

**EVALUACIÓN DE UN PROCESO TERMOQUÍMICO SELECCIONADO  
MEDIANTE VIGILANCIA TECNOLÓGICA PARA TRANSFORMAR BIOMASA  
SÓLIDA EN ENERGÍA ELÉCTRICA QUE PUEDA SER USADO EN LAS ZONAS  
NO INTERCONECTADAS DE COLOMBIA**

**ABREO ORTIZ MARIA VICTORIA  
RUEDA GUTIÉRREZ STEPHANY LORRAYNE**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2016**

**EVALUACIÓN DE UN PROCESO TERMOQUÍMICO SELECCIONADO  
MEDIANTE VIGILANCIA TECNOLÓGICA PARA TRANSFORMAR BIOMASA  
SÓLIDA EN ENERGÍA ELÉCTRICA QUE PUEDA SER USADO EN LAS ZONAS  
NO INTERCONECTADAS DE COLOMBIA**

**ABREO ORTIZ MARIA VICTORIA  
RUEDA GUTIÉRREZ STEPHANY LORRAYNE**

**Trabajo de grado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero  
Químico**

Director:

**Viatcheslav V. Kafarov**

Ingeniero Químico, Dr.Sc.

Co-director:

**Yurley Paola Villabona Durán**

Ingeniera Química

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2016**

## **DEDICATORIA**

*Dedico de manera especial este trabajo realizado: a Dios por haberme permitido realizar con satisfacción una de mis metas. A mi madre María Teresa Ortiz, a mis hermanos Johanna María Abreo, Pedro Elías Ortiz y Jorge Armando Abreo, a Marina Vega y Edison Acosta Vega; por ser quienes siempre me han apoyado y me han dado una voz de aliento para seguir adelante con mi proyecto de vida.*

*También dedico este trabajo a German Quiroga y a mis amigos que estuvieron durante el transcurso de la carrera brindándome su amistad y apoyo solidario. A Stephany Rueda por la cooperación y realización de la tesis de grado.*

**MARIA VICTORIA ABREO ORTIZ**

## **DEDICATORIA**

Principalmente a Dios, por su infinita bondad y amor; por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta este momento de mi formación profesional.

A mi madre, por su apoyo incondicional, por sus consejos, por su amor, por su ejemplo de perseverancia y constancia.

A mis hermanos por ser parte de mi vida, por ayudarme a crecer.

A mis profesores a quienes les debo gran parte de mis conocimientos, gracias a su paciencia y enseñanza.

A Julián por estar presente no sólo en esta etapa de mi vida tan importante, sino en todo momento; gracias por su amor y comprensión.

A mis amigos Jessy, Henry, Jair, Kari, Andrés y Viky, por acompañarme en los buenos y malos momentos que sólo se viven en la universidad.

A Viky mi compañera de proyecto, porque con su cooperación y dedicación se hizo posible culminar esta meta.

***STEPHANY LORRAYNE RUEDA GUTIÉRREZ***

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan sus más sinceros agradecimientos a:

A la universidad Industrial de Santander, por darnos el privilegio de formar parte de la familia universitaria.

Al Dr. Sc, Viatcheslav Kafarov por brindarnos la oportunidad de realizar este trabajo de grado.

A nuestra co-directora Paola Villabona por su dedicación y esfuerzo, deseamos expresar nuestra gratitud hacia usted deseándole éxito y el mayor de los augurios en su trayectoria profesional.

A Jair Rangel por su apoyo incondicional, quien siempre estuvo dispuesto a ofrecernos su ayuda y colaboración.

A nuestros padres por brindarnos la oportunidad de ser profesionales

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	18
1.METODOLOGÍA.....	22
1.1. ANÁLISIS DE LAS NECESIDADES ENERGÉTICAS DE ZNI DE COLOMBIA .....	22
1.1.1. Identificación de las zonas no interconectadas de Colombia.....	22
1.1.2. Identificación de la demanda energética.....	23
1.1.3. Identificación de las políticas energéticas y ambientales en las ZNI que existen en Colombia. ....	23
1.1.4. Identificación de los tipos de tecnologías utilizadas para las ZNI. ....	23
1.1.5. Selección de las zonas casos de estudio.....	24
1.2. SELECCIÓN DEL PROCESO TERMOQUÍMICO QUE SE ADAPTE A LAS NECESIDADES ENERGÉTICAS DE LAS ZNI MEDIANTE VIGILANCIA TECNOLÓGICA POR TIPO DE TECNOLOGÍA .....	24
1.2.1. Determinación de palabras clave a vigilar.....	24
1.2.2. Identificación de los diferentes procesos termoquímicos y sus tecnologías.	24
1.2.3. Identificación de la oferta y la demanda de las tecnologías escogidas. ....	25
1.2.4. Selección de tecnologías .....	25
1.3. SIMULACIÓN DEL PROCESO TERMOQUÍMICO SELECCIONADO .....	25
2. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	26
2.1. TENDENCIAS EN COLOMBIA: ANÁLISIS DE LAS NECESIDADES ENERGÉTICAS DE ZNI DE COLOMBIA PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.....	26
2.1.1. ZNI de Colombia. ....	26
2.1.2. Demanda energética en las ZNI.. ....	27
2.1.3. Políticas energéticas y ambientales que existen en Colombia.....	28
2.1.4. Tecnologías utilizadas para las ZNI de Colombia.. ....	29

2.1.5. Selección de las Zonas No Interconectas: Caso de estudio. ....	30
2.2. SELECCIÓN DEL PROCESO TERMOQUÍMICO QUE SE ADAPTE A LAS NECESIDADES ENERGÉTICAS DE LAS ZNI MEDIANTE VIGILANCIA TECNOLÓGICA.....	31
2.2.1. Palabras clave a vigilar. ....	31
2.2.2 Identificación de los diferentes procesos termoquímicos y sus tecnologías. ....	31
2.2.3. Identificación de la oferta y la demanda de las tecnologías escogidas. ....	37
2.2.5. Selección de las tecnologías.].....	39
2.3. SIMULACIÓN.....	42
3. CONCLUSIONES. ....	51
4. RECOMENDACIONES.....	52
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53
BIBLIOGRAFIA.....	62
ANEXOS.....	64

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 1.</b> Demanda energética mensual por departamento de las ZNI .....	27
<b>Tabla 2.</b> Gasificación en lecho fijo Downdraft y lecho fluidizado burbujeante .....	40
<b>Tabla 3.</b> Tecnología de gasificación de lecho fijo en corriente descendente.....	41
<b>Tabla 4.</b> Condiciones de operación en el proceso.....	44
<b>Tabla 5.</b> Análisis próximo de cada tipo de biomasa.....	45
<b>Tabla 6.</b> Composición elemental de cada tipo de biomasa (%p/p).....	45
<b>Tabla 7.</b> <i>Composición elemental de cada tipo de biomasa (%p/p)</i> .....	48
<b>Tabla 8.</b> Energía intercambiable de los diferentes tipos de biomasa.....	50

## LISTA DE GRAFICAS

	Pág.
<b>Gráfica 1.</b> Déficit de cobertura de energía eléctrica en las ZNI, año 2014 .....	26
<b>Gráfica 2.</b> Análisis Vantage Point por tipo de proceso termoquímico.....	33
<b>Gráfica 3.</b> Tipo de tecnología de gasificación.....	35
<b>Gráfica 4.</b> Número de artículos por tipo de tecnología de combustión .....	36
<b>Gráfica 5.</b> Estadísticas por tipo de tecnología de combustión.....	37
<b>Gráfica 6.</b> Número de artículos importados por tipo de tecnología de combustión .....	38
<b>Gráfica 7.</b> Representación del gas de síntesis de diferentes tipos de biomasa. ...	46
<b>Gráfica 8.</b> Representación de la composición de los productos del motor de combustión diferentes tipos de biomasa agrícola. ....	47
<b>Gráfica 9.</b> Representación de los gases de síntesis de diferentes tipos de biomasa. ....	48
<b>Gráfica 10.</b> Representación de la composición de los productos del motor de combustión diferentes tipos de biomasa forestal. ....	49

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1.</b> Diagrama del proceso de gasificación .....	44

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
<b>Anexo A.</b> Departamentos que pertenecen a las ZNI, año 2014.....	64
<b>Anexo B.</b> Municipios que pertenecen a las ZNI de Colombia, año 2014 .....	65
<b>Anexo C .</b> Leyes para las ZNI .....	69
<b>Anexo D.</b> Decretos para las ZNI.....	70
<b>Anexo E.</b> Resoluciones para las ZNI.....	71
<b>Anexo F.</b> Grupos electrógenos en las ZNI .....	72
<b>Anexo G.</b> Portafolio tecnológico Gasificación.....	73
<b>Anexo H.</b> Pasos para la simulación en Aspen Plus.....	76

## LISTA DE ABREVIATURAS

ZI	Zonas Interconectadas.
ZNI	Zonas No Interconectadas.
SIN	Sistema Interconectado Nacional.
PCI	Poder calórico inferior.
NOx	Óxidos de nitrógeno.
IPSE	Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas
UPME	Unidad de Planeación Minero Energética
CNM	Centro Nacional de Monitoreo
CREG	Comisión de Regulación de Energía y Gas
SIEL	Sistema de Información Eléctrico Colombiano
SUI	Sistema Único de Información de Servicios Públicos
PIEC	Plan Indicativo de Expansión de Cobertura de Energía Eléctrica
SIMEC	Sistema de Información Minero Energético Colombiano
DANE	Departamento Administrativo Nacional de estadística
kWh	Kilovatios/ hora
MWh	Megavatios/ hora

## RESUMEN

**TÍTULO:** EVALUACIÓN DE UN PROCESO TERMOQUÍMICO SELECCIONADO MEDIANTE VIGILANCIA TECNOLÓGICA PARA TRANSFORMAR BIOMASA SÓLIDA EN ENERGÍA ELÉCTRICA QUE PUEDA SER USADO EN LAS ZONAS NO INTERCONECTADAS DE COLOMBIA\*

**AUTORES:** *Abreo Ortiz María Victoria, Rueda Gutiérrez Stephany Lorryne.* \*\*

**PALABRAS CLAVES:** Vigilancia tecnológica, gasificación, combustión, Zonas No Interconectadas (ZNI), Generación de energía eléctrica, Aspen plus®, biomasa, agrícola, forestal.

### **DESCRIPCIÓN:**

Las ZNI representan el 52% del territorio nacional colombiano, se caracterizan por carecer de energía eléctrica o tener muy pocas horas de este servicio, debido a que están ubicadas en sitios de difícil acceso; una alternativa para dar solución a este problema es el empleo de energías renovables. El presente trabajo estudió el aprovechamiento de los residuos forestales y agrícolas, que a través de procesos termoquímicos generan energía eléctrica y permiten suplir las necesidades energéticas de este tipo de población. Se empleó vigilancia tecnológica con el fin de determinar los dos procesos termoquímicos más empleados en los últimos 10 años y sus tecnologías para un posible uso en las ZNI de Colombia; se seleccionaron algunas tecnologías existentes en el mercado y finalmente se escogió la gasificación en lecho fluidizado Downdraft ya que cumple con características como buena eficiencia eléctrica, bajas emisiones de gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>), evita la emisión de gases tóxicos como: SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub> y NO<sub>x</sub> (promotores de lluvia ácida), furanos y dioxinas (agentes cancerígenos).

A partir de búsqueda bibliográfica en entidades gubernamentales se determinó la demanda eléctrica de las ZNI y se escogieron los municipios de El Carmen del Darién y Medio Atrato como casos de estudio para llevar a cabo la simulación en el software Aspen Plus empleando tres tipos de biomasa agrícola y tres tipos de biomasa forestal; destacándose entre ellos el capacho de maíz y las virutas de abarco, ya que generan un syngas con mayor PCI; para el caso del capacho de maíz bajas emisiones de CO<sub>2</sub>, y para las virutas de abarco bajas emisiones de N<sub>2</sub>.

---

\*Proyecto de Grado

\*\*Facultada de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director. Dr. Sc. Viatcheslav V. Kafarov Co-directora: Ing. Yurley Paola Villabona Durán.

## ABSTRACT

**TITLE:** ASSESSMENT OF A SELECTED THERMOCHEMICAL PROCESS THROUGH TECHNOLOGICAL SURVEILLANCE TO TRANSFORM SOLID BIOMASS INTO ELECTRIC ENERGY THAT MAY BE USED ON NON-INTERCONNECTED ZONES OF COLOMBIA.\*

**AUTHORS:** *Abreo Ortiz María Victoria, Rueda Gutiérrez Stephany Lorryne.*\*\*

**KEYWORDS:** Agricultural biomass, Aspen Plus®, combustion, electric energy generation, forestry biomass, gasification, non-interconnected zones, technological surveillance.

### DESCRIPTION:

The non-interconnected zones represent 52% of Colombian national territory, they are characterized by the lack of electric energy or by having very few hours of the service daily. Due to they are located in places too hard to get. An alternative to solve this issue is by using renewable sources of energy. This paper studied the advantages of using agricultural and forestry residuals that through thermochemical processes generate electric energy and let supply the lack of energy in towns located in ZNI. Technological surveillance was used in order to determine the two thermochemical processes most widely used during the last ten (10) years as well as their technologies to be used in Colombian ZNI. We chose some technologies already existent on the market and finally fluidized bed gasification Downdraft was selected, since it has some characteristics such as good electric efficiency, low greenhouse gasses emissions (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>), it avoids toxic gasses emissions as: SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub> and NO<sub>x</sub> (acid rain trigger), furans and dioxins (cancer agents).

From bibliographic research done on government entities we could conclude the electric demand from ZNI. We selected the towns of El Carmen del Darien and Medio Atrato as study cases to carry on the simulation with the Aspen Plus Software using three types of agricultural biomass and three of forestry biomass; where corn husk and spanned wood shavings stood out, because they generate a syngas with a higher ICP (Inferior Calorific Power), that in the case of corn husk represents low CO<sub>2</sub> emissions, and for wood shavings low N<sub>2</sub> emissions.

---

\*Thesis

\*\*Faculty of Engineering Physicochemical. School of Chemical Engineering. Director. Dr. Sc. Viatcheslav V. Kafarov; Co-directora: Ing. Yurley Paola Villabona Durán.

## INTRODUCCIÓN.

Colombia está dividida en dos tipos de zonas energéticas: Zonas Interconectadas (ZI) y Zonas No Interconectadas. (ZNI). El término ZNI fue ingresado en el año 1994, pero se definió en el año 2003 con la ley 855, Artículo N° 1 como municipios, corregimientos, localidades y caseríos no conectados al Sistema Interconectado Nacional (SIN). Estas zonas no cuentan con energía eléctrica constante o sólo se presta el servicio por pocas horas al día debido a sus características geográficas y naturales, no cuentan con infraestructura física adecuada que permita transportar algún energético (poliductos y gasoductos), esto conlleva a que el costo del servicio sea muy costoso y poco confiable; por lo tanto requieren una solución energética que permita mejorar la duración, calidad y cobertura de dicha distribución, teniendo en cuenta que sean viables económicamente y sostenibles a largo plazo.

Según el Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas (IPSE), para el año 2014 éstas representaban el 52% del territorio nacional, incluyendo 107 municipios, 1448 localidades, 37 cabeceras municipales y 20 territorios especiales; donde habitaban más de 1'400.000 colombianos [1].

La biomasa es utilizada hoy en día como fuente de energía debido a que es renovable y el impacto ambiental se da en menor proporción, además es un combustible con menor cantidad de azufre y metales que los combustibles convencionales [2] [3].

Las fuentes de biomasa para fines energéticos son: biomasa natural, producida en ecosistemas naturales; biomasa residual, se genera en explotaciones agrícolas, forestales, ganaderas, industrias y núcleos urbanos; cultivos energéticos que son

especies vegetales cultivadas para producción de energía [4] [5] [6]. La conversión de la biomasa en energía eléctrica se realiza principalmente por procesos termoquímicos [7]:

En la combustión, el proceso se lleva a cabo generalmente mediante una reacción química de oxidación muy rápida que libera grandes cantidades de calor, permitiendo transformar la energía química en energía térmica, que puede ser utilizada para el uso humano; la biomasa debe tener bajo contenido de humedad para producir  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  y densidad y tamaño menor para tener una mejor combustión, produciendo calor y vapor de agua, siendo el vapor de agua el que se aprovecha para la producción de energía [8] [9] [10].

Por otro lado está la gasificación, en el cual la biomasa sólida se coloca en una corriente que entra en contacto con agentes de reacción; se lleva a cabo a altas temperaturas (800-1000°C) y en un ambiente pobre de oxígeno [11]. Este proceso inicia con el secado, luego por un proceso de pirólisis y finalmente la gasificación, produciendo gas de síntesis que puede ser usado para producir energía eléctrica a través de turbinas o motores [12] [13] [14] [15].

Otro proceso termoquímico es la pirólisis en el que la biomasa sólida se descompone a través de la acción térmica en ausencia de oxígeno o agente de reacción. Este proceso es fundamental, debido a que es una etapa antes o durante los procesos de gasificación y combustión; este puede producir productos sólidos, líquidos o gaseosos, los cuales pueden ser utilizados para la generación de energía eléctrica [16] [17] [18] [19].

En el transcurso del tiempo se han realizado investigaciones pertinentes a los procesos termoquímicos:

En Madrid, España, se realizó un estudio sobre la implementación de una central termoeléctrica en la provincia de Orense-España, utilizando biomasa forestal para

la combustión en una caldera que produce residuos de ceniza, CO<sub>2</sub> y vapor de agua. El vapor que sale de la combustión es ingresado a un turbo-generador que transforma en energía eléctrica para aportarlo a la red eléctrica haciendo uso de un transformador. Luego de un estudio económico concluyeron que es fiable debido a que obtiene VAN positivo y un periodo de retorno de inversión muy alto; además puede abastecer a la provincia [20].

En Valencia, España, Vargas Salgado en el año 2012 hizo un estudio comparativo teórico y experimental de dos tipos de tecnología de gasificación de biomasa (tacos de madera, madera triturada y pellets): lecho fijo downdraft y lecho fluido burbujeante para producir energía eléctrica en aplicaciones de baja potencia. El autor concluye que los dos tipos de tecnologías son viables para la generación de energía eléctrica, el mayor poder calorífico lo presenta el gasificador de lecho fluido debido al mejor contacto entre partículas y a la menor temperatura de operación; para operaciones de baja potencia cuando la demanda energética es variable, es más factible y eficiente un gasificador de lecho fluido [21].

En Bucaramanga, Colombia, Guerrero y Gamboa en el año 2009 realizaron el diseño conceptual de una planta piloto de combustión a partir de rastrojo y hojas secas del maíz; empleando la herramienta matemática para evaluar tecnologías (HMOVST). Concluyeron que la combustión en cuanto al aprovechamiento energético de la biomasa residual del maíz es la tecnología más viable, para ello se tuvo en cuenta los criterios ambiental, tecnológico, económico y social [22].

Debido a que la mayor parte de las ZNI está en sitios que constituyen reservas de biodiversidad y agua muy importantes para el país, son lugares de difícil acceso y no cuentan con vías ni infraestructura física apropiada, se hace necesario buscar alternativas eficientes para mitigar este problema, que ofrezcan un servicio energético confiable, sin contribuir con el alto impacto ambiental ni gases de efecto invernadero, dando un buen uso a los recursos naturales de la zona.

El presente trabajo evalúa un proceso termoquímico para transformar la biomasa sólida agrícola y forestal en energía eléctrica que pueda ser usado en las ZNI, identificándolo mediante vigilancia tecnológica; para lo cual se plantearon los siguientes objetivos específicos:

Analizar las necesidades energéticas y tecnológicas de la ZNI.

Seleccionar el proceso termoquímico que se adapte a las necesidades energéticas de las ZNI mediante vigilancia tecnológica por tipo de tecnología.

Evaluar el proceso termoquímico seleccionado por medio del simulador Aspen Plus aplicándolo en dos ZNI: caso de estudio.

## **1. METODOLOGÍA.**

Para el cumplimiento de los objetivos planteados se llevó a cabo un análisis cuantitativo, basado en literatura y datos obtenidos de distintas entidades gubernamentales y bases de datos como Isi Web of Knowledge y Scopus, con el fin de evaluar un proceso termoquímico para transformar la biomasa sólida agrícola y forestal en energía eléctrica que pueda ser usado en las ZNI de Colombia identificándolo mediante vigilancia tecnológica; para lo cual se plantearon los siguientes pasos:

### **1.1. ANÁLISIS DE LAS NECESIDADES ENERGÉTICAS DE ZNI DE COLOMBIA**

Para el análisis de las necesidades tecnológicas en las ZNI de Colombia, se utilizó información suministrada por fuentes estatales como el Sistema de Información Eléctrico (SIEL), el Instituto de Planeación y Promoción de Soluciones Energéticas en las Zonas no Interconectadas (IPSE), Centro Nacional de Monitoreo (CNM), Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), con el fin de conocer cuáles departamentos pertenecen a dichas zonas, la demanda energética, normatividad vigente y las tecnologías que se están planteando como solución para satisfacer sus necesidades energéticas.

**1.1.1. Identificación de las zonas no interconectadas de Colombia.** Se elaboró un mapa de Colombia identificando los departamentos que pertenecen a las ZNI hallados mediante una revisión de datos de cobertura de la UPME [1].

**1.1.2. Identificación de la demanda energética.** Para identificar la demanda energética de las ZNI se revisaron informes de cobertura de la UPME para conocer el número de usuarios sin servicio; del Plan Indicativo de Expansión de Cobertura de Energía Eléctrica 2013-2017 (PIEC) se obtuvo la demanda promedio mensual por usuario calculada, [23]. A partir de los datos anteriores se calcula la demanda energética de cada zona se empleó la fórmula:

$$D_p = \#_{Usuarios} * P \quad (1)$$

Donde:

$D_p$ = demanda energética de cada zona

$\#_{Usuarios}$ = número de usuarios sin servicio

$P$ = demanda promedio mensual por usuario en KWh/mes

**1.1.3. Identificación de las políticas energéticas y ambientales en las ZNI que existen en Colombia.** Para ello se revisó la normatividad vigente en el país sobre leyes, decretos, acuerdos y resoluciones establecidas para las ZNI, empleando la información que ofrecen fuentes gubernamentales como el SIMEC, CREG, IPSE y el Ministerio de Minas y Energía [24] [25].

**1.1.4. Identificación de los tipos de tecnologías utilizadas para las ZNI.** Se buscó información en páginas web gubernamentales como el CNM y el IPSE con el fin de identificar cuáles son las diferentes tecnologías implementadas en las ZNI para generación de energía eléctrica y el tipo de combustible empleado [23].

**1.1.5. Selección de las zonas casos de estudio.** Para la selección de los dos casos de estudio de las ZNI se identificó el departamento con mayor demanda energética, seleccionando los dos municipios con alto déficit de cobertura. Además se escogieron tres tipos de biomasa agrícola que se producen en las zonas de estudio, y tres tipos de biomasa forestal teniendo en cuenta el volumen de producción anual [34].

## **1.2. SELECCIÓN DEL PROCESO TERMOQUÍMICO QUE SE ADAPTE A LAS NECESIDADES ENERGÉTICAS DE LAS ZNI MEDIANTE VIGILANCIA TECNOLÓGICA POR TIPO DE TECNOLOGÍA**

**1.2.1. Determinación de palabras clave a vigilar.** Se identificaron las diferentes palabras que son claves para la búsqueda de información de los procesos y tecnologías.

**1.2.2. Identificación de los diferentes procesos termoquímicos y sus tecnologías.** Se identificó mediante vigilancia tecnológica los diferentes procesos termoquímicos y las diversas tecnologías para la generación de energía eléctrica a partir de biomasa sólida teniendo en cuenta la base de datos Scopus. Se empleó el software Vantagepoint para clasificar los datos y seleccionar dos procesos termoquímicos y dos tecnologías que se adecuen a las necesidades de las ZNI de acuerdo a los que son más empleados actualmente. [26]

### **1.2.3. Identificación de la oferta y la demanda de las tecnologías escogidas.**

La identificación de la demanda y oferta en Colombia se realizó a partir de informes de producción nacional, importaciones y exportaciones de entidades como el Departamento Administrativo Nacional de estadística (DANE) y sección Procolombia [27] [28].

**1.2.4. Selección de tecnologías.** Se seleccionaron tecnologías a través de internet, recopilándose información técnica y de costos sobre estas en sistemas a pequeña escala. Las principales variables y valores a tener en cuenta fueron [29], [30], [31]:

- Tecnología
- Tipo de biomasa
- Equipo
- Eficiencia del equipo
- Conversión de biomasa a electricidad (kWh/kg MS)
- Contenido de humedad de la biomasa combustible (b.h.)
- Tamaño de biomasa
- Poder calorífico de biomasa
- Potencia
- Aplicación en otros mercados, industrias.
- Aceptabilidad ambiental.

## **1.3. SIMULACIÓN DEL PROCESO TERMOQUÍMICO SELECCIONADO**

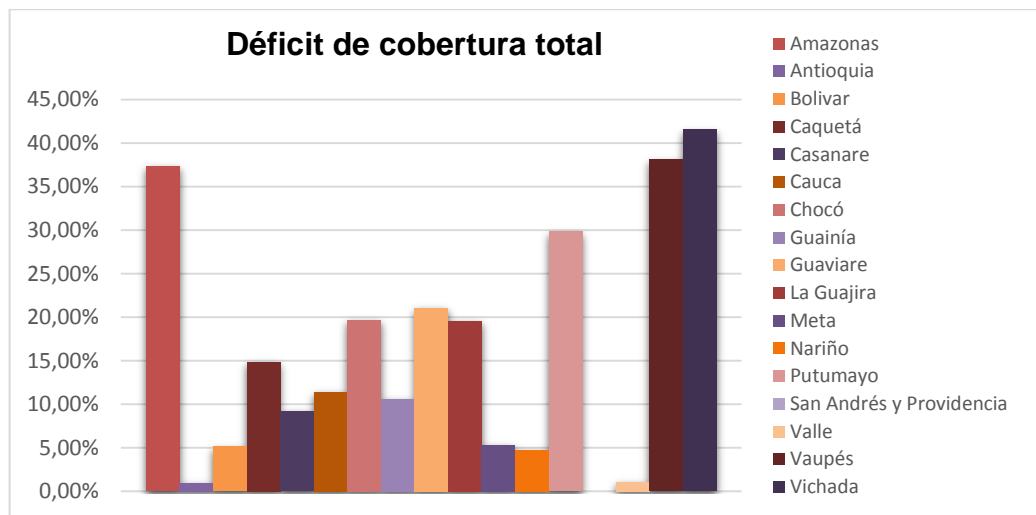
Se realizó la simulación del proceso termoquímico seleccionado, mediante el software Aspen Plus aplicándolo en dos ZNI [32] [33]. Caso de estudio.

## 2. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 2.1. TENDENCIAS EN COLOMBIA: ANÁLISIS DE LAS NECESIDADES ENERGÉTICAS DE ZNI DE COLOMBIA PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

**2.1.1. ZNI de Colombia.** Para el año 2014 las ZNI representaban el 52% del territorio nacional, conformadas por 17 departamentos, 5 capitales departamentales (Leticia, San José del Guaviare (zona rural), Mitú, Puerto Inírida y Puerto Carreño), incluye 107 municipios, 1448 localidades, 37 cabeceras municipales y 20 territorios especiales; donde habitan más de 1'400.000 colombianos. [1] (Ver anexo A)

**Gráfica 1.** Déficit de cobertura de energía eléctrica en las ZNI, año 2014



Fuente: UPME [1]

En la gráfica 1 se puede observar un aproximado de la situación eléctrica de los departamentos de Colombia para el año 2014 que pertenecen a las ZNI. Vichada presenta el mayor déficit de cobertura de energía eléctrica (41,53%), el departamento en su totalidad es considerado ZNI. Vaupés tiene la segunda cobertura más baja (61,9%), cuenta con 4.866 usuarios y todo el departamento es considerado ZNI. Amazonas tiene un déficit de cobertura de 37,31%, de sus 9 corregimientos departamentales Mirití-Paraná es el más afectado pues sólo tiene cobertura del 4,6%. El Putumayo cuenta con 13 municipios, 7 de ellos no tienen interconexión nacional. Guaviare tiene la cuarta cobertura más baja, tan sólo tiene 4 municipios y 3 de ellos son zona mixta, es decir pertenece una parte al SIN y otra a ZNI (Ver anexo B). El archipiélago de San Andrés y Providencia tiene cobertura del 100%, sin embargo pertenece a las ZNI, ya que está aislada geográficamente y es de difícil conexión al SIN.

**2.1.2. Demanda energética en las ZNI.** Para el año 2014 a nivel nacional había un total de 14'044.225 viviendas, de las cuales 442.448 estaban sin servicio de energía eléctrica, pero sólo 288.484 pertenecían a las ZNI [1].

El cálculo de la demanda energética existente para las ZNI del año 2014, se hizo teniendo en cuenta la ecuación 1. La demanda promedio mensual por vivienda la calculó el PIEC, la cual se encuentra clasificada por municipio y por ubicación del usuario, tomando como 92 KWh/mes. [35] (Ver anexo B)

**Tabla 1.** Demanda energética mensual por departamento de las ZNI

DEPARTAMENTO	Usuarios total ZNI	Demanda de energía KWh/mes
Amazonas	10.811	994.612,00
Antioquia	3.529	324.668,00
Bolivar	537	49.404,00
Caquetá	5.822	535.624,00
Casanare	1.267	116.564,00
Cauca	21.775	2.003.300,00
Chocó	44.902	4.130.984,00
Guainía	14.147	1.301.524,00
Guaviare	8.202	754.584,00

<b>La Guajira</b>	286	26.312,00
<b>Meta</b>	5.262	484.104,00
<b>Nariño</b>	51.447	4.733.124,00
<b>Putumayo</b>	5.767	530.564,00
<b>San Andrés y Providencia</b>	18.715	1.721.780,00
<b>Valle</b>	5.710	525.320,00
<b>Vaupés</b>	4.866	447.672,00
<b>Vichada</b>	8.494	781.448,00
<b>TOTAL</b>	<b>211.539</b>	<b>19.461.588,0</b>

**Fuente:** Autores a partir de Datos de Cobertura UPME, 2014 [1].

De la tabla 1 se puede observar que los departamentos de Nariño y Chocó son los de mayor demanda energética, ya que tiene una gran cantidad de usuarios sin servicio; Nariño requiere 4.733.124 de KWh/mes y Chocó 4.130.984 KWh/mes. Es decir entre los dos departamentos suman una demanda total del 45,54%, los departamentos de La Guajira, Bolívar y Casanare son los que tienen una menor demanda energética, dado que de la demanda total de las ZNI requieren tan sólo un 0,13%, 0,25% y 0,6% respectivamente.

**2.1.3. Políticas energéticas y ambientales que existen en Colombia.** Existen dos fuentes creadas por el gobierno para la financiación de proyectos de las ZNI; la primera es el Fondo de Apoyo Financiero para la Energización de las ZNI (FAZNI, ley 633 del 2000); regulada por el decreto 2884 de 2001, donde se decidió que el FAZNI debe contribuir con proyectos institucionales y empresariales que integren la prestación de servicios, mejoras en la cobertura y confiabilidad en el servicio (Artículo 5). La segunda es el Fondo Nacional de Regalías (FNR, ley 756 del 2002), que determina las distribución de los recursos para inversión en infraestructura de distribución de gas para los estratos 1 y 2, inversión en ZI y ZNI (artículo 37). Con la resolución 182138 y resolución 181891 se expiden y se adaptan procedimientos para otorgar subsidios del sector eléctrico en las ZNI, donde se favorece al sector de estrato 1 y 2. Otra entidad es la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) encargada de establecer fórmulas para la fijación de las tarifas de los servicios públicos (ley 142 de 1994 artículo 73) y

definir la metodología para el cálculo de las tarifas aplicables a los usuarios regulados del servicio de electricidad (Ley 143 de 1994, artículo 23).

Se han creado diversas leyes (Ver Anexo C) que favorecen la utilización de energías renovables, fomentan el uso racional y eficiente de energía, regulan la prestación del servicio, promueven el desarrollo e implementan soluciones energéticas, conceden áreas de servicio exclusivo a fin de que estos se puedan extender a la personas de menos recursos, establecen funciones a entidades gubernamentales encargadas de definir los porcentajes y condiciones en los cuales se conceden subsidios, y se otorguen excepciones al impuesto, como lo es la ley 223 de 1995, creada con el fin de mejorar la economía del país, la cual trata de excluir del IVA a los equipos que cumplan con las regulaciones y estándares ambientales de acuerdo al Ministerio del Medio Ambiente.

En el año 2014 se generó la ley 1715, que permite la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional, con la intención de reducir las emisiones de efecto invernadero y cumplir con la demanda energética. En el transcurso de los años el gobierno ha establecido varias leyes, decretos y resoluciones (Ver Anexo D y E) que favorecen el desarrollo de energía eléctrica en las ZNI de Colombia, permitiendo así el crecimiento de estas y del país, logrando una mejor calidad de vida.

**2.1.4. Tecnologías utilizadas para las ZNI de Colombia.** De acuerdo al Plan de Energización de ZNI (PEZNI) para el 2015, el 90% de generación de energía eléctrica se realizaba mediante plantas Diésel (Ver Anexo F) y el 10% con otras fuentes (Pequeñas centrales hidroeléctricas PCH, solar y aerogeneradores) [36] [37] [38].

Por otra parte se tienen los reportes del CNM para el año 2014; en el que destaca que hay dos PCH, una en Guacamayas (Caquetá) y Bahía Solano (Chocó); dos Microcentrales hidroeléctricas (MCH), una en Agua Clarita (Chocó) con una

capacidad instalada de 100 KW y Nuquí (Chocó) con 20 KW de generación y sistemas híbridos como hidráulica-térmica en los departamentos de Vaupés, Chocó y Caquetá. También en algunas zonas hay sistemas de generación solar-diésel que se encuentran en el departamento de Bolívar en los corregimientos Isla Fuerte, Múcura y Santa cruz de Islate, con capacidades de 25 kW; híbrido solar-diésel en el departamento de Chocó en el corregimiento de Titumate que cuenta con capacidad de 105 kW; sistemas fotovoltaicos en Macuira – Flamencos (La Guajira); se implementó una experiencia del proceso termoquímico de gasificación en el Centro de Innovación Tecnológica (CIT) en Necoclí. [39]

**2.1.5. Selección de las Zonas No Interconectas: Caso de estudio.** Para la selección de los dos casos de estudio de las ZNI se tuvo en cuenta el departamento con mayor demanda energética, Nariño fue descartado porque cuenta con un Plan de Energización Rural Sostenible (PERS) a corto, mediano y largo plazo por parte de entidades gubernamentales como IPSE, UPME, la Agencia de Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID), entre otras [40].

El departamento del Chocó cuenta con 30 municipios, de los cuales 25 pertenecen a las ZNI. Se seleccionaron los municipios de Medio Atrato y El Carmen del Darién.

Medio Atrato se seleccionó por ser un municipio con alto número de usuarios sin servicio de energía eléctrica (2.098) y se tuvo en cuenta la capacidad instalada requerida para suplir la necesidad energética (129,53 KWh) [41]. Además se seleccionó tres tipos de biomasa agrícola; aunque no se tienen reportes de entidades gubernamentales para esta zona de estudio, se tienen datos departamentales en los que se reportó la cantidad de residuos generados: para el raquis de plátano 628.882 t/año, cascarilla de arroz 54.991 t/año y rastrojo de maíz 19.766 t/año [34].

Para el caso de El Carmen del Darién, según datos reportados por la UPME para el 2014, presentaba alta demanda eléctrica de 1.077.504 kwh/año y un alto déficit de cobertura de este servicio (80,26%). Además este municipio es uno de los principales productores de maderas en el departamento del Chocó según datos de producción de venta de CODECHOCÓ presentando para el año 2014 una producción de 61.844 m<sup>3</sup> [42]. Debido a la falta de información sobre residuos forestales de madera, se tuvo en cuenta sólo la producción de ventas y el tipo de biomasa forestal que se genera en estas zonas. Se escogió el roble, abarco y bálsamo, porque son los que contienen menor porcentaje de humedad con respecto a otras biomásas y esto permite eliminar el proceso de secado.

## **2.2. SELECCIÓN DEL PROCESO TERMOQUÍMICO QUE SE ADAPTE A LAS NECESIDADES ENERGÉTICAS DE LAS ZNI MEDIANTE VIGILANCIA TECNOLÓGICA**

**2.2.1. Palabras clave a vigilar.** Se identificaron las diferentes palabras que son claves para la búsqueda de información de los diferentes procesos y tecnologías que se están empleando actualmente:

Biomass, lignocellulosic biomass, agricultural residue, agricultural waste, forest residue, crop residue, thermochemical processes, thermochemical conversion, combustion, co-combustion, direct combustion, cofiring, direct burning, direct firing, gasification, gasifier, syngas, energy, power, energetics, electric power, electricity, thermoelectric power, biomass power, heat and power generation, biomass electrical energy, electricity from biomass, electricity supply, renewable energy, rural electrification, thermoelectric plant, pyrolysis.

**2.2.2 Identificación de los diferentes procesos termoquímicos y sus tecnologías.**

- **Selección de dos procesos termoquímicos.**

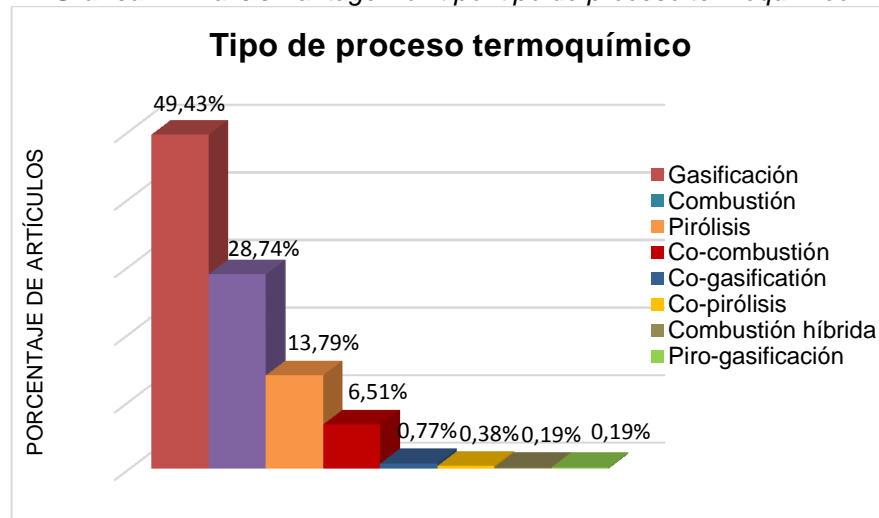
Se construyó una ecuación de búsqueda teniendo en cuenta operadores boléanos como AND, OR, NOT y las palabras claves identificadas en el numeral 2.2.1, con el fin de ingresarla a la base de datos Scopus; esta ecuación se limitó desde el año 2005 hasta el año 2015, con el fin de obtener los dos procesos termoquímicos más empleados durante los últimos 10 años. La ecuación para la búsqueda de procesos termoquímicos es la siguiente:

```
TITLE-ABS-KEY(Electric* OR "Electrical energy" OR "electric power" OR "electricity supply" OR
"Thermoelectric power" OR "thermoelectric plant" OR electricity OR "biomass electrical energy" OR
electrification* OR "heat and power generation") AND TITLE-ABS-KEY(Biomass) AND TITLE-ABS-
KEY("lignocellulosic biomass" OR "agricultural residue$" OR "agricultural waste" OR "forest
residue$" OR briquett* OR pellet* OR "wood" OR "crop residue$" OR "energy crop") AND TITLE-
ABS-KEY("thermochemical process*" OR combustion OR cocombustion OR pyrolysis OR
gasification OR gasifi* OR "syngas" OR "thermochemical conversion" OR "Direct combustion" OR
"Cofiring" OR "Direct burning" OR " Direct firing" OR "Direct-firing") AND NOT TITLE-ABS-
KEY(NOT "wastewater treatment" NOT "water treatment" NOT "anaerobic digestion" NOT
"Pyrolysis molecular" NOT biodiesel NOT methanol NOT ethanol NOT biochar NOT bio oil NOT
microbial NOT "liquid biomass" NOT manure NOT "heavy metal" NOT "activated carbon" NOT
"electric vehicles" NOT "chemical elements" NOT "mineral elements" NOT "biomass Composition"
NOT "Energy Materials" NOT "ceramic*" NOT "Carbohydrate") AND PUBYEAR > 2004 AND
(EXCLUDE (EXACTKEYWORD,"Fuels") OR EXCLUDE (EXACTKEYWORD,"Environmental
impact") OR EXCLUDE (EXACTKEYWORD,"Fossil fuels") OR
EXCLUDE(EXACTKEYWORD,"Priority journal")) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2015) OR LIMIT-TO
(PUBYEAR , 2014) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2013) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2012) OR LIMIT-
TO (PUBYEAR , 2011) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2010) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2009) OR
LIMIT-TO (PUBYEAR , 2008) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2007) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2006)
OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2005))
```

De esta ecuación se obtuvieron 666 resultados, a los cuales se les realizó un filtro para obtener un resultado más preciso; se pudo obtener finalmente 483 artículos,

que posteriormente se ingresaron en el software Vantage Point para llevar a cabo la clasificación de la información:

**Gráfica 2.** Análisis Vantage Point por tipo de proceso termoquímico



De la gráfica 2 se puede observar que el proceso termoquímico más estudiado actualmente es la gasificación con 49,43%, seguido de la combustión con 28,74%, en tercer lugar se encuentra la pirólisis con 13,79%, el proceso de Co-combustión representa el 6,51%, la Co-gasificación tiene 0,77%, Co-pirólisis 0,38%, según los datos obtenidos el proceso termoquímico menos empleado actualmente con 0,19% es la combustión híbrida y la piro-gasificación. Estos resultados pueden deberse en el caso de la piro-gasificación y la combustión híbrida a que son procesos no desarrollados, están en investigación y son poco comerciales; mientras que la tecnología de gasificación presenta ciertas ventajas como bajas emisiones contaminantes, gas de síntesis de fácil almacenamiento y altas eficiencias con respecto a los otros procesos termoquímicos [43] [12] [44], presentándose como una alternativa viable para ser implementada en diversos lugares; en cuanto a la combustión es una tecnología ampliamente probada, que se ha implementado desde tiempos remotos para generar energía térmica y

eléctrica [45]. Se escogieron los dos procesos termoquímicos (gasificación y combustión) con mayor porcentaje de investigación con el fin de realizar Vigilancia tecnológica por tipo de tecnología.

- **Selección de las tecnologías.**

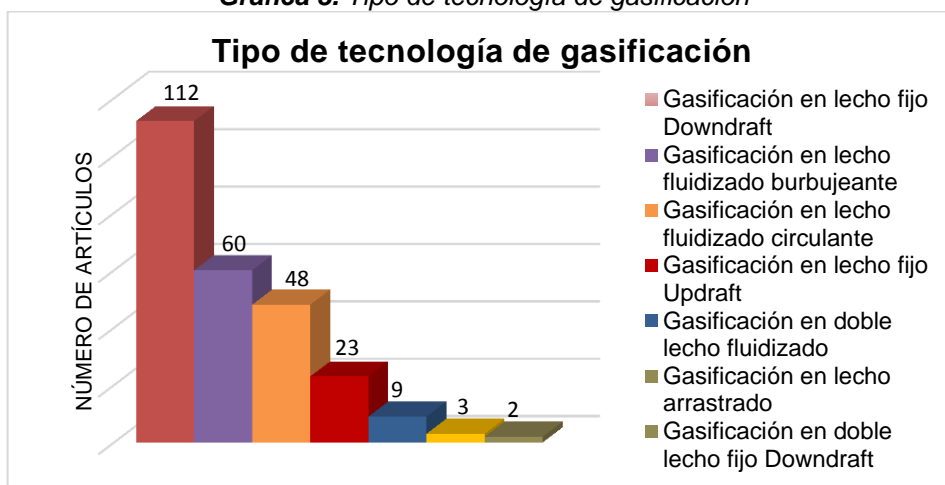
Se realizó vigilancia tecnológica por tipo de tecnología a los procesos de gasificación y combustión, planteando una ecuación de búsqueda para cada uno de los procesos termoquímicos escogidos.

- **Ecuaciones de búsquedas para la tecnología de gasificación.**

```
TITLE-ABS-KEY ("gasification" OR "gasifier") AND TITLE-ABS-KEY ("downdraft" OR "updraft" OR "fixed bed" OR "fluidized bed" OR "bubbling fluidized bed" OR "circulating fluidized bed gasification") AND TITLE-ABS-KEY (Biomass) AND TITLE-ABS-KEY("lignocellulosic biomass" OR "agricultural residue$" OR "agricultural waste" OR "forest residue$" OR briquett* OR pellet* OR "wood" OR "crop residue$" OR "energy crop") AND ( LIMIT-TO(PUBYEAR,2015) OR LIMIT-TO(PUBYEAR,2014) OR LIMIT-TO(PUBYEAR,2013) OR LIMIT-TO(PUBYEAR,2012) OR LIMIT-TO(PUBYEAR,2011) OR LIMIT-TO(PUBYEAR,2010) OR LIMIT-TO(PUBYEAR,2009) OR LIMIT-TO(PUBYEAR,2008) OR LIMIT-TO(PUBYEAR,2007) OR LIMIT-TO(PUBYEAR,2006) OR LIMIT-TO(PUBYEAR,2005)) AND (EXCLUDE(EXACTKEYWORD,"Pyrolysis")) AND (EXCLUDE(EXACTKEYWORD,"Char")) AND (EXCLUDE(EXACTKEYWORD,"Biological materials") OR EXCLUDE(EXACTKEYWORD,"Polymer blends")) AND (EXCLUDE(EXACTKEYWORD,"Ammonia") OR EXCLUDE(EXACTKEYWORD,"Methanol")) AND (EXCLUDE(EXACTKEYWORD,"Catalysis") OR EXCLUDE(EXACTKEYWORD,"Gas emissions") OR EXCLUDE(EXACTKEYWORD,"Nitrogen")) AND (EXCLUDE(EXACTKEYWORD,"Municipal solid waste") OR EXCLUDE(EXACTKEYWORD,"Nickel") OR EXCLUDE(EXACTKEYWORD,"Phenols") OR EXCLUDE(EXACTKEYWORD,"Potassium")) AND (EXCLUDE(EXACTKEYWORD,"Tar concentration"))
```

En la ecuación de búsqueda se generaron 337 resultados, a los cuales se les aplicó un filtro, obteniendo un resultado final de 241 artículos, y posteriormente se ingresaron en el software Vantage Point para su respectiva clasificación, obteniéndose los siguientes resultados:

**Gráfica 3. Tipo de tecnología de gasificación**



En la gráfica 3 se observa que las tecnologías más estudiadas son la gasificación en lecho fijo Downdraft (112 artículos) y gasificación en lecho fluidizado burbujeante (60 artículos). Es posible que estos resultados se deban a que el lecho fijo es una tecnología que ha sido ampliamente investigada y comercializada, presenta alta conversión de combustible, produce bajas cantidades de alquitrán y es de bajo costo; en cuanto a la gasificación de lecho fluidizado burbujeante probablemente se deba a que genera baja producción de alquitrán, alta tasa de transferencia de calor y produce un gas uniforme [46]. Por otro lado se observó que la tecnología menos empleada es la gasificación en doble pared Downdraft con 0,59% del total de artículos publicados, este resultado se pudo dar debido a que es una tecnología poco desarrollada [44]. Se escogieron las dos tecnologías de gasificación en lecho fijo Downdraft y lecho fluidizado burbujeante.

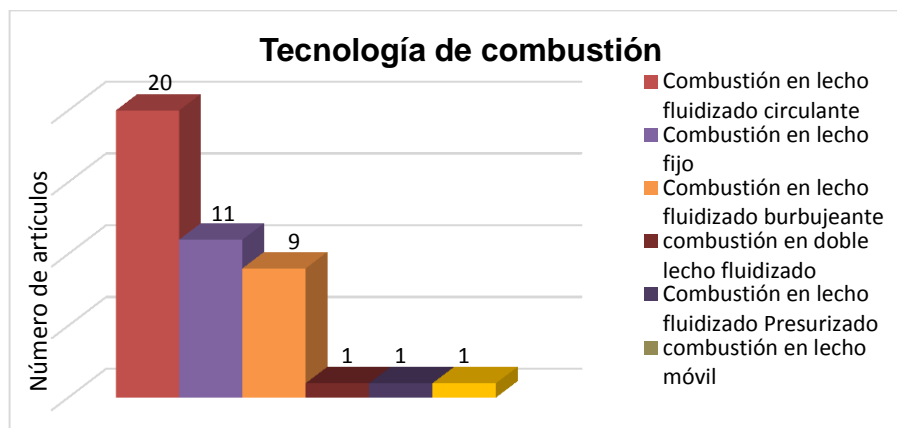
➤ **Ecuación de búsqueda para la tecnología de combustión.**

TITLE-ABS-KEY ("combustion" OR "cocombustion" OR "Direct combustion" OR "Cofiring" OR "Direct burning" OR "Direct firing") AND TITLE-ABS-KEY ("boiler") AND TITLE-ABS-KEY ("fixed bed" OR "fluidized bed" OR "pulverized fuel" OR "drag flow" OR "fixed grate" OR "inclined grate" OR "Horizontal grate" OR "vibrating grate" OR "moving grate") AND TITLE-ABS-KEY (Biomass)

AND TITLE-ABS-KEY("lignocellulosic biomass" OR "agricultural residue\$" OR "agricultural waste" OR "forest residue\$" OR briquett\* OR pellet\* OR "wood" OR "crop residue\$" OR "energy crop") AND (LIMIT-TO(PUBYEAR,2015) OR LIMIT-TO(PUBYEAR,2014) OR LIMIT-TO(PUBYEAR,2013) OR LIMIT-TO(PUBYEAR,2012) OR LIMIT-TO(PUBYEAR,2011) OR LIMIT-TO(PUBYEAR,2010) OR LIMIT-TO(PUBYEAR,2009) OR LIMIT-TO(PUBYEAR,2008) OR LIMIT-TO(PUBYEAR,2007) OR LIMIT-TO(PUBYEAR,2006) OR LIMIT-TO(PUBYEAR,2005)) AND (EXCLUDE(EXACTKEYWORD,"Sewage sludge")) AND (EXCLUDE(EXACTKEYWORD,"Ammonium compounds") OR EXCLUDE(EXACTKEYWORD,"Animals") OR EXCLUDE(EXACTKEYWORD,"Paper Industry") OR EXCLUDE(EXACTKEYWORD,"Paper and pulp industry")) AND (EXCLUDE(EXACTKEYWORD,"Zinc")) AND (EXCLUDE(EXACTKEYWORD,"Pyrolysis")) AND (EXCLUDE(EXACTKEYWORD,"Ash") OR EXCLUDE(EXACTKEYWORD,"Nitrogen oxides")) AND (EXCLUDE(EXACTKEYWORD,"Coal ash") OR EXCLUDE(EXACTKEYWORD,"Eurasia") OR EXCLUDE(EXACTKEYWORD,"Municipal Solid Waste"))

Esta ecuación de búsqueda arrojó 68 resultados, posteriormente se le aplicó un filtro con el fin de seleccionar únicamente los artículos que más se adecuaban al tema de búsqueda pertinente a este trabajo, dando como resultado 43 artículos que se ingresaron en el Vantage Point, para clasificar la información obteniendo los siguientes resultados:

**Gráfica 4.** Número de artículos por tipo de tecnología de combustión



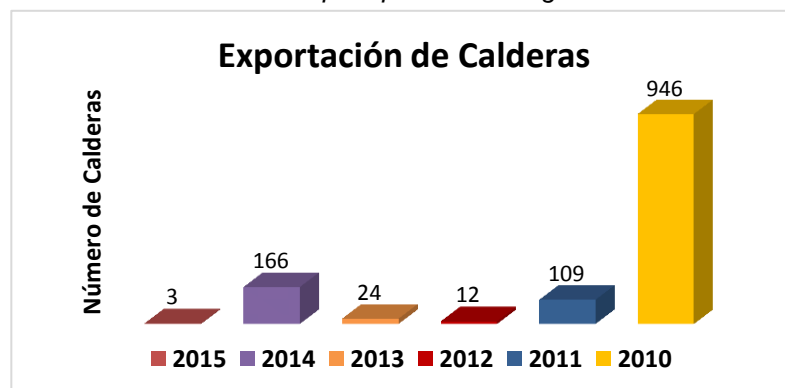
De la gráfica 4 se puede ver que la combustión en lecho fluidizado circulante es la que ha tenido mayor relevancia en los últimos 10 años ya que representa el

46,51% de los resultados obtenidos en la vigilancia tecnológica, este resultado posiblemente se dio debido a que este tipo de lechos son los que tienen mayores rendimientos, facilidad de operación y mejor calidad en el gas producido; en segundo lugar se encuentra la combustión en lecho fijo con 25,58% probablemente por ser una tecnología muy desarrollada y ampliamente probada [47]. También se puede ver que los menos investigados han sido las tecnologías de combustión en doble lecho fluidizado, combustión en lecho fijo en contracorriente y combustión en lecho fluidizado presurizado, con tan sólo 1 artículo por cada tecnología, esto se puede deber a que son tecnologías en desarrollo y las referencias existentes en el mercado son menores [48]. Se escogieron las tecnologías de combustión en lecho fluidizado circulante y lecho fijo.

### 2.2.3. Identificación de la oferta y la demanda de las tecnologías escogidas.

En las reseñas estadísticas de ProColombia para equipos de combustión, se encontró que se exporta mayormente por vía marítima a distintos países como lo son Panamá, Ecuador, Perú, Venezuela, Estados Unidos, Guatemala, Puerto Rico, República Dominicana entre otros.

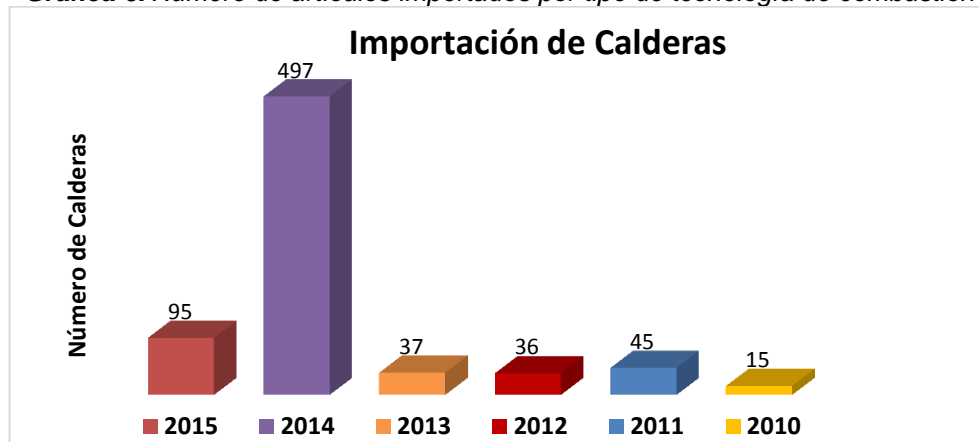
**Gráfica 5.** Estadísticas por tipo de tecnología de combustión



**Fuente:** ProColombia, Dane; 2015 [49] [50]

En la gráfica 5 se puede apreciar que la participación de las exportaciones de calderas para el año 2011 se redujo cerca del 90% con respecto al año anterior, el descenso de las exportaciones se explica, en parte, por el decrecimiento de la producción de la industria manufacturera colombiana afectando el PIB del país, trayendo consigo una disminución de la oferta [51]. Por otra parte se presentó un leve incremento en los años 2013 al 2014, presentando un crecimiento cercano al 20% posiblemente por el hecho de que en ese tiempo la demanda interna y externa de la industria manufacturera del país fue mejor [52]. Según el presidente de Analdex, Javier Díaz, para el año 2015 en Colombia las exportaciones se vieron afectadas por la “estructura de costos muy alta”, ya que los impuestos fueron mayores con respecto al de los otros países, costo de fletes altos y el coste de energía elevado, entre otros factores que afectaron las exportaciones de este tipo de tecnologías [53]. Esto conllevó a disminuir el interés de inversión extranjera y por ende a bajas exportaciones.

**Gráfica 6.** Número de artículos importados por tipo de tecnología de combustión



**Fuente:** ProColombia, Dane; 2015 [49] [50]

Según la gráfica 6 para los años 2013 a 2014 se presentó un incremento superior al 90% en importación de calderas, la causa de este alto crecimiento quizá fue

debido a la falta de producción por parte de la industria manufacturera, sin embargo, en el 2015 hubo un decrecimiento cercano al 81% probablemente debido a incrementos de la moneda extranjera respecto al peso colombiano [54]. Cabe resaltar que los anteriores datos encontrados en los reportes de Procolombia y el Dane son para partida arancelaria N°.8405100000 (Las demás calderas de vapor (generadores de vapor), incluidas las calderas mixtas, excepto las de calefacción central); las tecnologías escogidas pueden encajar en dicha partida, debido a que en documentos gubernamentales no se encuentran datos precisos de estos tipos de tecnologías.

Aunque el proceso de gasificación se ha venido desarrollando durante más de 100 años, en Colombia esta tecnología está en proceso de desarrollo; por consiguiente, aún no se presentan datos específicos de importaciones y exportaciones. Sin embargo se encontró que en el año 2008 se obtuvo la primera patente de un gasificador de lecho fluidizado, por personal de las universidades de Antioquia, Pontificia Bolivariana y la Nacional de Colombia (Sede Medellín), y la empresa ladrillera San Cristóbal S.A. [55].

**2.2.5. Selección de las tecnologías.** Debido a que las zonas escogidas requieren una producción de pequeña escala, se decidió utilizar la tecnología de combustión en lecho fijo para la selección de las tecnologías, fundamentalmente porque la tecnología de combustión de lecho fijo tiene una capacidad de procesamiento de 5 KW hasta 5 MW, mientras que la tecnología de combustión en lecho fluidizado es recomendada para generación de altas potencias superiores a 100 MW. [56] [45]

De la tabla 2 se puede destacar que el tipo de tecnología que más se adapta a las zonas escogidas para el caso del proceso de gasificación en lecho fijo Downdraft, especialmente por la capacidad de procesamiento requerida, además por ser de fácil construcción y operación.

**Tabla 2.** Gasificación en lecho fijo Downdraft y lecho fluidizado burbujeante

<b>Gasificación</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Lecho fijo Downdraft	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Capacidad de procesamiento de 0,1 MW<sub>e</sub> hasta 1 MW<sub>e</sub></li> <li>*Costo de inversión no tan elevado</li> <li>*Generación de muy bajo contenido de alquitrán</li> <li>*Buena conversión del combustible</li> <li>*Fácil construcción y operación</li> <li>*Gas de síntesis limpio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Requiere biomasa de bajo contenido de humedad</li> <li>*No es fácilmente escalable</li> </ul>
Lecho fluidizado burbujeante	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Capacidad de procesamiento de 2 MWe hasta 100 MWe</li> <li>*Permite mayor porcentaje de humedad</li> <li>*Alta eficiencia</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Genera alto contenido de tar</li> <li>*Mala respuesta ante variaciones de carga</li> <li>*Alto costo de inversión</li> <li>*Gas de síntesis sucio</li> </ul>

**Fuente:** Sierra, Guerrero, Forero, 2011; Arroyo, 2011; Pérez, 2014 [57] [58] [59]

Debido a que no se tienen datos suficientes para hacer el análisis de costo por Kwh generado se recurrió a la literatura para la selección del proceso termoquímico. Un estudio realizado por la Universidad Industrial de Santander encontró el cálculo del costo total de inversión para una planta generadora de electricidad a partir de biomasa para las ZNI de Colombia empleando el software Homer Energy, dando como resultado que la producción de energía a partir de la combustión de biomasa por kW es 4 veces más costosa que la producción a partir de la gasificación [60].

Ambientalmente, el proceso termoquímico de gasificación es más amigable con el medio ambiente ya que presenta menor emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera porque la combustión completa se da en presencia de O<sub>2</sub>, mientras que en la gasificación, la reducción se realiza en ausencia o baja concentración de O<sub>2</sub>, además en el proceso de combustión se obtienen cenizas como productos sólidos; la retención, extracción y tratamiento de estas sustancias puede contaminar el agua y el suelo debido a la presencia de sustancias tóxicas entre los compuestos que constituyen las cenizas. Por las razones anteriormente expuestas se escogió el proceso de gasificación de lecho fijo en corriente descendente.

Se solicitó información a empresas en Colombia y en el exterior sobre tecnologías de gasificación en lecho fijo en corriente descendente de bajas potencias.

**Tabla 3.** Tecnología de gasificación de lecho fijo en corriente descendente.

<b>TECNOLOGÍA</b>	<b>EMPRESA</b>	<b>POTENCIA</b>	<b>COSTO TOTAL DE EQUIPO</b>
<b>Gasificador Ginox</b>	Ginox S.L.	0,0111 Mwe	226.000 €
<b>Gasificador Biomax 100</b>	Community Power Corporation	0,1 Mwe	973.000 €
<b>Gasificador Greene</b>	Greene	0,5 Mwe	1.715.000 €
<b>Gasificador TK</b>	Taim Weser	0,65 Mwe	2.400.000 €
<b>Gasificador TK</b>	Taim Weser	1,3 Mwe	4.200.000 €
<b>Gasificador TK</b>	Taim Weser	1,8 Mwe	5.500.000 €

**Fuente:** Autores a partir de cotizaciones a diversas empresas.

En la tabla 3 se pueden observar algunas de las tecnologías existentes. Dependiendo de la producción de biomasa de la zona y su ubicación geográfica se puede seleccionar una u otra tecnología. Para los casos de estudio seleccionados se asume la recolección de los residuos en un solo lugar, por lo tanto se sugiere la tecnología Gasificador Greene, ya que esta puede abastecer la demanda energética puesto que puede generar hasta 500 KW<sub>e</sub> [41]; además es una tecnología que trabaja con diversos tipos de combustibles, pudiendo adaptarse a la biomasa presente en dicha zona y presenta como ventajas medioambientales que es amigable con el medio ambiente ya que reduce la emisión de gases de efecto invernadero: en un 40% las emisiones de CO<sub>2</sub> y en un 100% las de CH<sub>4</sub>. Se evita la emisión de gases tóxicos como: SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub> y NO<sub>x</sub> (promotores de lluvia ácida), furanos y dioxinas (agentes cancerígenos). Esta tecnología presenta una eficiencia eléctrica del 23% y está en la capacidad de procesar 3400 ton/año de residuos agrícolas (Ver Anexo G).

## 2.3. SIMULACIÓN

### ❖ Consideraciones para la simulación.

Para realizar la simulación del proceso de gasificación, se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones [61] [62]:

- El proceso es isotérmico y constante.
- Todos los gases se distribuyen uniformemente dentro de cada zona de división.
- El tiempo de permanencia de los gases en el gasificador es lo suficientemente alto para establecer equilibrios termodinámicos y químicos.
- Se utiliza reactores de Gibss; estos son usados cuando la estequiometria de la reacción es desconocida, pero se conoce la temperatura y presión del reactor [45]; se emplea el modelo de minimización de la energía libre de gibss en el equilibrio y se considera que no hay pérdidas de presiones.
- Se considera presiones bajas, por lo tanto los gases se suponen gases ideales
- El método de cálculo del software se manejó con el modelo PR-BM, el cual calcula las propiedades físicas del gas y componentes sólidos [63]; en la literatura se recomienda este modelo para producción y procesamientos de gas, generación de energía entre otros.
- Los sólidos que se generan son las cenizas de biomasa. El char es despreciable, porque se considera un alto rendimiento en la gasificación.
- Agente gasificante es aire
- Cero-dimensionamiento.

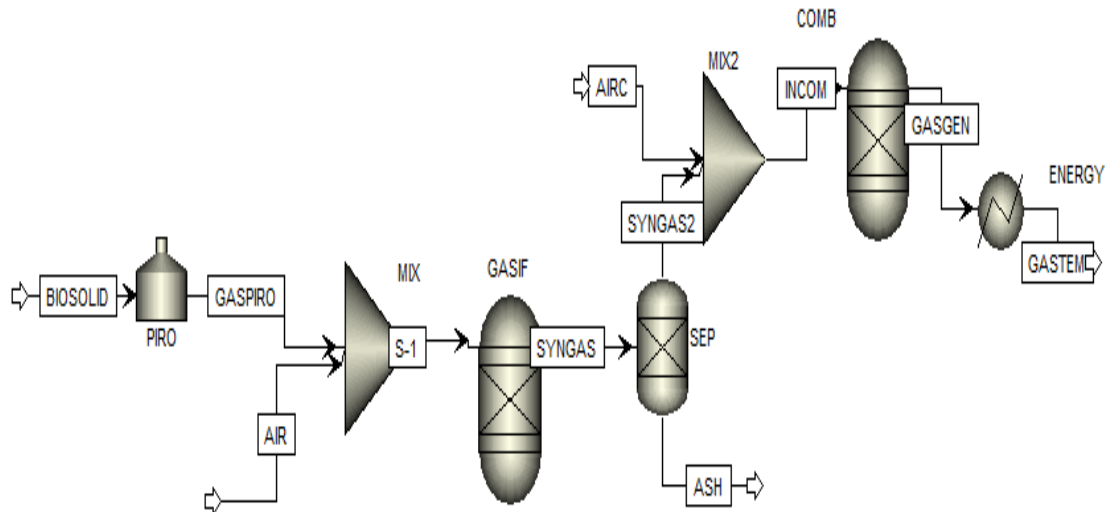
### ❖ **Condiciones de operación para la simulación.**

La simulación se compone de ciertos bloques como se ilustra en la figura 2; en donde la biomasa sólida se ingresa al equipo de pirólisis (PIRO) y esta se descompone en sus elementos principales tales como C, H, O, N, Cenizas entre otros. Después se utiliza el reactor de Rgibss (GASF); en este ocurre la gasificación, los componentes de la biomasa son mezclados con el agente gasificante y realizan diversas reacciones que se pueden observar en el Anexo H, se emplea exceso de oxígeno del 30% [64], logrando así el gas de síntesis (SYNGAS).

Luego el gas de síntesis pasa a un proceso de purificación donde se le retira las cenizas. Después se dirige a un mezclador con flujo de aire que contiene un coeficiente de exceso de 1,2, para que la combustión sea completa en el motor de combustión [65]; En el motor de combustión se utiliza otro reactor de Rgibss (COMB), donde se ingresa el flujo de mezcla y ocurren ciertas reacciones; la energía liberada en las reacciones se aprovecha para transformarla en energía mecánica, esta energía es transmitida al generador para la producción de energía eléctrica.

Antes de ingresar al generador se le debe bajar la temperatura, debido a que el equipo no admite altas temperaturas porque baja el rendimiento o puede ocasionar daños en el generador. Por lo tanto se pasa por un intercambiador de calor bajándole la temperatura a 60 °C.

**Figura 1.** Diagrama del proceso de gasificación



**Fuente:** Autores

Para llevar a cabo la simulación se ingresó 450 kg/h de biomasa, ya que la tecnología de gasificación escogida requiere esta capacidad [64]. En la tabla 5 se puede ver las condiciones de los reactores y las corrientes de entrada.

**Tabla 4.** Condiciones de operación en el proceso.

Corriente GASPRO ( Gas pirólisis)	Temperatura: 500°C
	Presión: 1 bar
Corriente AIR (Aire)	Temperatura: 25°C
	Presión: 1 bar
	Flujo molar: 2,07 kmol/h
Gasificador GASF	Temperatura: 850°C
	Presión: 1 bar
	Agente gasificante: aire
Motor de Combustión COMB	Temperatura: 1200°C
	Presión: 1 bar
	Coefficiente de exceso aire: 1,2
Corriente ARC (Aire)	Temperatura: 25°C
	Presión: 1 bar
	Flujo molar: 52 kmol/h

**Fuente:** Autores a partir Severns, Degler, Miles, 2007; Greene, 2015, [64] [65]

En la simulación las entradas de los flujos de aire, las condiciones de los reactores y demás equipos se mantuvieron constantes; sólo se varió el tipo de biomasa.

#### ❖ Caracterización de la biomasa agrícola.

Se utilizó tres tipos de biomasa más representativos casi en todas las zonas, especialmente en el departamento del Chocó: raquis de plátano, cascarilla de arroz y rastrojo de maíz. En las tablas 6 y 7 se puede observar el análisis próximo y composición elemental de cada tipo de biomasa agrícola.

**Tabla 5.** Análisis próximo de cada tipo de biomasa

<b>Biomasa</b>	<b>Humedad</b>	<b>M. Volátiles</b>	<b>Carbono Fijo</b>	<b>Cenizas</b>	<b>PCI [ kJ/Kg]</b>
Raquis Plátano	10,66	69,17	14,52	16,32	7.570
Cascarilla arroz	9,4	65,47	16,67	23,1	17.644
Capacho Maíz	8,52	95,29	2,21	2,50	16.589

**Fuente:** Escalante; Orduz; Zapata; Cardona; Duarte; 2010 y Valverde; Sarria; Monteagudo; 2007. [34] [66]

**Tabla 6.** Composición elemental de cada tipo de biomasa (%p/p)

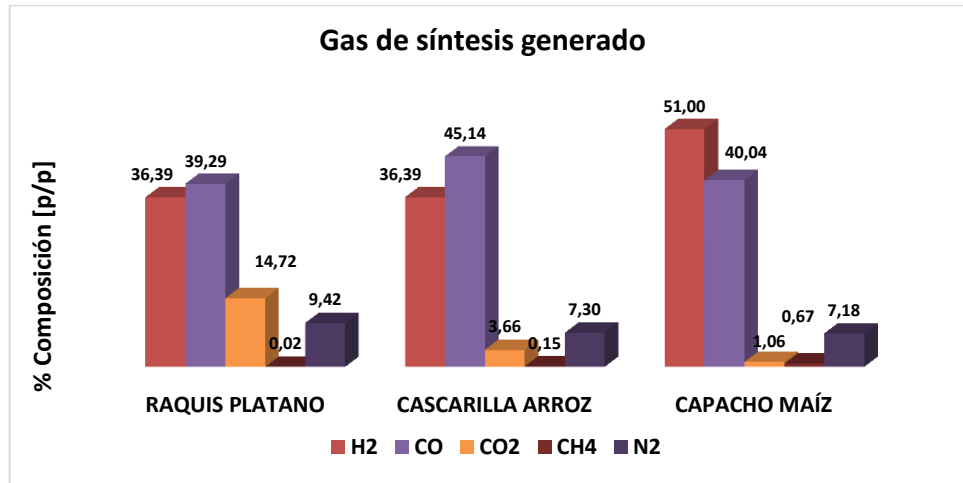
<b>Biomasa</b>	<b>C[%]</b>	<b>H[%]</b>	<b>O[%]</b>	<b>N[%]</b>	<b>S[%]</b>
Raquis Plátano	30,42	3,50	48,54	0,97	0,25
Cascarilla arroz	33,4	4,3	38,5	0,38	0,32
Capacho Maíz	55,45	6,37	35,33	0,30	0,12

**Fuente:** Hernández; Orduz; Zapata; Cardona; Duarte; 2010 y Valverde; Sarria; Monteagudo; 2007. [34] [66]

#### ❖ Análisis del proceso de simulación con biomasa agrícola

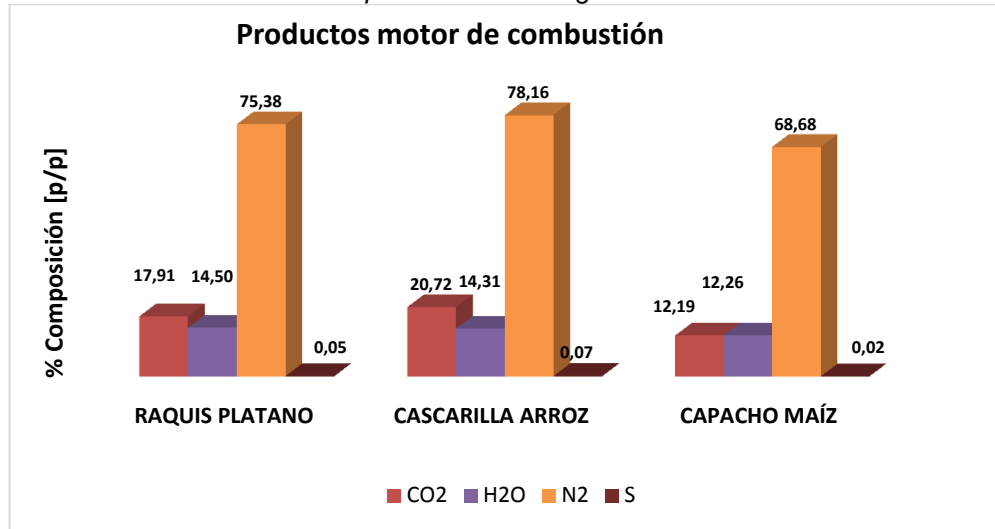
En la gasificación se obtuvo un gas de síntesis compuesto principalmente por CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>. Según la literatura el gas de síntesis está compuesto por H<sub>2</sub> (20-40%), CO (35-40%), CO<sub>2</sub> (25-35%), CH<sub>4</sub> (0-15%) y N<sub>2</sub> (46-56%) [67]

**Gráfica 7.** Representación del gas de síntesis de diferentes tipos de biomasa.



Se puede observar en la gráfica 7 los porcentajes de los componentes del gas de síntesis generado a las condiciones descritas en el gasificador se acercan o están en los rangos de la literatura. En este proceso se genera en mayor proporción H<sub>2</sub> y CO, gases importantes para el proceso en el motor de combustión, el cual permite generar energía eléctrica a través del generador [68]. De acuerdo a la simulación el tipo de biomasa que genera mayor contenido de H<sub>2</sub> y CO es el capacho de maíz con 50,9% H<sub>2</sub> y 40% CO, seguido de la cascarilla de arroz con 44% H<sub>2</sub> y 45% CO. El gas de síntesis con mayor poder calorífico inferior (PCI) es el capacho de maíz con 775,640 Kcal/m<sup>3</sup> con respecto al PCI del syngas de los otros tipos de residuos se pueden observar en el anexo H. Como el PCI es la energía liberada que se puede obtener en la combustión y el agua se presenta en fase vapor [69]; el capacho permitirá transmitir mayor energía al generador. El raquis de plátano es la biomasa que más emisiones contaminantes genera, debido a que tiene mayor contenido de CO<sub>2</sub> (14,7%) y N<sub>2</sub> (9,4%). El tipo de biomasa más favorable es el capacho de maíz, ya que el rango de emisiones comprendido es bajo con respecto a los otros tipos de biomasa.

**Gráfica 8.** Representación de la composición de los productos del motor de combustión diferentes tipos de biomasa agrícola.



En la gráfica 8 se puede evidenciar, que la cascarilla de arroz es la mayor de porcentaje de contaminantes, teniendo el 20% de CO<sub>2</sub>, 78% N<sub>2</sub> y 0,07%S; seguida del raquis de plátano con 17% de CO<sub>2</sub>, 75% N<sub>2</sub> y 0,055%S. Por lo tanto el más favorable para el medio ambiente es el capacho de maíz comparado con los otros tipos de biomasa, ya que generan bajos contenidos de CO<sub>2</sub> (12%), N<sub>2</sub> (68%) y S (0,02%). Cabe resaltar que se operó todo a las mismas condiciones, por lo que se observó que la relación de aire en la combustión para el capacho de maíz debe ser un poco más alta, puesto que después de pasar por el motor de combustión contiene todavía 18% CO. Se pudo notar que la biomasa con menor porcentaje de humedad (Capacho de maíz) generó mejores resultados tanto en el gas de síntesis, como en el proceso a la salida del motor de combustión, logrando emisiones bajas con respecto a las otras biomásas.

Cabe resaltar que industrialmente el motor de combustión genera emisiones de NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> y SO<sub>3</sub>, sin embargo, para efectos de la simulación el reactor escogido asumió que se generaba S y N<sub>2</sub> de manera independiente, tanto para la biomasa agrícola como para la forestal.

❖ **Características de la biomasa forestal.**

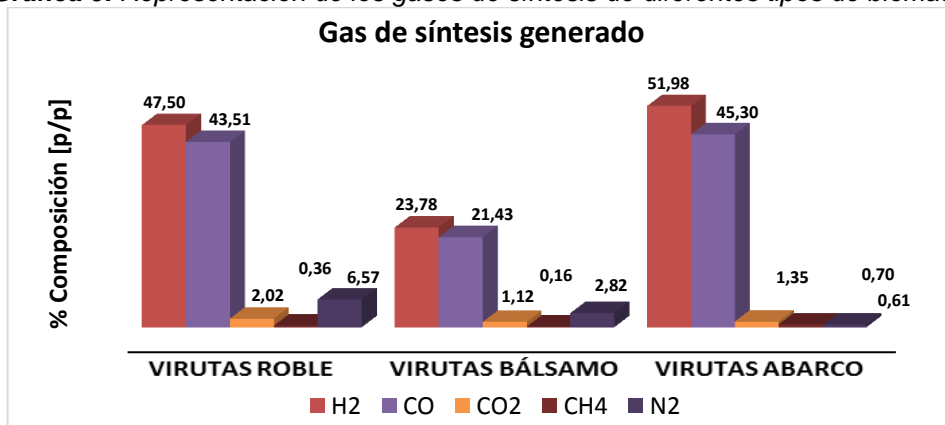
**Tabla 7.** Composición elemental de cada tipo de biomasa (%p/p)

Biomasa	C[%]	H[%]	O[%]	N[%]	S[%]	Humedad	Cenizas
Virutas Roble	39,66	4,82	33,71	0,78	0,09	18,37	20,94
Virutas Bálsamo	37,46	4,80	34,07	0,73	0,08	16,71	22,86
Virutas Abarco	40,61	4,93	33,83	0,62	0,09	13,40	19,92

*Fuente:* Agamez; Arroyo-2016 [42]

❖ **Análisis del proceso de simulación con biomasa forestal**

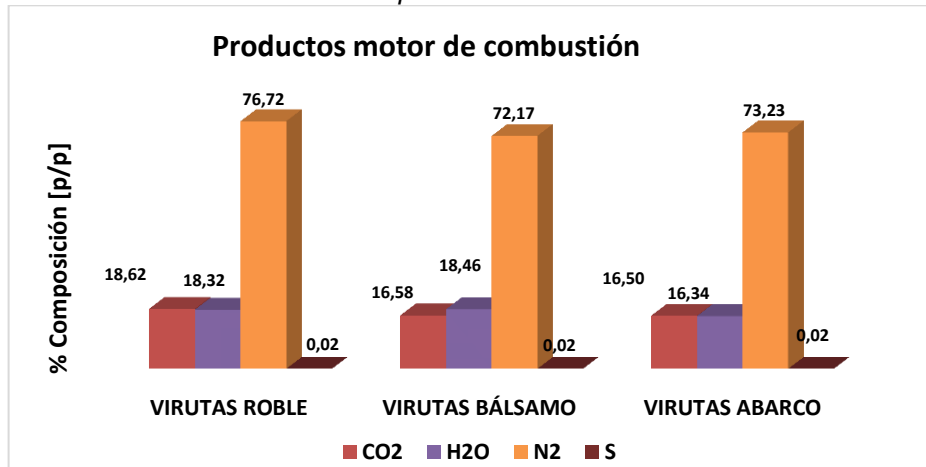
**Gráfica 9.** Representación de los gases de síntesis de diferentes tipos de biomasa.



En la gráfica 9 se puede notar que el syngas generado a partir de virutas de abarco contiene 52% H<sub>2</sub> y 45% CO y el PCI es el más alto con 799,718 kcal/m<sup>3</sup> con respecto a las otras biomásas y es el que menos emisiones contaminantes genera: 1,3% CO<sub>2</sub> y 0,6%N<sub>2</sub>. La biomasa con mayor porcentaje de contaminación son la virutas de roble ya que contienen 2%CO<sub>2</sub> y 6,5%N<sub>2</sub>.

**NOTA:** Resolución 0909 de 2008. Párrafo Quinto: “los equipos de generación eléctrica impulsados por motores de combustión interna con capacidad igual o superior a 1 MW deben cumplir un límite de emisión admisible para MP de 50 mg/m<sup>3</sup>, para SO<sub>2</sub> de 400 mg/m<sup>3</sup> y para NO<sub>x</sub> de 300 mg/m<sup>3</sup>”.

**Gráfica 10.** Representación de la composición de los productos del motor de combustión diferentes tipos de biomasa forestal.



La gráfica 10 representa las emisiones a la salida del motor de combustión con diferentes tipos de biomasa forestal; se puede notar que se generan altos porcentajes de N<sub>2</sub> y bajos porcentajes de S. Las virutas de roble son los que tienen mayor porcentaje de contaminantes, debido a que contienen 18%CO<sub>2</sub>, 76% N<sub>2</sub> y 0,018%S; el más favorable para el medio ambiente son las virutas de abarco conteniendo 16%CO<sub>2</sub>, 73% N<sub>2</sub> y 0,019%S.

Además se constató que al mantener los flujos constantes de aire en el proceso, en el motor de combustión no se da completamente la reacción, ya que a la salida del reactor se presenta porcentajes pequeños de H<sub>2</sub> y CO; por lo tanto se debe aumentar el flujo de aire para que se aproveche todo el H<sub>2</sub> y CO, y así poder lograr una combustión completa. Por otra parte se pudo observar en la simulación que la biomasa con menor porcentaje de humedad (virutas abarco) dio mejores resultados en la producción del syngas y menor porcentaje de emisiones.

**Tabla 8.** Energía intercambiable de los diferentes tipos de biomasa

<b>Tipo de biomasa</b>	<b>Kw/hr</b>
Virutas Roble	795,026
Virutas Bálsamo	768,343
Virutas Abarco	839,924
Raquis de plátano	770,806
Cascarilla arroz	770,845
Capacho maíz	953,977

**Fuente:** Autores

En la tabla 8 se puede observar la energía que se puede transmitir al alternador de acuerdo al tipo de combustible implementado en las simulaciones. Se puede ratificar que el mejor tipo de biomasa agrícola es el capacho de maíz (953,977 kW/h) y de la forestal son las virutas de abarco (839,924 kW/h), porque son los que tiene mayor energía a intercambiar con el generador. La máxima potencia a producir es 500 kW<sub>e</sub> de acuerdo a la tecnología escogida.

### **3. CONCLUSIONES.**

La tecnología de gasificación de lecho fijo en corriente descendente se adapta a las necesidades energéticas de las zonas escogidas, ya que estos gasificadores son más apropiados para bajas potencias, además este puede suplir la demanda de energía eléctrica en las zonas de estudio ya que estas tienen una demanda inferior a 150 KW y el gasificador genera en rangos inferiores a 500 KW.

El capacho de maíz y las virutas de abarco se presentan como la mejor alternativa para generar energía eléctrica a partir de la gasificación en lecho fijo Downdraft en los casos de estudio, ya que generan un syngas con mayor PCI y bajas emisiones de CO<sub>2</sub>: capacho de maíz (1%), y virutas de abarco 1,3%.

#### **4. RECOMENDACIONES.**

Se recomienda hacer estudios de la biomasa residual forestal generada en las ZNI de Colombia para tener datos concretos que permitan poder llevar a cabo nuevos proyectos sobre generación de energía eléctrica.

Para futuras investigaciones se recomienda hacer variaciones de los tipos de biomasa y el flujo de aire a la entrada del motor de combustión interna para obtener el porcentaje óptimo que permita generar una energía más limpia; además se hace necesario someter la biomasa a un pretratamiento de secado, debido a que en las ZNI se encuentran distintos tipos de biomasa con altos porcentajes de humedad.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [1] UPME, Unidad de Planeación Minero Energética 2014. [En línea]. [citado el 9 Julio dec2015]. Disponible en internet: <URL: <http://www.siel.gov.co/Inicio/CoberturadelSistemaInterconectadoNacional/ConsultasEstadisticas/tabid/81/Default.aspx>>
- [2] FERNANDEZ, Jesús. Energías Renovables para todos. Biomasa. Madrid 2012. 20 p.
- [3] RICO, Javier. Energía de la Biomasa, Madrid, España: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2007. 140 p.
- [4] FERNANDEZ, Jesús. Guía completa de la Biomasa y los Biocombustibles. Madrid, España 2010.
- [5] JAVIER MILLAR, Héctor. Biomasa y sus propiedades como combustible. En: Celulosa y Papel. Octubre, 2009. pp. 24-28
- [6] CERDÁ, Emilio Energía obtenida a partir de biomasa, Madrid, España: Universidad Complutense de Madrid, 2008. 24 p.
- [7] NOGUÉS, Fernando; GARCÍA, Daniel y REZEAU, Adeline. Energía de la biomasa: Transformaciones termoquímica. Zaragoza, España: Prensas Universitarias de Zaragoza. 2010, pp. 55-56.
- [8] SÁNCHEZ, Consuelo. «Combustión,» de Teoría de la Combustión, Madrid, España: UNED, 2011, pp. 19-25.
- [9] CARRASCO, Juan. Combustión directa de la biomasa. EOI. 2008, pp. 3-30,
- [10] ENERGIA, Energía Sostenible para todos. [En línea]. [citado el 15 de febrero de 2015] Disponible en internet: <URL: [www.energia2012.es](http://www.energia2012.es)>
- [11] FERNÁNDEZ, Luis y GARCÍA, Eduardo. Obtención de gas combustible a partir de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo. Bogotá,

Colombia : Universidad Nacional de Colombia , 2011. 112 p.

- [12] RINCÓN, Sonia; GÓMEZ, Alexánder y KLOSE, Wolfgang. Gasificación de biomasa residual de procesamiento agroindustrial. Bogotá, Colombia, 2011, 132 p. Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica. Facultad de Ingeniería.
- [13] DEL VAL GENTO, Verónica y GIRALDO, Gregorio Antolín. Planta de cogeneración mediante gasificación de biomasa residual. Madrid, España, 2007, 25 p. Trabajo de grado. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales.
- [14] MORENO GONZÁLEZ, Francisco Javier. Simulación de gasificación de biomasa en lecho fluidizado burbujeante. Madrid, 2010, 107 p. Trabajo de grado (Ingeniero Industrial). Universidad Carlos III Madrid. Departamento de ingeniería térmica y de fluidos. Área tecnologías energéticas.
- [15] BESEL. Biomasa: Gasificación. Madrid, España : IDEA , 2007. 36 p.
- [16] AGRO WASTE. Pirólisis [En línea]. [citado el 15 de marzo de 2015] Disponible en internet: <URL: <http://www.agrowaste.eu/wp-content/uploads/2013/02/PIROLISIS.pdf>>
- [17] GÓMEZ, Alexánder; KLOSE, Wolfgang y RINCÓN, Sonia. Pirólisis de biomasa, Bogotá, Colombia : Universidad de Kassel, Universidad Nacional de Colombia, 2008. 133 p.
- [18] HERNANDEZ OLVERA, Nereyda. Pirólisis de Biomasa para producir biocombustible. San Nicolás de la Garza, México, 2011, 170 p. Trabajo de grado (Maestría en ciencias). Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ciencias Químicas.
- [19] MIGUEZ TABARÉS, José Luis. Procesos termoquímicos para la obtención de energía a partir de la fitomasa residual (combustión, gasificación, pirólisis).
- [20] ALONSO AGUADO, Antonio. Viabilidad de una planta de biomasa forestal para la producción de energía eléctrica. Madrid, España: E.T.S.I. de Minas y Energía (UPM), 2014.

- [21] VARGAS SALGADO, Carlos Afranio. Estudio comparativo de la utilización de las tecnologías de gasificación downdraft y lecho fluido burbujeante para la generación de energía eléctrica en aplicaciones de baja potencia. Valencia, España, 2012. 312 p. Tesis doctoral (Ingeniería y producción industrial). Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales.
- [22] GUERRERO CONTRERAS, Jenny Carolina y GAMBOA NIÑO, Carlos Fernando. Diseño residual de una planta piloto de combustión para el aprovechamiento energético de la biomasa residual del maíz, Bucaramanga, 2009, p. 30. Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Universidad Industrial de Santander. Facultad Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química.
- [23] PARRA, Jackson y CAMPOS, Karen. Análisis de la viabilidad económica de las tecnologías de generación eléctrica a partir de fuentes no convencionales de energía renovable en ZNI de Colombia utilizando el software Homer (versión demo): Tres casos de estudio. Bucaramanga, 2014, 107 p. Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Universidad Industrial de Santander. Facultad Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química.
- [24] GÓMEZ ESTEVEZ, Natalia. Energización de las Zonas no Interconectadas a partir de las Energías Renovables Solar y Eólica. Bogotá, 2011, 99 p. Trabajo de grado (Magister en Gestión Ambiental). Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de estudios Ambientales y Rurales.
- [25] BENAVIDES, Jairo Alberto. Observatorio de Energía Renovable para América Latina y el Caribe: Retos y oportunidades de las energías renovables en Colombia. Brasil: ONUDI, 2011. 107 p.
- [26] SEARCHTECHNOLOGY, «Search Technology, Inc.,» [En línea]. Disponible en internet: <URL: <https://www.thevantagepoint.com/>>.[citado el 5 de octubre de 2015]
- [27] MINISTERIO DE PLANIFICACIÓN, Metodología general de preparación y evaluación de proyectos. Chile, 2011.
- [28] HERRERA, Fernando Colí. Formulación y evaluación de proyectos de inversión. Las Gaviotas, México: Instituto Tecnológico Superior de

Coatzacoalcos 2013.

- [29] BERNÁRDEZ, Mariano. Desempeño Organizacional. AuthorHouse, 2007.
- [30] SILVA, Álvaro y PEÑA, Frank. Diseño y elaboración de un portafolio de servicios tecnológicos para el CDT de gas para el uso racional y eficiente de la energía (URE) en procesos de combustión de gas natural. Bucaramanga, 2005, 191 p. Trabajo de grado (Ingeniero Mecánico).Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánica.Escuela de Ingeniería Mecánica.
- [31] BALDERRAMA, Salvador; LUJÁN, Concepción; LEWIS, David; ORTEGA, Juan; JONG, Bernardus y NÁJERA, Tonatiuh.Factibilidad de generación de electricidad mediante gasificación de residuos de aserradero en el norte de México. En: Madera y Bosques: Febrero, 2011, vol. 2.
- [32] LAGUADO GONZÁLEZ, Nolberto; PRADA, Vladimir Antonio. Simulación de un sistema gasificador de bagazo de caña de azúcar conectado a un reactor WGS para la producción de hidrógeno. Bucaramanga,2008, 55 p. Trabajo de grado (Ingeniero Químico).Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química.
- [33] PÉREZ, Juan; BORGE, David y AGUDELO, John. Proceso de gasificación de biomasa. Una revisión de estudio teórico-experimentales. En: Revista Facultad de Ingeniería, 2010, pp. 95-107; N° 52.
- [34] ESCALANTE HERNÁNDEZ, Humberto; ORDUZ PRADA, Janneth; ZAPATA LESMES, Henry Josué; CARDONA RUÍZ, Maria Cecilia y DUARTE ORTEGA, Martha.Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. Colombia: UPME, IDEAM, COLCIENCIAS y UIS, 2010.182 p.
- [35] UPME. Plan Indicativo de expansión de cobertura de energía eléctrica 2013-2017.[En línea]. [Citado el 5 de Julio de 2015]. Disponible en internet: <URL:<http://www1.upme.gov.co/plan-indicativo-de-expansion-de-cobertura-de-energia-electrica>>.
- [36] IPSE. Plan de Energización de Zonas no Interconectadas PEZNI. [En línea]. [Citado el 10 de enero de 2016]. Disponible en internet: <URL: <http://www.ipse.gov.co/informacion-institucional>>.

- [37] CNM. Centro Nacional de Monitoreo. [En línea]. [citado el 5 de julio de 2015]. Disponible en internet: <URL: <http://190.216.196.84/cnm/#>>.
- [38] CREG. Determinación de inversiones y gastos de administración, operación y mantenimiento para la actividad de generación en zonas no interconectadas con plantas térmicas. Bogotá D.C.: Usaene, 2013. 98p.
- [39] IPSE, Soluciones Energéticas para las Zonas no Interconectadas de Colombia. Julio 2014. [Citado el 15 de agosto de 2015] [En línea]. Disponible en internet: <URL: <https://www.minminas.gov.co/documents/10180/742159/09C-SolucionesEnergeticasZNI-IPSE.pdf/2871b35d-eaf7-4787-b778-ee73b18dbc0e>>.
- [40] UPME. PERS Nariño. [En línea]. [Citado el 15 de enero de 2016] Disponible en internet: <URL: <http://sipersn.udenar.edu.co:90/sipersn/index.php?per=s&propers=s>>.
- [41] ROSSO CERÓN, Ana María. Diseño y aplicación de una metodología basada en la lógica difusa para la selección de alternativas sostenibles de generación eléctrica en ZNI de Colombia. Bucaramanga, 2016. Trabajo de grado (Magister en Ingeniería Química), Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química.
- [42] AGÁMEZ HERNÁNDEZ, Luz Teresa; y ARROYO PATERNINA Jorge Eliécer. Evaluación del potencial energético de la biomasa residual forestal en el departamento del Chocó: Caso de estudio. Bucaramanga, 2016. Trabajo de grado (Ingeniero Químico), Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química.
- [43] ENERGIA 12. [En línea]. [Citado 20 Enero 2016]. Disponible en internet: <URL: <http://energia12.com/2012/02/14/la-importancia-de-la-generacion-electrica-de-biomasa-en-estados-unidos/>>.
- [44] CASTELLS, Xavier Elías. Tratamiento y valorización energética de residuos, Madrid: Díaz de Santos, 2005. ISBN 8479786949, 9788479786946.
- [45] RUIZ BERMEJO, José Antonio. Análisis de la problemática e investigación de aspecto avanzado de la generación eléctrica con biomasa. Logroño (España), 2013. Trabajo de grado (Tesis doctoral), Universidad de la Rioja.

Departamento de Ingeniería Mecánica. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial.

- [46] CÁRDENAS VARGAS, Rogelio. Biorefinerías para la producción de biocombustibles de segunda generación, Valencia (España), 2010. Trabajo de grado (Doctorado en Ingeniería y Producción Industrial), Universidad Politécnica de Valencia, 142 p.
- [47] MÍGUEZ GÓMEZ, Claudio Daniel. La eficiencia energética en el uso de la biomasa para la generación de energía eléctrica: optimización energética y exergética. Madrid (España), 2013. Trabajo de grado (Tesis doctoral), Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Ciencias Políticas y Sociología.
- [48] RUIZ BERMEJO, José Antonio. Análisis de la problemática e investigación de aspecto avanzado de la generación eléctrica con biomasa. Logroño (España), 2013. Trabajo de grado (Tesis doctoral), Universidad de la Rioja. Departamento de Ingeniería Mecánica. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial.
- [49] PROCOLOMBIA. Partidas arancelarias de Importaciones y Exportaciones. Bucaramanga, 2015.
- [50] DANE, Departamento Administrativo Nacional de Estadística. Junio 2015. [En línea]. [Último acceso: 20 Octubre 2015]. Disponible en internet: <URL: <http://www.dane.gov.co/>>.
- [51] MINISTERIO DE COMERCIO, INDUSTRIA Y TURISMO, MCIT. Informe de Industria. Bogotá (Colombia), 2011.
- [52] MINISTERIO DE COMERCIO, INDUSTRIA Y TURISMO. Informe de Industria. Bogotá (Colombia), 2014.
- [53] MEDINA GARCÍA, Claudia Marcela. La Nación, En Caída las exportaciones de Colombia. 13 Septiembre 2015. [En línea]. [Último acceso: 10 Diciembre 2015]. Disponible en internet: <URL: <http://www.lanacion.com.co/index.php/dominical/entrevista/item/258250-en-caida-las-exportaciones-de-colombia>>.
- [54] DINERO. Nueva caída de las importaciones afecta el consumo y la

producción industrial. 12 Diciembre 2015. [En línea]. [Último acceso: 20 Diciembre 2015]. Disponible en internet: <URL: <http://www.dinero.com/economia/articulo/importaciones-colombia-octubre-2015/217459>>.

- [55] LONDOÑO, Carlo; ARENAS, Erika. Gasificador amigo del ambiente es propiedad de las universidades. Universidad Nacional de Colombia. Agencias de Noticias UN. 14 Octubre 2008. [En línea]. [Último acceso: 24 Enero 2016]. Disponible en internet: <URL: [http://historico.agenciadenoticias.unal.edu.co/articulos/ciencia\\_tecnologia/ciencia\\_tecnologia\\_20081014\\_gases.html](http://historico.agenciadenoticias.unal.edu.co/articulos/ciencia_tecnologia/ciencia_tecnologia_20081014_gases.html)>.
- [56] MÍGUEZ GÓMEZ, Claudio Daniel. La eficiencia energética en el uso de la biomasa para la generación de energía eléctrica: optimización energética y exergética. Madrid (España), 2013. Trabajo de grado (Tesis doctoral), Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Ciencias Políticas y Sociología.
- [57] FORERO NÚÑEZ, Carlos Andrés; GUERRERO FAJARDO, Carlos Alberto; SIERRA VARGAS, Fabio Emiro. Producción y uso de pellets de biomasa para la generación de energía térmica: una revisión a los modelos del proceso de gasificación. Bogotá, Agosto 2011. En: Revista de la División de Ingenierías y Arquitectura.
- [58] PÉREZ, Martín David. Diseño de un gasificador de pequeña potencia eléctrica. Barcelona (España), Octubre 2014. Trabajo de grado (Magister Interuniversitario de Ingeniería en Energía), Universidad Politécnica de Catalunya.
- [59] CUBA ARROYO, Carlos Guillermo. Piloto de gasificador downdraft operado con biomasa. Barcelona (España), 2011. Trabajo de grado, Universitat Politècnica de Catalunya.
- [60] WEINGÄRTNER, Simon; ROSSO CERÓN, Ana María y KAFAROV, Viatcheslav. Generation of Electricity by Plant Biomass in Villages of the Colombian Provinces: Chocó, Meta and Putumayo. En: The Italian Association of Chemical Engineering, vol. 43, 2015. DOI: 10.3303/CET1543097.

- [61] PANDA, Chittaranjan. Aspen Plus Simulation and Experimental Studies on Biomass Gasification. Rourkela (India), 2012. Trabajo de grado (Bachelor of technology in Chemical Engineering), National Institute of Tecnology.
- [62] TAPAS KUMAR, Patra; PATRIK, Sheth. Biomass gasification models for downdraft gasifier: A state of the art review. Rajasthan (India), 29 de Mayo 2015. En: Elsevier. Chemical Engineering Department. Birla Institute of Technology and Science – Pilani, Pilani Campu nº Volumen 50, 583-593 p.
- [63] LIU, Zheyu; FANG, Yitian; DENG, Shuping; HUANG, Jiejie; ZHAO, Jiantao and CHENG, Zhonghu. Simulation of Pressurized Ash Agglomerating Fluidized Bed Gasifier Using ASPEN PLUS. En: Energy Fuels, vol. 2, 1237-1245 p.
- [64] GREENE. Tecnología de gasificación. Planta de valorización energética de biomasa 0,5 MW. 2015.
- [65] SEVERNS. Energía mediante vapor, aire o gas. Publicaciones científicas y de tecnología aplicada. Barcelona (España), 2007. Editorial Reverté. ISBN 8429148906, 9788429148909.
- [66] VALVERDE, Agustín; SARRIA, Bienvenido; MONTEAGUDO, José. Análisis comparativo de las características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz. Pereira, Diciembre 2007. En: Scientia et Technica Año XIII, No 37. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701, 37 p.
- [67] CLARKE ENERGY ENGINEER-INSTALL-MAINTAIN [En línea]. [Último acceso: 14 Enero 2016]. Disponible en internet: <URL: <https://www.clarke-energy.com/synthesis-gas-syngas/>>.
- [68] SÁNCHEZ BASTARDO, Nuria. Obtención del gas de síntesis a partir de biomasa utilizando catalizadores de níquel, Valladolid (España), 2014. Trabajo de grado (Ingeniero químico), Universidad de Valladolid.
- [69] ATECYR y IDAE, «Guía técnica de diseño de centrales de calor eficientes,» 2010.
- [70] SIEL, Sistema de Información Eléctrico Colombiano. 30 Junio 2015. [En línea]. [Último acceso: 09 Julio 2015]. Disponible en internet: <URL: <http://www.siel.gov.co/Inicio/CoberturadelSistemaIntercontecadoNacional/Co>

nsultasEstadisticas/tabid/81/Default.aspx>.

- [71] SIMEC, Sistema de Información Minero Energético Colombiano. 2015. [En línea]. [Último acceso: 06 Julio 2015]. Disponible en internet: <URL: <http://www.simec.gov.co/>>.
- [72] NOGUÉS, Fernando Sebastián; GARCÍA GALINDO, Daniel; Rezeau, Adeline. Energía de la Biomasa. Energía renovables. Universidad de Zaragoza, 2010, 18-21 p. ISBN 8492774916, 9788492774913.

## BIBLIOGRAFIA.

CÓRDOVA, Soledad Orjuela y Medina, Paulina Sandoval. Guía del estudio de Mercado para la evaluación de proyectos . Chile : Universidad de Chile.2002.

DANE. 2015. Departamento Administrativo Nacional de Estadística. [En línea] Junio de 2015. <http://www.dane.gov.co/> [citado 10 de octubre de 2015].

DOHERTY, Wayne; REYNOLDS, Anthony y KENNEDY, David. Aspen Plus Simulation of Biomass Gasification in a Steam Blown Dual Fluidised Bed.En: Escuela de ingeniería de mecanica y transporte. Dublin Institute of Technology . Dublin, 2013.

IDEA ( Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía), Octubre, 2007, ISBN 13:978-84-96680.19-7. Biomasa: Edificios, pág. 13.

IPSE. Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas. Portal Gobierno en línea Colombia. [En línea] <http://www.ipse.gov.co/informacion-institucional> [citado el 11 de Septiembre de 2013].

IPSE. Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas. [En línea]. [http://www.si3ea.gov.co/si3ea/Documentos/Ciure/Documentos/Catorce\\_Sesion/IPSE.pdf](http://www.si3ea.gov.co/si3ea/Documentos/Ciure/Documentos/Catorce_Sesion/IPSE.pdf) [Citado el: 17 de Julio de 2015.].

LOZANO, Álvaro Alonso. Gasificación en Gasificadores de Flujo Arrastrado Simulación en Aspen Plus y Comparación . España : Designación de trabajo de grado, Universidad de Zaragoza, 2012.

LOZANO, Sergio Martínez. Evaluación de la biomasa como recurso energético renovable en cataluña. Girona : Designación de trabajo de grado, Universitat de Girona, 2009.

LV,.P.M., Xiong; Z.H., Chang; J. , Wu, C.Z. y CHEN , J.X. Zhu. An experimental study on biomass air–steam gasification in a fluidized bed. En: Bioresource Technology. Marzo, 2004, págs. 95-101.

Ministerios de Comercio, Industria y Turismo. Informe de Industria . Colombia : MinCIT, 2014.

PROCOLOMBIA. Partidas arancelarias de Importaciones y Exportaciones.[En línea], <http://www.procolombia.co/#> [citado 10 de octubre de 2015].

SANTA Cruz, Astorqui; DEL RÍO, Mercedes; CACHERO, Gemma; MONJE, IGNACIO; RUBIO, Dolores. Estudio de la viabilidad del aprovechamiento de Biomasa para calefacción y ACS en edificios. Madrid (España), 2008: Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica de Madrid.

SEIMED. SEIMED . [En línea]. [http://www.seimed.eu/vlx/about/Enterprise\\_Europe\\_Network.asp?ContentID=0306&BackTo=0&savemsg=&CustomMessage](http://www.seimed.eu/vlx/about/Enterprise_Europe_Network.asp?ContentID=0306&BackTo=0&savemsg=&CustomMessage) [citado 20 septiembre de 2015].

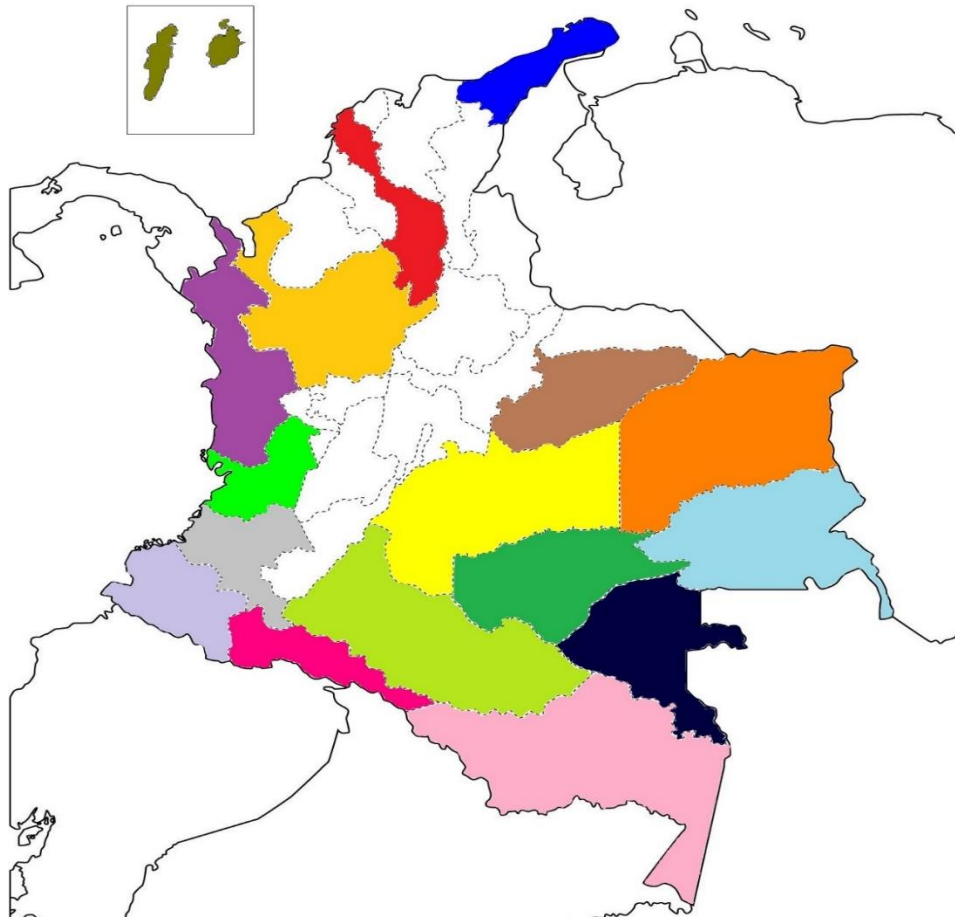
SHARMINA, Begum, MOHAMMAD G., Rasul, DELWAR, Akbar, NAVEED, Ramzan. Performance Analysis of an Integrated Fixed Bed Gasifier Model for Different Biomass Feddstocks. En: Energies. Septiembre, 2013, págs. 6508-6524.

SIEL. Sistema de Información Eléctrico Colombiano. Demanda De Energía . [En línea].<http://www.siel.gov.co/siel/Inicio/Demanda/tabid/60/Default.aspx>. [15 de Enero de 2015].

W.H.Severns, H.E.Degler y J.C. Miles. 2007. Energía mediante vapor, aire o gas. Barcelona. Editorial Reverté, 2007. ISBN:978-84-291-4890-9.

## ANEXOS

### Anexo A. Departamentos que pertenecen a las ZNI, año 2014



**Figura 2.** Departamentos que pertenecen a las ZNI, año 2014

**Fuente:** [36]

DEPARTAMENTO	
Amazonas	37,31%
Antioquia	0,95%
Bolívar	5,14%
Caquetá	14,86%
Casanare	9,17%
Cauca	11,39%
Chocó	19,66%
Guainía	10,59%
Guaviare	21,04%
La Guajira	19,57%
Meta	5,32%
Nariño	4,73%
Putumayo	29,81%
San Andrés y Providencia	0,00%
Valle	1,04%
Vaupés	38,10%
Vichada	41,53%

**Anexo B. Municipios que pertenecen a las ZNI de Colombia, año 2014**

**Tabla 9. Municipios que pertenecen a las ZNI por departamentos 2014**

<b>Municipios que pertenecen a las ZNI por departamentos 2014</b>						
<b>DEPARTAMENTO</b>	<b>Municipio</b>	<b>Usuarios ZNI</b>	<b>Cobertura del servicio de energía eléctrica (%)</b>	<b>Déficit de cobertura total</b>	<b>N° de viviendas sin servicio (N°)</b>	<b>N° de viviendas totales por municipio</b>
Amazonas	Leticia	8850	79,07%	20,93%	2.342,00	11.192,00
	CD. El Encanto	75	8,96%	91,04%	762,00	837,00
	CD. La Chorrera	78	11,14%	88,86%	622,00	700,00
	CD. La Pedrera	165	20,78%	79,22%	629,00	794,00
	CD. La Victoria1	36	21,95%	78,05%	128,00	164,00
	CD. Miriti-Parana	11	4,60%	95,40%	228,00	239,00
	CD. Puerto Alegría2	36	8,41%	91,59%	392,00	428,00
	CD. Puerto Arica3	64	29,77%	70,23%	151,00	215,00
	Puerto Nariño	1164	79,84%	20,16%	294,00	1.458,00
	CD. Puerto Santander	68	12,55%	87,45%	474,00	542,00
	CD. Tarapaca	264	39,00%	61,00%	413,00	677,00
Antioquia	Murindó	605	100,00%	0,00%	0,00	605,00
	Urrao	123	96,06%	3,94%	360,00	9.131,00
	Vigía Del Fuerte	2801	100,00%	0,00%	0,00	2.801,00
Bolívar	Cartagena	158	100,00%	0,00%	0,00	158,00
Caquetá	Belén Andaquies	60	80,39%	19,61%	570,00	2.906,00
	Cartagena del Chaira	902	75,23%	24,77%	1.532,00	6.186,00
	Curillo	80	73,47%	26,53%	673,00	2.537,00
	El Paujil	377	99,25%	0,75%	28,00	3.741,00
	La Montañita	263	72,98%	27,02%	693,00	2.565,00
	Milán	212	78,96%	21,04%	422,00	2.006,00
	Puerto Rico	251	71,01%	28,99%	2.182,00	7.526,00

	San Vicente del Caguan	2065	69,99%	30,01%	3.518,00	11.723,00
	Solano	1547	100,00%	0,00%	0,00	1.547,00
	Solita20	25	58,20%	41,80%	765,00	1.830,00
	Valparaíso	40	39,57%	60,43%	1.437,00	2.378,00
Casanare	Paz de Ariporo	54	83,74%	16,26%	1.651,00	10.155,00
	Trinidad	1213	75,36%	24,64%	1.215,00	4.932,00
Cauca	Guapi	7641	100,00%	0,00%	0,00	7.641,00
	López	3376	100,00%	0,00%	0,00	3.376,00
	Santa Rosa	234	72,28%	27,72%	642,00	2.316,00
	Timbiquí	10524	100,00%	0,00%	0,00	10.524,00
Chocó	Quibdó	3694	100,00%	0,00%	0,00	44.108,00
	Acandí	3811	100,00%	0,00%	0,00	3.811,00
	Alto Baudo(Pie De Pato)	1405	23,12%	76,88%	4.673,00	6.078,00
	Bagado	273	53,23%	46,77%	1.033,12	2.209,12
	Bahia Solano (Mutis)	2870	100,00%	0,00%	0,00	2.870,00
	Bajo Baudo (Pizarro)	6530	91,12%	8,88%	636,00	7.166,00
	Bojaya (Bellavista)	2079	71,17%	28,83%	842,00	2.921,00
	Canton De San Pablo30 + Capurgana	190	80,09%	19,91%	409,66	2.057,66
	Carmen Del Darien31	240	19,74%	80,26%	976,00	1.216,00
	Condoto	112	95,01%	4,99%	216,25	4.334,25
	Litoral Del San Juan	2269	77,55%	22,45%	657,00	2.926,00
	Istmina	211	100,00%	0,00%	0,00	10.234,00
	Jurado	1805	100,00%	0,00%	0,00	1.805,00
	Lloro	650	56,65%	43,35%	1.383,56	3.191,56
	Medio Atrato33	2098	40,35%	59,65%	3.102,00	5.200,00
	Medio Baudo (Boca De Pepe)34	2062	59,83%	40,17%	2.062,00	5.133,00
	Medio San Juan35	2844	82,30%	17,70%	836,80	4.727,80
	Novita	219	60,02%	39,98%	1.055,73	2.640,73
	Nuqui	2087	100,00%	0,00%	0,00	2.087,00
	Rio Iro36	782	81,23%	18,77%	436,86	2.327,86

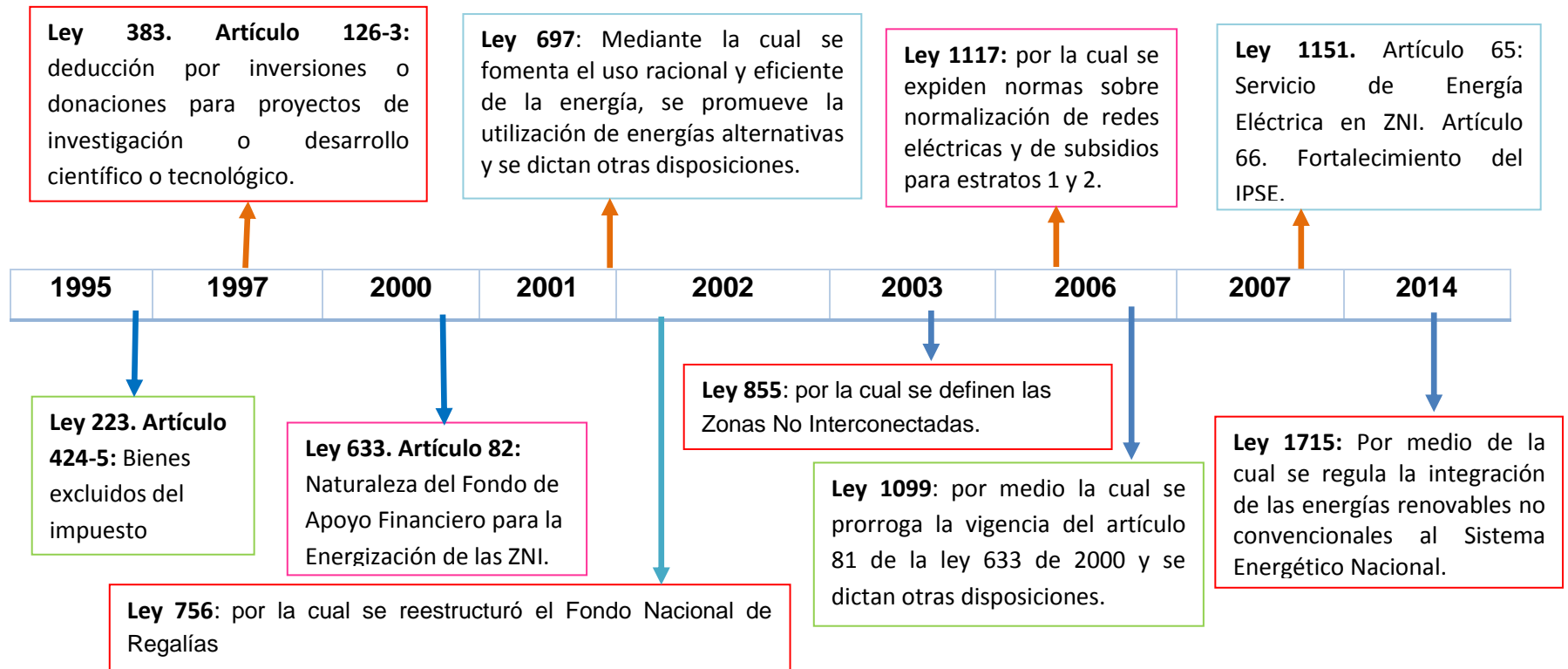
	Rio Quito37	1770	61,19%	38,81%	1.876,64	4.835,64
	Riosucio	2644	39,83%	60,17%	3.994,00	6.638,00
	Sipi	1496	65,90%	34,10%	774,00	2.270,00
	Unguia	2661	72,72%	27,28%	998,00	3.659,00
	Union Panamericana38	100	89,01%	10,99%	243,53	2.215,53
Guainía	Puerto Inirida	12426	100,00%	0,00%	0,00	12.426,00
	CD. Barranco Minas	470	46,08%	53,92%	550,00	1.020,00
	CD. Mapiripana41	35	100,00%	0,00%	0,00	35,00
	CD. San Felipe	75	100,00%	0,00%	0,00	75,00
	CD. Puerto Colombia	596	66,67%	33,33%	298,00	894,00
	CD. La Guadalupe	67	98,53%	1,47%	1,00	68,00
	CD. Cacahual	396	78,26%	21,74%	110,00	506,00
	CD. Pana Pana y otros	32	5,57%	94,43%	542,00	574,00
Guaviare	CD. Morichal Nuevo	50	22,32%	77,68%	174,00	224,00
	San José del Guaviare	3226	84,75%	15,25%	2.516,00	16.501,00
	Calamar	197	72,60%	27,40%	548,00	2.000,00
	El Retorno	225	49,60%	50,40%	2.088,00	4.143,00
La Guajira	Miraflores	4554	86,30%	13,70%	723,00	5.277,00
	Uribia	143	100,00%	0,00%	0,00	143,00
Meta	El Calvario	45	79,94%	20,06%	141,00	703,00
	La Macarena	3116	83,90%	16,10%	598,00	3.714,00
	Mapiripán y pto Elvira	1007	30,53%	69,47%	2.291,00	3.298,00
	Puerto Concordia	85	37,74%	62,26%	2.423,00	3.892,00
	Puerto Gaitán	664	95,00%	5,00%	365,00	7.295,00
	Puerto Lleras	7	77,93%	22,07%	754,00	3.416,00
Nariño	Puerto Rico	338	39,04%	60,96%	3.517,00	5.769,00
	Barbacoas	2623	85,65%	14,35%	1.024,00	7.138,00
	Cumbal	320	94,98%	5,02%	403,00	8.022,00
	El Charco	15338	93,39%	6,61%	1.086,00	16.424,00
	La Tola	2951	71,70%	28,30%	1.165,00	4.116,00

	Mosquera	2440	73,05%	26,95%	900,00	3.340,00
	Olaya Herrera	5292	74,07%	25,93%	1.853,00	7.145,00
	Pizarro	1998	60,29%	39,71%	1.316,00	3.314,00
	Roberto Payan + San Juan Costa	3369	99,96%	0,04%	2,00	4.636,00
	Santa Barbara	7389	94,18%	5,82%	457,00	7.846,00
	Tumaco + Chacal	9727	99,99%	0,01%	4,00	46.021,00
Putumayo	Mocoa	1700	91,66%	8,34%	1.700,00	20.381,00
	Orito	419	61,17%	38,83%	7.209,00	18.565,00
	Puerto Asís	703	72,67%	27,33%	4.643,00	16.991,00
	Puerto Guzmán	418	67,08%	32,92%	3.756,00	11.408,00
	Puerto Leguízamo	2087	100,00%	0,00%	0,00	2.087,00
	Valle del Guamuez	320	51,41%	48,59%	5.958,00	12.261,00
	Villagarzón	120	53,55%	46,45%	2.561,00	5.513,00
San Andres y Providencia	San Andrés	16729	100,00%	0,00%	0,00	16.729,00
	Providencia	1986	100,00%	0,00%	0,00	1.986,00
Valle	Buenaventura	5710	99,40%	0,60%	500,00	83.711,00
Vaupés	Mitu65	3273	69,43%	30,57%	1.441,00	4.714,00
	Carurú	403	57,82%	42,18%	294,00	697,00
	CD. Pacoa	110	9,98%	90,02%	992,00	1.102,00
	Taraira	970	95,66%	4,34%	44,00	1.014,00
	CD. Papunaua	110	100,00%	0,00%	0,00	110,00
Vichada	Puerto Carreño	4251	90,99%	9,01%	421,00	4.672,00
	La Primavera	1468	51,58%	48,42%	1.378,00	2.846,00
	Santa Rosalía	610	79,32%	20,68%	159,00	769,00
	Cumaribo66	2165	34,69%	65,31%	4.076,00	6.241,00

Fuente: SIEL, 2015 [70]

## Anexo C .Leyes para las ZNI

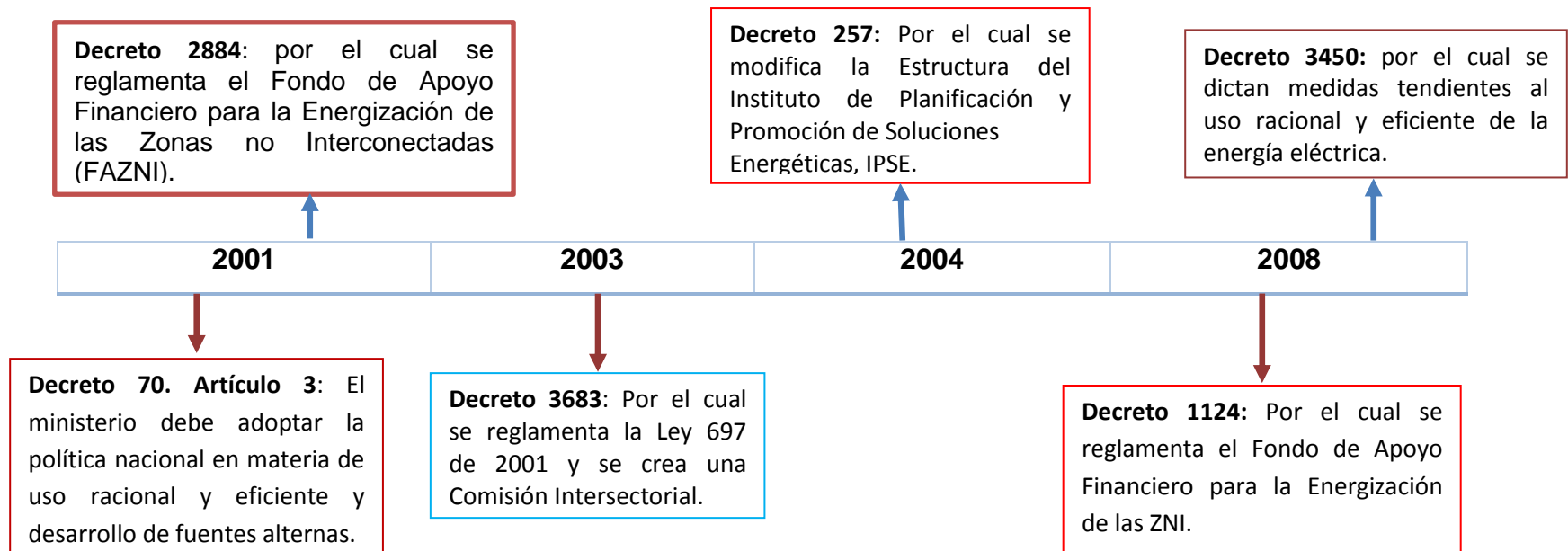
Figura 3. Línea del tiempo leyes para las ZNI de Colombia



Fuente: SIMEC [71]

## Anexo D. Decretos para las ZNI

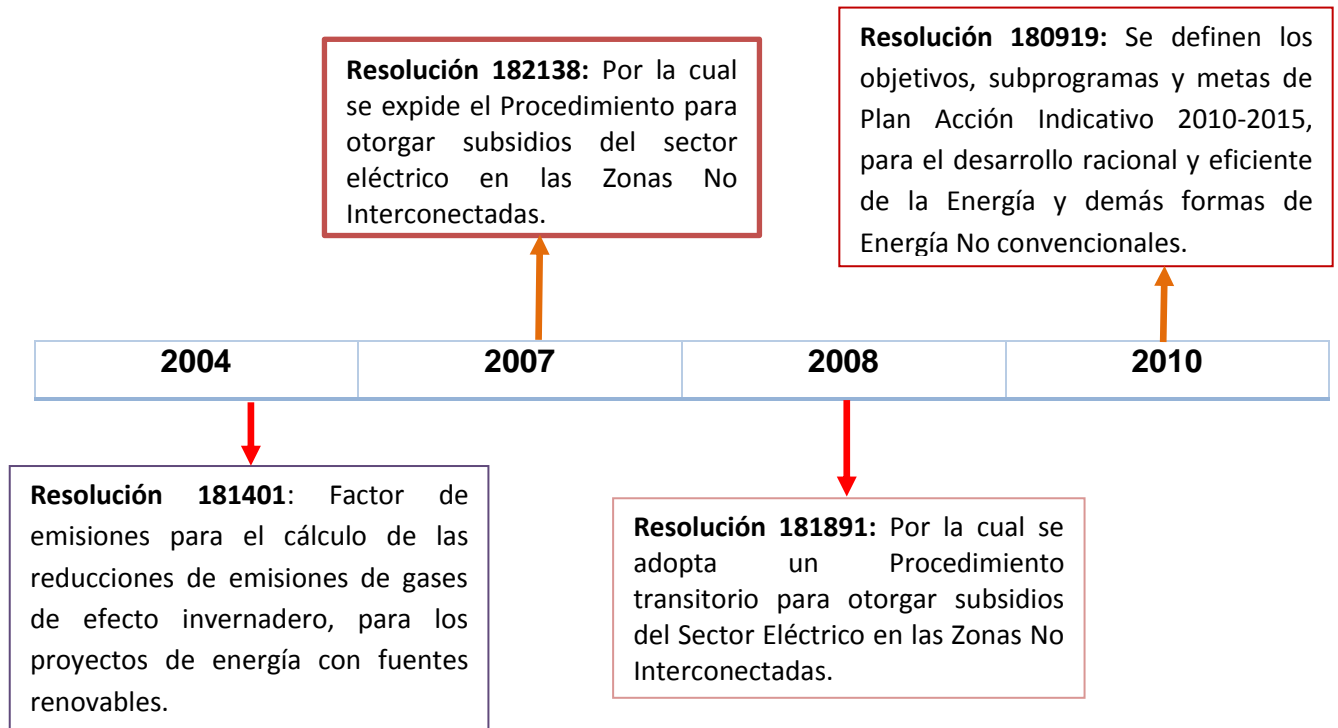
Figura 4. Línea del tiempo decretos para las ZNI de Colombia



Fuente: SIMEC [71]

## Anexo E. Resoluciones para las ZNI

Figura 5. Línea del tiempo resoluciones para las ZNI de Colombia



Fuente: SIMEC [71]

## *Anexo F. Grupos electrógenos en las ZNI*

**Tabla 10.** Cantidad de grupos electrógenos en las ZNI y distribución por departamentos.

DEPARTAMENTO	N° DE GRUPOS ELECTRÓGENOS	RANGO DE POTENCIA DE LAS UNIDADES	
		POTENCIA MÍNIMA (KW)	POTENCIA MÁXIMA (KW)
Amazonas	52	11	6.969
Bolívar	1	35	35
Caquetá	53	10	500
Casanare	2	300	496
Cauca	140	2	1.250
Chocó	252	3	1.000
Guainía	58	5	2.100
Guaviare	33	15	625
La Guajira	2	500	800
Meta	15	15	1.608
Nariño	543	3	800
Putumayo	11	31	1.000
Valle del Cauca	23	13	352
Vaupés	73	1	1.500
Vichada	25	22	1.000
<b>TOTAL</b>	<b>1283</b>		

*Fuente: CREG, 2013 [38]*

En los reportes del CREG para el año 2013, se encuentra que había 1283 plantas diésel. Los departamentos con mayor cantidad de plantas Diésel son Nariño, Chocó y Cauca, como se puede observar en la tabla 3 y los departamentos con mayor rango de potencia nominal son Amazonas con 6.969 KW, seguido de Guainía con 2.100 KW.

## Anexo G. Portafolio tecnológico Gasificación.

**Tabla 11.** Portafolio tecnológico de gasificación en lecho fijo Downdraft

<b>Gasificador Greene</b>	
Empresa titular	Greene
Tipo de biomasa	Residuos agrícolas
Conversión de biomasa a electricidad (Kg/KWh)	1Kwhe/ 1 Kg biomasa
Contenido de humedad de la biomasa combustible (b.h.)	20%
Tamaño de biomasa	<30 mm
Poder calorífico de biomasa	3.684 Kcal/Kg
Capacidad Instalada	3400 ton/año
Potencia	0,5 Mwe
Eficiencia eléctrica de la instalación	25%
Aplicación en otros mercados, industrias	*Producción de Hidrógeno. * Generación de energía térmica. *Producción de combustibles y productos químicos
Aceptabilidad ambiental	Amigable con el medio ambiente ya que reduce en un 40% emisiones de CO2 y en un 100% de CH4. Se evita la emisión de gases tóxicos como: SO2, SO3 y NOx, furanos y dioxinas.
<b>Costo total del equipo</b>	<b>1.715.000 €</b>
<b>Gasificador TK</b>	
Empresa titular	Taim Weser
Tipo de biomasa	Materiales leñosos
Conversión de biomasa a electricidad (Kg/KWh)	1Kwhe/ 1 Kg biomasa
Contenido de humedad de la biomasa combustible (b.h.)	10%-15%
Tamaño de biomasa	50 mm
Poder calorífico de biomasa	4.448 Kcal/ Kg
Capacidad Instalada	4500-5000 Tm/año
Potencia	0,65 Mwe
Eficiencia eléctrica de la instalación	23%
Aplicación en otros mercados, industrias	*Utilización directa del gas (reemplazo de combustibles fósiles). *Generación de energía térmica. *Producción de fertilizantes.
Aceptabilidad ambiental	Respetable con el medio ambiente, ya que por cada 4500 Ton de astillas al año, evita la emisión de hasta 11000 Ton de CO2.
<b>Costo total del equipo</b>	<b>2.400.000 €</b>
<b>Gasificador Biomax 100</b>	
Empresa titular	Community Power Corporation
Tipo de biomasa	Astillas de madera

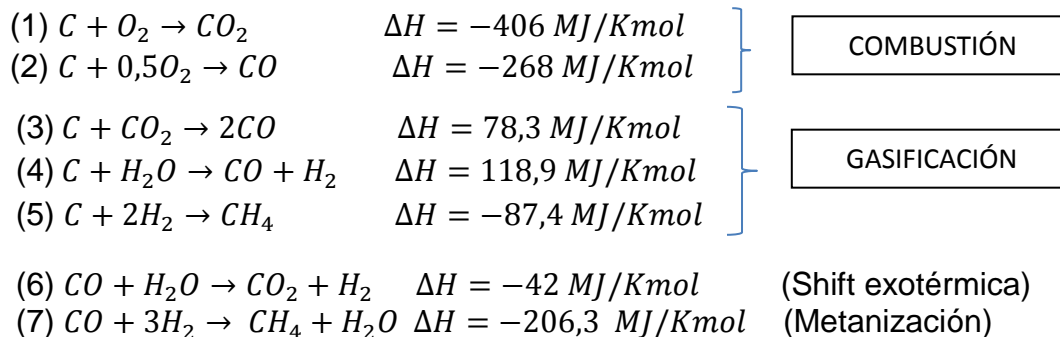
Conversión de biomasa a electricidad (Kg/KWh)	1Kwhe/ 0,9Kg biomasa
Contenido de humedad de la biomasa combustible (b.h.)	40%
Tamaño de biomasa	5 mm-6 mm
Poder calorífico de biomasa	4.448 Kcal/ Kg
Capacidad Instalada	1200 Ton/año
Potencia	100 KW
Eficiencia eléctrica de la instalación	22%
Aplicación en otros mercados, industrias	*Generación de combustible de aviación. *Producción de tecnología Fischer Tropsch. *Producción de diésel sintético.
Aceptabilidad ambiental	Respetable con el medio ambiente, no produce humo, olor, ni efectos tóxicos; bajo nivel de alquitrán en el gas pobre. No emplea agua
<b>Costo total del equipo</b>	<b>973.000 €</b>
<b>Gasificador TK</b>	
Empresa titular	Taim Weser
Tipo de biomasa	Materiales leñosos
Conversión de biomasa a electricidad (Kg/KWh)	1Kwhe/ 1 Kg biomasa
Contenido de humedad de la biomasa combustible (b.h.)	10%-15%
Tamaño de biomasa	50 mm
Poder calorífico de biomasa	4.448 Kcal/ Kg
Capacidad Instalada	4500-5000 Tm/año
Potencia	1,3 Mwe
Eficiencia eléctrica de la instalación	23%
Aplicación en otros mercados, industrias	*Utilización directa del gas (reemplazo de combustibles fósiles). *Generación de energía térmica. *Producción de fertilizantes.
Aceptabilidad ambiental	Respetable con el medio ambiente, ya que por cada 4500 Ton de astillas al año, evita la emisión de hasta 11000 Ton de CO2.
<b>Costo total del equipo</b>	<b>4.200.000 €</b>
<b>Gasificador Ginox</b>	
Empresa titular	Ginox S.L.
Tipo de biomasa	Pellets de madera residual
Conversión de biomasa a electricidad (Kg/KWh)	1Kwhe/ 1 Kg biomasa
Contenido de humedad de la biomasa combustible (b.h.)	10%
Tamaño de biomasa	0,5 mm- 1,2 mm
Poder calorífico de biomasa	4.448 Kcal/ Kg
Capacidad Instalada	105 Ton/año
Potencia	11,1 KW
Eficiencia eléctrica de la instalación	16%
Aplicación en otros mercados, industrias	Generación de energía térmica (vapor, agua caliente, agua fría)

Aceptabilidad ambiental	Amigable con el medio ambiente, ya que contribuye con la reducción de las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera. Bajo contenido de alquitrán
<b>Costo total del equipo</b>	<b>226.000 €</b>
<b>Gasificador TK</b>	
Empresa titular	Taim Weser
Tipo de biomasa	Materiales leñosos
Conversión de biomasa a electricidad (Kg/KWh)	1Kwhe/ 1 Kg biomasa
Contenido de humedad de la biomasa combustible (b.h.)	10%-15%
Tamaño de biomasa	50 mm
Poder calorífico de biomasa	4.448 Kcal/ Kg
Capacidad Instalada	4500-5000 Tm/año
Potencia	1,8 Mwe
Eficiencia eléctrica de la instalación	23%
Aplicación en otros mercados, industrias	*Utilización directa del gas (reemplazo de combustibles fósiles). *Generación de energía térmica. *Producción de fertilizantes.
Aceptabilidad ambiental	Respetable con el medio ambiente, ya que por cada 4500 Ton de astillas al año, evita la emisión de hasta 11000 Ton de CO2.
<b>Costo total del equipo</b>	<b>5.500.000 €</b>

**Fuente:** Autores a partir de información técnica y de costos de diversas empresas.

## Anexo H. Pasos para la simulación en Aspen Plus.

El proceso de gasificación consta de las siguientes reacciones principales [59]:



- Composición del gas de síntesis y PCI obtenidos a partir de la simulación.

**Tabla 12.** % Composición del gas de síntesis y poder calorífico inferior con biomasa agrícola.

BIOMASA	GAS DE SÍNTESIS					PCI
	H2 [%]	CO [%]	CO2 [%]	CH4 [%]	N2 [%]	Kcal/m3
<b>RAQUIS PLATANO</b>	36,393	39,291	13,305	0,034	1,108	582,913
<b>CASCARILLA ARROZ</b>	43,546	45,140	3,659	0,145	7,305	752,323
<b>CAPACHO MAÍZ</b>	50,997	40,039	1,058	0,675	6,082	775,64

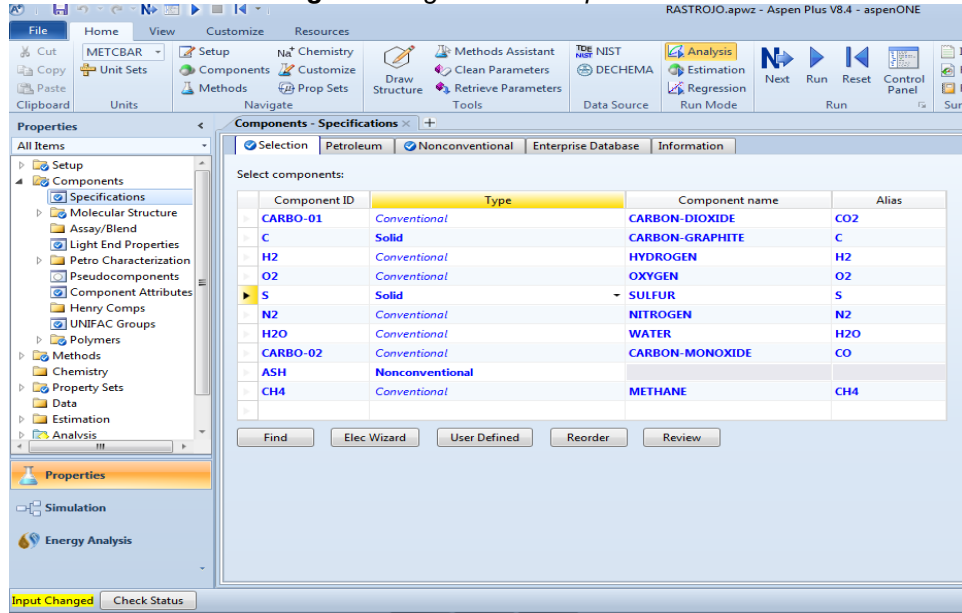
*Fuente:* Autores

**Tabla 13.** % Composición del gas de síntesis y poder calorífico inferior con biomasa forestal.

BIOMASA	GAS DE SÍNTESIS					PCI
	H2 [%]	CO [%]	CO2 [%]	CH4 [%]	N2 [%]	Kcal/m3
<b>Virutas Roble</b>	47,502	43,510	2,019	0,356	6,574	779,779
<b>Virutas Bálsamo</b>	23,438	21,110	1,229	0,136	3,332	771,067
<b>Virutas Abarco</b>	51,988	45,302	1,351	0,700	0,612	799,718

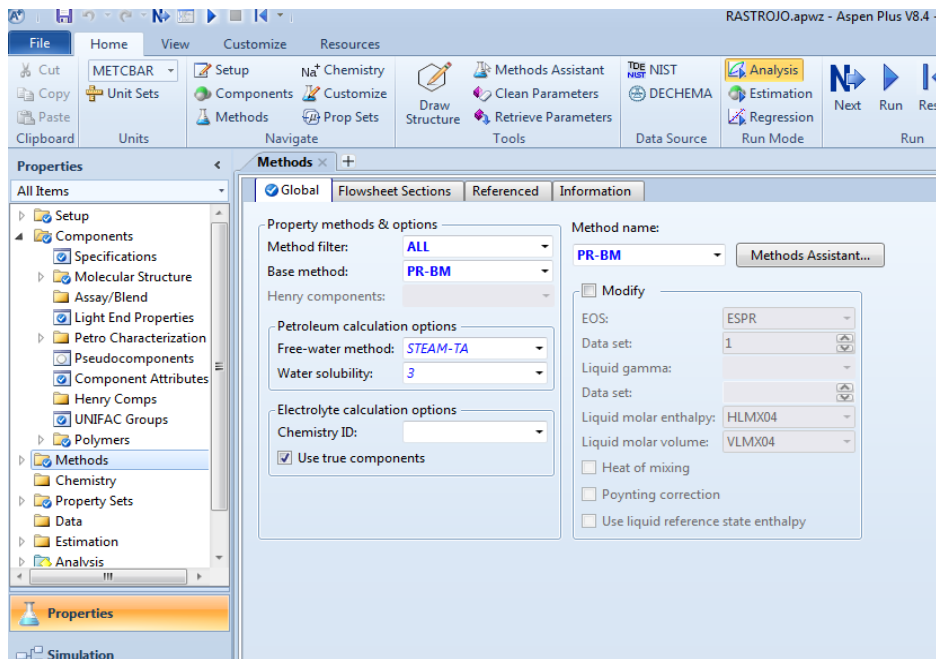
*Fuente:* Autores

Figura 6. Ingreso de componentes



Fuentes: Autores

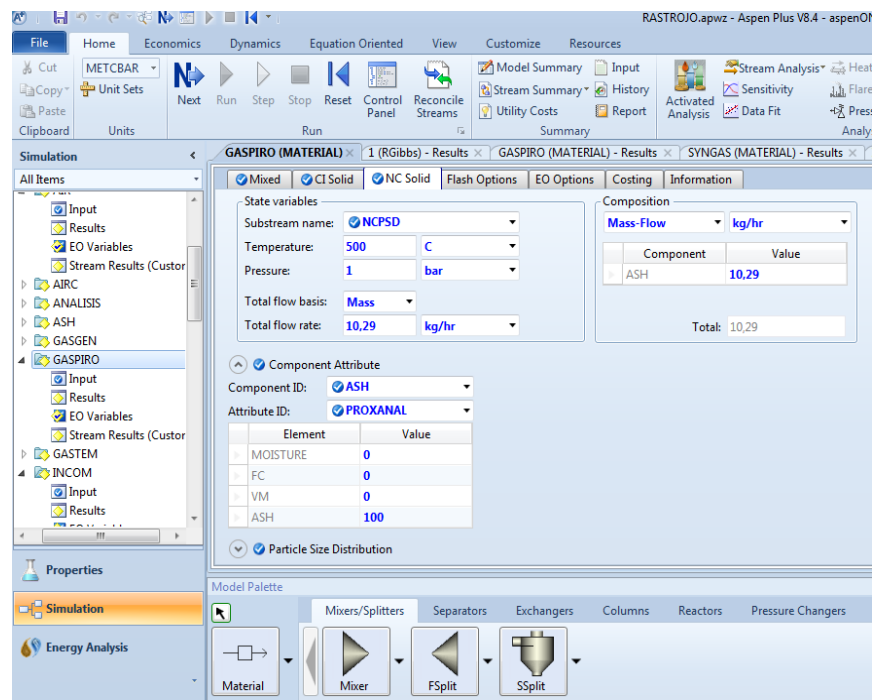
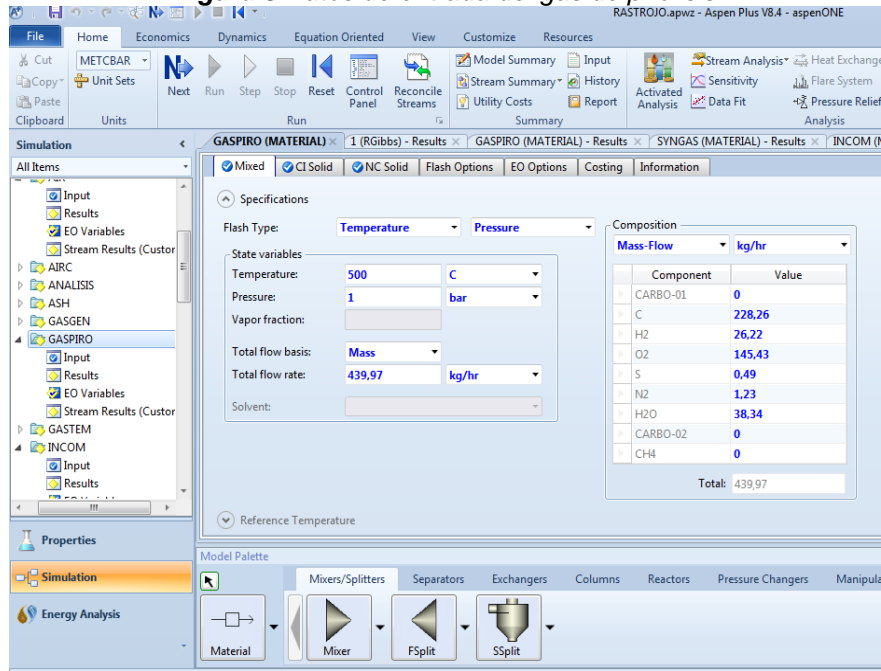
Figura 7. Selección del método de cálculo



Fuentes: Autores

En la simulación primero se ingresa los componentes a utilizar en todo el proceso como se puede ver en la figura 6. Seguidamente se escoge el método del cálculo del software, en este caso se seleccionó PR-BM (figura 7); en el documento se menciona por qué este cálculo.

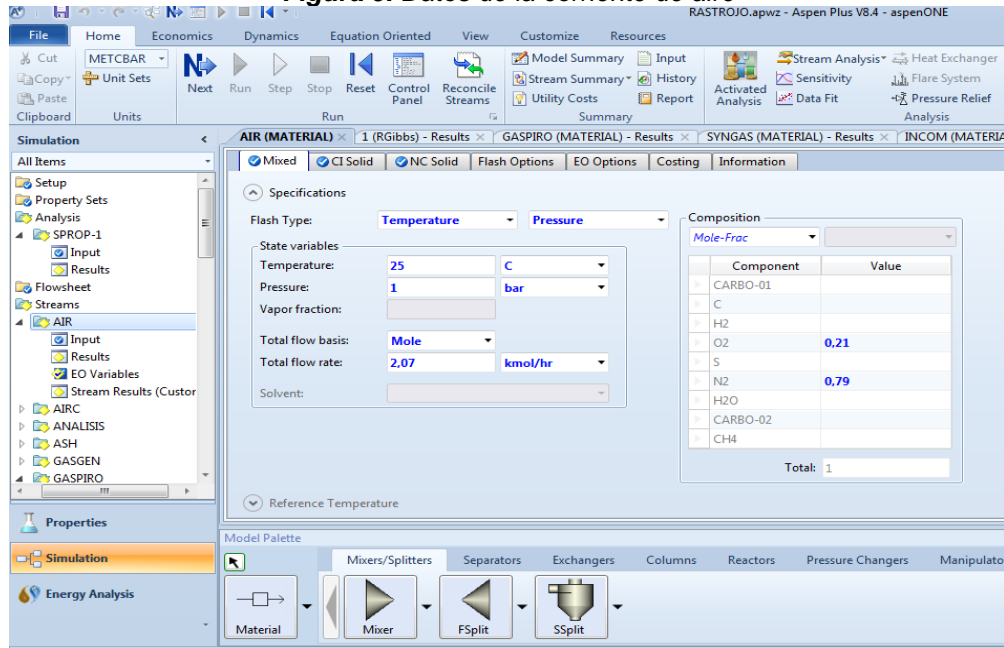
**Figura 8** Datos de entrada del gas de pirólisis



**Fuentes:** Autores

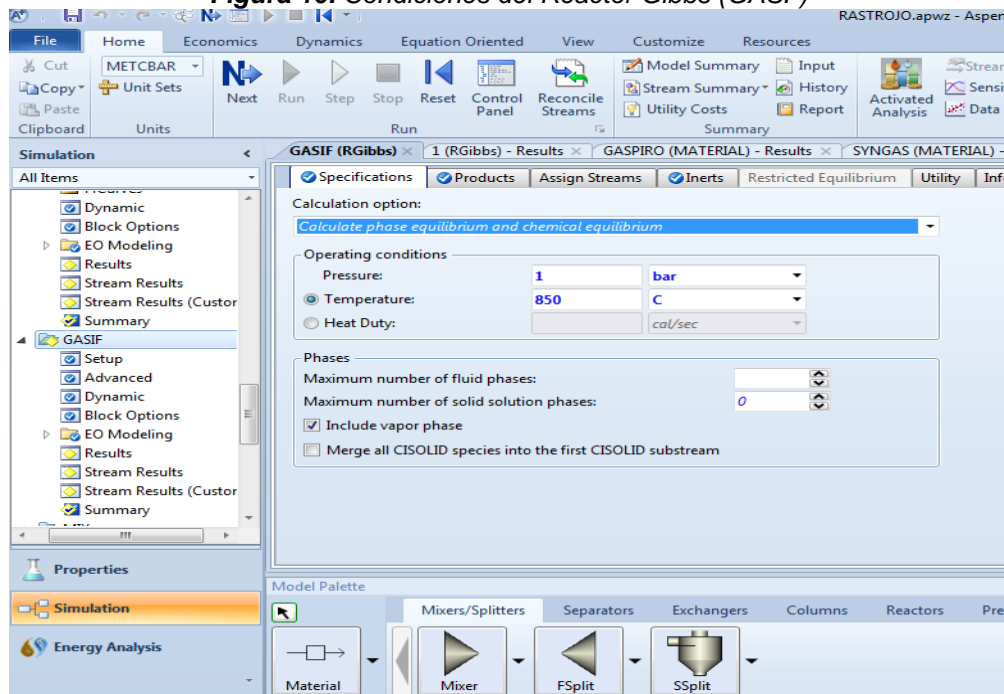
Después de seleccionar el método, se debe que ingresar los datos de la corriente de gas de pirolisis (GASPIRO); donde la corriente tiene una temperatura de 500°C, una presión de 1 bar; se ingresa el caudal con sus respectivos composiciones que contiene este gas y los componentes solidos los cuales son las cenizas.

**Figura 9. Datos de la corriente de aire**



Fuentes: Autores

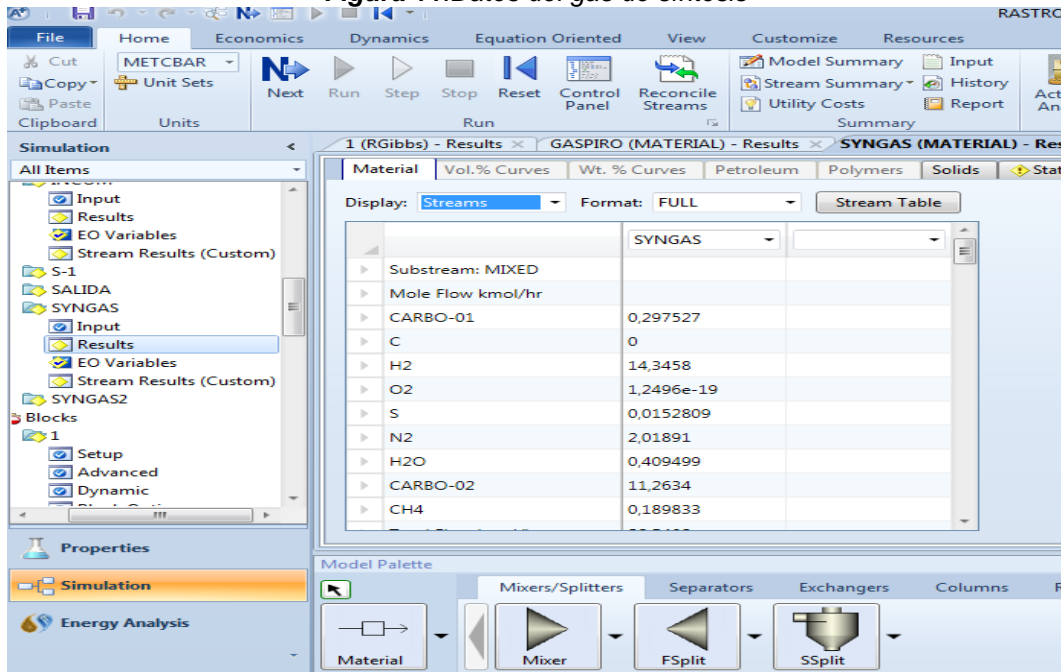
**Figura 10. Condiciones del Reactor Gibbs (GASF)**



Fuentes: Autores

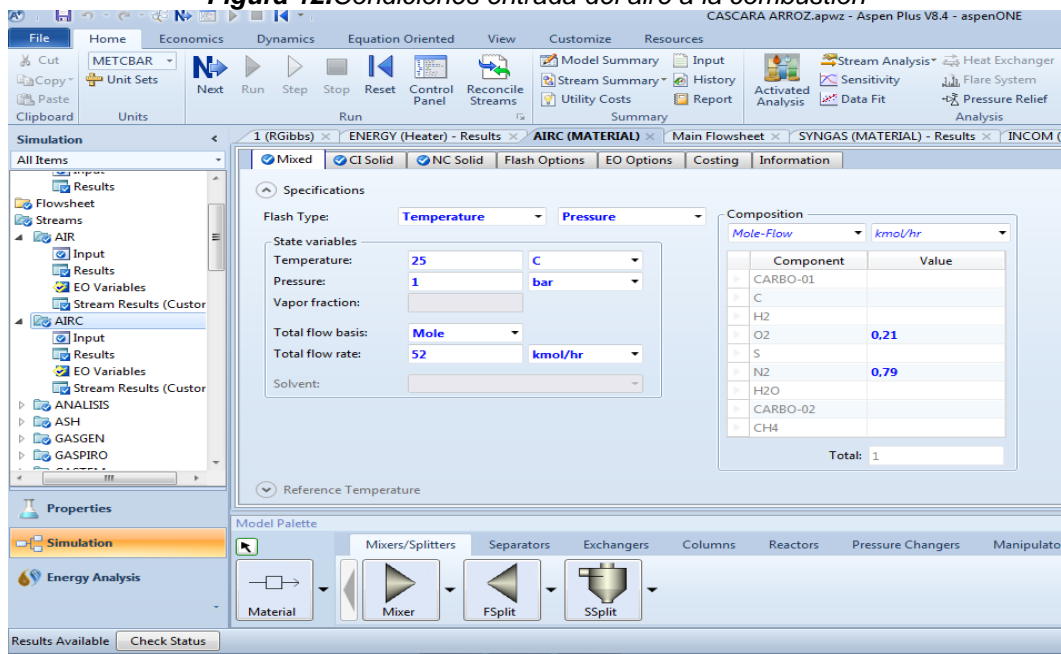
En la figura 9 se puede ver las condiciones de entrada al aire al mezclador (MIX) y el composición del oxígeno y nitrógeno. El gas de pirólisis y el aire son mezclados e ingresados al reactor Gibbs, donde este opera a 850°C y presión de 1 bar como se puede ver en la figura 10. Luego de producir el gas de síntesis este pasa por un separador retirándole las cenizas presentes en el.

**Figura 11. Datos del gas de síntesis**



Fuentes: Autores

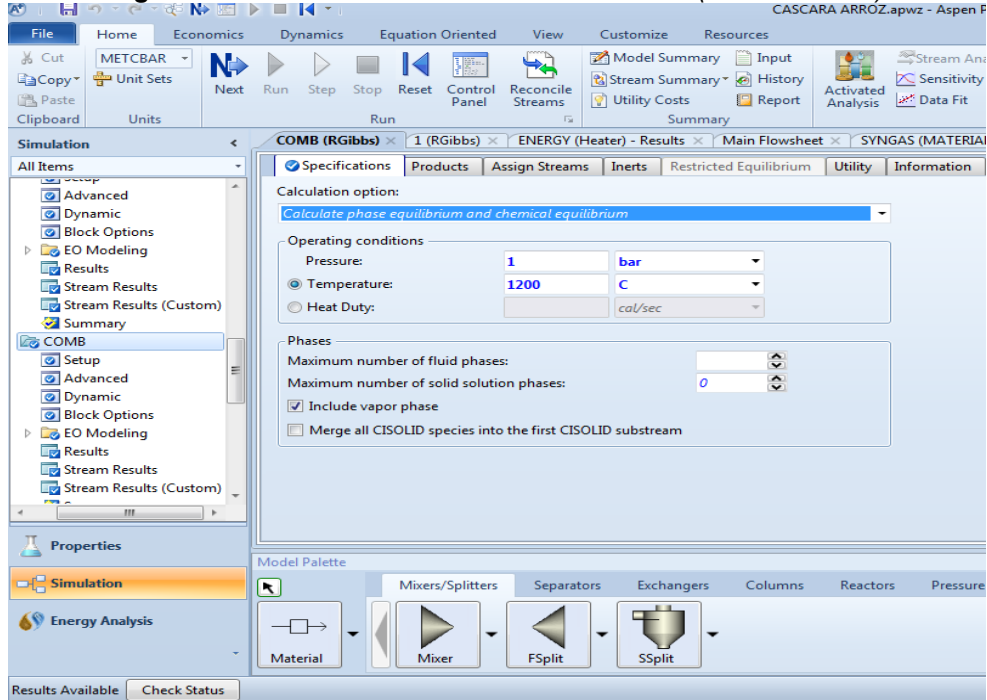
**Figura 12. Condiciones entrada del aire a la combustión**



Fuentes: Autores

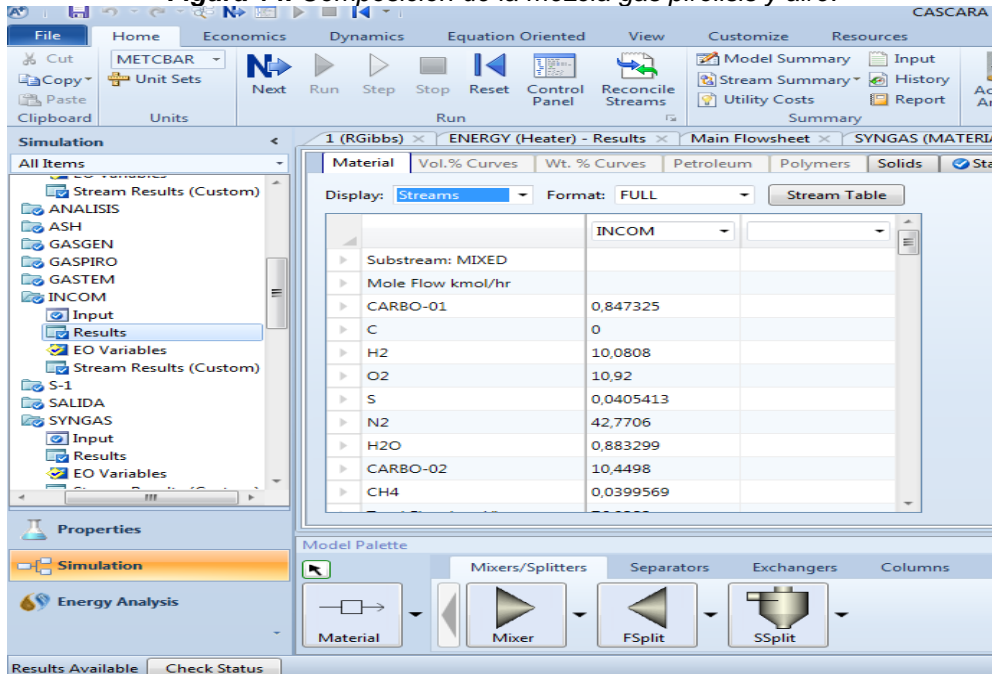
En la figura 11 se encuentra las composiciones del gas de síntesis de un tipo de biomasa; este gas se ingresa a un mezclador (MIX2) con aire; en la figura 12, se puede ver las condiciones que entra este aire al mezclador, como el flujo, la temperatura, presión y composición de este.

Figura 13. Condiciones del motor de combustión (Reactor Gibss)



Fuentes: Autores

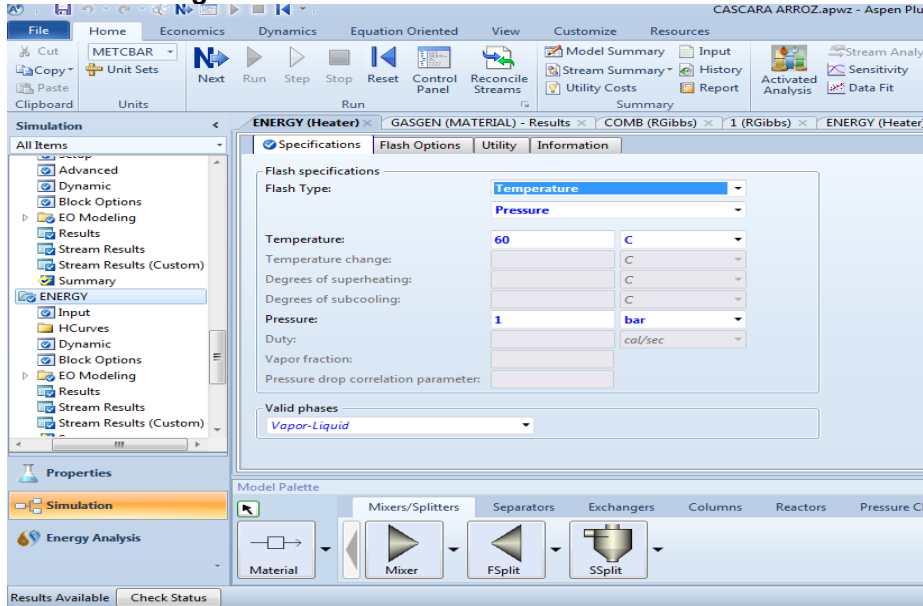
Figura 14. Composición de la mezcla gas pirolysis y aire.



**Fuentes:** Autores

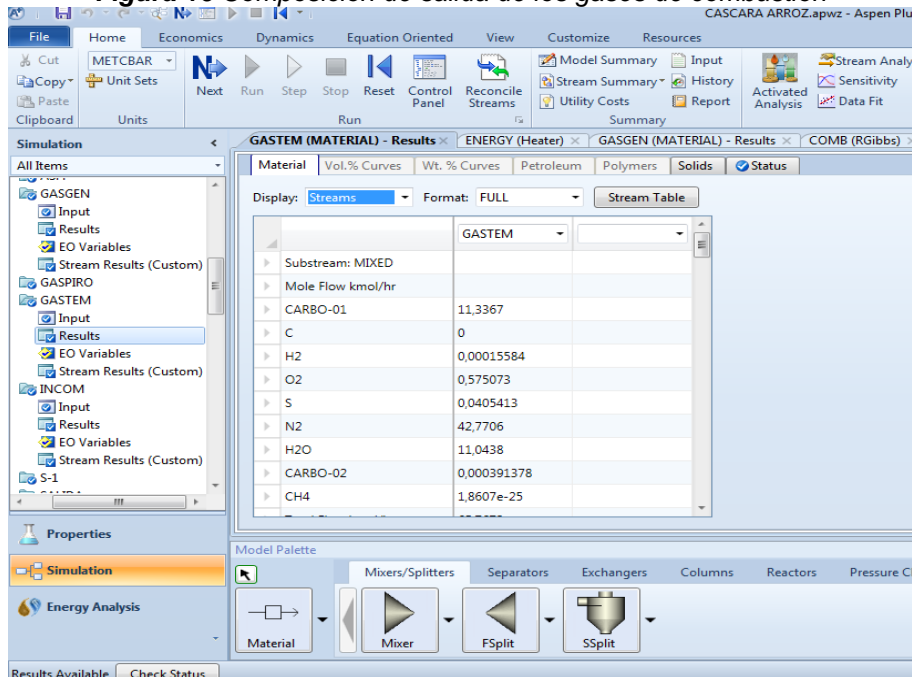
El motor de combustión se simuló como otro reactor de Gibbs, en el cual opera a 1200°C y presión de 1 bar (figura 13); donde se le ingresó una mezcla de aire y gas de síntesis. La figura 14, se puede observar la composición de esta mezcla en la entra del reactor.

**Figura 15.** Condición del Intercambiador de Calor.



**Fuentes:** Autores

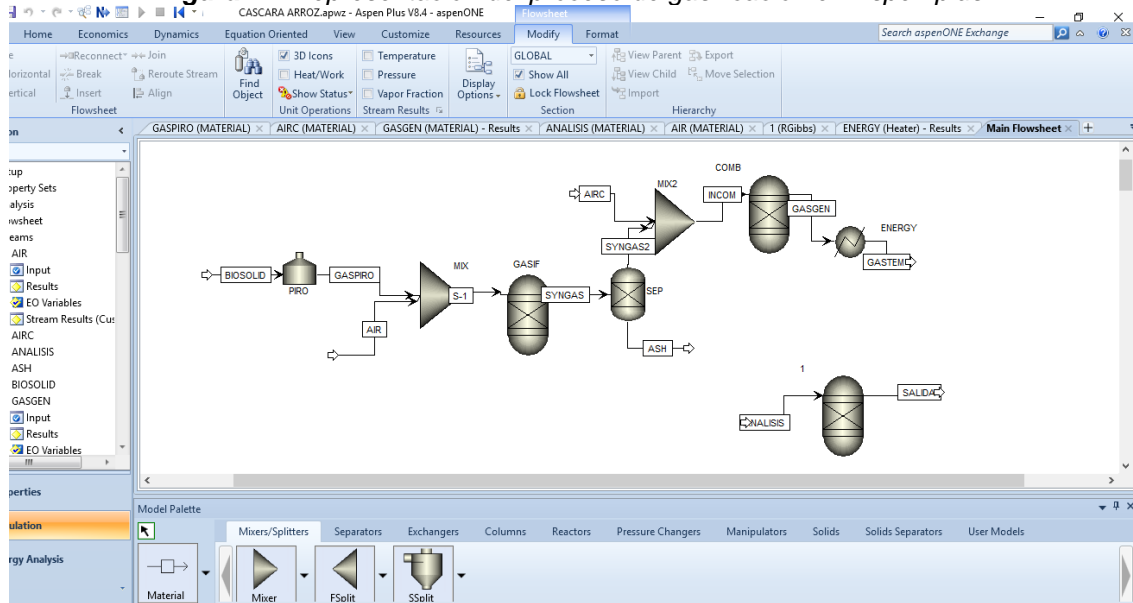
**Figura 16** Composición de salida de los gases de combustión



**Fuentes:** Autores

Luego del proceso de combustión el gas sale con alta temperatura, en el cual se le debe que bajar, porque al generador se ingresa a bajas temperaturas para que tenga mayor rendimiento. Por lo tanto se pasó por un intercambiador de calor (figura 15). Seguidamente se obtuvo las composiciones de salida (figura 16) de los gases de combustión, los cuales estos se ingresar a un generador.

**Figura 17.** Representación del proceso de gasificación en Aspen plus.



**Fuentes:** Autores

En la figura 17 se puede observar la representación de diagrama de bloques del proceso de gasificación con todas las corrientes que están involucradas y sus respectivos equipos para la producción del gas de síntesis y utilización de energía eléctrica.