se incrementan las posibilidades de venta y aplicación.



Figura 13 – Almacenamiento de neumáticos usados [22].

2.5 Procesos y métodos de valorización de neumáticos y posos de café en España.

2.5.1. Procesos y métodos de valorización de neumáticos empleados en España.

Entre los distintos tipos de aprovechamiento de residuos de neumáticos, hay un proceso por el cual pasan la mayoría de estos, siendo el más aprovechado al existir una separación de los distintos materiales que contiene.

2.5.1.1. La granulación.

Este método consiste en una serie de operaciones de trituración, eliminación del acero y de los textiles, obteniendo un material granulado con un reducido tamaño, inferior

a 12 mm, para a continuación pasar por una serie de procesos de trituración más específicos. Que pueden ser:

1. Trituración criogénica.

Es el proceso que permite que el caucho se vuelva frágil y quebradizo, a través de la aplicación de un agente congelante, habitualmente puede ser el nitrógeno líquido, en forma de espuma, para facilitar la desintegración por medio de la maquinaria apropiada. Este método tiene un alto coste debido a que necesita instalaciones complejas y mantenimiento de la maquinaria [23].

2. Trituración mecánica.

Este proceso no necesita agentes químicos ni aportación de calor, por lo que este es puramente mecánico, tan solo sometido a una serie de triturados sucesivos, para reducir su tamaño al uso que se le vaya a destinar. Obteniendo del mismo los componentes de calidad, ya que no poseen impurezas (acero, caucho, nylon). Es un tratamiento compatible con el medio ambiente, además de ser bajo su coste de inversión, también lo es el mantenimiento [24].



Figura 14 – Imagen de una planta trituradora de neumáticos [25].

Los procesos o tratamientos para la valorización del neumático son los siguientes:

a) Gasificación.

“Es un proceso termoquímico en el que un material es transformado en un gas combustible, mediante una serie de reacciones que ocurren en presencia de un agente gasificante”, como puede ser el oxígeno o el hidrógeno. Lo que implica romper moléculas

de combustible. Siendo el objetivo transferir la energía contenida en el combustible a un gas pobre, con una pérdida mínima de energía.

La gasificación puede ser altamente eficiente llegando a unos valores entre el 60 – 70 % y la conversión del carbono entre el 98 – 99 %. Es una alternativa viable para la valorización energética de neumáticos. Las condiciones que tiene ésta son similares al proceso de pirólisis.

Los estudios de gasificación de neumáticos muestran la posibilidad de emplear esta tecnología para su valorización energética.

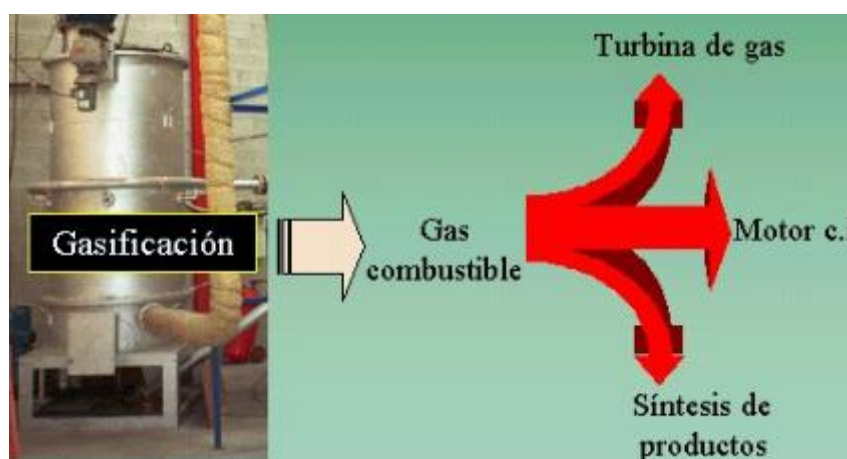


Figura 15 – Esquema del proceso de gasificación.

La principal desventaja para esta aplicación a gran escala es el tamaño reducido que tiene nuestro combustible, teniendo que tener 2 cm como máximo, siendo preferentemente las partículas más pequeñas de hasta 0.5 cm. Para obtener un rendimiento más óptimo y mejores resultados, el tamaño de las partículas debe ser inferior a 1 mm.

Los experimentos realizados hasta ahora son directamente influenciados por diferentes factores como dimensión de las partículas, temperatura, composición del gas, rendimiento del gas, calentamiento del gas, distribución de productos, la conversión del carbono y la recuperación de energía.

La gasificación aparece como proceso alternativo con varias ventajas sobre la combustión de neumáticos de desecho y la pirólisis.

b) Destilación.

El proceso de destilación “consiste en separar los componentes o sustancias de una mezcla líquida mediante el uso de la ebullición selectiva y la condensación.

La destilación puede ser un proceso de separación completo o parcial. Es un proceso de separación física. Este es llevado a cabo junto con el proceso de gasificación. Consiste en un calentamiento a baja temperatura (550°C) del granulado de neumático, en reactores verticales, obteniendo un gas que se condensa a baja temperatura. En esta condensación se obtienen unos aceites, parecidos al fuel, compuestos por una mezcla de hidrocarburos ($\text{C}_5 - \text{C}_{34}$), con un alto porcentaje de compuestos aromáticos, que se puede usar como combustible líquido, mezclado con gasoil y un gas no condensable” [14].

“Los hidrocarburos ($\text{C}_1 - \text{C}_4$), con alto contenido en butano (26 – 45 %), metano (14 – 19%) e hidrogeno (11 – 16%) con un poder calorífico elevado”, son convertidos en electricidad mediante una turbina [14].

“De esta etapa obtenemos un residuo sólido, compuesto en su mayoría por el negro del carbono, que transcurrido el proceso de destilación se gasifica en el reactor, a una temperatura de unos 1.000°C , quedando un gas pobre, el cual también se convierte en electricidad en una turbina” [14].



Figura 16 – Equipo de destilación del aceite obtenido de los neumáticos [26].

Se estima que en este proceso se pueden llegar a obtener por cada tonelada de neumático entre 413 – 661 kWh (gasificación), en forma de electricidad, y alrededor de 470kWh en la etapa de destilación. “Calculando un total de energía eléctrica producida, en función de la temperatura a la que se realice, entre 880 y 1.130 kWh por tonelada de neumático tratado” [14].

En la suma de los tratamientos por destilación y gasificación se puede llegar a recuperar el 95% de la energía contenida en los neumáticos [14].

c) Incineración.

“Es la combustión completa de la materia orgánica hasta su conversión en cenizas, llevada a cabo en hornos mediante oxidación química, en presencia de un exceso de oxígeno”

Este es un proceso costoso, presentando la dificultad de las diferentes velocidades de combustión de los materiales que forman el neumático, y la necesidad de una depuración de los residuos gaseosos que se emiten en el tratamiento, por lo que éste no es fácil de controlar, generando calor que puede ser usado como energía” [27].

En el caso de incineración no controlada, el impacto ambiental sería elevadísimo con las siguientes repercusiones, como pueden ser:

- Liberación de monóxido de carbono.
- Expulsión de óxidos de nitrógeno, óxidos de zinc, óxidos de plomo.



Figura 17 – Planta incineradora de neumáticos en Maresme (Barcelona).

“El hollín contiene cantidades importantes de hidrocarburos aromáticos policíclicos altamente cancerígenos. Muchos de los residuos generados son solubles al agua por lo que entrarían en la cadena alimentaria y de ahí a los seres humanos” [28].

d) Combustión.

“Reacción química entre el oxígeno y un material oxidable, acompañado de desprendimiento de energía que habitualmente se manifiesta por incandescencia o llama” [29].

Los neumáticos se queman en calderas para la producción de vapor a alta presión, que se introducen en una turbina de vapor acoplada a un generador para la generación de electricidad. Según estudios realizados, éste, produce la misma energía que la gasolina y entre un 28 – 50 % más que el carbón.

El proceso de combustión podría ser realizado en condiciones de lecho fluidizado. Los experimentos de combustión en éste, fueron satisfactorios. Siendo la mayoría de estos procesos reflexivos para la gestión de neumáticos. Sin embargo, es relativamente caro debido a los altos costos de operación y preparación de la materia prima.

Este procedimiento en horno rotatorio, admite la combustión de diferentes tamaños de neumáticos, por lo que tiene unos costes de operación relativamente bajos, apareciendo como una alternativa económicamente justificable sobre todo para las plantas de grandes dimensiones.

La desventaja de la combustión en las cámaras del horno, exige la filtración de partículas y un control de emisiones. Siendo el impacto medioambiental de este proceso un estudio de investigación adicional, con respecto a la generación de PAH (hidrocarburos aromáticos policíclicos) en los gases de escape [30].

e) Pirólisis.

“La pirólisis es la descomposición química de la materia orgánica y de todo tipo de materiales, excepto metales y vidrios, causada por el calentamiento en ausencia de oxígeno, pero sin producir dioxinas ni furanos, siendo contaminantes para el medioambiente” [28]. Puede ser de varias categorías, de acuerdo a la presión aplicada como el vacío o atmosférica, y de ejecución rápida o lenta de acuerdo con la velocidad de calentamiento, la temperatura, así como los tiempos de resistencia de elementos sólidos y volátiles.

Las ventajas de la pirólisis son, el poco aporte de energía que tenemos que suministrar, el alto rendimiento y dispositivos utilizados simples. Los procesos de pirólisis reducen los residuos sólidos carbonosos, los aceites y la condensación de los gases. Aparte de la posibilidad de recuperar el negro del carbono, los compuestos volátiles liberados para la recuperación de energía renovable.

El principal problema de las aplicaciones a gran escala para impulsar el proceso de pirólisis es la transferencia de calor y la distribución uniforme de la temperatura. Además, los productos son químicamente más complejos que los procedentes de procesos de conversión termoquímica, alternativamente a este tipo de residuos, tales como gasificación o combustión.

Su uso como combustible tiene como ventajas que se pueden manipular, transportar y almacenar fácilmente, permitiendo una alta flexibilidad para aplicaciones de potencia. El aceite obtenido de los neumáticos es completamente miscible con el diésel, mezclando ambos combustibles se utilizan para estudios experimentales, como por ejemplo alimentando motores de encendido por compresión.

La distribución en masa de cada una de las fases se determina por los parámetros de operación, temperatura, presión, velocidad de calentamiento, dimensiones del combustible, sistemas de calefacción y catalizadores, entre otros.



Figura 18 – Planta de pirólisis de neumáticos.

Tipos de pirólisis:

- Pirólisis primaria: 250 - 520 °C.
- Pirólisis secundaria: 600 – 800 °C.
- Gasificación de cationes con CO_2 , H_2O y O_2 en un rango de temperatura entre 750 – 1.000 °C.

El balance de energía neta para la pirólisis de neumáticos tiene un rango de recuperación de energía entre el 75 y el 82% del calor de la combustión de los neumáticos.

Durante este proceso los componentes del neumático se descomponen en: aceite de pirólisis (45%), negro del carbono (30%), alambre de acero (15%) y el gas combustible (10%).

Existen estudios de investigación y anexamos la siguiente figura (Figura 19) como prototipo en prueba.

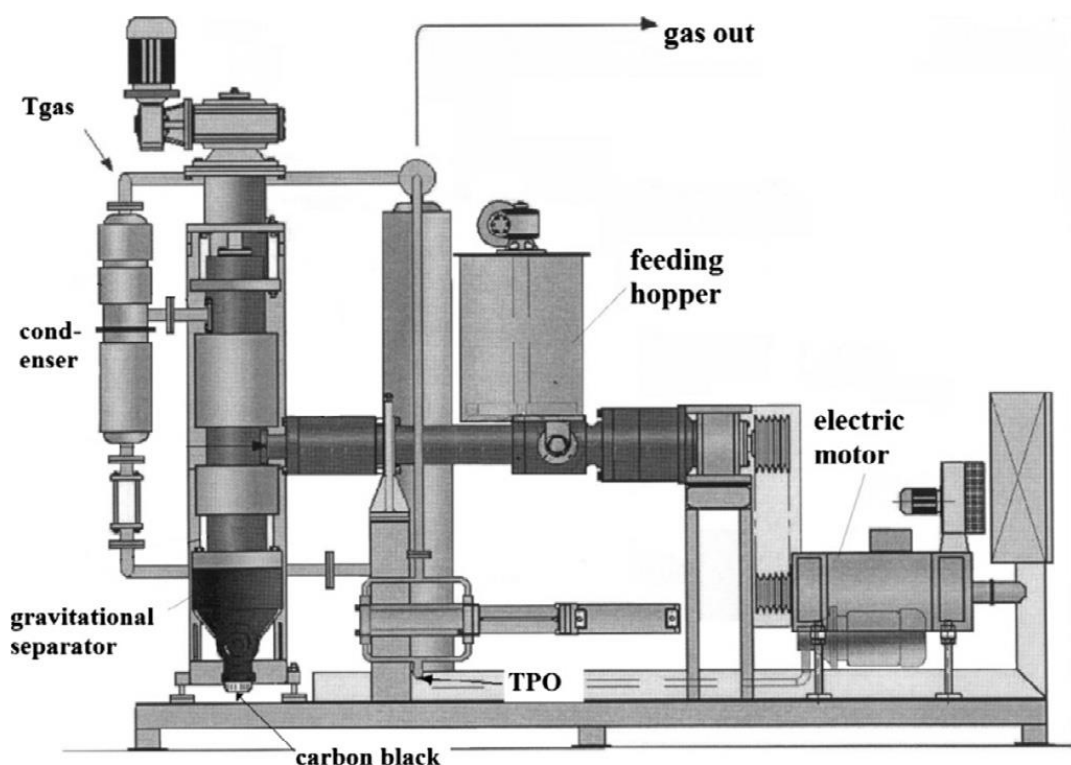


Figura 19 – Prototipo utilizado en la investigación [31].

La influencia de los parámetros para su investigación son la velocidad de calentamiento, la temperatura, la presión, así, como los tiempos de resistencia de elementos sólidos y volátiles en los rendimientos del producto y sus propiedades.

El principal problema de las aplicaciones a gran escala para impulsar el proceso de pirólisis es la transferencia de calor y la distribución uniforme de la temperatura.

f) Termólisis.

“Es la reacción en la que un compuesto es separable al menos de otros dos (metales, hidrocarburos sólidos y gaseosos), cuando se somete a temperaturas elevadas, sin presencia de oxígeno. Destruyendo los enlaces químicos que lo forman”.

La secuencia esquematizada quedaría:

Existe un primer paso de trituración para llegar a la termólisis obteniendo dos variantes, una gaseosa y otra sólida. En la primera de ellas, se aplica la combustión que también es aportada por parte del carbón después de la separación mecánica de la materia sólida. Obteniendo la producción de energía y el reciclaje del material.

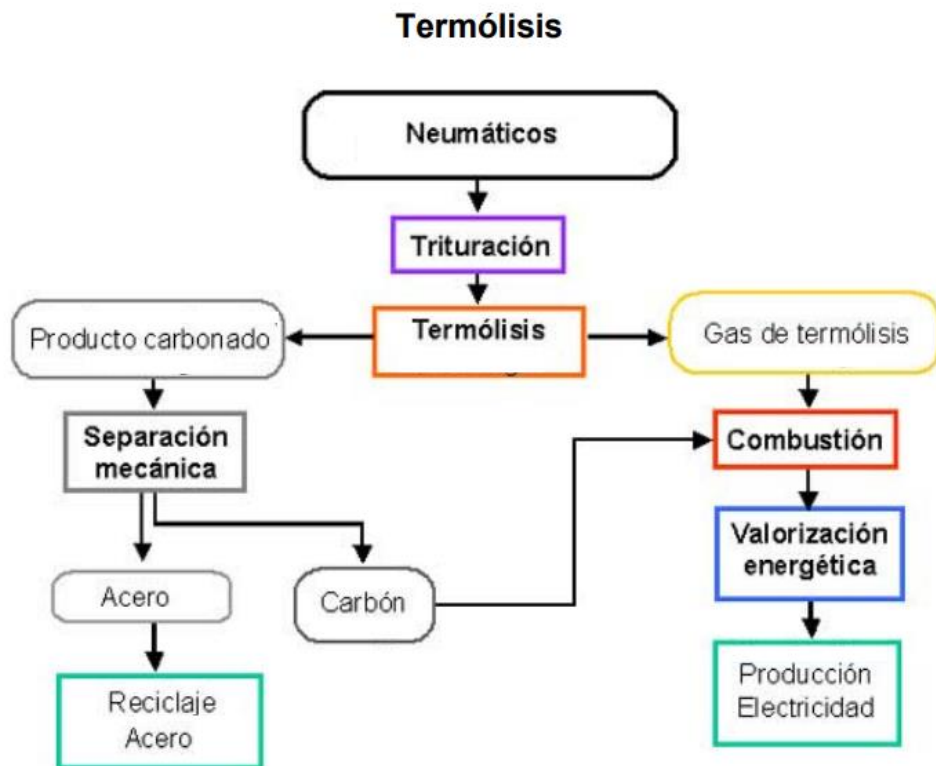


Figura 20 – Diagrama de bloques del proceso de termólisis.

2.5.2. Procesos y métodos de valorización de posos de café empleados en España.

En los diversos procesos de valorización que se pueden llegar a obtener con los posos de café, nos encontramos el problema explicado anteriormente que tiene este residuo, la humedad contenida.

Fundamentalmente este residuo se puede valorizar generando a partir de él biocombustibles como biodiesel y pellet, para su utilización como combustible de biomasa. También nombraremos otros usos que se le pueden dar a éste, pero que aún no están demasiado desarrollados, como los mencionados anteriormente.

A continuación, explicaremos los diferentes métodos más comunes utilizados para la recuperación, aprovechamiento y uso que se le está aplicando actualmente a este residuo.

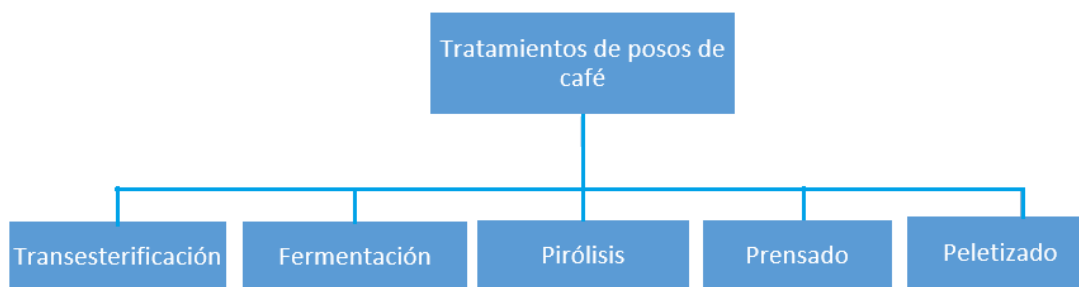


Figura 21 – Esquema de diversificación de los posos de café.

2.5.2.1. Transesterificación.

“Es el proceso más utilizado para la producción de biodiesel”. Es la “reacción entre un aceite o grasa vegetal y un alcohol en un medio catalizado, para así producir ésteres alquílicos de ácidos grasos (biodiesel) y glicerol o glicerina” [32].

“Los alcoholes empleados deben ser de bajo peso molecular, los más utilizados son el metanol y el etanol. Para que esta reacción sea completa, se necesita varios factores, mantener una temperatura de 60 °C, un catalizador básico (hidróxido o ácido) y un tiempo de reacción aproximadamente de 3 horas” [32].

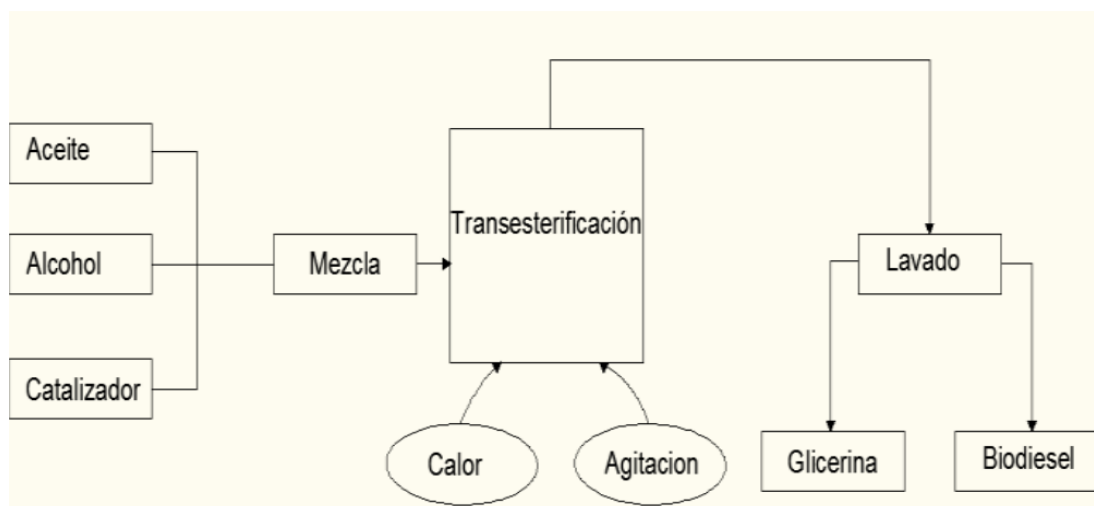


Figura 22 – Diagrama de bloques ubicando en el proceso de transesterificación para la generación de Biodiesel [33].

“En la síntesis del biodiesel los ésteres son una proporción aproximada del 90% más un 10% glicerina. Conteniendo una cantidad de grasa en torno al 15 – 20 % en base seca. El aceite extraído de los posos se estima que contiene, aproximadamente unos 150 gramos por cada kilo de residuo seco. Las cadenas de ésteres se convertirán en biodiesel, reteniendo moléculas de oxígeno (11% en peso del biodiesel) en su constitución, lo que le otorgará interesantes propiedades en la combustión” [32].

2.5.2.2. Fermentación.

“Es un proceso metabólico que lleva a cabo la degradación de oxidación incompleta de nutrientes orgánicos, transformándolos en productos finales simples”. Este proceso no requiere oxígeno y el producto final es un compuesto orgánico. En los posos de café se obtiene combustible, el bioetanol, a partir del índice de azúcar que contiene nuestro residuo.

2.5.2.3. Pirólisis.

“Es la descomposición térmica de un material en ausencia de oxígeno o cualquier otro reactante. Esta descomposición se produce a través de una serie compleja de reacciones químicas y de procesos de transferencia de materia y calor. La pirólisis también aparece como previo paso a la gasificación y combustión” [34].

En este caso se utiliza una pirólisis lenta y a baja temperatura, para así poder obtener bio-aceites, que puedan ser posteriormente valorizados como biocombustible o biocarburante.

Al igual que hemos tratado en el apartado referente a los neumáticos es un tratamiento muy similar, salvo la objeción de estar manejando un material orgánico, dando diferentes resultados de materias primas.

2.5.2.4. Prensado.

Este proceso de compactar los posos de café, se lleva a cabo una vez secados o extraídos de ellos el material, no siendo necesario que a estos le hayamos quitado parte de los elementos de los que están compuestos (azúcares, aceite graso).

2.5.2.5. Peletizado.

Proceso que consiste en la elaboración de materia en forma de gránulos o pequeños palitos circulares. Es uno de los más utilizados para valorizar este residuo, una vez seco, y en algunos casos prensado, éste es peletizado para su posterior uso en diferentes aplicaciones, como puede ser su utilización para combustible transformado en biomasa.

Estudios confirman que, éstos contienen un 20% más de poder calorífico que la madera. También mencionar que por cada kilogramo de posos de café se obtienen alrededor de 800 gramos de pellets.



Figura 23 – Peletizado de posos de café [35].

2.6. Usos que tienen nuestros residuos una vez valorizados.

En este apartado explicaremos los diferentes usos que le podemos dar. En la actualidad se les aplica a nuestros residuos, una vez pasados por los distintos procesos, explicados en el apartado anterior, consiguiendo un nuevo uso y evitar tanto almacenamiento, contaminación de estos residuos y las emisiones de CO₂ liberadas a la atmósfera.

2.6.1. Uso de los residuos de neumáticos valorizados.

2.6.1.1. Acero.

Según los estudios analizados, se obtiene aproximadamente la sexta parte del neumático, y el destino final de éste, es la fundición, de tal forma que puede ser reutilizado para fabricación de nuevos componentes metálicos.

2.6.1.2. Construcción de suelos de campos de fútbol, pistas de atletismo y parques infantiles.

Separados los residuos por el proceso de granulación, algunos de ellos son encapsulados en diferentes tamaños que oscilan del 0.5 mm a 4 mm, disponiendo de una gama de productos para la realización completa de campos de futbol, pistas de atletismo o parques infantiles, con caucho SBR [36]. Admitiendo los mismos diversas gamas de colores.

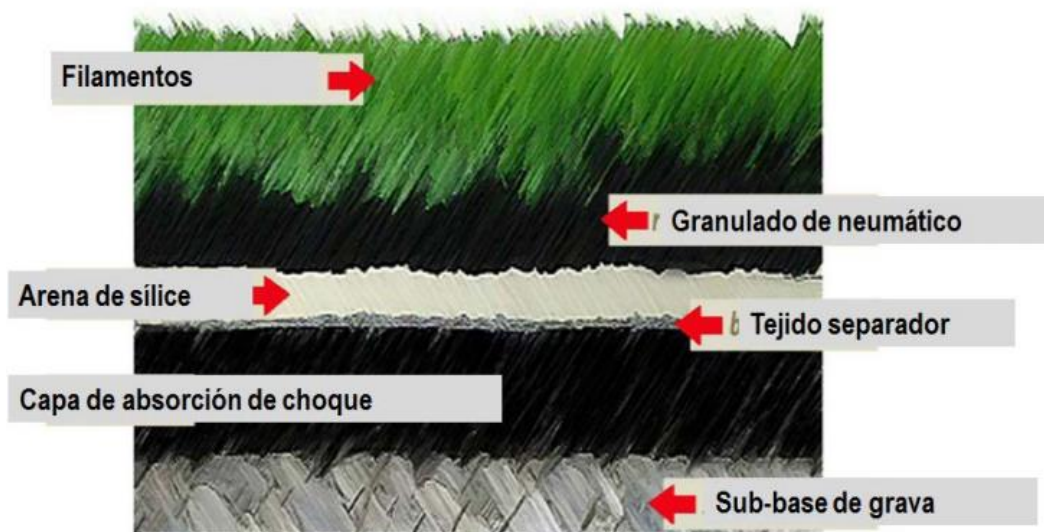


Figura 24 – Capas disponibles en un césped artificial con relleno de neumático.



Figura 25 – Suelo de parque infantil fabricado a partir del reciclaje del neumático [37].

2.6.1.3. Protección del revestimiento impermeable.

“El neumático entero se utiliza en casos para proteger terrenos en los taludes, garantizando la permeabilidad de los vertederos. Reduciendo así el impacto de la masa de residuos vertida y favoreciendo la recogida de aguas residuales filtradas a través de materiales porosos en los taludes” [38].

2.6.1.4. Aprovechamiento de la superficie para balsas de almacenamiento e infiltración.

“El neumático entero puede disponerse en capas homogéneas y utilizarse en la construcción de balsas de infiltración, y mantener el ciclo hidrológico del agua, como de retención, para la reutilización del agua almacenada a otros usos” [39].



Figura 26 – Utilización de neumáticos para construcción de balsas [40].

2.6.1.5. Uso como material de drenaje.

“La alta conductividad hidráulica que presenta el triturado del neumático, aporta unas buenas propiedades como material de filtro. Esto permite el aprovechamiento del material para la construcción de diferentes capas estructurales en vertederos, la capa de drenaje de fondos en los vertederos y la capa de recogida de aguas superficiales” [11].



Figura 27 – Utilización de neumáticos triturados como material drenante [41].

2.6.1.6. Extracción de biogás.

“En este caso la alta porosidad del triturado cumple dos objetivos fundamentales, el primero, dirigir el biogás generado hacia una tubería de aspiración gracias a su alto índice entre huecos y, en segundo lugar, su gran capacidad de absorción de los empujes del propio residuo dentro del vertedero” [11].

2.6.1.7. Producción eléctrica.

A través de un tratamiento térmico de oxidación completa, la incineración, aprovechamos el alto contenido energético del neumático para la obtención de energía eléctrica, a partir del calor que ha sido generado durante este proceso. Este lleva anexo demasiadas desventajas por la contaminación que genera, y habría que depurarlas.

De los diferentes elementos que se extraen en este proceso de valorización, los gases pueden ser aprovechados para accionar turbinas, produciendo electricidad y ésta puede ser incorporada a la red o ser consumidas en la propia planta.

2.6.1.8. Combustible de sustitución.

Las plantas cementeras producen energía eléctrica a pequeña escala para la alimentación de un motor de combustión interna. Es un combustible alternativo al petróleo con aceite extraído de proceso de pirólisis.

“La utilización del neumático como combustible sólido recuperado (CSR)” [42] en la industria supone algo más que un aprovechamiento energético, constituyendo por lo tanto un proceso mixto o co-proceso del neumático.

Entre los beneficios esta la reducción de las emisiones de CO₂, debido al origen renovable del contenido de caucho natural y su bajo contenido en humedad.



Figura 28 – Cementera que utiliza neumáticos como combustible ubicada en Castilla León [43].

2.6.1.9. Aplicaciones en ingeniería de vertederos.

Cuando se trata de la utilización de neumáticos en vertederos para la aplicación de obra civil, la legislación actual contempla que estos pueden ser usados, tanto enteros como triturados, en aplicaciones acordes con estas estructuras.

Se aprovecha el neumático fuera de uso, utilizándolo como relleno ligero de terraplenes, se aplica la norma ASTM D6270-08 “Estándar Practice for Use of Scrap Tires in Civil Engineering Applications” [39].



Figura 29 – Relleno de terraplenes con neumáticos usados [44].

2.6.1.10. Otras aplicaciones para los neumáticos.

- “Mezclas bituminosas con polvo de neumático, confieren unas propiedades superiores a las mezclas asfálticas con diferentes betunes. Obteniendo mejoras a la fatiga, resistencia a las rodadas y a las fisuras [45].
- “Aplicación ornamental, en jardines o rotondas podemos encontrar material procedente del neumático, puede aplicarse una coloración especial y su principal beneficio es la reducción de agua de riego que llevaría un jardín tradicional [39].
- Suelas de calzado, fabricadas con polvo o granulado. Resisten la dureza. Se desgastan menos que el resto del calzado.
- Fabricación de piezas de caucho, usado en numerosas piezas de goma. El caucho reciclado se puede usar como carga de refuerzo.
- Pantallas acústicas, una de sus cualidades utilizadas como láminas, es la absorción de vibraciones procedentes del exterior, creando así, un aislamiento acústico.
- Barreras de protección en circuitos de seguridad, éste presenta una gran capacidad de absorción y resistencia a la intemperie, por ello, es utilizado en barreras de protección de barcos, muelles y en muros de protección de circuitos automovilísticos.
- Reductores de altura de ola, aplicados en aguas interiores o marítimas moderadas, se consigue combinando diversos efectos como forma, disposición o estructura, sobre sencillos sistemas reduciendo la altura de las olas.” [39].

2.6.2. Uso de los residuos de los posos de café valorizados.

2.6.2.1. Piensos.

“La pulpa del café puede reemplazar parte de los concentrados comerciales para la alimentación de ganado. Pero para que ésto no sea perjudicial para la salud, tanto del propio animal como posteriormente del ser humano que la ingiere, no se debe superar por una adicción mayor al 20%, dependiendo del animal que se trate. Estos estudios están siendo empíricos con animales tanto marinos como terrestres y hasta ahora se han logrado éxitos como mayor aumento de peso con respecto a los alimentados con concentrados comerciales” [46].

2.6.2.2. Biogás.

Mezclada con agua, la pulpa, su evolución hace posible la producción de un biogás de metano altamente enriquecido, que tiene únicamente la mitad del nivel habitual de CO₂ inerte. Para sacar el mejor rendimiento del biogás, se consigue haciendo funcionar con él un motor para generar electricidad, y el calor residual más bajo procedente de la refrigeración y gases de escape pueden ser usados para el secado de café.

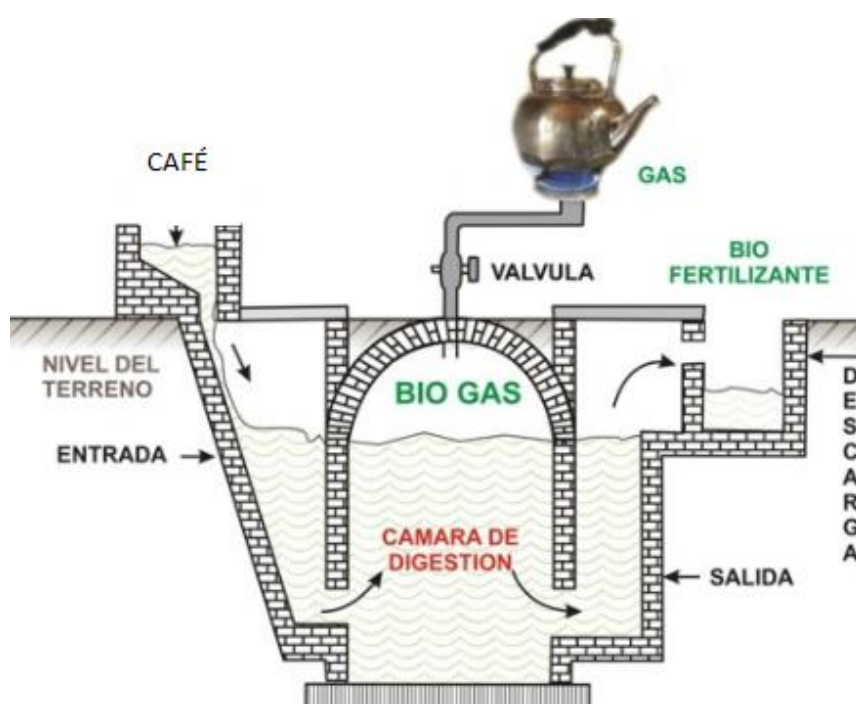


Figura 30 – Producción de biogás a partir de café.

2.6.2.3. Combustible

Puede quemarse la cascara en un generador de gas pobre y accionar un motor sobre ese gas para producir electricidad. Igual que con el biogás, el calor residual procedente de ese generador de gas y del motor, puede utilizarse para calentar una corriente de aire limpio y ésto aún secar más el café.

2.6.2.4. Calzado

En centros tecnológicos se están investigando nuevas aplicaciones que permitirán suelas y entresuelas de calzado con propiedades aromáticas y antimicrobianas, teniendo en cuenta el entorno acuoso que se puede encontrar dentro del calzado, debido al vapor de agua que genera el propio pie. Esto confirmaría definitivamente las propiedades citadas.

2.6.2.5. Pellets

Al igual que con los huesos de aceituna, sarmientos de viña, madera... se puede emplear el poso de café, obteniendo un biocombustible más rentable en poder calorífico que el conseguido con el hueso de aceituna. A parte de la extracción de azúcares y grasas para la producción de bioetanol y biodiesel, respectivamente.

2.6.2.6. Otros

Investigados para materia textil, agrícola, farmacéutica, etc.

2.7 Ejemplos de plantas de valorización de neumáticos y posos de café en España.

2.7.1. Plantas de valorización de neumáticos en España.

2.7.1.1. SIGNUS.

SIGNUS Ecovalor “es una entidad sin ánimo de lucro creada en mayo de 2.005, incentivada por los principales fabricantes de neumáticos, con la finalidad de que pueda ser utilizado como mecanismo con el que todos los productores que lo deseen, puedan cumplir con las obligaciones que les impone el Real Decreto 1619/2005” [11].

Para garantizar la correcta gestión medioambiental de la vida del neumático y gestionar su correcta valorización, es el precio que paga el productor y el mismo que repercute en toda la cadena comercial.

 Tarifa Ecovalor			
Categorías	Descripción	Detalle de los productos	Precio/Ud
A	Moto, Scooter, Ciclomotor	todos los productos	0,70 €
B	Turismo	todos los productos	1,18 €
C	Camioneta, 4x4, SUV	todos los productos	1,90 €
D	Camión	todos los productos	8,80 €
E1	Agricultura, Obra Pública, Industrial, Macizos, Manutención, Quad, Kart, Aeronaves, Resto de neumáticos	(*) 0,00 - 5,00 kgs	0,29 €
E2		5,01 - 20,00 kgs	1,73 €
E3		20,01 - 50,00 kgs	3,78 €
E4		50,01 - 100,00 kgs	9,24 €
E5		100,01 - 200,00 kgs	18,00 €
E6		> 200,00 kgs	31,50 €

Tarifas vigentes a partir del 1 de julio de 2019
I.V.A. o I.G.I.C. no incluido

Nota: los neumáticos cuyo diámetro sea superior a más de 1.400 mm. quedan excluidos (RD1619/2005)

Figura 31 – Tasas aplicadas a cada neumático cuando es sustituido en taller [11].



Figura 32 – Imagen del interior de la planta de reciclaje de neumáticos.

2.7.1.2. RNC.

Coopera junto con SIGNUS, encargada de la gestión integral a nivel nacional de los neumáticos fuera de uso, realizando la separación del neumático con una alta eficiencia y obteniendo los distintos materiales: caucho, acero y fibra textil. Esta empresa está dotada de sistemas de limpieza para garantizar productos de alta pureza.

“Realizando estudios de las propiedades del caucho reutilizado, junto con la industria química y encontrando así productos únicos como el caucho encapsulado, estando éste homologado y certificado por el IBV (Instituto de Biomecánica de Valencia)” [7].

Esta empresa realiza una labor de valorización del neumático fuera de uso, mediante varios procesos y convierten este residuo en un producto listo para ser comercializado.

Su cadena de reciclado es la siguiente:

“La planta realiza la recogida y clasificación para reutilización y valorización de los neumáticos fuera de uso (NFU). El proceso de recogida de NFU se realiza desde los puntos de producción, donde se trasladan a las instalaciones y se realiza la fase de clasificación, ésta separa los NFU y NRU”. De éstos, solo el 7% de los neumáticos que llegan a la planta vuelve al mercado como neumático de uso reutilizable (NRU) [7]. Llegando a la fase final donde se realiza la separación de los productos a valorizar.

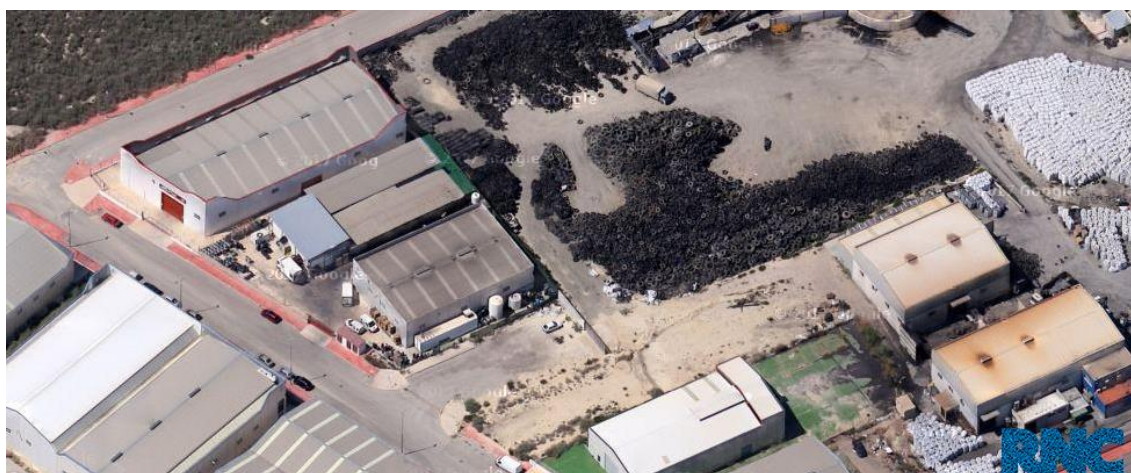


Figura 33 – Imagen aérea de la planta RNC ubicada en la provincia de Murcia. [7]

2.7.1.3. Reciclado de neumáticos de Andalucía. (RENEAN) (Jaén).

Esta empresa “posee un tratamiento de neumáticos que cuenta con un ciclo de producción que se obtiene a partir de neumático, separándolo en diferentes tamaños de granulometrías de caucho, y al mismo tiempo la separación de otros componentes del neumático como son el acero y la fibra textil”. Se obtiene polvo neumático en tres grandes

grupos: 0.0/0.6 mm, 0.6/2.0 mm y 2.0/4.0 mm. El acero conseguido es de alta calidad y buenas prestaciones que es mandado para reciclarlo en la industria de siderurgia. Se extrae la fibra de neumático, material derivado del petróleo con un gran poder calorífico y buenas propiedades de aislamiento acústico y térmico” [47].



Figura 34 – Imagen del exterior de la planta RENEAN ubicada en la provincia de Jaén [48].

2.7.1.4. ENRECO 2000.con ayuda de (CSIC CENIM INCAR).

“Posee un método de reciclaje que consiste en someter a los neumáticos a un proceso térmico para convertirlos en combustibles y gases capaces de generar energía eléctrica” [49]. Estos pasan por los procesos de destilación y gasificación, explicados anteriormente.

Obteniendo una parte de aceite por condensación a baja temperatura, transformándolo más tarde en gasolina y diésel. Por otro lado, se generan gases que no han sido condensados y se transforman en energía eléctrica. Y un residuo sólido denominado CHAR [50], convertido en combustible mediante gasificación.

La ventaja de este método es no generar residuos ni emisiones, y lo transforma en combustible y energía eléctrica, contribuyendo así a la disminución de las emisiones de CO₂” [51].



Figura 35 – Imagen del exterior de una fábrica de cemento preparada para la valorización energética [52].

2.7.1.5. Recumatic

Esta fue creada en el año 2.000 con una iniciativa emprendedora respondiendo a la normativa ambigua del reciclaje del neumático, adaptándose a la normativa establecida actualmente.

Valorizan el tratamiento de neumáticos y caucho sintético de la comunidad autónoma de Castilla y León. Su objetivo era conseguir que fuera compatible la actividad con la protección del medioambiente.

Los neumáticos fuera de uso (NFU) provienen de la industria automovilística, distribuyéndose de la siguiente forma: Profesionales de la carretera (65%), garajes y estaciones de servicio (19%) y distribuidores del producto (16%).

Hasta la entrada en vigor del Real Decreto 1619/2005, estos eran recogidos por servicios municipales o comarcales, o directamente transportados por los talleres a los vertederos públicos. A partir de esa fecha se crea un sistema integrado de organización, que asegura la gestión y el tratamiento de los NFU generados en España, así como la reutilización y valorización de los mismos.



Figura 36 – Imagen de la planta Recumatic para triturado de neumático ubicada en Burgos [53].

2.7.1.6. Gestión Medioambiental de Neumáticos (GMN).

Ubicada en la provincia de Lleida. Empezó su funcionamiento en 2.001. Integra todas las actividades relacionadas con la gestión del NFU, desde la recogida hasta la venta del producto reciclado.

Siguiendo las siguientes etapas:

- “Recogida: Servicio de recogida, logística y transporte de los neumáticos desde talleres y centros de producción.
- Recepción: Recepción y clasificación en base a su tipología y estado.
- Recuperación: Recuperación de las unidades en mejor estado para la venta o recauchutado.
- Trituración: Trituración del resto de neumáticos en tamaños inferiores a 150mm
- Granulación: Granulación del triturado y obtención de granza de caucho de diversas tipologías y granulometrías.
- Productos: Granza de caucho” [54].

Aplicación	Intervalos Granulométricos (mm)
<i>Asfaltos</i>	0 – 1
<i>Césped artificial</i>	0.5 – 3
<i>Losetas</i>	1 – 4
<i>Pavimento en continuo y alcorques</i>	2 – 10
<i>Hípica, rellenos de obra civil</i>	6 – 20

Tabla 1 – Intervalos granulométricos para distintas aplicaciones, [54].

2.7.1.7. Empresa de Grupo Sacyr.

Situada en Chiloeches (Guadalajara). Su rango de actuación es la zona centro de España. Separando como en las anteriores los tres elementos esenciales del neumático para valorizarlos y llevarlos a su proceso primario de producción. Es la planta con mayor capacidad para el reciclaje, actualmente unas 25.000 toneladas anuales, estando preparada para procesar hasta 40.000 toneladas.

2.7.1.8. Neumáticos Adrián Moreno.

Empresa ubicada en Málaga, por su carácter prácticamente familiar, recicla 800 toneladas de neumáticos al mes utilizándolo en gran medida como combustible para la industria cementera. La utilización del neumático triturado como combustible, produce la misma energía que la gasolina.

PLANTAS RECICLADORAS	CAPACIDAD DE TRATAMIENTO DE NFU (tn/año)	PRODUCCIÓN DE CAUCHO (tn/año)
RMD Añacóllar (Sevilla)	20.000	12.000
RENEAN Espeluy (Jaén)	15.000	9.000
AMSA Pont de Vilomara (Barcelona)	15.000	9.000
ANDALUZA DE RECICLAJES ASNA	12.000	7.200
Planta de NFU Zaragoza	12.000	7.200
Granulados Levantinos de Caucho Xirivella (Valencia)	6.000	3.600
TOTAL	80.000	48.000

Figura 37 – Tabla de empresas de reciclaje de neumáticos y sus datos de reciclaje [55].

PLANTAS RECICLADORAS	PLANTAS VALORIZADORAS (Valorización Energética)
RENECAL (Palencia)	Carboneras (Almería) HOLCIM
RMD (León)	Sagunto (Valencia) ASLAND
RMD (Sevilla)	Torredonjimeno (Jaén) HOLCIM
ALFREDO MESALLES S.A. (Barcelona)	Lemona (Vizcaya) PÓRTLAND VALDERRIBAS
ANKER (Vitoria)	San Vicente del Raspeig (Alicante) CEMEX
GMN (Lérida)	Málaga ITALCEMENTI
RNC (Murcia)	Oucal (Lugo) COSMOS
EMA (Castellón)	Yeles (Toledo) HOLCIM
DAPAR (Córdoba)	Yepes (Toledo) CEMEX
GESCOMETAL (Asturias)	Lorca (Murcia) HOLCIM
INSATURBO (Alicante)	San Sebastián (Guipúzcoa) ITALCEMENTI
RENEAN (Jaén)	Villaluenga de la Sagra (Toledo) ASLAND
AMSA (Pont de Vilomara – Barcelona)	Son Reus (Mallorca, Baleares) TIRME
Andaluza de Reciclajes ANSA (Andalucía)	
NFU (Zaragoza)	
Granulados Levantinos de Caucho Xirivella (Valencia)	
Reciclados Corbera, S.L. (Consuegra, Toledo)	
Tratamiento de residuos del neumático, S.L. (Toledo)	
Reciclajes Jospat S.L. (Yeles, Toledo)	
Reciclajes La Mancha, S.L. (Campo de Criptaza, Ciudad Real)	
Negrell Residuos (Banyoles, Girona)	

Figura 38 – Empresas de reciclaje y valorización en España. [55]

2.7.2. Ejemplos de plantas de valorización de neumáticos en el mundo.

2.7.2.1. Planta de valorización de neumáticos en Noruega, Norsk Dekkretur.

Creada en 1.995 para la gestión de los neumáticos fuera de uso. Al igual que Signus, establece una financiación por cada neumático nuevo o recauchutado.

Al comienzo, los neumáticos se usaban para abastecer a las cementeras como combustible alternativo, aunque avanzando en el tiempo se le dieron más uso como en ingeniería civil, alfombras para animales o recauchutado.

2.7.2.2. Planta de valorización en Hungría, Öko-Gum.

Asociación de empresas de reciclaje de neumáticos. Su financiación es compartida, tasación de producto más cuota de utilización pagado por el consumidor.

Los neumáticos usados se le dan superficies de campos de fútbol, carril bici, carreteras agrícolas y re-cultivo de vertederos.

2.7.3. Ejemplos de plantas de valorización de posos de café en España.

2.7.3.1. NESTLE.

La empresa Nestlé ha comenzado la construcción de una planta en Girona, dedicada a la valorización de posos de café, que con ello elaborará café soluble y bebidas en cápsulas monodosis.

Esta nueva planta dispondrá de una caldera que utilizará el poso sobrante de la elaboración del café instantáneo, para obtener vapor y con este obtener movimiento en las turbinas para producir electricidad y vapor gracias a la caldera de recuperación, que aprovecha la energía térmica de los gases calientes.

Está previsto que empiece a funcionar a mediados de 2.020, estimándose las siguientes cifras: Generación de 125.000 toneladas de vapor al año, suponiendo un ahorro del 25% del consumo de gas natural de la fábrica. Ahorro con esta caldera del 70% de la energía demandada por ésta que será totalmente eficiente [56].



Figura 39 –Imagen de la planta de Nestlé, ubicada en Girona [57].

2.7.3.2. Contenedores Madrid.

Hace unos años, hemos empezado a separar los materiales orgánicos del resto de residuos. En algunas ciudades aparece un nuevo contenedor de color marrón, como en la ciudad de Madrid, para la materia orgánica. En él se podrán depositar restos de fruta, verdura, restos cocinados de carne y pescado, frutos secos, infusiones, posos de café y cáscaras de huevo, entre otros. Es el quinto contenedor de la ciudad.

La idea es intentar cumplir con el objetivo europeo para el próximo año, 2.020 que consiste en rebajar un 20% la cantidad de residuo generado y alcanzar la cifra del 50% de residuos preparados y separados para su posterior reutilización.



Figura 40 – Imagen de los distintos contenedores “marrones” de la ciudad de Madrid [58].

El biorresiduo se aprovecha como material fertilizante y como generador de energía, recuperándose por separado, así evitamos emisiones a la atmósfera de gases de efecto invernadero y malos olores, con la consecuencia de reducir la cantidad de residuos que se depositan en los vertederos.

Actualmente, esta primera experiencia ha ido creciendo de forma progresiva hasta cubrir 12 distritos a día de hoy y atender una población de 1.800.000 personas. Se recogen de forma diaria sobre 270 toneladas de este residuo [59].

2.7.3.3. Up energía

Su proceso para la producción de biocombustible sólido es el aprovechamiento de la materia prima. En el caso de los residuos del café, se recogen de los bares, restaurantes, hoteles... para la producción de pellets y potenciar así la economía circular. Los residuos que generamos como sociedad son recolectados, transformados y devueltos a ella en forma de energía.

Sus objetivos son luchar contra los problemas surgidos de efecto invernadero y fomentar una mejor gestión de los residuos. Para alcanzar los anteriores puntos, debe ser una empresa social capaz de gestionar miles de toneladas de residuos para generar miles de toneladas de pellet.

2.7.3.4. Ecoalf. Posos de café para fabricación de prendas.

“El proyecto nació en 2.009 con la idea de crear una compañía de moda sostenible. Actualmente sus prendas se distribuyen a través de su página web y cuentan con puntos de venta físicos en Estados Unidos, Londres, Milán, Japón, Beijín, Austria, París, Alemania y España.

Han desarrollado una generación de productos de moda con materiales reciclados, ofreciendo la misma calidad, diseño y propiedades técnicas que los mejores productos no reciclados del mercado. Donde otros ven basura ellos han sabido ver materia prima. Las materias primas utilizadas en su colección de ropa, calzado y accesorios son las siguientes: redes de pesca usadas, neumáticos usados, lana reciclada, algodón reciclado, botellas de plástico y posos de café.

Los posos de café molido son recogidos diariamente por la sociedad de café. El primer paso es secarlo y extraer el aceite. Los posos de café se muelen hasta conseguir

un tamaño de nano-polvo que se mezcla con polímeros de poliéster reciclado con el fin de crear hilo” [60].



Figura 41 – Ejemplo de tejido formado a partir de posos de café [61].

2.7.4. Investigación sobre la valorización de posos de café en España.

2.7.4.1. Universidad de Jaén.

La Universidad de Jaén realiza una investigación sobre el secado de posos de café para obtener energía. Ésta comenzó hace años, dirigida por el investigador Francisco Javier Gómez, intentando extraer biodiesel a partir de alperujo seco de café.

Realizando análisis han llegado a la conclusión que se debe comenzar con un alto grado de secado de las muestras. Continúa el proceso de investigación, intentando dar el salto a niveles industriales para conseguir biocombustibles a mayor escala, teniendo como hándicap el reunir una cantidad elevada de este residuo para que sea rentable.

De estas investigaciones confirman que con 40 kg de posos de café podríamos hacer el suficiente biocombustible para que un vehículo recorriese unos 100 km.

El siguiente paso es recoger los residuos de café en bares, restaurantes, domicilios... y trasladarlos a empresas de reciclaje que tengan instalaciones según sistema ideado, para su conversión en biocombustible. También obtiene 150 gramos de grasa por kilogramo de poso de café seco, convirtiéndose en su mayoría en bioetanol o biodiesel.



Figura 42 – Imagen de prototipo utilizado en las instalaciones de la universidad de Jaén para la investigación del secado de los posos de café [62].

2.7.4.2. Universidad Pública de Navarra y Biopar.

Recientemente, el trabajo de la Universidad Pública de Navarra en conjunto con la empresa privada Biopar, han conseguido desarrollar un proceso de fabricación económicamente rentable para la explotación de posos de café en forma de pellets para calderas de biomasa.

Afirman que este combustible tiene un poder calorífico un 20% superior al de los pellets tradicionales, que el proceso de fabricación tiene una tasa de conversión del 80% de transformación de residuo a pellets.

Estos generan menos cenizas que los tradicionales. Además, la mayoría de las calderas de biomasa actuales no deberían requerir ningún tipo de ajuste, lo cual es una ventaja importante para su introducción en el mercado. También destacar que el potencial de los posos de café no se queda en su utilización como biomasa. Investigaciones de otras universidades como la de Jaén o Bath, investigan la obtención de bioetanol y biodiesel.

2.7.5. Plantas de valorización de posos de café en el mundo.

2.7.5.1. Biobean (autobuses Londres con biocombustible a partir de posos de café.)



Figura 43 – Imagen de autobús londinense con la campaña de biocombustible a partir del café [63].

Esta empresa tenía el proyecto en las estaciones londinenses de Victoria y Waterloo. Ampliando el acuerdo para aprovechar los residuos de café generados en las siguientes estaciones de ferrocarril más grandes de Londres, Euston, King's Cross, Liverpool Street, Paddington, Victoria y Waterloo y producir biocombustible.

Estudios confirman cifras de alrededor de 700 toneladas de café en estas estaciones al cabo del año, con lo que esta empresa pretende producir 650 toneladas de biocombustible neutro en carbono, combustible apto para calentar hogares, oficinas, empresas e incluso para la utilización en vehículos.

Estimando un aprovechamiento por cada tonelada de residuo de poso de café capaz de producir 5.700 KW/h de energía. Suponiendo la cifra de 700 toneladas capaces de proporcionar suministro energético a mil hogares.

Además de que valorizar este residuo también supone una supresión de emisiones a la atmosfera de 5.000 toneladas de dióxido de carbono (CO₂).

2.7.6. Ejemplos singulares de valorización de posos de café.

2.7.6.1. The Café Racer: correr con combustible de café.

Es una competición con coches usando un combustible peculiar, con posos de café. “Los participantes en la competición The Café Racer utilizan los posos de dicho alimento como combustible para sus coches. Para ello se basan en la gasificación, un método que transforma cualquier tipo de biomasa en un vapor inflamable válido para motores de combustión interna. Este proceso no es nuevo, durante la Segunda Guerra Mundial, cuando no había gasolina en Europa, más de un millón de vehículos lo emplearon para convertir el carbón y virutas de madera en gas” [64].

Básicamente sería utilizado para generar energía eléctrica a nivel individual (por hogares) en lugares aislados, a falta de red de energía comercial y contribuyendo al impacto medioambiental que generan los otros combustibles alternativos.

3. Materiales y métodos.

3.1. Caracterización de la biomasa empleada.

3.1.1. Granulado de neumáticos.

Las muestras con las que realizamos la investigación es un granulado de neumáticos proporcionado por el Departamento de Ingeniería Eléctrica del Campus Tecnológico de Linares (Universidad de Jaén), como se muestra en el Anexo de este trabajo (Figura 60). Por dificultades en la fase de prensado y existiendo espacios muy grandes que impedían componer la muestra compacta de granulado para realizar la prueba en la bomba calorimétrica, recurrimos a tomar unas muestras de un neumático usado, con las misma similitudes, dimensiones y peso necesario para realizar nuestros ensayos. Este fue proporcionado por el Departamento de Ingeniería de Materiales del Campus Tecnológico de Linares (Universidad de Jaén), de la marca Michelin, expuesto en la siguiente figura (Figura 44).



Figura 44 – Muestra de neumático utilizado para el análisis realizado con la bomba calorimétrica, suministrado por el Departamento de Ingeniería de Materiales (Campus Científico Tecnológico de Linares).

3.1.2. Posos de café.

Los residuos de posos de café secados y proporcionados por el Departamento de Ingeniería Eléctrica del Campus Tecnológico de Linares (Universidad de Jaén), ilustrado en el anexo de este TFG (Figura 61), serán los que utilizaremos en la fase de investigación, para obtener valores del poder calorífico de este residuo.

Así mismo, los residuos de posos de café empleados para determinar el porcentaje de humedad en peso con otras muestras similares. Siendo proporcionado por los servicios de hostelería de la citada universidad.

Para analizar los residuos con los que estamos trabajando, realizaremos un estudio de la manera tanto química como analítica, para determinar las propiedades energéticas que podemos llegar a obtener de estos.

3.2. Humedad de los posos de café.

Como mencionamos anteriormente en este mismo documento, la dificultad principal a los que nos enfrentamos con este residuo, es su alto porcentaje de humedad, en torno a un 70%.

Sin embargo, realizaremos un análisis y pruebas experimentales para eliminar la humedad de nuestras muestras, y así, poder obtener unos resultados apropiados para comparar los valores que obtendremos de este análisis, con los que tenemos en bibliografía.

La investigación empieza con calcular la humedad de los posos de café y lo realizaremos con tres muestras de la cafetería de la universidad. Éstas las someteremos a un proceso de secado en un horno mufla ubicado en el laboratorio de la universidad, con él verificaremos por tramos nuestras prácticas de la humedad durante el tiempo de exposición.



Figura 45 – Muestras introducidas en el horno mufla.



Figura 46 – Temperatura seleccionada del horno.

3.3. Pasos a seguir para procedimiento del ensayo de secado de posos de café.

El procedimiento y análisis de secado realizado en el laboratorio, se divide en las siguientes fases:

- Recogida de residuos de la cafetería de la escuela.
- Pesado de los recipientes vacíos.
- Llenado de los recipientes.
- Pesado de los posos de café en balanza de precisión.
- Introducción de los recipientes en horno a temperatura controlada (aproximadamente 90° C).
- Segunda pesada de los recipientes transcurrido 24 horas en horno.
- Análisis de los resultados.
- Obtención de la humedad inicial de los residuos.

3.3.1. Recogida de residuos de posos de café de la cafetería de la escuela.

Se toman muestras en la cafetería del Campus Científico Tecnológico de Linares de posos de café húmedos, con los que realizaremos nuestros ensayos. Para ello, se preparan recipientes de vidrio totalmente limpios y secos, para no aportar en ellos humedad ni otros elementos que pudieran afectar al resultado final.

3.3.2. Pesado de los recipientes vacíos.

Realizamos sobre las cubetas de ensayo el pesado de los recipientes vacíos en una balanza de precisión del laboratorio, eligiendo para ello que fuesen de cristal transparente y soportaran las temperaturas a la que iban a estar sometidos. Siendo estos identificados numeralmente, como se muestra en la figura (Figura 48).



Figura 47 – Pesado de recipiente vacío número 1.

3.3.3. Llenado de los recipientes.

Una vez testados los recipientes vacíos donde van a ser depositadas nuestras muestras a analizar, introducimos el material a estimación con una cuchara de precisión para su llenado, tratando que estas cantidades sean aproximadas, y colocándolas de manera uniforme sobre el fondo del recipiente.

3.3.4. Primera pesada de los recipientes con los posos de café húmedos.

Con los recipientes ya preparados, procedemos a la primera pesada que nos servirá de referencia para analizar el porcentaje en humedad que éstos contienen, y así iniciar la tabla de valores que nos irá indicando el transcurso de la investigación.



Figura 48 – Pesado de recipiente 2 con muestras de café húmedo.

3.3.5. Introducción de los recipientes en horno.

Ya identificadas nuestras muestras y puestas de manera uniforme sobre los vasos, las introducimos centradas sobre la rejilla del horno mufla con temperatura controlada, de aproximadamente unos 90°C.

La alta temperatura a la que sometemos las muestras provocará la evaporación del agua contenida en nuestro residuo. Si elevamos la temperatura en este tipo de ensayo, nuestro residuo contiene material volátil que podría ser eliminado a una temperatura superior.

3.3.6. Segunda pesada de los recipientes con los posos de café.

Para esta pesada, las muestras deberán permanecer en el horno durante 24 horas, para eliminar parte del porcentaje de humedad que contiene. Transcurrido este tiempo, se pesan, calculando que éstas hayan perdido al menos un 0.5% en peso por hora, ya que ese valor sería suficiente. En caso de no alcanzar ese objetivo, deberían volver a introducirse en el horno con los mismos valores y ser pesadas en intervalos de diez horas, hasta obtener entre las dos pesadas un porcentaje en peso inferior al 0.5% desde el inicio.

En caso contrario, deberíamos realizar este proceso de nuevo hasta que nuestras muestras no superen el valor anterior y fuesen similares las pesadas. El sistema de operación utilizado se lleva a cabo siguiendo la norma UNE-EN ISO 18134-1:2016.

3.4. Análisis de los resultados obtenidos.

A continuación, en las siguientes tablas se observan los resultados de las pesada inicial y final de nuestras muestras analizadas en el laboratorio. Siendo éstas sometidas a un proceso de secado en horno a temperatura y tiempo controlados, explicado anteriormente.

PESADO INICIAL DE LOS POSOS DE CAFÉ

	Peso Vaso (g)	Peso total (g)	Peso de los Posos de café (g)
Muestra 1	49.254	72.465	23.211
Muestra 2	43.865	68.345	24.48
Muestra 3	32.154	49.169	17.015

Tabla 2 – Pesado inicial de los posos de café.

PESADO DE LOS POSOS DE CAFÉ TRAS SECADO EN HORNO

	Peso Vaso (g)	Peso total (g)	Peso de los Posos de café (g)
Muestra 1	49.254	59.610	10.356
Muestra 2	43.865	54.897	11.032
Muestra 3	32.154	39.811	7.657

Tabla 3 – Pesado realizado de las muestras de posos de café una vez sometidas a secado en horno.

3.5. Obtención de la humedad inicial de los posos de café.

El porcentaje que obtenemos de humedad, es el que contenían nuestros posos de café al inicio del secado. Éste se consigue si utilizamos la siguiente ecuación, que relaciona los términos de la muestra inicial con la muestra seca y con ella podemos valorar su contenido:

$$w (\%) = \frac{w_i - w_f}{w_i} \cdot 100 = \frac{(P_{im} - Pr) - (P_{fm} - Pr)}{(P_{im} - Pr)} \cdot 100$$

Donde:

- $W \rightarrow$ Contenido en humedad en %
- $W_i \rightarrow$ Peso de la muestra húmeda o $(P_{im} - P_r)$ (Peso de la muestra húmeda más el recipiente, menos el recipiente).
- $W_f \rightarrow$ Peso de la muestra seca o $(P_{fm} - P_r)$ (Peso de la muestra seca más el recipiente, menos el recipiente).

Los resultados que obtenemos aplicando la ecuación anterior quedan reflejados en la siguiente tabla:

CALCULO DE LA HUMEDAD (%)

Muestra 1	55.38322347
Muestra 2	54.93464052
Muestra 3	54.99853071
MEDIA	55.1054649

Tabla 4 – Cálculo de la humedad inicial de nuestras muestras de posos de café.

Obteniendo los valores de las tres muestras con las que hemos realizado los ensayos, calculamos el contenido inicial de su media aritmética dando un valor de un 55.11%. Lo que supone que al final de nuestro secado tendrán aproximadamente una humedad de un 7% en peso. El índice de humedad conseguido tras el secado en horno nos servirá para utilizar nuestro residuo en las diferentes aplicaciones que tenga para su valorización.

4. Resultados.

4.1. Análisis elemental de nuestros residuos para el cálculo de composición CHNS.

Para caracterizar nuestros residuos llevaremos a cabo un análisis químico próximo, y un análisis elemental que nos indicará el contenido (% de peso en base seca) de material volátil (VM), carbón fijo (FC), cenizas (Ash) y azufre (%S) respectivamente.

Para el análisis elemental se estudiará una muestra analizada y realizada por los servicios técnicos propios de la Universidad de Jaén.

Para examinar más a fondo los residuos del que estamos haciendo el estudio de forma experimental añadido en este apartado un análisis CHNS de neumático de un artículo científico, para tener referencia del porcentaje de contenido que tiene tanto de carbono (%C), hidrogeno (%H), nitrógeno (%N), oxígeno (%O) y azufre (%S) respectivamente.

Mandamos examinar las muestras de ambos de nuestros residuos a la Universidad de Jaén que dispone de un analizador de CHNS.

4.1.1. Análisis elemental de los residuos de posos de café (CHNS).

Los resultados conseguidos son los obtenidos y analizados de las muestras de nuestros residuos totalmente secos.

El contenido en humedad de estos residuos, sobre todo de los posos de café, es muy importante ya que por poca humedad que éste disponga variara bastante los resultados, llevando así en algún caso a confusión y errores de estos datos.

En la siguiente tabla aparecen los porcentajes de pérdidas que tienen los posos de café, un 10.4% en peso.

Proceso	Residuo obtenido	% Pérdida	Nombre producto
Despulpado	Pulpa Fresca	43,6	Café cereza
Desmucilaginado	Mucilago	14,9	
Secado	Agua	17,1	Café verde
Trilla	Pergamino	4,2	
	Película plateada		
Torrefacción	Volátiles	2,2	Café tostado
Preparación de la bebida	Posos del café	10,4	Café soluble
		92,4	

Figura 49 – Residuos obtenidos de analizar 1kg de café [65].

Los resultados que obtengamos de nuestro análisis elemental, los compararemos con los que se han obtenido en publicaciones científicas, como muestra la siguiente figura (Figura 50) [66].

TABLA 1

Physical and chemical composition of dried spent coffee grounds (DSCG) and (defatted spent coffee ground) DFSCG

Property	DSCG	DFSCG
Average particle size (m)	237.20	216.20
Higher heating value (MJ/kg)	23.10	20.40
Element (weight %, wt %)		
Carbon	52.95	48.34
Hydrogen	6.76	6.17
Nitrogen	2.10	2.39
Sulfur	0.12	0.09
Oxygen	38.07	43.01
Ash (wt%)	1.59	1.86
Protein (wt%)	14.39	14.80
Crude fiber (wt%)	21.43	20.44
Total sugar (wt%)	14.09	12.93

Figura 50 – Análisis químico elemental de posos de café (%peso) [66].

En este análisis por comparación elegimos dos muestras, las cuales tienen que ser trasladadas a la Universidad de Jaén para ser analizadas por el laboratorio, por no contar en estas instalaciones del analizador elemental (AQ07 – Analizador elemental automático CHNS 2). Dichos resultados son los que se muestran en la tabla con los valores que queremos comparar para esta prueba. En la siguiente tabla se muestran los valores obtenidos en una publicación científica [66] de poder calorífico superior (PCS), azúcar y contenido en cenizas.

Análisis químico (% peso)

<i>Posos de café / Coffee grounds</i>	PCS (MJ/kg)	Azúcar (Sugar)	Cenizas (Ash)
	23.10	14.09	1.59

Tabla 5 – Análisis químico próximo posos de café (referencia bibliográfica)

En la siguiente tabla, se muestra el análisis CHNS de una muestra bibliográfica [66], que compararemos con nuestros análisis efectuados.

Análisis químico elemental (% peso)

<i>Posos de café / Coffee grounds</i>	C	H	N	O	S
	52.95	6.76	2.10	38.07	0.12

Tabla 6 – Análisis elemental CHNS posos de café (referencia bibliográfica)

En esta tabla se muestran los resultados del análisis elemental CHNS llevado a cabo por los servicios propios de la Universidad de Jaén.

Análisis químico elemental (% peso)

<i>Posos de café / Coffee grounds</i>	C	H	N	O	S
<i>MUESTRA 1</i>	49.4310	6.5583	2.2872	41.7235	0
<i>MUESTRA 2</i>	49.26	6.4672	2.2905	41.9823	0

Tabla 7 – Análisis elemental CHNS posos de café (laboratorio Universidad de Jaén)

En la siguiente imagen se muestran los datos que compararemos con los resultados obtenidos de nuestras muestras.

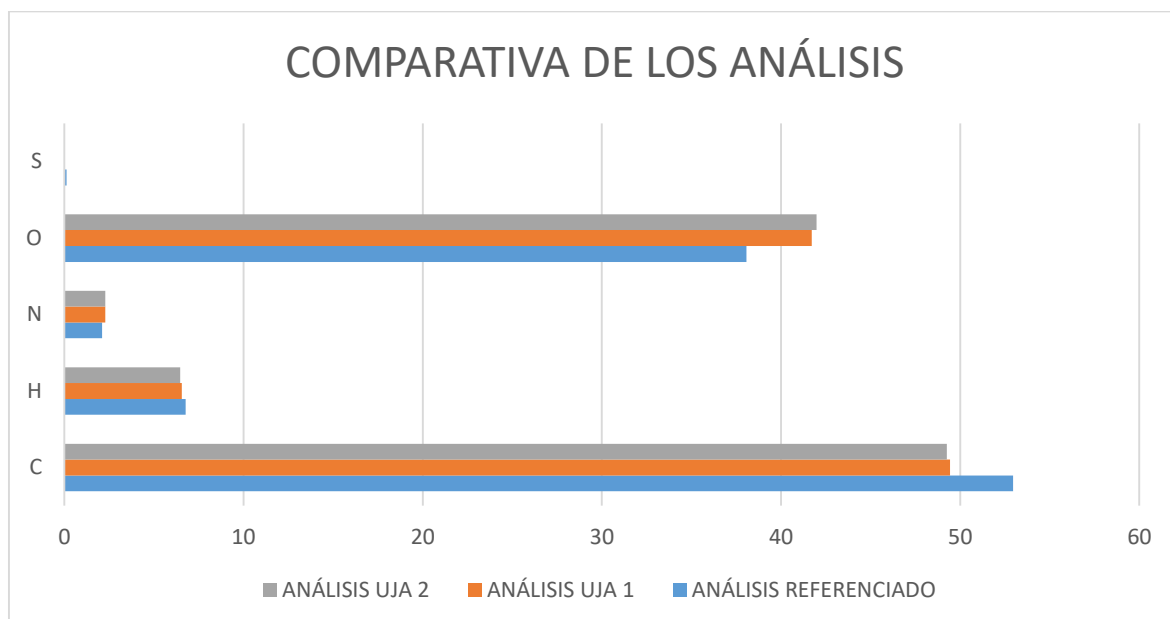


Figura 51 – Comparativa de los resultados obtenidos de los análisis de café.

La gráfica anterior muestra las diferencias que existen en algunos de los valores analizados. Teniendo en cuenta que el carbono, el hidrógeno y el azufre aparecen con valores superiores a los que nosotros hemos recibido en nuestras pruebas, y apareciendo el nitrógeno y el oxígeno con valor inferior en la de ellos, la diferencia que se observa en los mismos es insignificante.

Deducimos de la misma, que los componentes de mayor valor para ser utilizados son el carbono y el oxígeno, existiendo en una proporción muy débil el hidrógeno, y los dos restantes apenas muestran un porcentaje apreciable. Con lo cual, tendríamos que utilizar cantidades muy voluminosas si queremos sacar rendimiento de los tres últimos componentes.

4.1.2. Análisis elemental de residuos de neumáticos (CHNS).

Procedemos de forma similar al análisis que realizamos anteriormente con los posos de café, siguiendo las mismas pautas para determinar los valores destacados de este material. La siguiente tabla refleja el tanto por ciento de los elementos con los que están formados los neumáticos, aunque nosotros tan solo vamos a estudiar cinco de todos ellos.

Type os tyre	PCT	TT
<i>Composition (wt%)</i>		
<i>NR</i>	-	-
<i>SBR</i>	62.1	-
<i>NR + SBR</i>	62.1	-
<i>Carbon black</i>	31.0	-
<i>Extender oils</i>	1.9	-
<i>Zinc oxids</i>	1.9	-
<i>Stearic acid</i>	1.2	-
<i>Sulphur</i>	1.1	-
<i>Accelerator</i>	0.7	-
<i>Steel</i>	-	-
<i>Others</i>	-	-
<i>GCV (MJ/kg)</i>	40	33.4
<i>Ultimate analysis (wt%)</i>		
<i>C</i>	85.9	83.2
<i>H</i>	8.0	7.7
<i>O</i>	2.3	6.16
<i>N</i>	0.4	1.5
<i>S</i>	1	1.44
<i>Cl</i>	-	-
<i>Ash</i>	2.4	-
<i>Proximate analysis (wt%)</i>		
<i>Volatiles</i>	66.5	66.1
<i>Fixed carbon</i>	30.3	27.5
<i>Ash</i>	2.4	5
<i>Moisture</i>	0.8	1.4

Figura 52 – Datos bibliográficos del análisis elemental CHNS de los neumáticos [67]

En la siguiente tabla se muestran los valores obtenidos en una publicación científica [67] de materiales volátiles, contenido en caucho SBR y contenido en cenizas.

Análisis químico (% peso)

Neumáticos / Tyres	Volátiles (VM)	Caucho SBR	Cenizas (Ash)
	66.5	62.1	2.4

Tabla 8 – Análisis químico próximo características neumáticos [67].

En la siguiente tabla, se muestra el análisis CHNS de una muestra bibliográfica [67], que compararemos con nuestros análisis efectuados.

Análisis químico elemental (% peso)

Neumáticos / Tyres	C	H	N	O	S
	85.9	8.0	0.4	2.3	1.0

Tabla 9 – Análisis elemental CHNS neumáticos [67]

En esta tabla se muestran los resultados del análisis elemental CHNS llevado a cabo por los servicios propios de la Universidad de Jaén.

Análisis químico elemental (% peso)

Neumáticos / Tyres	C	H	N	O	S
MUESTRA 1	84.4090	6.8964	0.3062	4.6127	1.3757
MUESTRA 2	82.9050	7.2812	0.3683	5.9559	1.0896

Tabla 10 – Análisis elemental CHNS neumáticos (laboratorio Universidad de Jaén).

En la siguiente imagen se muestran los datos que compararemos con los resultados obtenidos de nuestras muestras.

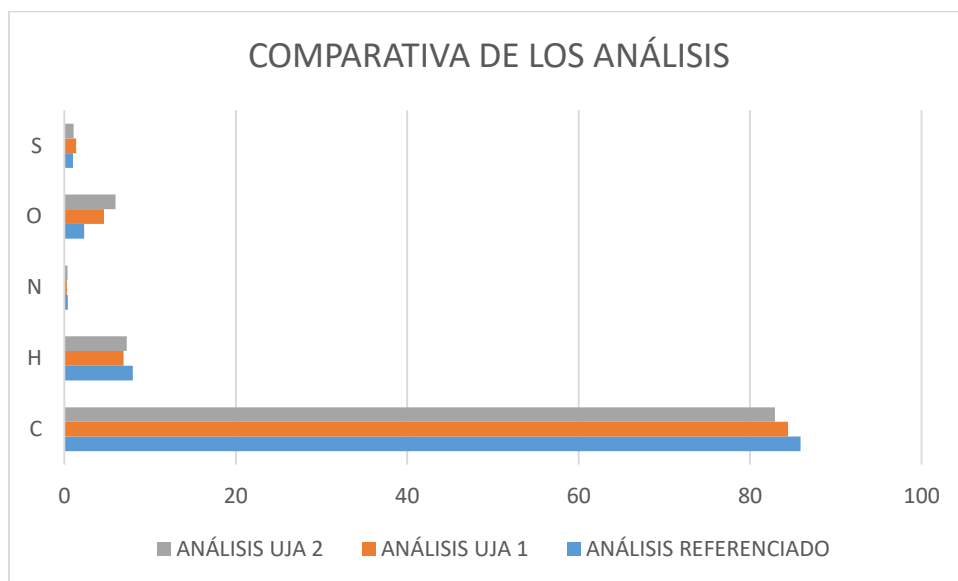


Figura 53 – Comparativa de los resultados obtenidos de los análisis de los neumáticos.

Esta gráfica muestra las diferencias que existen en alguno de los valores analizados. Teniendo en cuenta que el carbono, el hidrógeno y el nitrógeno, aparece con valores superiores a los que nosotros hemos recibido en nuestras pruebas, apareciendo el azufre y el oxígeno con valor inferior en la de ellos, la diferencia que se observan en los mismos es minúscula.

Deducimos de la misma, que el componente de mayor valor para ser utilizado es el carbono, apreciándose en una proporción muy débil el hidrogeno y el oxígeno, los dos restantes apenas muestran un porcentaje de valor. Con lo cual, tendríamos que utilizar cantidades muy grandes, si queremos sacar rendimiento de los cuatro componentes.

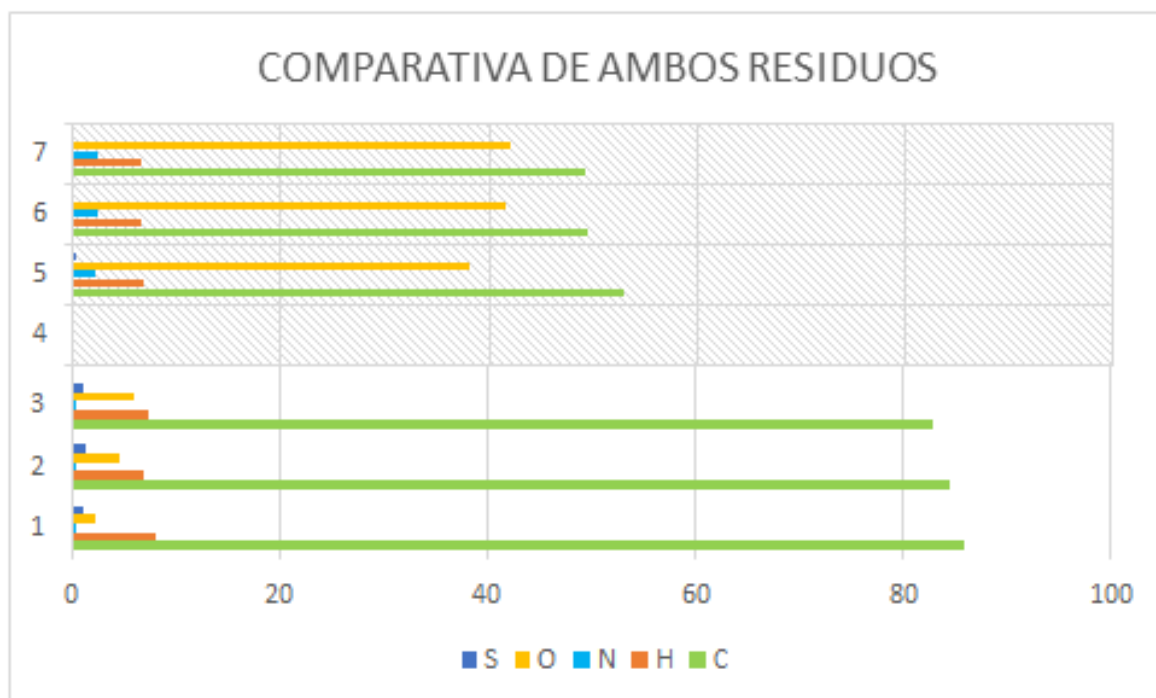


Figura 54 – Comparativa de análisis de los resultados obtenidos de posos de café y neumáticos.

En la tabla anterior hemos diferenciado los valores de los posos de café en espacio sombreado, con los de neumáticos sin color. El carbono, diferenciado por el color verde, produce aproximadamente un 30% más en los neumáticos que en los posos de café. Sin embargo, el oxígeno, marcado con color naranja, supera en un 35% al valor de los neumáticos. Quedando los otros valores muy aproximados en porcentaje y de muy baja cantidad.

4.2. Poderes caloríficos (PCI y PCS).

Este ensayo lo realizamos en el laboratorio de la Escuela Politécnica Superior de Linares con la bomba calorimétrica. El cálculo de PCS (Poder calorífico superior), nos lo reflejará la máquina automáticamente en su display frontal, relacionando los valores más importantes para analizarlos, y sacar una comparativa que demuestre las diferencias y el rendimiento de cada material. Como mostraremos en las imágenes.

El principio básico de funcionamiento de la bomba calorimétrica tiene como fundamento quemar una pequeña cantidad del combustible y medir la cantidad de calor generada, a través de la energía térmica ganada por el agua.

El cálculo del PCS y su valor se realiza, por la máquina, sin que estas tengan humedad alguna, mientras que el PCI (Poder Calorífico Inferior) nos lo genera la fórmula de Dulong, que será desarrollada a posterior. Teniendo el valor de la humedad inicial (0% de humedad) e introduciendo los valores de cada una de ellas, se hace el seguimiento de la misma a lo largo del tiempo hasta su finalización (tiempo de operación aproximado 20 minutos).



Figura 55 – Bomba calorimétrica que utilizaremos para nuestros ensayos.

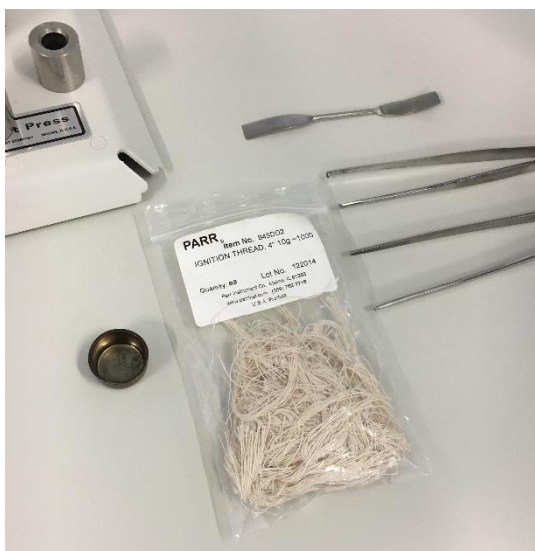
Cronológicamente para utilizar esta bomba calorimétrica debemos seguir los siguientes procedimientos que enumeramos a continuación:

- 1 – Se toma una muestra de pellet siempre con un peso inferior a 0.8 gramos.
- 2 – Introducimos en el tubo metálico de la prensa la muestra y de ahí resulta la pastilla con las dimensiones del molde ya prensadas.
- 3 – Pesado en una balanza de precisión de la pastilla fabricada anteriormente.
- 4 – Introducimos en el accesorio de la bomba calorimétrica extraíble la pastilla con una mecha que recorra la parte inferior de ésta, cuando prenda el hilo de encendido, ésta arderá sin dificultad para quemar toda ella sin dejar resto alguno (el hilo no debe ser tocado con las manos u otros objetos que puedan aportar algún tipo de material combustible como grasa).
- 5 – Se introduce el accesorio en la máquina calorimétrica.
- 6 – Consultar y esperar a que la bomba tenga prácticamente igualadas las temperaturas en la cubeta y en la camisa para proceder al ensayo.
- 7 – La bomba calorimétrica debe estar conectada a dos fuentes, una de oxígeno y otra de

nitrógeno para su correcto funcionamiento y comprobar que la presión del oxígeno esté en la posición correcta.

8 – Accionamos en el display electrónico el peso en gramos y a continuación pulsamos la opción empezar, una vez realizada esta operación desaparece la opción empezar y aparece la de cancelar.

9 – Una vez finalizado el proceso aparecen en la pantalla varios datos, de los cuales tan solo son necesarios para el ensayo el peso (g) y el calor total (cal/g).



Figuras 56 y 57 – Materiales a utilizar para el ensayo de la bomba calorimétrica.

En la figura de arriba a la izquierda se muestra el hilo de encendido que se conecta a la parte de la bomba calorimétrica extraíble, mandando un impulso eléctrico y a través de éste se propaga por la mecha para quemar la muestra introducida.

En la imagen del lado derecho vemos la prensa con la que se hacen las pastillas para introducirlas en el interior de la bomba calorimétrica.



Figura 58 – Pastilla de posos de café a introducir en la bomba calorimétrica.

En la figura 58 se muestra la parte de la bomba calorimétrica extraíble que se introduce en ella, los polos que crean el impulso eléctrico que se transmite a través del hilo de encendido, y con la precaución de que el hilo pase por debajo de nuestra muestra para que sea prendida en su totalidad.

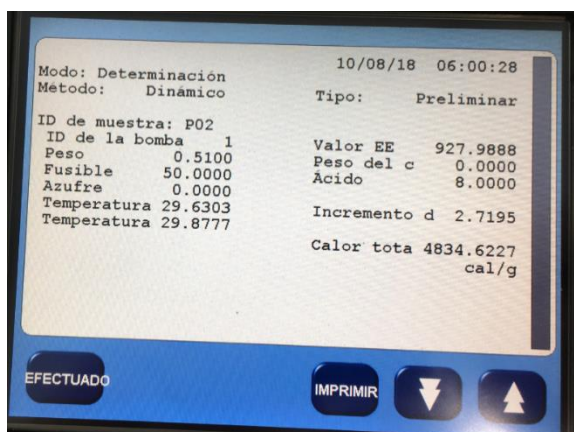


Figura 59 – Ejemplo de resultados obtenidos de un ensayo con la bomba calorimétrica.

En el estudio del valor de la humedad inicial de la muestra, en nuestro caso, los posos de café eran prácticamente nula, y en el caso de los neumáticos podemos referenciarlos con el artículo bibliográfico [68] que tiene un rango entre 0.8 y 1.72% en peso de humedad.

Al valor de PCS medio de cada uno de nuestros residuos y realizada la media aritmética a los valores obtenidos en el laboratorio, en el caso de los posos de café es de 4960.679 kcal/kg, y en el caso de los neumáticos es de 9305.0954 kcal/kg. Estos resultados son obtenidos al realizar tres ensayos en el laboratorio del Campus tecnológico de Linares.

A continuación, se muestran las tablas con los resultados del PCS para nuestros residuos.

Tomamos las muestras de posos de café seco y las introducimos en la bomba calorimétrica obteniendo los siguientes valores representados en la tabla (Tabla 11) y gráfica.

	PCS (kcal/kg)	PCS (KJ/kg)
<i>Muestra 1</i>	5016.2421	20987.957
<i>Muestra 2</i>	4834.6227	20228.0614
<i>Muestra 3</i>	5031.1722	21050.4245
<i>Media</i>	4960.679	20755.481

Tabla 11 – Resultados de PCS de la bomba calorimétrica posos de café.

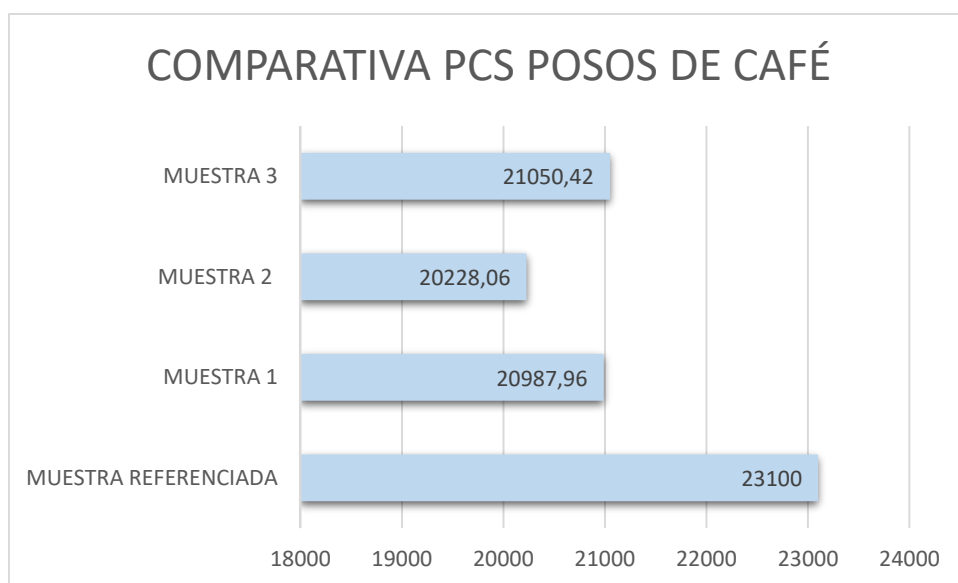


Figura 60 - Comparativa de PCS para posos de café (KJ/kg).

El resultado de los ensayos obtenidos de la bomba calorimétrica es ligeramente inferior al encontrado en las pruebas científicas [66]. Siendo nuestro análisis más homogéneo entre ellos y resultando más fiable nuestra prueba.

A continuación, hacemos la mismo con las muestras de neumático directamente cortados tres trozos de parecido tamaño para realizar los ensayos y obtener el PCS. Los resultados obtenidos de la bomba calorimétrica con las muestras de neumático aparecen en la siguiente tabla (Tabla 12) y gráfica.

	PCS (kcal/kg)	PCS (KJ/kg)
<i>Muestra 1</i>	9342.1437	39087.53
<i>Muestra 2</i>	9257.1669	38731.986
<i>Muestra 3</i>	9315.9757	38978.0423
<i>Media</i>	9305.0954	38932.519

Tabla 12 – Resultados de PCS de la bomba calorimétrica neumáticos.

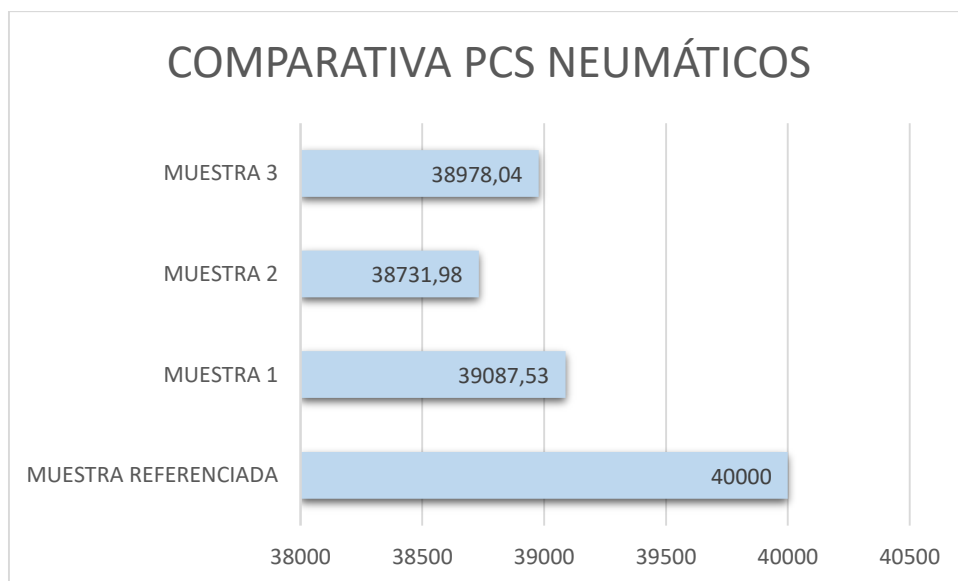


Figura 61 – Comparativa de PCS para neumáticos (KJ/kg).

El estudio realizado después del ensayo con la bomba calorimétrica, refleja que el valor obtenido por la publicación científica [67], es ligeramente superior a los obtenidos por nuestras pruebas. Dando éstas unos resultados muy similares entre sí, ofreciendo más seguridad en su valor.

Una vez realizadas estas pruebas en el laboratorio, se obtiene el valor de PCI. El cálculo del PCI puede llevarse a cabo utilizando las siguientes expresiones:

La ecuación (1), en la que se relaciona el PCS, la humedad y el contenido en hidrógeno de la muestra:

$$PCI = PCS - Lv \times \left(\frac{9H}{100} + \frac{M}{100} \right) \quad (1)$$

Siendo L_v el calor latente de vaporización del agua (2260 KJ/kg) [69].

O con la siguiente ecuación, conocida como la Fórmula de Dulong, con la que obtenemos el PCI a partir de las proporciones, en peso, del carbono total, hidrogeno útil, azufre y humedad del combustible, en el caso que la haya [70].

Fórmula de Dulong para un combustible seco es la siguiente:

$$PCI = 8140 \cdot C + 29000 \cdot \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2220 \cdot S$$

Formula de Dulong para un combustible húmedo es la siguiente:

$$PCI = 8140 \cdot C + 29000 \cdot \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2220 \cdot S - 600 \cdot H_2O$$

Donde:

8140 kcal/kg – Poder calorífico del carbono.

C – Contenido en carbono en peso, del combustible utilizado.

29000 kcal/ kg – Poder calorífico del hidrogeno utilizado.

H – Contenido de hidrogeno en peso, del combustible utilizado.

O – Contenido de oxígeno en peso, del combustible utilizado.

2220 kcal/kg – Poder calorífico del azufre.

S – Contenido de azufre en peso, del combustible utilizado.

600 kcal/kg – Calor latente del agua.

H₂O – Humedad del combustible.

Ya que tenemos los análisis de CHNS, utilizaremos esta última, por lo que se llevara a cabo un ajuste de proporciones en peso de cada componente en función del contenido de humedad de cada muestra, partiendo de la base de los resultados obtenidos de una muestra totalmente seca.

4.3. Cálculo del PCI de nuestros residuos.

Una vez realizado los ensayos en el horno de nuestras muestras, tenemos de referencia un análisis químico elemental para una muestra de nuestro residuo con aproximadamente un 0% de humedad, ya que la composición del análisis elemental (CHNS) varía dependiendo del contenido en humedad con el que vamos a trabajar.

Los valores que obtenemos de nuestra referencia bibliográfica de una publicación para análisis elemental son los siguientes:

Análisis químico (% peso)

	C	H	N	O	S
MUESTRA 1	52.95	6.76	2.1	38.07	0.12

Tabla 13 – Análisis elemental CHNS de posos de café (referencia bibliográfica) [66].

Análisis químico elemental (% peso)

posos de café / Coffee grounds	C	H	N	O	S
MUESTRA 1	49.4310	6.5583	2.2872	41.7235	0
MUESTRA 2	49.26	6.4672	2.2905	41.9823	0

Tabla 14 – Análisis elemental CHNS de posos de café (referencia obtenida experimental) Universidad de Jaén.

Análisis químico elemental (% peso)

Neumáticos /	C	H	N	O	S
Tyres	85.9	8.0	0.4	2.3	1.0

Tabla 15 – Análisis elemental CHNS neumáticos [67].

Análisis químico elemental (% peso)

Neumáticos /	C	H	N	O	S
Tyres					
MUESTRA 1	84.4090	6.8964	0.3062	4.6127	1.3757
MUESTRA 2	82.9050	7.2812	0.3683	5.9559	1.0896

Tabla 16 – Análisis elemental CHNS neumáticos (referencia obtenida experimental)

Para el cálculo del PCI interpretamos que tenemos como base una muestra de 100 kg de residuo, para una muestra seca, los valores CHNS son los indicados en las tablas anteriores. Sin embargo, trabajando el combustible con humedad, debemos llevar a cabo el ajuste de estos valores teniendo en cuenta una fracción de peso en agua. El ajuste que se lleva a cabo mediante la interpolación con los datos obtenidos.

Encontrados estos valores, ya podemos proceder al cálculo de PCI de nuestras muestras, a través de la fórmula de Dulong, ecuación citada anteriormente:

Fórmula de Dulong para un combustible seco, es la siguiente ecuación (2):

$$PCI = 8140 \cdot C + 29000 \cdot \left(H - \frac{O}{8}\right) + 2220 \cdot S \quad (2)$$

Donde:

8140 kcal/kg – Poder calorífico del carbono.

C – Contenido en carbono en peso, del combustible utilizado.

29000 kcal/ kg – Poder calorífico del hidrogeno utilizado.

H – Contenido de hidrogeno en peso, del combustible utilizado.

O – Contenido de oxígeno en peso, del combustible utilizado.

2220 kcal/kg – Poder calorífico del azufre.

S – Contenido de azufre en peso, del combustible utilizado.

Aplicando la anterior fórmula con los datos que tenemos para una muestra completamente seca, tanto de otras publicaciones como los realizados en los laboratorios de la universidad, obtenemos los siguientes resultados de nuestros residuos:

Posos de café:

MUESTRA REFERENCIADA	Kcal/kg	KJ/kg
PCI	4870.319	20377.4147

Tabla 17 – Resultados obtenidos de aplicar la fórmula de Dulong a los datos de posos de café de publicaciones científicas [66].

Muestra 1	Kcal/kg	KJ/kg
PCI	4413.113525	18464.46699
Muestra 2	Kcal/kg	KJ/kg
PCI	4363.393625	18256.43893

Tabla 18 – Resultados obtenidos de aplicar la fórmula de Dulong a los datos analizados de posos de café en la Universidad de Jaén.

Media	Kcal/kg	KJ/kg
PCI	4388.253575	18360.45296

Tabla 19 – Resultados medios obtenidos de realizar la media aritmética de los datos analizados de posos de café en la Universidad de Jaén.

Neumáticos:

MUESTRA REFERENCIADA	Kcal/kg	KJ/kg
PCI	9251.085	38706.53964

Tabla 20 – Resultados obtenidos de aplicar la fórmula de Dulong a los datos analizados de neumáticos de otras publicaciones científicas [67].

Muestra 1	Kcal/kg	KJ/kg
PCI	8374.178765	35037.56395
Muestra 2	Kcal/kg	KJ/kg
PCI	8668.302745	36268.17869

Tabla 21 – Resultados obtenidos de aplicar la fórmula de Dulong a los datos analizados de neumáticos en la Universidad de Jaén.

Media	Kcal/kg	KJ/kg
PCI	8521.240755	35652.87132

Tabla 22 – Resultados medios obtenidos de realizar la media aritmética de los datos analizados de neumáticos en las instalaciones de la Universidad de Jaén.

5. Conclusiones.

La conclusión fundamental de este estudio realizado tanto bibliográfico como experimental, es que el secado de la biomasa hay que realizarlo de manera muy exhaustiva para poder obtener una eficiencia elevada. En nuestro caso los posos de café, han tenido que ser tratados para la obtención de residuos secos con el mismo índice de humedad (muy baja).

Pudiendo utilizar para este tipo de ensayo cualquier otro material de biomasa y alcanzar así el índice máximo de poder calorífico, y usarlo de manera más eficaz a la hora de emplearlo como combustible, por ejemplo, puede ser el alperujo.

Además de haber podido secar bastante nuestras muestras, obteniendo así un combustible con mayores cualidades energéticas, también conseguimos un nuevo producto con el que su valorización puede ser llevada a cabo y analizada por distintas empresas, una vez contrasten resultados con los demás tipos de biomasa tradicionales, como puede ser la madera.

En este estudio bibliográfico contemplamos que, en la parte de los posos de café, alguno de los puntos analizados en este trabajo están poco desarrollados, porque apenas hay datos de este residuo, ya que por ahora no está siendo valorizados de la manera que están siendo investigados otros residuos como pueden ser los neumáticos.

En una de las fases del trabajo con los posos de café, surgió el problema con la humedad de éstos, no pudiendo realizar el secado de una forma continuada en un tiempo establecido por las pautas a seguir en estos casos. Siendo resuelto en los días posteriores al proceso, vigilando y manteniendo la temperatura adecuada para éste tipo de residuo.

Encontramos también una dificultad a la hora de compactar el granulado del neumático, puesto que era demasiado elástico al comprimirlo y no quedaba con la forma del molde. Recurriendo a obtener un trozo del mismo, que ya estaba compactado, adecuándolo a las condiciones de la máquina y del molde.

El secado de los posos de café y la cantidad de residuos que se pueden obtener de manera voluminosa, es uno de los mayores problemas por los que las empresas no apuestan por este residuo para darle un segundo uso. Éste incrementa bastante el coste para una empresa de tamaño pequeño o mediano, y no se arriesgan a realizar esta inversión.

Una solución a este problema sería, al igual que los neumáticos, que tienen una pequeña tasa para su reciclaje, que abonamos cada vez que sustituimos las ruedas de

cualquier transporte. Sería conveniente hacer lo mismo con los posos de café, e intentar llevar a cabo el uso posterior de dicho residuo.

La competencia por esta materia está siendo tan diversificada que es difícil poder conseguir muchas cantidades para que sean rentables como producción de energía, siendo más sencillo valorizarlas con tratamientos simples y de uso bastante frecuente.

6. Anexos.

6.1 Comparativa energética de los nuestros residuos con otros combustibles.

En este apartado vamos a realizar una comparativa de nuestros residuos, los neumáticos y posos de café con otros combustibles que pudiesen competir con ellos en el mercado. Los posos de café serán previamente secados para no tener un porcentaje de humedad elevado.

En las siguientes figuras aparecen nuestras muestras de residuos (Figura 62 – Triturado de Neumáticos y Figura 63 – Posos de café).

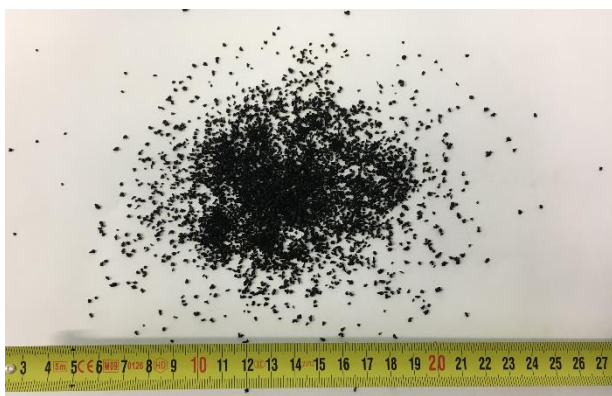


Figura 62 – Muestra de granulado de neumáticos cedido por el departamento de Ingeniería Eléctrica (Campus Tecnológico de Linares).



Figura 63 – Muestra de posos de café totalmente secos suministrados por el Departamento de Ingeniería Eléctrica (Campus Científico Tecnológico de Linares).

Comparativa energética de los posos de café con otros combustibles.

Para ver el valor de nuestro residuo como combustible, lo vamos a comparar en una tabla con otros residuos utilizados para el mismo fin, como puede ser, pellet. [71].

	PCI (Kcal/ kg)
<i>Biomasa en general</i>	3382
<i>Serrines y virutas</i>	3780
<i>Residuos de poda</i>	3750
<i>Hueso de aceituna</i>	3860
<i>Orujillo</i>	3780
<i>Cascara de frutos secos</i>	3710
<i>Posos de café</i>	4388 (nuestro resultado) – 6500 (ref. biblio)
<i>Pellet de madera</i>	4319
<i>Carbón vegetal</i>	3800

Tabla 23 – Comparativa de Posos de café con distintos tipos de biomasa [71].

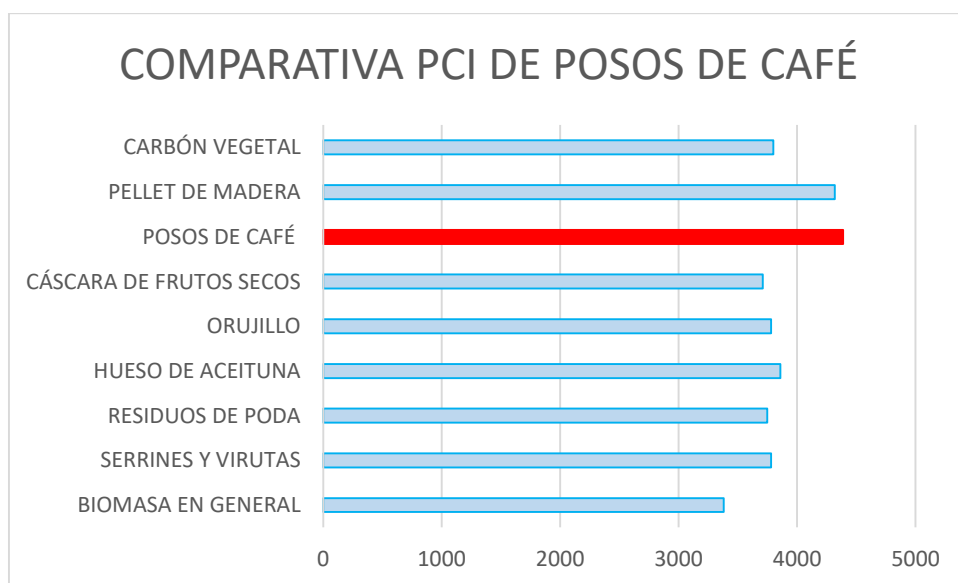


Figura 64 – Comparativa de valores de PCI respecto a posos de café (kcal/kg).

La gráfica anterior muestra que los posos de café poseen más poder calorífico con respecto a algunas muestras biológicas, tomadas de una tabla de valores bibliográfica [71]. Obteniendo casi los mismos resultados que los pellets de madera, pero no así reflejado en

el estudio que ellos realizan sobre posos de café, los cuales los superan casi a un tercio más.

Hacemos lo mismo, para los neumáticos, comparándolos con algunos combustibles como puede ser el bioetanol o la madera.

	PCI (Kcal/ kg)
Bioetanol	6449
Biodiesel	8837
Neumáticos	8274.91 (nuestro resultado) 6930 – 10.080 (ref. bibliográfica)
Plásticos	7834
Papel y cartón	4550
Madera	3896

Tabla 24 – Comparativa de PCI de neumáticos con otros combustibles [71].

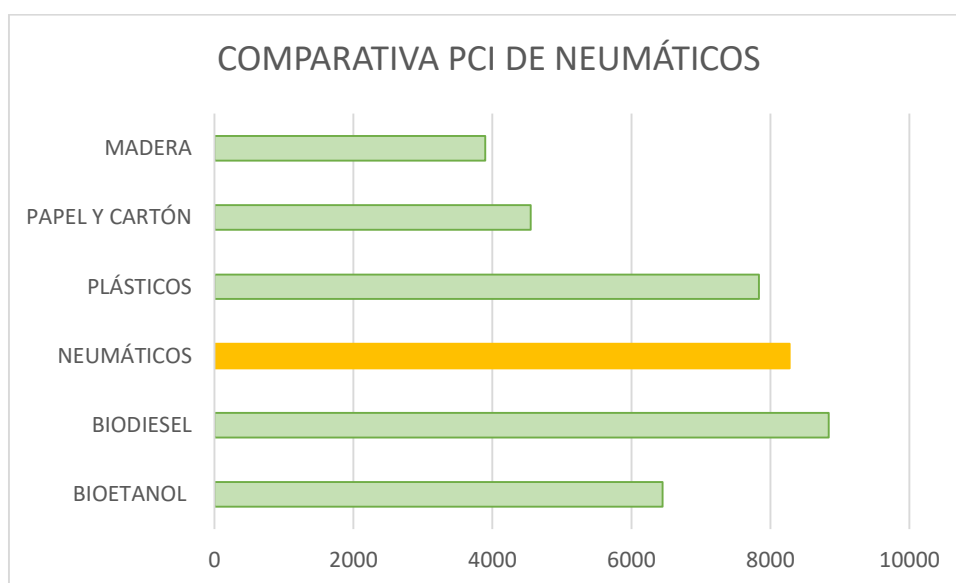


Figura 65 – Comparativa de valores de PCI respecto a los neumáticos.

Este diagrama refleja que el valor conseguido con los biocarburantes (biodiesel y bioetanol) puede superar casi al doble al obtenido con los restos orgánicos. Aquí tenemos la conclusión de estar en el centro de los materiales con un poder calorífico inferior de todos los analizados. Esta muestra analizada de neumáticos se efectuó por el laboratorio de la universidad, no siendo así el resto de las muestras comparadas.

7. Bibliografía.

- [1] <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/144472/Ingenier%C3%ADa-de-perfil-de-modernas-plantas-para-reciclaje-de-neum%C3%A1ticos-fuera-de-uso-%28NFU%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [2] Fuente Federación Española del café
- [3] <https://www.madrimasd.org/blogs/energiasalternativas/2015/05/04/132467>
- [4] <https://www.adalmo.es/noticias/casi-un-tercio-de-los-neumaticos-usados-en-espana-se-gestiona-sin-regulacion/>
- [5] <http://www.amianstop.com/wp-content/uploads/2014/09/Cat%C3%A1logo-europeo-de-residuos.pdf>
- [6] <https://www.boe.es/eli/es/rd/2005/12/30/1619/dof/spa/pdf>
- [7] RNC Reciclaje de Neumático y Caucho S.L. <http://beta.rncmurcia.com/>
- [8] Empresa global SACYR “http://www.sacyr.com/es_es/default.aspx”
- [9] <https://www.efeverde.com/noticias/andalucia-cataluna-madrid-reciclaje-neumaticos/>
- [10] Noticia extraída del periódico digital <https://www.eldiario.es>
- [11] Empresa dedicada a la valorización de neumáticos con varios fabricantes desde la aprobación de leyes en España. www.signus.es
- [12] <http://www.qcom.es/El-consumo-de-cafe-en-Espana-coge-buen-color>
- [13] <https://waste.ideal.es/neumaticos.htm>
- [14] <http://www.energia2012.es/sites/default/files/Aprovechamiento%20energ%C3%A9tico%20de%20residuos,el%20caso%20de%20los%20neum%C3%A1ticos%20fuera%20de%20uso.pdf>
- [15] Noticia extraída del periódico digital ABC <https://www.abc.es>
- [16] <http://www.taminca.cat/es/productes/assecadors/assecadors-rotatius-trommels-per-farratges-i-biomassa/>
- [17] <http://www.lippel.com.br/es/categorias/energia/queimadores-e-secadores-de-biomassa/secador-rotativo/secador-rotativo-para-secagem-de-biomassa-179.html>
- [18] <http://biomasaypelets.blogspot.com/2014/04/secadora-banda-continua.html>
- [19] <http://altertec.com/secadores-solares/>
- [20] <http://www.cona.at/index.php?id=hackguttrocknung&L=1>

- [21] <https://www.climair50.com/secador-de-heno/energias-renovables/secadores-con-caldera-a-biomasa/>
- [22] <https://faqcar.com/cubiertas/reciclaje/805-el-reciclaje-de-los-neumaticos-usados>
- [23] (Castro, 2007)
<https://www.rmlconsultores.com/revista/index.php/crv/article/download/715/717>
- [24] (Unoreciclaje, 2010)
<https://www.rmlconsultores.com/revista/index.php/crv/article/download/715/717>
- [25] <http://www.grupo-spr.com/procesos/neumaticos-fuera-de-uso/>
- [26] <http://www.refiningequipment.com/es/products/Tyre-Pyrolysis-Oil-Distillation-to-Diesel-Machine.html>
- [27] Información extraída de la Universidad Tecnológica de Pereira
<http://repositorio.utp.edu.co/dspace/>
- [28] Combustión de neumáticos y reciclado de llantas
<http://minuevoblograulj.blogspot.com/>
- [29] Blog de noticias de materiales de uso peligroso <http://traficoadr.com/nueva-referencia33>
- [30] PAH, sustancias químicas que se forman durante la combustión incompleta de un combustible como puede ser el carbón.
<http://www.murciasalud.es/pagina.php?id=252725&idsec>
- [31] Figura 6 del artículo científico Renewable and sustainable Energy Reviews 68 (2017) 306 - 315. Frigo S, Seggiani M, Puccini M, Vitolo S. Liquid fuel production from waste tyre pyrolysis and its utilization in a Diesel engine. Fuel 2014; 116:399–408.
- [32] <https://dialnet.unirioja.es> › descarga › artículo
- [33] http://diegopeluffo.com/publicaciones/2016_JornadasFica_Biodiesel.pdf
- [34] Documentos de investigación <https://www.clubensayos.com/>
- [35] <https://ecoinventos.com/pellets-de-cafe/>
- [36] Usos después de valorización de neumáticos, lo ejercen empresas como SIGNUS [8].
- [37] <http://blog.signus.es/10-anos-dando-valor-al-neumatico-usado/>
- [38] Líquidos que discurren a través de residuos depositados y rezuman contenido en ellos.
<https://www.cogersa.es/metaspacesportal/14498/19173>

- [39] <http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/32/neumaticos-fuera-de-uso/valorizacion/aplicaciones/311/obras-de-tierra-y-terraplenes.html>
- [40] <https://gestoresderesiduos.org/noticias/aplicaciones-de-los-neumaticos-reciclados>
- [41] <https://gestoresderesiduos.org/noticias/aplicaciones-de-los-neumaticos-reciclados>
- [42] En España la norma que regula el CSR es la UNE-EN 15359:2012 <http://ecomedioambiente.com/residuos/combustible-solido-recuperdo-csr/>
- [43] <https://www.lanuevacronica.com/neumaticos-fuera-de-uso-fabricas-de-cemento-y-economia-circular>
- [44] Imagen extraída de fuente SACYR.
- [45] <https://newsroom.ferrovial.com/es/noticias/mezclas-asfalticas-polvo-neumatico-solucion-sostenible/>
- [46] Rajkumar Rathinavelu y Giorgio Graziosi ICS-UNIDO, Science Park, Padriciano, Trieste, Italia; Departamento de Biología de la Universidad de Trieste (Italia).
- [47] Empresa de reciclaje de neumáticos ubicada en Jaén <http://www.reneansl.com/>
- [48] Imagen extraída de RENEAN.
- [49] Revista digital de Medio Ambiente, “<https://ojeandolaagenda.com/>”
- [50] Residuo carbonoso que queda tras la pirolisis de la biomasa, formado principalmente por carbono y cenizas <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/20317/fichero/2.+GASIFICACI%C3%93N+DE+CHA R.pdf>
- [51] Revista digital de Medio Ambiente, “<https://ojeandolaagenda.com/>”
- [52] <https://www.europapress.es/epsocial/responsables/noticia-11-combustible-usado-fabricas-cemento-espana-son-residuos-reutilizados-20110510173629.html>
- [53] <http://recumatic.es/>
- [54] Consejos de CSIC sobre el ahorro energético <http://www.energia2012.es/>
- [55] Plantas recicladoras según PNIR 2008-2015. VALORIZACION MATERIAL Y ENERGETICA DE NEUMATICOS FUERA DE USO ACTUALIZACION.
Fuentes: CCAA, Tratamiento de Neumáticos Usados, S.L. (TNU), OFICEMEN
6. Ministerio de Medio Ambiente. II Plan Nacional de Neumáticos Fuera de Uso 2008-2015 (II PNFU). Anexo 4 Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) 2008-2015 Versión Preliminar.

- [56] <https://www.residuosprofesional.com/nestle-valorizara-residuos-cafe/>
<https://www.lavanguardia.com/local/barcelona/20190523/462421475197/nestle-invierte-17-millones-en-una-nueva-caldera-de-valorizacion-de-posos-de-cafe-en-girona.html>
<https://www.europapress.es/catalunya/noticia-nestle-invierte-17-millones-nueva-caldera-valorizacion-posos-cafe-girona-20190523140152.html>
- [57] Imagen extraída de Fuente el país.
- [58] <https://elmiradordemadrid.es/madrid-pone-en-marcha-la-recogida-selectiva-de-materia-organica/>
- [59] Noticia de valorización de posos de café en Madrid
 “<https://www.elmundo.es/madrid/2017/10/18/59e7846f468aeb98418b45a9.html>”.
- [60] <https://eco-circular.com/2016/06/30/economia-circular-proyecto-de-exito-ecoalf/>
- [61] Imagen extraída de ECOALF. Sitio web.
- [62] Imagen extraída de diario digital. Web.
- [63] <https://www.diariosur.es/sociedad/cafe-mueve-autobuses-20171121110231-nt.html>
- [64] <https://www.consumer.es/medio-ambiente/cafe-para-generar-energia-renovable.html>
- [65] Datos de Subproductos de café Chinchilla Cenicafe.
- [66] Tabla 1 de artículo científico, Agriculture and Natural Resources 51 (2017) 181 - 189
<http://www.journals.elsevier.com/agriculture-and-natural-resources/>
 Optimization of coffee oil extraction from spent coffee grounds using four solvents and prototype-scale extraction using circulation process. Krit Somnuk,* Pichai Eawlex, Gumpon Prateepchaikul
- [67] Features of an efficient and environmentally attractive used tyres pyrolysis with energy and material recovery N. Antoniou, A.Zabaniotou.
- [68]“Williams PT, Bottrill RP. Sulfur-polycyclic aromatic hydrocarbons in tyre pyrolysis oil. Fuel 1995;74(No. 5):736–42”.
- “Williams PT, Besler S. Pyrolysis-thermogravimetric analysis of tyres and tyre components. Fuel 1995;14(No. 9):1277–83”.
- [69] J. E. Gonçalves, M. M. P Sartori, and A. L. Leão, “Energia de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de Eucalyptus grandis,” *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.*, vol. 13, no. 5, pp. 657–661, 2009.
- [70] C. S.a and P. P. Parikh, “A inified correlation for estimating HHV of solid,liquid and gaseous fuels,” *Fuel*, vol. 81, pp. 1051–1063, 2002.

[71] I.D.A.E.

“http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:4fFbjMJ6Q6kJ:www.idae.es/uploads/documentos/documentos_PCI_Combustibles_Carburantes_final_valores_Update_2014_0830376a.xlsx+&cd=1&hl=es&ct=clnk&gl=es”

http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_PCI_Combustibles_Carburantes_final_valores_Update_2014_0830376a.xlsx