

05-012

**GASIFICATION OF PLASTIC WASTE FROM OUTDOOR LUMINAIRES. STUDY
CASE OF THERMOCHEMICAL CONVERSION OF WEEE PLASTIC-WASTE IN
HIGH ALENTEJO (PORTUGAL)**

Hermoso-Orzáez, Manuel Jesus ⁽¹⁾; *Mota-Panizio, Roberta* ⁽²⁾; *Carmo-Calado, Luis* ⁽²⁾;
Brito, Paulo ⁽²⁾

⁽¹⁾ Univesity of Jaén. Departamento Ingeniería Gráfica, Diseño y Proyectos, ⁽²⁾ IPP
Portalegre

The recovery of urban waste is a social demand and a measure of the energy-environmental sustainability of cities and regions. In particular, wastes of electrical origin, WEEE in the hands of managers allow them to be strongly valued. The plastic fraction of these wastes allows their gasification mixed with biomass, for the production of synthesis gas. This work studies the recovery of energy by thermal conversion of plastic waste from the disassembly of the luminaires by mixing said plastic waste in different proportions with the biomass of crop residues (olive, pine, etc.), Co tests -gasification were carried out in a fixed bed reactor downstream, at temperatures of approximately 800 ° C. The results obtained demonstrate the applied viability of the technology, with the ideal conditions for the production of higher LHV syn-gas (more than 5 MJ / Nm³) produced in mixtures of up to 30% of plastic waste from. This study was complemented with the economic-financial analysis. Using it as a case study for the technological reconversion to LED that is planned to be carried out on a large scale in the Alentejo region (Portugal), as a circular economy solution.

Keywords: co-gasification; urban-waste; plastics wastes; biomass; syngas; techno-economic analysis

**LA GASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS PLASTICOS DE LUMINARIAS. CASO
ESTUDIO DE CONVERSIÓN TERMOQUÍMICA DE RESIDUOS PLÁSTICOS EN EL
ALTO-ALENTEJO (PORTUGAL)**

La recuperación de residuos urbanos es una demanda social y una medida de la sostenibilidad energética-ambiental de las ciudades y regiones. En particular, los desechos de origen eléctrico, RAEE en manos de gestores permiten valorizarlos energéticamente. La fracción plástica de estos desechos permite su gasificación mezclada con biomasa, para producción de gas de síntesis. Este trabajo estudia la recuperación de energía mediante la conversión térmica de los residuos plásticos del desmontaje de las luminarias mediante la mezcla de dichos residuos plásticos en diferentes proporciones con la biomasa de residuos del cultivo (oliva, pino, etc.), Las pruebas de co-gasificación se realizaron en un reactor de lecho fijo aguas abajo, a temperaturas de aproximadamente 800 °C. Los resultados obtenidos demuestran la viabilidad aplicada de la tecnología, con las condiciones ideales para la producción de syn-gas de LHV más alto (más de 5 MJ / Nm³) que se producen en mezclas de hasta el 30 % de residuos plásticos de. Este estudio se complementó con el análisis económico-financiero. Utilizándolo como caso de estudio para la reconversión tecnológica a LED que se planea llevar a cabo a gran escala en la región de Alentejo (Portugal), como solución de economía circular.

Palabras clave: cogasificación; residuos urbanos; desechos de plásticos; biomasa; syngas; análisis tecnoeconómico

Correspondencia: Manuel Jesús Hermoso Orzáez mhorzaez@ujaen.es



©2020 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción.

Para el desarrollo de un país, se requieren altas inversiones en relación con la generación de energía eléctrica. Para satisfacer esta demanda actual y respetar la integración entre el hombre y la naturaleza, es necesario generar una generación de energía limpia, renovable y eficiente. La búsqueda del desarrollo económico y social debe estar vinculada a la preservación del medio ambiente para el desarrollo sostenible (Veksha et al. 2019). El agotamiento de los combustibles fósiles se está convirtiendo en una preocupación masiva hoy en día una vez que se requieren cantidades crecientes de energía para la forma de vida real implementada por la sociedad (Harvey and Pilgrim 2011). El petróleo todavía se considera como la principal fuente de energía, pero esta situación puede revertirse en un corto período de tiempo. Investigadores de diversas nacionalidades están desarrollando nuevas tecnologías destinadas a reemplazar una parte razonable de los combustibles fósiles por combustibles alternativos, siguiendo así el nuevo orden mundial que busca repensar las formas de obtener y producir electricidad para preservar el medio ambiente (Prasertcharoensuk et al. 2018). La biomasa es un recurso interesante, capaz de suprimir estas necesidades una vez que tiene un contenido de calentamiento significativo y, por lo tanto, puede convertirse en formas de energía distintas que contribuyen también al alivio de los problemas ambientales bien conocidos asociados con el calentamiento global. (Huda et al. 2014) En los países industrializados, la legislación prevé una reducción e incluso una prohibición del uso futuro de los vertederos, ya que la eliminación de desechos es una situación ambientalmente crítica. Como una forma de reducir la cantidad de desechos enviados a los vertederos, el reciclaje, la valorización de los residuos agrícolas, forestales, industriales y urbanos así como la recuperación de energía son opciones perfectamente viables usando técnicas de incineración, Co-combustion y gasificación. (Makarichi et al. 2018) (Carmo-Calado et al. 2020). La recuperación de energía de los desechos es la conversión de materiales de desecho no reciclables en calor, electricidad o combustible utilizables a través de una variedad de procesos, como bioquímicos, químicos y termoquímicos. Los procesos termoquímicos se dividen en pirólisis, gasificación y combustión. (Zhang et al. 2010) .

Lo residuos que tienen propiedades combustibles, donde la reutilización y el reciclaje no son posibles, se debe considerar la posibilidad de recuperación de energía antes de la descarga en vertederos. En este contexto, los residuos urbanos o industriales que tienen un valor calorífico agregado pueden usarse directamente como combustible o como materia prima para la producción de combustible (Fogarasi et al. 2019). La biomasa es un recurso muy interesante, en algunos casos con un alto poder calórico por conversión termoquímica (HLV) y, por lo tanto, puede convertirse en formas de energía distintas que contribuyen también al alivio de los problemas ambientales bien conocidos asociados con el calentamiento global (Zhang et al. 2010) (Huda et al. 2014). La gasificación térmica se caracteriza por una oxidación parcial a altas temperaturas, generalmente en el rango de 800 a 1000 ° C, que se convierte de biomasa en una mezcla de gases combustibles (Basu et al. 2009). La recuperación termoquímica como tecnología de recuperación de energía por conversión térmica de materiales combustibles fue discutida en diferentes estudios (Pashchenko 2017). Los residuos de equipos eléctricos y electrónicos (RAEE) o Waste electrical and electronic equipmen (WEEE) contienen metales valiosos como el cobre y el aluminio, por lo que llaman la atención sobre el reciclaje (Kasper et al. 2011). Otro recurso importante presente en los RAEE son los plásticos que ocupan alrededor del 30% de su peso total. Actualmente, la mayoría de los RAEE que se producen se envían al vertedero o la incineración sin recuperación de energía, y un pequeño porcentaje se valoriza para otros fines (Gramatyka P. , Nowosielski R., Sakiewicz 2007) (Hannequart 2003).

Con el estallido de la crisis del petróleo en 1973, los Residuos de Combustibles Reducidos Waste Reduced Fuels (RDF) o surgieron como posibles combustibles de reemplazo con bajos costos. En los últimos 10 años, ha habido un creciente interés en los sectores minero, metalúrgico y energético en RDF debido a los problemas económicos y ambientales. Además, la asociación de la política energética europea con la política desarrollada para la gestión de residuos ha dado un nuevo impulso al uso de plásticos y gomas basados en residuos no peligrosos.(Aluri et al. 2018) Estos combustibles tienen un contenido de carbono biogénico de alrededor del 50-60% y, por lo tanto, pueden contribuir significativamente a reducir las emisiones de CO2 y aumentar el uso de energía renovable (Hermoso-orzáez et al. 2020).Para realizar la recuperación de energía de los plásticos y cauchos, existen dos tipos principales de procesos de conversión de residuos en energía y combustibles: termoquímicos y químicos. Estas operaciones generalmente se denominan 'Residuos a la energía'. La conversión termoquímica de la biomasa consiste en varias vías que incluyen gasificación, pirólisis, proceso hidrotérmico e hidrólisis en azúcares. (Hrabovsky 2011) (Ferreira et al. 2019).Otro problema mundial es la producción de plásticos y caucho, que alcanzó 36 Mton. La recuperación de energía de estos residuos se ha llevado a cabo mediante un proceso de incineración y en hornos de cemento. Los plásticos pueden alcanzar un valor calorífico superior a 40 MJ / kg debido a los altos contenidos de carbono e hidrógeno y los bajos contenidos de cenizas. Pero la posible emisión de compuestos tóxicos, como cloro, cloruro de hidrógeno, fosgeno, benceno y sus derivados, amoníaco y cianuro de hidrógeno, así como ácido fórmico, formaldehído, fenol y dioxinas y furanos policlorados, es una de las principales objeciones. a la recuperación energética de residuos plásticos. Por lo tanto, debido al riesgo de emisiones nocivas durante la combustión, el cloruro de polivinilo (PVC), el poliuretano (PUR), el polimetacrilato de metilo (PMMA), la poliamida (PA) y el fenol-formaldehído (PF) requieren atención especial en la selección de la tecnología de combustión o gasificación, y el costo de inversión es un aspecto importante para la decisión (Wang et al. 2004).AMBILAMP S.A, Asociación sin animo de lucro, dedicada a la recogida de luminarias en España, recogió 8.843 toneladas de residuos para su reciclaje en 2019, un 72,5% más que en 2018. Del total, 6.286 toneladas corresponden a residuos de iluminación y 2.557 toneladas a residuos material eléctrico y electrónico (RAEE) bajo la marca AMBIAFME. En total, desde la Asociación se han recogido y tratado casi 8.843 toneladas de residuos durante el pasado ejercicio ante los 5.126 de 2018, lo que supone un incremento de un 72,51% en este sentido.Ver figura 1)

Figura 1. Cuadro representativo del incremento exponencial de recogida de productos procedentes del desmontaje de luminarias en los procesos de cambio a LED's en España. (Fuente: AMBILAMP).



La gasificación térmica se caracteriza por una oxidación parcial a altas temperaturas, generalmente en el rango de 800 a 1000 ° C, que se convierte de biomasa en una mezcla de gases combustibles (Basu et al. 2009). Para producir el gas de síntesis de alta calidad rico en H₂ a partir de biomasa y desechos plásticos, el sistema de gasificación se considera una ruta adecuada (Zhang et al. 2019). La mezcla combustible de plástico I (RPF), y los pellets de madera se probaron en un gasificador de lecho fluidizado soplado por aire (FBG), en distintos trabajos de investigación, con resultados muy positivos, para la utilización de gas de síntesis en un GE (motor de gas). Con temperaturas que oscilan entre 700 y 940 ° C y relaciones de equivalencia (ER) variables de 0.3–0.5, Observando que algunas de las características más importantes del gas producto, incluido el valor de calentamiento inferior (LHV) y los niveles de concentración de alquitrán fueron muy satisfactorias. Los resultados de la composición del gas revelaron que las tendencias de concentración variaron para los gases del producto CO, H₂ e hidrocarburos, dependiendo del tipo de materia prima, mientras que se observaron las mismas tendencias para las concentraciones de CH₄ y alquitrán.(Win et al. 2019).Comparando la gasificación con los combustibles fósiles, este tipo de combustible mezcla de Biomasa y residuos plásticos tiene un valor de calentamiento similar. Esto puede explicarse por dos características distintas: baja humedad y alto contenido de carbono (Demirbas 2007). El alto contenido de humedad es una de las características desventajosas para el uso de biomasa para la producción de combustible. (Jenkins et al. 1998).La recuperación termoquímica puede considerarse como una tecnología de producción de hidrógeno a bordo (Pashchenko 2019). La mayoría de los estudios de gasificación plástica son sobre gasificación conjunta. Ahmed y Gupta (Ahmed and Gupta 2011) estudiaron las características del gas producido en la gasificación y pirólisis de muestras de plástico que también contienen caucho, entre 800 y 900 ° C. Los resultados de la gasificación mostraron una producción significativa de hidrógeno a cualquier temperatura. La gasificación mostró una producción de hidrógeno 5 veces mayor que la obtenida en el proceso de pirólisis a 800 ° C y siete veces mayor que 900 ° C.

En el presente trabajo se estudió la posibilidad de recuperación de energía de RAEE, concretamente el plástico recuperado de luminarias desmontadas por la empresa de suministro eléctrico en la zona del Alto Alentejo de Portugal.(Lourinho and Brito 2015) Los experimentos se llevaron a cabo con una mezcla de residuos plásticos procedentes de la luminaria tipo SYNTRA, Luminarias más reemplazada en los procesos de sustitución por luminarias tipo LED en esta región de Portugal, Tratando de aprovechar y recuperar estos residuos plásticos con biomasa agrícola procedente del olivar (pellenc) mezclada en distintos porcentajes. Ambos combustibles se caracterizaron previamente y luego se gasificaron, en las siguientes condiciones: 100% pellenc; 10% RAEE (plástico) + 90% pellenc y 20% RAEE (plástico) + 80% pellenc. Las pruebas se llevaron a cabo a temperaturas entre 750 ° C y 960 ° C, con el objetivo de verificar la influencia de los RAEE en el rendimiento del gas de síntesis. Además de conocer la influencia de los RAEE en el gas de síntesis, también sumamos y analizamos la cantidad de caracteres, alquitranes y cloruro producidos durante los experimentos (Hrabovsky 2011). Por otro lado, se realizó un estudio de viabilidad económica para la instalación de una unidad de gasificación en el productor de residuos de polímeros. (Ismail et al. 2019),A continuación, explicaremos la metodología utilizada, comenzando con el análisis termogramétrico y su valor de calentamiento de la biomasa como materia prima. Más adelante explicaremos el proceso de gasificación y los equipos utilizados para llevar a cabo el experimento (T.M. Ismail, M. Abd El-Salam, E. Monteiro 2017). Como punto final, discutiremos los resultados del proceso de análisis de los productos de gasificación obtenidos y los equipos utilizados para ello. Analizaremos el potencial energético de los procesos de gasificación estudiados, el impacto ambiental y el análisis económico aplicado a un estudio de caso. Finalmente discutiremos los resultados y concluiremos el estudio. (Carmo-Calado et al. 2020)

2. Materiales y Métodos.

Las pruebas de gasificación se realizaron con una mezcla de plásticos y biomasa agrícola procedente del olivar (pellenc) mezclada en distintos porcentajes.(Fig.1).Ambos combustibles se caracterizaron previamente y luego se gasificaron, en las siguientes condiciones: 100% pellenc; 10% RAEE (plástico) + 90% pellenc y 20% RAEE (plástico) + 80% pellenc.(Lourinho and Brito 2015). Para las pruebas de gasificación de los RAEE, fue necesaria la clasificación manual con la ayuda de imanes para la eliminación de pequeños metales que pudieran estar presentes, ya que dichos materiales podrían dañar el reactor. En la gasificación conjunta, se probó la mezcla entre biomasa de olivo y RAEE para investigar la composición del gas de síntesis y su valor de calentamiento en temperatura entre 800 y 960 ° C. (Brito, P. S. D.; Rodrigues, L. F.; Calado 2015). Las luminarias y los residuos plásticos del estudio fueron proporcionados por la empresa EDP (Portugal) “ Projeto Illupub- Projeto para la Melhoria energética e eficiencia iluminacao Publica” encargada del suministro eléctrico y del desmontaje de luminarias obsoletas para cambiarlas por luminarias LED’s en el Alto Alentejo (Portugal). El proceso consiste en desmontar las luminarias separando las partes plásticas y eliminando la mayor parte del metal presente. La parte más polimérica es rectificada y pasa a través de esteras magnéticas para el mejor uso de la parte metálica. Los desechos del proceso se envían al vertedero (Guilhermino et al. 2018). (Ver Tabla 1)

2.1. Análisis de biomasa

Los residuos se analizaron en términos de mayor valor calorífico, análisis final y análisis próximo (Wang et al. 2018) [36].Para los residuos urbanos plásticos probados, fue necesario una molienda y cribado mecánico para separar las fracciones entre 1-4 cm, para obtener el tamaño ideal para ser procesado en el reactor. Después de clasificar por tamaño, se realizó una clasificación manual para eliminar los metales que podrían dañar el equipo.(Nhuchhen and Salam 2012),(Figura 2).

Tabla 1. Medición en peso de la luminaria Syntra descompuesta

Elementos analizados	Peso g)	Foto
Luminaria completa	8624,1	
Cristales y material cerámico (degradación)	0,1654	
Electronica (Difícil degradación)	3906,4	
Metales (Difícil degradación)	2756,4	
Plásticos (Fácildegradación)	1795,9	

2.1.1 Análisis final

El análisis final se realizó para determinar la composición elemental de la biomasa (contenido de C, H, N, S y O), utilizando un analizador ThermoFisher Scientific Flash 2000 CHNS-O. (Ver tabla 2) (UI Hai et al. 2019).

Figura 2. Materias primas utilizadas para la gasificación conjunta en el reactor. (a) residuos de biomasa olivar (pellenc). (b) desechos de plásticos. (Fuente: self-made)



a) Biomasa tipo.- Olive sid Lignocellulosic fuel

b) PE lights Polymeric fuel (plástico)

2.1.2 Análisis termogravimétrico

El análisis termogravimétrico se utilizó para determinar el contenido de humedad, materia volátil y carbono fijo combinado con cenizas [38]. La prueba se realizó en un PerkinElmer STA 6000 (ver tabla 3) usando un flujo de nitrógeno de 20 ml / min para atmósfera inerte y una tasa de crecimiento de temperatura de 20 ° C / min. (Nyakuma et al. 2014)(Mallick et al. 2018).

2.1.3 Determinación del higher heating value (HHV) o valor calorífico bruto o elevado y (HLV) Low heating Value

El valor calorífico se determinó utilizando un calorímetro digital de bomba (modelo: IKA C 2000) en el que pequeñas muestras se sometieron a una combustión completa en un entorno adiabático (tabla 4).(IKA 2000), Para el cálculo del valor calorífico de la biomasa nos basaremos en la metodología de cálculo utilizada en estudios similares.(V. Silva, E. Monteiro, N. Couto, P. Brito 2014) El HHV (valor de calentamiento más alto) o el LHV (valor de calentamiento más bajo) de la biomasa se predijeron mediante el análisis inmediato (Erol, M.; Haykiri-Acma, H.; Kucukbayrak 2010) (Friedl et al. 2005) (Yin 2011)(Gillespie et al. 2013). Para el cálculo de LHV, Ozyuguran (Ozyuguran et al. 2018)] utiliza un modelo y los resultados se compararon con los obtenidos en este artículo.

2.2 Pruebas de gasificación

Las pruebas de gasificación se realizaron en un AllPowerLabs PP20 Power Pallets (AllPowerLabs 2009) (tabla 5), un reactor de tiro descendente común con una potencia de 15 KW. El equipo consiste en un silo de almacenamiento, donde la biomasa se seca simultáneamente mediante la recirculación de los gases calientes producidos en el reactor. La biomasa se suministra desde la parte superior a medida que el aire se mueve hacia abajo, precalentando a través del contacto con las paredes del reactor (figura 3). Las pruebas comenzaron con pellenc de biomasa de olivo al 100% a 800 °C, hasta que se consumió toda la biomasa en la tolva. A continuación, se repitió el ensayo con mezclas de biomasa de olivo y residuos poliméricos al 10%; y posteriormente al 20%. Realizándose estas tres pruebas o ensayos tomando seis (6) muestras y realizándolas de forma continua, durante 2,5 horas. Las muestras de gas de síntesis se recogieron del filtro de partículas de biomasa en bolsas adecuadas con la ayuda de una bomba de vacío. Una de las muestras se recolectó cuando el proceso de gasificación se estabilizó (variación de temperatura cero o casi cero) y otra al final de la prueba antes de que se cerrara el equipo. El análisis de los gases de síntesis se determinó por cromatografía de gases. Cada bolsa que contiene el gas

de síntesis se analizó en un cromatógrafo de gases Varian 450-GC con detector TCD (utilizado para la identificación y cuantificación de CO, CO₂, H₂, CH₄ e hidrocarburos ligeros) (Zhang et al. 2015) (Gas Chromatograph Model 450-GC Specification Sheet 2008).. La Figura 3 muestra un diagrama de la unidad e imágenes de ella. (AllPowerLabs 2009).

Figura 3. Esquema de operación del sistema y detalle del reactor. (a) Descripción general de los tubos y las rutas de gas. (b) Detalles del sitio de extracción de muestras de gas de la salida del reactor Valoriza IPP Portalegre (Portugal).(Fuente: Manual del técnico de Power Pallet (PP20 / v1.09) v elaboración propia.

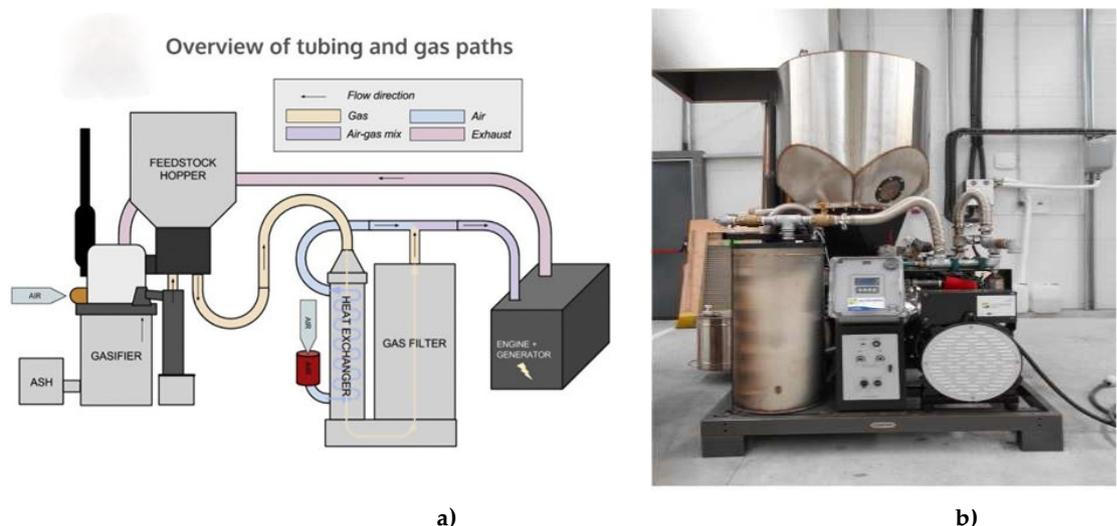


Tabla 2. Análisis de biomasa. (Fuente: elaboración propia)

Analisis	Parámetros	Uds	PE lights Polymeric Fuel	Olive sid Lignocellulosic Fuel
Próximo	Humedad	%	0,2	9,4
	Materia Volatil	%	78,3	66,5
	Carbono Fijo	%	20,9	19,7
	Residuos	%	0,6	4,4
Ultimo	Nitrogeno	%	0,46	1,7
	Carbon	%	81,89	53,4
	Hydrogen	%	12,37	7,5
	Azufre	%	1,92	0.1
	oxigeno	%	2,76	32,9
LHV		MJ/m3	41,8	20,5

En la Tabla 2 se ilustran el promedio aproximado, último y LHV de los combustibles insertados. Mostraremos los resultados del análisis de biomasa obtenido en función de la caracterización de la biomasa, los valores de calentamiento de la biomasa, el análisis próximo y el análisis final.(Wang et al. 2019). Es posible observar que el LHV obtenido en el caso del plástico de las luminarias (PE lights Polymeric Fuel es de 41,8 MJ / kg) fue el doble del valor de Olive sid Lignocellulosic Fuel, siendo resultados similares a los reportados por otros estudios (Rowhani and Rainey 2016). Esta evidencia se debe a la presencia de un alto contenido de carbono en los combustibles poliméricos en relación con los combustibles lignocelulósicos. Los resultados también muestran que los residuos en estudio tienen un alto potencial para la producción de energía. Los desechos de plásticos pueden representar un

riesgo para los equipos que no están preparados para soportar tan alto LHV. El equipo de producción de energía de biomasa generalmente tiene un límite recomendado de 18 MJ / kg para el valor calorífico del combustible.

3. Resultados.

3.1. Análisis del Syngas producido.

Seguidamente presentaremos los resultados de gasificación obtenidos para las pruebas realizadas en forma resumida en la tabla 3, para seis muestras tomadas y seis mediciones realizadas durante el proceso de gasificación que duró aproximadamente 2,5 horas. (Carmo-Calado et al. 2020)

Tabla 3. Ensayos de gasificación de plásticos y pellenc de biomasa de olivo.

Parametros	Uds	Resultados Análisis		
		100% Olivo	10% Plastico & 90% Olivo	20% Plastico & 80% Olivo
Biomasa Olivo	%	100	90	80
Plastico	%	0	10	20
T _{max oxi}	° C	720	708	758
T _{max red}	° C	515	547	526
Biomasa+ P	kg/h	5,2	6,9	5,0
Aire intectado	m ³ /h	11,21	14,17	12,04
ER	-	0.27	0.26	0.28
V _{Tars}	ml/h	146,8	127,96	111,54
Cenizas	kg/h	0,161	0,123	0,133
CO ₂	%	9,914	9,775	10,839
C ₂ H ₄	%	0,479	0,618	0,427
C ₂ H ₆	%	0,122	0,138	0,042
N ₂	%	55,99	56,97	58,749
CH ₄	%	2,073	2,556	1,799
CO	%	18,480	17,744	18,852
H ₂	%	13,369	12,711	13,045
Tiempo	s	4.940	5.708	5.610
V _{Syngas}	m ³ /h	15,73	19,10	14,51
Q _{Biomasa}	Kg/h	5,20	6,90	5,00
LHV	MJ/m ³	5,280	5,422	5,225

3.2. Análisis energético.

Antes de comenzar la prueba de eficiencia de la mezcla de plásticos de RAEE y biomasa de olivo, el gasificador funcionó durante 20 minutos en la antorcha y luego otros 120 minutos en el generador (motor de combustión-alternador) desarrollando una potencia eléctrica de 3kW. La prueba de eficiencia se llevó a cabo con una carga de 3 kW durante un período de aproximadamente 2 h. El volumen de gas de síntesis, necesario para calcular la eficiencia del gasificador, se calcula combinando el flujo volumétrico de aire promedio, determinado a través de un anemómetro, con el porcentaje de N₂ en el gas de síntesis de la siguiente manera:

$$V_{\text{syngas}} = V_{\text{air}} * (0,781/N_2) \quad (1)$$

Donde:

- V_{syngas} volume de syn-gas producido Nm³/h;
- V_{air} es el volume de aire introducido en Nm³/h;

- 0.781 es el porcentaje de nitrógeno en el aire;
- N_2 es el porcentaje de nitrógeno en el Syngas

La relación de equivalencia se define como:

$$ER = (A/F)_{\text{stoic}} / (A/F) \quad (2)$$

Donde:

- ER es la relación de equivalencia;
- $(A/F)_{\text{stoic}}$ es la relación de masa de aire/combustible en condiciones estequiométricas;
- (A/F) es la misma relación de masa pero bajo las condiciones experimentales que se adoptaron.

Por lo tanto, para mezclas ricas en combustible, el $ER > 1$, y para combustible pobre, $ER < 1$, y para la mezcla estequiométrica, $ER = 1$. La eficiencia del gasificador, la eficiencia total y la eficiencia del motor se calculan de la siguiente manera (Allesina et al. 2018):

$$\eta_{\text{gas}} = (V_{\text{syngás}} * LHV_{\text{syngás}}) / (m_{\text{bio}} * LHV_{\text{bio}}) \quad (3)$$

$$\eta_{\text{tot}} = E_{\text{el}} * 3,6 / (LHV_{\text{bio}} * m_{\text{bio}}) \quad (4)$$

$$\eta_{\text{eng}} = ((\eta_{\text{tot}} * \eta_{\text{gen}}) / \eta_{\text{gas}}) \quad (5)$$

Where:

- η_{gas} es la eficiencia del reactor-gasificador;
- $LHV_{\text{syngás}}$ es el lower heating value del syngas ;
- m_{bio} is the fuel mass used during the test;
- η_{tot} is the total efficiency;
- LHV_{bio} es el lower heating value del fuel o mezcla de entrada .
- E_{el} [kWh] es la energía eléctrica generada;
- η_{eng} es la eficiencia del motor (0,3) ;
- η_{gen} es la eficiencia del generador (0,8).
-

3.3 Análisis y estudio de viabilidad económica.

Realizaremos un análisis económico utilizando los indicadores económicos financieros habituales para justificar la viabilidad de instalar el Gasificador de 15 KW para la producción de energía eléctrica con venta directa a la Compañía de Distribución de Electricidad (EDP), en la compañía de tratamiento de residuos plásticos elegida. El gasificador se basó en un tipo de lecho fijo, montado con un motor de gas y con la posibilidad de una futura instalación de un módulo para la recuperación de energía térmica conectada al motor. Se consideró que la energía eléctrica comprada a través de la red nacional de energía se complementará con la energía producida por la propia empresa a través de la valorización de sus residuos con el gasificador. El análisis realizado se basó en los resultados de las pruebas de gasificación anteriores, utilizando la cantidad los residuos plásticos necesarios t y de biomasa , el poder calorífico del gas de síntesis y los ingresos que la empresa obtendrá del uso de la energía eléctrica producida a través de gasificación. Estos residuos se envían actualmente al vertedero, donde el importe actualmente pagado por el depósito es de 9,9 € / t, con un reajuste anual del 1,12% anual. El costo de la electricidad es de aproximadamente 0,16 € // kWh [50]. La compañía gasta aproximadamente 5.072 kWh / mes y tiene un gasto anual de electricidad de 9.738,24 euros. Teniendo en cuenta el tipo de unidad de gasificación que se utilizó durante las pruebas, se estima que el costo de la instalación de un equipo similar costará 1.500 € / kW. Para los cálculos del uso del gasificador, consideramos que la empresa trabaja de lunes a viernes, durante 12 horas. (Tabla 4).(Luz et al. 2015)

Tabla 4. Parámetros para el análisis económico de la viabilidad de instalar una planta de gasificación. (Fuente: elaboración propia)

Parámetros		
	Tipo de Gasificador	Lecho fijo
	Tiempo de operación (h)	12
	Días por mes	25
	Días por año	300
Materia Prima		
Residuos plástico RAEE procedente de Luminarias		
	Precio por tratamiento en vertedero (€/ton)	45,00
	Incremento anual sobre el precio en vertedero (%)	1,25
Biomasa agrícola (olivo)		
	Precio del pellenc (€/ton)	30
Parámetros económicos		
	Inversión en el gasificador/motor /alternador Incluida instalacion (€/kW)	1.200
	Precio de la electricidad producida(€/kWh)	0,20
	Precio de la electricidad consumida(€/kWh)	0,16
	Costes de operación (% investment)	5%
	Life time (años)	10

A continuación realizaremos el análisis Económico-Financiero para la instalación del gasificador para los tres casos estudiados. (90% olivo + 10% RAEE), (80% olivo + 20% RAEE) y (100% olivo). Evaluamos el período de retorno de la inversión (recuperación de la inversión) (PP), el valor actual neto (VAN), la tasa interna de rendimiento (TIR) y el costo promedio del beneficio del índice (IB_mC) para cada caso (Hermoso Orzáez and De Andrés Díaz 2013) (Cardoso et al. 2019) (Hermoso-Orzáez et al. 2017) (Ye et al. 2019)

3.4 Resultados del Análisis de Viabilidad económica.

A continuación mostraremos los resultados del Análisis de viabilidad económica –financiera obtenidos para los tres casos analizados

3.4.1. Resultados Análisis económica-financiera (100 % olivo-pellenc).

Para una mezcla introducida en el gasificador formada por 100% de biomasa de olivo y aplicando las fórmulas (3) y (5), obtenemos los resultados de la Tabla 5.

Table 5. Resultados de gasificación y rendimientos para 100% biomasa olivo. (fuente:elaboración propia)

Unidades		Resultados	
		Olivo (100%)	
LHV_{bio}	MJ/m ³	20,50	20,50
LHV_{syngas}	MJ/m ³	5,280	
V_{syngas}	m ³ /h	15,73	
η_{gas}	%	0,78	
η_{eng}	%	0,30	
η_{gen}	%	0,80	
η_{tot}	%	0,29	
biomasa	kg /h	5,20	5,2
		Total ton/month	1,56
		Total ton/year	18,72

Por lo tanto, de la fórmula (4) obtenemos la energía eléctrica producida durante una hora 8,65 kWh / h, totalizando la energía anual total producida a 31.145.40 kWh / año y el ingreso de las ventas anuales de energía, de acuerdo con las horas de operación anuales esperadas será de 6,229.00 € / año. Con esta potencia tendremos que instalar un gasificador de 10 KW, por lo que la inversión necesaria (K) según la tabla 8 ascenderá a 12.000,00 € (aplicando un IVA del 23% en Portugal) la inversión total sería de 14.760,00 euros. Por otro lado, este tipo de equipos de producción de energía limpia en Portugal está subsidiado con POSEUR Aid en un 65% (Governo do Portugal. Ministerio do Ambiente Ordenamento do Território e Energia 2015). Lo que significa para un estudio económico con 10 años de vida útil, una subvención de 780,00 € / año. Por otro lado, tendremos gastos operativos de alrededor del 5% de los costos de inversión (600 € / año), junto con los costos personales para la supervisión del Gasificador, que asciende a 3.150,00 € / año, además de los costos de compra de biomasa de olivo que se eleva a 561,60 € / año. Los resultados se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Resultados Análisis Económico (100% biomasa de olivo) (Fuente: elaboración propia)

años	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ct	2.697	2.697	2.697	2.697	2.697	2.697	2.697	2.697	2.697	2.697
$(1+i)^t$	1,050	1,103	1,158	1,216	1,276	1,340	1,407	1,477	1,551	1,629
$\frac{Ct}{(1+i)^t}$	2.569	2.447	2.330	2.219	2.114	2.013	1.917	1.826	1.739	1.656
$\sum_{t=1}^N \frac{Ct}{(1+i)^t}$	-9.431	-6.984	-4.654	-2.435	-321	1.691	3.608	5.434	7.173	8.829
Inversion (€)	12.000									
VAN (5 years) (€)	- 321									
VAN (10 years) (€)	8.829									
TIR (%)	18,29									
IBmC	0,19									
PB (año)	6									

3.4.2. Resultados Análisis económica-financiera (90 % olivo y 10% plástico)

Para una mezcla introducida en el gasificador formada por 90% de biomasa de olivo y 10 % de plástico aplicando las fórmulas (3) y (5), obtenemos los resultados de la Tabla 7.

Table 7. Resultados para 90% olivo y 10% plástico . (Fuente: elaboración propia)

	Uds	Resultados	Biomasa	
			Olivo (90%)	Plastico-WEEE (10%)
LHV_{bio}	MJ/m ³	22,63	18,45	4,18
LHV_{syngas}	MJ/m ³	5,422		
V_{syngas}	m ³ /h	19,10		
η_{gas}	%	0,66		
η_{eng}	%	0,30		
η_{gen}	%	0,80		
η_{tot}	%	0,25		
biomasa	kg /h	6,90	6,21	0,69
		Total t/mes	1,86	0,21
		Total t/año	22,36	2,48

Por lo tanto, de la fórmula (4) obtenemos la energía eléctrica producida durante una hora 10,79 kWh / h, totalizando la energía anual total producida a 38.835,08 kWh / año y el ingreso de las ventas anuales de energía, de acuerdo con las horas de operación anuales esperadas será de 7.767,02 € / año. Con esta potencia tendremos que instalar un gasificador de 15 KW, por lo que la inversión necesaria (K) según la tabla 8 ascenderá a 18.000,00 € (aplicando un IVA del 23% en Portugal) la inversión total sería de 22.140,00 euros. Por otro lado, este tipo de equipos de producción de energía limpia en Portugal está subsidiado con POSEUR Aid en un 65%. Lo que significa para un estudio económico con 10 años de vida útil, una subvención de 1.170,00 € / año. Además, evitaremos tener que enviar residuos plásticos RAEE al vertedero con un ahorro de 125,19 € / año según las tablas 8 y 11. Por otro lado, tendremos gastos operativos de alrededor del 5% de los costos de inversión (900 € / año), junto con los costos personales, que asciende a 3.150 € / año, además de los costos de compra de biomasa de olivo que se eleva a 670,68 € / año. Los resultados se muestran en la tabla 8.

Table 8. Resultados Análisis Económico (90% olivo y 10% plástico) (Fuente: elaboración propia)

años	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ct	4.342	4.342	4.342	4.342	4.342	4.342	4.342	4.342	4.342	4.342
$(1+i)^t$	1,050	1,103	1,158	1,216	1,276	1,340	1,407	1,477	1,551	1,629
$\frac{Ct}{(1+i)^t}$	4.135	3.938	3.750	3.572	3.402	3.240	3.085	2.939	2.799	2.665
$\sum_{t=1}^N \frac{Ct}{(1+i)^t}$	-13.865	-9.927	-6.177	-2.605	797	4.036	7.122	10.060	12.859	15.524
Inversion (€)	18.000									
VAN (5 years) (€)	-796									
VAN(10 years) (€)	15.524									
TIR (%)	20,33									
IBmC	0,21									
PB (año)	5									

3.4.3. Resultados Análisis económica-financiera (80 % olivo y 20% plástico)

Por último los resultados para la mezcla de combustible del 80% de biomasa de olivo y 20 % de plástico aplicando las fórmulas (3) y (5), obtenemos los resultados de la Tabla 9

Table 9. Resultados para 80% olivo y 20% plástico . (Fuente: elaboración propia)

	Uds	Resultados	Biomasa	
			Olivo (80%)	Plastico-WEEE (20%)
LHV_{bio}	MJ/m ³	22,63	18,45	4,18
LHV_{syngas}	MJ/m ³	5,225		
V_{syngas}	m ³ /h	14,51		
η_{gas}	%	0,61		
η_{eng}	%	0,30		
η_{gen}	%	0,80		
η_{tot}	%	0,23		
biomass	kg /h	5,00	6,21	0,69
		Total t/mes	1,20	0,30
		Total t/año	14,40	3,60

Por lo tanto, de la fórmula (4) obtenemos la energía eléctrica producida durante una hora 7,90 kWh / h, totalizando la energía anual total producida a 28430,53 kWh / año y el ingreso de las ventas anuales de energía, de acuerdo con las horas de operación anuales esperadas será de 5.686,11 € / año. Con esta potencia tendremos que instalar un gasificador de 10 KW, por lo que la inversión necesaria (K) según la tabla 8 ascenderá a 12.000,00 € (aplicando un IVA del 23% en Portugal) la inversión total sería de 14.760,00 euros. Por otro lado, este tipo de equipos de producción de energía limpia en Portugal está subsidiado con POSEUR Aid en un 65%. Lo que significa para un estudio económico con 10 años de vida útil, una subvención de 780,00 € / año. Además, evitaremos tener que enviar residuos plásticos RAEE al vertedero con un ahorro de 181,44 € / año según las tablas 8 y 13. Por otro lado, tendremos gastos operativos de alrededor del 5% de los costos de inversión (600 € / año), junto con los costos personales, que asciende a 3.150 € / año, además de los costos de compra de biomasa de olivo que se eleva a 432,00 € / año. Los resultados se muestran en la tabla 10

Table 10, Resultados Análisis Económico (80% olivo y 20% plástico) (Fuente: elaboración propia)

años	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ct	2.466	2.466	2.466	2.466	2.466	2.466	2.466	2.466	2.466	2.466
$(1+i)^t$	1,050	1,103	1,158	1,216	1,276	1,340	1,407	1,477	1,551	1,629
$\frac{Ct}{(1+i)^t}$	2.348	2.236	2.130	2.028	1.932	1.840	1.752	1.669	1.589	1.514
$\sum_{t=1}^N \frac{Ct}{(1+i)^t}$	-9.652	-7.416	-5.286	-3.257	-1.325	514	2.267	3.935	5.525	7.038
Inversion (€)	12.000									
VAN (5 years) (€)	-1.325									
VAN10 years) (€)	7.038									
TIR (%)	15,81									
IBmC	0,18									
PB (año)	6									

4. Discusión.

La gasificación combinada de desechos de biomasa agrícola procedente del olivar y desechos industriales de plástico, en una porción en masa de entre 10 y 20%, se ha demostrado que puede ser valorizado energéticamente de forma eficiente, mediante producción de singas. El gas sincrónico producido en el reactor tiene un poder calorífico sintetizador LHV, lo suficientemente interesante como para considerar la explotación de este valioso recurso, para su explotación industrial a través de la generación eléctrica, como una forma de energía alternativa en entornos rurales apropiados. (Wang et al. 2019) La Tabla 11 muestra los resultados comparativos del análisis económico realizado para los tres casos estudiados.

Table 11. Resultados comparativos del análisis de indicadores económicos. (Fuente: elaboración propia)

	100% Olivo Test 1	10% WEEE-plastico Test 2	20% WEEE-plastico Test 3
Inversion (€)	12.000	18.000	12.000
VAN (5 years) (€)	- 321	-796	-1.325
VAN(10 years) (€)	8.829	15.524	7.038
TIR (%)	18,29	20,33	15,81
IBmC	0,19	0,21	0,18
PB (año)	6	5	6

5. Conclusiones

Este trabajo nos permite afirmar que existe un gran potencial para la recuperación de energía a través de la gasificación de residuos de productos plásticos de origen industria, mezclados con biomasa agrícola o forestal. En particular de plásticos de equipos eléctricos y electrónicos (RAEE o WEEE), en particular procedentes de desechos de luminarias obsoletas desmontadas en viales. Al mezclar estos plásticos con biomasa agrícola, en proporción adecuada, es posible obtener un gas de síntesis altamente energético para la gasificación, y luego para su transformación en energía eléctrica. El LHV de los plásticos de RAEE mostró buenas perspectivas para convertir este combustible en energía. Para los procesos de conversión de energía termoquímica, debido a la especificidad de la biomasa, no es posible introducirlo solo en el reactor. La alta materia volátil hace que los RAEE sean más fácilmente desvolatilizados durante la pirólisis y la gasificación, y los valores más bajos de materia volátil reducen el LHV, adyacente es necesaria más energía para las reacciones de gasificación. El alto contenido de cenizas hace que los RAEE sean propensos a la escoria en los sistemas de conversión termoquímicos. Como tal, se recomienda la gasificación de tiro descendente, ya que esto se informa a temperaturas más bajas en la parrilla, lo que reduce las tendencias de escoria de cenizas.

Los productos de la gasificación muestran que los plásticos de RAEE tienen un gran potencial para la gasificación conjunta con una biomasa forestal. La pregunta fundamental es poder encontrar la proporción exacta que permita obtener los mejores resultados desde el punto de vista energético, económico y ambiental. Con la mezcla correcta 90 % de biomasa agrícola y 10 % de plásticos de luminarias, este combustible produjo un gas de síntesis rico, con más de 5 MJ / kg y un baja producción de carbón y alquitrán. Tanto el carbón como el alquitrán pueden reintroducirse en el combustible y gasificarse nuevamente,

Este trabajo demostró la viabilidad técnica y la rentabilidad económica de transformar este tipo de residuos mezclados con biomasa forestal, en energía eléctrica. En particular, para una mezcla de 10% de plásticos con 90% de biomasa de olivo, se obtuvieron los mejores resultados desde el punto de vista energético y económico, según el análisis de los indicadores estudiados. Así mismo se comprobó la viabilidad económico-financiera para la instalación de equipos de gasificación de tamaño mediano (por debajo de los 15 KW) con amortizaciones inferiores a 5 años con rentabilidades en torno al 20% que justificarían la inversión realizada. Este estudio demuestra el potencial que podría tener la Gasificación de la mezcla de recursos de biomasa de origen agrícola o forestal y residuos plásticos industriales, como una tecnología futura y fuente de producción de energía limpia y renovable.

Agradecimientos

This research received no external funding; however, in this work, PhD Hermoso-Orzáez Manuel Jesús participated as a researcher in the external research at the Center Instituto Politécnico de Portalegre (Portugal) within the ECOCIR INTERNATIONAL PROJECT - PROJECT OF CROSS-BORDER COOPERATION FOR THE INTRODUCTION OF THE ECOLOGICAL AND CIRCULAR ECONOMY THROUGH THE PREVENTION OF IMPROVEMENT OF RECYCLING, THE MANAGEMENT AND VALORIZATION OF RESIDUES IN THE REGIONS CENTRO, EXTREMADURA AND ALENTEJO.- INTERREG ESPAÑA-PORTUGAL supervised by PhD Brito Paulo , with the aim of looking for Models of Specifications that serve as a reference for the massive LED replacements that are expected to be carried out in the short and medium-term in the Alentejo and Extremadura area

6. Referencias

- Ahmed I, Gupta AK (2011) Characteristic of hydrogen and syngas evolution from gasification and pyrolysis of rubber. *International Journal of Hydrogen Energy* 4340–4347
- Allesina G, Pedrazzi S, Allegretti F, et al (2018) Gasification of cotton crop residues for combined power and biochar production in Mozambique. *Applied Thermal Engineering* 139:387–394. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.04.115>
- AllPowerLabs (2009) Power Pallet Technician's Handbook (PP20/v1.09). In: *Power Pallet Technician's Handbook (PP20/v1.09) Rev B. Section 1_Introduction to the Power Pallet (PP20)*. http://www.allpowerlabs.com/wp-content/uploads/2015/06/v1-09_Section_01_Introduction_to_the_Power_Pallet.pdf
- Aluri S, Syed A, Flick DW, et al (2018) Pyrolysis and gasification studies of model refuse derived fuel (RDF) using thermogravimetric analysis. *Fuel Processing Technology* 179:154-166.(DOI:10.1016/j.fuproc.2018.06.010). <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.06.010>
- Basu P, Acharya B, Dutta A (2009) Gasification in fluidized beds – present status & design. 20 th International conference on fluidized bed combustion 1:1–7
- Brito, P. S. D.; Rodrigues, L. F.; Calado L. et ál. . (2015) Thermal gasification of agro-industrial residues. *BIOMASS TO BIOFUELS Colección: WIT Transactions on State of the Art in Science and Engineering* 83:101–118
- Cardoso J, Silva V, Eusébio D (2019) Techno-economic analysis of a biomass gasification power plant dealing with forestry residues blends for electricity production in Portugal. *Journal of Cleaner Production* 212:741–753. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.054>
- Carmo-Calado L, Hermoso-Orzáez MJ, Mota-Panizio R, Brito P (2020) Co-Combustion of Waste Tires and Plastic-Rubber Wastes with Biomass Technical and Environmental Analysis. *Sustainability* 12(3): <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su12031036>
- Demirbas A (2007) Combustion of biomass. *Energy Sources Part A.* 29:549–61. <https://doi.org/https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/009083190957694>
- Erol, M.; Haykiri-Acma, H.; Kucukbayrak S (2010) Calorific value estimation of biomass from their proximate analyses data. *Renewable Energy* 35:170-173-(DOI:10.1016/j.renene.2009.05.008). <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.05.008>
- Ferreira S, Monteiro E, Brito P, Vilarinho C (2019) A holistic review on biomass gasification modified equilibrium models. *Energies* 12:1–31. <https://doi.org/10.3390/en12010160>
- Fogarasi S, Imre-Lucaci F, Fogarasi M, Imre-Lucaci Á (2019) Technical and environmental assessment of selective recovery of tin and lead from waste solder alloy using direct anodic oxidation. *Journal of Cleaner Production* 213:872–883. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.101>
- Freitas CP (2009) Investment Project Appraisal Report. Central Ecological Forest Biomass (CTBF). Porto (Portugal)
- Friedl A, Padouvas E, Rotter H, Varmuza K (2005) Prediction of heating values of biomass fuel from elemental composition. 544:191-198.(DOI:10.1016/j.aca.2005.01.041). <https://doi.org/10.1016/j.aca.2005.01.041>
- Gas Chromatograph Model 450-GC Specification Sheet (2008) Gas Chromatograph model Varian 450-GC. <http://photos.labwrench.com/equipmentManuals/25399-8198.pdf>
- Gillespie GD, Everard CD, Fagan CC, McDonnell KP (2013) Prediction of quality parameters of biomass pellets from proximate and ultimate analysis. *Fuel* 11:771-777.(DOI:10.1016/j.fuel.2013.05.002). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.05.002>
- Governo do Portugal. Ministerio do Ambiente Ordenamento do Territorio e Energia (2015) POSEUR.Support for energy efficiency, smart energy management and the use of renewable energies in central government public infrastructures - co-financed through the Cohesion Fund in the SEUR OP. Portugal
- Gramatyka P. , Nowosielski R., Sakiewicz P (2007) Recycling of waste electrical and electronic equipment. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 20:535–538
- Guilhermino A, Lourinho G, Brito P, Almeida N (2018) Assessment of the Use of Forest Biomass Residues for Bioenergy in Alto Alentejo, Portugal: Logistics, Economic and Financial Perspectives. *Waste and Biomass Valorization* 9:739–753. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-9830-3>
- Hannequart J-PA of C and R for (ACRR) (2003) Waste management of electrical and electronic equipment. Bruselas - Bélgica

- Harvey M, Pilgrim S (2011) The new competition for land: Food, energy, and climate change. *Food Policy* 36:S40–S51. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2010.11.009>
- Hermoso-Orzáez MJ, Gago-Calderón A, Rojas-Sola JI (2017) Power quality and energy efficiency in the pre-evaluation of an outdoor lighting renewal with light-emitting diode technology: Experimental study and amortization analysis. *Energies* 10:. <https://doi.org/10.3390/en10070836>
- Hermoso-orzáez MJ, García-alguacil M, Terrados-cepeda J (2020) Measurement of environmental efficiency in the countries of the European Union with the enhanced data envelopment analysis method (DEA) during the period 2005 – 2012. *Environmental Science and Pollution Research Article-in:DOI:* <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08029-3>. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11356-020-08029-3>
- Hermoso Orzáez MJ, De Andrés Díaz JR (2013) Comparative study of energy-efficiency and conservation systems for ceramic metal-halide discharge lamps. *Energy* 52:258–264. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.01.050>
- Hrabovsky M (2011) Plasma aided gasification of biomass , organic waste and plastics. 30th International Conference on Phenomena in Ionized Gas 1–4
- Huda ASN, Mekhilef S, Ahsan A (2014) Biomass energy in Bangladesh: Current status and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 30:504–517. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.10.028>
- IKA (2000) IKA Calorimeter System C 2000 EDVLF C 2000 FRQWURO. 3:
- Ismail TM, Monteiro E, Ramos A, et al (2019) An Eulerian model for forest residues gasification in a plasma gasifier. *Energy* 182:1069–1083. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.070>
- Jenkins B., Baxter L., Miles T., Miles T. (1998) Combustion properties of biomass. *Fuel Processing Technology* 54:17-46.(DOI:10.1016/S0378-3820(97)00059-3). [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(97\)00059-3](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(97)00059-3)
- Kasper AC, Berselli GBT, Freitas BD, et al (2011) Printed wiring boards for mobile phones: Characterization and recycling of copper. *Waste Management* 31:2536-2545(DOI:10.1016/j.wasman.2011.08.013). <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.08.013>
- Lourinho G, Brito P (2015) Assessment of biomass energy potential in a region of Portugal (AltoAlentejo). *Energy* 81:189–201. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.12.021>
- Luz FC, Rocha MH, Lora EES, et al (2015) Techno-economic analysis of municipal solid waste gasification for electricity generation in Brazil. *Energy Conversion and Management* 103:321-337.(DOI:10.1016/j.enconman.2015.06.074). <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.06.074>
- Makarichi L, Jutidamrongphan W, Techato K anan (2018) The evolution of waste-to-energy incineration: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 91:812–821. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.088>
- Mallick D, Poddar MK, Mahanta P, Moholkar VS (2018) Discernment of synergism in pyrolysis of biomass blends using thermogravimetric analysis. *Bioresource Technology* 261:294-305.(DOI:10.1016/j.biortech.2018.04.011). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.04.011>
- Nhuchhen DR, Salam PA (2012) Estimation of higher heating value of biomass from proximate analysis : A new approach. *Fuel* 99:55-63.(DOI:10.1016/j.fuel.2012.04.015). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.04.015>
- Nyakuma BB, Johari A, Ahmad A, Abdullah TAT (2014) Thermogravimetric analysis of the fuel properties of empty fruit bunch briquettes. *Jurnal Teknologi (Sciences and Engineering)* 67:79–82. <https://doi.org/10.11113/jt.v67.2768>
- Ozyuguran A, Akturk A, Yaman S (2018) Optimal use of condensed parameters of ultimate analysis to predict the calorific value of biomass. *Fuel* 214:640-646.(DOI:10.1016/j.fuel.2017.10.082). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.10.082>
- Pashchenko D (2017) Thermodynamic equilibrium analysis of combined dry and steam reforming of propane for thermochemical waste-heat recuperation. *International Journal of Hydrogen Energy* 42:14926–14935. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.04.284>
- Pashchenko D (2019) Thermochemical recuperation by ethanol steam reforming: Thermodynamic analysis and heat balance. *International Journal of Hydrogen Energy* 44:30865–30875
- Prasertcharoensuk P, Hernandez DA, Bull SJ, Phan AN (2018) Optimisation of a throat downdraft gasifier for hydrogen production. *Biomass and Bioenergy* 116:216-226.(DOI:10.1016/j.biombioe.2018.06.019). <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.06.019>
- Rowhani A, Rainey TJ (2016) Scrap tyre management pathways and their use as a fuel - A review. *Energies* 9:1–26. <https://doi.org/10.3390/en9110888>

- T.M. Ismail, M. Abd El-Salam, E. Monteiro AR (2017) Fluid dynamics model on fluidized bed gasifier using agro-industrial biomass as fuel. *Waste Manag* 73:476–486
- Ul Hai I, Sher F, Yaqoob A, Liu H (2019) Assessment of biomass energy potential for SRC willow woodchips in a pilot scale bubbling fluidized bed gasifier. *Fuel* 258:116143. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116143>
- V. Silva, E. Monteiro, N. Couto, P. Brito AR (2014) Analysis of syngas quality from Portuguese biomasses: an experimental and numerical study. *Energy Fuels*, 28:5766–5777
- Veksha A, Giannis A, Yuan G, et al (2019) Distribution and modeling of tar compounds produced during downdraft gasification of municipal solid waste. *Renewable Energy* 136:1294-1303
(DOI:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.104>)
- Wang T, Li Y, Zhang J, et al (2018) Evaluation of the potential of pelletized biomass from different municipal solid wastes for use as solid fuel. *Waste Management* 74:260–266.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.11.043>
- Wang Y, Li G, Liu Z, et al (2019) Techno-economic analysis of biomass-to-hydrogen process in comparison with coal-to-hydrogen process. *Energy* 185:1063–1075. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.119>
- Wang Z, Richter H, Howard JB, et al (2004) Laboratory investigation of the products of the incomplete combustion of waste plastics and techniques for their minimization. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 43:2873–2886. <https://doi.org/10.1021/ie030477u>
- Win MM, Asari M, Hayakawa R, et al (2019) Characteristics of gas from the fluidized bed gasification of refuse paper and plastic fuel (RPF) and wood biomass. *Waste Management* 87:173–182.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.02.002>
- Ye C, Wang Q, Zheng Y, et al (2019) Techno-economic analysis of methanol and electricity poly-generation system based on coal partial gasification. *Energy* 185:624–632.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.175>
- Yin C (2011) Prediction of higher heating values of biomass from proximate and ultimate analyses. *Fuel* 90:1128-1132.(DOI:10.1016/j.fuel.2010.11.031). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.11.031>
- Zhang L, Xu C (Charles), Champagne P (2010) Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass. *Energy Conversion and Management* 51:969–982.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.11.038>
- Zhang S, Zhu S, Zhang H, et al (2019) High quality H₂-rich syngas production from pyrolysis-gasification of biomass and plastic wastes by Ni-Fe@Nanofibers/Porous carbon catalyst. *International Journal of Hydrogen Energy* 44:26193–26203. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.08.105>
- Zhang Y, Zhao Y, Gao X, et al (2015) Energy and exergy analyses of syngas produced from rice husk gasification in an entrained flow reactor. *Journal of Cleaner Production* 95:273-280.(DOI:10.1016/j.jclepro.2015.02.053). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.053>
- Zhu Y, Zhai R, Yang Y, Angel Reyes-Belmonte M (2017) Techno-economic analysis of solar tower aided coal-fired power generation system. *Energies* 10:1–26. <https://doi.org/10.3390/en10091392>

Comunicación alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

