

**Generación de energía eléctrica  
mediante sistema híbrido  
Solar/Gasificación de residuos  
agroindustriales**

**HIBRELEC**



**GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE SISTEMA  
HÍBRIDO SOLAR/GASIFICACIÓN DE RESIDUOS  
AGROINDUSTRIALES  
HIBRELEC**

**Financiado por:**



**Editorial**

**[ CENTRO  
TECNOLÓGICO ] CARTIF**

**ISBN: 978-84-617-5386-4.**

**DL VA 595-2016**

**Primera edición: Noviembre de 2016**

**Diseño de carátula: Javier Alonso Ordoñez**

**Fotografía caratula: Robert Macías Naranjo**

Generación de energía eléctrica mediante sistema híbrido Solar/Gasificación de residuos agroindustriales

Autores: Fernando Frechoso Escudero, Jhon Fredy Vélez Jaramillo, David Diez Rodríguez, Ana Urueña Leal, Farid Chejne Janna, Javier Alonso Ordoñez Loza, Robert José Macías Naranjo, Carlos Andrés Gómez Gutiérrez, Estefanía Orrego Restrepo, Fanor Mondragón Pérez, Diana Patricia López López, Raquel Ramos Casado, Virginia Pérez López, José María Sánchez Hervás, José María Murillo Laplaza, Jorge Arenales Rivera, Alfonso Pascual Delgado, Isabel Ortiz González, Daniela Tavares Silva, Ricardo Barbosa Monteiro, Rogelio Moreno Muñoz, Alfredo Curbelo Alonso, Deny Oliva Merencio.

Editorial CARTIF, 2016.

Parque Tecnológico de Boecillo, 205, 47151 Boecillo, Valladolid, España.

Licencia Creative Commons



Proyecto «Prototipo de generación de energía eléctrica y térmica en núcleos aislados de Iberoamérica mediante hibridación – HIBRELEC»

Este trabajo presenta algunos de los resultados más relevantes del proyecto de investigación «Prototipo de generación de energía eléctrica y térmica en núcleos aislados de Iberoamérica mediante hibridación (HIBRELEC)», el cual ha sido financiado por el Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), Contrato 710PIC0401.

Las instituciones y autores del presente libro se detallan a continuación:

**Centro Tecnológico CARTIF (España).**

Fernando Frechoso

Fredy Vélez

David Diez

Ana Urueña

**Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Grupo de investigación en Termodinámica Aplicada y Energías Alternativas –TAYEA (Colombia).**

Farid Chejne Janna

Javier Alonso Ordoñez Loza

Robert José Macías Naranjo.

Carlos Andrés Gómez Gutiérrez.

Estefanía Orrego Restrepo

Javier Fernando de La Cruz

**Universidad de Antioquia. Grupo Química de Recursos Energéticos y Medio Ambiente –QUIREMA (Colombia).**

Fanor Mondragón Pérez

Diana Patricia López

**Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas –CIEMAT (España).**

Raquel Ramos Casado

Virginia Pérez López

Proyecto «Prototipo de generación de energía eléctrica y térmica en núcleos aislados de Iberoamérica mediante hibridación – HIBRELEC»

José María Sánchez Hervás

José María Murillo Laplaza

Jorge Arenales Rivera

Alfonso Pascual Delgado

Isabel Ortiz González

**Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial –INEGI (Portugal)**

Daniela Silva

Ricardo Barbosa

**Universidad Austral de Chile –UACH (Chile).**

Rogelio Moreno Muñoz

**Centro para la Gestión de la Información y el Desarrollo de la Energía –  
CUBAENERGIA (Cuba).**

Alfredo Curbelo Alonso

**Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. Grupo de Investigación de  
Biomasa –CETERCUJAE (Cuba).**

Deny Oliva Merencio

## Contenido

1	RECURSO SOLAR Y BIOMASA RESIDUAL .....	14
1.1	Chile: Biomasa residual y recurso solar .....	15
1.1.1.	Recurso solar .....	16
1.1.2.	Recurso biomasa residual .....	18
1.2	Colombia: Biomasa residual y recurso solar .....	21
1.2.1	Recurso solar .....	21
1.2.2	Recurso biomasa residual .....	23
1.3	Cuba: Biomasa residual y recurso solar .....	31
1.3.1	Recurso Solar .....	31
1.3.2	Recurso biomasa residual .....	33
1.4	España: Biomasa residual y recurso solar .....	36
1.4.1	Recurso solar .....	36
1.4.2	Recurso biomasa .....	38
1.5	Recurso solar de Portugal.....	43
1.6	Apunte Final.....	45
2	PIRÓLISIS .....	46
2.1	Influencia de las variables de operación en la distribución del producto de pirólisis .....	49
2.1.1	Temperatura de operación.....	49
2.1.2	Velocidad de calentamiento del reactor de pirólisis.....	50
2.1.3	Tamaño de la partícula de la biomasa utilizada.....	51
2.1.4	Caudal de gas inerte .....	51
2.1.5	Influencia de las cenizas.....	52
2.1.6	Efecto del tiempo de permanencia .....	53
2.2	Metodología de experimentación .....	53
2.2.1	Variables de operación .....	56
2.3	Resultados Experimentales .....	57
2.3.1	Cardo.....	58
2.3.2	Resultados comparativos de la pirólisis de las diferentes biomasa utilizadas en Chile 60	
2.4	Pirólisis del ciprés de la cordillera ( <i>Austrocedrus chilensis</i> ) en Chile .....	62

2.5	Apuntes Finales .....	65
3	GASIFICACIÓN.....	67
3.1	Caracterización de combustibles.....	68
3.1.1	Pélets de serrín de pino.....	69
3.1.2	Métodos de caracterización .....	69
3.1.3	Propiedades físicas .....	70
3.1.4	Análisis inmediato y elemental .....	71
3.1.5	Composición de las cenizas.....	72
3.1.6	Análisis termogravimétrico .....	73
3.2	Gasificación de serrín de pino en España.....	77
3.2.1	Gasificación.....	77
3.2.2	Resultados de gasificación de pélets de pino .....	84
3.3	Gasificación de cascarilla de arroz en Colombia .....	90
3.3.1	Materia prima. ....	91
3.3.2	Resultados de pruebas experimentales .....	97
3.4	Gasificación de cardo, chopo y cañote de maíz .....	102
3.5	Apuntes Finales .....	105
4	PLANTA PILOTO HÍBRIDA PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN ZONAS AISLADAS .....	106
4.1	Sistema solar fotovoltaico .....	107
4.2	Reactor Downdraft y motor-generator de combustión de gas pobre.....	110
4.2.1	Reactor Downdraft .....	110
4.2.2	Sistema de limpieza de gases .....	112
4.2.3	Motor de generación eléctrica .....	116
4.3	Sincronización de la generación fotovoltaica y energía proveniente del motor-generator. ....	117
4.4	Puesta en marcha del prototipo .....	120
4.4.1	Medición de la potencia eléctrica generada por el sistema híbrido .....	125
4.5	Apuntes Finales .....	126
	Bibliografía .....	128

Proyecto «Prototipo de generación de energía eléctrica y térmica en núcleos aislados de Iberoamérica mediante hibridación – HIBRELEC»



## Introducción

Dentro de las fuentes energéticas, la energía eléctrica es fundamental para el desarrollo del bienestar social y económico de una sociedad; pensemos en la cantidad de usos que en la actualidad puede brindarnos este recurso: iluminación, refrigeración, potabilización de agua, telecomunicaciones, computación, etc. De acuerdo con esto y con distintas investigaciones, es posible afirmar que el acceso a la energía logra reducir la pobreza, mejorar la salud, el medio ambiente, aumentar la productividad y promover el crecimiento económico.

En este sentido, se presenta este proyecto, que inició en el 2010, cuyo objetivo es facilitar el acceso a la electricidad en aquellas zonas rurales de Iberoamérica que poseen suficiente biomasa. La utilización energética de la biomasa ha sido tradicionalmente térmica, por lo que se pretende aprovechar para usos eléctricos.

El objetivo anteriormente citado se encuentra alineado con iniciativas tan importantes como la Sustainable Energy for All (SE4ALL), alianza intersectorial de gobiernos, sector privado y sociedad civil; que surge en el 2011 con la finalidad poner la energía a disposición de todos los habitantes del planeta, mientras se reduce su intensidad de carbono. Dicha iniciativa es promovida por la Organización de las Naciones Unidas (ONU).

De esta manera, la publicación «Global Tracking Framework 2015» realizada por SE4ALL, basada en estadísticas oficiales, actualiza varios datos sobre el acceso energético: cerca 1 100 millones de personas —casi el 15% de la población global— no tienen acceso a la electricidad; de ellos, según la CEPAL, 34 millones viven en Iberoamérica y el Caribe, lo que supone un 5% del total de su población. Por lo tanto, este organismo ha planteado cuatro puntos claves para una agenda sostenible en esta materia:

- Promover el ahorro y uso eficiente de la energía
- Fomentar la igualdad en el acceso
- Mejorar la seguridad energética

- Diversificar la matriz, que en la región, actualmente, depende en un 75 % de fuentes no renovables.

La aplicación de estos lineamientos ha permitido que la electrificación camine a buen ritmo en la periferia de las ciudades y zonas rurales, aunque la calidad de esta a veces deje mucho que desear, por los numerosos cortes del fluido eléctrico. Sin embargo, aún deben llevarse a cabo, en estas zonas rurales, medidas para proporcionar energía eléctrica a más personas. De no ser así, dichas zonas quedarán despobladas, pues la población se desplaza, preferentemente, adonde se encuentran los servicios básicos.

Muchas zonas rurales de Iberoamérica están «fuera de red», lo que significa que no están conectadas a las redes de distribución y transporte de energía eléctrica. A veces puede ser complicado extender la red eléctrica a estas localidades debido a sus ubicaciones remotas, baja densidad de la población o falta de la infraestructura existente. En consecuencia, la electricidad debe ser suministrada de manera local utilizando sistemas domésticos independientes o mini redes que hagan uso de los recursos locales que tienen a su disposición. De esta manera, se rompe el círculo vicioso que existe entre el desarrollo económico y el suministro de energía, donde la falta del primero, imposibilita la segunda y viceversa. De ahí la importancia de implementar sistemas de energía renovables locales, cuya operación no acarree costos elevados para los diferentes usuarios.

Al respecto, es importante señalar que los sistemas domésticos independientes son fuentes de energía autónoma y de pequeña escala que, a nivel mundial, son utilizados por 216 millones de personas para acceder a la energía, ya que han sido desarrollados para apoyar a la población, principalmente, a nivel individual y doméstico. Un ejemplo de este tipo de sistemas domésticos son los sistemas solares.

Una mini red es un servicio de electricidad local que produce energía por medio de un generador y se distribuye a través de varios cables a hogares y negocios de los alrededores. Las mini redes pueden utilizar fuentes diésel renovables o un combinado de ambas para producir energía y a menudo incluyen un sistema de almacenamiento. Cerca de 400 millones de personas en el mundo obtienen su electricidad con esta tecnología.

Ahora bien, en septiembre de 2015, los líderes mundiales se reunieron para ponerse de acuerdo en diecisiete Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), con fecha límite de realización en el 2030. Dentro de estos objetivos se encuentra el SDG 7, el cual establece el acceso universal a los servicios modernos de energía para todas las personas, además demanda que se dupliquen tanto la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética, como la energía renovable en la mezcla de energía mundial.

En consideración con lo anterior, nuestro proyecto ha desarrollado una exitosa planta de generación de energía eléctrica con base en un sistema híbrido de energía solar fotovoltaica/gasificación de residuos agroindustriales, con el objetivo de proporcionar una solución de abastecimiento energético de calidad en las zonas aisladas no interconectadas de Iberoamérica. A continuación se describe el sistema está formado por la combinación de un módulo de gasificación de biomasa acoplado a un motor-generator de 20 kWe y un sistema de captación solar fotovoltaico de 5 kWe:

- El módulo de gasificación de biomasa cuenta con un sistema de limpieza de gases que se compone de: un ciclón, unidades filtrantes y un sistema de limpieza con H<sub>2</sub>O que garantizan la calidad y limpieza de la corriente gaseosa con la que se alimenta un moto-generator de 20 kWe. Lo anterior se debe a que uno de los principales problemas presentado por la gasificación es la aparición en el gas de salida de alquitranes (tar) que deterioran el motor-generator. Este módulo, además, puede producir energía térmica mediante el aprovechamiento de los humos de salida del moto-generator y de sus fluidos de refrigeración.
- El módulo de captación solar fotovoltaico seleccionado e instalado tiene una potencia nominal de 5.39 kWp y está formado por dos arreglos de once paneles cada uno, con un área total de 43 m<sup>2</sup> capaces de generar 7.18 MWh/año. Este sistema está en capacidad de generar una red trifásica de 9 kW por medio de inversores cargadores. La red está dimensionada para el consumo de cargas convencionales de 120 y 208 VAC durante las 24 horas del día gracias a un banco de baterías de 2000 Ah y 24 VDC.

- Los dos módulos están acoplados mediante un sistema de gestión de la demanda energética, el cual cuenta con un diseño de control que permite integrar y gestionar todos los sistemas redireccionando la energía donde sea requerida. Cuando el sistema solar está generando, el inversor cargador principal se sincroniza con los inversores cargadores secundarios para enviar energía al banco de baterías, a la red o al consumo inmediato del usuario final. Cuando el motor generador ingresa al sistema, los inversores cargadores secundarios sincronizan las fases para cargar las baterías o para suplir la demanda energética instantánea.

De otro lado, resulta fundamental destacar que la selección de la combinación biomasa y fotovoltaica se debe a que ambas son renovables y, en cualquier sitio de Iberoamérica, es posible encontrar estas dos fuentes de energía para poder utilizarlas en función de su abundancia y del tipo de demanda energética que se necesite.

De modo que, para las primeras pruebas hemos utilizado cascarilla de arroz como biomasa para el módulo de gasificación, pues pensamos que esta sería la biomasa más abundante en el primer emplazamiento de este equipo.

La proporción entre la potencia del módulo de biomasa y la potencia del módulo fotovoltaico, además de la cantidad total de acumulación en baterías, se optimizarán de manera particular y variará según:

- La cantidad de recurso fotovoltaico y de recurso de biomasa del emplazamiento, pues estos nos inclinarán hacia el más abundante por ser menos costoso.
- Los perfiles de consumo del lugar. Si tenemos muy baja demanda o esta es muy desigual entre el día y la noche se daría más importancia al módulo fotovoltaico, mientras que si la demanda es muy regular se maximizaría la generación mediante gasificación por biomasa.

De igual manera, el tamaño del módulo fotovoltaico y la acumulación con baterías garantizarán la suficiente electricidad para el arranque autónomo del módulo de gasificación

por biomasa, pues estamos aislados de la red eléctrica y la electricidad es necesaria para realizar esta operación.

Finalmente, para poder implantar el resultado del proyecto en la comunidad aislada que se decida, los pobladores y entes comunitarios deben recibir una capacitación para que aprendan a operar y mantener con seguridad el sistema de generación y la gestión de la energía producida.

Conforme a lo anterior, se cumplen las cuatro condiciones principales para que este proyecto de electrificación sea sostenible en el tiempo y en el espacio:

- Adaptarse a las necesidades energéticas de cada zona: debe ser capaz de proporcionar energía eléctrica y térmica para abastecer las necesidades de electricidad, agua caliente sanitaria, etc.
- Emplear de forma eficiente los recursos naturales de cada zona con el fin de minimizar el coste de generación y maximizar la calidad de la energía generada. La parte correspondiente al módulo solar fotovoltaico y la acumulación en baterías siempre se podrá ampliar en caso necesario.
- Minimizar vertidos y residuos: los materiales empleados en la limpieza del gas de gasificación se pueden introducir en el gasificador, mezclados con la biomasa. Mientras que las cenizas generadas podrán ser empleadas como fertilizante natural. Por lo tanto, la planta no generará residuos líquidos ni sólidos.
- Contar con las comunidades locales. Los proyectos de electrificación solo funcionan y se benefician con el desarrollo de la experiencia y participación de la población local. No importa qué modelo de negocios se siga, el punto importante es que la comunidad participe de manera activa en el proyecto.

Para concluir, no queríamos finalizar esta introducción sin subrayar el compromiso con el desarrollo de la ciencia que tenemos las organizaciones financiadoras y ejecutoras de este

proyecto. Mil gracias a CYTED por creer en este proyecto a pesar de los problemas económicos que a todos nos han sacudido, y mil gracias a todos los socios por su trabajo.

El desarrollo de este proyecto ha contribuido a la formación de profesionales e investigadores, especialmente en el ámbito de la gasificación de biomasa sobre una base científica, cuyos resultados han quedado reflejados tanto en la elaboración de diversos artículos científicos como en la construcción del sistema de generación que en gran parte ha sido construido en Medellín (Colombia).

# 1 RECURSO SOLAR Y BIOMASA RESIDUAL

En este capítulo se presenta el potencial de recurso solar y de biomasa aptos para sistemas híbridos de generación eléctrica de pequeña potencia (10-40 kW). Además, se evalúa por separado la disponibilidad de ambos recursos en Chile, Colombia, Cuba, España y Portugal para ser utilizados en zonas aisladas donde la disponibilidad de energía eléctrica es escasa o inexistente.

La biomasa es «la materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía» (RAE, 2016). Se considera biomasa residual el subproducto resultante de una actividad determinada (agrícola, forestal, agroindustrial, agroforestal) que tiene un valor económico escaso o nulo al no tener aprovechamiento comercial. Los datos necesarios para acometer el inventario de recursos de biomasa se pueden obtener de fuentes muy diversas dependiendo del tipo de biomasa, nivel de precisión requerida, ámbito geográfico y otros (ver Tabla 1-1).

*Tabla 1-1 Bases de datos disponibles para la cuantificación del potencial de biomasa de Chile, Colombia, Cuba y España*

País	Entidad	Fecha de Consulta
Chile	Instituto Nacional de Estadística (INE)	2006
	Instituto Forestal (INFOR)	2006

<b>Colombia</b>	DANE	2009
<b>Cuba</b>	Ministerio de Agricultura	2013
<b>España</b>	Instituto Geográfico Nacional	2006

Por su parte, la energía solar es una energía renovable, obtenida a partir del aprovechamiento de la radiación electromagnética procedente del sol. La radiación es aprovechable en sus componentes directo y difuso o en la suma de ambos. Así, la radiación directa es la que llega directamente del foco solar, sin reflexiones o refracciones intermedias. La bóveda celeste diurna emite la radiación difusa debido a los múltiples fenómenos de reflexión y refracción solar en la atmósfera, en las nubes y el resto de elementos atmosféricos y terrestres.

La elección del lugar, en cada uno de los países participantes, donde se deben poner los paneles se hizo a través de la consulta de datos estadísticos que identifican la densidad de las zonas con menor concentración de población. Para el uso de energía solar por medio de paneles fotovoltaicos, la radiación difusa es el parámetro más importante a considerar.

Al efectuar una evaluación de la conjugación de los niveles de radiación difusa y densidad poblacional, se identificaron, para cada uno de los cinco países involucrados en el proyecto, las regiones con mayor potencial para instalar el sistema híbrido a construir. Sin embargo, es importante destacar que la combinación de este análisis con los niveles de biomasa podrá llevar a la identificación de la región óptima para la instalación del equipo a desarrollar en cada país.

## **1.1 Chile: Biomasa residual y recurso solar**

Chile es un país ubicado en el extremo sudoeste de América del Sur, dentro de la región llamada Cono Sur, Chile continental presenta un alto desarrollo longitudinal y escaso desarrollo latitudinal. Según las proyecciones del Instituto Nacional de Estadísticas (INE),

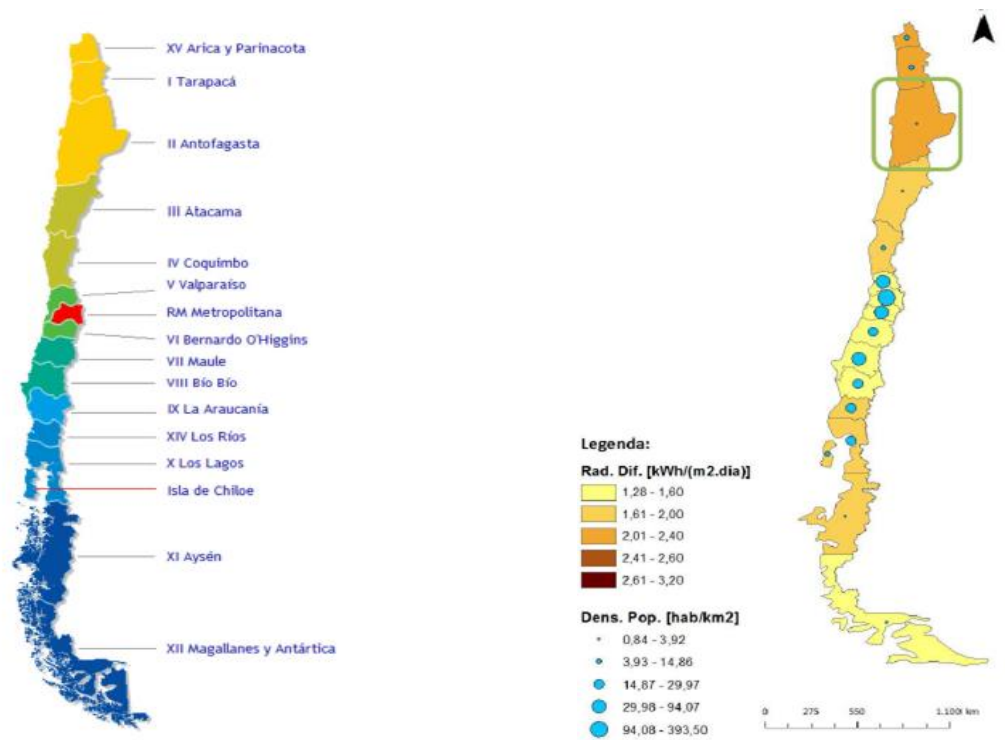


Chile tiene una población de 18 006 407 habitantes, de los cuales 8 911 940 son hombres y 9 094 467 mujeres. Actualmente Chile se encuentra dividido en 15 regiones (ver Figura 1.1.A), 51 provincias y 346 comunas.

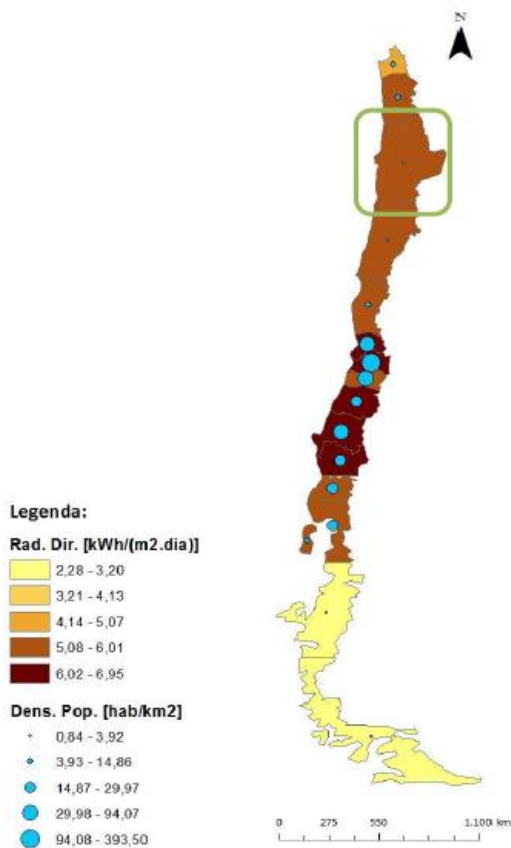
### 1.1.1. Recurso solar

En el estudio desarrollado fue considerada su división regional utilizando datos de radiación difusa, global y media, para cada región del terreno dividido en fracciones de 1600 km<sup>2</sup> (OpenEI, 2015), y para el caso de la radiación directa se tomó el valor de la media anual (registrada en un periodo de 22 años) para la capital regional ( POWER: Prediction of Worldwide Energy Resource Project, 2015).

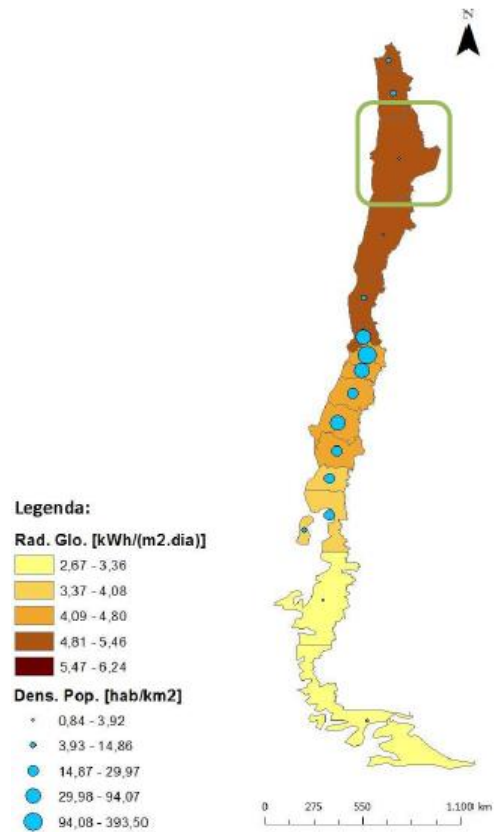
En las regiones del norte de Chile los valores de radiación difusa son más elevados: Arica y Parinacota (2,07 kWh/m<sup>2</sup>día) y Antofagasta (2,08kWh/(m<sup>2</sup>día)); además, a excepción de la región metropolitana, las densidades poblacionales de las regiones restantes son relativamente reducidas, en especial las regiones de Aysen (0,84 hab/km<sup>2</sup>), de Magallanes y Antártica (1,14 hab/m<sup>2</sup>) y Atacama (3,43 hab/m<sup>2</sup>) (Figura 1.1.B).



**A) División política de Chile**



**B) Radiación difusa y población en Chile**



**C) Radiación directa y población en Chile**

**D) Radiación global y población en Chile**

**Figura 1.1 Información sobre Chile: A) División política; B) Radiación difusa; C) Radiación directas y D) Radiación global**

La radiación directa varía relativamente entre 2,35 kWh/(m<sup>2</sup>día) Aysen y 6,94 kWh/(m<sup>2</sup>día) RM Metropolitana (Figura 1.1.C). En relación con la radiación global, esta es claramente más elevada en Antofagasta, en el norte chileno. Con la evaluación de los mapas presentados y por la conjugación de los diferentes tipos de radiación solar y la densidad poblacional se sugiere la hipótesis de considerar al departamento de Antofagasta (Figura 1.1.D).

### 1.1.2. Recurso biomasa residual

Según el estudio «Potencial de la Biomasa para la generación eléctrica en Chile al 2025» de la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM), Chile avanza a paso sostenido en la implementación de plantas energéticas a partir de biomasa y, para el 2025, se espera que haya entre 456 y 903 MW generados a partir de biomasa residual. En este estudio de la UTFSM se considera, aparte de los desechos de la industria forestal, desechos de cereales y manejo forestal, otras fuentes de biomasa como los desechos de la industria agropecuaria y los cultivos energéticos. En esta sección se hará una extracción selectiva de la evaluación realizada sobre los desechos de cereales, agroindustriales y manejos forestales en Chile.

Chile contaba para el 2006, según el Instituto Nacional de Estadísticas (INE), con 594 952 hectáreas de cereal, de las cuales 314 720 son de trigo, 123 560 son de maíz y 29 060 son de cebada. En la Tabla 1-2 se presenta el potencial bruto de energía a partir de los desechos de los cereales de maíz, trigo y cebada. En dicha tabla se puede apreciar que las regiones VII, VIII y IX concentran el mayor potencial bruto de los desechos de cereales.

**Tabla 1-2 Potencial Bruto a partir de desechos de cereales (maíz, trigo, cebada)**

Región	Potencial Bruto Desechos de Cereales (MW)		
	Mín.	Máx.	%
<b>IV</b>	0	0	0%
<b>V</b>	0	0	0%
<b>VI</b>	30	65	11%
<b>VII</b>	40	84	14%
<b>VIII</b>	70	143	24%
<b>IX</b>	110	231	39%
<b>X</b>	30	77	13%
<b>RM</b>			0%

<b>Otras</b>			0%
<b>Total</b>	280	600	100%
<b>(MW)</b>			

Por otra parte, según el Instituto Forestal (INFOR), para el 2006 el recurso forestal de Chile contaba con bosques nativos y plantaciones forestales a lo largo de todo el país, con cerca de 15,6 millones de hectáreas, de las cuales 13,6 millones son de bosque nativo y 2,1 millones corresponden a plantaciones forestales. Las especies de bosque nativo que más sobresalen son: Siempreverde, Lenga y Coihue de Magallanes. El total de las plantaciones forestales en Chile fue de 2 078 646 ha, de las cuales el Pino Radiata tuvo 1 408 430 ha, el Eucalipto tuvo 489 603 ha y el Atriplex tuvo 58 501 ha; en estas tres especies se concentró aproximadamente el 93% de las plantaciones forestales.

En la Tabla 1-3 se presenta un resumen del potencial bruto calculado en el estudio de la UTFSM para la industria forestal y el manejo de plantaciones. En esta tabla se aprecia que el 77% de la energía que se puede obtener, proveniente del sector forestal, es del bosque nativo; sin embargo, dado que los bosques nativos tienen tanta importancia biológica, estos no se consideran para este estudio. Por lo tanto, el potencial bruto de energía disponible es 1435 MW, casi todo concentrado en las regiones VII, VIII y IX. La tasa de forestación promedio entre los años 2002-2004, según la INFO, fue de 112 742 hectáreas por año, correspondientes a 57 067 hectáreas de forestación y 55 675 de reforestación.

*Tabla 1-3 Resumen potencial bruto (MW) de la industria forestal y manejo de plantaciones*

Región	Manejo Forestal		Residuos Industria		Manejo Bosques Nativos		Total Potencial Bruto		Porcentaje
	MW								
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	
<b>IV</b>	1	1	0	0	0	0	1	1	0
<b>V</b>	37	49	2	6	17	33	55	87	1%
<b>VI</b>	17	23	10	30	21	41	48	94	2%
<b>VII</b>	68	91	52	151	65	130	185	372	6%
<b>VIII</b>	152	203	181	528	138	276	472	1007	16%
<b>IX</b>	76	101	36	103	159	319	271	523	8%
<b>X</b>	42	56	32	94	634	1268	709	1419	23%
<b>RM</b>			0	0			0	0	0%
<b>Otras</b>			-	-	1327	2655	1327	2655	43%
<b>Total</b>	393	523	313	912	2361	4723	3067	6158	100%
<b>Porcentaj e</b>		9%		15%		77%		100%	

El estudio de la UTFSM estima que para Chile el 45% del potencial energético bruto total tiene que ver con fuentes del sector forestal y actividades asociadas a este y que, por la abundancia de plantaciones en las regiones VI a X, se puede encontrar la mayor capacidad para producir energía a partir de residuos vegetales. Además, para los desechos de cereales se tiene una factibilidad del 53% de ser usados como biomasa en la producción energética, esto es como máximo 317 MW.

## 1.2 Colombia: Biomasa residual y recurso solar

El territorio que comprende la República de Colombia está situado en la esquina noroccidental de América del Sur y tiene un área continental de 1 141 748 km<sup>2</sup>, se encuentra dividida en 32 departamentos y un distrito capital (ver Figura 1.2.A). Cada departamento está dividido en municipios que a su vez son divididos en corregimientos. La demografía de Colombia es estudiada por el Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE). Según los datos del censo nacional de 2005 extrapolados a 2010, el país tiene una población de 46 581 823 habitantes, lo que lo constituye en el cuarto país más poblado en América después de los Estados Unidos, Brasil y México. De ellos, el 51,2 % son mujeres y el 48,8 % son hombres.

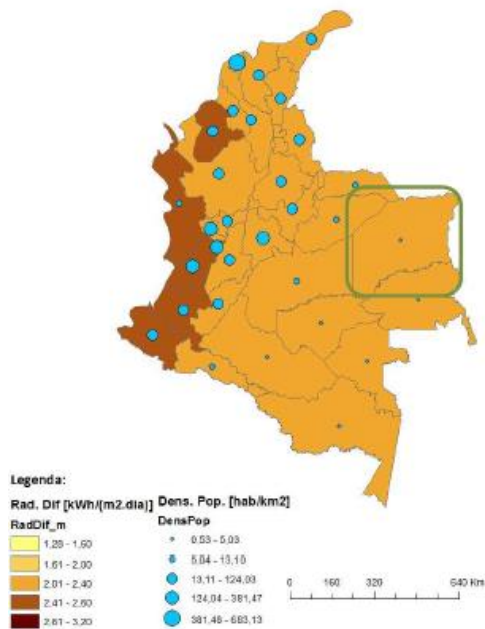
### 1.2.1 Recurso solar

El análisis subsecuente se basó en la división colombiana por departamentos. Se usaron datos de radiación difusa, global y media para cada región del terreno dividido en fracciones de 1600 km<sup>2</sup> (OpenEI, 2015), y para el caso de radiación directa se tomó el valor de la media anual (registrada por un periodo de 22 años) para la capital de cada departamento (POWER: Prediction of Worldwide Energy Resource Project, 2015).

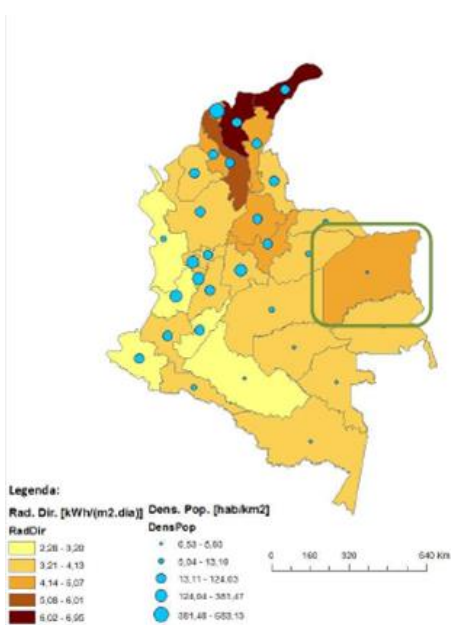
Los departamentos de la región sureste son los menos poblados, entre ellos se destacan: Guainía (0,53hab/m<sup>2</sup>), Vichada (0,64hab/m<sup>2</sup>), Amazonas (0,64 hab/m<sup>2</sup> y Vaupés (0,77 hab/m<sup>2</sup>). El nivel de radiación difusa (Figura 1.2.B) varía entre 2,13 kWh/m<sup>2</sup> en el departamento de Atlántico y 2,50 kWh/m<sup>2</sup> en el Chocó. En el caso de la radiación directa (Figura 1.2.C) los valores para Colombia están comprendidos entre 2,64 kWh/m<sup>2</sup>día, en el departamento del Caquetá, y 6.87 kWh/m<sup>2</sup>día, en el Magdalena. Respecto a la radiación global (Figura 1.2.D), sus niveles van desde 4,35 kWh/m<sup>2</sup>día en Nariño, hasta 5.44 kWh/m<sup>2</sup>día en el departamento del Atlántico.



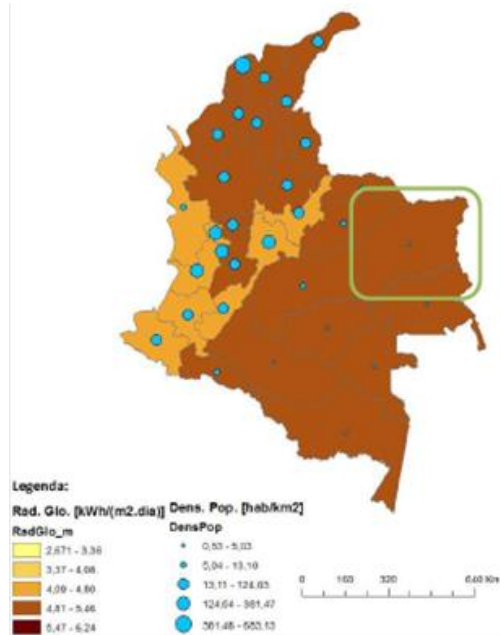
A) División política de Colombia



B) Radiación difusa y población en Colombia



C) Radiación directa y población en Colombia



D) Radiación global y población en Colombia

Figura 1.2 Información sobre Colombia: A) División política; B) Radiación difusa; C) Radiación directas y D) Radiación global

Con la evaluación de los mapas presentados y con la conjugación de los diferentes tipos de radiación solar y densidad poblacional, se sugiere considerar al departamento de Vichada; sin embargo, este no es el departamento colombiano con mayor nivel de radiación difusa, pero entre los que tienen menor nivel de densidad de población, es el que tiene un nivel de radiación difusa razonable.

### **1.2.2 Recurso biomasa residual**

Colombia es un país que cuenta con gran variedad de cultivos como café, plátano, palma africana, arroz, maíz, frijol, y otros; además posee bosques naturales y bosques plantados. Los bosques plantados tienen potencialidad solamente a partir de los residuos producidos, los cuales son recuperables hasta en un 90%, ya sean residuos de campo (desrame, corte y troce) o de aserradero (aserrín, tapas, puntas, trozos). Por el contrario, en cuanto a los bosques naturales, la industria maderera se ha fraccionado en un sin número de pequeñas explotaciones o empresas unipersonales e informales que explotan el bosque sin atender las restricciones legales y ambientales (UPME, 2003). Estas explotaciones individuales y el progresivo uso de motosierras para procesar madera escuadrada directamente en el bosque, hacen que dichos residuos provenientes del desrame, descortezado, troce y corte queden diseminados directamente en el bosque y por tanto, el potencial energético no se puede encontrar concentrado.

La Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA) (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de la República de Colombia, 2009) diferencia los cultivos en Colombia en dos categorías: cultivos permanentes y cultivos transitorios, esto porque los cultivos permanentes no tienen la misma dinámica de los cultivos transitorios, ya que la cosecha de los mismos solo puede realizarse después de un lapso de tiempo mayor a un año, en algunos casos, y en pequeñas cantidades. En los cultivos permanentes se encuentra el café, el plátano, la caña de azúcar, la palma africana, frutales, entre otros. Estos cultivos presentaron un leve aumento en el porcentaje de participación dentro del área agrícola para el 2009.

En la Tabla 1-4 se presenta el área cosechada y el rendimiento de los cultivos permanentes más representativos en el territorio colombiano. Los residuos de biomasa para los cultivos



permanentes principales son muy variados, se considera la paja, las cascaras, los racimos, las fibras, entre otros desechos.

*Tabla 1-4 Producción agrícola de cultivos permanentes en Colombia.*

<b>Cultivos Permanentes</b>	<b>Área cosechada (Ha)</b>	<b>Producción (ton)</b>	<b>Rendimiento (t/ha)</b>
<b>Café</b>	664 479	481 122	0,90
<b>Plátano</b>	348 510	2 247 487	8,00
<b>Palma africana</b>	342 547	7 604 543,4	22,20 [8]
<b>Caña de azúcar</b>	214 947	2 397 367	11,15
<b>Caña panelera</b>	203 919	8 786 201	57,01
<b>Otros frutales</b>	132 670	927 585	10,67
<b>Cacao</b>	119 102	46 581	0,51
<b>Banano de consumo interno</b>	37 536	241 603	7,37
<b>Banano de exportación</b>	42 655	1 724 707	40,43
<b>Naranja</b>	35 637	465 015	15,45
<b>Otros Permanentes</b>	48 962	194 733	4,50
<b>Otros cítricos</b>	27 343	223 919	9,93
<b>Mango</b>	11 445	100 445	13,0

Colombia cuenta con un total de 17 185 716 t/año de residuos agroindustriales y de cosecha de cultivos permanentes. El principal aporte lo hacen las plantaciones de caña panelera con un 26,7%, seguida por los cultivos de plátano y palma africana con un 25,5 % y 21,7 % respectivamente. En la Tabla 1-5 se presenta la estimación de la energía potencial bruta a partir de residuos de cultivos permanentes en Colombia, de igual manera en el caso anterior se consideró una humedad promedio en los residuos tipo paja de 70% y una reducción de la humedad al 10% para su uso potencial.

*Tabla 1-5 Potencial de energía bruta a partir de desechos agrícolas de cultivos permanentes.*

<b>Cultivos</b>	<b>MJ/año</b>	<b>GWh/año</b>
<b>Café</b>	2,15E+09	815
<b>Plátano</b>	1,91E+10	5320
<b>Palma africana</b>	2,55E+10	7010
<b>Caña de azúcar</b>	5,49E+09	1910
<b>Caña panelera</b>	2,01E+10	6990
<b>B. interno</b>	1,59E+09	442
<b>B. exportación</b>	1,14E+10	3160

El estudio del potencial energético de los residuos provenientes de la caña permiten encontrar que el mayor potencial energético son los residuos de cosecha tipo paja, estos poseen un potencial de 4817 GWh/año que no se aprovecha actualmente, ya que quedan esparcidos en los campos después de la recolección (UPME, 2003). En la actualidad algunos ingenios utilizan los residuos de cosecha para la generación de energía, práctica que resulta costosa debido a la recolección y transporte para llevarlos hasta el ingenio azucarero, aunque

estos se encuentran cerca de las plantaciones (UPME, 2003). El bagazo tiene un potencial de 2170 GWh/año que representa un 31,1% del total de la energía potencial para estos cultivos.

Para los cultivos transitorios la ENA reporta, en el 2009, una disminución evidente en la siembra de algunos cereales como el sorgo, el trigo y el maíz amarillo; mientras que cultivos como el arroz, la papa, la soya y algunas hortalizas experimentaron crecimientos respecto al año anterior. En materia de cereales, el arroz presentó un incremento del 6%, en términos de área sembrada, respecto al año anterior. En la Tabla 1-6 se presenta el área cosechada, la producción y el rendimiento de los cultivos transitorios en Colombia. El arroz representa el cultivo transitorio de mayor producción en Colombia, seguido de la papa, yuca y hortalizas.

*Tabla 1-6 Producción agrícola de cultivos transitorios en Colombia.*

<b>Cultivos transitorios</b>	<b>Área cosechada (ha)</b>	<b>Producción (t/año)</b>	<b>Rendimiento (t/Ha)</b>
<b>Arroz</b>	619 011	3 717 995	6,0
<b>Maíz</b>	412 631	1 179 131	2,9
<b>Maíz amarillo</b>	297 924	840 668	2,8
<b>Maíz blanco</b>	114 708	338 463	3,0
<b>Yuca</b>	175 526	1 629 222	9,3
<b>Papa</b>	123 659	2'272772	18,4
<b>Papa consumo directo</b>	87 488	1 449 494	16,6
<b>Papa industrial</b>	36 170	823 278	22,8
<b>Hortalizas</b>	119 549	1 609 613	13,46

<b>Frijol</b>	86 134	132 015	1,5
<b>Algodón</b>	40 035	29 570	0,74
<b>Sorgo</b>	35 355	107 482	3,0
<b>Soya</b>	27 458	74 888	2,7
<b>Trigo</b>	14 369	24 349	1,7
<b>Tabaco</b>	9 590	17 590	1,8
<b>Cebada</b>	7 283	17 567	2,4

La estimación de los residuos de los diferentes cultivos se realiza con base en porcentaje de desecho, relación desecho/producto y producción de desecho por hectárea cosechada, encontrados en la literatura. En la Tabla 1-7 se presenta un resumen de los coeficientes de desecho para cultivos transitorios y los valores de calor de combustión (kJ/kg) para cada tipo de desecho.

*Tabla 1-7 Características de producción de desechos agrícolas en cultivos transitorios.*

<b>Cultivo</b>	<b>Desecho</b>	<b>Observaciones</b>	<b>Relación Desecho (kg)/Producido (kg)</b>	<b>CP (kJ/kg)</b>
<b>Arroz</b>	Cáscara de arroz	(Natarajan, Nordin, & Rao, 1998)	0,2	15.000 (Natarajan, Nordin, & Rao, 1998)
	Paja de arroz	(Summers, y otros, 2003) Campos California	0,3- 0,5	14.589 (Calvo, Otero, Jenkins, Morán, & García, 2004)

		(Summers, y otros, 2003) Campos Modernos	1	
		(Summers, y otros, 2003) Campos cultivos tradicionales	2	
<b>Trigo</b>	Paja	(Telebnia, Karakashev, & Angelidaki, 2010)	1,3	14.589 (Calvo, Otero, Jenkins, Morán, & García, 2004)
		(Zeng, Ma, & Ma, 2007)	1,336	
<b>Maíz</b>	Paja	(Zeng, Ma, & Ma, 2007)	2	14.589 (Calvo, Otero, Jenkins, Morán, & García, 2004)
<b>Frijoles</b>	Paja	(Zeng, Ma, & Ma, 2007)	1,5	14.589 (Calvo, Otero, Jenkins, Morán, & García, 2004)
<b>Tubérculos y hortalizas</b>	Paja	(Zeng, Ma, & Ma, 2007)	0,5	14.589 (Calvo, Otero, Jenkins, Morán, & García, 2004)

En la Tabla 1-8 se reporta la producción de biomasa residual estimada para los principales cultivos transitorios en Colombia, y se presenta un resumen del tipo de desecho considerado para cada cultivo. El principal residuo agrícola de cultivos transitorios es el arroz que representa un 30,3%, considerando la paja producida en la cosecha y cascarilla de arroz, seguido del maíz y la papa con un 23,4 % y 11,3%, respectivamente.

*Tabla 1-8 Desechos agrícolas de los principales cultivos transitorios en Colombia.*

<b>Cultivo</b>	<b>Desecho</b>	<b>Producción residuos (t/año)</b>
<b>Arroz</b>	Paja - Cáscara	3 059 909
<b>Maíz</b>	Paja	2 358 262
<b>Papa</b>	Paja	1 136 386
<b>Frijol</b>	Paja	804 806
<b>Algodón</b>	Paja	198 022
<b>Trigo</b>	Paja	88 710
<b>Hortalizas</b>	Paja	31 653
<b>Yuca</b>	Paja	53 438

La biomasa residual para los principales cultivos transitorios de los desechos tipo paja en Colombia poseen una humedad promedio del 70%; para la estimación de la energía potencial se consideró una humedad del 10%. En la Tabla 1-9 se presenta la energía potencial bruta estimada para los residuos agrícolas y agroindustriales de los principales cultivos transitorios en GWh/año con una energía potencial bruta total de 12 300 GWh/año.

*Tabla 1-9 Potencial de energía bruta a partir de desechos agrícolas de cultivos transitorios.*

<b>Cultivo</b>	<b>MJ/Año</b>	<b>GWh/año</b>
<b>Arroz</b>	2,16E+10	6000
<b>Maíz</b>	1,15E+10	3190

<b>Papa</b>	5,53E+09	1530
<b>Hortalizas</b>	3,91E+09	1090
<b>Frijol</b>	9,63E+08	267
<b>Algodón</b>	4,95E+08	138
<b>Trigo</b>	1,54E+08	42,8

El arroz constituye el cultivo transitorio con mayor potencial de biomasa; se estima una energía potencial bruta de 6 000 GWh/año que constituye un 49% del total de energía potencial de los cultivos transitorios.

Como se muestra en la Tabla 1-10, la energía potencial de la paja producida en la cosecha del arroz es de 3 130 GWh/año, correspondiente a un 52%. La cascarilla no siempre se encuentra disponible cerca al cultivo, en algunas ocasiones una gran parte se encuentra disponible en los sitios de procesamiento o trilla y no en los campos (UPME, 2003). Dicho desecho constituye un 48% del potencial energético del arroz.

*Tabla 1-10 Energía potencial bruta a partir de desechos en cultivos de arroz*

<b>Arroz</b>	<b>MJ/año</b>	<b>GWh/Año</b>
<b>Paja</b>	1,13E+10	3130
<b>Cascarilla</b>	1,03E+10	2870

La paja residual de los cultivos del maíz representa un 26% de la energía bruta de los cultivos transitorios, lo que la convierte en el segundo cultivo de mayor importancia en potencial energético. Los residuos de cosecha de maíz, arveja y frijol son utilizados por el sector ganadero para la alimentación vacuna de manera fresca (recién cortado o verde) o

henificado (deshidratado y enfardado) (UPME, 2003). Dicha situación es una limitante para el uso de estos residuos por la competitividad.

De acuerdo con lo anterior, el arroz constituye el cultivo transitorio con mayor potencial de biomasa, esta, a su vez, representa un problema ambiental para la industria arrocera, pues son residuos manejados de forma inadecuada (quema no controlada). Por lo tanto, se concluye que, emplear la cascarilla de arroz como fuente de energía para un reactor se hace muy viable para Colombia.

### **1.3 Cuba: Biomasa residual y recurso solar**

Cuba es un archipiélago constituido por la mayor isla de las Antillas llamada Cuba, la Isla de la Juventud (anteriormente llamada Isla de Pinos), y otros 4 195 cayos, islotes e islas adyacentes. Está ubicada en el mar de las Antillas (o mar Caribe), cerca de la costa de los Estados Unidos y México. Posee una superficie de 109 884,01 km<sup>2</sup>. Cuba está dividida en 14 provincias (Figura 1.3.A), cuenta con 169 municipios y un municipio especial (la Isla de la Juventud). Según datos del último censo, la población residente en la isla en el año 2012 fue de 11 167 325 habitantes (Oficina Nacional de Estadísticas (O.N.E.)). O.N.E es el organismo estatal encargado de supervisar los datos demográficos cubanos. El porcentaje de mujeres es relativamente superior al de los hombres, 50,01% y 49,99%, respectivamente.

#### **1.3.1 Recurso Solar**

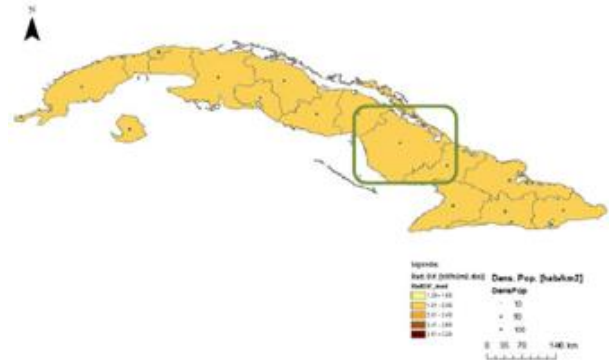
Para el estudio realizado se consideró la división de Cuba por provincias, usando datos de radiación directa y global media para cada región del terreno dividido en fracciones de 100 km<sup>2</sup> (OpenEI, 2015). En el caso de la radiación difusa (Figura 1.3.B) se tomó el valor de la media anual (registrada por un periodo de 22 años) para la capital de cada provincia (POWER: Prediction of Worldwide Energy Resource Project, 2015).



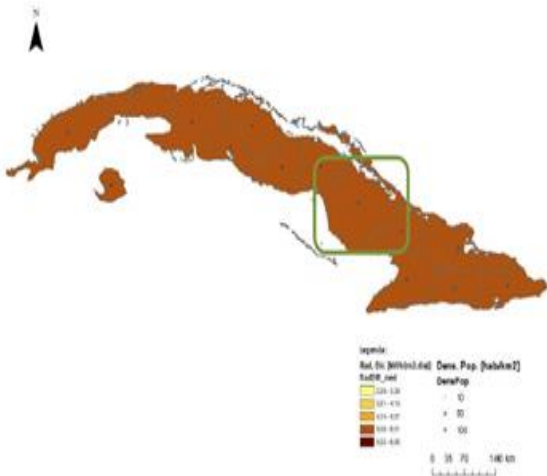
En Cuba la densidad poblacional es reducida en comparación con los demás países estudiados, y es Santiago de Cuba con 170,1 hab/km<sup>2</sup> el que presenta un valor más elevado, en tanto que la Isla de Juventud con 35,7 hab/km<sup>2</sup>, es la que tiene el menor valor.



A) División política de Cuba



B) Radiación difusa y población en Cuba



C) Radiación directa y población en Cuba



D) Radiación global y población en Cuba

**Figura 1.3. Información sobre Cuba: A) División política; B) Radiación difusa; C) Radiación directas y D) Radiación global**

La radiación directa incidente en este país varía entre los 5,19 kWh/m<sup>2</sup>día, en la provincia de la Habana, y 5,97 kWh/m<sup>2</sup>día, en Granma (Figura 1.3.C). En cuanto a la radiación global,

se tiene que en la provincia de la Habana es de 5,55 kWh/m<sup>2</sup>día, y en la provincia de Granma de 5,89 kWh/m<sup>2</sup>día (Figura 1.3.D).

El análisis de radiación en los mapas cubanos presentados y su combinación con la densidad poblacional de varias provincias de este país, sugieren Camagüey como la región más adecuada para la instalación de una unidad piloto.

### 1.3.2 Recurso biomasa residual

En Cuba, en el año 2013, las fuente de energía renovables representaron el 22,4% del total de la producción de energía primaria del país; sin embargo, debido a la historia política de Cuba y a su geografía, el desarrollo de sistemas energéticos alternativos ha sido lento, lo que hace que su principal fuente de energía renovable sea la biomasa. Cuba no cuenta con ríos caudalosos ni con velocidades de viento que permitan explotar significativamente estas alternativas. No obstante, para cubrir la demanda de energía, existe un potencial energético factible de ser usado que no solo proviene de la caña, cuyos cultivos representan cerca del 50 % del territorio destinado a la agricultura con aproximadamente 1 720 791 de hectáreas sembradas (Eicma, 2013), sino de cultivos como la Jatropha, la leña, la paja de caña y la cascarilla de arroz. En la Tabla 1-11 se presenta la disponibilidad de biomasa residual de Cuba

*Tabla 1-11 Biomasa residual de Cuba*

<b>Biomasa</b>	<b>Toneladas</b>
<b>Bagazo y paja de caña</b>	4 030 310
<b>Serrín de madera</b>	1 815
<b>Cáscara de arroz</b>	2 870
<b>Desechos de café</b>	232
<b>Cáscara de coco</b>	204,7
<b>Desechos forestales</b>	6 771, 3
<b>Desechos agrícolas</b>	739,4

<b>Leña</b>	1 193 893 [miles de metros cúbicos]
-------------	-------------------------------------

Así mismo, en Cuba se ha implementado, paulatinamente, en los últimos años un plan de ahorro energético y de producción a partir de energías alternativas, tales como la biomasa residual. Así se evidencia en la Tabla 1-12.

*Tabla 1-12 Energía obtenida de la biomasa*

<b>Biomasa</b>	<b>2006</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>2013</b>
<b>Bagazo de caña</b>	865,4	927,2	1004,1	930,0
<b>Leña</b>	224,0	181,9	245,6	170,0
<b>Serrín de madera</b>	0,2	0,2	0,4	0,2
<b>Cáscara de arroz</b>	2,4	0,8	0,1	1,04
<b>Otros desechos forestales</b>	0,6	7,6	4,5	4,5

Fuente: anuario estadístico de Cuba, 2013

Se puede observar que, el uso de estas fuentes renovables para la generación de energía eléctrica está estrechamente ligado a la implementación y desarrollo de tecnologías eficientes como la gasificación, la cual permite que esta producción sea competitiva con el uso de los combustibles tradicionales.

En la isla se destacan por su abundancia y factibilidad técnica y energética dos tipos de residuos que provienen de la industria del azúcar y un arbusto invasivo llamado Marabú (ver Figura 1.4) (Energy, 2015).



**A) Cultivo de Marabú**



**B) Bagazo de Caña**

***Figura 1.4 Biomosas abundantes en Cuba: A) Marabú y B) Caña (Energy, 2015).***

**Bagazo de caña.** En Cuba existe una gran cantidad de residuos de la agroindustria de la caña que pueden ser destinados a la producción de energía. En el año 2013 se usaron 4,1 millones de toneladas con fines energéticos, gracias a la abundancia de biomasa y la disponibilidad de plantas azucareras que están distribuidas en todo el país. En el año 2011, se consideraba al bagazo y la paja de caña como los principales residuos empleados como combustible, ya que 61 ingenios generaban aproximadamente 38 KW/t de caña. De estos residuos, el 97,4% de la producción nacional fueron utilizados en la obtención de energía, lo que significa que cerca del 85% del total de energía fue obtenida mediante combustión directa.

**Marabú.** En Cuba, la disponibilidad de este arbusto o pequeño árbol es de aproximadamente 2 millones de hectáreas. De este se aprovecha cerca del 90% con una

densidad de 1,11 a 1,23 g/cm<sup>3</sup>, una disponibilidad energética de 4654 kcal/kg y una humedad del 15% aproximadamente. De acuerdo con esta información, se podrían generar cerca de 13 MWt a partir de 35 toneladas de residuo (Energy, 2015).

Si bien, las políticas de desarrollo de Cuba están encaminadas a fomentar un esquema energético que permita la transformación del existente mediante la producción de energía más limpia, diversa y eficiente; aún existen problemas fundamentales como la alta dependencia de los combustibles importados, el elevado costo de la energía entregada y la baja utilización de fuentes renovables. Problemas asociados a la baja eficiencia de la generación térmica y a las altas pérdidas en las redes de distribución. Por esta razón, las biomásas como el bagazo de caña están incluidas dentro del plan de contribución a la generación de energía eléctrica, mediante el desarrollo e implementación de nuevas tecnologías como la gasificación que permitan tener una participación del 14% en la matriz energética nacional para el año 2030.

## **1.4 España: Biomasa residual y recurso solar**

España (nombre oficial: «Reino de España») es un país transcontinental situado en el suroeste de Europa y en el norte de África ocupando la mayor parte de la Península Ibérica. Está dividida en 17 comunidades y cuenta con dos ciudades autónomas, Ceuta y Melilla (Figura 1.5.A). El Instituto Nacional de Estadística estimó que el número de habitantes, al 1 de enero de 2014, era de 46 507 760. Del conjunto de la población estimada, 41 831 739 eran de nacionalidad española y 4 676 022 extranjeros, lo que representa un 10,05 %.

### **1.4.1 Recurso solar**

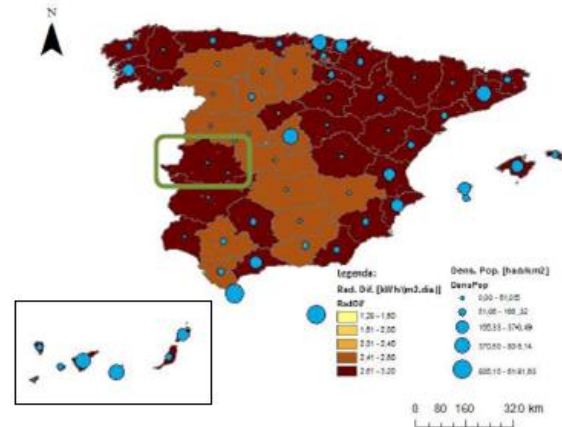
Para el estudio que se presenta a continuación, se tomó la división descrita en el párrafo anterior. Los datos de radiación solar difusa fueron tomados de los resultados obtenidos mediante simulación en el software METEONORM (Meteotest, 2015). En cuanto a la radiación directa y global, se tomó el valor de la media anual (registrada por un periodo de 22

años) para la capital de cada comunidad autónoma ( POWER: Prediction of Worldwide Energy Resource Project, 2015).

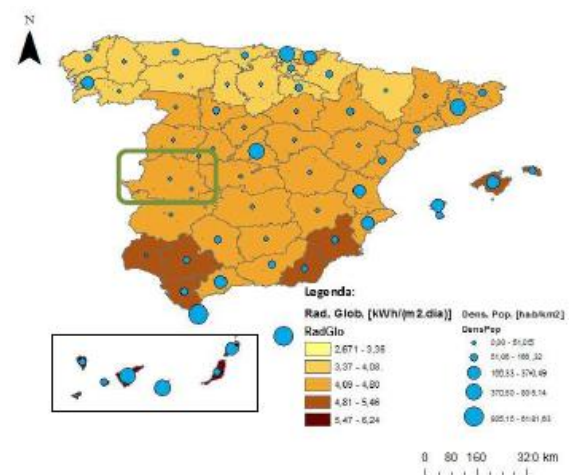
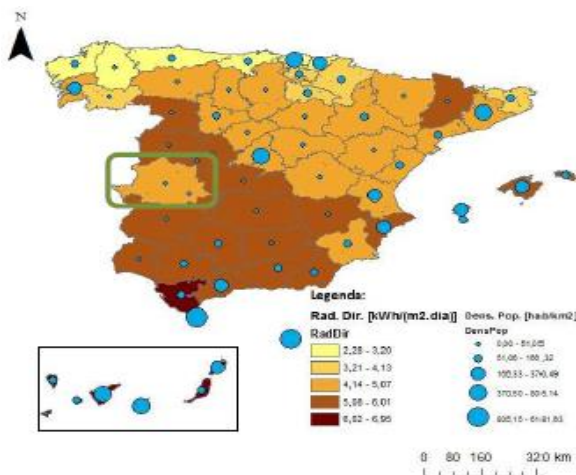
Dada su pequeña área, la ciudad de Melilla (6181,63 hab/km<sup>2</sup>), en el norte de África, es la parte española con mayor densidad poblacional, a esta le sigue Ceuta con 4241 hab/km<sup>2</sup>. En el continente europeo, la comunidad de Madrid es la más poblada con 805.41 hab/km<sup>2</sup>. La localidad de Soria, perteneciente a la provincia de Castilla y León, es la que presenta una menor densidad poblacional con 9,25 hab/km<sup>2</sup>. La variación de la radiación difusa en España se encuentra entre: los 2,46 kWh/m<sup>2</sup>.día en León (provincia de Castilla y León) y los 3,18 kWh/m<sup>2</sup>.día, en Coruña (Galicia) (Figura 1.5.B).



A) División política de España



B) Radiación difusa y población en España



**C) Radiación directa y población en  
España**

**D) Radiación global y población en  
España**

***Figura 1.5 Información sobre España: A) División política; B) Radiación difusa; C) Radiación directas y D) Radiación global***

Ahora bien, la radiación directa es más intensa en las Islas Canarias con 6,93 kWh/m<sup>2</sup>día, mientras que en Vizcaya se encuentran valores de radiación directa más bajos (del orden de 2,28 kWh/m<sup>2</sup>día) (Figura 1.5.C). La radiación global también es más elevada en las Islas Canarias (con un máximo de 6,19 kWh/m<sup>2</sup>día) y es menor en la localidad de Lugo, en Galicia (Figura 1.5.D).

Con la evaluación de los mapas presentados y la conjugación de los diferentes tipos de radiación solar y la densidad poblacional, se sugiere la hipótesis de considerar la provincia de Extremadura por sus elevados valores de radiación. Esta provincia ha sido beneficiada con la instalación de unidades de aprovechamiento de energía solar.

#### **1.4.2 Recurso biomasa**

De acuerdo con la base de datos Land Cover, desarrollada en el proyecto CORINE (Coordination of Information on the Environment), en España sobresalen por su abundancia, en casi todas las zonas del país, los cultivos herbáceo y los sistemas agroforestales. Sin embargo, en lo referente a los recursos agroforestales existentes en el país, la determinación de la cantidad de residuos disponible para las distintas superficies de cultivos y arboladas representa una cuestión de gran dificultad, puesto que hasta la fecha no se ha llevado a cabo una cuantificación de la cantidad generada en las operaciones y labores realizadas en cada uno de los montes y tierras agrícolas españolas. Esto se debe a que, en la mayoría de los casos, no se realiza ningún aprovechamiento de estos residuos, sino que simplemente se trituran y se abandonan en el suelo como abono orgánico (Marcos Martín, 2006).

En este apartado se propone que, por la capacidad de aprovechamiento energético en el empleo de la biomasa debido a su elevada producción o potencial de producción, se haga la clasificación en biomasa residual agrícola (herbácea y leñosa), biomasa residual forestal y

biomasa de cultivos energéticos (chopo). Para el análisis se tendrá en cuenta el factor de producción de biomasa residual (t/ha) y, luego se calculará la producción total de residuos a partir de toda la superficie cultivada de la especie en cuestión.

Como biomasa residual agrícola herbácea se ha considerado, para el presente estudio, la paja de cereal (trigo y cebada) y la tusa —corazón de la mazorca— de maíz y caña de girasol, dicha selección se justifica por la gran cantidad existente. En la Tabla 1-13 se pueden observar los factores de producción de la biomasa. Nótese el elevado factor de producción de maíz que destaca sobre los otros cereales, pues es aproximadamente dos veces mayor que estos; además, el poder calorífico inferior (PCI) es comparable entre las especies, lo que nos lleva a afirmar que puede ser más rentable obtener energía a partir de la tusa del maíz y la caña de girasol.

*Tabla 1-13 Cálculo de residuos producidos en España a partir la superficie cultivada y el factor de producción de biomasa*

<b>Cultivo</b>	<b>Factor de producción de biomasa, t/ha</b>	<b>Superficie del cultivo (ha)</b>	<b>Residuos (t)</b>	<b>PCI (MJ/kg)</b>
<b>Paja de trigo</b>	1,2	2 284 944	2 741 932	13,37
<b>Paja de cebada</b>	1,35	423 680	571 968	13,37
<b>Tusa de maíz</b>	2,73	763 989	2 085 689	12,54
<b>Caña de girasol</b>	1,8	2 844 915	512 0847	12,54

(Fundación Circe, 2006), (Alonso Mateos, 2004) y (ESYRCE, 2015).



Se debe agregar que, en España hay una elevada utilización de la paja de cereal para la cama y el forraje del ganado, así como para fábricas de pienso. Por otra parte, la disponibilidad de tusa de maíz y caña de girasol es mucho mayor, ya que aunque la tusa de maíz se puede utilizar directamente como cama de ganado sin necesidad de operaciones de acondicionamiento, desde el punto de vista de la alimentación del ganado, esta debe pasar por algún proceso de transformación, al menos físico. Por lo tanto, un ganadero valora más la paja de trigo o de cebada, pues ambas se pueden incorporar directamente a la alimentación de los animales sin ningún otro tipo de acondicionamiento.

Ahora bien, la biomasa residual agrícola de cultivos leñosos proviene de los restos de poda. El tratamiento a seguir puede ser el triturado, el apilado y la quema en el campo o, la recogida y posterior retirada para su aprovechamiento. Los agricultores han señalado que esta última es una alternativa para el ahorro de tiempo de trabajo y costos asociados al uso o contratación de maquinaria (picadora) y al consumo de combustible. Como biomasa residual agrícola de cultivos leñosos se han considerado los residuos de poda de la vid, el olivo y masas frutales, por ser los más representativos de España.

Teniendo en cuenta el factor de producción de biomasa residual (t/ha) se puede calcular la producción de residuos tomando la superficie total cultivada. En la Tabla 1-14 se muestran los datos de la superficie cultivada, las toneladas de residuos y la energía que estos producen (ESYRCE, 2015) (Rosúa & Pasadas, 2012).

**Tabla 1-14. Cálculo de residuos agrícolas leñosos producidos en España a partir de la superficie cultivada y el factor de producción de biomasa**

<b>Cultivo</b>	<b>Factor de producción de biomasa (t/ha)</b>	<b>Superficie cultivada (ha)</b>	<b>Residuos (t)</b>	<b>PCI (MJ/kg)</b>
<b>Viñedo</b>	3,5	967 733	1 451 600	15,03
<b>Olivar</b>	1,7	2 605 252	5 992 080	19,37

<b>Frutales</b>	2,3	1 344 277	3 091 837	17,20
-----------------	-----	-----------	-----------	-------

(Alonso Mateos, 2004), (ESYRCE, 2015) y (Rosúa & Pasadas, 2012).

Al respecto, es importante resaltar que la disponibilidad de biomasa residual agrícola leñosa es muy alta, pues existen pocas actividades que demanden su uso tales como, la calefacción individual (para la que se utilizan los restos de poda de ramas de mayor grosor) y el uso en asados o barbacoas (para las que se usan restos de sarmientos de vid). En el resto de los casos, la gestión de estos residuos supone una carga extra que no genera ningún valor añadido para el agricultor.

Las masas de caducifolias, pese a la dificultad que presentan a la hora de la obtención de los residuos de biomasa que en ellas se generan (principalmente por la realización de tratamientos severos en estas formaciones), se han de tener en cuenta por su enorme potencial y su abundancia en todo el territorio español. En la Tabla 1-15 se muestra información de los residuos de caducifolias en España. Nótese que la cantidad de desechos provenientes de las caducifolias sembradas en España sobrepasan los 7 millones de toneladas.

**Tabla 1-15. Información de Pináceas y Caducifolias**

<b>Residuo</b>	<b>Factor de producción de biomasa, t/ha</b>	<b>Superficie cultivada (ha)</b>	<b>Residuos (t)</b>	<b>PCI (KJ/kg)</b>
<b>Caducifolias</b>	1,3	5 462 426	7 101 154	12,69

(ESYRCE, 2015), (Domínguez Bravo, Ciria, Esteban, David, & Lasry, 2003) y (Alonso Mateos, 2004).

Las especies de crecimiento rápido con alta densidad de plantación son idóneas como cultivos energéticos, sometiéndolas a podas intensivas y cosechando su producción en ciclos cortos, generalmente menores a cinco años. Las especies forestales más adecuadas para cultivos energéticos son: eucalipto, sauce, chopo y cardo. Esta investigación hace énfasis en el chopo (*Populus*) y el cardo (*Asteraceae*) por su adaptabilidad climática en España.

El chopo, como especie frugal, se adapta muy bien a todo tipo de suelos, excepto a los que son marcadamente arcillosos, ácidos o salinos. En cuanto a la vegetación, se produce muy bien en terrenos sueltos (arenosos), con el único condicionante de un riego periódico. La preferencia edáfica pasa por suelos de textura franca, franca-arenosa o franca-limosa. El chopo no se considera una especie exigente en nutrientes y, gracias a esto, puede encontrarse en suelos de regadío que son pobres para el cultivo agrícola, aunque no cabe duda de que un suelo fértil favorece su desarrollo.

Por otro lado, el cardo tiene unas excelentes condiciones de producción y adaptabilidad a la gran mayoría de los secanos españoles. Es una especie herbácea vivaz (perenne) próxima a la alcachofa y, al igual que el girasol, pertenece a la familia de las compuestas. Tiene un ciclo anual de producción de biomasa aérea muy bien adaptada a las condiciones del clima mediterráneo de veranos secos y calurosos. Su cultivo puede llegar a producir de 15 a 20 toneladas de materia seca por hectárea y año. Es decir, de tres a cinco veces lo que producen los cultivos de cereales de la meseta castellana, como son el trigo, la cebada, la avena, el centeno, etc.

La consideración del estudio del cardo, dentro de este proyecto, responde a su potencial como cultivo energético. Si bien es cierto que su actual producción en España no es muy elevada, recientes investigaciones (Fernández, Curt, & Aguado, 2006) muestran su viabilidad tanto agronómica, como energética para actuar como biocombustible. Dicha situación se debe al enorme potencial de producción de biomasa por hectárea que proporciona esta especie. Según estudios de la Universidad Politécnica de Madrid y el IDAE, el cardo puede llegar a alcanzar rendimientos medios de 16,93 t/ha de biomasa (Tabla 1-16).

*Tabla 1-16. Materias primas seleccionadas*

Grupo de biomasa	Residuo de biomasa	Procedencia
<b>Biomasa residual agrícola</b>	Tusa de maíz	Provincia de Zamora
	Caña de girasol	Provincia de Zamora

<b>Biomasa residual forestal</b>	Pino resinero ( <i>Pinus pinaster</i> )	Provincia de Soria
	Pino silvestre ( <i>Pinus sylvestris</i> )	Provincia de Soria
<b>Biomasa de cultivos energéticos</b>	Chopo	Provincia de Palencia
	Cardo	Provincia de Soria

Finalmente, se ha considerado interesante seleccionar dos especies representativas de la biomasa residual agrícola herbácea y la biomasa residual forestal, además de dos representantes de los cultivos energéticos. Lo anterior se debe al factor de producción de biomasa residual, la extensión de los cultivos, la energía que aportan y la disponibilidad de los recursos para evaluar estos residuos de biomasa en el laboratorio (Tabla 1-16).

## 1.5 Recurso solar de Portugal

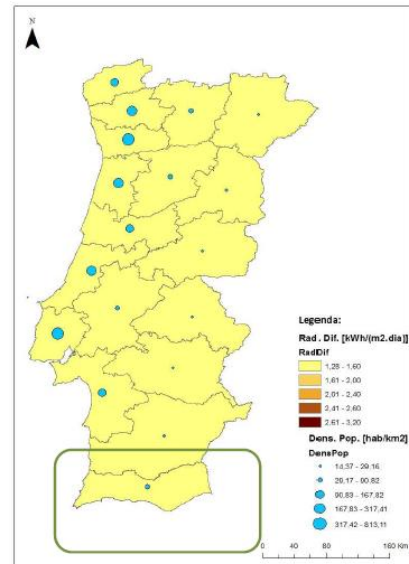
Portugal está formado por un territorio continental de 91 951 km<sup>2</sup> situado en el suroeste de Europa. El país ocupa una gran parte de la costa atlántica de la Península Ibérica y dos archipiélagos situados en el océano Atlántico: Madeira y Azores. Las principales divisiones administrativas de Portugal son sus 18 distritos continentales y sus dos regiones autónomas (Azores y Madeira). Estos, a su vez, se subdividen en 308 concelhos o municipios. Dichos municipios se dividen en 4260 freguesías. La densidad poblacional portuguesa varía entre los 14,37 hab/m<sup>2</sup>, en el distrito de Castelo Branca (en el interior del país), y 813,11 hab/km<sup>2</sup> en la capital de Lisboa (Figura 1.6.A).

De esta manera, se tiene que la radiación difusa varía entre 1,28 kWh/m<sup>2</sup>.día en Viana do Castelo (norte) y 1,5 kWh/m<sup>2</sup>.día en el distrito de Leiria (centro). En cuanto a la radiación directa en Portugal continental, esta se encuentra comprendida entre 5,03 kWh/m<sup>2</sup>.día en el distrito de Vila Real y los 6,41 kWh/m<sup>2</sup>.día en el distrito de Viana do Castelo. La radiación

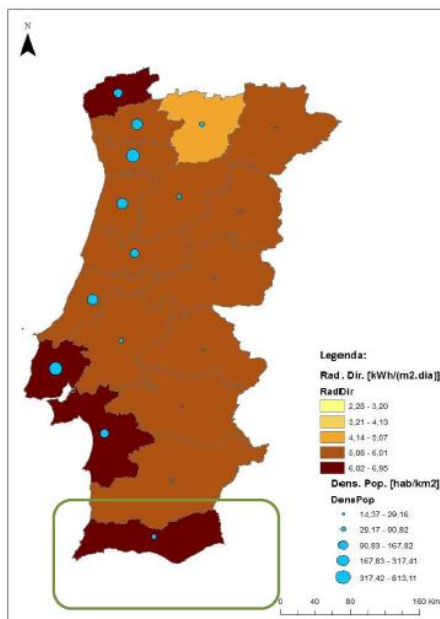
global varía entre los 4,19 kWh/m<sup>2</sup>.día obtenidos en Villa real y los 4,88 kWh/m<sup>2</sup>.día en el distrito de Faro, al sur del país (Figura 1.6).



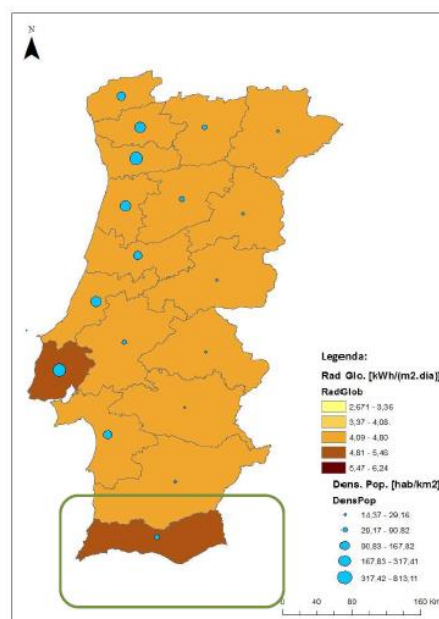
A) División política de Portugal



B) Radiación difusa y población en Portugal



C) Radiación directa y población en Portugal



D) Radiación global y población en Portugal

***Figura 1.6 Información sobre Portugal: A) División política; B) Radiación difusa; C) Radiación directas y D) Radiación global***

En resumen, la región de Alentejana presenta los valores de radiación significativamente elevados y, adicionalmente, cuenta con una baja densidad poblacional.

## **1.6 Apunte Final**

Cada país dispone de energía solar que puede ser aprovechada para generar energía eléctrica, tanto de manera directa, mediante celdas fotovoltaicas, como de manera indirecta, mediante el calentamiento térmico de una sustancia de trabajo y, posteriormente, del uso de ciclos termodinámicos. En este sentido, los ciclos Rankine con fluidos orgánicos (ciclos ORC) pueden ser la tecnología apropiada para la generación de energía eléctrica, la cual puede ser utilizada en: alumbrado público, uso domiciliario, potabilización del agua y congelamiento de recursos naturales, como el pescado, en zonas aislada y de poca población.

En cuanto a la biomasa de origen agroindustrial, es posible afirmar que países como Chile y España disponen de residuos de cultivos de cereales aptos para ser tratados en procesos de pirólisis, combustión y gasificación. Del mismo modo, países como Colombia y Cuba poseen importantes residuos procedentes de la economía de los cultivos del arroz y de la caña de azúcar, residuos que pueden ser utilizados como precursores de muchos procesos termoquímicos e incluso para la obtención de químicos, fertilizantes, combustibles líquidos, etc.

## 2 PIRÓLISIS

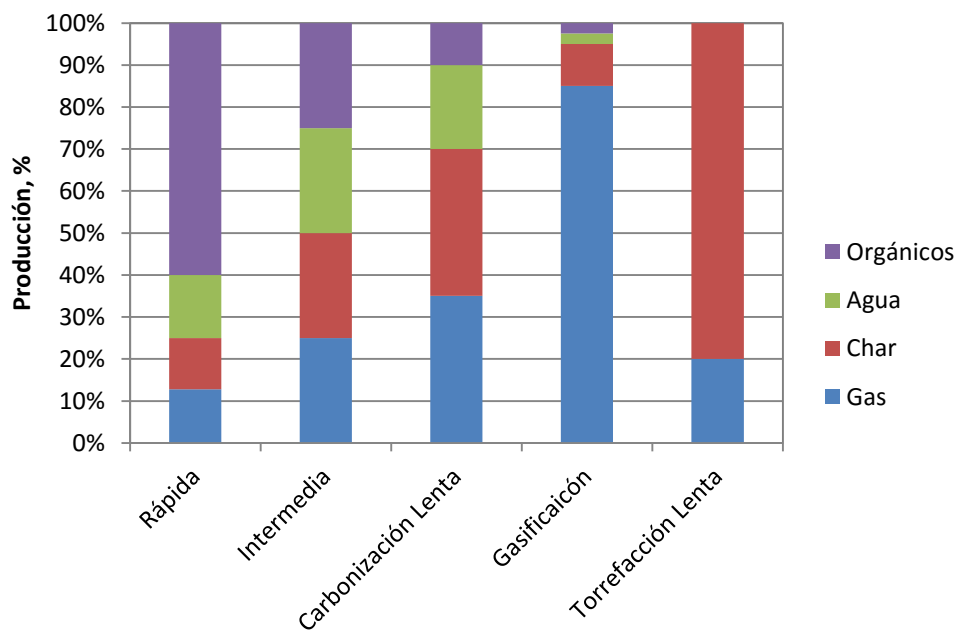
La pirólisis es un proceso de descomposición térmica que se produce en ausencia de oxígeno. En función de las condiciones de operación con las que se trabaja durante la pirólisis se obtienen distintas fracciones de gas, char y tar. Cuando se opera a bajas temperaturas y a tiempos de permanencia elevados, se favorece la producción de la fracción sólida (char), mientras que si se trabaja a altas temperaturas y elevados tiempos de permanencia, aumenta la producción de gas. Por último, a temperaturas moderadas y tiempos de permanencia cortos, se aumenta la producción de líquidos.

Como se ha expresado con anterioridad, en el proceso de pirólisis siempre se obtiene como resultado tres productos, pero las proporciones pueden variar en un amplio rango en función del ajuste de los parámetros del proceso. En la Tabla 2-1 y la Figura 2.1 se presenta la distribución de los productos obtenidos a partir de los diferentes tipos de pirólisis, lo que demuestra la gran variabilidad según las condiciones cambiantes del proceso.

*Tabla 2-1 Rendimientos típicos en peso del producto (base seca) obtenidos por los diferentes modos de pirólisis de madera (Bridgwater, 2011).*

TIPO	CONDICIONES	LIQUIDO	SÓLIDO	GAS
<b>Rápido</b>	500 °C, tiempo de permanencia corto (1 s)	75%	12% char	13%
<b>Intermedio</b>	500 °C, 10-30s tiempo de permanencia	50% en dos fases	25% char	25%
<b>Carbonización (lenta)</b>	400 °C, tiempo de permanencia largo (horas o días)	30%	35% char	35%

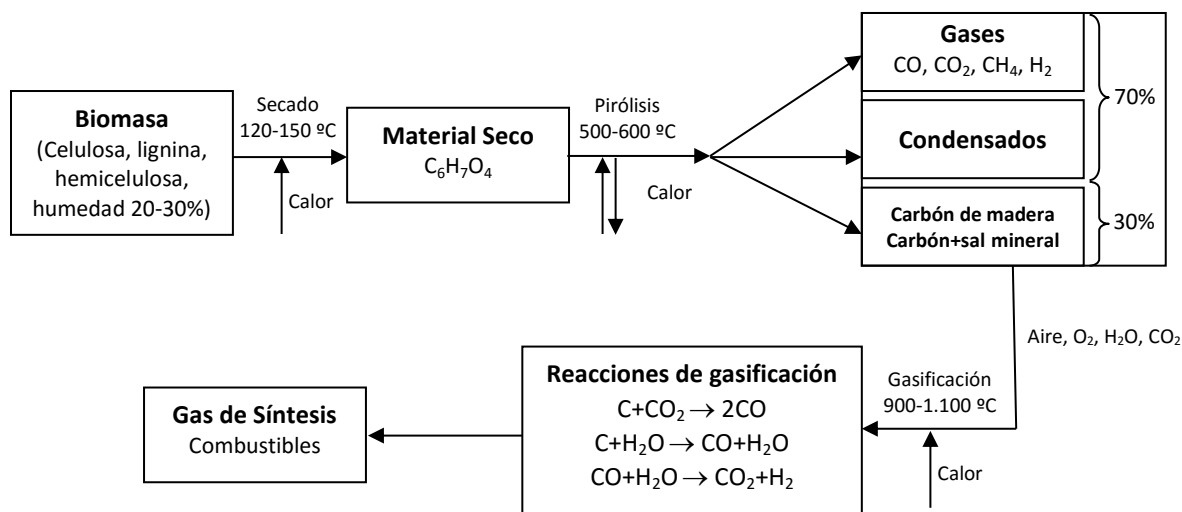
<b>Gasificación</b>	750-900 °C	5%	10% char	85%
<b>Torrefacción (lenta)</b>	290 °C 10-60 min tiempo de permanencia	0% si no condensa, hasta un 5% si condensa	80% sólido	20%



**Figura 2.1 Espectro de los productos de los procesos de pirólisis y el resto de procesos termoquímicos (Bridgwater, 2011).**

En relación con el proceso de gasificación, se produce una etapa inicial de pirólisis que transcurre a altas temperaturas y a altas velocidades de calentamiento, por lo que este tipo de pirólisis se encuadraría en lo que se define como pirólisis rápida o intermedia (ver Figura 2.2).





**Figura 2.2 Diagrama de flujo de gasificación ( Ramírez Rubio, Sierra, & Guerrero, 2011).**

Por lo que se refiere a la pirólisis rápida, la biomasa se descompone rápidamente para generar, principalmente, vapores, aerosoles y algo de char y gas. Tras un proceso de refrigeración y condensación del gas, se obtiene un líquido homogéneo de color marrón oscuro, el cual tiene un poder calorífico de aproximadamente la mitad del combustible convencional. En la mayor parte de las biomazas este tipo de pirólisis produce una cantidad elevada de líquido y una escasa producción de cenizas. Otras características típicas de dicho proceso son:

- La necesidad de aportar gran cantidad de calor para que se desarrolle el proceso.
- Los cortos tiempos de permanencia, por lo general inferiores a 2s, para minimizar las reacciones secundarias.
- La rápida eliminación de char para minimizar el craqueo.

Dado que la pirólisis rápida se produce en unos pocos segundos, tanto los procesos de transferencia de masa, los fenómenos de transición de fase, como la cinética de la reacción química, juegan un papel muy importante. La cuestión fundamental es llevar a las partículas

de biomasa reaccionantes a la temperatura óptima del proceso y reducir al mínimo su exposición a las temperaturas más bajas que favorecen la formación de char. Este objetivo se puede lograr mediante el uso de pequeñas partículas, como es el caso de los procesos de lecho fluidizado.

## **2.1 Influencia de las variables de operación en la distribución del producto de pirólisis**

Resulta primordial conocer qué variables de operación ejercerán influencia a lo largo del proceso de pirólisis, evaluando su importancia tanto de forma cualitativa como cuantitativa. A priori y según los estudios realizados (Heo, y otros, 2010), (Pattiya, 2011), (Luo, Wang, Liao, Zhou, Gu, & Cen, 2004), las variables de operación que tienen mayor efecto en el producto final de pirólisis son: la temperatura de operación, la velocidad de calentamiento del reactor de pirólisis, el tamaño de la partícula de la biomasa utilizada y el caudal de gas inerte.

### **2.1.1 Temperatura de operación**

La temperatura de operación es el parámetro que más afecta al rendimiento de los productos de pirólisis. En experimentos llevados a cabo en reactores de lecho fluidizado a escala de laboratorio, se ha llegado a la conclusión de que el aumento de la temperatura provoca una disminución de los rendimientos de char y un aumento del rendimiento de gas. La reducción que se produce en el rendimiento de char, al aumentar la temperatura, puede deberse a una descomposición primaria de la biomasa a altas temperaturas o a una descomposición térmica secundaria del char formado antes de ser arrastrado fuera de la zona de reacción. El aumento del rendimiento de gas al aumentar la temperatura se debe, posiblemente, a una combinación de craqueo térmico secundario de los vapores de pirólisis y a la descomposición secundaria del char.

Con respecto al rendimiento de la fracción líquida, el aumento de la temperatura provoca un ligero aumento de los rendimientos hasta alcanzar un máximo, a partir del cual, un aumento de la temperatura provoca una disminución de los rendimientos. Esta temperatura de

rendimiento máximo de bioaceite depende del tipo de biomasa utilizada. Además, es importante señalar que la producción de agua de la reacción disminuye con el aumento de la temperatura, lo que indica que las reacciones de deshidratación que tienen lugar durante la pirólisis rápida son mayores a menor temperatura.

Los productos gaseosos contienen dióxido de carbono y monóxido de carbono con pequeñas cantidades de hidrógeno y gases de hidrocarburos  $C_1$ - $C_3$ . La mayoría de los gases identificados aumentan su producción a medida que aumenta la temperatura (excepto el hidrógeno y el propano). Un aumento de la temperatura de pirólisis lleva a una disminución de la proporción de  $CO_2$  y un aumento en la proporción de  $CO$ . Esto se debe principalmente a que la mayor parte del  $CO_2$  se genera al liberar carboxilo a una temperatura relativamente baja (Luo, Wang, Liao, Zhou, Gu, & Cen, 2004). Además, el craqueo térmico secundario de los vapores de pirólisis produce  $CO$  y gases de hidrocarburos en vez de  $CO_2$  (Boroson, Howard, Longwell, & Peters, 1989).

Estos resultados se corresponden con estudios previos (Asadullah, y otros, 2007), (Beis, Onay, & Kockar, 2002), (Horne & Williams, 1996), (Lee, Kang, Park, & Kim, 2005), (Luo, Wang, Liao, Zhou, Gu, & Cen, 2004), (Sensoz, Demiral, & Ferdi Gecel, Olive bagasse (Olea europea L.) pyrolysis, 2006), (Sensoz & Can, Effect of pyrolysis temperature and heating rate on the product yields, 2002) y (Tsai, Lee, & Chang, 2007).

### **2.1.2 Velocidad de calentamiento del reactor de pirólisis**

Las variaciones en las velocidades de calentamiento no implican un efecto demasiado característico. El rendimiento de biochar disminuye al aumentar tanto la velocidad de calentamiento, como la temperatura de pirólisis. El rápido calentamiento conduce a una rápida despolimerización del material sólido a volátiles primarios, mientras que a bajas velocidades de calentamiento, la deshidratación a anhidrocelulosa más estable es limitada y muy lenta (Demirbas, 2004) y (Zanzi, Sjöström, & Björnbom, 2002). Este fenómeno podría deberse a una mayor descomposición primaria de la biomasa a temperaturas más altas o la descomposición de los residuos secundarios de char (Horne & Williams, 1996). En el caso del

bioaceite, el aumento de la velocidad de calentamiento provoca un aumento en el rendimiento de los productos líquidos, debido al calor y a la reducción de las limitaciones de transferencia de masa.

### **2.1.3 Tamaño de la partícula de la biomasa utilizada**

El tamaño de partícula puede ser una variable importante que afecta la velocidad del proceso. Por lo tanto, se espera que el aumento de tamaño de partícula provoque gradientes de temperatura dentro de esta, con lo que, en un momento dado, la temperatura central sería menor que en la superficie. Lo anterior probablemente dé lugar a un aumento en el rendimiento del sólido y una disminución de líquidos y gases (Beaumont & Schwob, 1984) y (Chan, Kelbon, & Krieger-Brockett, 1988). Sin embargo, se ha comprobado experimentalmente (Encinar, Beltrán, Ramiro, & González, 1998) que el tamaño de partícula no tiene ninguna influencia sobre los rendimientos de las fracciones obtenidas como producto. Como consecuencia de ello, con las partículas con un diámetro de hasta 2 mm, no hay gradiente de temperatura que dé lugar a limitaciones de transferencia de calor. Estos resultados coinciden con otros previamente publicados (Chan, Kelbon, & Krieger-Brockett, 1988), según los cuales el tamaño de partícula inferior a 5 mm no ejerce ninguna influencia sobre la velocidad del proceso.

### **2.1.4 Caudal de gas inerte**

Según lo expuesto en algunas publicaciones (El. Harfi, Mokhlisse, & Ben Chanâa, 1999) y (Senoz, Angin, & Yorgun, 2000), el gas inerte elimina los volátiles del medio de pirólisis. Por consiguiente, las reacciones secundarias como el craqueo térmico, la re-polimerización y la re-condensación se mantienen al mínimo, mientras que el rendimiento de líquido es máximo. El corto tiempo de permanencia de los volátiles en el reactor, así como el aumento del flujo de gas inerte, provocan una descomposición secundaria relativamente menor a los productos de mayor peso molecular (Miao, Wu, & Yang, 2004), (Zanzi, Sjöström, & Björnbom, 2002), (Zhongyang, Shurong, Yanfen, Jinsong, Yueling, & Kefa, 2004) y (Piskorz, Majerski, Radlein, Scott, & Bridgwater, 1998).

### 2.1.5 Influencia de las cenizas

El tipo de biomasa juega un papel determinante en los resultados de la pirólisis. De hecho, la ceniza tiene un mayor efecto en la pirólisis de la biomasa, que el grado de cristalinidad y la polimerización (Antal & Varhegyi, 1995). Algunos elementos de las cenizas pueden catalizar el comportamiento de la pirólisis y cambiar la distribución de productos (Richards & Zheng, 1991). Además de esto, la biomasa con la ceniza retirada podrá producir más bioaceite y menos gas (Raveendran, Ganesh, & Khilar, 1995). De otro lado, la ceniza no tiene ningún efecto aparente en la pérdida de peso, porque las cenizas de biomasa no volatilizan ni se descomponen cuando la temperatura es inferior a 650 °C.

Williams y Horne (1994) llevaron a cabo pruebas para determinar la influencia que, sobre los productos de pirólisis, muestran los metales típicos presentes en las cenizas. Las pruebas se llevaron a cabo en un reactor discontinuo de lecho fijo de 200 cm<sup>3</sup> de acero inoxidable, calentado por un horno eléctrico y con un caudal fijo de nitrógeno como gas portador. Como biomasa se utilizó celulosa, se añadió sal de metal para disminuir el porcentaje de masa del líquido y aumentar el porcentaje de char. Dado lo anterior, se observa que para el Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, el NiCl<sub>2</sub> y NaCl el porcentaje de gas de pirólisis aumenta, respecto al porcentaje de gas obtenido con la celulosa original.

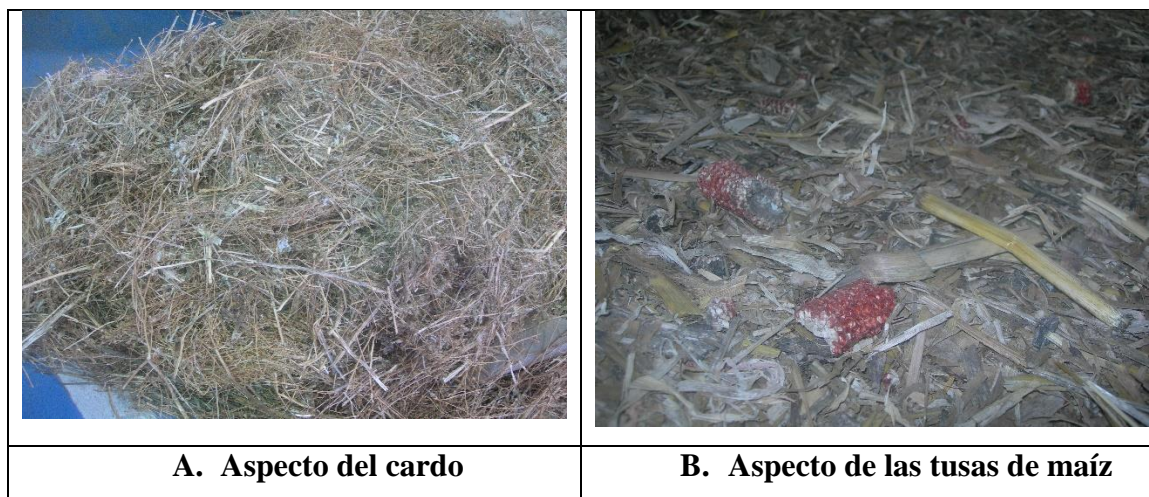
Adicionalmente, los gases desprendidos en relación con la sal de metal añadido pueden ser agrupados en dos, por un lado, CuSO<sub>4</sub>, NaCl y FeSO<sub>4</sub> y por el otro, ZnCl<sub>2</sub>, NiCl<sub>2</sub> y Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Por ejemplo, la celulosa sin sal añadida produjo la menor concentración de hidrógeno y la adición de todas las sales del metal produjo un aumento en la cantidad de hidrógeno. Para CuSO<sub>4</sub>, NaCl y FeSO<sub>4</sub> el aumento fue inferior al 10%, sin embargo, para ZnCl<sub>2</sub>, NiCl<sub>2</sub> y el Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> el aumento fue de más del 100% en comparación con la pirólisis de la celulosa sin el añadido de sales metálicas. Asimismo, la producción total de los hidrocarburos, el hidrógeno y monóxido de carbono más dióxido de carbono fueron más bajos en presencia de CuSO<sub>4</sub>, NaCl y FeSO<sub>4</sub> y mayor en presencia de ZnCl<sub>2</sub>, NiCl<sub>2</sub> y Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>.

### 2.1.6 Efecto del tiempo de permanencia

Se ha comprobado el efecto del caudal de alimentación de biomasa en el rendimiento del producto. Según Heo et al (2010), al descender el flujo másico de biomasa de 2,5 a 1,5 g/min, se produce una baja del 3% (w/w) del bioaceite, mientras que el rendimiento del char no se ve afectado; este resultado se puede interpretar como el efecto del tiempo de permanencia. La reducción del volumen de los vapores de la pirólisis, debido al descenso del flujo másico, aumenta el tiempo de permanencia de los vapores en el reactor, lo que provoca más reacciones en fase de vapor de los compuestos condensables produciendo moléculas más ligeras de gas.

## 2.2 Metodología de experimentación

Las materias primas utilizadas en las pruebas de pirólisis han sido previamente acondicionadas para su utilización en la planta piloto de CARTIF. Dichas materias son: cardo (*Asteraceae*), procedente de Alcalá de Henares; chopo (*Populus*), procedente de la provincia de Zamora y tusa -corazón de la mazorca de maíz-, procedente de la Comunidad Autónoma de Aragón. En la Figura 2.3 se muestran el cardo y las tusas empleadas en las pruebas realizadas.



**Figura 2.3 Cardo y tusas empleados en las pruebas de pirólisis**

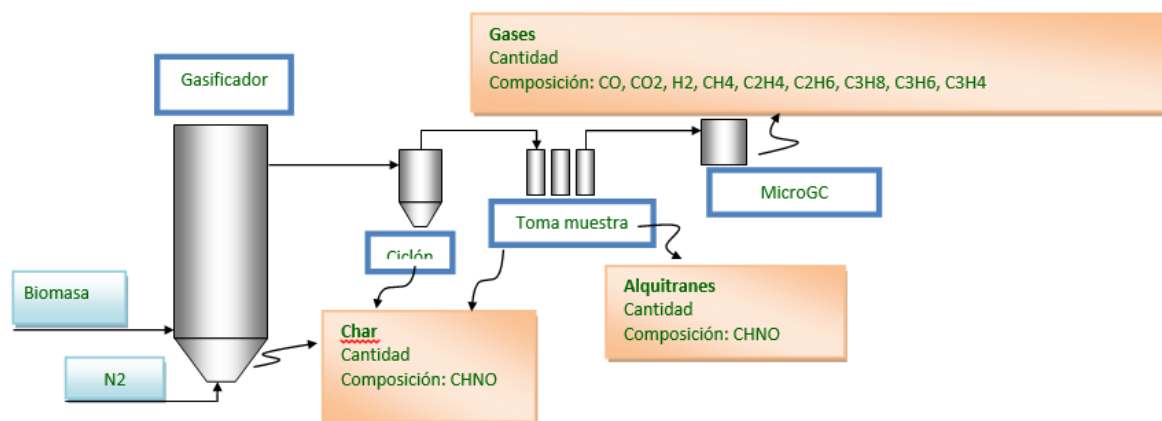
El pretratamiento realizado consistió en la trituración y molienda de las materias primas hasta un tamaño de 5 mm. Para el caso del cardo y las tusas, fue necesario astillarlos en una primera fase de pre-tratamiento y, posteriormente, triturarlos hasta un tamaño de 5 mm. Los equipos empleados en la reducción de tamaño fueron, en el astillado, una biotrituradora de martillos (Figura 2.4.A), marca HERKULES modelo 4000 PROFI, con un motor de potencia de 3,7 kW; y en el caso de la trituración, un molino de cuchillas marca EUROTECNO con una potencia de 4 kW y con un tamiz incorporado de luz 5 mm. En la Figura 2.4.B se observa el aspecto del cardo y el chopo (C) tras el proceso de triturado. Cuando el chopo estaba astillado, únicamente fue necesario triturarlo en el molino marca EUROTECNO, utilizado también en el proceso de la tusa.



**Figura 2.4 Máquina trituradora, aspecto del cardo y del chopo después de ser triturados**

De esta manera, se obtuvieron las materias primas con una granulometría inferior a 5 mm. Respecto a la humedad de las materias primas, no fue necesario realizar ningún tipo de pretratamiento de estas, ya que presentaban una humedad entre 8 y 15%. Tras la fase de acondicionamiento se obtuvieron las materias primas con un  $\phi < 5$  mm que posteriormente fueron utilizadas en las pruebas de pirólisis.

El dispositivo experimental utilizado para el desarrollo de las pruebas de pirólisis es la planta piloto de lecho fluidizado burbujeante que puede apreciarse en la Figura 2.5, en esta la separación de sólidos de la corriente de productos es realizada usando un ciclón, un banco de limpieza para la toma de muestras gaseosas y análisis de alquitranes. Dicha planta se encuentra ubicada en las instalaciones del Centro Tecnológico CARTIF (España).



*Figura 2.5 Diagrama de proceso de pirólisis de biomasa y análisis de datos*

Cada experimento se inicia haciendo fluir nitrógeno, con un caudal aproximado de 8 NL/min, con el objetivo de desplazar el aire que estuviese contenido en el interior del sistema y, al mismo tiempo, facilitar la fluidización del lecho de arena que se encontraba situado en el interior del reactor. A continuación, se procedía con el calentamiento del reactor mediante el empleo de resistencias eléctricas, hasta que se alcanzaba la temperatura de operación deseada; cuando esto ocurría, se procedía a la dosificación continua de la biomasa mediante el empleo de un tornillo sinfín. El caudal empleado fue de 1 kg/h.

Una vez que las partículas de biomasa penetraban en el interior del reactor de lecho fluidizado, el calor era transferido del medio de fluidización caliente a las partículas de biomasa, principalmente por conducción y convección, de esta manera se producía la degradación térmica de la biomasa. En el proceso se obtenían tres productos principales: tar o biooil constituido por vapores condensables y agua; gases no condensables y char como residuo sólido.



Una vez estos productos salían del reactor, se hacían pasar por un ciclón donde se separaba el sólido, recogiendo del fondo del ciclón. Posteriormente, la corriente gaseosa se enfriaba en un intercambiador de calor de carcasa y tubos que utilizaba agua como agente refrigerante. Los alquitranes, ya condensados, se almacenaban en un depósito a la salida del intercambiador de calor. Tras esto, se procedía al lavado y purificación de la corriente gaseosa mediante un sistema de lavado. Para finalizar el proceso, parte del gas se bombeaba a un cromatógrafo de gases (MGC) para el análisis de su composición.

En cada prueba se determinó la composición de los siguientes gases:  $H_2$ ,  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_6$  y  $C_3H_8$ ; en la corriente de gas de salida. Además, tanto el char como el tar obtenidos se caracterizaron mediante un análisis elemental, inmediato y calorífico.

Para el estudio de la influencia de las variables en el proceso de pirólisis, se realizó un diseño de experimentos que permitió definir las pruebas a realizar. De ahí que, una vez analizado el proceso, se identificaron las variables de operación o factores que afectaban de manera significativa y, se determinaron los niveles necesarios para cada una de las variables.

### 2.2.1 Variables de operación

Las variables de operación fueron: tipo de biomasa: tusa, cardo y chopo; temperatura de operación: 500 °C, 600 °C y 700 °C; y el tiempo de permanencia del gas en el reactor: 5s, 7s y 10s. Estos tiempos de permanencia fueron calculados según la velocidad superficial (U) de la arena de tamaño A2 para cada una de las temperaturas de operación. Dicha velocidad se corresponde con los valores de 2, 3 y 4 veces la velocidad mínima de fluidización; la cual fue determinada con base en la velocidad media entre la temperatura de operación y la temperatura a la entrada del reactor (100 °C).

Para conocer los caudales de agente inerte, se determinó la velocidad superficial (U) para cada una de las temperaturas de operación (500, 600 y 700 °C) y para la arena de diámetro de partícula media A2 (300  $\mu$ m). Una vez determinada la velocidad superficial, se calculó el caudal de agente inerte para cada uno de las condiciones de operación, según la ecuación:

$$Q_{N_2} = \left(\frac{\pi}{4} \cdot D^2\right) \cdot u \quad (2-1)$$

Donde:  $Q_{N_2}$  = Caudal de agente fluidizante;  $D$  = Diámetro del reactor (0,1 m) y  $u$  = Velocidad superficial. Conocido el caudal de agente fluidizante y el volumen del reactor, se determinó el tiempo de permanencia del gas en el interior del reactor. Para ello, se utilizó la ecuación (2-2):

$$\tau_p = \frac{V_{reactor}}{Q_{N_2}} \quad (2-2)$$

Donde:  $\tau_p$  = Tiempo de permanencia de los gases en el reactor;  $Q_{N_2}$  = Caudal de agente fluidizante y  $V_{reactor}$  = Volumen del reactor.

Así pues, al ser un reactor cilíndrico, el volumen de este se calculó en función de su diámetro (0,1 m) y su altura (1 m). Sin embargo, otro parámetro a tener en cuenta es la altura del lecho fijo en el interior del reactor (0,4 m). Con base en estas dos alturas se pueden definir dos tiempos de permanencia, uno relacionado con la altura del reactor y el otro relacionado con la altura del lecho fijo.

### 2.3 Resultados Experimentales

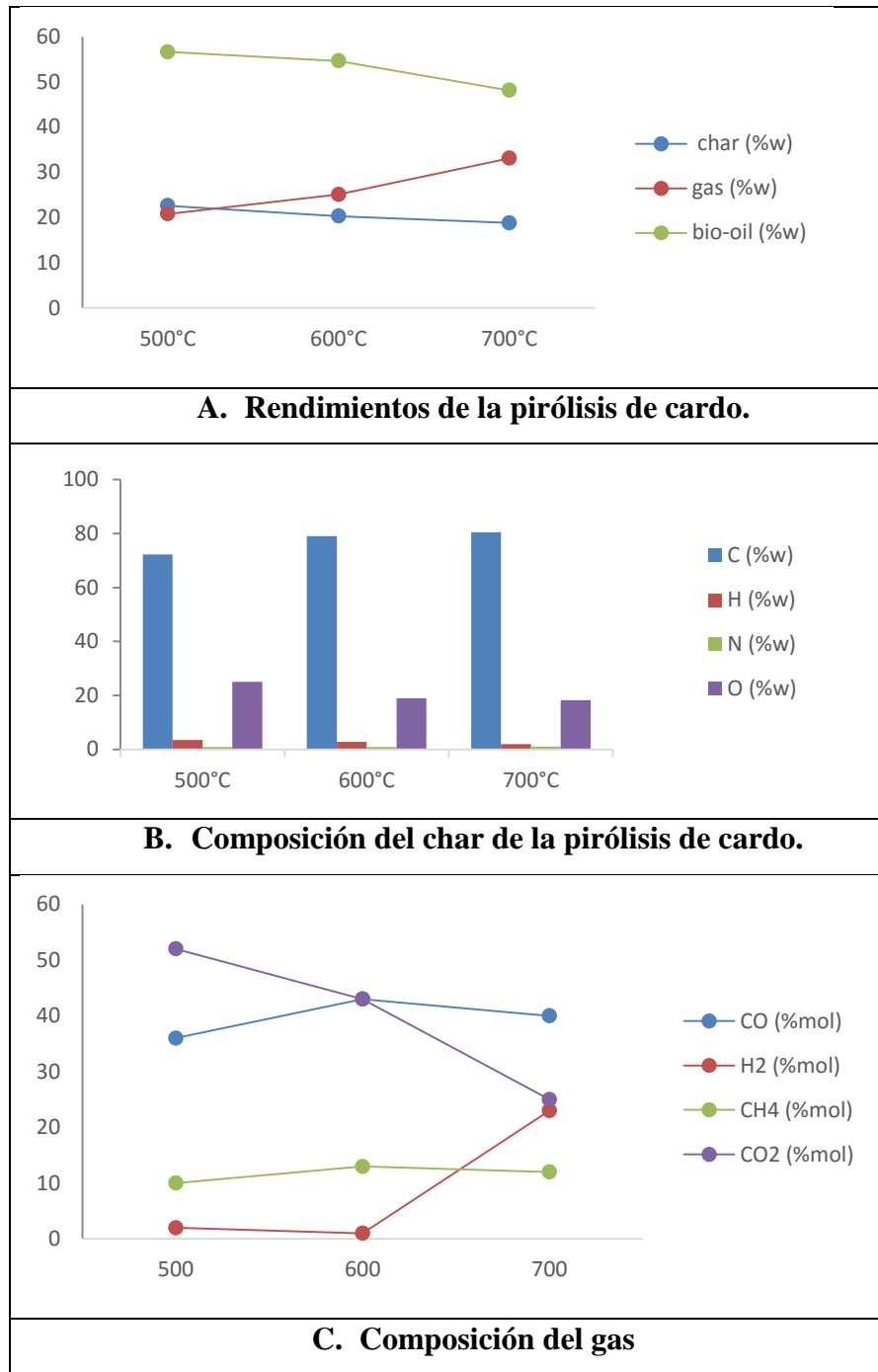
Para cada nivel de temperatura de operación y caudal de gas inerte se ha obtenido el rendimiento (expresado en %) de las tres fracciones alcanzadas en el proceso de pirólisis (char, gas y bioaceite). Además, se ha obtenido la composición de los gases de salida (expresada en % mol) y el análisis elemental de la composición del char (expresada en % en peso). En lo que respecta al bioaceite, se ha determinado su poder calorífico y su composición elemental en función de la temperatura. Los análisis que se muestran a continuación se corresponden con las experiencias realizadas modificando la temperatura, ya que para las correspondientes a la variación del tiempo de permanencia no se observaron diferencias significativas.

### 2.3.1 Cardo

Los rendimientos de cada uno de los productos (char, gas y bioaceite) fueron determinados bajo las condiciones de operación (temperaturas de 500 °C, 600 °C y 700 °C y tiempos de permanencia de 5s, 7s y 10s). Como se puede observar en la Figura 2.6, es característico para las biomásas, como el cardo, que la fracción más importante corresponda al bioaceite. Se observó que la distribución de productos para este caso es poco sensible al tiempo de permanencia dentro del reactor.

Los gases obtenidos después de la pirólisis están enriquecidos con monóxido de carbono y, en 700 °C, se observó que la participación de hidrógeno se incrementa hasta valores cercanos al 20% con una participación del 10% de metano; lo cual hace que este sea un gas combustible para ser utilizado en el propio proceso de pirólisis o en otros.

Otro aspecto que se observa cuando se realizan los procesos de pirólisis está relacionado con la obtención del char, el cual puede ser considerado como otro combustible sólido, dado que posee un alto contenido de carbón y bajo contenido de oxígeno. De esta manera, la pirólisis es una práctica recomendable para el aprovechamiento de los residuos agroindustriales.



*Figura 2.6 Rendimientos y composición del char y gas obtenidos después de la pirólisis para un tiempo de permanencia de los gases en el reactor de 10s*

La composición del bioaceite obtenido de la pirólisis del cardo se puede observar en la Tabla 2-2. Allí se aprecia un combustible líquido con un alto porcentaje de carbono e

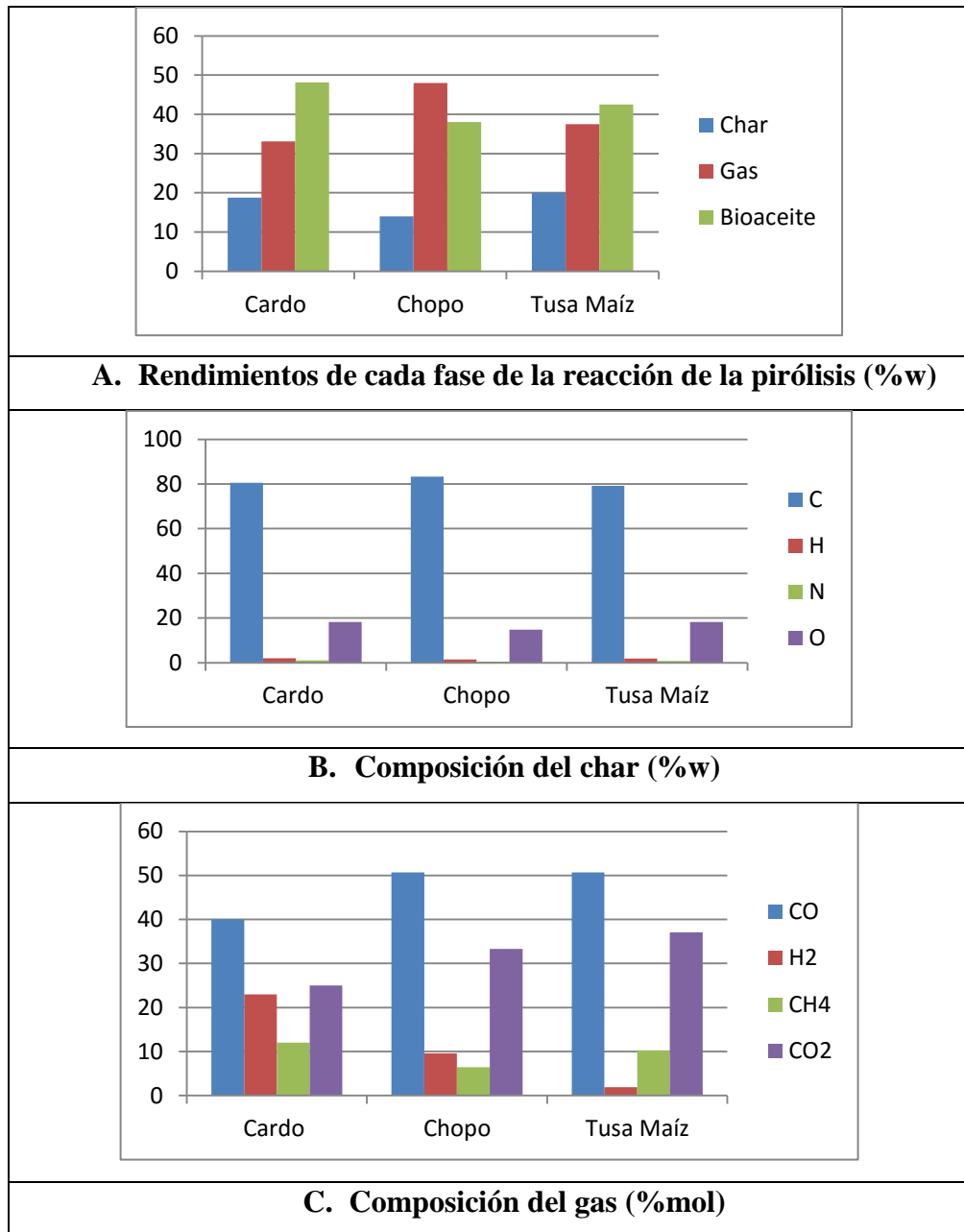
hidrógeno similar a los hidrocarburos convencionales. No obstante, el alto porcentaje de oxígeno indica la presencia de compuestos oxigenados o de agua que hace necesario un proceso posterior de refinación.

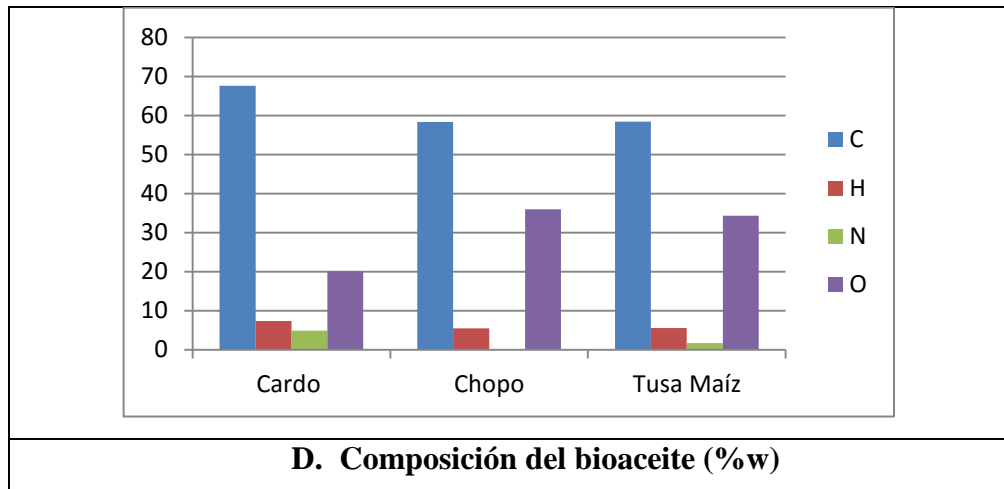
**Tabla 2-2. Análisis elemental y poder calorífico del bioaceite obtenido de la pirólisis del cardo, en función de la temperatura**

Temperatura (°C)		500	600	700
<b>Composición bioaceite</b>	<b>C</b> (%w)	61,8	63,4	67,6
	<b>H</b> (%w)	7,7	8,2	7,4
	<b>N</b> (%w)	3,3	4,5	4,9
	<b>O</b> (%w)	27,2	23,9	20,1
<b>Poder calorífico</b> (MJ/kg)		36,8	36,8	36,4

### 2.3.2 Resultados comparativos de la pirólisis de las diferentes biomásas utilizadas en Chile

El chopo y la tusa de maíz fueron otras biomásas que se trataron y se les realizó un proceso de pirólisis similar al aplicado al cardo. En este ítem se presenta una comparación de los resultados obtenidos, los cuales se aprecian en la Figura 2.5.





*Figura 2.7 Comparación de rendimientos de las fases y sus composiciones cuando la pirólisis fue llevada a cabo a 700 °C y con un tiempo de permanencia de los gases de 10s*

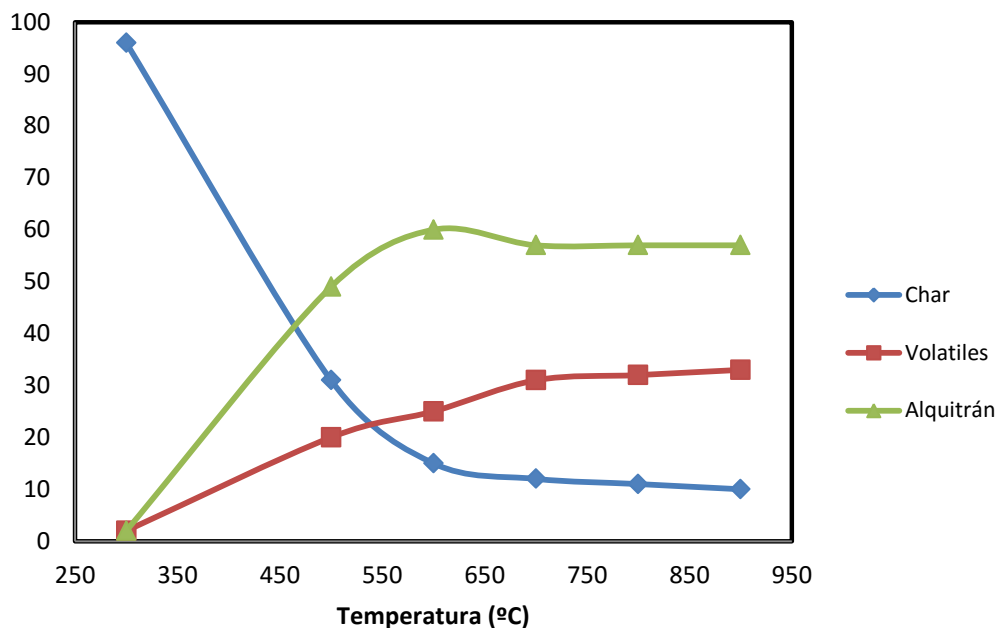
Tal como se puede observar en la Figura 2.5, el comportamiento de las diferentes biomásas, medidas desde el punto de vista de rendimiento, composición de los diferentes productos (char, gas y bioaceite), fue similar. Se resaltan los resultados del cardo como el más atractivo de las tres biomásas tratadas, puesto que es el que presenta un rendimiento ligeramente superior a las otras dos, con la gran ventaja de generar el bioaceite con menos compuestos oxigenados.

#### **2.4 Pirólisis del ciprés de la cordillera (*Austrocedrus chilensis*) en Chile**

El proceso de pirólisis se aplicó a una biomasa oriunda de la cordillera de los Andes en Chile, denominada ciprés de la cordillera. La biomasa, fue triturada y tamizada hasta un tamaño de partícula medio de  $125 < \phi < 75 \mu\text{m}$ . La elección de este tamaño se justifica en que, al emplear tamaños pequeños de partícula se minimizan los fenómenos anómalos que experimentan los gases generados en el interior de la partícula al tener que atravesar la matriz de biomasa. De este modo, se aseguró que la reacción fuese la etapa controlante del proceso. Esto es especialmente importante para la caracterización de los gases generados durante el proceso de pirólisis, ya que estos datos se emplearán para el modelado cinético del proceso. El

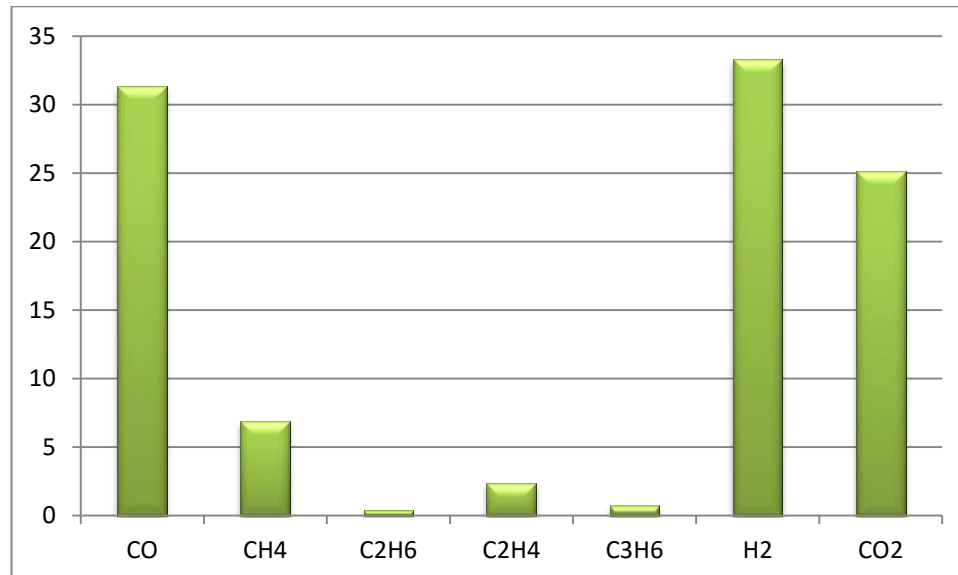
sistema empleado para la realización de los ensayos a altas velocidades de calentamiento consiste en un reactor semicontinuo de 28 cm de diámetro y 52 cm de altura construido en acero inoxidable AISI 310. Dicho reactor está introducido en un horno mufla marca Thermolin serie 6000 que permite elevar la temperatura del reactor hasta un máximo de 900 °C.

En la Figura 2.8 se puede observar cómo el punto en el que se genera la máxima cantidad de alquitrán es en torno a los 500-600 °C, a partir de esa temperatura, la cantidad generada disminuye y se sitúa cercana al 60%. Por otra parte, la cantidad de gas generado se incrementa con la temperatura hasta un máximo de 33%.



#### A. Rendimientos de cada fase de la reacción de la pirólisis (%w)





**B. Composición química del gas (%mol)**

*Figura 2.8 Rendimientos de las fases con el cambio de la temperatura y composición del gas cuando la pirolisis fue llevada a cabo a 700°C*

Estos resultados muestran que la composición del gas a partir de los 700 °C permanece constante, a excepción del incremento que se produce en la concentración de CO. La cantidad de alquitrán es máxima en torno a los 500-600 °C, a partir de esa temperatura la cantidad generada disminuye y se sitúa cercana al 60%. La cantidad de gas generado se incrementa con la temperatura hasta un máximo de 33%. Ahora, la composición del gas a partir de los 700 °C permanece constante, aunque se produce un incremento en la concentración de CO, lo que favorece un incremento en el PCI del gas.

Para las condiciones de operación de un reactor de gasificación, con temperaturas en torno a los 700-900 °C, la biomasa será pirolizada instantáneamente produciendo un craqueo similar al observado bajo estas condiciones. En comparación con los resultados obtenidos en el estudio de pirólisis a velocidades de calentamiento bajas, se observa un incremento en la cantidad de gas y alquitrán generado a costa de una menor producción de char.

## 2.5 Apuntes Finales

La temperatura es la variable que mayor influencia ejerce en el rendimiento de los productos. De esta manera se concluye que, el aumento de la temperatura provoca un descenso generalizado en los rendimientos de char para todas las biomásas. Esto se debe a que, con el aumento de la temperatura se produce la descomposición primaria de la biomasa y una descomposición secundaria del char que se forma con anterioridad a su salida de la zona de reacción.

Por otra parte, el aumento de temperatura provoca un aumento en los rendimientos del gas. Esto posiblemente es ocasionado por una combinación de craqueo térmico secundario de los vapores de pirólisis, así como a la descomposición secundaria del char. El rendimiento máximo de gas se obtiene para el chopo (50%), seguido de la tusa (45%) y por último el cardo (33%), con unos rendimientos más discretos.

En cuanto a la influencia de la temperatura de operación en el rendimiento del producto líquido (bioaceite), se produce un descenso progresivo de este. El contenido en agua de la fase líquida disminuye con el aumento de la temperatura, debido a que las reacciones de deshidratación, que tienen lugar durante la pirólisis rápida, son mayores a menor temperatura.

Ahora bien, la fracción de gas obtenida en el proceso de pirólisis contiene principalmente: dióxido y monóxido de carbono, pequeñas cantidades de hidrógeno y gases de hidrocarburos ligeros ( $C_1-C_3$ ). Un aumento de la temperatura de operación da lugar a un aumento generalizado de la proporción de monóxido de carbono y un descenso de dióxido de carbono, dado que la mayor parte del dióxido de carbono se genera al liberar carboxilo a una temperatura relativamente baja. Por otra parte, el craqueo secundario de los vapores de pirólisis produce monóxido de carbono y gases de hidrocarburos, en lugar de dióxido de carbono.

Con respecto a la influencia del tiempo de permanencia en el proceso de pirólisis, se ha obtenido, en general, un ligero aumento del rendimiento del gas a medida que aumenta el

tiempo de permanencia y un descenso del rendimiento del líquido, para el caso del cañote del maíz y del chopo. Por lo que se refiere al cardo, conforme varía el tiempo de permanencia no se aprecia variación significativa de los rendimientos de los productos de pirólisis. Razón por la cual, no se ha encontrado un efecto generalizado del tiempo de permanencia sobre el rendimiento de las fracciones de pirólisis para todas las materias primas.

## 3 GASIFICACIÓN

La generación de energía a partir del empleo de biomasa ha experimentado un importante crecimiento debido, en parte, al aumento de la demanda energética global y a las nuevas reglamentaciones medioambientales que afectan a los combustibles fósiles tradicionales (Miao, Wang, Wu, Yin, & Zu, 2011). La biomasa como fuente de energía renovable puede ser considerada como «libre de generación de CO<sub>2</sub>», lo que contribuye a limitar sus emisiones y por tanto el efecto invernadero (Pecho, 2008).

El aumento del consumo energético y el desarrollo económico en países emergentes ha aumentado el precio y la disponibilidad de los combustibles fósiles, de manera que se han desarrollado otras fuentes de obtención de combustible como el empleo de biomasa en procesos termoquímicos. Precisamente, la Directiva 28/CE/2009 del Parlamento Europeo relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables (Wang, Weller, Jones, & Hanna, 2008), establece como objetivo para el año 2020 que el 20% del consumo final bruto de energía en la Unión Europea (UE) proceda de fuentes renovables. La combustión directa es el proceso térmico más utilizado para producción de energía, sin embargo presenta una elevada emisión de contaminantes como óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno y dioxinas. La gasificación reduce estos inconvenientes de la combustión (Gabra, Pettersson, Backman, & Kjellstrom, 2001) y además aporta una serie de ventajas como son la posibilidad de transporte o almacenamiento sin perder valor energético, una mayor versatilidad en su aprovechamiento y un mayor rendimiento del proceso (Gil, Corella, Aznar, & M., 1999).

En este sentido, se tiene que la gasificación es un proceso termoquímico que transforma la biomasa generando un gas de síntesis o syngas compuesto mayoritariamente de: hidrógeno (H<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), metano (CH<sub>4</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y nitrógeno (N<sub>2</sub>); en el caso de la gasificación con aire (Wang, Weller, Jones, & Hanna, 2008). Así pues, el

agente gasificante empleado en el proceso puede ser aire, aire enriquecido con oxígeno, vapor de agua y CO<sub>2</sub>; elementos que influyen en el poder calorífico del gas de gasificación. La gasificación con aire como agente gasificante posee un elevado contenido de nitrógeno y genera un gas pobre con bajo poder calorífico del orden de 4-7 MJ/Nm<sup>3</sup> (van der Drift, van Doorn, & Vermeulen, 2001), con vapor de agua el poder calorífico aumenta considerablemente hasta 10-15 MJ/Nm<sup>3</sup> (Basu, 2006) y con oxígeno puro hasta 10-18 MJ/Nm<sup>3</sup>.

El gas de gasificación obtenido tiene múltiples aplicaciones, pues puede ser empleado como combustible industrial en la producción de calor, generación de energía eléctrica empleando alternadores accionados por motores de combustión interna o turbinas de gas, producción de hidrógeno, síntesis de combustibles líquidos o en pilas de combustible.

En los procesos de gasificación se dispone de dos tipos fundamentales de tecnología: gasificadores de lecho fijo y gasificadores de lecho fluidizado. Los gasificadores de lecho fluidizado logran un mayor contacto entre el sólido combustible y el agente gasificante, lo que se traduce en una mejor uniformidad de temperatura, mayor conversión de carbono (European Committee for Standardization, 2006) y la posibilidad de añadir catalizadores al material del lecho para aumentar la calidad del gas de gasificación (reduciendo el contenido de alquitranes y aumentando el poder calorífico) (Alauddin, Lahijani, & Mohammadi, 2010). No obstante, estos reactores deben contar con buenos sistemas de control del agente gasificante y el tamaño de partícula, sistemas que pueden resultar muy costosos. Los gasificadores de lecho fijo, por el contrario, cuentan con versatilidad en la operación del equipo, ya que el tamaño de partículas se puede distribuir en un rango más amplio y se debe tener menos factores controlados para su buen funcionamiento.

### **3.1 Caracterización de combustibles**

### 3.1.1 Pélets de serrín de pino

Las pruebas con más éxito en gasificación fueron llevadas a cabo con astillas de origen forestal calibradas y libres de finos. Sin embargo, la utilización de materiales peletizados permite obtener un combustible homogéneo con propiedades estables y reproducibles.

Como combustible básico se han seleccionado pélets de serrín de pino comerciales. Se trata de pélets comercializados habitualmente para uso en calefacciones domésticas, catalogados como A1 según la norma UNE-EN ISO 17225-2:2014 que asegura unos estándares de calidad (cenizas < 0,5%, humedad < 10% y PC > 5,1 kWh/kg).

### 3.1.2 Métodos de caracterización

La caracterización del combustible se ha llevado a cabo mediante la aplicación de una serie de normas o métodos que contemplan la determinación de propiedades físicas, análisis inmediato y elemental, poder calorífico, composición de las cenizas y análisis termogravimétrico.

Los métodos de análisis empleados se recogen de forma resumida en la Tabla 3-1.

*Tabla 3-1 Métodos de análisis*

		Norma / Metodología
<b>Densidad</b>		<b>EN 15103</b>
<b>Durabilidad mecánica</b>		<b>EN 15210-1</b>
<b>Distribución granulométrica</b>		<b>EN 15149-1 y 2</b>
<b>Análisis inmediato</b>	Humedad	<b>EN 14774-2</b>
	Cenizas	<b>EN14775</b>
	Volátiles	<b>EN 15148</b>
	Carbono fijo	<b>por diferencia</b>
<b>Análisis elemental</b>	C, H, N	<b>EN 15104</b>
	S	<b>EN 15289</b>
	F, Cl	<b>Procedimiento derivado de las</b>

		<b>normas ASTM D-2361-66 y UNE 32024.</b>
<b>Poder calorífico</b>	PCS	<b>EN 14918</b>
	PCI	<b>calculado a partir de PCS</b>
<b>Análisis de composición de las cenizas</b>	Al, Ba, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, S, Si, Sr, Ti y Zn.	<b>EN 15290 / Espectrometría de plasma ICP.</b>
<b>Análisis termogravimétrico</b>	TGA y DTG	<b>Procedimiento en termobalanza Star<sup>e</sup> SW 9.20 con rampa horizontal</b>

### 3.1.3 Propiedades físicas

La caracterización física de los pélets de pino se presenta en la Tabla 3-2. El manejo y la alimentación de este material son más sencillos que el de otros combustibles a granel de menor densidad causado por: mayor densidad, bajo contenido en finos y elevada durabilidad; características que aseguran una alimentación al gasificador de forma estable y reproducible.

*Tabla 3-2. Propiedades físicas del combustible péllet de pino*

<b>Parámetro</b>	<b>Combustible</b>
<b>Humedad (%)</b>	<b>7,3</b>
<b>Densidad a granel (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>690</b>
<b>Durabilidad (%)</b>	<b>98,2</b>
<b>Finos (% peso &lt; 2,5 mm)</b>	<b>0,1</b>

En la Figura 3.1 se muestra el aspecto de los pélets de pino empleados que, con una humedad media de 7,3%, se consideran de una calidad adecuada para ser alimentados como combustible en el gasificador piloto.



*Figura 3.1. Pélets de serrín de pino*

### 3.1.4 Análisis inmediato y elemental

En la Tabla 3-3 se muestra la caracterización química de los pélets de pino utilizados. Destaca su bajo contenido en cenizas y su elevado contenido en materia volátil que se traduce en la formación de baja cantidad de residuo, cenizas volantes e inquemados durante el proceso de gasificación. La determinación del contenido en oxígeno de los pélets de pino se obtiene por diferencia a partir de los datos suministrados en el análisis elemental que figura en la Tabla 3-3.

*Tabla 3-3. Caracterización química de los combustibles*

Parámetro	Pélet pino
<b>Humedad (% b.h.)</b>	<b>7,3</b>
<b>ANÁLISIS INMEDIATO</b>	
<b>Materias volátiles (% b.s.)</b>	<b>86,7</b>
<b>Cenizas (% b.s.)</b>	<b>0,5</b>
<b>Carbono fijo (% b.s.)</b>	<b>12,8</b>
<b>ANÁLISIS ELEMENTAL</b>	



<b>Carbono (% b.s.)</b>	<b>50,90</b>
<b>Hidrógeno (% b.s.)</b>	<b>6,10</b>
<b>Nitrógeno (% b.s.)</b>	<b>0,06</b>
<b>Azufre (% b.s.)</b>	<b>0,02</b>
<b>Cloro (% b.s.)</b>	<b>0,02</b>

Como puede observarse en la Tabla 3-4, el poder calorífico de los pélets de serrín de pino utilizados es elevado.

*Tabla 3-4. Poderes caloríficos de los combustibles*

<b>Parámetro</b>	<b>Pélet pino</b>
<b>Poder calorífico superior (PCS<sub>0</sub>) (MJ/kg)</b>	19,90
<b>Poder calorífico inferior (PCI<sub>0</sub>) (MJ/kg)</b>	18,57

### 3.1.5 Composición de las cenizas

La composición de elementos inorgánicos de las cenizas de pélets de serrín de pino obtenida a 550 °C se muestra en la Tabla 3-5.

Se observa la presencia de metales con propiedades catalíticas para la eliminación de alquitranes (Fe, Mg y Ca). Además, la concentración de metales alcalinos (Na, K) podría originar algún problema de aglomeración si se sobrepasan las temperaturas de fusión, debido al alto contenido en potasio (van der Drift, van Doorn, & Vermeulen, 2001). No obstante, el contenido en Magnesio del material puede elevar la temperatura de fusión lo suficiente para evitar la sinterización.

*Tabla 3-5. Composición en metales en las cenizas obtenidas a 550 °C (% b.s.)*

Parámetro	Pellet pino	Parámetro	Pellet pino
Al	1,7	Na	0,65
Ba	0,028	P	1,5
Ca	15	S	1,9
Fe	1,6	Si	9,5
K	13	Sr	0,034
Mg	4,2	Ti	0,1
Mn	1,2	Zn	0,25

### 3.1.6 Análisis termogravimétrico

La caracterización de la biomasa empleada en este estudio se completa con un análisis termogravimétrico que nos permite conocer el comportamiento del material en términos de estabilidad térmica, es decir: rango de temperaturas y rapidez de la pérdida de masa, residuo obtenido en referencia al material no-volátil tras los ensayos y las distintas etapas del proceso.

El equipo utilizado en el estudio es una termobalanza Star<sup>®</sup> SW 9.20 (Mettler Toledo). El análisis se ha llevado a cabo en un rango de temperaturas de 30 °C-900 °C con una velocidad de calentamiento de 20 °C/min (rampa horizontal) en atmósfera de nitrógeno.

Se han realizado tres muestras del ensayo termogravimétrico del combustible para condiciones de pirólisis y se presentan las curvas obtenidas: curva de pérdida de peso (TGA), curva de velocidad de pérdida de peso (DTG) y curva del análisis térmico diferencial (SDTA).

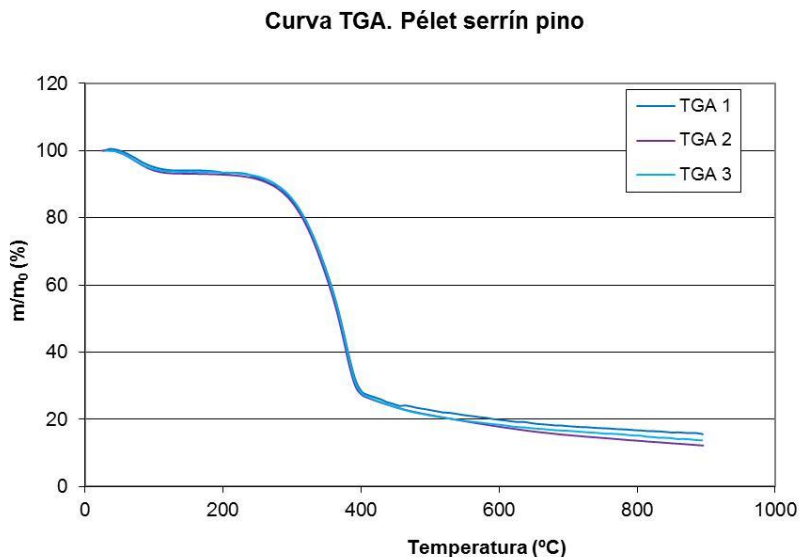
**Curva TGA.** Es la curva de pérdida de peso en función de la temperatura, donde  $m$  es la masa de muestra, en mg;  $m_0$  es la masa inicial de la muestra, en mg; y Temperatura es la temperatura a la que se somete la muestra, en °C.

Esta curva suministra información sobre:

- El proceso: rango de temperaturas y el número de etapas en las que se produce la degradación térmica del combustible.
- La velocidad del proceso: en función de la pendiente de la curva TGA se puede conocer la rapidez del proceso.
- La pérdida de masa que experimenta la muestra de combustible durante el proceso de pirólisis a través del cual se desprende la humedad de la muestra, la materia volátil se transforma en productos gaseosos de suma importancia en el proceso de gasificación ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,...) y el residuo obtenido corresponde a las cenizas y carbono fijo de la muestra.

Las curvas obtenidas para las tres réplicas se representan en la Figura 3.2. El proceso transcurre en tres etapas: una etapa inicial de secado que transcurre entre 50-110 °C, una segunda etapa de descomposición de los materiales celulósicos entre 280-410 °C y una última etapa en la que se produce la degradación del residuo generado en la etapa previa entre 410 °C-900 °C. La degradación es rápida, se observa que la pendiente de la curva es acusada.

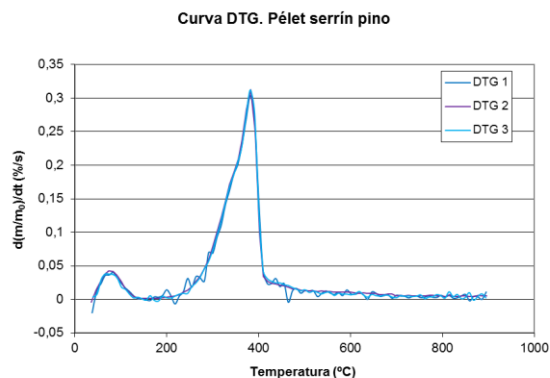
La pérdida de masa en la etapa de secado debido a la humedad es en torno al 7%, la pérdida de masa debido a los volátiles es del 80% y presenta un residuo correspondiente a la suma de carbono fijo y cenizas que es del 12%. Estos valores coinciden con los resultados obtenidos en el laboratorio de caracterización de biomasa.



**Figura 3.2. Curva TGA para pirólisis de pélets de pino**

**Curva DTG.** Es la curva de la velocidad de pérdida de peso en función de la temperatura, donde:  $d(m/m_0)/dt$ , en %/s, es la velocidad de pérdida de peso y Temperatura, en °C, es la temperatura a la que se somete la muestra. Esta curva suministra información de: la velocidad del proceso a cada temperatura y sobre las zonas de reacción en función de la velocidad de pérdida de peso.

Las curvas obtenidas para el análisis DTG se representan en la Figura 3.3. Se pueden determinar tres etapas: una primera etapa de secado que tiene lugar entre los 40-130 °C y que alcanza su máxima velocidad a 75 °C; una segunda etapa asociada al desprendimiento de volátiles entre los 190 °C-420 °C y que alcanza su máxima velocidad a 382 °C y una tercera etapa de degradación del residuo que transcurre en un proceso lento entre los 420 °C-900 °C, sin presentar ningún máximo de velocidad.

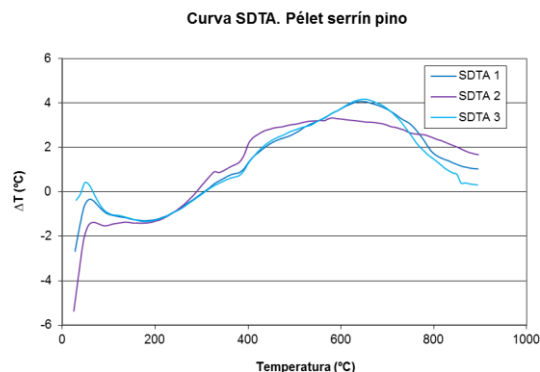


*Figura 3.3. Curva DTG para pirólisis de pélets de pino*

**Curva SDTA.** La curva del análisis térmico diferencial representa el incremento de temperatura que se produce en la muestra,  $\Delta T$ , en función de la temperatura a la que se somete la muestra. Esta curva suministra información sobre:

- La temperatura con la que se produce la degradación térmica del material.
- Lo exotérmicas o endotérmicas que son las reacciones. El proceso es exotérmico si la gráfica presenta un máximo y endotérmico si presenta un mínimo.

Las curvas obtenidas para el análisis SDTA se representan en la Figura 3.4. En primer lugar se observa un valle de temperatura en torno a 200 °C que corresponde al proceso endotérmico de secado. A temperaturas superiores aparece un pico exotérmico de 330 °C relacionado con la pérdida de peso debido a los volátiles, observado en la curva TGA, y a 380 °C aparece un pico endotérmico correspondiente a algunas reacciones endotérmicas del proceso de pirólisis. Finalmente, existe un máximo de 650 °C que indica que el proceso de degradación del residuo es exotérmico.



*Figura 3.4. Curva SDTA para pirólisis de pélets de pino*

## 3.2 Gasificación de serrín de pino en España

Los ensayos de gasificación de biomasa se han realizado con los pélets de serrín de pino caracterizados. Se ha producido gas de síntesis a partir de la biomasa, utilizando distintas relaciones de equivalencia (ER) y midiendo la composición del gas producido y su contenido en alquitranes.

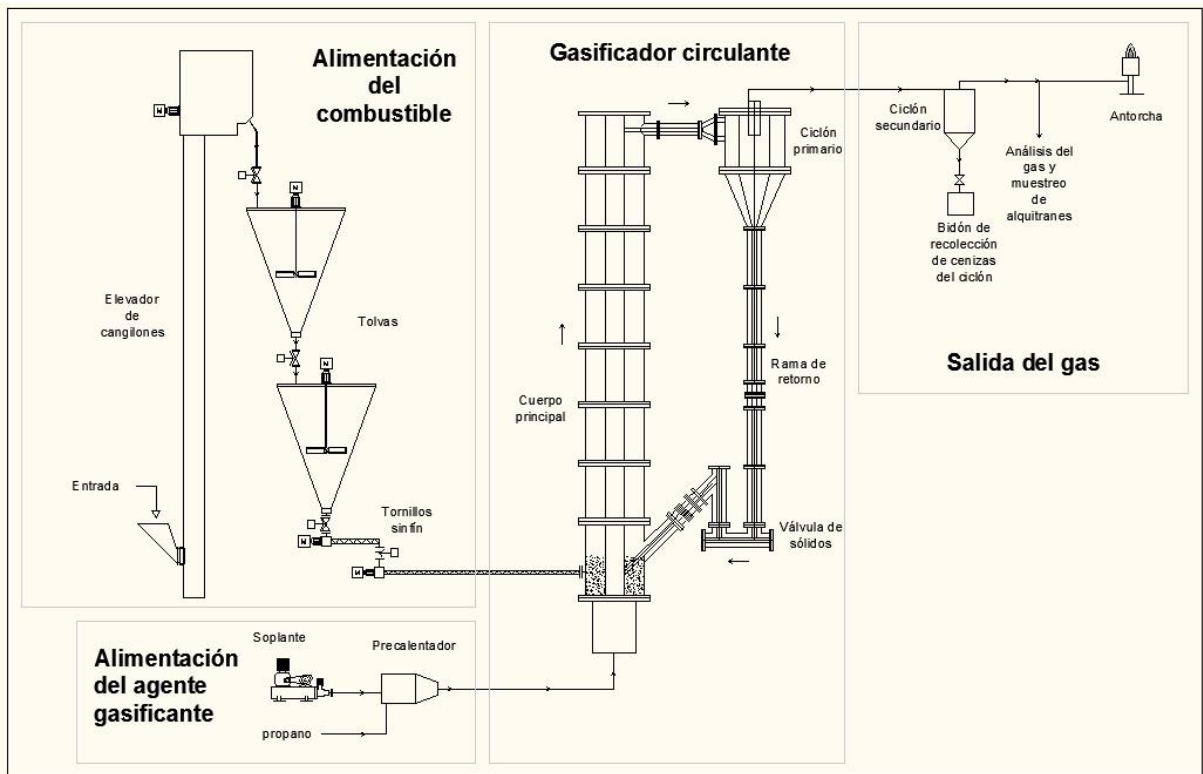
### 3.2.1 Gasificación

La planta piloto empleada para la realización de los ensayos de gasificación es de tecnología de lecho fluidizado circulante, con potencia térmica nominal de 500 kW<sub>t</sub>. Trabaja a presión atmosférica y en operación autotérmica, es decir, sin ningún aporte externo de calor. Se encuentra ubicada en las instalaciones del CEDER-CIEMAT en Soria, España. (Ver la Figura 3.5).



*Figura 3.5. Gasificador de lecho fluidizado circulante*

La instalación consta de las siguientes partes: sistema de alimentación del combustible, sistema de alimentación del agente gasificante, gasificador de lecho fluidizado circulante y salida de gases según se recoge en el diagrama del proceso (ver la Figura 3.6).



*Figura 3.6. Diagrama del flujo de la instalación de gasificación*

El sistema de alimentación del combustible se compone de un elevador de cangilones y un sistema de doble tolva con válvulas tajadera, entre cada uno de ellos, que permite la operación en continuo. De esta manera, dos tornillos sin fin con una válvula rotativa situada entre ambos facilitan la dosificación y la alimentación del combustible. La válvula rotativa tiene la función de evitar fugas de gas desde el cuerpo del gasificador hacia el sistema de alimentación.

El aire de gasificación (usado en estos ensayos como único agente gasificante) es suministrado por una soplaante de émbolos rotativos que proporciona una presión máxima dentro del gasificador, de 0,3 bar. Para iniciar el proceso de gasificación es necesario calentar previamente el aire hasta alcanzar, en el gasificador, temperaturas cercanas a 400 °C, temperatura de ignición de la biomasa, para lo que se utiliza un precalentador de aire con un quemador de propano. Posteriormente, la combustión parcial de la biomasa con aire, suministra el calor necesario para llevar a cabo el proceso de gasificación.



El gasificador circulante posee un cuerpo principal, un ciclón primario, una rama de retorno y una válvula no mecánica de sólidos. Se trata de un horno cilíndrico, de diámetro interno 300 mm y 8,5 m de altura; que está revestido internamente de hormigón refractario y externamente de lana mineral. En el interior del gasificador el combustible en reacción y el material inerte del lecho, junto con el gas producido, ascienden por su cuerpo, arrastrados por el agente gasificante, hasta llegar al ciclón primario, en el cual la mayor parte de los sólidos se separan del gas. Estos sólidos, que consisten en el material del lecho y en combustible que no ha reaccionado totalmente, caen por la rama de retorno hasta la válvula no mecánica de sólidos que los transporta de nuevo hasta el cuerpo del gasificador. Este movimiento circulante de sólidos es lo que caracteriza al gasificador de lecho fluidizado circulante. En él la válvula de sólidos permite el transporte de partículas sólidas desde una zona de baja presión, ciclón, a una zona de alta presión, gasificador.

La tubería de salida de gas que parte del ciclón primario, dispone de un segundo ciclón que permite recoger gran parte de los sólidos más finos en un bidón de recolección de cenizas. La composición y el contenido de alquitranes del gas de salida se determinan antes de ser quemado en una antorcha que dispone de una llama piloto de propano.

La planta piloto está acondicionada dentro de un edificio cerrado de 16 m de altura con varias aperturas de ventilación y con dos extractores de tejado. Existen detectores de H<sub>2</sub> y CO a distintas alturas de la instalación.

**Analizadores de gases.** Para poder analizar el gas de gasificación la planta piloto encargada de este proceso dispone de una toma de muestra situada en la salida de los gases del gasificador, previo a la antorcha, donde se toma una alícuota de gas que pasa por un filtro y un conjunto de borboteadores para retener las partículas y elementos pesados que se puedan condensar. El gas limpio es estudiado por un conjunto de analizadores (Figura 3.7 izquierda) que posibilitan el análisis del gas producido por el gasificador de manera continua durante los ensayos. Los analizadores son los siguientes:

- FTIR utilizado para medir H<sub>2</sub>O, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, otros hidrocarburos ligeros, NH<sub>3</sub> y HCl.
- Analizador paramagnético utilizado para medir O<sub>2</sub>.
- Analizador por conductividad térmica utilizado para medir H<sub>2</sub>.
- Analizador de ionización de llama (FID) utilizado para medir el contenido total en hidrocarburos.
- Analizador láser utilizado para medir la concentración de H<sub>2</sub>S.

Alternativamente, en el mismo punto de toma de muestra, se realiza un muestreo en discontinuo del gas mediante un tren de alquitranes (Figura 3.7 derecha) que permite la retención de alquitranes y partículas y, su posterior cuantificación de la concentración de los mismos en el gas producido, siguiendo el protocolo de muestreo de alquitranes y partículas en gasificación de biomasa, según la especificación técnica europea: CEN/TS 15439:2006 (European Committee for Standardization, 2006).



**Analizador en continuo de gases**



**Tren de muestreo para alquitranes**

***Figura 3.7. Sistemas de análisis disponibles en la planta piloto de gasificación***

**Análisis de alquitranes.** El alquitrán está formado por cientos de compuestos distintos, lo que dificulta su cuantificación individual debido a la necesidad de tener patrones puros de cada compuesto y, a que las concentraciones de unos y otros pueden estar en un rango muy diferente. Se han considerado alquitranes los compuestos con un peso molecular superior al

benceno y han sido seleccionados algunos compuestos para su cuantificación. Esta selección se ha realizado teniendo en cuenta la abundancia de los compuestos en las muestras, su relevancia como indicadores del proceso de gasificación y su importancia medioambiental.

Los alquitranes determinados en este estudio se recogen en la Tabla 3-6, donde se indica en qué tipo de muestras han sido analizados.

*Tabla 3-6. Alquitranes de estudio*

<b>Familia</b>	<b>Compuesto</b>	<b>Tipo de muestra</b>
<b>PAH</b>	Naftaleno	Adsorbente
	Acenaftileno	Filtro
	Acenafteno	Disoluciones
	Fluoreno	IP
	Fenantreno	Condensados
	Antraceno	Acuosos
	Fluoranteno	
	Pireno	
	Benzo(a)antraceno	
	Criseno	
	Benzo(b)fluoranteno	
	Benzo(k)fluoranteno	
	Benzo(a)pireno	
	Indeno(1,2,3-cd)pireno	
	Dibenzo(ah)antraceno	
Benzo(ghi)perileno		
<b>BTEX</b>	Benceno	Disoluciones
	Tolueno	IP
		Condensados

## Acuosos

**Análisis de alquitranes en el condensado de gasificación.** Los condensados acuosos proceden del primer borboteador del tren de muestreo. En este borboteador, que al principio del muestreo está vacío y a temperatura ambiente, condensa principalmente el agua y los alquitranes más polares.

Ahora bien, las muestras acuosas se extraen con cloruro de metileno. La inyección en modo splitless de los extractos en un cromatógrafo de gases/espectrómetro de masas trabajando en modo SCAN, utilizando la columna CP-Sil8CB, permite identificar los compuestos orgánicos comprendidos entre el benceno y el 1-H-indol. No se han identificado en las muestras analizadas compuestos volátiles como benceno o tolueno. En algunos casos se identifican hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAH), pero no son componentes mayoritarios en las muestras y suelen encontrarse preferentemente los de mayor volatilidad. Entre tanto, se han identificado otros compuestos con mayor participación, tales como anilina, fenol, piridina, benzonitrilo y 1-H pirrol; con base en sus espectros de masas.

**Muestras de isopropanol cargado de alquitranes.** Estas muestras proceden del tren de muestreo, del segundo al séptimo borboteador. En un principio, se analizaron los borboteadores de manera individual para comprobar que el sistema de muestreo funcionaba correctamente, es decir, que la concentración de alquitrán iba disminuyendo de manera progresiva. Una vez se comprobó dicho funcionamiento, se decidió analizar el segundo borboteador individualmente y juntar al resto de los borboteadores en una única muestra.

El análisis de PAH se ha realizado mediante GC/MS, utilizando un equipo Agilent 6890/5975B con columna HP5 (5% fenil-metilpolisiloxano) en modo de trabajo SIM, e inyección splitless que permiten cuantificar PAH entre el naftaleno y el indeno (1,2,3-c,d pireno) con límites de detección inferiores a 1 µg/ml.

Para la identificación cualitativa de otros compuestos orgánicos que pudieran ser significativos en el proceso, se ha utilizado el mismo equipo y columna cromatográfica

seleccionando el método de trabajo en split, con el programa de temperaturas adecuado, y modo de trabajo SCAN del espectrómetro de masas que permite identificar los compuestos orgánicos comprendidos entre el benceno y el triacontano en concentraciones superiores a las 50 ppm.

La cuantificación de los compuestos volátiles mayoritarios, benceno y tolueno, se ha realizado por dilución de las muestras en isopropanol y análisis en modo de inyección split, en un cromatógrafo de gases/espectrómetro de masas HP 5890/5971A equipado con una columna CP-Sil8CB y modo de trabajo SCAN.

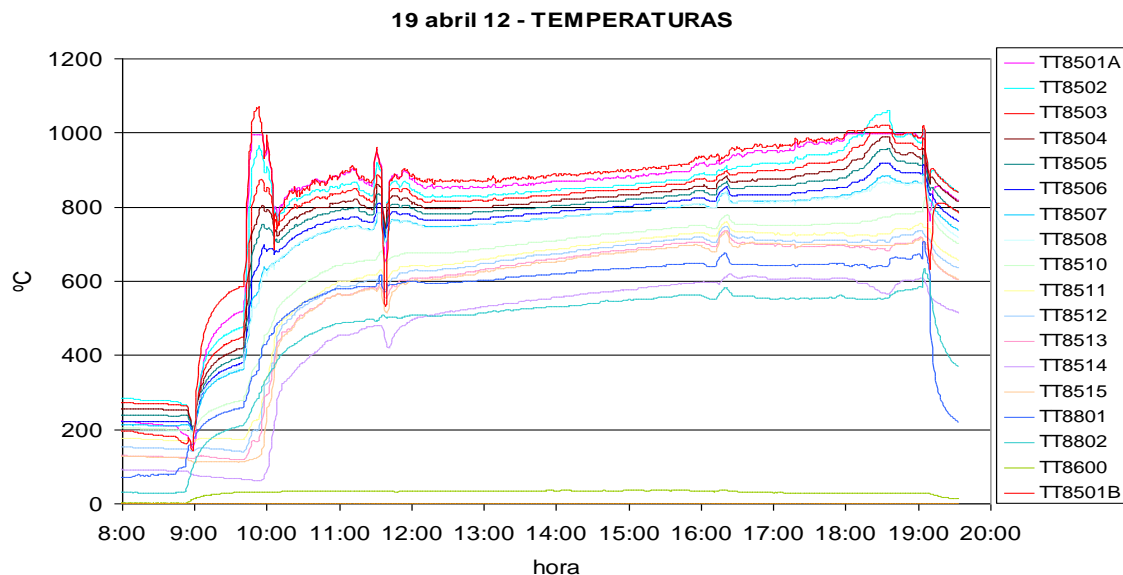
### 3.2.2 Resultados de gasificación de pélets de pino

Los ensayos de gasificación de pélets de pino se realizan con aire como agente gasificante, a presión atmosférica y en operación autotérmica. Todos los ensayos se realizan con arena de sílice como material de lecho, modificando el caudal de combustible alimentado y el caudal de aire primario, esto es, se varía su relación de equivalencia (llamada de aquí en adelante ER) para estudiar su efecto en la composición del gas y en el contenido de alquitranes. El consumo de pélets se ha variado desde 80 hasta 120 kg/h y se trabaja con una potencia de operación de la instalación hasta 550 kW<sub>t</sub>.

El calentamiento de la instalación se realiza con aire precalentado. Desde que se alcanza un proceso estable, las características autotérmicas de la gasificación de biomasa mantienen la instalación a una temperatura de operación (750 °C–900 °C) sin ningún aporte externo de calor.

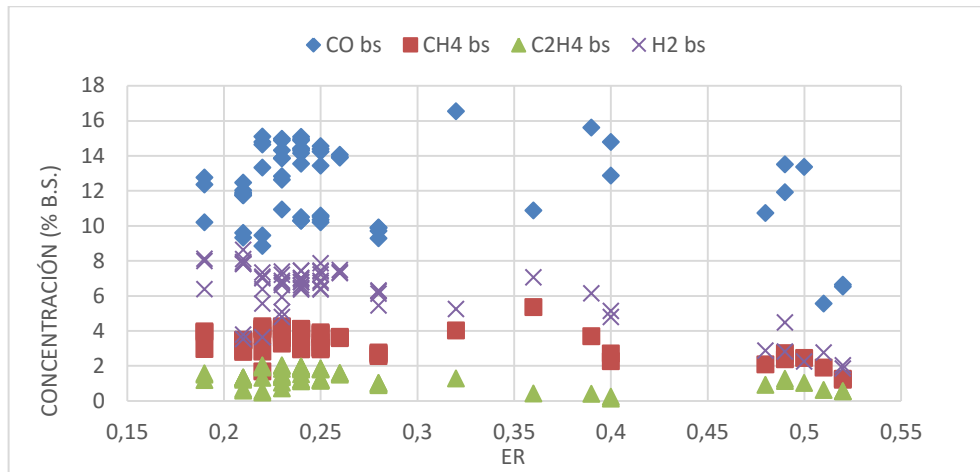
En la Figura 3.8 se presentan los valores de temperatura para uno de los ensayos realizados. Se representan las temperaturas de la rama principal a distintas alturas comenzando desde la temperatura de la parte inferior (TT8501A), temperatura en el punto medio (TT8504) y temperatura de la parte superior (TT8508). Además se representan algunas temperaturas de la rama de retorno como la temperatura en el ciclón (TT8510), en la mitad de la rama de retorno (TT8512) y en la válvula de sólidos (TT8514 y TT8515). La figura también incluye la

temperatura a la salida del gasificador (TT8801). Se observa una estabilidad relativa del proceso durante más de 8 horas, y, sin embargo, una tendencia de aumento paulatino de las temperaturas hacia el final del ensayo. Este aumento de temperatura se debe a la insuficiente tasa de circulación de sólidos dentro del gasificador circulante



*Figura 3.8. Evolución de las temperaturas en el gasificador*

En la Figura 3.9 se muestran los resultados de la composición del gas para los distintos ensayos realizados en función de ER en un rango entre 0,2 y 0,5. Se observa que a medida que aumenta el valor de ER, disminuye ligeramente la concentración de los principales compuestos responsables del poder calorífico del gas ( $H_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$  y  $C_2H_4$ ). No obstante, el aumento de ER provoca una mejor conversión del char, residuo carbonoso, pero, a su vez, reduce el poder calorífico del gas proceso (Alauddin, Lahijani, & Mohammadi, 2010), dado que un aumento de ER favorece las reacciones de combustión completa que aumentan la formación de  $CO_2$  en lugar de  $CO$  o  $CH_4$ . Además, el aumento del aire suministrado provoca que se introduzca más contenido de nitrógeno, el cual diluye el gas producido.



**Figura 3.9. Composición del gas de gasificación en función del ER**

Como prueba de las concentraciones encontradas, en la Tabla 3-7 se presenta la composición del gas de gasificación obtenido para una de las condiciones con un valor de ER de 0,31.

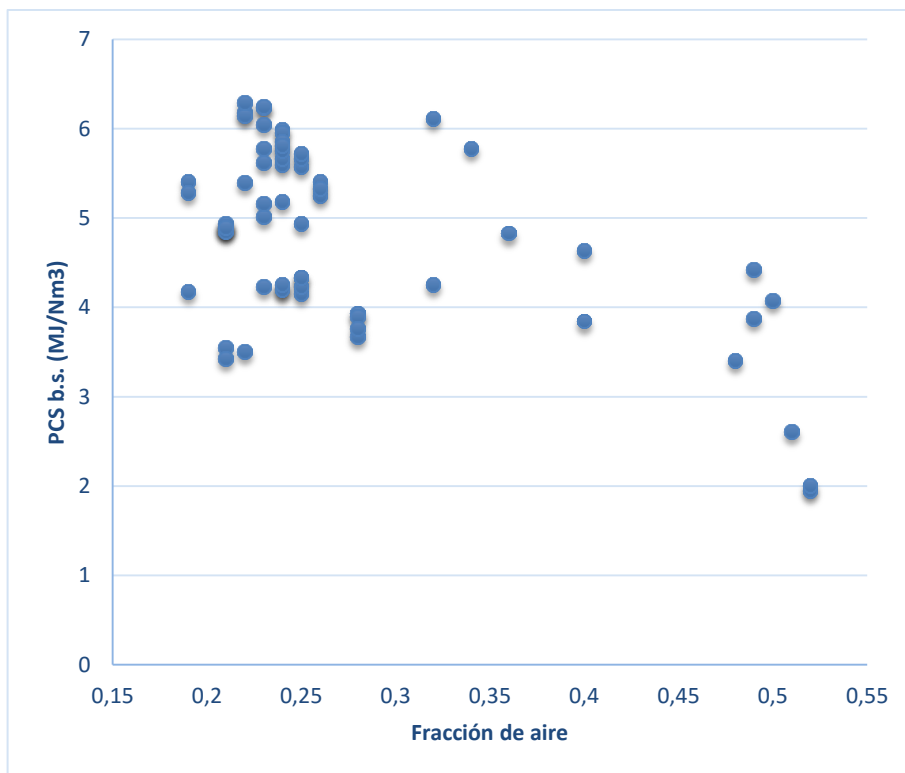
**Tabla 3-7. Composición del gas de gasificación para ER=0,31**

Compuesto	Concentración (% b.s.)
H <sub>2</sub>	7,12
CO	19,30
CO <sub>2</sub>	21,72
CH <sub>4</sub>	4,68
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1,60
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,09
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	0,21

En vista de que la gasificación se ha realizado con aire, el compuesto mayoritario en el gas es el nitrógeno, correspondiente a la diferencia que supone aproximadamente un 50%; en segundo lugar se encuentra el CO<sub>2</sub> con un contenido del 22%; en menor contenido se

encuentran los compuestos deseados de la gasificación que le aportan poder calorífico, estos son CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> y C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>.

En la Figura 3.10 se muestran los resultados del poder calorífico del gas de gasificación obtenido en función del ER para un rango entre 0,2 y 0,5. El poder calorífico del gas disminuye al aumentar el ER, a causa de la tendencia decreciente que presentan los principales compuestos responsables de aportar poder calorífico al gas. Se observa un valor máximo para el ER en torno a 0,31. El PCS más alto del gas encontrado es próximo a 6,2 MJ/Nm<sup>3</sup>. Por lo tanto, existe un óptimo localizado de valores de ER en el que el proceso de gasificación muestra relación lógica entre los alquitranes generados durante el proceso y el poder calorífico del gas obtenido, ya que bajos valores de ER provocan un descenso en la temperatura de reacción, resultado desfavorable para el proceso de gasificación (Xiong, Chang, Wu, Chen, & Zhu J., 2004).



**Figura 3.10. Poder calorífico del gas y concentración de alquitranes en función de la fracción de aire**

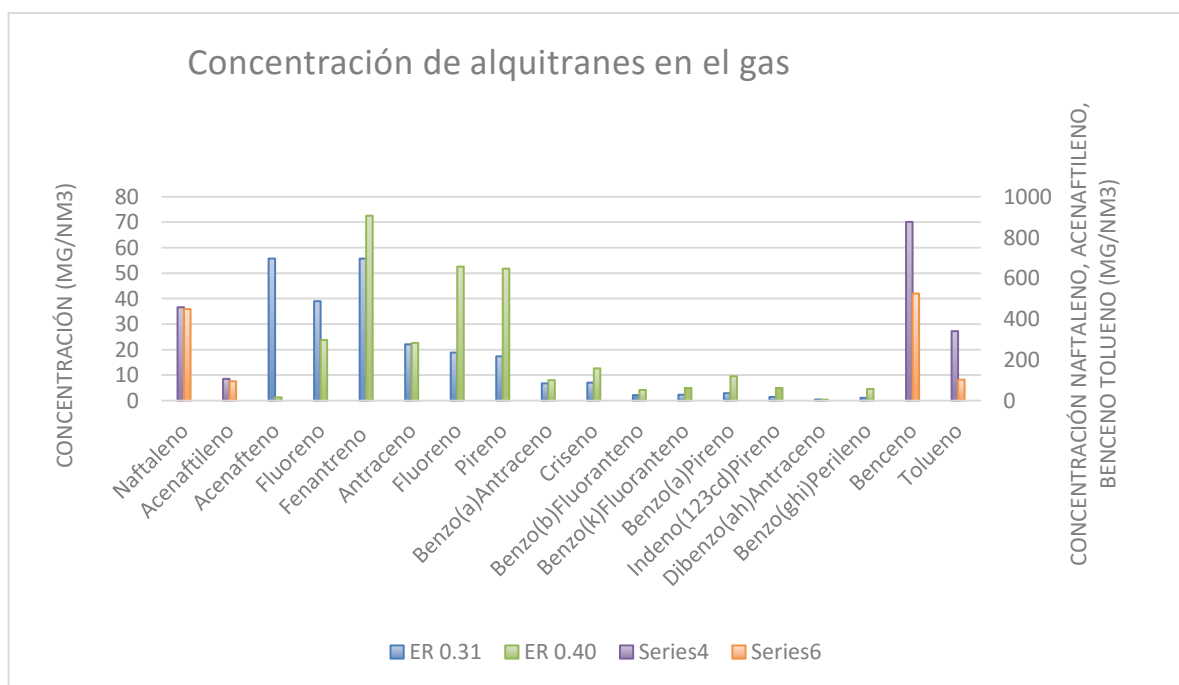


La concentración de alquitranes se ha medido a dos valores de ER distintos, para 0,31 y 0,40. El contenido de alquitranes del gas de gasificación se presenta en la Tabla 3-8. En ella se puede observar que el contenido de alquitranes pesados (PAH) es de 0,80 g/Nm<sup>3</sup> y se mantiene constante con la variación de ER; mientras que el contenido de alquitranes ligeros (BTEX) está entre 0,63 y 1,20 g/Nm<sup>3</sup> y disminuye al aumentar el ER.

**Tabla 3-8. Contenido de alquitranes en el gas de gasificación**

	ER 0,31	ER 0,40
<b>PAH</b>	0,80 g/Nm <sup>3</sup>	0,82 g/Nm <sup>3</sup>
<b>BTEX</b>	1,20 g/Nm <sup>3</sup>	0,63 g/Nm <sup>3</sup>

En la Figura 3.11 se analiza detalladamente, por especies, la concentración de los alquitranes encontrados. Los alquitranes mayoritarios son: naftaleno, acenaftileno y fenantreno; así como los alquitranes ligeros, benceno y tolueno.



**Figura 3.11. Concentración de alquitranes en el gas para los valores de ER**

Para el uso del gas en un motor se precisa reducir el contenido de alquitranes pesados mediante procedimientos de limpieza de gas; en cuanto a los alquitranes ligeros, estos aportan poder calorífico sin causar ningún problema en el motor. Razón por la cual, para los resultados obtenidos, la gasificación de pélets de pino presenta un óptimo para ER en torno a 0,31, pues el poder calorífico evidencia un máximo y el contenido en alquitranes pesados se mantiene prácticamente constante.

Por consiguiente, se han estudiado los pélets de serrín de pino certificados como combustible para procesos de gasificación. Se trata de pélets comercializados habitualmente para el uso en calefacción doméstica que cumplen unos estándares de calidad de forma que son catalogados como A1 según la norma UNE-EN ISO 17225-2:2014. Además, tienen un bajo contenido en cloro y azufre (inferior al 0,02 % b.s.). Respecto al análisis termogravimétrico del proceso de pirólisis, este se produce en tres etapas bien diferenciadas:

- Secado de la muestra en un proceso endotérmico.
- Proceso de desprendimiento de volátiles. Es el proceso más rápido y engloba reacciones exotérmicas y endotérmicas.
- Proceso de degradación del residuo generado. Es el proceso más lento y exotérmico.

Así pues, se realizaron ensayos, a presión atmosférica y en operación autotérmica, de gasificación en la planta piloto de lecho fluidizado circulante. Para ello, se empleó aire como agente gasificante y arena de sílice como material de lecho. Se utilizó un consumo de pélets de pino certificados desde 80-120 kg/h, trabajando con una potencia de operación de la instalación que llegaba hasta más de 550 kW<sub>t</sub>. Las características autotérmicas de la gasificación de la biomasa, mantienen la temperatura de operación (750 °C – 900 °C) sin ningún aporte de calor externo, como también la influencia del valor de la relación de equivalencia (ER) en la composición del gas y en su contenido de alquitranes. Finalmente, de los resultados descritos, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Las concentraciones de los compuestos con mayor influencia en el poder calorífico del gas de gasificación son: CO 6,0-16,0; H<sub>2</sub> 2,0-8,0; CH<sub>4</sub> 2,0-5,5; C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 0,25-2,00 (en % en volumen. b.s. variando en función del valor de ER comprendido entre 0,2 y 0,5).
- Existe una clara influencia del ER en la composición del gas y, por tanto, en el poder calorífico. A medida que aumenta ER disminuye la concentración de los principales compuestos responsables del poder calorífico. En un valor de ER 0,31, se presenta un óptimo de poder calorífico de 6,2 MJ/Nm<sup>3</sup>.
- El contenido de alquitranes pesados (PAH) es de 0,80 g/Nm<sup>3</sup> y se mantiene constante con la variación de ER. El contenido de alquitranes ligeros (BTEX) es entre 0,63 y 1,20 g/Nm<sup>3</sup> y disminuye al aumentar el ER.
- El gas de gasificación contiene múltiples compuestos, entre los mayoritarios se encuentran compuestos pesados como Naftaleno, Acenaftileno y Fenantreno; y compuestos ligeros como benceno y tolueno.
- Teniendo en cuenta el poder calorífico del gas y el contenido en alquitranes, la gasificación de pélets de pino presenta un óptimo para ER en torno a 0,31, ya que el poder calorífico presenta un máximo, el contenido de alquitranes pesados se mantiene prácticamente constante y el contenido de alquitranes ligeros no presenta ninguna limitación para su aplicación en motores.

### 3.3 Gasificación de cascarilla de arroz en Colombia

Con el fin de determinar el potencial de la gasificación en lecho fluidizado de biomasa residual, proveniente del sector agroindustrial en Colombia, como alternativa de suministro energético en zonas apartadas de la geografía o para centros de producción de bienes agrícolas y pecuarios con demanda media de energía eléctrica; se realizó una revisión de las principales biomásas residuales producidas en el país, así como su caracterización fisicoquímica y

fluidodinámica. Posteriormente, la biomasa seleccionada fue sometida a procesos de molienda y tamizado como pretratamiento para su uso como materia prima en un proceso de gasificación. Finalmente, se realizó un estudio de las principales variables del proceso (Temperatura, ER y SB) y su impacto en la calidad del syngas obtenido y en la eficiencia global.

### 3.3.1 Materia prima.

Para el desarrollo de actividades agropecuarias, Colombia cuenta con 50 941 744 hectáreas que corresponden a un 45% del total del territorio nacional. De este total, el 7% están destinadas a la actividad agrícola con un 60% dedicado a cultivos permanentes, un 38% a cultivos transitorios y un 2% compuesto por áreas de descanso (terrenos que se dejan de sembrar por cierto periodo de tiempo para recuperar la fertilidad de los suelos). Los cultivos permanentes poseen un potencial de residuos de 7 731 189 de ton/año con una energía potencial bruta de 12300 GWh/Año proveniente, principalmente, de los cultivos de arroz con un 49%, Maíz con un 26% y papa con un 12,5% (Duarte Ortega, Cardona Ruiz, Zapata Lesmes, Orduz Prada, & Escalante Hernández, 2011). Teniendo en cuenta esto, el arroz constituye el cultivo transitorio con mayor potencial de biomasa, la cual, a su vez, representa un problema ambiental para la industria arrocera, pues son residuos manejados de forma inadecuada (quema no controlada)

**Cascarilla de arroz.** La cascarilla de arroz es un tejido vegetal que cubre al grano con el fin de protegerlo y es removida al momento de pasar al proceso de secado. Este tejido vegetal está compuesto principalmente por celulosa y sílice, características que generan un buen rendimiento en la combustión (Valverde et al., 2007). Entre sus aspectos físicos más relevantes, se resalta su forma de fibras largas de longitud entre 5 y 11 mm dependiendo la variedad del arroz. Su ancho es aproximadamente el 30% - 40% de la longitud y de acuerdo con su tamaño, una cascarilla puede pesar entre 2.5 y 4.8 mg. Su composición química se presenta en la Tabla 3-9.

**Tabla 3-9. Composición fisicoquímica de la cascarilla de arroz**

Análisis último, % w/w		Norma	
<b>C</b>	33,8	ASTM	D
		4239	
<b>H</b>	4,9	ASTM	D
		4239	
<b>N</b>	1,4	ASTM	D
		4239	
<b>S</b>	0,01	ASTM	D
		4239	
<b>O</b>	40,02	Por diferencia	
Análisis próximo, % w/w		Norma	
<b>Cenizas</b>	20,02	ASTM	D
		3172	
<b>Humedad</b>	8,41	ASTM	D
		3173	
<b>Carbono fijo</b>	13,27	ASTM	D
		3175	
<b>Volátiles</b>	58,30	ASTM	D
		3174	
<b>Poder calorífico, cal/g</b>	3491	ASTM	D
		5865	

En consonancia con la tabla, se puede afirmar que el contenido de agua de la cascarilla de arroz es alrededor del 8,4%, con una poca variación a lo largo del año; su contenido de ceniza es alto y está compuesto principalmente por sílice; sin embargo, tanto el contenido de volátiles como el de carbono fijo, además del alto poder calorífico con respecto a otros

energéticos, hacen de la cascarilla una buena alternativa como materia prima para el proceso de gasificación.

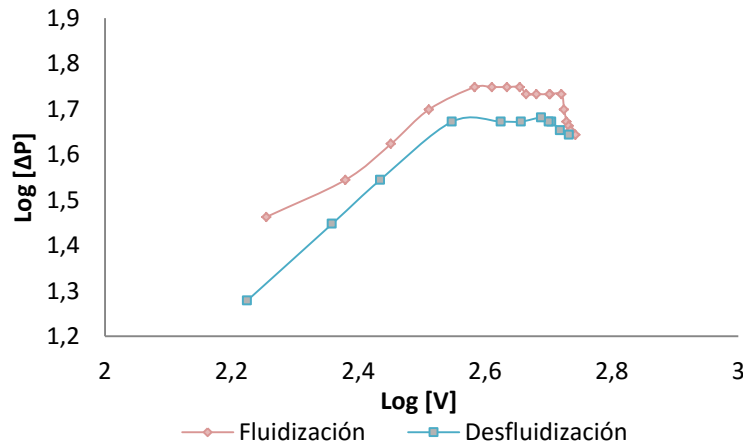
Además de la caracterización fisicoquímica, es necesario realizar la caracterización fluidodinámica de la materia prima. Para esto, se realizaron pruebas de fluidización en frío. El equipo experimental consta de una columna de acrílico de 1,50 m de alto y 8,2 cm de diámetro interno, un módulo en forma de cono situado en la parte inferior, sobre la cual se ubica la placa distribuidora de gas y por donde se ingresa el aire (agente fluidizante) y, un separador de partículas solido-gas o ciclón situado en la salida del gas. En el acrílico se encuentran conectadas algunas líneas de gas para la medición de presión en el tablero de manómetros de agua y de mercurio que miden el cambio de presión en diferentes partes del equipo. El sistema posee una válvula de regulación de la presión de salida del aire, proveniente de la línea de suministro de este, una válvula reguladora de flujo de gas y un rotámetro para la medición de caudal de aire (ver *Figura 3.12*)



*Figura 3.12. Fluidización en frío de la cascarilla de arroz tamaño natural*

Como primer resultado se encontró dificultad para fluidizar la cascarilla en su tamaño natural (diámetro promedio de 0,84 mm) para las condiciones de trabajo del reactor de gasificación, esto debido a la formación de flujo tapón y la geometría de la cascarilla que permite el entrecruzamiento de las fibras, disminuyendo la segregación y la libertad de movimiento de las partículas; en consecuencia, la biomasa fue sometida a un proceso de molienda para llevarla a un tamaño promedio de partícula de 1,35 mm y se le adicionó un

lecho de arena sílice de 20 cm con el fin de garantizar las condiciones de fluidización en el reactor. En la Figura 3.13 se presenta la curva de fluidización correspondiente.



**Figura 3.13. Curva de fluidización de la cascarilla de arroz, lecho de arena sílice**

En la Figura 3.13 se observa el aumento de la caída de presión en el lecho hasta alcanzar un valor aproximadamente constante. Una vez superada la velocidad de 0,15 m/s, por arrastre de partículas, la caída de la presión en el lecho disminuye. En la curva de desfluidización se observa el mismo comportamiento con caídas menores de presión en el lecho, esto se debe a que el lecho ya se encuentra totalmente expandido. En el punto donde la caída de presión permanece constante se estima la velocidad mínima de fluidización: 0,1 m/s.

**Propuesta experimental.** Basados en la revisión del estado del arte, presentada anteriormente, y en estudios previos sobre gasificación de biomasa residual en lecho fijo y lecho fluidizado (Basu, 2006), (Burgt, 2008) y (Farid Chejne, 2009), se establecen como intervalos de trabajo una relación equivalente entre 0,2 y 0,5 veces el aire estequiométrico para la combustión y una relación de hasta 1 kg de vapor por kg de biomasa (Almeida G, 2010). La propuesta experimental desarrollada se presenta en la Tabla 3-10.

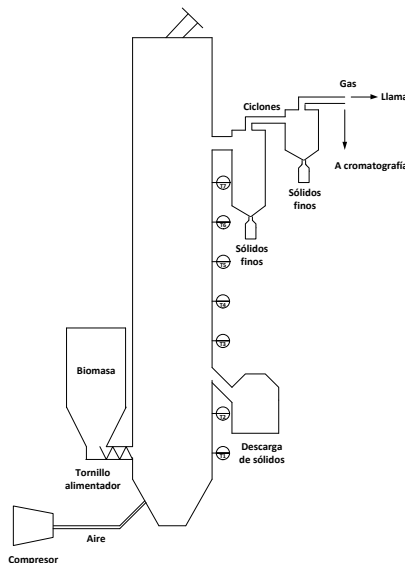
*Tabla 3-10. Propuesta experimental desarrollada*

Experimentos	Biomasa	ER	SB
<b>Secuencia 1</b>	Cascarilla de arroz	0,25	0,5
<b>Secuencia 2</b>	Cascarilla de arroz	0,35	0,5
<b>Secuencia 3</b>	Cascarilla de arroz	0,50	0,5
<b>Secuencia 4</b>	Cascarilla de arroz	0,35	0,7
<b>Secuencia 5</b>	Cascarilla de arroz	0,35	1,0

De acuerdo con la caracterización fisicoquímica y fluidodinámica realizada a la biomasa en cuestión, como consecuencia del mayor contenido de cenizas y del menor poder calorífico de la cascarilla de arroz, fue necesario proporcionar un porcentaje mayor de aire que permitiera mantener la temperatura del reactor.

**Descripción equipo experimental.** Las pruebas fueron realizadas en un reactor fabricado en acero inoxidable (AISI 310), cuyo esquema general se presenta en la Figura 3.14. El reactor tiene un diámetro interior de 22 cm y una altura de 400 cm, tiene una placa distribuidora de 142 agujeros de 1 mm de diámetro dispuestos en un patrón triangular. La pared del reactor está recubierta con una capa de 10 cm de cemento refractario y 15 cm de aislamiento de fibra cerámica. Cuenta con un tubo de rebose ubicado a 100 cm de la placa distribuidora que evacúa sólidos y mantiene constante la altura del lecho.





*Figura 3.14. Esquema general de equipo experimental*

Se monitoreó la temperatura del reactor por medio de termocuplas ubicadas a la entrada del aire, en el lecho y en el freeboard. La alimentación de la biomasa se realizó por medio de tornillos transportadores, previamente calibrados. El aire proveniente del compresor fue medido por un rotámetro y alimentado al reactor por la parte inferior.

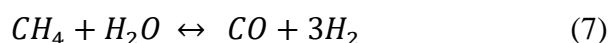
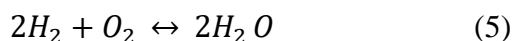
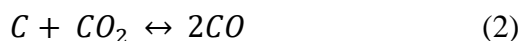
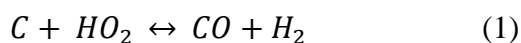
**Muestreo y análisis de gases.** Los sólidos finos arrastrados por la corriente de gas fueron retirados en dos ciclones conectados a un colector de partículas; el gas se divide en dos corrientes que van a la chimenea y a la línea de muestreo de gases. El muestreo de gases se realizó usando un tren de limpieza conformado por un filtro de fibra de vidrio para retener el material particulado, un sistema de burbujeo e impinger con sílica, gel para retirar humedad y así, finalmente, llevarlo al análisis en bolsas Tedlar®. El cromatógrafo usado es un Varian 3800, equipado con columnas Hayesep y Molsieve. El análisis se realiza en estado isotérmico a 40 °C durante un tiempo de 20 minutos con un detector TCD configurado a una temperatura de 170 °C.

**Protocolo experimental.** El calentamiento inicial del reactor se realizó mediante la combustión de carbón vegetal hasta alcanzar la temperatura de ignición de la biomasa; además, se empleó un lecho de material inerte con una altura de 40 cm y un diámetro de

partícula de 0,6. La biomasa fue sometida a un proceso de molienda previo para llevarla a un tamaño promedio de partícula de 1,35 mm y se fijaron los flujos del aire y la biomasa, de acuerdo con las condiciones experimentales. Una vez estabilizado el reactor, no se presentan cambios de temperatura mayores al 5% y, se inicia el muestreo y análisis de los productos de gasificación continuando cada 20 minutos.

### 3.3.2 Resultados de pruebas experimentales

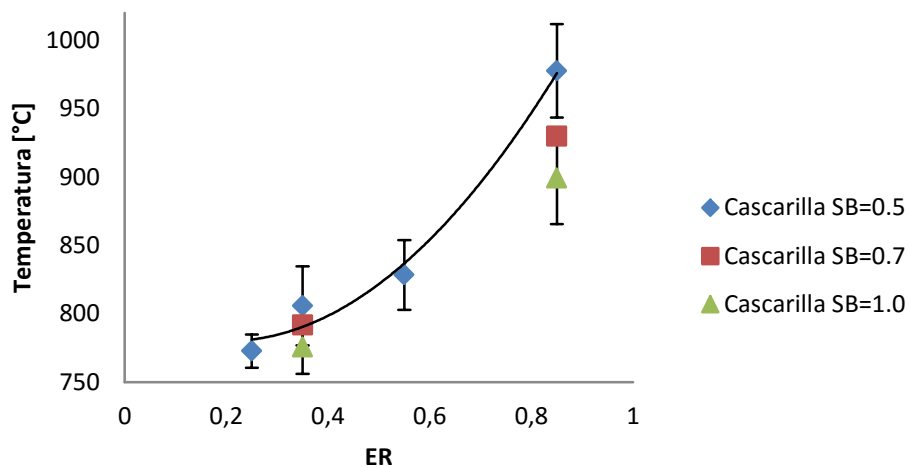
Los productos de gasificación fueron analizados por cromatografía para evaluar el efecto de la temperatura, la relación aire combustible y vapor combustible en la composición de estos. También se realizó un análisis último del char con el fin de presentar balances de materia y energía. Las principales reacciones que se dan en el proceso de gasificación se presentan a continuación:



El proceso de gasificación ocurre en tres etapas: devolatilización, donde el material se descompone térmicamente produciendo una fracción gaseosa rica en H<sub>2</sub> y un residuo carbonoso llamado comúnmente char; ocurre a partir de 150 °C. En la segunda etapa se llevan a cabo reacciones secundarias entre los mismos gases originados, consumiéndose la mayor parte del oxígeno alimentado al gasificador (reacciones 3, 4 y 5). Estas reacciones son exotérmicas y desprenden el calor necesario para producir las reacciones de gasificación. Posteriormente y una vez consumido todo el oxígeno, se producen las reacciones entre la

fracción gaseosa ( $\text{CO}$  y  $\text{H}_2\text{O}$ ) y el char, generando  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  y  $\text{CH}_4$  (reacciones 1, 2, 6, 7) Con base en esto, se analizarán los resultados obtenidos.

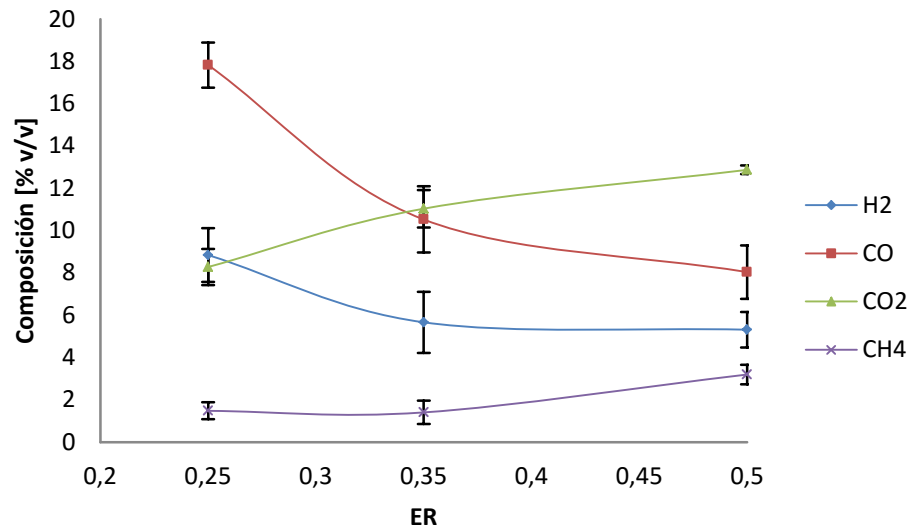
**Temperatura del proceso.** En un proceso de gasificación autotérmico, la combustión parcial de la biomasa mantiene la temperatura del reactor y proporciona la energía necesaria para las reacciones de gasificación. Es por esto que el aumento en la relación ER incrementa la temperatura, como se puede observar en la Figura 3.15, ya que favorece las reacciones de combustión que son exotérmicas.



*Figura 3.15. Temperatura de gasificación de cascarilla de arroz*

Por otra parte, las reacciones de gasificación con vapor son endotérmicas, por lo cual el incremento en la relación vapor/combustible disminuye la temperatura del proceso.

**Efecto de la relación aire-combustible sobre el rendimiento del proceso.** Como se mencionó anteriormente, la relación aire/combustible es determinante en la temperatura del proceso e indica la cantidad de oxígeno disponible para las reacciones de combustión y combustión parcial. Es así, que al aumentar la relación aire/combustible, aumenta el  $\text{CO}_2$  como producto de combustión y al disminuir la relación ER, aumentan los productos de gasificación  $\text{H}_2$  y  $\text{CO}_2$  hasta el punto donde la baja temperatura no permite que se dé el proceso de gasificación como se muestra en la Figura 3.16.



*Figura 3.16. Efecto de la relación aire/combustible-ER*

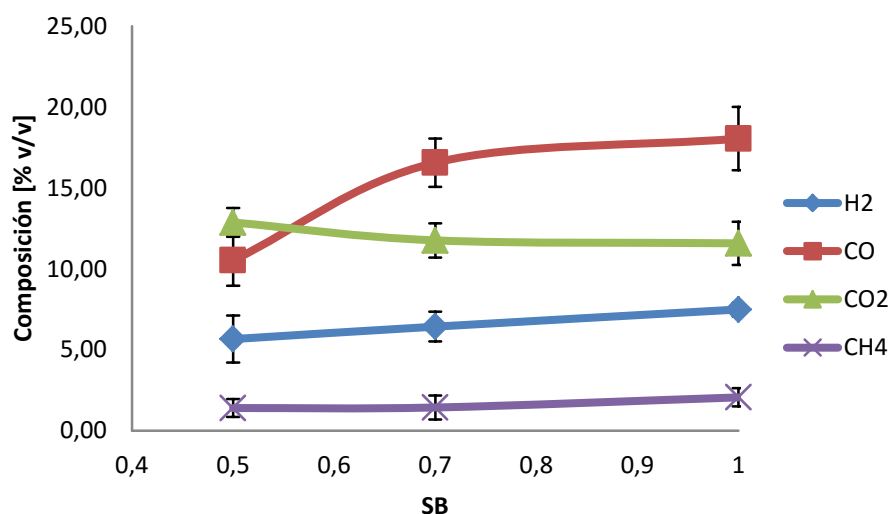
A medida que disminuye la relación ER, aumentan los productos de gasificación  $H_2$ , CO y  $CH_4$  como productos de desvolatilización de la biomasa, sus reacciones (6 y 7), las reacciones de gasificación con aire (reacción 3) con agua y dióxido de carbono (reacciones 1 y 2), productos de combustión (reacciones 4 y 5); esto explica la disminución en el porcentaje de  $CO_2$  en el syngas producto. En la Figura 3.17 se puede observar la llama producida por el syngas de la cascarilla de arroz gasificada con aire.



*Figura 3.17. Llama de syngas producto de gasificación de cascarilla de arroz con aire*

La llama fue de color naranja debido al alto contenido de monóxido de carbono. Esto demuestra que la gasificación con aire y poca cantidad de agua, hace que los productos del syngas sean ricos en monóxido de carbono (CO), apto para el uso en motores de combustión interna y generación de energía eléctrica.

**Efecto de la relación vapor-combustible sobre el rendimiento del proceso.** En el caso de la relación vapor/combustible, un cambio en SB genera dos efectos competitivos en las reacciones de gasificación. Por una parte, como se había señalado anteriormente, el aumento del vapor en el reactor disminuye la temperatura del proceso. A su vez, favorece las reacciones de gasificación con agua (reacciones 1 y 7). En la Figura 3.18 se muestran los resultados de las pruebas de gasificación con vapor.



*Figura 3.18. Efecto de la relación vapor/combustible SB*

Se observa un incremento de la participación del hidrógeno en el syngas producido, lo que da cuenta de la reacción de gasificación con el vapor de agua (reacción 1). También se observó un incremento en la proporción del monóxido de carbono y una disminución de la presencia de dióxido de carbono; lo cual indica que también se favoreció la reacción de gasificación de la biomasa con el CO<sub>2</sub> (reacción 3). A partir de la relación SB de 0,7, se

observó un aumento leve en el CO en comparación con los cambios anteriores. Esto como consecuencia de una caída de la temperatura de aproximadamente 150 °C, cuestión que lleva al proceso a disminuir las velocidades de reacción de gasificación tanto con el vapor de agua, como con el dióxido de carbono.

En la Figura 3.19 se puede observar la llama producida por el syngas de la cascarilla de arroz gasificada con aire y vapor. En dicha figura se evidencia una coloración azul debido al mayor contenido de hidrógeno y metano producto de las reacciones con agua.



*Figura 3.19. Llama de syngas producto de gasificación de la cascarilla de arroz con aire y vapor*

**Eficiencia energética.** En la Tabla 3-11 se presentan los resultados más importantes obtenidos en los balances de materia y energía para las pruebas de gasificación realizadas con cascarilla de arroz. El poder calorífico del syngas producido es bajo debido a la presencia de productos de combustión y a la dilución dada por el N<sub>2</sub> del aire. La prueba realizada a una relación ER de 0,25 presenta el mayor poder calorífico aunque con el menor índice de

producción de gas de síntesis, por lo que en términos de eficiencia el mejor punto de operación para la cascarilla de arroz se encuentra en ER de 0,35.

**Tabla 3-11. Resultados de las pruebas de gasificación de biomasa**

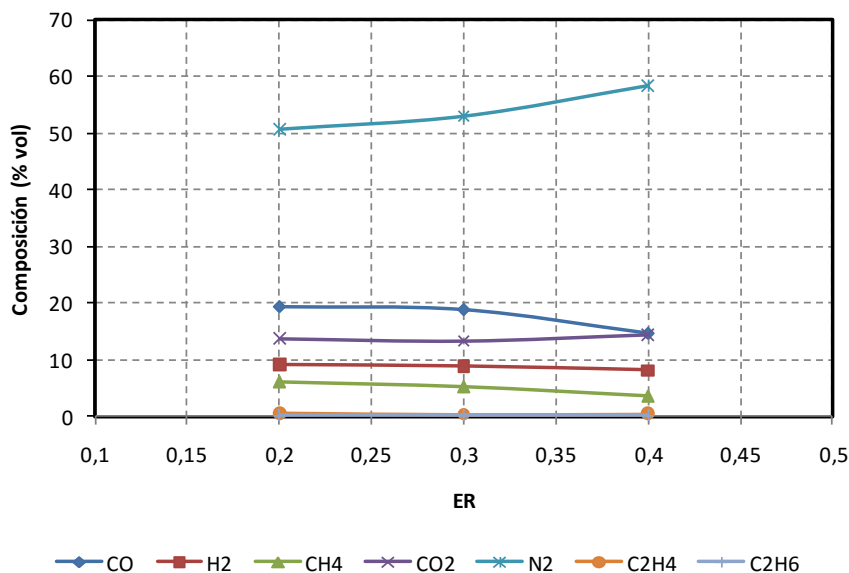
Biomasa	ER	SB	Relación syngas/Biomasa	Poder calorífico syngas [MJ/Nm <sup>3</sup> ]	Eficiencia [%]
<b>Cascarilla de arroz</b>	0,50	0,5	3,4	2,3	42,0
<b>Cascarilla de arroz</b>	0,35	0,5	2,0	3,2	47,2
<b>Cascarilla de arroz</b>	0,25	0,5	1,5	3,7	34,9

La relación syngas/biomasa de la cascarilla de arroz es alta, ya que el aire estequiométrico también lo es debido al menor contenido de oxígeno de los residuos de arroz y a su alto contenido de cenizas. Por otra parte, las pérdidas, en su mayoría, se originan por la oxidación parcial de combustible que permite alcanzar la temperatura necesaria para la gasificación y, por las pérdidas de calor a través de paredes y bridas del reactor. Por esta razón se encontraron eficiencias (expresadas en términos de la energía obtenida en el syngas vs. la energía del combustible) menores al 50%.

### 3.4 Gasificación de cardo, chopo y cañote de maíz

La gasificación de estas biomásas se realizó con el equipo descrito en la sección 2.2, en estas pruebas se modificó la relación ER para determinar la calidad del gas cuando se usa aire

como agente gasificante. Los resultados que se muestran en la figura 3.4-1 corresponden a cada una de las biomasas

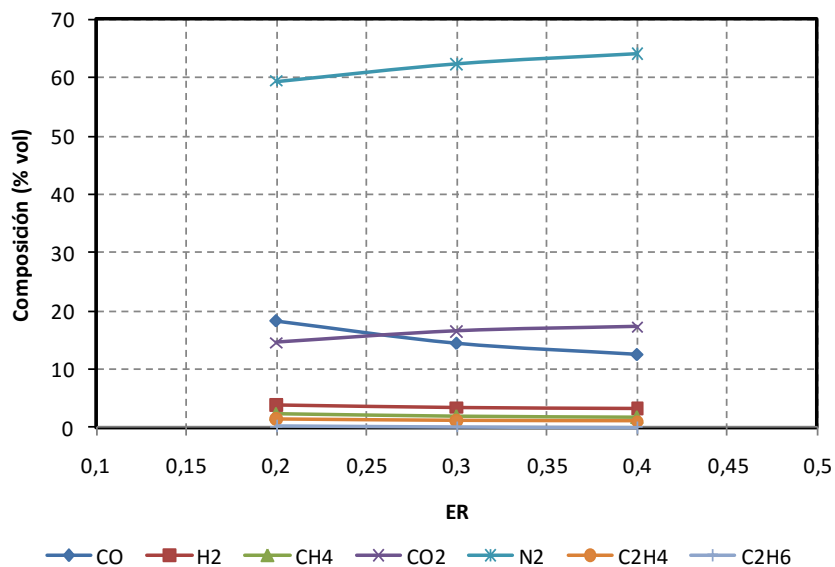


**Figura 3.20. Composición del gas de gasificación del chopo en función de la ER. Agente gasificante: aire**

En la figura 3.21 muestra la composición del gas de gasificación del chopo usando aire como agente gasificante, allí se aprecia como el incremento de la relación ER aumenta la producción de monóxido de carbono y se reduce la producción de hidrógeno y metano, con lo que se obtiene una reducción del poder calorífico del gas.

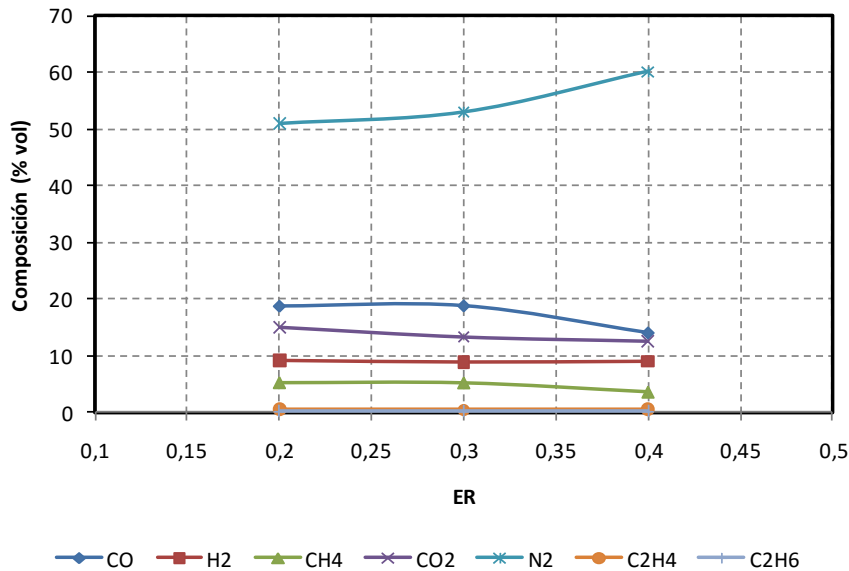
Respecto a la gasificación del cañote de maíz, bajas relaciones de ER favorecen la formación de monóxido de carbono, presentando valores cercanos al 20%, tal y como se presenta en la Figura 3.21.





**Figura 3.21** Composición del gas de gasificación del cañote de maíz en función de la ER.  
*Agente gasificante: aire*

En relación con la gasificación del cardo, bajas relaciones de ER favorecen la formación de monóxido de carbono, pero también de hidrógeno, presentando valores cercanos al 20% y 10%, respectivamente. Esto genera un gas con un poder calorífico relativamente alto que permite su uso en aplicaciones de generación eléctrica (ver Figura 3.22).



**Figura 3.22** Composición del gas de gasificación del cardo en función de la ER. Agente gasificante: aire

Esta característica general de reducción en la composición de monóxido de carbono e hidrógeno con el incremento en la relación ER, sugiere que la gasificación de biomasa presenta retos importantes en la tecnología del lecho fluidizado, debido a que normalmente se requiere incrementar el flujo de gas para alcanzar la condición de fluidización, y para esto es necesario recurrir a nitrógeno u otro gas inerte, incrementando los costos y manejo de la tecnología.

### 3.5 Apuntes Finales

En resumen, se puede decir que el cardo, el chopo, el cañote de maíz y la cascarilla de arroz son biomásas factibles de ser gasificadas tanto en reactores de lecho fluidizado como en los de lecho fijo. Además, es altamente recomendable su peletización para lograr una mayor uniformidad del tamaño de partícula. Dicho procedimiento provoca uniformidad en el tiempo

de residencia para el proceso de gasificación, incrementa la densidad energética y favorece el almacenamiento de biomasa.

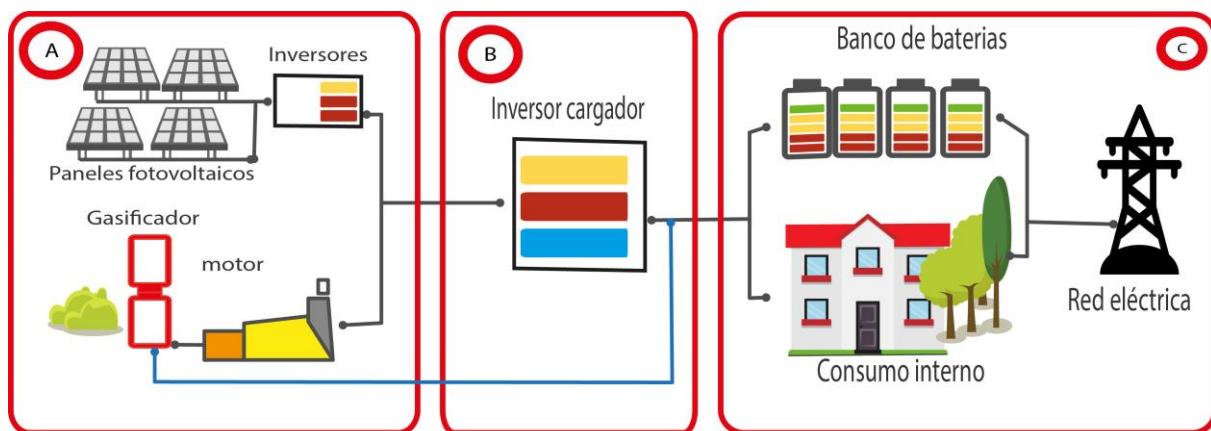
## **4 PLANTA PILOTO HÍBRIDA PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN ZONAS AISLADAS**

Los sistemas híbridos permiten la generación de energía eléctrica de una manera eficiente, puesto que aprovechan el recurso disponible en el momento en que se requiere. Por lo tanto, cuando no se disponga del recurso de la energía solar, que como sabemos, solo está disponible durante unas horas del día, tiempo durante el cual funciona eficientemente, se puede recurrir a sistemas alternos como la generación de motor con el recurso de biomasa a través de la gasificación y, de esta manera, garantizar la generación continua de energía.

Otra ventaja de los sistemas híbridos está relacionada con la posibilidad de suplir las necesidades de energía de los sistemas de generación constantes, aprovechando la generación discontinua de aquellos recursos intermitentes. En este sentido, el sistema de generación permanente puede ser la generación con motores de combustión interna a través de la gasificación de residuos agroindustriales que facilita la generación de un gas combustible; por su parte, recursos intermitentes como la energía solar podrían suplir los requerimientos energéticos de arranque y estabilización del sistema continuo. Además, se podría acumular la energía en sistemas de almacenamiento adecuado para suplir necesidades por defectos en el suministro eléctrico.

En este capítulo se presenta la descripción y puesta en marcha del sistema híbrido para la generación de energía eléctrica ubicado en el laboratorio de Ciencias de la Energía, adscrito al

Departamento de Procesos y Energía de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. El sistema híbrido se puede dividir en cuatro bloques: generación eléctrica (ver Figura 4.1.A), administración de potencia del sistema (ver Figura 4.1.B), almacenamiento y consumo eléctrico (ver Figura 4.1.C). La viabilidad de la implementación de este sistema depende, en primera medida, del recurso solar y de biomasa disponibles en el lugar donde se quiera usar.



*Figura 4.1. Diagrama de bloques del prototipo de generación de energía híbrido*

Este sistema se debe implementar según la capacidad energética requerida para un adecuado suministro en la zona aislada. Una vez definida la capacidad nominal, se evalúa la capacidad de almacenamiento requerida, con el objeto de disminuir los costos de operación.

#### **4.1 Sistema solar fotovoltaico**

El sistema solar fotovoltaico de la planta híbrida desarrollada en el proyecto HIBRELEC se presenta en la Figura 4.2, allí se pueden ver los paneles debidamente instalados y el sistema de control inteligente que permite la selección y suministro del recurso. Este sistema está en capacidad de generar una red trifásica de 5,39 kW. Esta potencia está dimensionada para el consumo de cargas convencionales de 120 y 208 VAC, para una generación promedio de 19 kWh por día. El sistema se compone de 2 arreglos de 11 paneles cada uno, para un total de 22

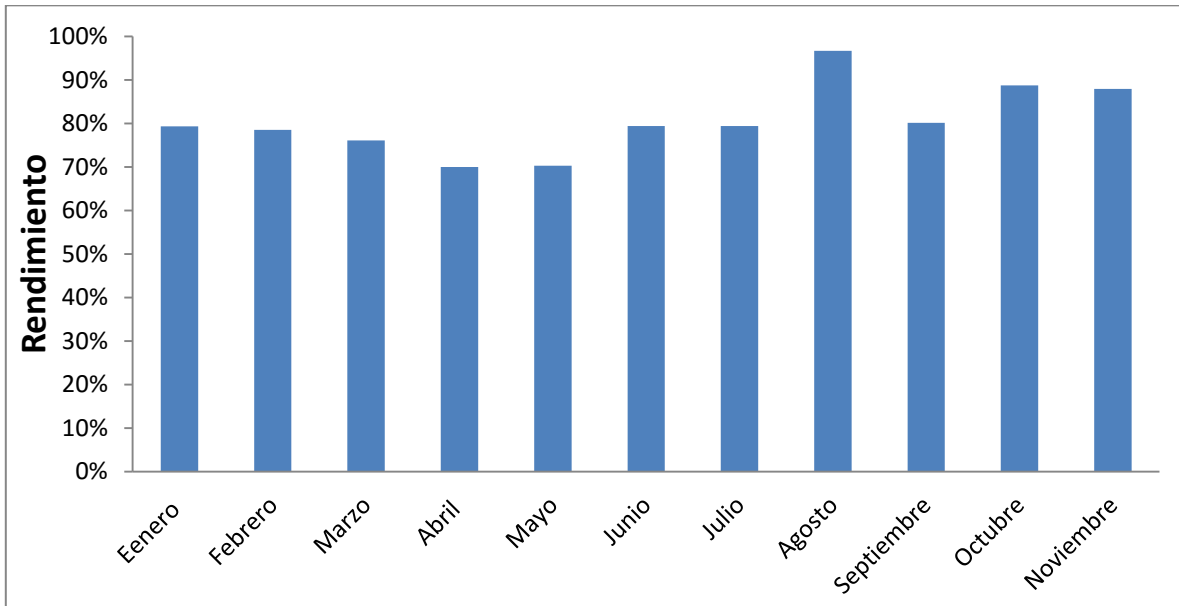
paneles solares fotovoltaicos policristalinos de 245 W, un inversor de conexión y un sistema de monitoreo.



**Figura 4.2. Sistema de captación solar fotovoltaica**

En la figura 4.2 se pueden observar: A) campo de paneles policristalinos, B) inversores/cargadores, C) baterías y D) inversor. Para garantizar que el sistema genere la mayor cantidad de energía posible se debe procurar: limpiar los paneles con espuma especial para ello, sin utilizar abrasivos ni detergentes, podar vegetación si es necesario y retirar objetos que puedan estar produciendo sombra, verificar conexiones entre paneles y revisar cables y terminales y, finalmente, realizar el monitoreo de los datos de generación frecuentemente.

En la Figura 4.3 se presenta el rendimiento de la instalación para el año 2015, este sistema tiene una capacidad de 5.39 kWp durante los meses de funcionamiento.



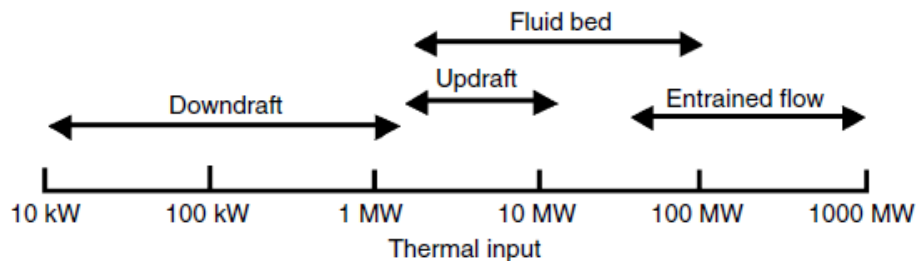
**Figura 4.3. Rendimiento solar por meses para el año 2015.**

El año 2015 fue enmarcado por el fenómeno del niño como lo reportó el instituto de Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, se presentaron sequias y alta radiación solar, cuestiones que se ven reflejadas en el rendimiento promedio de la instalación, cerca del 81%. Para la ciudad de Medellín los picos de radiación más altos se dan entre los meses de julio y octubre.

Para este periodo de tiempo las reducciones de emisiones, de acuerdo con los datos suministrados por FRONIUS SOLAR WEB, los cuales están sujetos a la normatividad europea, corresponden a 6.40 Toneladas de CO<sub>2</sub> 29036 Km de circulación de un auto familiar, el equivalente a sembrar 223 árboles y un ahorro de \$2 730 496.

## 4.2 Reactor Downdraft y motor-generador de combustión de gas pobre

**Elección de reactor de lecho fijo Downdraft.** Teniendo en cuenta el rango entre aplicación, para el cual se recomiendan las diferentes tecnologías de gasificación reportadas en la literatura (Figura 4.4), se realizó el diseño de un gasificador de lecho fijo Downdraft para un proyecto de baja escala.



*Figura 4.4. Rango de aplicación de diferentes tipos de gasificadores (Basu, 2010).*

Así mismo, se tuvo en cuenta la versatilidad en la operación del equipo y el rango de tamaño de partículas que van desde 2 a 10 cm. También resulta más fácil la operación en lecho fijo que en lecho fluidizado, y para lugares aislados donde se instalará el prototipo es un factor crucial. Los gasificadores de lecho fijo Downdraft tienen como ventaja la baja producción de tar en comparación con otras tecnologías de lecho fijo, además de su aplicación a baja escala.

El reactor Downdraft fue diseñado para generar gases combustibles que se aprovechan en un motor-generador de combustión de gas pobre. Este motor cuenta con un sistema de control para la generación eléctrica con una potencia disponible máxima de 25 kW.

### 4.2.1 Reactor Downdraft

El gasificador Downdraft, funciona haciendo uso de un exceso de aire, este se usa para llevar a cabo la combustión de una fracción de material orgánico (carbón o biomasa). La energía liberada por esta combustión permite, junto con el residuo de aire, que se dé la gasificación de la fracción restante de materia orgánica. En este proceso se generan gases

combustible y alquitranes que se ven obligados a viajar por un lecho a alta temperatura en donde son craqueados, formando igualmente más gases combustibles.

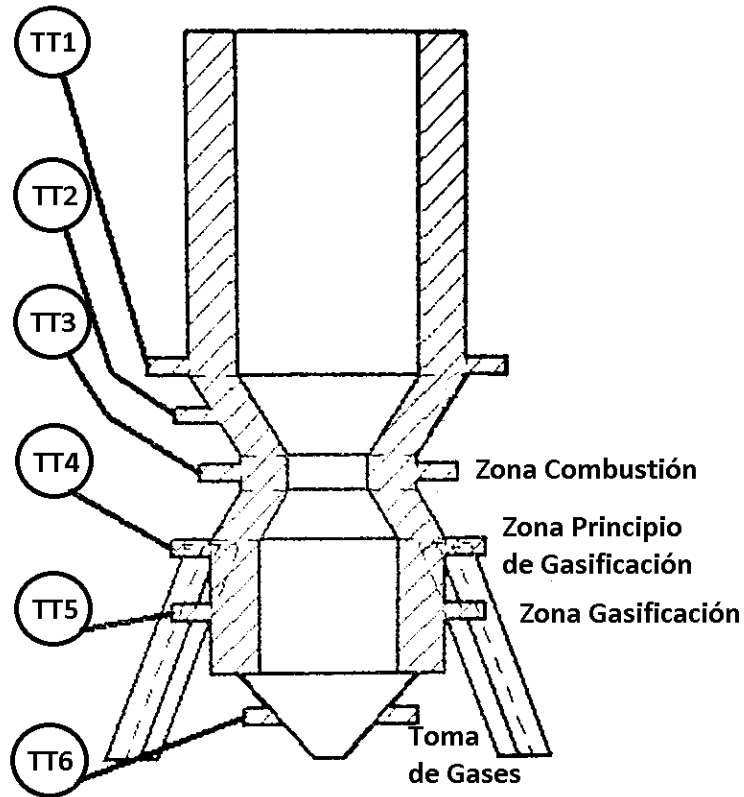
La velocidad de entrada de los gases está condicionada por los parámetros de diseño, como diámetro del reactor y diámetro de la garganta; para este caso la garganta tiene un radio de 12,5 cm necesario para lograr que el flujo de aire proveniente de la tolva se equipare con el de las entradas laterales que realizan la combustión sobre la biomasa. Esta velocidad es de 31 m/s. tras el proceso de diseño se tienen los siguientes parámetros mostrados en la Tabla 4-1

**Tabla 4-1. Principales parámetros del diseño**

Parámetro	Valor
Capacidad	50 kg/h
Capacidad de la tolva	25 kg
Diámetro del reactor	52 cm
Diámetro de la garganta	25 cm
Ángulo de la garganta	60°
Longitud de la zona de reducción	35 cm
Entrada de aire	29 cm
Velocidad del aire	30-35 m/s

El reactor fue fabricado en acero inoxidable tipo 304, calibre 4,5 milímetros, revestido en la zona de combustión para alta temperatura con concrax 1500 y para la zona de gasificación con concrax 1300 con 15 cm de espesor (ver Figura 4.5). Cuenta con 6 termocuplas tipo K, un tamiz soporte para pélets fabricado en acero 310, 5 conexiones para toma de muestras, una compuerta tipo chapola para la salida de cenizas, flanches con sello superior y en la salida de cenizas y, un soplete de gas para el arranque del reactor.





*Figura 4.5. Esquema del gasificador Downdraft*

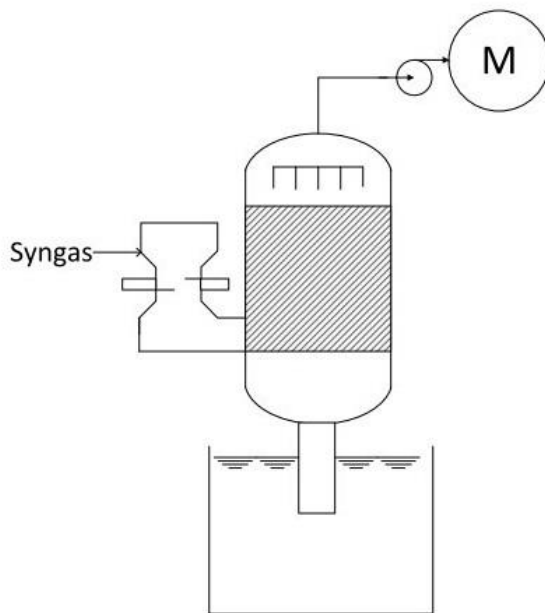
El reactor tiene capacidad para procesar 12 kg/h de cascarilla cruda o 50 kg/h de biomasa en forma de pélets; además puede almacenar en la tolva 60 kg de cascarilla cruda o 200 kg de pélets, tiene un diámetro total de 52 cm, 25 cm en la garganta y 35 cm de longitud en la zona de reducción con una velocidad del aire de 30-35 m/s.

#### **4.2.2 Sistema de limpieza de gases**

Después de una reacción de gasificación se debe implementar un sistema de limpieza, ya que el gas de síntesis crudo que sale del gasificador contiene una serie de contaminantes sólidos y fluidos que deben ser removidos. Este proceso, por lo general, se hace a alta temperatura para lograr una buena eficiencia. Sin embargo, en el caso de la aplicación a motores de combustión interna se recomienda realizar el proceso de limpieza a bajas temperaturas para obtener un gas a temperaturas menores de 100 °C debido a que, a estas temperaturas el gas es de mayor densidad energética. Además, el proceso de limpieza es

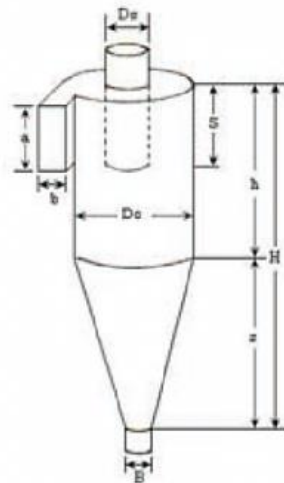
necesario para proteger los equipos porque dependiendo del tipo de aplicación, cada contaminante crea riesgos específicos en su uso, desde las ineficiencias del proceso derivadas de alteraciones de tuberías, hasta fallas catastróficas como la desactivación rápida y permanente de catalizadores.

El sistema de limpieza elegido para este proyecto, en donde el gas de síntesis es producido en un gasificador Downdraft (lecho fijo), se compone de un ciclón, unidades filtrantes y un sistema de limpieza con agua. Este sistema es robusto y fiable, con él se minimiza el contenido de alquitranes y partículas, la temperatura del gas de síntesis disminuye, pues a la entrada del motor es menor a 50 °C; de esta manera asegura su buen funcionamiento (ver Figura 4.6). Se debe agregar que un sistema de monitoreo, control y alerta, es fundamental para asegurar el correcto funcionamiento del sistema.



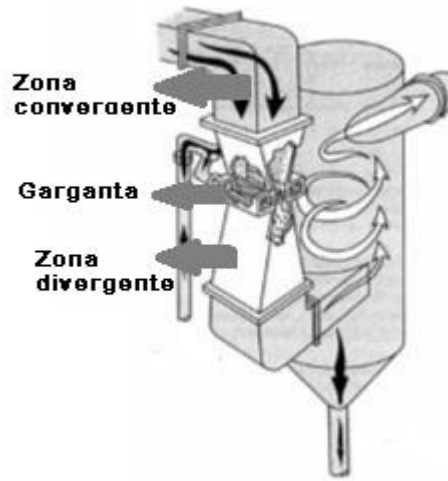
**Figura 4.6. Sistema de limpieza de gases**

El ciclón que se recomienda para este tipo de aplicaciones es el de alta eficiencia Stairmand que está diseñado para remociones de partículas pequeñas (5  $\mu\text{m}$ ). Este tipo de ciclón opera correctamente cuando el 34,5 % del tamaño de las partículas está por debajo de los 60  $\mu\text{m}$  y el 45% de las partículas está por debajo de los 10  $\mu\text{m}$  (ver Figura 4.7).



**Figura 4.7. Dimensiones del ciclón (Landau, 1937).**

Existen otros sistemas de limpieza posteriores al ciclón, desde los más sofisticados hasta los más simples. Entre los más sofisticados se encuentra el lavador Venturi hecho en acero inoxidable para que posea una buena resistencia a la corrosión y termofluencia. Un lavador Venturi es identificado por poseer tres zonas: zona convergente, garganta y zona divergente (ver Figura 4.8) (Hesketh & Mohan, 1983). Parámetros como el flujo del gas, temperatura y humedad, determinarán la cantidad de líquido que se evaporará; a mayor evaporación, mayor será la cantidad de líquido a suministrar para tratar el gas. El flujo del gas determinará el tamaño del lavador. Cabe resaltar entre otras cosas que, al aumentar la velocidad se producirá también un aumento en la caída de la presión, lo cual determina que debe haber un equilibrio razonable entre ambas variables. La relación líquido–gas (L/G) representa el volumen de líquido que debe suministrarse para tratar un volumen determinado de gas, mientras mayor es dicha relación, se puede esperar también una mayor eficiencia de remoción en el lavador.

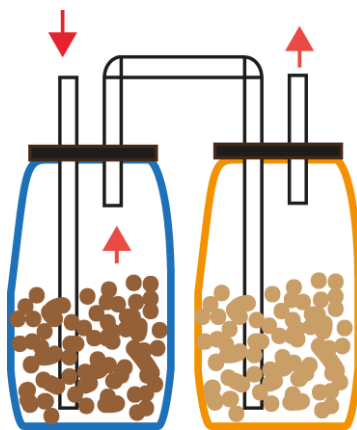


*Figura 4.8 Lavador de gases Venturi*

Es posible creer que un mayor diámetro en las gotas del líquido sería beneficioso para el desempeño de un lavador de gases; sin embargo, a mayor tamaño de las gotas, menor es el área superficial disponible para la captación de partículas. Por otro lado, un tamaño muy pequeño provocaría que la corriente gaseosa acelere rápidamente las gotas a la velocidad del gas, reduciendo de esta forma la velocidad relativa, e inclusive, arrastrando el líquido fuera de la cámara. Por lo tanto, el diámetro adecuado de las gotas del líquido fluctúa entre 500  $\mu\text{m}$  y 1000  $\mu\text{m}$ . Por último, la longitud de la garganta y de la zona divergente del lavador Venturi deberá permitir el contacto suficiente entre las gotas y las partículas, por lo menos hasta que las gotas sean aceleradas hasta la velocidad del gas; una vez que las gotas del líquido de lavado y las partículas alcanzan la misma velocidad, los principales mecanismos de colección (impacto inercial e intercepción) reducen su efecto drásticamente.

Un sistema de limpieza de gas un poco más simple que el lavador Venturi, consta de tanques de filtración en los que se utiliza madera en diferentes tamaños para retener los alquitranes. También se pueden usar soluciones líquidas básicas para retener el contenido de ácidos formados en la gasificación, su aplicación no genera residuos sólidos contaminantes, pues cuando la madera está saturada de contaminantes, esta se puede transformar

energéticamente en el gasificador, evitando daños ambientales en la zona de aplicación (ver Figura 4.9).



*Figura 4.9. Sistema de limpieza simple*

Este sistema simple es más fácil de implementar en zonas aisladas, ya que cuenta con pocos suministros para su construcción.

#### **4.2.3 Motor de generación eléctrica**

El motor-generator de combustión interna es estándar y adaptado para funcionar con gas de síntesis proveniente del reactor de gasificación y con capacidad de generación eléctrica de 30 kW (modelo LHBMG30 de LVHUAN POWER EQUIPMENT CO). El equipo está adecuadamente instrumentado, con conexiones requeridas entre el motor y el sistema de limpieza de gas (ver Figura 4.10).



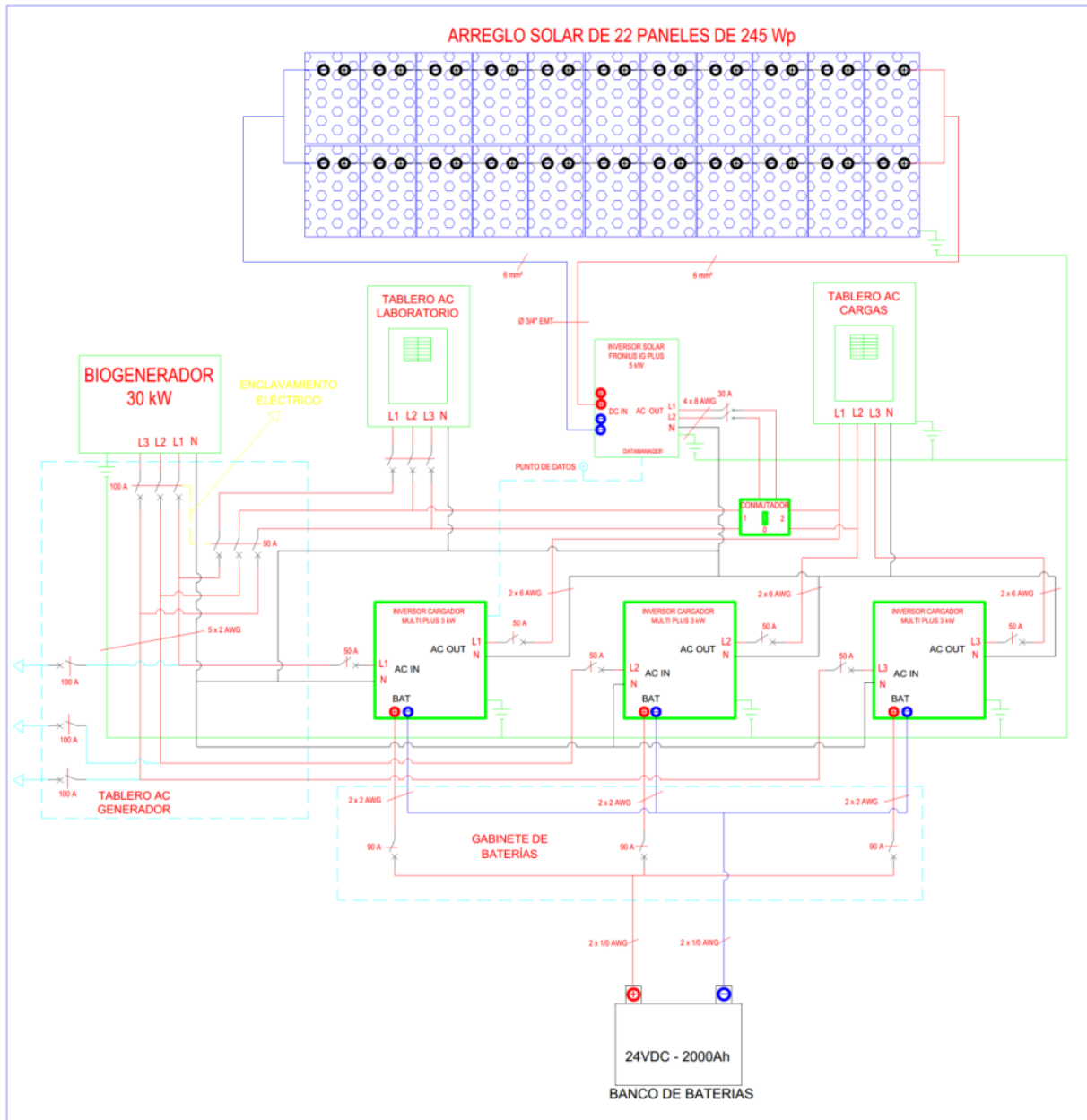
*Figura 4.10. Motor generador para gas pobre*

El adecuado funcionamiento del motor se asegura con refrigerante AC pre-diluido 50/50, aceite lubricante 15W40 para motores a gas, manómetro para presión de aceite y termocuplas para monitorear la temperatura del refrigerante aguas arriba y aguas abajo del radiador; existen motores que incluyen el manómetro y las termocuplas. Adicionalmente, se debe realizar la conexión de entrada de gases al motor. Para esto fue necesaria la selección y adquisición de un ventilador que permita llevar los gases desde el sistema de limpieza hasta el motor-generador.

#### **4.3 Sincronización de la generación fotovoltaica y energía proveniente del motor-generador**

La planta piloto del sistema híbrido está ubicada en la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Esta planta fue diseñada para energizar el laboratorio de Ciencias de la Energía. El sistema híbrido gasificador-motor-solar cuenta con un diseño de control que permite integrar todos los sistemas, redireccionando la energía donde sea requerida (ver Figura 4.11). Cuando el sistema solar está generando, el inversor cargador principal se sincroniza con los inversores cargadores secundarios para enviar energía al banco de baterías, a la red o al consumo inmediato del usuario final (en nuestro caso el laboratorio

de Ciencias de la Energía). Cuando el motor generador ingresa al sistema, los inversores cargadores secundarios sincronizan las fases para cargar las baterías o para suplir la demanda energética instantánea. Así mismo, un contactor de seguridad aísla el inversor de conexión para evitar que se encuentren las corrientes de los paneles solares y del motor, evitando así que se presente un cortocircuito. En otras palabras, cuando entra en funcionamiento el generador por combustión del gas de gasificación, los paneles solares se aíslan del suministro de energía.



*Figura 4.11. Diagrama de conexiones eléctricas*

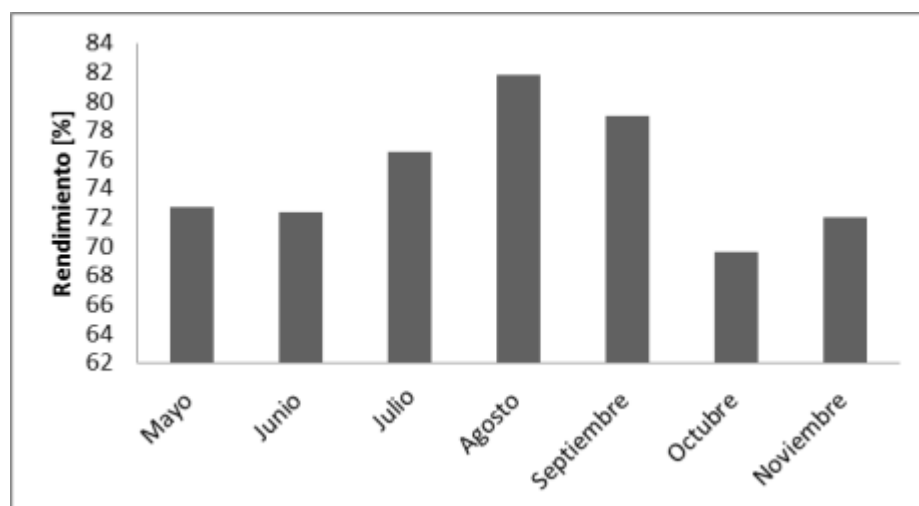
Este sistema de generación de energía híbrida está equipado con un banco de 48 baterías de 2 V / 500 Ah conectadas en dos grupos de 24 para formar un banco de baterías con una capacidad de 24 V / 2000 Ah, el cual alimenta tres inversores/cargadores de 3000 VA con los que se forma una red trifásica con capacidad de 9 kW y un nivel de tensión de 208V o 120V. Así se tendrá, bajo condiciones normales de radiación y temperatura en la zona y haciendo un



uso adecuado de los mismos, un sistema que proporciona electricidad continuamente, gracias al banco de baterías que almacena la energía producida por el arreglo fotovoltaico durante el día y por el motor-generador cuando este sea encendido.

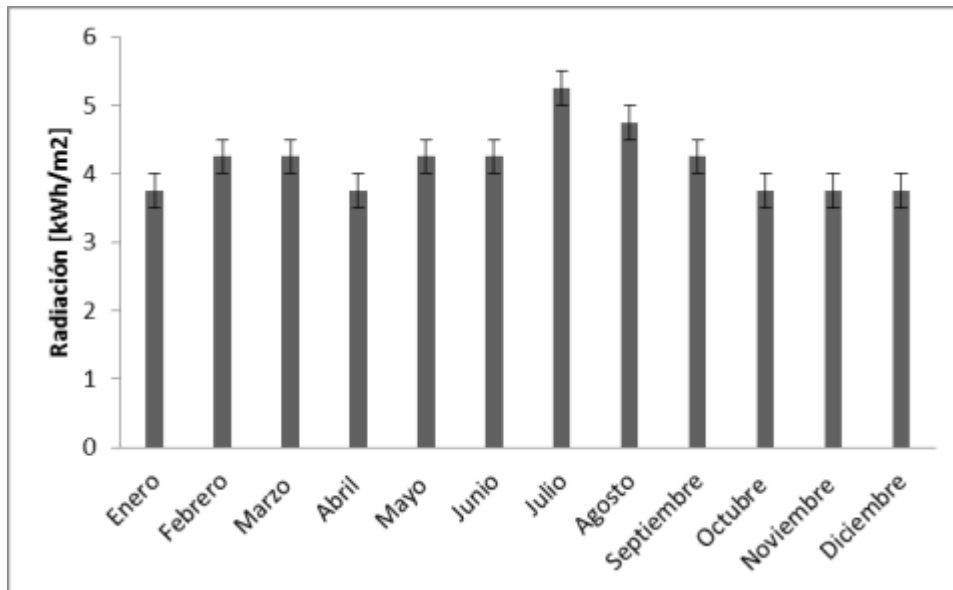
#### 4.4 Puesta en marcha del prototipo

El sistema solar fotovoltaico entró en funcionamiento en el mes de mayo de 2014 y fue monitoreado a través de la plataforma solar web. En la Figura 4.12 se presenta el rendimiento de la instalación con capacidad de 5.39 kWp durante los meses de funcionamiento.



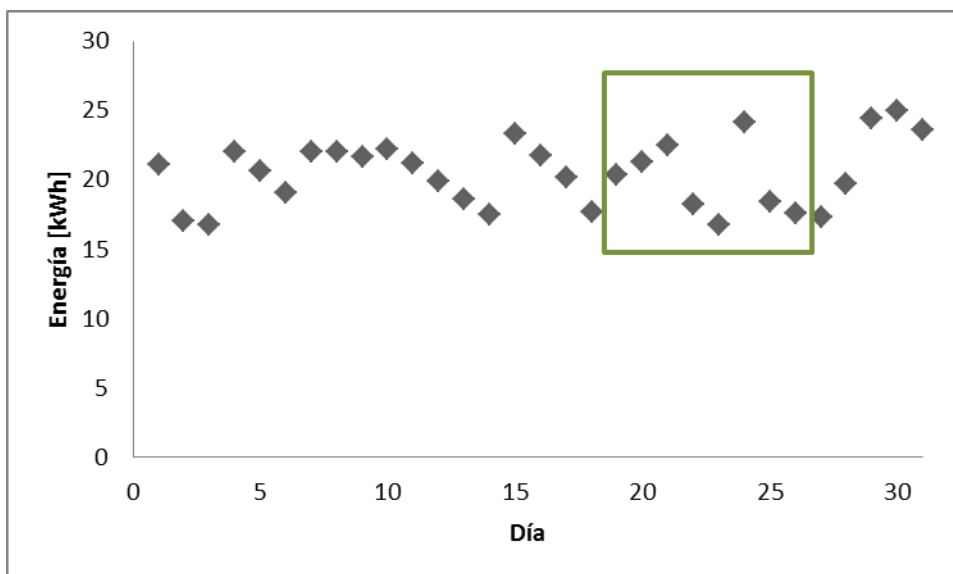
*Figura 4.12. Rendimiento del sistema fotovoltaico*

En el reporte del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM del año 2014 (IDEAM, 2014) para la ciudad de Medellín entre los meses de julio y septiembre, se presentaron los valores más altos de radiación solar: entre 4,5 y 5,5 kWh/m<sup>2</sup> (ver Figura 4.13). Este periodo de alta radiación solar se ve reflejado en el rendimiento del sistema fotovoltaico (Figura 4.12) con rendimientos entre el 75% y el 82% para ese mismo periodo de julio-septiembre.



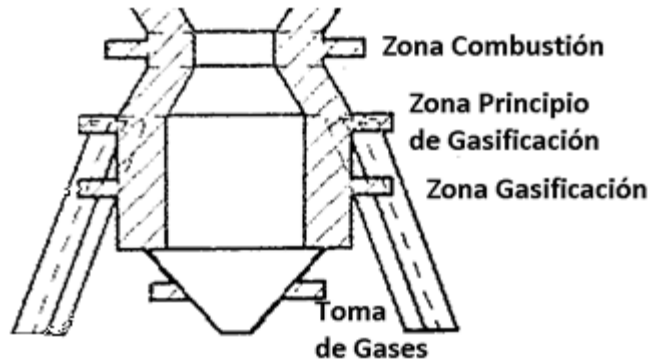
*Figura 4.13. Promedio mensual de radiación en la ciudad de Medellín (UPME; IDEAM, 2005).*

Al analizar más detalladamente la producción de energía del sistema en el mes de agosto (mes con mayor rendimiento), se observa en la Figura 4.14 una producción diaria entre 15 y 25 kWh, dependiendo de las condiciones climáticas y de radiación solar.



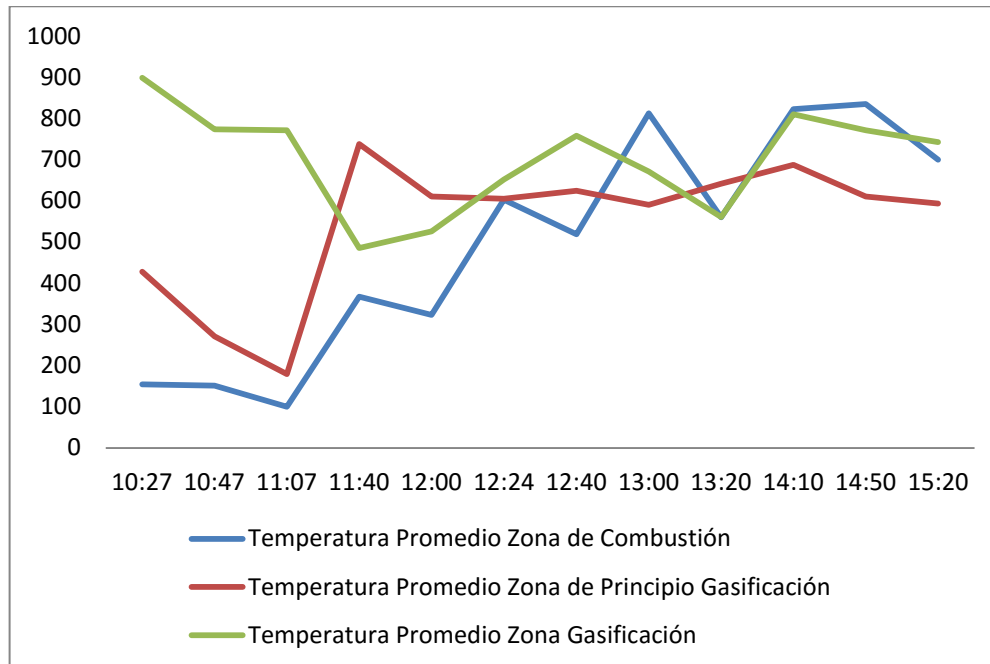
**Figura 4.14. Energía producida por sistema fotovoltaico durante el mes de Agosto de 2014**

Por otra parte, los experimentos en el reactor de gasificación de biomasa empezaron a realizarse en diciembre de 2015. El objetivo fue verificar la existencia de la zona de gasificación y determinar el poder calorífico del gas producido. Por consiguiente, se tomaron datos de temperatura en la zona de combustión, en la zona de principio de gasificación y en la zona de gasificación (Figura 4.15). Se midió la concentración de gases extraídos en la parte inferior del reactor. Todas estas mediciones se hicieron siempre sincronizadas.



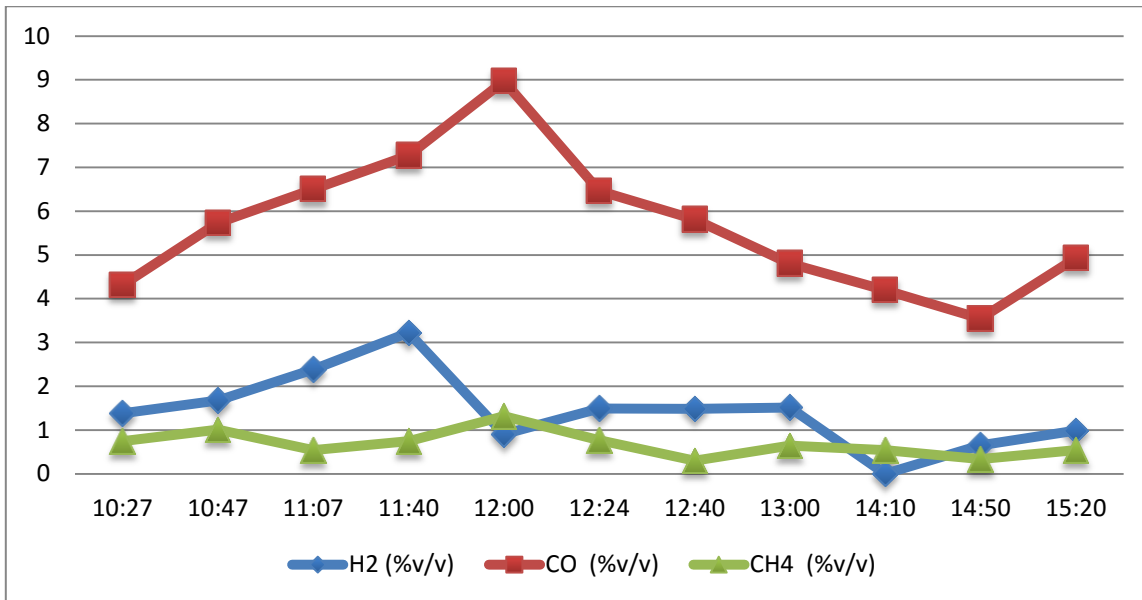
**Figura 4.15 Zonas del reactor donde se hicieron mediciones de temperatura y se tomaron gases**

La Figura 4.16 muestra el comportamiento de las temperaturas en las zonas del reactor descritas anteriormente (ver Figura 4.15). Las temperaturas se calcularon tomando el promedio de las mediciones de dos puntos diametralmente opuestos en la misma zona. Para ello se usaron termocuplas tipo K instaladas en el reactor.

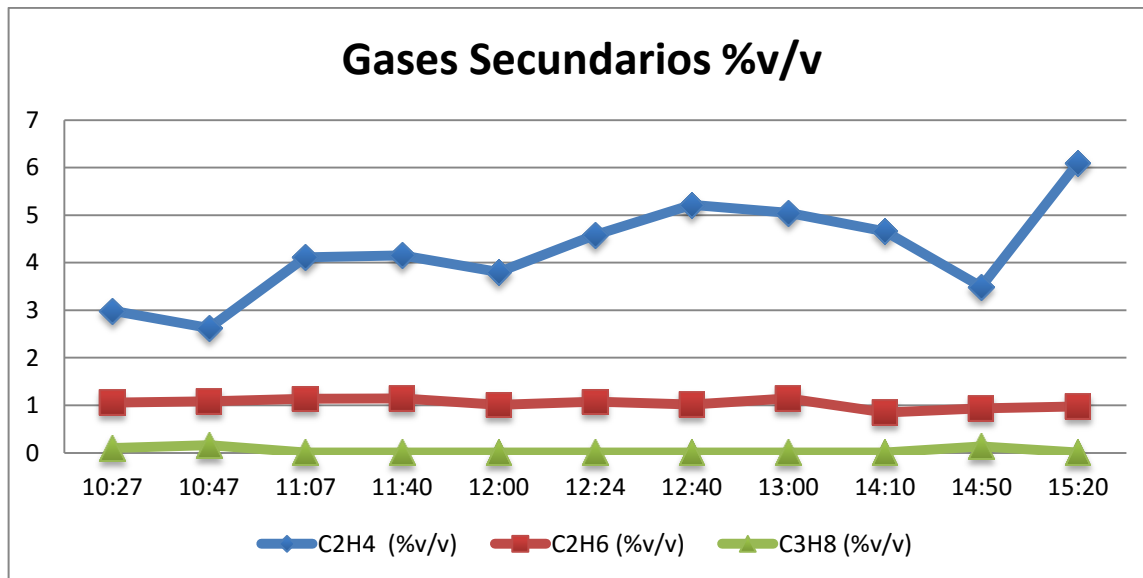


**Figura 4.16. Evolución de la temperatura en las zonas de combustión y gasificación del reactor Dawndraft encendido. Temperatura en °C**

Nótese que en la Figura 4.16, a partir de las 12:00 la temperatura en la zona de gasificación permanece aproximadamente entre 600 °C-800 °C. Durante este tiempo se nota un aumento considerable de la concentración de monóxido de carbono y eteno (Figura 4.17 y Figura 4.18).

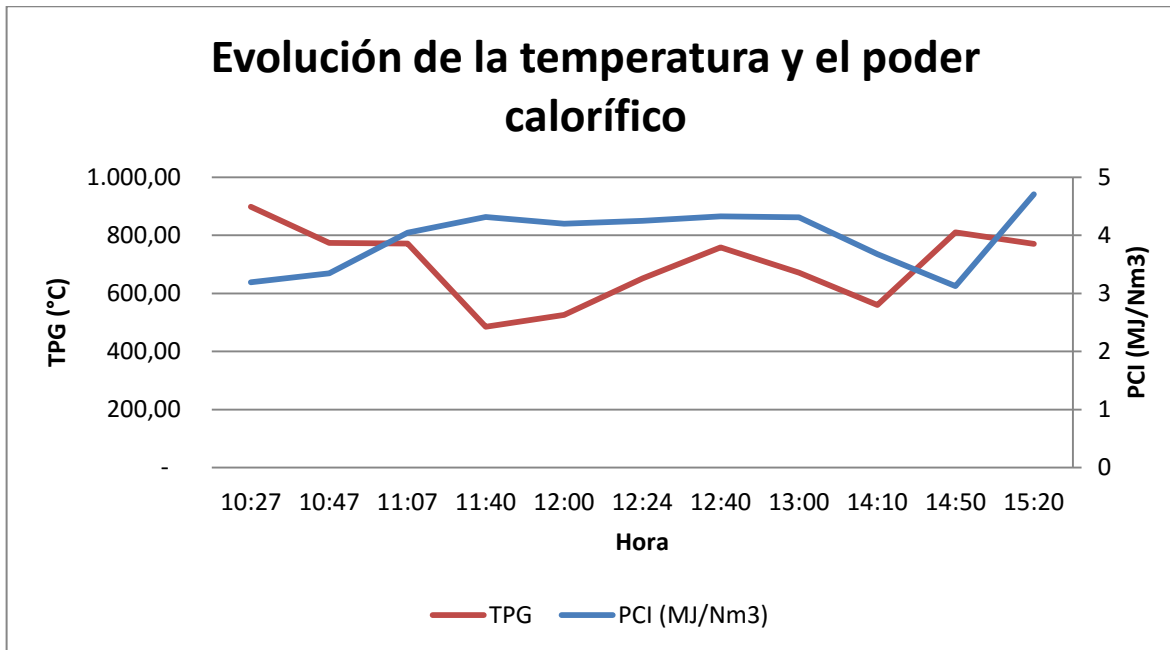


*Figura 4.17. Concentración de gases primarios de gasificación*



*Figura 4.18. Concentración de gases secundarios de gasificación*

Con estas concentraciones de gases se calculó el poder calorífico inferior (PCI) y se obtuvieron valores por encima de 3 MJ/Nm<sup>3</sup>. Existe una cierta correlación entre el comportamiento del PCI con la temperatura en la zona de gasificación (Figura 4.19). El PCI fue suficiente para garantizar la puesta en marcha del motor generador para gas pobre.

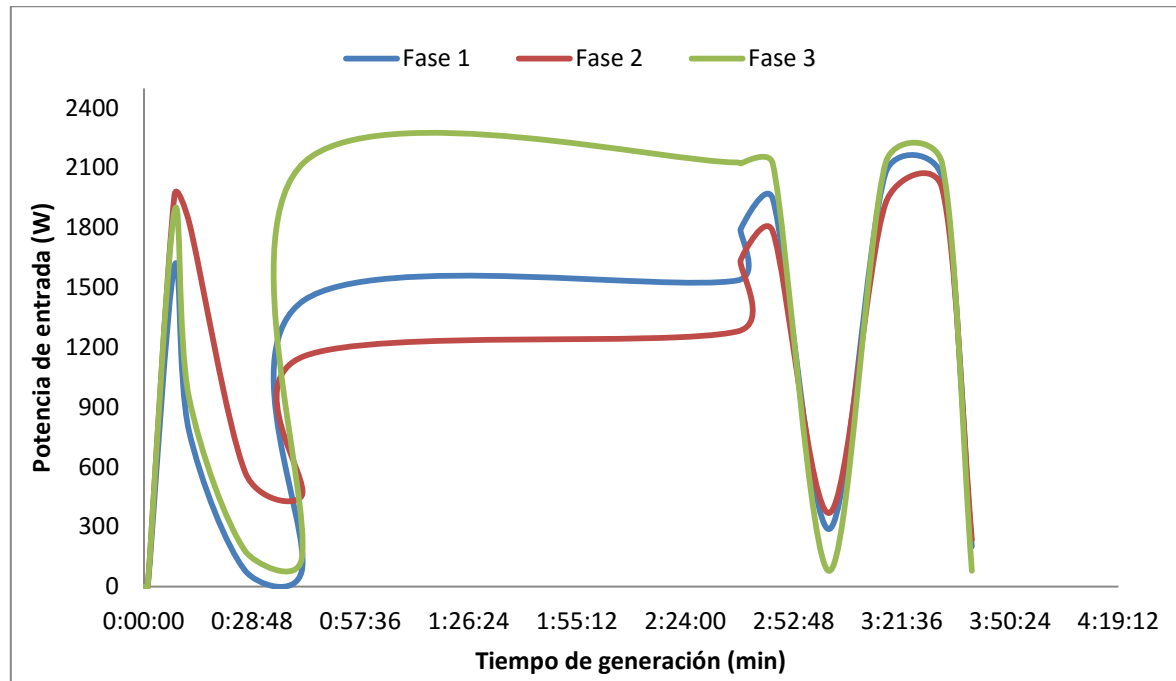


**Figura 4.19. Evolución del poder calorífico y la temperatura en la zona de gasificación del reactor Downdraft encendido**

A las cenizas extraídas del reactor se les hizo un análisis de CHN y se consiguieron porcentajes de carbono de 27,69 %<sup>w/w</sup>, hidrógeno 0,6 %<sup>w/w</sup> y nitrógeno 0,32 %<sup>w/w</sup>. Esto significa que el proceso de gasificación en el Downdraft no se hizo de manera completa y genera inquemados que deben ser evaluados para definir un posterior uso de los residuos.

#### 4.4.1 Medición de la potencia eléctrica generada por el sistema híbrido

El banco de baterías se descargó mediante resistencias y equipos disponibles en planta hasta el 40% con el fin de cargarlas y cuantificar la energía producida por el motor, posteriormente se realiza una prueba de gasificación para producir el sygas. El reactor alcanza la temperatura de gasificación después de aproximadamente 3 horas de encendido, luego se da paso hacia el motor generador. La potencia generada por el sistema gasificador-generador se muestra en la Figura 4.20.



**Figura 4.20. Potencia eléctrica del generador-gasificador**

El sistema conjunto presenta picos en la generación de energía, los cuales corresponden a la sincronización del sistema sola-motor, es decir, al inicio de la prueba el motor generador presenta 3 fases que entregan 220 V a 60 Hz, esto sin que se le pida una carga externa. Cuando se le da paso al banco de baterías, el motor requiere una cantidad de gas mayor para soportar esta carga, es por esto que la frecuencia cae y los inversores cargadores vuelven a sincronizar nuevamente el sistema hasta lograr la estabilidad y la generación continua de energía para cargar las baterías.

En total se generaron 45 KW eléctricos a 220 V y 18,45 A, durante un periodo aproximado de 4 horas 30 minutos. Pasado este tiempo, la carga de las baterías fue del 100%.

#### 4.5 Apuntes Finales

La generación de energía eléctrica a partir de dos fuentes renovables como la biomasa y la solar, permite un suministro adecuado de energía eléctrica en zonas no interconectadas. Disponer de biomasa de fácil acceso puede reducir los costos de inversión para los sistemas

Proyecto «Prototipo de generación de energía eléctrica y térmica en núcleos aislados de Iberoamérica mediante hibridación – HIBRELEC»

fotovoltaicos al no requerir baterías, dado que este sistema puede suplir las necesidades en ausencia de luz solar.



## Bibliografía

(s.f.).

Hesketh , H. E., & Mohan, K. (1983). Specifying Venturi Scrubber Throat Length for Effective Particle Capture at Minimum Pressure Loss Penalty. *J. Air Pollut. Control Assoc.*, 854–857.

POWER: Prediction of Worldwide Energy Resource Project. (2015). *Surface meteorology and Solar Energy*. Recuperado el 2015, de <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>

Ramírez Rubio, S., Sierra, F. E., & Guerrero, C. A. (2011). Gasificación de materiales orgánicos residuales. *Ingeniería en Investigación*, 17-25.

Alauddin, Z., Lahijani, P., & Mohammadi, M. (2010). Gasification of lignocellulosic biomass in fluidized beds for renewable energy development: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2852-2862.

Almeida G, B. J. (2010). Alterations un energy properties of euclyptus wood and bark subject to torrefction . *Bioresour technol* , 9778-9784.

Alonso Mateos, J. J. (2004). Las posibilidades energéticas de la Biomasa en la Comunidad Autónoma de Madrid. *Observatorio Medioambiental*, 195-220.

Antal, M. J., & Varhegyi, G. (1995). Cellulose pyrolysis kinetics: the current state of knowledge. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 703–717.

Asadullah, M., Ansiour Rahman, M., Mohsin Ali, M., Abdul Motin, M., Borhanus Sultan, M., Robiul Alam, M., y otros. (2007). Jute stick pyrolysis for bio-oil production in fluidized bed reactor. *Bioresour Technol.*, 44-50.

Basu, P. (2006). Combustion and Gasification in fluidized beds. *CRC Press*.

Beaumont, O., & Schwob, Y. (1984). Influence of physical and chemical parameters on wood pyrolysis. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 637.

Beis, S., Onay, O., & Kockar, O. (2002). Fixed-bed pyrolysis of safflower seed: influence of pyrolysis parameters on product yields and compositions. *Renew. Energy*, 21-31.

Boroson, M., Howard, J., Longwell, J., & Peters, W. (1989). Product Yield and Kinetics from the vapour phase cracking of wood pyrolysis Tars. *AIChE Journal*, 120-128.

Bridgwater, A. (2011). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 1-27.

- Burgt, H. &. (2008). *Gasification*. Gulf Professional Publishing.
- Calvo, L., Otero, M., Jenkins, B., Morán, A., & García, A. (2004). Heating process characteristics and kinetics of rice straw in different atmospheres. *Fuel and Processing*, 279-291.
- Chan, W., Kelbon, M., & Krieger-Brockett, B. (1988). single-particle biomass pyrolysis: correlations of reaction products with process conditions. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2261-2275.
- Demirbas, A. (2004). Determination of calorific values of bio-chars and pyro-oils from pyrolysis of beech trunkbarks. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 215-219.
- Domínguez Bravo, J., Ciria, P., Esteban, L. S., David, S., & Lasry, P. (2003). Evaluación de la biomasa potencial como recurso energético en la región de Navarra (España). *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*.
- Eicma. (2013). *Ministerio de Agricultura de Cuba*. Recuperado el 15 de Marzo de 2016, de <http://agricultura.minag.cu/>
- El. Harfi, K., Mokhlisse, A., & Ben Chanâa, M. (1999). Effect of water vapor on the pyrolysis of the moroccan (Tarfaya) oil shale. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 65-69.
- Encinar, J., Beltrán, F., Ramiro, A., & González, J. (1998). Pyrolysis/gasification of agricultural residues by carbon dioxide in the presence of different additives: influence of variables. *Fuel Processing Technology*, 219-233.
- Energy, S. W. (2015). *Sustainable World Energy*. Recuperado el 2016 de Marzo de 31, de <http://www.sustainableworldenergy.org/es/nuestro-productos/>
- ESYRCE. (2015). *Encuesta sobre superficies y rendimientos de cultivos*. Madrid: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. .
- European Committee for Standardization. (2006). *Technical Specification CEN/TS 15439. Biomass gasification – Tar and particles in product gases – Sampling and analysis*. Ref. No. CEN/TS 15439:2006:E.
- Farid Chejne, J. d. (2009). CO-gasification of pelletized wood residues. *Elsevier*, 437-445.
- Fernández, J., Curt, M., & Aguado, P. (2006). Industrial applications of *Cynara cardunculus* L. for energy and other uses. *Industrial Crops and Products*, 222-229.
- Fundación Circe. (2006). *Evaluación del Potencial de Biomasa Residual en los Ecosistemas Forestales*. Huesca.

- Gabra, M., Pettersson, E., Backman, R., & Kjellstrom, B. (2001). Evaluation of cyclone gasifier performance for gasification of sugar cane residue-Part I: Gasification of bagasse. *Biomass and Bioenergy*, 351-369.
- Gil, J., Corella, J., Aznar, M., & M., C. (1999). Biomass gasification in atmospheric and bubbling fluidized bed: Effect of the type of gasifying agent on the product distribution. *Biomass and Bioenergy*, 389-403.
- Heo, H. S., Parka, H. J., Yimb, J.-H., Sohnc, J. M., Parkd, J., Kime, S.-S., y otros. (2010). Influence of operation variables on fast pyrolysis of *Miscanthus sinensis* var. *purpurascens*. *Bioresource Technology*, 3672-3677.
- Horne, P., & Williams, P. (1996). Influence of temperature on the products from the flash pyrolysis of biomass. *Fuel*, 1051-1059.
- IDEAM. (2014). *BOLETIN AGROMETEOROLÓGICO No. 33*. .
- Jayachandra, T., Venugopal, C., & Anu Appaiah, K. (2011). Utilization of phytotoxic agrowaste- coffee, cherry husk through pretreatment by the ascomycetes fungi *Mycotypha* for biomethanation. *Energy for Suitainable Development*, 104-108.
- Landau, L. (1937). On the Theory of phase transitions. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 19-32.
- Lee, K., Kang, B., Park, Y., & Kim, J. (2005). Influence of reaction temperature, pretreatment, and a char removal system on the production of bio-oil from rice straw by fast pyrolysis, using a fluidized bed. *Energy Fuels*, 2179-2184.
- Luo, Z., Wang, S., Liao, Y., Zhou, J., Gu, Y., & Cen, K. (2004). Research on biomass fast pyrolysis for liquid fuel . *Biomass and Bioenergy*, 455-462.
- Marcos Martín, F. (2006). Generación de Energía Eléctrica con Biomasa a Medio y Largo Plazo. *Anales de Mecánica y Electricidad*, 22-26.
- Meng, X., de Jong, W., Fu , N., & Verkooijen, A. (2011). Biomass gasification in a 100 kWth steam-oxygen blown circulating fluidized bed gasifier: Effects of operational conditions on product gas distribution and tar formation. *Biomass and Bioenergy*, 2910-2924.
- Meteotest. (2015). *Meteonorm*. Recuperado el 2015, de <http://www.meteonorm.com/>
- Miao , X., Wu, Q., & Yang, C. (2004). Fast Pyrolysis of micro algae to produce renewable fuels . *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 855-863.

- Miao, Q., Wang, C., Wu, X., Yin, X., & Zu, J. (2011). Fluidization of sawdust in a cold model circulating fluidized bed: Experimental Study. *Chemical Engineering Journal*, 335-341.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de la República de Colombia. (2009). *Oferta Agropecuaria ENA -Cifras 2009*. Bogotá D.C.
- Natarajan, E., Nordin, A., & Rao, A. (1998). Overview of combustion and gasification of rice husk in fluidized bed reactors. *Biomass and Bioenergy*, 533-546.
- OpenEI. (2015). *Solar and Wind Energy Resource Assessment*. Recuperado el 2015, de <http://en.openei.org/apps/SWERA/>
- Pattiya, A. (2011). Bio-oil production via fast pyrolysis of biomass residues from cassava plants in a fluidised-bed reactor. *Bioresour. Technol.*, 1959-1967.
- Pecho, J. S. (2008). Reactive beds materials for improved biomass gasification in a circulating fluidised bed reactor. *Chemical Engineering Science*, 2465-2476.
- Piskorz, J., Majerski, P., Radlein, D., Scott, D., & Bridgwater, A. (1998). Fast Pyrolysis of sweet sorghum and sweet sorghum bagasse. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 15-29.
- RAE. (2016). *Diccionario La Lengua Española*. Recuperado el 31 de Marzo de 2016, de <http://dle.rae.es/?id=5YtOE4H>
- Raja, S., Kennedy, Z., Pillai, B., & Lee, C. (2010). Flash pyrolysis of jatropha oil cake in electrically heated fluidized bed reactor. *Energy*, 2819–2823.
- Raveendran, K., Ganesh, A., & Khilar, K. (1995). Influence of mineral matter on biomass pyrolysis characteristics. *Fuel*, 1812-1822.
- Richards, G., & Zheng, G. (1991). . Influence of metal ions and of salts on products from pyrolysis of wood: applications to thermochemical processing of newsprint and biomass. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 133-146.
- Rosúa, J. M., & Pasadas, M. (2012). Biomass potential in Andalusia, from grapevines, olives, fruit trees and poplar, for providing heating in homes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4190-4195.
- Rosúa, J., & Pasadas, M. (2012). Biomass potential in Andalusia, from grapevines, olives, fruit trees and poplar, for providing heating in homes. *renewable and sustainable energy reviews*, 4190–4195.
- Sensoz, S., & Can, M. (2002). Effect of pyrolysis temperature and heating rate on the product yields. *Energy Source*, 347-355.

- Sensoz, S., Angin, D., & Yorgun, S. (2000). Influence of particle size on the pyrolysis of rapeseed (*Brassica napus*L.): fuel properties of bio-oil. *Biomass and Bioenergy*, 271-279.
- Sensoz, S., Demiral, I., & Ferdi Gecel, H. (2006). Olive bagasse (*Olea europea* L.) pyrolysis. *Bioresour Technol*, 429-436.
- Summers, M., Jenkins, B., Hyde, P., Williams, J., Mutters, R., Scardacci, S., y otros. (2003). Biomass Production and allocation in rice with implications for straw harvesting and utilization. *Biomass and Bioenergy*, 163-173.
- Telebna, F., Karakashev, D., & Angelidaki, I. (2010). Production of bioethanol from wheat straw: An overview on pretreatment, hydrolysis and fermentation. *Bioresource Technology*, 4744-4753.
- Tsai, W., Lee, M., & Chang, Y. (2007). Fast pyrolysis of rice husk: product yields and compositions. *Bioresour. Technol.*, 22-28.
- UPME. (2003). *Potenciales de cultivos energéticos y residuos agroindustriales*. Bogotá: UPME.
- UPME; IDEAM. (2005). *Atlas de radiación solar en Colombia*.
- van der Drift, A., van Doorn, J., & Vermeulen, J. (2001). Ten residual biomass fuels for circulating fluidized-bed gasification. *Biomass and Bioenergy*, 45-56.
- Wang, L., Weller, C., Jones, D., & Hanna, M. (2008). Contemporary issues in thermal gasification of biomass and its application to electricity and fuel production. *Biomass and Bioenergy*, 573-581.
- Williams, P., & Horne, P. (1994). The role of metal salts in the pyrolysis of biomass. *Renewable Energy*, 1-13.
- Xiong, L. P., Chang, Z., Wu, J., Chen, C., & Zhu J., Y. (2004). An experimental study on biomass air-steam gasification in a fluidized bed. *Bioresource technology* , 95-101.
- Yusoff, S. (2006). Renewable energy from palm oil - innovation on effective utilization of waste. *Journal of Cleaner Production*, 87-93.
- Zanzi, R., Sjöström, K., & Björnbom, E. (2002). Rapid Pyrolysis of agricultural residues at high temperature . *Biomass Bioenergy*, 357-366.
- Zeng, X., Ma, Y., & Ma, L. (2007). Utilization of straw in biomass energy in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 976-987.
- Zhongyang, I., Shurong, W., Yanfen, L., Jinsong, Z., Yueling, G., & Kefa, C. (2004). Research on biomass fast pyrolysis for liquid fuel. *Biomass and Bioenergy*, 455-462.

Proyecto «Prototipo de generación de energía eléctrica y térmica en núcleos aislados de Iberoamérica mediante hibridación – HIBRELEC»