



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**TEMA: “EVALUACIÓN Y CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA
DEL GAS DE SÍNTESIS DE BIOMASA CON PODER
CALORÍFICO ALTO, MEDIO Y BAJO, PRODUCTO DEL
PROCESO DE GASIFICACIÓN DOWNDRAFT DE 10 KW”**

AUTOR: AGUIRRE GUERRERO, LUIS ALBERTO

DIRECTOR: ING. GUTIÉRREZ, ROBERTO

SANGOLQUÍ

2017



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

CERTIFICADO

Certifico que el trabajo de titulación: **“EVALUACIÓN Y CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DEL GAS DE SÍNTESIS DE BIOMASA CON PODER CALORÍFICO ALTO, MEDIO Y BAJO, PRODUCTO DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN DOWNDRAFT DE 10 KW”** realizado por el señor **LUIS ALBERTO AGUIRRE GUERRERO**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas – ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar al señor **LUIS ALBERTO AGUIRRE GUERRERO** para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, enero de 2017

Ing. Eduardo Roberto Gutiérrez

Director



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **LUIS ALBERTO AGUIRRE GUERRERO** con cédula de ciudadanía N° 1722123310 declaro que este trabajo de titulación: **“EVALUACIÓN Y CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DEL GAS DE SÍNTESIS DE BIOMASA CON PODER CALORÍFICO ALTO, MEDIO Y BAJO, PRODUCTO DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN DOWNDRAFT DE 10 KW”** ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, enero de 2017

Luis Alberto Aguirre Guerrero

172212331-0



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORIZACIÓN

Yo, **LUIS ALBERTO AGUIRRE GUERRERO** autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE publicar en la Biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación: **“EVALUACIÓN Y CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DEL GAS DE SÍNTESIS DE BIOMASA CON PODER CALORÍFICO ALTO, MEDIO Y BAJO, PRODUCTO DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN DOWNDRAFT DE 10 KW”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad y autoría.

Sangolquí, enero de 2017

Luis Alberto Aguirre Guerrero

172212331-0

DEDICATORIA

A mis padres,

A toda mi familia y amigos.

Luis Aguirre G.

AGRADECIMIENTO

*A mi director de proyecto,
Ing. Roberto Gutiérrez*

A mis amigos compañeros.

Y a todos quien de una u otra manera, me acompañaron durante todo este tiempo.

Luis Aguirre G.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | |
|--|-----|
| CERTIFICADO..... | ii |
| AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD | iii |
| AUTORIZACIÓN..... | iv |
| DEDICATORIA | v |
| AGRADECIMIENTO | vi |
| ÍNDICE DE CONTENIDOS..... | vii |
| ÍNDICE DE TABLAS | x |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | xii |
| RESUMEN..... | xiv |
| ABSTRACT | xv |
| CAPÍTULO 1 | 1 |
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1. ANTECEDENTES | 1 |
| 1.2. JUSTIFICACIÓN | 2 |
| 1.3. OBJETIVOS | 3 |
| 1.3.1. OBJETIVO GENERAL | 3 |
| 1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 4 |
| 1.4. ALCANCE DEL PROYECTO | 4 |
| CAPÍTULO 2..... | 5 |
| 2. MARCO TEÓRICO..... | 5 |
| 2.1. BIOMASA..... | 5 |
| 2.1.1. DESCRIPCIÓN | 5 |
| 2.1.2. PROPIEDADES | 6 |
| 2.1.2.1. Poder calorífico | 6 |
| 2.1.2.2. Contenido de humedad (HR) | 6 |
| 2.1.2.3. Porcentaje de cenizas | 7 |
| 2.1.3. CLASIFICACIÓN Y FUENTES DE LA BIOMASA | 7 |
| 2.1.3.1. Biomasa natural | 7 |
| 2.1.3.2. Biomasa residual..... | 7 |
| 2.1.3.3. Cultivos energéticos | 7 |
| 2.1.3.4. Excedentes agrícolas | 8 |

| | | |
|----------|--|----|
| 2.1.4. | BIOMASA COMO ENERGÍA RENOVABLE | 10 |
| 2.1.5. | PROCESOS DE CONVERSIÓN DE BIOMASA EN ENERGÍA..... | 10 |
| 2.1.5.1. | Combustión directa | 11 |
| 2.1.5.2. | Gasificación..... | 11 |
| 2.1.5.3. | Pirólisis..... | 11 |
| 2.2. | GAS DE SÍNTESIS | 12 |
| 2.3. | TECNOLOGÍAS RENOVABLES EN ECUADOR | 13 |
| 2.3.1. | DISPONIBILIDAD DE RECURSOS ENERGÉTICOS RENOVABLES..... | 14 |
| 2.3.1.1. | Hidráulica | 14 |
| 2.3.1.2. | Eólico | 15 |
| 2.3.1.3. | Geotérmico..... | 15 |
| 2.3.1.4. | Solar fotovoltaica..... | 16 |
| 2.3.1.5. | Biomasa | 17 |
| 2.4. | PROCESO DE GASIFICACIÓN DE BIOMASA | 18 |
| 2.4.1. | ETAPAS DE LA GASIFICACIÓN | 18 |
| 2.4.2. | REACCIONES EN EL PROCESO DE GASIFICACIÓN..... | 20 |
| 2.4.3. | AGENTE GASIFICANTES | 21 |
| 2.4.4. | TIPOS DE GASIFICADORES | 22 |
| 2.4.4.1. | Gasificador de lecho fijo - Downdraft..... | 23 |
| 2.4.4.2. | Gasificador de lecho fijo - Updraft | 24 |
| 2.4.4.3. | Gasificadores de lecho fluidizado..... | 24 |
| 2.4.5. | COMPARACIÓN DE DISTINTOS TIPOS DE GASIFICADORES | 25 |
| 2.5. | CROMATOGRAFÍA DE GASES | 26 |
| | CAPÍTULO 3..... | 28 |
| 3. | DISEÑO EXPERIMENTAL..... | 28 |
| 3.1. | PROCESO DE GASIFICACIÓN..... | 28 |
| 3.2. | SELECCIÓN DE BIOMASAS..... | 29 |
| 3.3. | VARIABLES Y DATOS DEL PROCESO..... | 29 |
| 3.4. | DISEÑO FACTORIAL DEL EXPERIMENTO | 32 |
| | CAPÍTULO 4..... | 41 |
| 4. | EVALUACIÓN Y CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DEL GAS DE SÍNTESIS DE BIOMASA..... | 41 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 4.1. | OBTENCIÓN DE LAS MUESTRAS | 41 |
| 4.2. | CARACTERIZACIÓN DEL GAS DE SÍNTESIS | 49 |
| 4.2.1. | RESULTADOS CROMATOGRÁFICOS Y PODER CALORÍFICO ... | 49 |
| 4.2.2. | TEMPERATURAS DURANTE EL PROCESO | 63 |
| 4.2.3. | ANÁLISIS DE MATERIAL PARTICULADO Y ALQUITRANES | 76 |
| 4.3. | EVALUACIÓN ENERGÉTICA DEL GAS DE SÍNTESIS | 76 |
| 4.3.1. | BALANCE DE MASA | 76 |
| 4.3.2. | BALANCE DE ENERGÍA | 79 |
| 4.3.3. | EFICIENCIA DEL GASIFICADOR | 80 |
| 4.4. | ANÁLISIS | 94 |
| 4.4.1. | PODER CALORÍFICO..... | 94 |
| 4.4.2. | EFICIENCIA EN CALIENTE..... | 97 |
| 4.4.3. | EFICIENCIA EN FRÍO..... | 98 |
| 4.4.4. | CALOR PERDIDO..... | 100 |
| 4.5. | ANÁLISIS AMBIENTAL..... | 102 |
| | CAPÍTULO 5..... | 104 |
| 5. | ANÁLISIS ECONÓMICO..... | 104 |
| 5.1. | COSTOS DIRECTOS..... | 104 |
| 5.2. | COSTOS INDIRECTOS | 104 |
| 5.3. | COSTO TOTAL DEL PROYECTO | 105 |
| | CAPÍTULO 6..... | 106 |
| 6. | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 106 |
| 6.1. | CONCLUSIONES..... | 106 |
| 6.2. | RECOMENDACIONES | 108 |
| | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 109 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1 Detalle de cultivos energéticos | 8 |
| Tabla 2 Detalle de biomasa residual | 9 |
| Tabla 3 Comparación de gasificadores | 26 |
| Tabla 4 Especificaciones técnicas del gasificador de biomasa | 29 |
| Tabla 5 Selección de biombras para la obtención del gas de síntesis..... | 29 |
| Tabla 6 Variables en el proceso de gasificación..... | 30 |
| Tabla 7 Otros datos del proceso..... | 32 |
| Tabla 8 Niveles y factores para la obtención del gas de síntesis | 33 |
| Tabla 9 Combinaciones de experimentos - réplica N°1 | 34 |
| Tabla 10 Combinaciones de experimentos - réplica N°2..... | 36 |
| Tabla 11 Combinaciones de experimentos – réplica N°3..... | 38 |
| Tabla 12 Características de las termocuplas..... | 41 |
| Tabla 13 Poderes caloríficos de componentes del gas de síntesis | 50 |
| Tabla 14 Resultados del análisis cromatográfico y presiones obtenidas – réplica N°1..... | 51 |
| Tabla 15 Resultados del análisis cromatográfico y presiones obtenidas – réplica N°2..... | 55 |
| Tabla 16 Resultados del análisis cromatográfico y presiones obtenidas – réplica N°3..... | 59 |
| Tabla 17 Registro de temperaturas - réplica N°1 | 64 |
| Tabla 18 Registro de temperaturas - réplica N°2 | 68 |
| Tabla 19 Registro de temperaturas - réplica N°3 | 72 |
| Tabla 20 Flujo másico de entrada de aire | 78 |
| Tabla 21 Balance de masa con el 100% de apertura de válvula de entrada de aire..... | 78 |
| Tabla 22 Balance de masa con el 50% de apertura de válvula de entrada de aire..... | 79 |
| Tabla 23 Balance de masa con el 25% de apertura de válvula de entrada de aire..... | 79 |
| Tabla 24 Balance de energía y eficiencia – réplica N°1 | 82 |
| Tabla 25 Balance de energía y eficiencia – réplica N°2 | 86 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 26 Balance de energía y eficiencia – réplica N°3 | 90 |
| Tabla 27 Experimentos con valores altos de PCI y PCS..... | 95 |
| Tabla 28 Experimentos con valores bajos de PCI y PCS..... | 96 |
| Tabla 29 Combinaciones con las que se obtuvieron los mejores resultados..... | 96 |
| Tabla 30 Combinaciones con las que se obtuvieron los peores resultados..... | 97 |
| Tabla 31 Costos directos..... | 104 |
| Tabla 32 Costos indirectos | 104 |
| Tabla 33 Costo del proyecto..... | 105 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 Obtención de la biomasa | 5 |
| Figura 3 Poderes caloríficos de diferentes tipos de biomasa | 6 |
| Figura 4 Procesos termoquímicos de conversión de biomasa en energía.. | 11 |
| Figura 5 Pirólisis y sus productos..... | 12 |
| Figura 6 Algunos usos para el gas de síntesis..... | 13 |
| Figura 7 Producción de Energía en Ecuador (GWh)..... | 13 |
| Figura 8 Mapa de Isoyetas del Ecuador..... | 14 |
| Figura 9 Mapa eólico del Ecuador..... | 15 |
| Figura 10 Prospectos geotérmicos del Ecuador..... | 16 |
| Figura 11 Mapa de isohelias promedio de Ecuador | 17 |
| Figura 12 Densidad de residuos bioenergéticos del Ecuador | 18 |
| Figura 15 Diagrama ilustrativo del proceso de gasificación | 20 |
| Figura 16 Clasificación común de gasificadores | 22 |
| Figura 17 Esquema de gasificador downdraft | 23 |
| Figura 18 Esquema de gasificador updraft | 24 |
| Figura 19 Esquema de gasificador de lecho fluidizado | 25 |
| Figura 20 Cromatógrafo de gases con espectrómetro de masas..... | 27 |
| Figura 21 Gasificador Downdraft (DECHEM) | 28 |
| Figura 22 Válvula de entrada del aire al venturi | 30 |
| Figura 23 Medición de la humedad de la biomasa (lechuguín) | 31 |
| Figura 25 Indicador de la balanza | 32 |
| Figura 26 Partes del gasificador..... | 42 |
| Figura 27 Distribución de las termocuplas en el gasificador | 42 |
| Figura 28 Limpieza del gasificador..... | 43 |
| Figura 29 Medición de presión | 43 |
| Figura 30 Conexión del aire comprimido al Venturi..... | 44 |
| Figura 31 Conexión de módulos a myRIO | 44 |
| Figura 32 Esquema de conexión de termocuplas | 45 |
| Figura 33 Lectura de datos de termocuplas | 46 |
| Figura 34 Encendido del carbón | 47 |
| Figura 35 Gasificador en operación | 47 |

| | |
|---|-----|
| Figura 36 Material granulado utilizado en filtro..... | 48 |
| Figura 37 Funda para muestra del gas de síntesis | 48 |
| Figura 38 Esquema de obtención del gas de síntesis..... | 49 |
| Figura 39 Flujo de masa y energía..... | 76 |
| Figura 40 Reacción de temperatura adiabática para la biomasa | 77 |
| Figura 41 PCI y PCS para experimentos de réplica N°1 (en MJ/Kg) | 94 |
| Figura 42 PCI y PCS para experimentos de réplica N°2 (en MJ/Kg) | 94 |
| Figura 43 PCI y PCS para experimentos de réplica N°3 (en MJ/Kg) | 95 |
| Figura 44 PCI (MJ/Kg) vs $\eta_{cal}(\%)$ para experimentos de réplica N°1 | 97 |
| Figura 45 PCI (MJ/Kg) vs $\eta_{cal}(\%)$ para experimentos de réplica N°2 | 98 |
| Figura 46 PCI (MJ/Kg) vs $\eta_{cal}(\%)$ para experimentos de réplica N°3 | 98 |
| Figura 47 PCI (MJ/Kg) vs $\eta_{frío}(\%)$ para experimentos de réplica N°1..... | 99 |
| Figura 48 PCI (MJ/Kg) vs $\eta_{frío}(\%)$ para experimentos de réplica N°2..... | 99 |
| Figura 49 PCI (MJ/Kg) vs $\eta_{frío}(\%)$ para experimentos de réplica N°3..... | 99 |
| Figura 50 PCI (MJ/Kg) vs Q_p (KW) para experimentos de réplica N°1 | 100 |
| Figura 51 PCI (MJ/Kg) vs Q_p (KW) para experimentos de réplica N°2 | 100 |
| Figura 52 PCI (MJ/Kg) vs Q_p (KW) para experimentos de réplica N°3 | 101 |
| Figura 53 Ciclo de carbono | 103 |

RESUMEN

En el presente trabajo tuvo como objetivo realizar una caracterización y evaluación energética del gas de síntesis obtenido del gasificador tipo downdraft de 10 KW, ubicado en el laboratorio de energías renovables del DECEM, trabajando con distintos tipos de biomásas (aserrín, cascarilla de arroz y lechuguín) y utilizando aire como agente gasificante. Se definieron las variables involucradas en el proceso de gasificación y se estableció la relación entre ellas mediante un diseño factorial. Se recolectó las muestras del gas de síntesis de cada experimento realizado y se realizó un análisis cromatográfico de las mismas, pudiendo así conocer los elementos contenidos en el gas para, de esta manera, calcular su poder calorífico superior e inferior. A partir de la aplicación de las ecuaciones de balance de masa y energía se determina el flujo de gas de síntesis obtenido, el calor perdido y la eficiencia, tanto en caliente como en frío del gasificador para cada experimento realizado. De manera general, se determinó que el poder calorífico del gas tiene relación con el tipo de biomasa, el flujo de gas de síntesis depende del tipo de biomasa y la cantidad de agente gasificante suministrado al sistema, el calor perdido fue mayor cuando se utilizó cascarilla de arroz, el lechuguín tuvo una mejor eficiencia en caliente y, por último, la eficiencia en frío fue directamente proporcional al poder calorífico del gas de síntesis.

PALABRAS CLAVES:

- **BIOMASA**
- **GASIFICACIÓN**
- **GAS DE SÍNTESIS**
- **PODER CALORÍFICO**

ABSTRACT

The research had as aim to perform the syngas's characterization and energetic evaluation obtained from the 10 KW downdraft gasifier, located in DECEM's renewable energy laboratory, operating with different types of biomass (sawdust, rice husks and *lechuguín*), and using air as a gasifying agent. The variables involved in the gasification process were defined and the relationship between them was established through a factorial design. The syngas samples of each experiment were collected and a chromatographic analysis was done in order to know the elements contained in the gas in order to calculate its upper and lower calorific value. Through the application of mass and energy balance equations, for each experiment, it was obtained the syngas flow, the heat lost and the efficiency of the gasifier, both hot and cold. In general, it was determined that the calorific value of the gas is related to the type of biomass, the syngas flow depends on the type of biomass as well as the amount of gasification agent supplied to the system, the heat lost was higher when the rice husk was used, a better hot efficiency was obtained by the *lechuguín* and, finally, the cold efficiency was directly proportional to the calorific value of the syngas.

KEYWORDS:

- **BIOMASS**
- **GASIFICATION**
- **SYNGAS**
- **CALORIFIC VALUE**

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

Ecuador y América Latina en general, son dependientes en un muy alto porcentaje de combustibles fósiles para la obtención de la energía y en un muy bajo porcentaje, de energías renovables. Debido a esto, el Gobierno de la República del Ecuador ha incentivado a través del INER (Instituto Nacional de Energías Renovables), “promover la eficiencia energética, una mayor participación de energías renovables sostenibles, el desarrollo y uso de prácticas tecnológicas diversificadas no contaminantes de bajo impacto y que no pongan en riesgo la soberanía alimentaria, el equilibrio ecológico de los ecosistemas ni el derecho al agua.” (INER, 2015)

El uso de la biomasa como energía no es algo nuevo, ya que es conocido que se usó en Europa durante la segunda guerra mundial y luego debido al auge que tuvo la industria petrolera se abandonó este tipo de tecnología. En la actualidad se he retomado la idea de continuar con este tipo de tecnologías debido al inminente agotamiento de las reservas petroleras y en especial por la crisis ambiental a la que enfrentamos. Así es como mediante el proceso de gasificación se puede obtener combustible el cual puede reemplazar a los combustibles fósiles sin dejar impacto ambiental.

La gasificación es un proceso termoquímico versátil el cual es capaz de obtener energía del gas producido (llamado gas de síntesis) por la combustión de biomasa que en nuestro país, constituye un potencial recurso energético para la reducción de contaminación y la generación de energías más limpias a un menor costo de producción.

1.2. JUSTIFICACIÓN

En el plan de desarrollo del buen vivir se estipula que se dará prioridad al empleo de energías renovables. El uso de la Biomasa tiene un gran interés ambiental y se basa en las múltiples ventajas que presenta como la disminución de las emisiones de CO₂, metano (CH₄) y la no emisión de contaminantes sulfurados o nitrogenados. Es por ello que en la Biomasa se utilizan recursos naturales renovables, es decir, son aquellos que tras ser utilizados, pueden regenerarse naturalmente o artificialmente como el agua o los alimentos. Son recursos que al estar sometidos a ciclos, se mantienen de forma constante en la naturaleza. En el Plan Nacional del Buen Vivir y en el INER se establecen objetivos y políticas para el desarrollo de las energías renovables, tales como:

- “Objetivo 4: Garantizar los derechos de la naturaleza y promover un ambiente sano y sustentable”. (SENPLADES)
- “Política 4.3: Diversificar la matriz energética nacional, promoviendo la eficiencia y una mayor participación de energías renovables sostenibles”. (INER, 2015)

La biomasa se puede clasificar mediante su poder calorífico, en este caso alto, medio y bajo y sus aplicaciones y ventajas son abundantes. Un ejemplo de biomasa puede ser el lechuguín, la cascarilla de arroz, el carbón, aserrín, etc., que al ser desechados pueden generar altos niveles de contaminación, por lo que se puede aprovechar para que, mediante un proceso termoquímico como es la gasificación, obtener gas de síntesis.

El gas de síntesis es un combustible producido por la gasificación de carbón o biomasa y consiste básicamente en una mezcla de gases combustibles como hidrógeno, monóxido de carbono y metano, y no combustibles como nitrógeno, dióxido de carbono y vapor de agua. Las altas reservas y el menor costo del carbón comparado con el gas natural motivan la sustitución de gas natural por gas de síntesis producto de la gasificación de carbón.

Existe en nuestro país poca aplicación de la combustión de biomasa para obtener energía por lo que con este proyecto, en conjunto con anteriores proyectos que se han realizado y futuras aplicaciones, se busca ampliar el conocimiento en cuanto al tema del gas de síntesis que se produce de la biomasa mediante el proceso de gasificación.

Con este proyecto se apoya al el cambio de la matriz energética del país, sustentado en la creación de capacidades locales, el aprovechamiento de los recursos naturales, renovables (biomasa) y no renovables que tiene Ecuador y su desarrollo sostenible. La Constitución de la República, posee algunos artículos que apoyan al cambio de la matriz energética.

Este proyecto toma importancia no solo para la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE y el DECEM, sino para la comunidad ecuatoriana en general ya que contribuirá al desarrollo de parámetros técnicos que puedan cumplir con normas internacionales para mejorar así los sistemas energéticos de biomasa existentes y desarrollar nuevas tecnologías dentro del campo de la gasificación y de energías renovables, lo que arrojará una importante fuente de investigación, por lo que se justifica plenamente su ejecución.

Por lo tanto, este proyecto es de suma importancia como sustento a la idea de traer desarrollo, crecimiento y progreso al sector industrial y comercial del país, por medio del uso óptimo de la biomasa.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar y caracterizar la capacidad energética del gas de síntesis, utilizando biomasa con poder calorífico alto, medio y bajo, producto del proceso de gasificación downdraft.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar el diseño de experimento para la evaluación energética de los gases de síntesis de biomasa, identificando y evaluando variables contenidas en el proceso de gasificación.
- Analizar las características del gas de síntesis de biomasa producto del proceso de gasificación mediante un estudio cromatográfico.
- Identificar los beneficios y perjuicios ambientales mediante la composición cromatográfica del gas de síntesis y sus posibles aplicaciones como energía renovable.

1.4. ALCANCE DEL PROYECTO

Contempla la evaluación energética del gas de síntesis de biomasa en el proceso de gasificación Downdraft de 10 KW para biomasa con poder calorífico alto, medio y bajo, utilizando aire como agente gasificante:

- Biomasa con poder calorífico alto: Aserrín
- Biomasa con poder calorífico medio: Cascarilla de arroz
- Biomasa con poder calorífico bajo: Lechuguín

Para la gasificación de la biomasa, se establecerán los parámetros de tipo de biomasa, cantidad, presión, humedad y poder calorífico que se encuentran inmersos en el proceso de gasificación para la extracción del gas de síntesis de biomasa, para su caracterización y evaluación.

La evaluación y análisis energética se realizará en el equipo gasificador Downdraft de 10 KW ubicado en el laboratorio de energías renovables del DECEM, ubicado en la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, campus Sangolquí.

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO

2.1. BIOMASA

2.1.1. DESCRIPCIÓN

La biomasa de manera general puede definirse como la materia de origen animal o vegetal incluyendo desechos y residuos orgánicos, la cual puede ser aprovechada energéticamente (Nogués, F. et al., 2010). La composición de la biomasa varía según su origen (Figura 1) ya sea animal o vegetal y a los procesos a los cuales ha sido sometida.

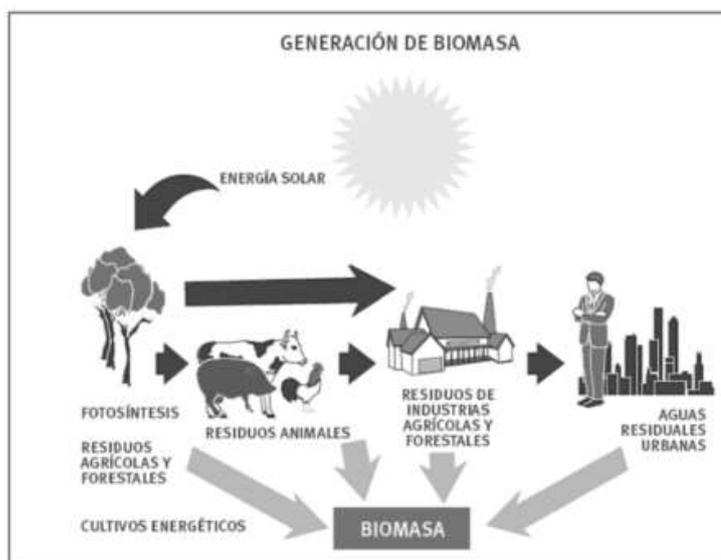


Figura 1 Obtención de la biomasa

Fuente: (Castells, 2012)

2.1.2. PROPIEDADES

2.1.2.1. Poder calorífico

“El poder calorífico representa la cantidad de energía por unidad de volumen o masa que se desprende cuando se produce una reacción química”. (Angiolani, A., 2006)

| Producto | PCS (kcal/kg) Humedad = 0% | PCI a la humedad x (kcal/kg) | | | |
|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------|-----|-------|
| | | x | PCI | x | PCI |
| <i>Leñas y ramas</i> | | | | | |
| Coníferas | 4.950 | 20% | 3.590 | 40% | 2.550 |
| Frondosas | 4.600 | 20% | 3.331 | 40% | 2.340 |
| <i>Serrines y virutas</i> | | | | | |
| Coníferas | 4.880 | 15% | 3.790 | 35% | 2.760 |
| Frondosas autóctonas | 4.630 | 15% | 3.580 | 35% | 2.600 |
| Frondosas tropicales | 4.870 | 15% | 3.780 | 35% | 2.760 |
| <i>Corteza</i> | | | | | |
| Coníferas | 5.030 | 20% | 3.650 | 40% | 2.650 |
| Frondosas | 4.670 | 20% | 3.370 | 40% | 2.380 |
| <i>Vid</i> | | | | | |
| Sarmientos | 4.560 | 20% | 3.280 | 40% | 2.310 |
| Ramilla de uva | 4.440 | 25% | 2.950 | 50% | 1.770 |
| Orujo de uva | 4.820 | 25% | 3.240 | 50% | 1.960 |
| <i>Aceite</i> | | | | | |
| Hueso | 4.960 | 15% | 3.860 | 35% | 2.810 |
| Orujillo | 4.870 | 15% | 3.780 | 35% | 2.760 |
| <i>Cáscaras frutos secos</i> | | | | | |
| Almendra | 4.760 | 10% | 3.940 | 15% | 3.690 |
| Avellana | 4.500 | 10% | 3.710 | 15% | 3.470 |
| Piñón | 4.930 | 10% | 4.060 | 15% | 3.830 |
| Cacahuete | 4.250 | 10% | 3.480 | 15% | 3.260 |
| <i>Paja de cereales</i> | | | | | |
| | 4.420 | 10% | 3.630 | 20% | 3.160 |
| | 4.420 | 30% | 2.700 | | |
| <i>Cascarilla de arroz</i> | | | | | |
| | 4.130 | 10% | 3.337 | 15% | 3.150 |
| <i>Girasol</i> | | | | | |
| Residuo de campo | 4.060 | 10% | 3.310 | 15% | 3.090 |

Figura 2 Poderes caloríficos de diferentes tipos de biomasa

Fuente: (IER, 1992)

2.1.2.2. Contenido de humedad (HR)

El contenido de humedad de la biomasa es la cantidad de agua contenida en la biomasa, y se la expresa en porcentaje de peso. Es importante que la biomasa contenga menos del 30% de contenido de humedad antes de someterse a un proceso de conversión energética.

Cuando el contenido de humedad es muy alto, existen métodos para reducir la humedad de la biomasa, ya sea de manera natural o forzada.

2.1.2.3. Porcentaje de cenizas

El porcentaje de cenizas es la cantidad de materia sólida que no se consume en el proceso de combustión. Las cenizas pueden ocasionar problemas de operación o pueden ser emitidas al medio ambiente como material particulado. En otras ocasiones estas pueden ser aprovechadas, como es el caso de las cenizas de la cascarilla de arroz, en la cual estas pueden ser utilizadas como aditivo en la mezcla de concreto o para la elaboración de filtros de carbón activado.

2.1.3. CLASIFICACIÓN Y FUENTES DE LA BIOMASA

Se puede clasificar a la biomasa en cuatro grupos:

2.1.3.1. Biomasa natural

Es el tipo de biomasa que se produce naturalmente en los ecosistemas naturales sin intervención humana. Un ejemplo de este tipo de biomasa es el lechuguín que se forma en los lagos, las hojas o ramas que caen de los árboles, etc.

2.1.3.2. Biomasa residual

Constituyen los residuos forestales, residuos agrícolas, de industrias forestales y de industrias agroalimenticias. En la tabla 2 se muestran el origen, tipo y residuos que genera cada tipo de biomasa residual.

2.1.3.3. Cultivos energéticos

Son cultivos específicos que se realizan con el objetivo de producir biomasa que pueda ser transformada en combustible. Deben ser cultivos que sean fáciles de obtener, no afecten al medio ambiente, tengan la máxima cantidad de energía por unidad de superficie y el menor costo posible. Los cultivos energéticos se destinan para la producción de biocombustibles sólidos o biocarburantes.

Tabla 1

Detalle de cultivos energéticos

| | Usos | Ejemplos |
|-----------------------------|---|---|
| Cultivos energéticos | Producción de biocombustibles sólidos para la obtención de calor y/o electricidad | Cultivos herbáceos: cardo, sorgo, miscanto Cultivos forestales: chopo, pawlonia, sauce |
| | Producción de biocarburantes. Las especies oleaginosas son utilizadas para obtener bioaceites mientras que las especies con alto contenido de azúcar para obtener bioetanol y derivados | Especies que generan semilla, fruto o raíz con alto contenido de aceite como girasol, colza, soja, etc. Especies que generan semilla, fruto o raíz con alto contenido en azúcar o almidón como caña de azúcar, cebada, trigo, patata, etc. |

Fuente: (Nogués, F. et al., 2010)

2.1.3.4. Excedentes agrícolas

Se utilizan para complementar los cultivos no alimentarios y son aprovechados para reemplazar de manera parcial los biocarburantes y combustibles fósiles. (Castells, 2012)

Tabla 2

Detalle de biomasa residual

| Categoría | Actividad origen del recurso | Tipos | Residuos que genera |
|------------------------------------|--|--|---|
| Residuos forestales | Tratamientos selvícolas: cortas de mejora y cortas parciales. Clareos, claras, podas | Principalmente en montes o en naturales con interés económico | Arboles de pequeño tamaño sin valor comercial. Ramas. Biomasa del estrato arbustivo |
| | Tratamientos selvícolas: cortas de regeneración | Objeto de extracción de madera del monte | Copas, ramas, raberones |
| | Incendios forestales | En Pinares | Árboles quemados sin valor comercial |
| | Aperturas de caminos, cortafuegos, etc. | En todo tipo de monte | Copas, ramas, raberones, árboles quemados |
| Residuos agrícolas | Cultivo de especies herbáceas | Cereales, algodón, etc. | Paja, bagazo, etc. |
| | Poda de especies leñosas | Olivo, vid, frutales | Ramas, tocones, pies secos |
| Industrias agroalimentarias | Industrias extractivas Industrias preparadoras | Extractivas de café, aceite Preparación de arroz, algodón, frutos secos | Alpechines, orujo de oliva, marro de café, cascarilla de arroz, desmontado de algodón |
| Industrias forestales | Primera transformación | Aserrato, fabricación de tableros, industrias del corcho, etc. | Serrines, virutas, cortezas, polvo lijado, recortes de chapas, restos de corchos |
| | Segunda y posteriores transformaciones | Carpintería, muebles, ensamblajes de madera, papel, derivados del corcho | Papel, polvo lijado, recortes, recortes de corchos, etc. |

Fuente: (Nogués, F. et al., 2010)

2.1.4. BIOMASA COMO ENERGÍA RENOVABLE

Solo un 15% del suministro de energía en todo el mundo proviene de la producción energética de la biomasa a pesar de que se sabe que la biomasa tiene un alto poder energético.

Varios son los beneficios medioambientales y sociales que se generan cuando la producción de energía obtenida a través de biomasa es manejada eficientemente si la comparamos con la energía de origen fósil, como por ejemplo la creación de puestos de trabajo, control de los desechos sólidos los cuales causan contaminación del suelo, reducción de las emisiones de dióxido de carbono, etc. (Pérez, J. F., 2009)

Según Klass, D. L. (1998) cada año se generan más de 220 billones de toneladas de biomasa, lo cual constituye más de 10 veces el consumo energético al año de energía en el mundo, por lo que, es importante la implementación de políticas sobre el manejo sostenible de recursos y de nuevas tecnologías de conversión energética eficientes.

Actualmente, de todas las energías no convencionales que se manejan, la biomasa brinda el mayor aporte energético.

Para lograr obtener la misma energía, en muchos de los casos se requiere de mayor cantidad de combustible obtenido a partir de biomasa que combustible de origen fósil, asimismo, la eficiencia de los equipos que funcionan con combustible fósil es mayor a los equipos que funcionan con combustibles obtenidos a partir de la biomasa. Sin embargo, la meta a largo plazo es mejorar el rendimiento energético y la productividad mediante la optimización de tecnologías existentes y el desarrollo de nuevos métodos. (EPEC, 2007)

2.1.5. PROCESOS DE CONVERSIÓN DE BIOMASA EN ENERGÍA

Se conocen cuatro tipos de procesos para convertir la biomasa en energía aprovechable, combustión directa, pirólisis, gasificación y licuefacción que es una tecnología relativamente nueva que se encuentra en desarrollo.



Figura 3 Procesos termoquímicos de conversión de biomasa en energía

Fuente: (SEA, 2008)

Los principales productos obtenidos pueden ser gas, calor, biocombustibles líquidos, carbón vegetal, lo cual depende del tipo de proceso de conversión de energía empleado.

2.1.5.1. Combustión directa

Es el proceso más utilizado para la obtención de energía de la biomasa. El proceso se da mediante la oxidación completa de la biomasa produciendo así energía térmica (calor) ya sea para uso doméstico como sistemas de calefacción o cocción de alimentos; o en industrias como en calderos, intercambiadores de calor, etc.)

2.1.5.2. Gasificación

Consiste en el proceso de combustión de biomasa de forma controlada en presencia de un agente gasificante que puede ser oxígeno, hidrógeno o aire para producir un gas combustible conocido como gas pobre, syngas o gas de síntesis. Este gas es susceptible de ser empleado como energía térmica, o acondicionado para ser utilizado en motores de combustión.

2.1.5.3. Pirólisis

Se lo realiza a través de una oxigenación parcial y controlada de la biomasa. Del proceso de pirólisis se pueden obtener combustibles sólidos (carbón vegetal) o gaseosos como el gas de síntesis. (SEA, 2008)

En la Figura 5 muestra los tipos de pirólisis (lenta y rápida) y los productos que se obtienen.

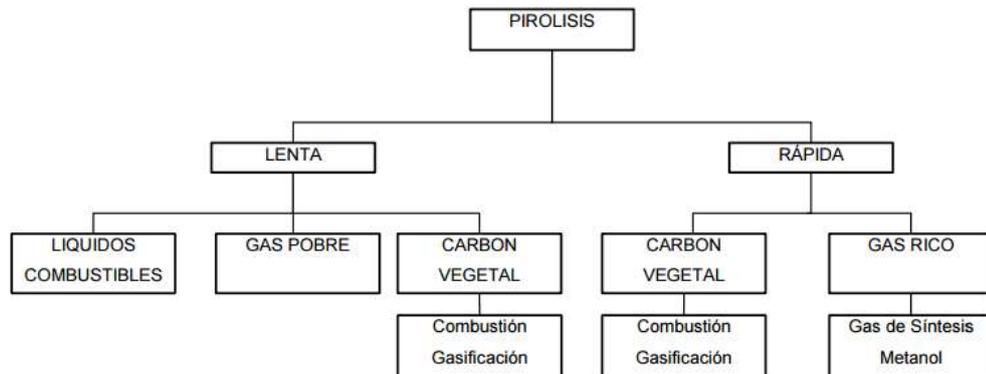


Figura 4 Pirólisis y sus productos

Fuente: (SEA, 2008)

2.2. GAS DE SÍNTESIS

El gas natural sintético es un combustible gaseoso que contiene una mezcla de hidrógeno (H_2), monóxido de carbono (CO) y de dióxido de carbono (CO_2), y otros gases que puede ser producido a partir de casi cualquier fuente rica en carbono, como la biomasa a través de distintas tecnologías que han sido desarrolladas a lo largo del tiempo. (Rostrup-Nielsen, J y Christiansen, L., 2011)

En la actualidad, el syngas se produce esencialmente para producir amoníaco (124 millones de toneladas por año en 2006) y metanol (33 millones de toneladas en 2005). También se usa para obtener hidrógeno, fertilizantes y productos químicos. (Rostrup-Nielsen, J y Christiansen, L., 2011)

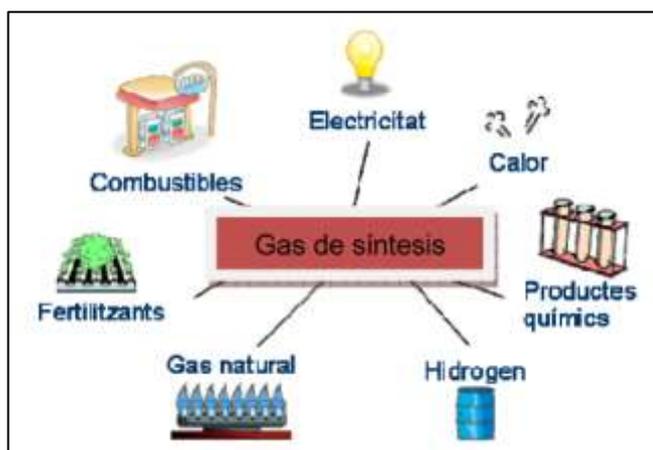


Figura 5 Algunos usos para el gas de síntesis

Fuente: (Pérez, M., 2009)

2.3. TECNOLOGÍAS RENOVABLES EN ECUADOR

La generación de energía en nuestro país está asociada directamente a combustibles fósiles. Son estos los que han sido el sustento para el suministro de energía en Ecuador, sin embargo, durante los últimos años con el programa de cambio de la matriz energética que ha venido desarrollando el gobierno, grandes obras relacionadas con la energía renovable se han venido construyendo y otras más están siendo planificadas.

Hasta el año 2015, se ha reemplazado el consumo de combustibles de origen fósil en un 51,78% por la producción de energía renovable, lo cual representa más de 13 mil gigavatios hora (GWh). (AGENCIA DE REGULACIÓN Y CONTROL DE ELECTRICIDAD, 2016)



Figura 6 Producción de Energía en Ecuador (GWh)

Fuente: (AGENCIA DE REGULACIÓN Y CONTROL DE ELECTRICIDAD, 2016)

La energía hidráulica es la tecnología con mayor desarrollo actualmente en y es la principal fuente de generación de energía para los ecuatorianos, sin embargo, otras energías renovables como la fotovoltaica, eólica y geotérmica aun casi no han sido desarrolladas y apenas representan un 6% del total de la generación de energía en el país. (INER, 2015)

Es por esto que el gobierno nacional, a través del Ministerio de Electricidad y Energía Renovable ha incentivado la inversión para proyectos de generación de energías en los campos renovables mencionadas.

2.3.1. DISPONIBILIDAD DE RECURSOS ENERGÉTICOS RENOVABLES

2.3.1.1. Hidráulica

Varios proyectos de generación hidráulica se están ejecutando en el país y otros más ya han sido entregados, además hay más en fase de planificación en todas las regiones del Ecuador. Según un análisis realizado por la Agencia de regulación y control de la electricidad, en Ecuador existe un potencial teórico de hidroelectricidad de 73390 MW, y un potencial viable de 21900 MW. (AGENCIA DE REGULACIÓN Y CONTROL DE ELECTRICIDAD, 2016)

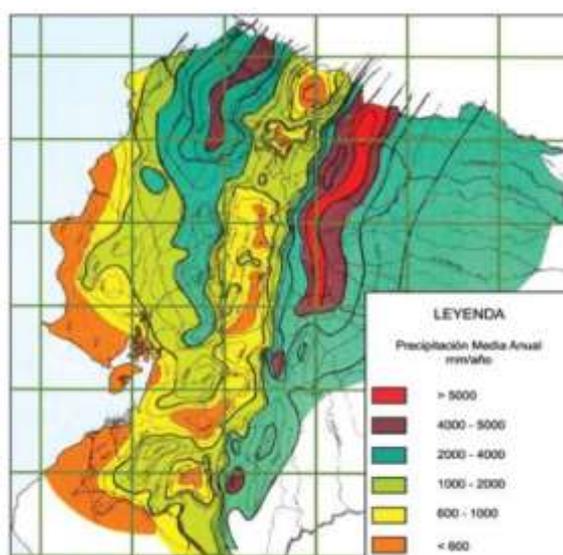


Figura 7 Mapa de Isoyetas del Ecuador

Fuente: (AGENCIA DE REGULACIÓN Y CONTROL DE ELECTRICIDAD, 2016)

2.3.1.2. Eólico

Los sitios con velocidades medias anuales de vientos mayores a 7 m/s, bajo los 3000 msnm y con una distancia menor a 10 km desde las redes de transmisión y carreteras, son considerados aprovechables para la generación de energía eólica. El potencial factible a corto plazo es de 884 MW continental y 7 MW insular.

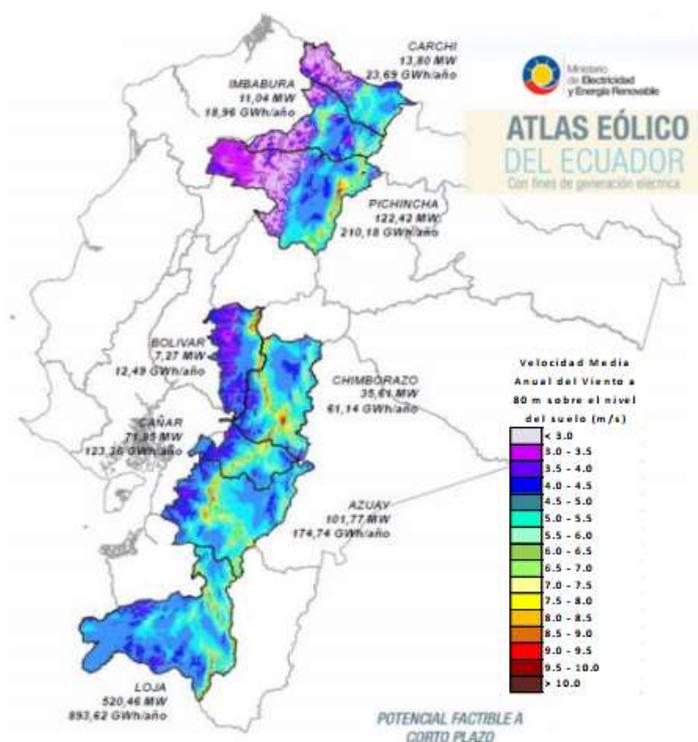
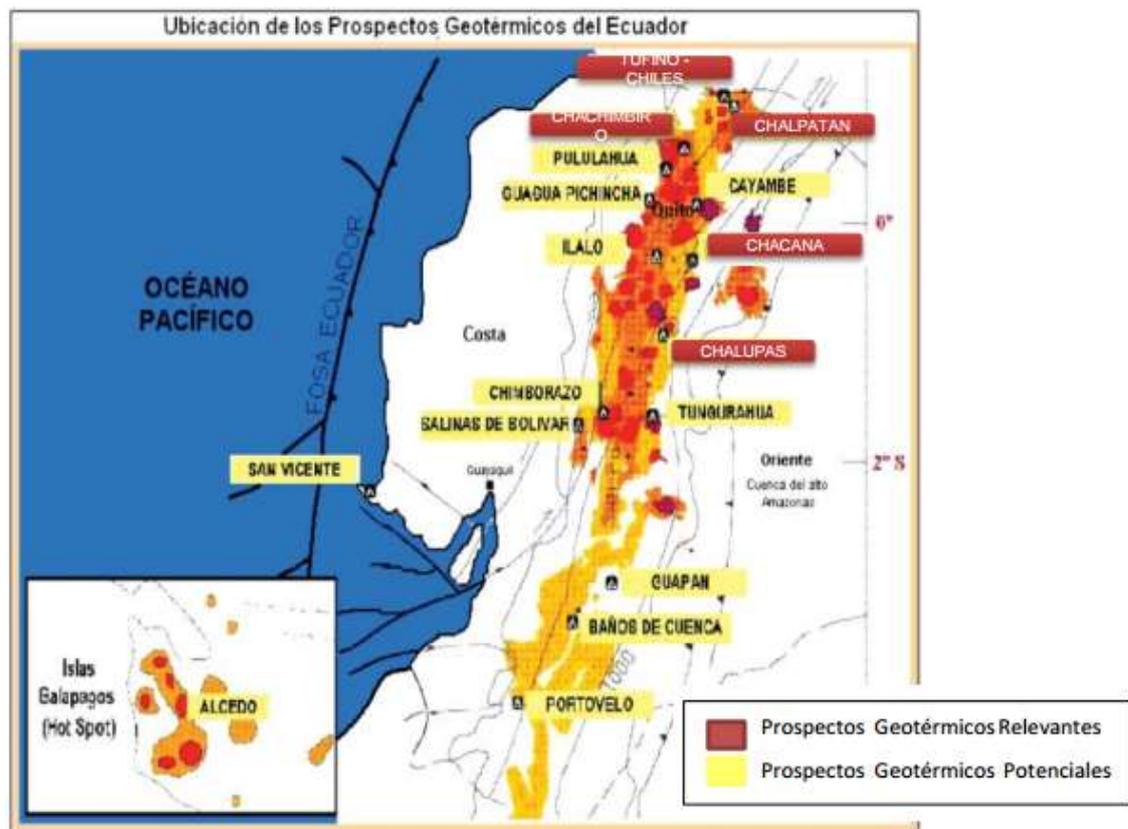


Figura 8 Mapa eólico del Ecuador

Fuente: (AGENCIA DE REGULACIÓN Y CONTROL DE ELECTRICIDAD, 2016)

2.3.1.3. Geotérmico

Según la Agencia de regulación y control de la electricidad existe un potencial teórico de 6500 MW aprovechables de recursos geotérmicos, y mediante la aplicación de 5 proyectos se puede alcanzar más de 1000 MW.



Fuente: Plan para el aprovechamiento de los recursos geotérmicos del Ecuador. Abril 2010

Figura 9 Prospectos geotérmicos del Ecuador

Fuente: (AGENCIA DE REGULACIÓN Y CONTROL DE ELECTRICIDAD, 2016)

2.3.1.4. Solar fotovoltaica

Los valores de insolación mayores o iguales a 4 000 Wh/m²/día son considerados tecnológicamente y económicamente aprovechables para la obtención de energía solar fotovoltaica.

En Ecuador, el valor promedio de insolación es de 4 575 Wh/m²/día, llegando a un máximo de 5 748 Wh/m²/día por lo que, la energía solar fotovoltaica es considerada una de las con mayor potencial y las que menor costo requieren en el país. (AGENCIA DE REGULACIÓN Y CONTROL DE ELECTRICIDAD, 2016)

Mapa isohelias Promedio

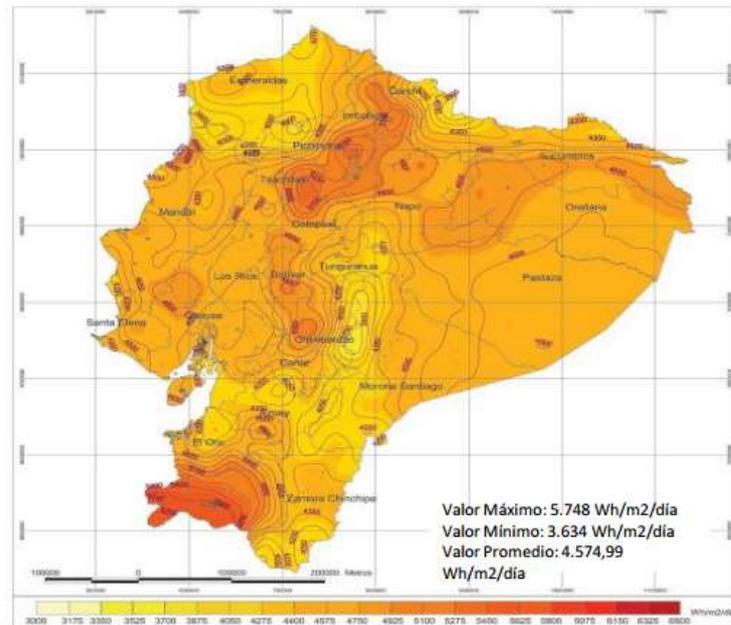


Figura 10 Mapa de isohelias promedio de Ecuador

Fuente: (AGENCIA DE REGULACIÓN Y CONTROL DE ELECTRICIDAD, 2016)

2.3.1.5. Biomasa

El potencial energético de los residuos naturales y agrícolas en Ecuador es realmente alta, considerando que estos se pueden aprovechar en todas las regiones del país. El aprovechamiento energético puede ser mediante el uso de biodigestores o procesos de gasificación de biomasa, que, aplicados de manera controlada, presentan buena eficiencia y bajo impacto ambiental, a diferencia de la obtención de combustibles sólidos.

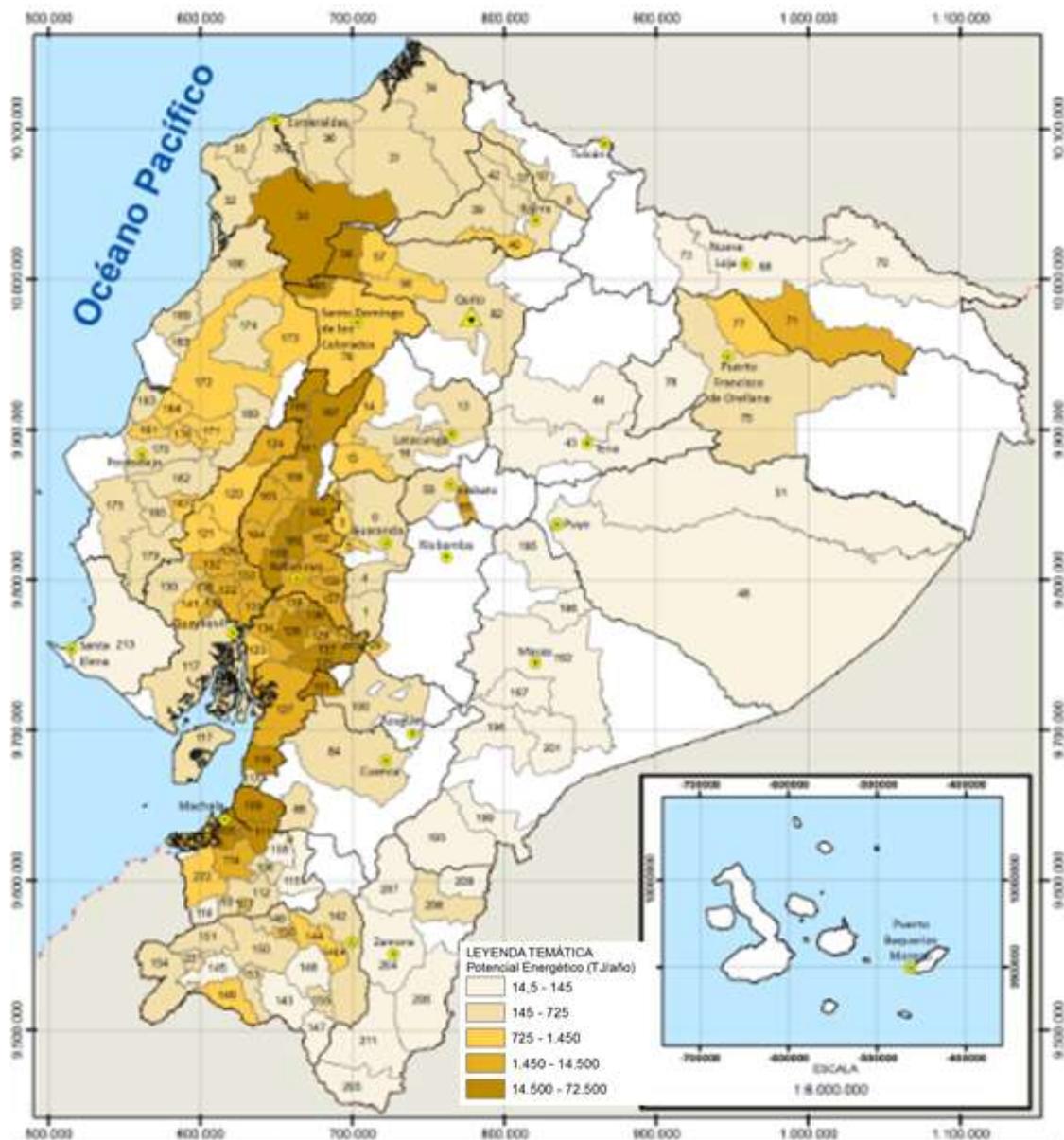


Figura 11 Densidad de residuos bioenergéticos del Ecuador

Fuente: (AGENCIA DE REGULACIÓN Y CONTROL DE ELECTRICIDAD, 2016)

2.4. PROCESO DE GASIFICACIÓN DE BIOMASA

2.4.1. ETAPAS DE LA GASIFICACIÓN

La gasificación es un proceso termoquímico de alta temperatura con presencia de oxígeno de combustión de biomasa que de manera controlada,

puede ser transformada en combustible gaseoso aprovechable energéticamente.

Durante el proceso de gasificación de biomasa, se identifican cuatro etapas: secado, pirólisis (carbonización), combustión (oxidación) y reducción (gasificación).

A continuación se describen los subprocesos de la gasificación:

- **Secado**

Cuando la biomasa ingresa al reactor, en la parte superior esta se calienta y se seca, evaporando parte de la humedad que esta contiene. Cuando el contenido de humedad de la biomasa es muy alta, se debe realizar un secado previo a su ingreso en el reactor; esto se lo hace ya que la mayoría de gasificadores funcionan de forma eficiente cuando el contenido de humedad está por debajo del 30%.

- **Pirólisis**

A este subproceso se lo conoce también como carbonización. La biomasa se descompone térmicamente en ausencia de oxígeno a una temperatura de entre 100 y 500°C aproximadamente. Los gases volátiles se desprenden (CH_4 , C_2H_6 , CO y H_2). Al haber ausencia de oxígeno en este subproceso, se genera una combustión incompleta en estos gases en el momento de su desprendimiento, por lo que se transforman en alquitranes o residuos carbonosos (char).

- **Combustión**

Los residuos carbonosos conocidos como “char” se queman al entrar en contacto con el agente gasificante para producir un gas con bajo contenido calórico.

- **Reducción**

En este subproceso se genera el combustible gaseoso. Las moléculas de alquitrán son descompuestas a moléculas más simples. Resulta en alquitrán, H₂O, partículas de cenizas y en el gas de síntesis.

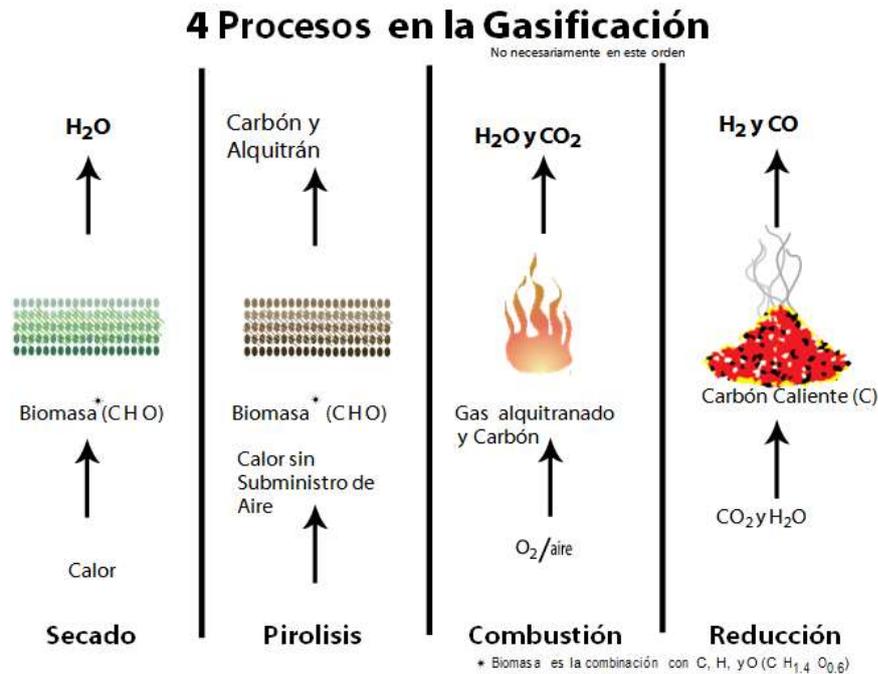


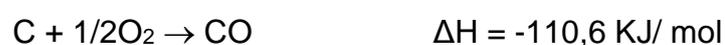
Figura 12 Diagrama ilustrativo del proceso de gasificación

Fuente: (Oriol, P. et. al., 2013)

2.4.2. REACCIONES EN EL PROCESO DE GASIFICACIÓN

En el proceso de gasificación de biomasa se presentan varias reacciones químicas entre las cuales están las reacciones exotérmicas de oxidación (en la zona de combustión) y las reacciones endotérmicas (en la zona de reducción).

Dentro de las reacciones exotérmicas tenemos:



Estas reacciones exotérmicas son rápidas y se consideran irreversibles en condiciones (temperaturas y presiones) normales del proceso de gasificación.

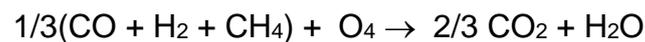
Dentro de las reacciones endotérmicas tenemos:



Formación de metano:



En la zona de pirólisis:



2.4.3. AGENTE GASIFICANTES

Es el agente utilizado en el proceso de gasificación de biomasa para producir las reacciones químicas con el objetivo de obtener el syngas.

Los agentes gasificantes que pueden ser utilizados en el proceso de gasificación son:

- **Aire**

Es la el más utilizado debido a la facilidad que presenta, sin embargo, el gas de síntesis que se es de bajo poder calorífico debido a la alta presencia de nitrógeno en el aire.

- **Oxígeno:**

Si se utiliza oxígeno como agente gasificador, aumenta la proporción de H₂ en el syngas y se obtiene un poder calorífico medio. Generalmente se utiliza cuando se quiere obtener metanol o gasolina sintética.

- **Vapor de agua**

Se obtiene un gas rico en hidrógeno y monóxido de carbono, por lo que su poder calorífico va a ser alto. Con el uso de este agente se puede obtener amoníaco o metanol.

- **Hidrógeno**

Se produce un gas de alto contenido energético al tener grandes cantidades de metano e hidrógeno. Con este agente gasificante el syngas que se obtiene puede reemplazar al gas natural. Sin embargo, dado que el hidrógeno es un excelente gas combustible, se lo debe emplear como agente gasificante cuando su pureza sea baja y que no pueda utilizarse como combustible por sí mismo.

2.4.4. TIPOS DE GASIFICADORES

Los gasificadores son reactores termoquímicos donde se producen reacciones químicas complejas y tienen el fin de obtener combustible gaseoso a través de biomasa. El gasificador es un sistema de alta eficiencia en términos de la relación biomasa-energía producida.

Para clasificar a los gasificadores, se los divide en dos grupos, gasificadores de lecho fijo o móvil y gasificadores de lecho fluido o fluidizado.

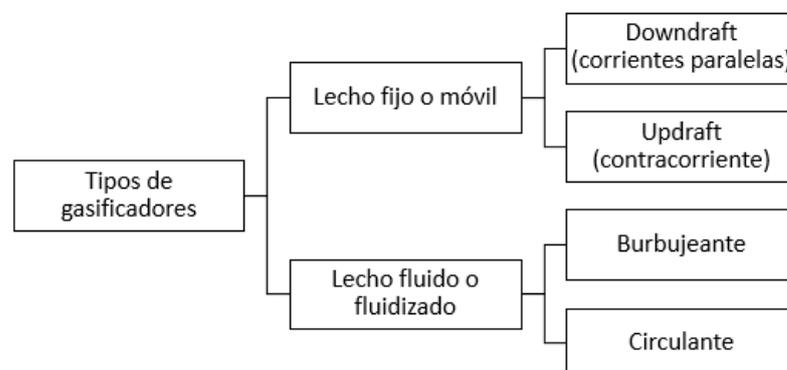


Figura 13 Clasificación común de gasificadores

2.4.4.1. Gasificador de lecho fijo - Downdraft

En este tipo de gasificador los flujos de biomasa y de agente gasificante van en la misma dirección. La biomasa entra por la parte superior, experimentando procesos de secado y pirólisis debido al aumento de la temperatura.

En el gasificador downdraft, las temperaturas en el reactor pueden superar los 1000°C. Estas temperaturas son resultado de la conducción y radiación de calor a temperaturas moderadamente altas que tienen lugar desde la parte interior, donde se genera calor mediante combustión parcial (ausencia de oxígeno) de los productos que llegan ahí. En la zona media del reactor se produce la oxidación, en la que los gases, alquitranes y carbón se queman parcialmente con el agente con ayuda del gasificante. Finalmente en la zona baja se produce el proceso de reducción de la cual se obtiene el gas de síntesis a altas temperaturas (600 a 800°C) (Rincón, S. et. al., 2011)



Figura 14 Esquema de gasificador downdraft

Fuente: (Lapuerta, M., 2007)

2.4.4.2. Gasificador de lecho fijo - Updraft

En este tipo de gasificadores, la biomasa ingresa por la parte superior del reactor y desciende en flujo contrario al agente gasificante, que ingresa por la parte inferior del gasificador. A medida que la biomasa desciende, esta se calienta debido a la corriente que asciende del agente gasificante hasta que alcanza la zona de combustión (mayor temperatura) y experimentando un enfriamiento posterior antes de la descarga de escorias.

La principal ventaja de este tipo de gasificador es que puede trabajar con biomasa cuyo contenido de humedad sea de hasta el 60%, sin embargo produce gases con alto contenido de alquitranes; esto lo hace adecuado para aplicaciones térmicas pero ineficiente para aplicaciones energéticas, que requieren gases con menos impurezas.

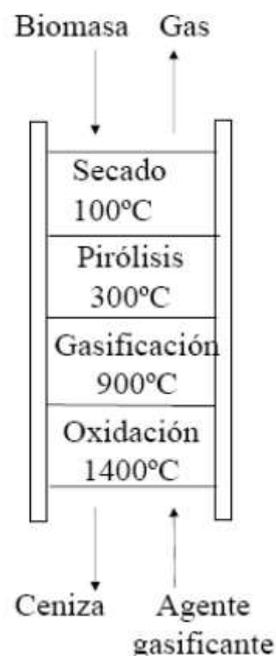


Figura 15 Esquema de gasificador updraft

Fuente: (Lapuerta, M., 2007)

2.4.4.3. Gasificadores de lecho fluidizado

La biomasa entra por la parte lateral del gasificador y el agente gasificante lo hace por la parte inferior del reactor. La reacción tiene lugar con la biomasa

suspendida en la corriente gaseosa, formando un lecho fluido que se comporta de modo similar a un líquido. (Pérez, J. F., 2009)

Tienen como ventaja la economía, debido a la relación volumen de gas/volumen del reactor, si lo comparamos con gasificadores de lecho fijo o móvil. Por su parte presentan el inconveniente de que los tamaños de material particuado de biomasa deben ser pequeños por lo que muchas veces requieren de procesos de corte previos, adicionalmente, su operación es más compleja en relación al resto de gasificadores.

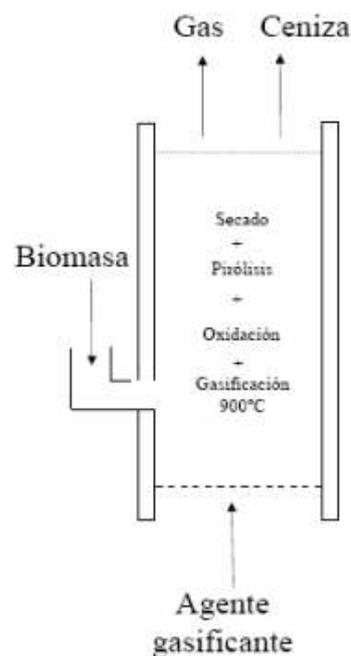


Figura 16 Esquema de gasificador de lecho fluidizado

Fuente: (Lapuerta, M., 2007)

2.4.5. COMPARACIÓN DE DISTINTOS TIPOS DE GASIFICADORES

La Tabla 3 muestra una comparación entre los tipos de gasificadores de lecho fijo y de lecho fluidizado.

Tabla 3

Comparación de gasificadores

| | Lecho fijo | | Lecho fluidizado |
|--|-------------------|-----------|-------------------------|
| | Updraft | Downdraft | |
| Alto contenido de humedad de biomasa (20 – 60%) | Si | No | No |
| Contenido de alquitranes en el gas | Alto | Bajo | Moderado |
| Temperatura del gas de salida | 250 | 800 | 800-900 |
| Dificultad de operación | Baja | Baja | Alta |

2.5. CROMATOGRAFÍA DE GASES

La cromatografía de gases es una técnica analítica que permite la separación y cuantificación de los componentes de una sustancia gaseosa. Actualmente, esta técnica se emplea en la industria, medicina, biología, análisis ambiental, etc. como técnica de rutina y control de gases. (Valcárcel, C. & Gómez, A., 1998)

En la cromatografía de gases, los componentes del gas son separados mientras son transportados por una fase fluida móvil a través de una fase estacionaria líquida. La separación se logra debido a que cada soluto de cada molécula depende de un equilibrio en la distribución entre la fase móvil y la estacionaria y la separación se la realiza en función de su masa, polaridad, cargas, etc. (Chicharro, M., s.f.)



Figura 17 Cromatógrafo de gases con espectrómetro de masas

Fuente: (Chicharro, M., s.f.)

CAPÍTULO 3

3. DISEÑO EXPERIMENTAL

Este capítulo describe el equipo e instrumentos utilizados y tipo de biomasa. Además incluye el análisis de variables, diseño factorial y el procedimiento realizado para obtener el gas de síntesis.

3.1. PROCESO DE GASIFICACIÓN

Se utilizó el equipo gasificador tipo downdraft de 10 KW, ubicado en el laboratorio de energías de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, campus Sangolquí.



Figura 18 Gasificador Downdraft (DECEM)

Las especificaciones técnicas del gasificador downdraft de biomasa son las siguientes:

Tabla 4

Especificaciones técnicas del gasificador de biomasa

| | |
|-----------------------------------|-----------|
| Capacidad máx (KW) | 10 |
| Flujo de gas (m ³ /hr) | 5 – 27 |
| Consumo de biomasa (kg/día) | 160 – 320 |

Fuente: (Mayorga, L & Garzón, G, 2015)

3.2. SELECCIÓN DE BIOMASAS

Para la selección del tipo de biomasas de la experimentación, se tomó en cuenta la disponibilidad y facilidad de obtención de las mismas, su precio en el mercado y su facilidad de transporte. Además de esto, las biomasas deben caracterizarse por su calor específico, alto medio y bajo, de acuerdo a las especificaciones para este proyecto.

Tabla 5

Selección de biomasas para la obtención del gas de síntesis

| Tipo de biomasa | Aserrín | Cascarilla de arroz | Lechuguín |
|------------------------|-------------|---------------------|------------|
| | Alto | Medio | Bajo |
| Poder calorífico | 19000 kJ/kg | 13800 kJ/kg | 4000 kJ/kg |

Fuente: (IER, 2007)

3.3. VARIABLES Y DATOS DEL PROCESO

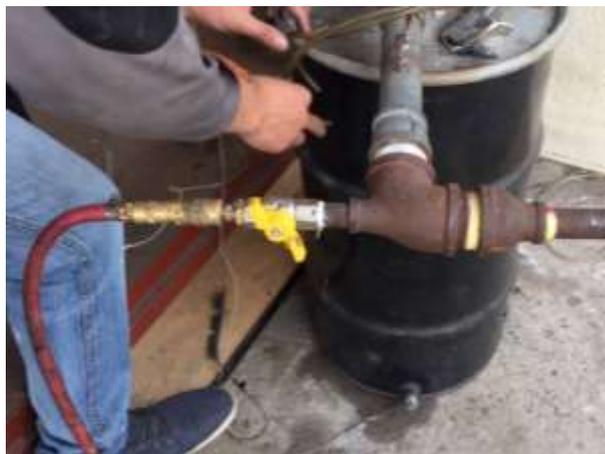
Se consideraron las variables más importantes dentro del proceso de gasificación. Estas son poder calorífico de la biomasa, la cantidad, la humedad contenida en la biomasa y presión en el reactor del gasificador.

Tabla 6

Variables en el proceso de gasificación

| | |
|---------------------------------------|----------------------------|
| Poder calorífico de la biomasa | Poder calorífico alto |
| | Poder calorífico medio |
| | Poder calorífico bajo |
| Presión en el reactor | Presión alta |
| | Presión media |
| | Presión baja |
| Cantidad de biomasa | Alta |
| | Media |
| | Baja |
| Humedad de la biomasa | Alto contenido de humedad |
| | Medio contenido de humedad |
| | Bajo contenido de humedad |

Para variar la presión en el reactor, se controla la cantidad de agente gasificante (aire) suministrado al sistema mediante apertura de la válvula de paso de entrada al venturi, siendo la presión máxima cuando está abierta en su totalidad (100%), presión media cuando la mitad de la válvula está abierta (50%) y presión mínima cuando un cuarto de la válvula está abierta (25%).

**Figura 19** Válvula de entrada del aire al venturi

Para conocer la humedad de la biomasa, se utilizó un detector de humedad y se estableció un 20% como contenido de humedad alta (máxima humedad que permite el gasificador tipo downdraft), un 16% como contenido de humedad medio y un 12% como contenido de humedad bajo. Para el secado de la biomasa, se lo realizó un secado de forma natural (secado al sol).



Figura 20 Medición de la humedad de la biomasa (lechuguín)

Se establecieron valores para la cantidad de biomasa a ser estudiada. Se consideró una masa de 5, 3 y 1 kg por cada tipo de biomasa de poder calorífico alto, medio y bajo (ver tabla 5). El control de la masa de la biomasa se lo realizó mediante una balanza. El gasificador posee celdas de carga en la base, y mediante un indicador podemos saber de forma precisa la cantidad de masa suministrada al sistema además del tiempo en que tarda en consumirse.



Figura 21 Indicador de la balanza

Otros datos adicionales a tomar en cuenta a la temperatura ambiente, la humedad relativa y la presión atmosférica. Los valores promedio obtenidos durante la realización de los experimentos los podemos ver en la tabla 7.

Tabla 7

Otros datos del proceso

| | |
|----------------------------------|---------|
| Temperatura ambiente | 25°C |
| Humedad relativa ambiente | 55% |
| Presión atmosférica | 0.8 atm |

3.4. DISEÑO FACTORIAL DEL EXPERIMENTO

Por diseño factorial se entiende que cada en ensayo o réplica del experimento se investigan todas las posibles combinaciones de todos los niveles de factores. (Delgado, R., 2004)

En general, los diseños factoriales son muy eficientes cuando se trata de este tipo de experimentos dado que puede ser aplicado cuando se tiene más de dos variables como en este caso. La notación en diseño factorial involucra a niveles y factores. (Delgado, R., 2004)

Para el diseño del experimento para la obtención del gas de síntesis, se consideraron como factores las variables en el proceso de gasificación (ver

Tabla 6), y como niveles los distintos valores asociados a cada uno de los factores.

Para un diseño experimental de 3 niveles y 4 factores su representación es de 3^4 . En la Tabla 8 se muestran los niveles y factores para el experimento.

Tabla 8

Niveles y factores para la obtención del gas de síntesis

| FACTORES | VARIABLE | NIVELES | | |
|--|----------|---------|---------------------|-----------|
| | | ALTO | MEDIO | BAJO |
| | | Aserrín | Cascarilla de arroz | Lechuguín |
| Poder calorífico de la biomasa [kJ/kg] | X1 | 19000 | 13800 | 4000 |
| Presión del reactor | X2 | 100% | 50% | 25% |
| Humedad de biomasa | X3 | 20% | 16% | 12% |
| Cantidad de biomasa | X4 | 5 kg | 3 kg | 1 kg |

X1= Poder calorífico de la biomasa

X2=Porcentaje de apertura válvula de entrada del agente gasificante

X3= Porcentaje de humedad de biomasa

X4= Masa de la biomasa

Dado que es un diseño factorial representado por 3^4 , se obtuvieron 81 posibles combinaciones de ensayos experimentales.

Para un diseño factorial se deben realizar réplicas de cada experimento. Las réplicas son corridas experimentales con la misma configuración de factores y niveles y están sujetas a las mismas fuentes de variabilidad. (MINITAB, s.f.)

Para el diseño factorial considerado de 3^4 se deben realizar tres réplicas, es decir, las 81 combinaciones, tres veces. (MINITAB, s.f.)

Tabla 9

Combinaciones de experimentos - réplica N°1

| Ord. | Combinaciones | | | | Combinaciones con datos | | | |
|------|---------------|-------|-------|-------|-------------------------|-------|-------|--------|
| | X1 | X3 | X2 | X4 | X1 (Kj/Kg) | X3(%) | X2(%) | X4(Kg) |
| 1 | alto | alto | alto | alto | 19000 | 20 | 100 | 5 |
| 2 | alto | alto | alto | medio | 19000 | 20 | 100 | 3 |
| 3 | alto | alto | alto | bajo | 19000 | 20 | 100 | 1 |
| 4 | alto | medio | alto | alto | 19000 | 16 | 100 | 5 |
| 5 | alto | medio | alto | medio | 19000 | 16 | 100 | 3 |
| 6 | alto | medio | alto | bajo | 19000 | 16 | 100 | 1 |
| 7 | alto | bajo | alto | alto | 19000 | 12 | 100 | 5 |
| 8 | alto | bajo | alto | medio | 19000 | 12 | 100 | 3 |
| 9 | alto | bajo | alto | bajo | 19000 | 12 | 100 | 1 |
| 10 | alto | alto | medio | alto | 19000 | 20 | 50 | 5 |
| 11 | alto | alto | medio | medio | 19000 | 20 | 50 | 3 |
| 12 | alto | alto | medio | bajo | 19000 | 20 | 50 | 1 |
| 13 | alto | medio | medio | alto | 19000 | 16 | 50 | 5 |
| 14 | alto | medio | medio | medio | 19000 | 16 | 50 | 3 |
| 15 | alto | medio | medio | bajo | 19000 | 16 | 50 | 1 |
| 16 | alto | bajo | medio | alto | 19000 | 12 | 50 | 5 |
| 17 | alto | bajo | medio | medio | 19000 | 12 | 50 | 3 |
| 18 | alto | bajo | medio | bajo | 19000 | 12 | 50 | 1 |
| 19 | alto | alto | bajo | alto | 19000 | 20 | 25 | 5 |
| 20 | alto | alto | bajo | medio | 19000 | 20 | 25 | 3 |
| 21 | alto | alto | bajo | bajo | 19000 | 20 | 25 | 1 |
| 22 | alto | medio | bajo | alto | 19000 | 16 | 25 | 5 |
| 23 | alto | medio | bajo | medio | 19000 | 16 | 25 | 3 |
| 24 | alto | medio | bajo | bajo | 19000 | 16 | 25 | 1 |
| 25 | alto | bajo | bajo | alto | 19000 | 12 | 25 | 5 |
| 26 | alto | bajo | bajo | medio | 19000 | 12 | 25 | 3 |
| 27 | alto | bajo | bajo | bajo | 19000 | 12 | 25 | 1 |
| 28 | medio | alto | alto | alto | 13800 | 20 | 100 | 5 |
| 29 | medio | alto | alto | medio | 13800 | 20 | 100 | 3 |
| 30 | medio | alto | alto | bajo | 13800 | 20 | 100 | 1 |
| 31 | medio | medio | alto | alto | 13800 | 16 | 100 | 5 |
| 32 | medio | medio | alto | medio | 13800 | 16 | 100 | 3 |
| 33 | medio | medio | alto | bajo | 13800 | 16 | 100 | 1 |
| 34 | medio | bajo | alto | alto | 13800 | 12 | 100 | 5 |
| 35 | medio | bajo | alto | medio | 13800 | 12 | 100 | 3 |

Continúa 

| | | | | | | | | |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|----|-----|---|
| 36 | medio | bajo | alto | bajo | 13800 | 12 | 100 | 1 |
| 37 | medio | alto | medio | alto | 13800 | 20 | 50 | 5 |
| 38 | medio | alto | medio | medio | 13800 | 20 | 50 | 3 |
| 39 | medio | alto | medio | bajo | 13800 | 20 | 50 | 1 |
| 40 | medio | medio | medio | alto | 13800 | 16 | 50 | 5 |
| 41 | medio | medio | medio | medio | 13800 | 16 | 50 | 3 |
| 42 | medio | medio | medio | bajo | 13800 | 16 | 50 | 1 |
| 43 | medio | bajo | medio | alto | 13800 | 12 | 50 | 5 |
| 44 | medio | bajo | medio | medio | 13800 | 12 | 50 | 3 |
| 45 | medio | bajo | medio | bajo | 13800 | 12 | 50 | 1 |
| 46 | medio | alto | bajo | alto | 13800 | 20 | 25 | 5 |
| 47 | medio | alto | bajo | medio | 13800 | 20 | 25 | 3 |
| 48 | medio | alto | bajo | bajo | 13800 | 20 | 25 | 1 |
| 49 | medio | medio | bajo | alto | 13800 | 16 | 25 | 5 |
| 50 | medio | medio | bajo | medio | 13800 | 16 | 25 | 3 |
| 51 | medio | medio | bajo | bajo | 13800 | 16 | 25 | 1 |
| 52 | medio | bajo | bajo | alto | 13800 | 12 | 25 | 5 |
| 53 | medio | bajo | bajo | medio | 13800 | 12 | 25 | 3 |
| 54 | medio | bajo | bajo | bajo | 13800 | 12 | 25 | 1 |
| 55 | bajo | alto | alto | alto | 4000 | 20 | 100 | 5 |
| 56 | bajo | alto | alto | medio | 4000 | 20 | 100 | 3 |
| 57 | bajo | alto | alto | bajo | 4000 | 20 | 100 | 1 |
| 58 | bajo | medio | alto | alto | 4000 | 16 | 100 | 5 |
| 59 | bajo | medio | alto | medio | 4000 | 16 | 100 | 3 |
| 60 | bajo | medio | alto | bajo | 4000 | 16 | 100 | 1 |
| 61 | bajo | bajo | alto | alto | 4000 | 12 | 100 | 5 |
| 62 | bajo | bajo | alto | medio | 4000 | 12 | 100 | 3 |
| 63 | bajo | bajo | alto | bajo | 4000 | 12 | 100 | 1 |
| 64 | bajo | alto | medio | alto | 4000 | 20 | 50 | 5 |
| 65 | bajo | alto | medio | medio | 4000 | 20 | 50 | 3 |
| 66 | bajo | alto | medio | bajo | 4000 | 20 | 50 | 1 |
| 67 | bajo | medio | medio | alto | 4000 | 16 | 50 | 5 |
| 68 | bajo | medio | medio | medio | 4000 | 16 | 50 | 3 |
| 69 | bajo | medio | medio | bajo | 4000 | 16 | 50 | 1 |
| 70 | bajo | bajo | medio | alto | 4000 | 12 | 50 | 5 |
| 71 | bajo | bajo | medio | medio | 4000 | 12 | 50 | 3 |
| 72 | bajo | bajo | medio | bajo | 4000 | 12 | 50 | 1 |
| 73 | bajo | alto | bajo | alto | 4000 | 20 | 25 | 5 |
| 74 | bajo | alto | bajo | medio | 4000 | 20 | 25 | 3 |
| 75 | bajo | alto | bajo | bajo | 4000 | 20 | 25 | 1 |

Continúa 

| | | | | | | | | |
|----|------|-------|------|-------|------|----|----|---|
| 76 | bajo | medio | bajo | alto | 4000 | 16 | 25 | 5 |
| 77 | bajo | medio | bajo | medio | 4000 | 16 | 25 | 3 |
| 78 | bajo | medio | bajo | bajo | 4000 | 16 | 25 | 1 |
| 79 | bajo | bajo | bajo | alto | 4000 | 12 | 25 | 5 |
| 80 | bajo | bajo | bajo | medio | 4000 | 12 | 25 | 3 |
| 81 | bajo | bajo | bajo | bajo | 4000 | 12 | 25 | 1 |

Tabla 10

Combinaciones de experimentos - réplica N°2

| Ord. | Combinaciones | | | | Combinaciones con datos | | | |
|------|---------------|-------|-------|-------|-------------------------|-------|-------|--------|
| | X1 | X3 | X2 | X4 | X1 (Kj/Kg) | X3(%) | X2(%) | X4(Kg) |
| 82 | alto | alto | alto | alto | 19000 | 20 | 100 | 5 |
| 83 | alto | alto | alto | medio | 19000 | 20 | 100 | 3 |
| 84 | alto | alto | alto | bajo | 19000 | 20 | 100 | 1 |
| 85 | alto | medio | alto | alto | 19000 | 16 | 100 | 5 |
| 86 | alto | medio | alto | medio | 19000 | 16 | 100 | 3 |
| 87 | alto | medio | alto | bajo | 19000 | 16 | 100 | 1 |
| 88 | alto | bajo | alto | alto | 19000 | 12 | 100 | 5 |
| 89 | alto | bajo | alto | medio | 19000 | 12 | 100 | 3 |
| 90 | alto | bajo | alto | bajo | 19000 | 12 | 100 | 1 |
| 91 | alto | alto | medio | alto | 19000 | 20 | 50 | 5 |
| 92 | alto | alto | medio | medio | 19000 | 20 | 50 | 3 |
| 93 | alto | alto | medio | bajo | 19000 | 20 | 50 | 1 |
| 94 | alto | medio | medio | alto | 19000 | 16 | 50 | 5 |
| 95 | alto | medio | medio | medio | 19000 | 16 | 50 | 3 |
| 96 | alto | medio | medio | bajo | 19000 | 16 | 50 | 1 |
| 97 | alto | bajo | medio | alto | 19000 | 12 | 50 | 5 |
| 98 | alto | bajo | medio | medio | 19000 | 12 | 50 | 3 |
| 99 | alto | bajo | medio | bajo | 19000 | 12 | 50 | 1 |
| 100 | alto | alto | bajo | alto | 19000 | 20 | 25 | 5 |
| 101 | alto | alto | bajo | medio | 19000 | 20 | 25 | 3 |
| 102 | alto | alto | bajo | bajo | 19000 | 20 | 25 | 1 |
| 103 | alto | medio | bajo | alto | 19000 | 16 | 25 | 5 |
| 104 | alto | medio | bajo | medio | 19000 | 16 | 25 | 3 |
| 105 | alto | medio | bajo | bajo | 19000 | 16 | 25 | 1 |

Continúa 

| | | | | | | | | |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|----|-----|---|
| 106 | alto | bajo | bajo | alto | 19000 | 12 | 25 | 5 |
| 107 | alto | bajo | bajo | medio | 19000 | 12 | 25 | 3 |
| 108 | alto | bajo | bajo | bajo | 19000 | 12 | 25 | 1 |
| 109 | medio | alto | alto | alto | 13800 | 20 | 100 | 5 |
| 110 | medio | alto | alto | medio | 13800 | 20 | 100 | 3 |
| 111 | medio | alto | alto | bajo | 13800 | 20 | 100 | 1 |
| 112 | medio | medio | alto | alto | 13800 | 16 | 100 | 5 |
| 113 | medio | medio | alto | medio | 13800 | 16 | 100 | 3 |
| 114 | medio | medio | alto | bajo | 13800 | 16 | 100 | 1 |
| 115 | medio | bajo | alto | alto | 13800 | 12 | 100 | 5 |
| 116 | medio | bajo | alto | medio | 13800 | 12 | 100 | 3 |
| 117 | medio | bajo | alto | bajo | 13800 | 12 | 100 | 1 |
| 118 | medio | alto | medio | alto | 13800 | 20 | 50 | 5 |
| 119 | medio | alto | medio | medio | 13800 | 20 | 50 | 3 |
| 120 | medio | alto | medio | bajo | 13800 | 20 | 50 | 1 |
| 121 | medio | medio | medio | alto | 13800 | 16 | 50 | 5 |
| 122 | medio | medio | medio | medio | 13800 | 16 | 50 | 3 |
| 123 | medio | medio | medio | bajo | 13800 | 16 | 50 | 1 |
| 124 | medio | bajo | medio | alto | 13800 | 12 | 50 | 5 |
| 125 | medio | bajo | medio | medio | 13800 | 12 | 50 | 3 |
| 126 | medio | bajo | medio | bajo | 13800 | 12 | 50 | 1 |
| 127 | medio | alto | bajo | alto | 13800 | 20 | 25 | 5 |
| 128 | medio | alto | bajo | medio | 13800 | 20 | 25 | 3 |
| 129 | medio | alto | bajo | bajo | 13800 | 20 | 25 | 1 |
| 130 | medio | medio | bajo | alto | 13800 | 16 | 25 | 5 |
| 131 | medio | medio | bajo | medio | 13800 | 16 | 25 | 3 |
| 132 | medio | medio | bajo | bajo | 13800 | 16 | 25 | 1 |
| 133 | medio | bajo | bajo | alto | 13800 | 12 | 25 | 5 |
| 134 | medio | bajo | bajo | medio | 13800 | 12 | 25 | 3 |
| 135 | medio | bajo | bajo | bajo | 13800 | 12 | 25 | 1 |
| 136 | bajo | alto | alto | alto | 4000 | 20 | 100 | 5 |
| 137 | bajo | alto | alto | medio | 4000 | 20 | 100 | 3 |
| 138 | bajo | alto | alto | bajo | 4000 | 20 | 100 | 1 |
| 139 | bajo | medio | alto | alto | 4000 | 16 | 100 | 5 |
| 140 | bajo | medio | alto | medio | 4000 | 16 | 100 | 3 |
| 141 | bajo | medio | alto | bajo | 4000 | 16 | 100 | 1 |
| 142 | bajo | bajo | alto | alto | 4000 | 12 | 100 | 5 |
| 143 | bajo | bajo | alto | medio | 4000 | 12 | 100 | 3 |
| 144 | bajo | bajo | alto | bajo | 4000 | 12 | 100 | 1 |
| 145 | bajo | alto | medio | alto | 4000 | 20 | 50 | 5 |

Continúa 

| | | | | | | | | |
|-----|------|-------|-------|-------|------|----|----|---|
| 146 | bajo | alto | medio | medio | 4000 | 20 | 50 | 3 |
| 147 | bajo | alto | medio | bajo | 4000 | 20 | 50 | 1 |
| 148 | bajo | medio | medio | alto | 4000 | 16 | 50 | 5 |
| 149 | bajo | medio | medio | medio | 4000 | 16 | 50 | 3 |
| 150 | bajo | medio | medio | bajo | 4000 | 16 | 50 | 1 |
| 151 | bajo | bajo | medio | alto | 4000 | 12 | 50 | 5 |
| 152 | bajo | bajo | medio | medio | 4000 | 12 | 50 | 3 |
| 153 | bajo | bajo | medio | bajo | 4000 | 12 | 50 | 1 |
| 154 | bajo | alto | bajo | alto | 4000 | 20 | 25 | 5 |
| 155 | bajo | alto | bajo | medio | 4000 | 20 | 25 | 3 |
| 156 | bajo | alto | bajo | bajo | 4000 | 20 | 25 | 1 |
| 157 | bajo | medio | bajo | alto | 4000 | 16 | 25 | 5 |
| 158 | bajo | medio | bajo | medio | 4000 | 16 | 25 | 3 |
| 159 | bajo | medio | bajo | bajo | 4000 | 16 | 25 | 1 |
| 160 | bajo | bajo | bajo | alto | 4000 | 12 | 25 | 5 |
| 161 | bajo | bajo | bajo | medio | 4000 | 12 | 25 | 3 |
| 162 | bajo | bajo | bajo | bajo | 4000 | 12 | 25 | 1 |

Tabla 11

Combinaciones de experimentos – réplica N°3

| Ord. | Combinaciones | | | | Combinaciones con datos | | | |
|------|---------------|-------|-------|-------|-------------------------|-------|-------|--------|
| | X1 | X3 | X2 | X4 | X1 (Kj/Kg) | X3(%) | X2(%) | X4(Kg) |
| 163 | alto | alto | alto | alto | 19000 | 20 | 100 | 5 |
| 164 | alto | alto | alto | medio | 19000 | 20 | 100 | 3 |
| 165 | alto | alto | alto | bajo | 19000 | 20 | 100 | 1 |
| 166 | alto | medio | alto | alto | 19000 | 16 | 100 | 5 |
| 167 | alto | medio | alto | medio | 19000 | 16 | 100 | 3 |
| 168 | alto | medio | alto | bajo | 19000 | 16 | 100 | 1 |
| 169 | alto | bajo | alto | alto | 19000 | 12 | 100 | 5 |
| 170 | alto | bajo | alto | medio | 19000 | 12 | 100 | 3 |
| 171 | alto | bajo | alto | bajo | 19000 | 12 | 100 | 1 |
| 172 | alto | alto | medio | alto | 19000 | 20 | 50 | 5 |
| 173 | alto | alto | medio | medio | 19000 | 20 | 50 | 3 |
| 174 | alto | alto | medio | bajo | 19000 | 20 | 50 | 1 |
| 175 | alto | medio | medio | alto | 19000 | 16 | 50 | 5 |
| 176 | alto | medio | medio | medio | 19000 | 16 | 50 | 3 |

Continúa 

| | | | | | | | | |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|----|-----|---|
| 177 | alto | medio | medio | bajo | 19000 | 16 | 50 | 1 |
| 178 | alto | bajo | medio | alto | 19000 | 12 | 50 | 5 |
| 179 | alto | bajo | medio | medio | 19000 | 12 | 50 | 3 |
| 180 | alto | bajo | medio | bajo | 19000 | 12 | 50 | 1 |
| 181 | alto | alto | bajo | alto | 19000 | 20 | 25 | 5 |
| 182 | alto | alto | bajo | medio | 19000 | 20 | 25 | 3 |
| 183 | alto | alto | bajo | bajo | 19000 | 20 | 25 | 1 |
| 184 | alto | medio | bajo | alto | 19000 | 16 | 25 | 5 |
| 185 | alto | medio | bajo | medio | 19000 | 16 | 25 | 3 |
| 186 | alto | medio | bajo | bajo | 19000 | 16 | 25 | 1 |
| 187 | alto | bajo | bajo | alto | 19000 | 12 | 25 | 5 |
| 188 | alto | bajo | bajo | medio | 19000 | 12 | 25 | 3 |
| 189 | alto | bajo | bajo | bajo | 19000 | 12 | 25 | 1 |
| 190 | medio | alto | alto | alto | 13800 | 20 | 100 | 5 |
| 191 | medio | alto | alto | medio | 13800 | 20 | 100 | 3 |
| 192 | medio | alto | alto | bajo | 13800 | 20 | 100 | 1 |
| 193 | medio | medio | alto | alto | 13800 | 16 | 100 | 5 |
| 194 | medio | medio | alto | medio | 13800 | 16 | 100 | 3 |
| 195 | medio | medio | alto | bajo | 13800 | 16 | 100 | 1 |
| 196 | medio | bajo | alto | alto | 13800 | 12 | 100 | 5 |
| 197 | medio | bajo | alto | medio | 13800 | 12 | 100 | 3 |
| 198 | medio | bajo | alto | bajo | 13800 | 12 | 100 | 1 |
| 199 | medio | alto | medio | alto | 13800 | 20 | 50 | 5 |
| 200 | medio | alto | medio | medio | 13800 | 20 | 50 | 3 |
| 201 | medio | alto | medio | bajo | 13800 | 20 | 50 | 1 |
| 202 | medio | medio | medio | alto | 13800 | 16 | 50 | 5 |
| 203 | medio | medio | medio | medio | 13800 | 16 | 50 | 3 |
| 204 | medio | medio | medio | bajo | 13800 | 16 | 50 | 1 |
| 205 | medio | bajo | medio | alto | 13800 | 12 | 50 | 5 |
| 206 | medio | bajo | medio | medio | 13800 | 12 | 50 | 3 |
| 207 | medio | bajo | medio | bajo | 13800 | 12 | 50 | 1 |
| 208 | medio | alto | bajo | alto | 13800 | 20 | 25 | 5 |
| 209 | medio | alto | bajo | medio | 13800 | 20 | 25 | 3 |
| 210 | medio | alto | bajo | bajo | 13800 | 20 | 25 | 1 |
| 211 | medio | medio | bajo | alto | 13800 | 16 | 25 | 5 |
| 212 | medio | medio | bajo | medio | 13800 | 16 | 25 | 3 |
| 213 | medio | medio | bajo | bajo | 13800 | 16 | 25 | 1 |
| 214 | medio | bajo | bajo | alto | 13800 | 12 | 25 | 5 |
| 215 | medio | bajo | bajo | medio | 13800 | 12 | 25 | 3 |
| 216 | medio | bajo | bajo | bajo | 13800 | 12 | 25 | 1 |

Continúa 

| | | | | | | | | |
|-----|------|-------|-------|-------|------|----|-----|---|
| 217 | bajo | alto | alto | alto | 4000 | 20 | 100 | 5 |
| 218 | bajo | alto | alto | medio | 4000 | 20 | 100 | 3 |
| 219 | bajo | alto | alto | bajo | 4000 | 20 | 100 | 1 |
| 220 | bajo | medio | alto | alto | 4000 | 16 | 100 | 5 |
| 221 | bajo | medio | alto | medio | 4000 | 16 | 100 | 3 |
| 222 | bajo | medio | alto | bajo | 4000 | 16 | 100 | 1 |
| 223 | bajo | bajo | alto | alto | 4000 | 12 | 100 | 5 |
| 224 | bajo | bajo | alto | medio | 4000 | 12 | 100 | 3 |
| 225 | bajo | bajo | alto | bajo | 4000 | 12 | 100 | 1 |
| 226 | bajo | alto | medio | alto | 4000 | 20 | 50 | 5 |
| 227 | bajo | alto | medio | medio | 4000 | 20 | 50 | 3 |
| 228 | bajo | alto | medio | bajo | 4000 | 20 | 50 | 1 |
| 229 | bajo | medio | medio | alto | 4000 | 16 | 50 | 5 |
| 230 | bajo | medio | medio | medio | 4000 | 16 | 50 | 3 |
| 231 | bajo | medio | medio | bajo | 4000 | 16 | 50 | 1 |
| 232 | bajo | bajo | medio | alto | 4000 | 12 | 50 | 5 |
| 233 | bajo | bajo | medio | medio | 4000 | 12 | 50 | 3 |
| 234 | bajo | bajo | medio | bajo | 4000 | 12 | 50 | 1 |
| 235 | bajo | alto | bajo | alto | 4000 | 20 | 25 | 5 |
| 236 | bajo | alto | bajo | medio | 4000 | 20 | 25 | 3 |
| 237 | bajo | alto | bajo | bajo | 4000 | 20 | 25 | 1 |
| 238 | bajo | medio | bajo | alto | 4000 | 16 | 25 | 5 |
| 239 | bajo | medio | bajo | medio | 4000 | 16 | 25 | 3 |
| 240 | bajo | medio | bajo | bajo | 4000 | 16 | 25 | 1 |
| 241 | bajo | bajo | bajo | alto | 4000 | 12 | 25 | 5 |
| 242 | bajo | bajo | bajo | medio | 4000 | 12 | 25 | 3 |
| 243 | bajo | bajo | bajo | bajo | 4000 | 12 | 25 | 1 |

CAPÍTULO 4

4. EVALUACIÓN Y CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DEL GAS DE SÍNTESIS DE BIOMASA

4.1. OBTENCIÓN DE LAS MUESTRAS

El gasificador downdraft de 10 KW utilizado para el presente proyecto cuenta con varias partes y termocuplas tipo K, dos de las cuales debieron ser cambiadas debido a que presentaban errores en las mediciones obtenidas en el programa en Labview myRIO. Las termocuplas utilizadas tienen las siguientes características:

Tabla 12

Características de las termocuplas

| Tipo | Rango de temperatura | Límite de error | Elementos de cable de extensión | Cable de extensión |
|-------------|-----------------------------|------------------------|--|---------------------------|
| K | 0 – 1250 | +/- 2,2°C | Cu-Al | KX |

Fuente: (WEIZS, s.f.)

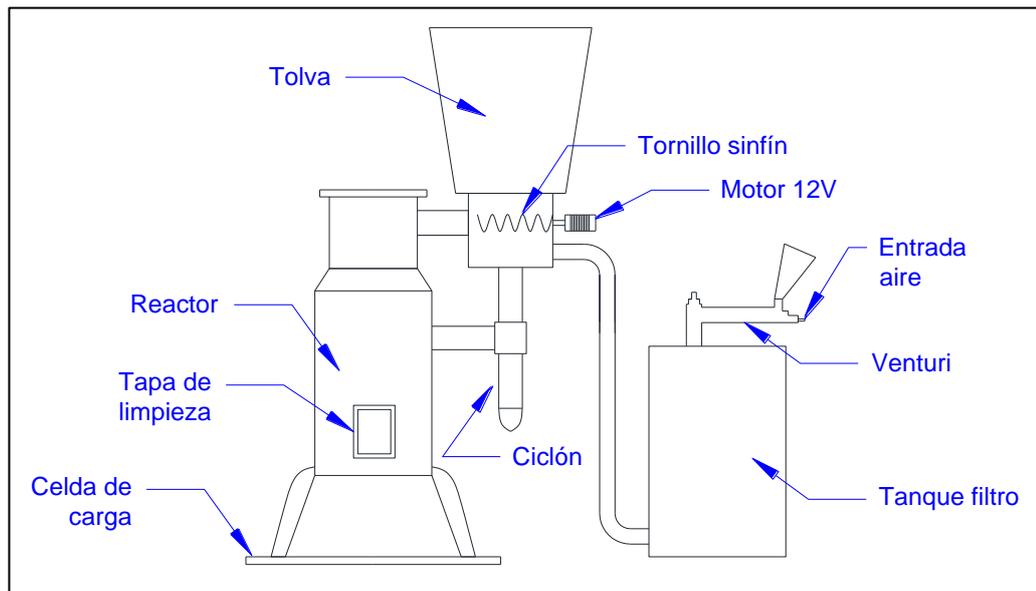


Figura 22 Partes del gasificador

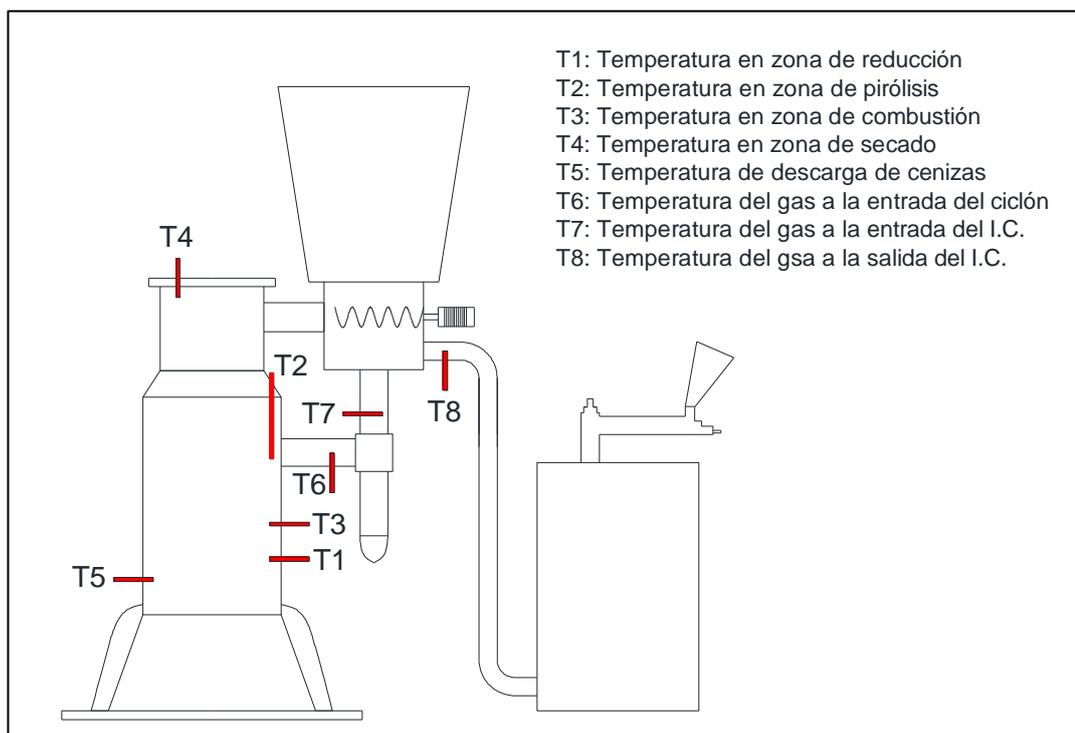


Figura 23 Distribución de las termocuplas en el gasificador

Para una correcta toma de las muestras, primeramente se debe realizar una inspección visual, limpieza del gasificador de procesos previos y verificación del correcto funcionamiento de la balanza y termocuplas.



Figura 24 Limpieza del gasificador

Se comprobó el funcionamiento del tubo en U con medición métrica, conectados sus dos terminales por medio de mangueras al acople donde se encuentra el Venturi.



Figura 25 Medición de presión

Para la entrada del aire en el Venturi, se colocó un acople rápido hembra para poder conectar la manguera que viene del compresor.



Figura 26 Conexión del aire comprimido al Venturi

Previo al encendido del equipo se conectó las termocupas a un módulo para incrementar la señal de las mismas (Módulo MAX 31855). Se empleó dos módulos MAX 31855 ya que cada una de estas pueden recibir hasta cuatro señales de termocupas. Los módulos fueron conectados a los canales del NI myRIO.

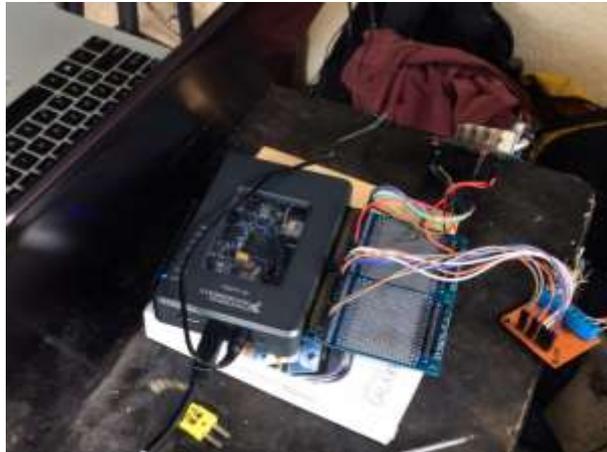


Figura 27 Conexión de módulos a myRIO

La conexión de los módulos y la myRIO con las termocupas se la realizó siguiendo el esquema:

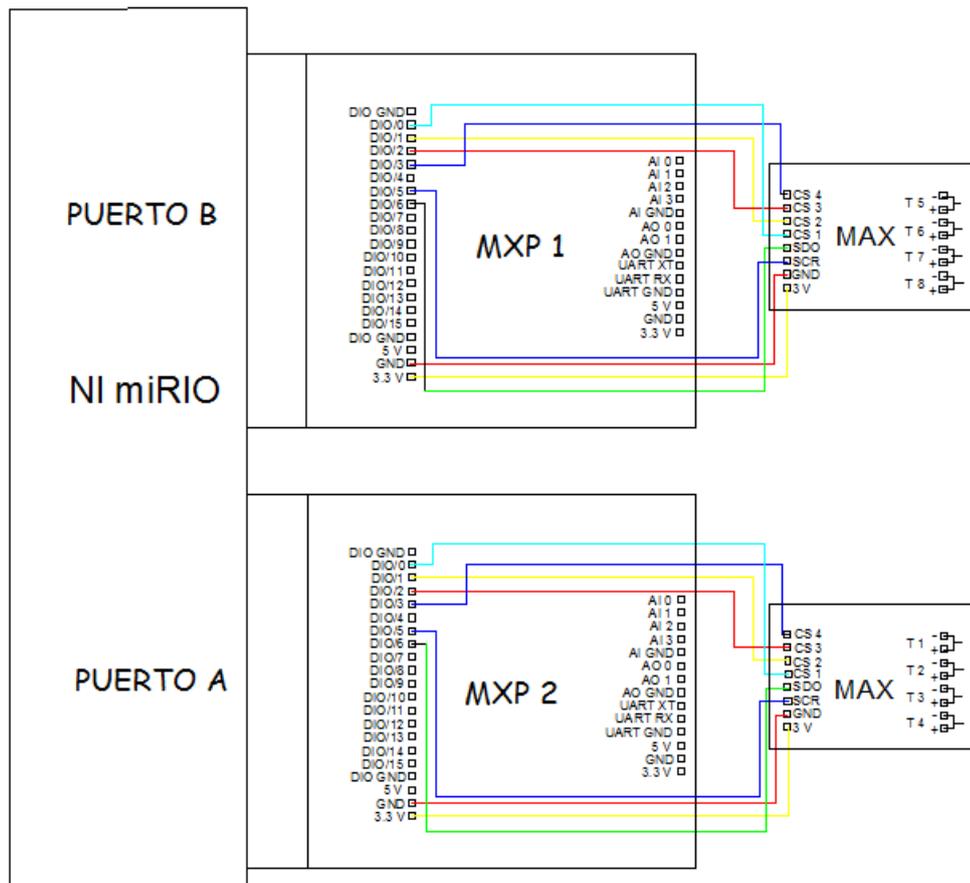


Figura 28 Esquema de conexión de termocuplas

Fuente: (Mayorga, L & Garzón, G, 2015)

Posteriormente a la conexión, se corre el programa en Labview myRIO 2013, en el programa podemos observar todas las temperaturas que estén conectadas mediante las termocuplas a los módulos MAX 31855.

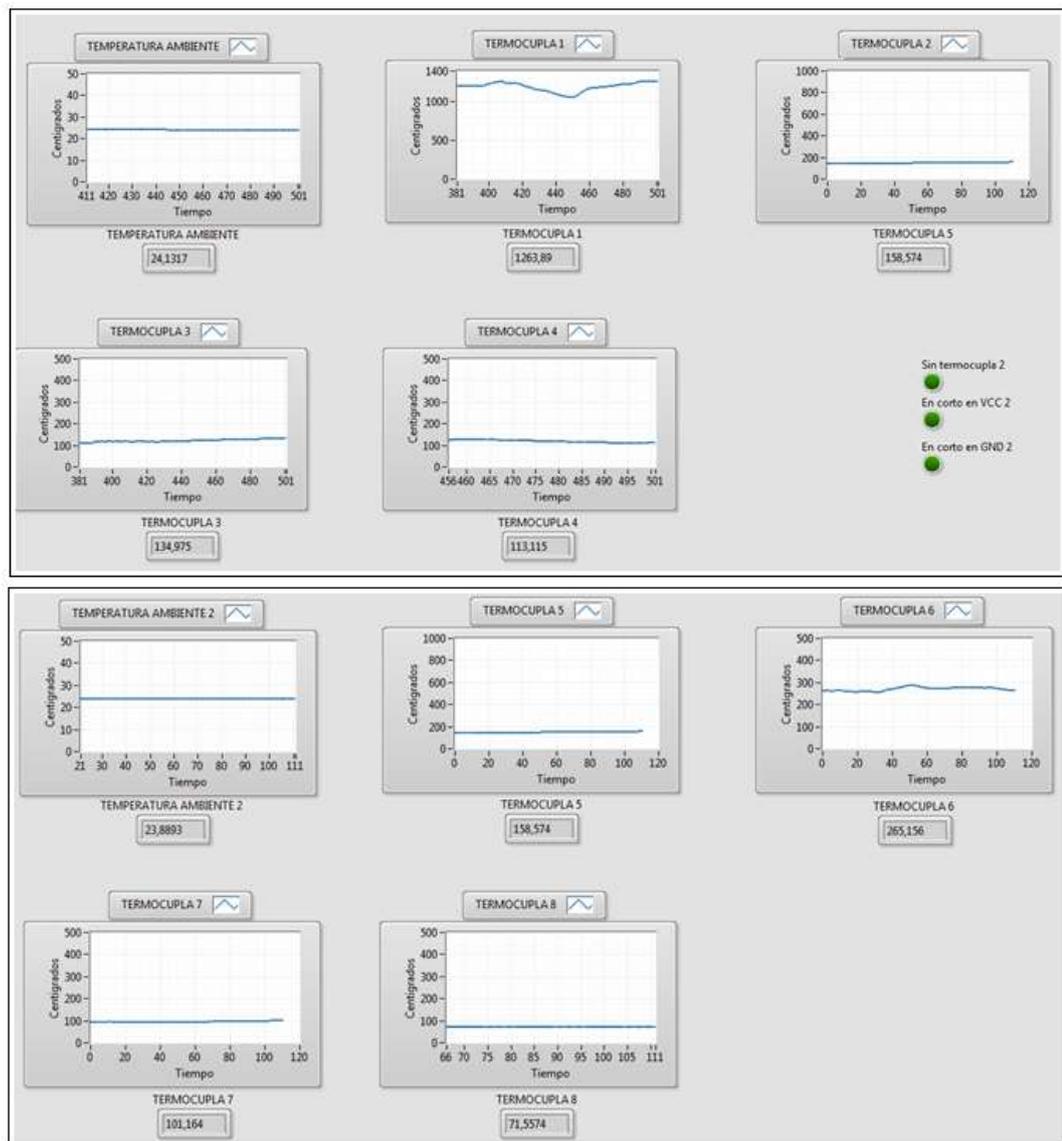


Figura 29 Lectura de datos de termocuplas

Para operar el gasificador se utilizaron los distintos tipos de biomasa, carbón en el interior del reactor y aire comprimido como agente gasificante.

Antes de iniciar con el proceso, se comprueba mediante la lectura de las termocuplas que la temperatura del carbón (zona de reducción) sea de aproximadamente 600°C , ya que, por debajo de ésta, se favorece la formación de CO_2 , mientras por encima, la de CO . (Cabrera, G. et. al., 2013)



Figura 30 Encendido del carbón



Figura 31 Gasificador en operación

Una vez iniciado el proceso y con la biomasa dentro del reactor, tomamos mediciones del tiempo, temperaturas y peso que se va consumiendo de la biomasa mediante el indicador de la balanza. Una vez que el gasificador alcanza los 1000°C aproximadamente en la zona de combustión (oxidación) (Cabrera, G. et. al., 2013), verificamos que se esté produciendo etano. Esto lo hacemos comprobando que la tea se encienda cuando ponemos una llama en la salida del gas al ambiente. Es en este momento cuando se puede proceder a tomar la muestra del gas de síntesis.

Debido a que el gas contiene un tanque filtro, el gas sale con una mínima cantidad de alquitranes y material particulado, los cuales quedan retenidos en los filtros y también en el ciclón. El filtro consiste en alambre fino de acero en

la parte inferior, chipeado de madera con diferente granulometría y esponja. Esto evita que el gas salga con material particulado hacia el venturi.



Figura 32 Material granulado utilizado en filtro

Por recomendación del personal del Laboratorio de Análisis Instrumental de la carrera de Ingeniería Química de la Escuela Politécnica Nacional, se tomó las muestras del gas de síntesis en fundas recolectoras de orina, las cuales poseen bajo contenido de aire y son fáciles de utilizarlas para este fin ya que poseen una válvula check en la entrada del aire.

Debido a que el gas no sale con presión del equipo, se utilizó un pequeño compresor para extraer el gas hacia la funda para que pueda se realice un análisis cromatográfico en el Laboratorio de Análisis Instrumental de la EPN.



Figura 33 Funda para muestra del gas de síntesis

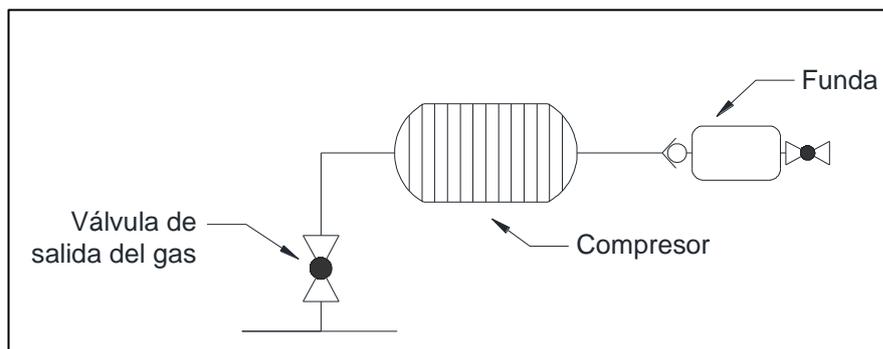


Figura 34 Esquema de obtención del gas de síntesis

4.2. CARACTERIZACIÓN DEL GAS DE SÍNTESIS

4.2.1. RESULTADOS CROMATOGRÁFICOS Y PODER CALORÍFICO

Dado que los componentes principales en el gas de síntesis son el hidrógeno, dióxido de carbono y monóxido de carbono, son estos los más importantes para determinar las características del gas, adicionalmente encontramos metano, etano, nitrógeno, oxígeno y agua.

Mediante el análisis cromatográfico realizado en el Laboratorio de Análisis Instrumental de la carrera de Ingeniería Química de la Escuela Politécnica Nacional se pudo identificar estos elementos del gas, en porcentaje, tanto en peso como en moles.

En las tablas 14, 15 y 16 se muestran los resultados del análisis cromatográfico de cada experimento. Los elementos se muestran en porcentaje de moles y su poder calorífico, tanto inferior como superior en MJ/Kg.

El gasificador downdraft no posee un sistema para medir la calidad del gas de síntesis producido, sin embargo del análisis cromatográfico se pueden conocer los principales elementos del gas y sus porcentajes; y conociendo los poderes caloríficos individuales de cada elemento (ver tabla 13), se puede calcular tanto el poder calorífico inferior como superior.

$$PCI_{gas} = \sum_{i=1}^{i=n} C_i PCI_i$$

Donde:

PCI_i es el poder calorífico inferior de cada componente del gas

C_i es la fracción molar de cada componente del gas

Tabla 13

Poderes caloríficos de componentes del gas de síntesis

| | MCal/kg | | MJ/kg | |
|-------------------------------------|---------|-------|--------|----------|
| | PCS | PCI | PCS | PCI |
| H ₂ | 33.15 | 28.24 | 141 | 118.0432 |
| CO | 2.4 | 2.4 | 10.032 | 10.032 |
| Metano CH ₄ | 13.1 | 11.57 | 54.758 | 48.3626 |
| Etano C ₂ H ₆ | 12.25 | 11.18 | 51.205 | 46.7324 |

Tabla 14

Resultados del análisis cromatográfico y presiones obtenidas – réplica N°1

| Ord | H ₂ | O ₂ | N ₂ | CO | CH ₄ | CO ₂ | C ₂ H ₆ | H ₂ O | N/I | PCS (MJ/Kg) | PCI (MJ/Kg) | P mmH ₂ O | P (KPa) |
|-----|----------------|----------------|----------------|-------|-----------------|-----------------|-------------------------------|------------------|-------|----------------|----------------|-------------------------|------------|
| 1 | 58.37% | 4.11% | 30.60% | 4.67% | 0.28% | 1.39% | 0.05% | 0.12% | 0.41% | 83.20 | 70.32 | 29 | 2.84 |
| 2 | 56.25% | 3.25% | 29.85% | 3.21% | 1.34% | 2.10% | 0.93% | 0.98% | 2.09% | 80.84 | 67.80 | 27 | 2.65 |
| 3 | 53.21% | 5.65% | 19.68% | 8.69% | 6.69% | 2.01% | 0.16% | 1.11% | 2.80% | 79.64 | 66.99 | 26 | 2.55 |
| 4 | 57.15% | 4.31% | 27.85% | 7.65% | 0.94% | 1.09% | 0.37% | 0.36% | 0.28% | 82.05 | 68.86 | 30 | 2.94 |
| 5 | 57.02% | 2.12% | 31.56% | 3.20% | 0.39% | 2.96% | 0.14% | 1.28% | 1.33% | 81.00 | 67.88 | 28 | 2.75 |
| 6 | 55.96% | 3.33% | 20.69% | 7.98% | 2.11% | 3.65% | 1.02% | 0.17% | 5.09% | 81.38 | 68.35 | 29 | 2.84 |
| 7 | 59.18% | 2.16% | 32.96% | 2.25% | 0.62% | 2.21% | 0.49% | 0.09% | 0.04% | 84.26 | 70.61 | 27 | 2.65 |
| 8 | 57.98% | 3.10% | 23.65% | 4.37% | 0.98% | 1.02% | 0.97% | 3.10% | 4.83% | 83.22 | 69.81 | 26 | 2.55 |
| 9 | 54.36% | 2.18% | 31.87% | 3.72% | 1.93% | 0.81% | 1.60% | 0.84% | 2.69% | 78.90 | 66.22 | 30 | 2.94 |
| 10 | 49.63% | 3.26% | 34.63% | 1.29% | 2.87% | 0.97% | 0.07% | 3.71% | 3.57% | 71.72 | 60.13 | 22 | 2.16 |
| 11 | 45.69% | 2.64% | 38.65% | 2.92% | 0.83% | 1.96% | 0.46% | 2.57% | 4.28% | 65.41 | 54.84 | 24 | 2.35 |
| 12 | 37.98% | 5.12% | 43.67% | 2.78% | 0.09% | 5.52% | 0.07% | 0.41% | 4.36% | 53.92 | 45.19 | 21 | 2.06 |
| 13 | 55.16% | 8.16% | 29.87% | 1.98% | 1.57% | 0.92% | 1.10% | 0.09% | 1.15% | 79.40 | 66.58 | 21 | 2.06 |
| 14 | 54.94% | 4.31% | 34.60% | 0.12% | 1.26% | 3.55% | 0.21% | 0.58% | 0.43% | 78.94 | 66.75 | 20 | 1.96 |
| 15 | 48.69% | 6.52% | 26.98% | 0.92% | 1.67% | 5.71% | 1.56% | 2.74% | 5.21% | 70.46 | 59.10 | 22 | 2.16 |

Continúa 

| | | | | | | | | | | | | | |
|----|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|----|------|
| 16 | 56.38% | 5.25% | 32.96% | 3.24% | 0.51% | 0.86% | 0.02% | 0.14% | 0.64% | 80.11 | 67.13 | 22 | 2.16 |
| 17 | 51.89% | 3.26% | 37.52% | 2.65% | 0.10% | 0.41% | 0.05% | 0.01% | 4.11% | 73.51 | 61.59 | 25 | 2.45 |
| 18 | 58.63% | 7.71% | 26.36% | 5.64% | 0.51% | 1.02% | 0.04% | 0.09% | 0.00% | 83.53 | 70.04 | 23 | 2.26 |
| 19 | 53.39% | 2.58% | 35.85% | 6.36% | 0.12% | 1.03% | 0.39% | 0.15% | 0.13% | 76.18 | 63.90 | 15 | 1.47 |
| 20 | 47.98% | 5.52% | 33.54% | 10.62% | 0.28% | 0.98% | 0.24% | 0.13% | 0.71% | 68.99 | 57.95 | 16 | 1.57 |
| 21 | 56.36% | 6.26% | 28.64% | 5.69% | 0.94% | 1.85% | 0.04% | 0.11% | 0.11% | 80.57 | 67.57 | 15 | 1.47 |
| 22 | 51.89% | 3.65% | 24.56% | 11.36% | 2.68% | 0.95% | 1.82% | 1.12% | 1.97% | 76.70 | 64.54 | 17 | 1.67 |
| 23 | 48.64% | 4.32% | 34.24% | 8.25% | 1.51% | 0.57% | 0.62% | 0.74% | 1.11% | 70.55 | 59.26 | 13 | 1.27 |
| 24 | 39.59% | 7.11% | 38.58% | 4.68% | 0.91% | 1.15% | 0.05% | 2.17% | 5.76% | 56.82 | 47.67 | 15 | 1.47 |
| 25 | 53.97% | 6.65% | 21.56% | 8.95% | 0.36% | 2.20% | 0.06% | 1.71% | 4.54% | 77.22 | 64.81 | 16 | 1.57 |
| 26 | 50.36% | 5.23% | 35.98% | 5.36% | 1.10% | 0.87% | 1.04% | 0.06% | 0.00% | 72.68 | 61.00 | 14 | 1.37 |
| 27 | 46.17% | 7.48% | 20.96% | 21.54% | 0.80% | 2.15% | 0.12% | 0.78% | 0.00% | 66.17 | 55.94 | 15 | 1.47 |
| 28 | 34.55% | 11.23% | 31.25% | 13.65% | 0.09% | 1.27% | 0.86% | 2.95% | 4.15% | 50.57 | 42.60 | 27 | 2.65 |
| 29 | 31.49% | 10.06% | 39.87% | 3.69% | 1.45% | 6.58% | 0.09% | 1.46% | 5.31% | 45.61 | 38.29 | 26 | 2.55 |
| 30 | 27.20% | 6.58% | 29.96% | 5.55% | 5.36% | 3.37% | 0.99% | 5.24% | 15.75% | 42.35 | 35.72 | 26 | 2.55 |
| 31 | 34.12% | 8.85% | 29.01% | 7.41% | 3.01% | 1.69% | 3.14% | 4.26% | 8.51% | 52.11 | 43.94 | 27 | 2.65 |
| 32 | 32.58% | 9.96% | 18.78% | 11.12% | 2.98% | 9.69% | 0.89% | 3.10% | 10.90% | 49.14 | 41.43 | 28 | 2.75 |
| 33 | 33.69% | 16.10% | 19.78% | 9.62% | 2.21% | 8.56% | 0.46% | 1.28% | 8.30% | 49.91 | 42.02 | 29 | 2.84 |
| 34 | 42.81% | 5.56% | 20.69% | 18.96% | 0.18% | 0.68% | 0.88% | 0.05% | 10.19% | 62.81 | 52.93 | 31 | 3.04 |
| 35 | 42.74% | 7.13% | 18.50% | 29.79% | 0.28% | 1.39% | 0.05% | 0.12% | 0.00% | 60.97 | 51.54 | 28 | 2.75 |
| 36 | 39.46% | 16.32% | 15.57% | 21.56% | 2.25% | 0.91% | 1.44% | 1.02% | 1.47% | 59.77 | 50.50 | 28 | 2.75 |

Continúa 

| | | | | | | | | | | | | | |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|----|------|
| 37 | 35.49% | 18.87% | 9.91% | 6.54% | 5.18% | 1.56% | 3.14% | 4.56% | 14.75% | 55.14 | 46.52 | 21 | 2.06 |
| 38 | 34.52% | 21.03% | 8.96% | 15.56% | 2.22% | 2.65% | 2.56% | 2.58% | 9.92% | 52.76 | 44.58 | 20 | 1.96 |
| 39 | 36.07% | 0.00% | 63.73% | 0.00% | 0.14% | 0.01% | 0.02% | 0.05% | 0.00% | 50.95 | 42.66 | 20 | 1.96 |
| 40 | 36.98% | 12.41% | 16.89% | 16.01% | 3.74% | 8.88% | 0.09% | 4.20% | 0.80% | 55.84 | 47.11 | 19 | 1.86 |
| 41 | 36.61% | 13.69% | 21.36% | 9.65% | 0.97% | 3.68% | 1.29% | 6.39% | 6.36% | 53.78 | 45.26 | 22 | 2.16 |
| 42 | 33.85% | 11.12% | 33.69% | 8.89% | 6.87% | 1.23% | 0.09% | 0.81% | 3.45% | 52.43 | 44.21 | 18 | 1.77 |
| 43 | 30.25% | 9.89% | 21.60% | 5.58% | 11.75% | 0.10% | 0.05% | 2.32% | 18.46% | 49.67 | 41.97 | 19 | 1.86 |
| 44 | 31.69% | 10.69% | 14.36% | 10.01% | 8.54% | 3.98% | 2.65% | 1.04% | 17.04% | 51.72 | 43.78 | 20 | 1.96 |
| 45 | 30.45% | 7.46% | 19.99% | 6.67% | 12.71% | 0.83% | 3.38% | 5.16% | 13.35% | 52.29 | 44.34 | 21 | 2.06 |
| 46 | 39.32% | 9.69% | 14.03% | 22.31% | 6.20% | 4.58% | 0.06% | 3.69% | 0.12% | 61.11 | 51.68 | 16 | 1.57 |
| 47 | 37.89% | 31.65% | 5.62% | 12.69% | 5.58% | 1.25% | 3.61% | 0.05% | 1.66% | 59.60 | 50.39 | 15 | 1.47 |
| 48 | 37.91% | 19.56% | 7.05% | 23.05% | 4.00% | 3.20% | 2.81% | 1.94% | 0.48% | 59.39 | 50.31 | 17 | 1.67 |
| 49 | 42.40% | 8.84% | 22.85% | 9.57% | 1.02% | 8.54% | 0.10% | 0.55% | 6.13% | 60.93 | 57.21 | 13 | 1.27 |
| 50 | 40.97% | 18.52% | 16.60% | 8.89% | 2.25% | 9.45% | 0.09% | 0.06% | 3.17% | 59.94 | 50.38 | 12 | 1.18 |
| 51 | 34.61% | 31.06% | 9.69% | 5.58% | 0.82% | 0.98% | 2.54% | 3.21% | 11.51% | 51.11 | 43.00 | 14 | 1.37 |
| 52 | 43.68% | 16.85% | 5.07% | 15.41% | 3.25% | 3.65% | 0.60% | 1.25% | 10.24% | 65.22 | 54.96 | 15 | 1.47 |
| 53 | 44.51% | 22.17% | 9.14% | 12.30% | 0.86% | 4.12% | 0.05% | 0.09% | 6.76% | 64.49 | 54.21 | 15 | 1.47 |
| 54 | 38.51% | 31.18% | 5.16% | 6.53% | 0.91% | 3.59% | 1.14% | 3.00% | 9.98% | 56.04 | 47.09 | 16 | 1.57 |
| 55 | 16.14% | 21.11% | 15.54% | 5.51% | 0.25% | 3.16% | 0.08% | 0.96% | 37.25% | 23.49 | 19.76 | 28 | 2.75 |
| 56 | 14.33% | 22.96% | 18.96% | 7.69% | 2.12% | 4.15% | 1.12% | 1.13% | 27.54% | 22.71 | 19.24 | 27 | 2.65 |
| 57 | 14.99% | 20.18% | 21.46% | 10.11% | 1.56% | 5.16% | 2.16% | 3.12% | 21.26% | 24.11 | 20.47 | 26 | 2.55 |

Continúa 

| | | | | | | | | | | | | | |
|----|--------|--------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|----|------|
| 58 | 16.01% | 19.85% | 25.11% | 10.10% | 1.01% | 7.88% | 0.06% | 4.16% | 15.82% | 24.17 | 20.43 | 29 | 2.84 |
| 59 | 13.16% | 25.00% | 19.63% | 9.31% | 3.18% | 11.00% | 2.37% | 0.65% | 15.70% | 22.44 | 19.11 | 31 | 3.04 |
| 60 | 12.25% | 11.32% | 24.37% | 6.27% | 2.65% | 7.64% | 1.23% | 1.50% | 32.77% | 19.98 | 16.95 | 30 | 2.94 |
| 61 | 18.01% | 12.16% | 27.85% | 6.85% | 0.89% | 5.32% | 2.10% | 1.03% | 25.79% | 27.64 | 23.36 | 30 | 2.94 |
| 62 | 18.15% | 13.69% | 30.21% | 3.65% | 1.14% | 4.56% | 0.09% | 2.11% | 26.40% | 26.63 | 22.38 | 27 | 2.65 |
| 63 | 16.92% | 18.19% | 21.14% | 8.51% | 0.20% | 8.73% | 1.16% | 0.72% | 24.43% | 25.41 | 21.47 | 29 | 2.84 |
| 64 | 14.85% | 16.47% | 15.96% | 6.11% | 2.12% | 5.12% | 0.40% | 1.23% | 37.74% | 22.92 | 19.35 | 20 | 1.96 |
| 65 | 13.95% | 16.56% | 16.50% | 5.16% | 0.26% | 9.19% | 1.00% | 0.65% | 36.73% | 20.84 | 17.58 | 19 | 1.86 |
| 66 | 14.26% | 14.23% | 31.12% | 1.50% | 2.23% | 10.10% | 0.68% | 0.85% | 25.03% | 21.83 | 18.38 | 21 | 2.06 |
| 67 | 16.01% | 13.69% | 25.63% | 5.15% | 1.10% | 5.69% | 0.04% | 2.13% | 30.56% | 23.71 | 19.97 | 22 | 2.16 |
| 68 | 15.12% | 13.58% | 28.98% | 4.16% | 0.21% | 6.41% | 0.91% | 1.15% | 29.48% | 22.32 | 18.79 | 18 | 1.77 |
| 69 | 15.01% | 25.62% | 18.16% | 2.50% | 1.32% | 7.01% | 0.06% | 0.09% | 30.23% | 22.17 | 18.64 | 20 | 1.96 |
| 70 | 17.30% | 13.57% | 26.15% | 6.26% | 0.45% | 6.55% | 0.04% | 0.60% | 29.08% | 24.87 | 21.03 | 21 | 2.06 |
| 71 | 16.92% | 10.56% | 29.63% | 4.13% | 0.41% | 10.26% | 0.44% | 0.02% | 27.63% | 24.72 | 20.79 | 23 | 2.26 |
| 72 | 14.32% | 14.58% | 22.89% | 6.19% | 1.19% | 8.52% | 0.51% | 0.82% | 30.98% | 21.72 | 18.34 | 24 | 2.35 |
| 73 | 14.96% | 16.96% | 25.63% | 3.21% | 1.18% | 5.16% | 0.20% | 1.26% | 31.44% | 22.16 | 18.65 | 14 | 1.37 |
| 74 | 15.09% | 13.93% | 18.99% | 4.48% | 0.54% | 7.03% | 0.07% | 0.92% | 38.95% | 22.06 | 18.56 | 15 | 1.47 |
| 75 | 13.05% | 21.36% | 19.14% | 5.98% | 0.33% | 11.32% | 0.09% | 0.89% | 27.84% | 19.23 | 16.21 | 14 | 1.37 |
| 76 | 16.32% | 14.56% | 21.63% | 5.52% | 0.21% | 6.16% | 0.16% | 1.12% | 34.32% | 23.76 | 19.99 | 16 | 1.57 |
| 77 | 15.26% | 18.52% | 19.50% | 3.90% | 0.43% | 5.32% | 0.12% | 0.62% | 36.33% | 22.20 | 18.67 | 17 | 1.67 |
| 78 | 15.37% | 21.00% | 16.32% | 5.65% | 0.27% | 6.36% | 0.06% | 3.14% | 31.83% | 22.42 | 18.87 | 17 | 1.67 |
| 79 | 18.27% | 10.16% | 31.20% | 4.16% | 0.34% | 9.16% | 0.26% | 0.20% | 26.25% | 26.50 | 22.27 | 14 | 1.37 |
| 80 | 16.22% | 16.56% | 20.36% | 5.26% | 1.14% | 10.41% | 0.14% | 1.16% | 28.75% | 24.09 | 20.29 | 15 | 1.47 |
| 81 | 13.11% | 19.54% | 25.96% | 6.33% | 0.97% | 6.25% | 1.39% | 2.96% | 23.49% | 20.36 | 17.23 | 15 | 1.47 |

Tabla 15

Resultados del análisis cromatográfico y presiones obtenidas – réplica N°2

| Ord | H ₂ | O ₂ | N ₂ | CO | CH ₄ | CO ₂ | C ₂ H ₆ | H ₂ O | N/I | PCS (MJ/Kg) | PCI (MJ/Kg) | P mmH ₂ O | P (KPa) |
|-----|----------------|----------------|----------------|-------|-----------------|-----------------|-------------------------------|------------------|-------|----------------|----------------|-------------------------|------------|
| 82 | 56.32% | 5.12% | 25.36% | 7.11% | 1.23% | 0.96% | 1.00% | 0.63% | 2.27% | 81.31 | 68.26 | 28 | 2.75 |
| 83 | 57.18% | 2.36% | 32.14% | 3.33% | 1.16% | 1.10% | 0.09% | 1.11% | 1.53% | 81.64 | 68.43 | 26 | 2.55 |
| 84 | 53.63% | 4.16% | 26.33% | 6.11% | 4.23% | 1.54% | 1.11% | 2.95% | 0.91% | 79.12 | 66.48 | 25 | 2.45 |
| 85 | 55.14% | 8.45% | 22.78% | 6.15% | 1.64% | 0.87% | 1.03% | 0.50% | 3.44% | 79.79 | 66.98 | 29 | 2.84 |
| 86 | 54.23% | 3.36% | 29.84% | 2.26% | 1.24% | 5.31% | 0.16% | 0.29% | 3.31% | 77.45 | 64.92 | 27 | 2.65 |
| 87 | 56.31% | 4.16% | 26.51% | 4.96% | 0.52% | 2.16% | 0.09% | 2.46% | 2.83% | 80.23 | 67.26 | 28 | 2.75 |
| 88 | 58.16% | 3.21% | 28.52% | 1.96% | 1.02% | 4.13% | 1.11% | 1.58% | 0.31% | 83.33 | 69.86 | 27 | 2.65 |
| 89 | 55.27% | 5.12% | 27.85% | 3.69% | 1.49% | 3.58% | 1.87% | 0.18% | 0.95% | 80.07 | 67.21 | 25 | 2.45 |
| 90 | 56.36% | 3.17% | 29.63% | 2.11% | 0.93% | 1.85% | 0.09% | 2.16% | 3.70% | 80.23 | 67.23 | 29 | 2.84 |
| 91 | 51.03% | 5.96% | 24.26% | 0.23% | 1.95% | 1.85% | 2.16% | 4.56% | 8.00% | 74.15 | 62.21 | 23 | 2.26 |
| 92 | 52.36% | 3.26% | 28.82% | 4.12% | 1.67% | 2.16% | 1.01% | 3.98% | 2.62% | 75.67 | 63.50 | 24 | 2.35 |
| 93 | 48.26% | 2.15% | 31.26% | 1.16% | 1.27% | 4.26% | 0.51% | 2.16% | 8.97% | 69.12 | 57.94 | 22 | 2.16 |
| 94 | 57.52% | 11.12% | 18.96% | 3.16% | 2.02% | 5.63% | 0.87% | 0.11% | 0.61% | 82.97 | 69.60 | 22 | 2.16 |
| 95 | 51.26% | 2.16% | 31.54% | 2.84% | 3.14% | 4.87% | 1.67% | 0.89% | 1.63% | 75.14 | 63.09 | 21 | 2.06 |
| 96 | 52.69% | 3.89% | 24.03% | 2.45% | 0.64% | 0.98% | 2.11% | 3.85% | 9.36% | 75.97 | 63.74 | 21 | 2.06 |
| 97 | 54.25% | 6.23% | 27.41% | 5.23% | 2.36% | 0.98% | 0.55% | 1.16% | 1.83% | 78.59 | 65.96 | 22 | 2.16 |

Continúa 

| | | | | | | | | | | | | | |
|-----|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|----|------|
| 98 | 49.63% | 1.03% | 31.29% | 5.63% | 1.85% | 1.25% | 2.71% | 3.92% | 2.69% | 72.94 | 61.31 | 24 | 2.35 |
| 99 | 50.05% | 3.65% | 31.35% | 3.02% | 1.01% | 2.49% | 0.61% | 2.11% | 5.71% | 71.74 | 60.16 | 22 | 2.16 |
| 100 | 51.40% | 3.21% | 28.88% | 5.37% | 2.47% | 0.95% | 1.83% | 1.16% | 4.73% | 75.30 | 63.26 | 14 | 1.37 |
| 101 | 50.23% | 2.13% | 28.63% | 5.16% | 2.54% | 2.13% | 1.29% | 1.26% | 6.63% | 73.39 | 61.64 | 15 | 1.47 |
| 102 | 54.12% | 3.26% | 25.59% | 4.18% | 2.03% | 2.11% | 1.07% | 2.15% | 5.49% | 78.39 | 65.79 | 14 | 1.37 |
| 103 | 56.36% | 2.85% | 27.56% | 6.11% | 1.02% | 0.85% | 0.09% | 2.06% | 3.10% | 80.69 | 67.68 | 16 | 1.57 |
| 104 | 53.35% | 5.26% | 29.03% | 7.15% | 3.43% | 0.08% | 1.05% | 0.11% | 0.54% | 78.36 | 65.84 | 12 | 1.18 |
| 105 | 49.96% | 5.62% | 31.20% | 5.11% | 1.03% | 0.84% | 0.51% | 1.38% | 4.35% | 71.78 | 60.22 | 14 | 1.37 |
| 106 | 49.85% | 3.25% | 34.12% | 5.20% | 0.09% | 1.16% | 0.61% | 2.13% | 3.59% | 71.17 | 59.69 | 15 | 1.47 |
| 107 | 51.23% | 4.26% | 28.47% | 5.26% | 0.88% | 1.04% | 0.61% | 2.08% | 6.17% | 73.56 | 61.71 | 13 | 1.27 |
| 108 | 51.26% | 3.16% | 22.63% | 11.16% | 0.51% | 2.89% | 1.29% | 1.74% | 5.36% | 74.34 | 62.48 | 16 | 1.57 |
| 109 | 30.85% | 12.16% | 28.11% | 10.16% | 1.45% | 2.02% | 0.98% | 3.17% | 11.10% | 45.81 | 38.59 | 27 | 2.65 |
| 110 | 31.65% | 11.02% | 33.96% | 5.15% | 3.04% | 7.54% | 1.89% | 0.25% | 5.50% | 47.78 | 40.23 | 27 | 2.65 |
| 111 | 28.24% | 9.11% | 23.56% | 4.85% | 6.62% | 6.95% | 1.56% | 5.31% | 13.80% | 44.73 | 37.75 | 27 | 2.65 |
| 112 | 35.95% | 11.23% | 24.11% | 9.95% | 3.41% | 0.78% | 2.16% | 1.38% | 11.03% | 54.66 | 46.09 | 28 | 2.75 |
| 113 | 34.20% | 8.52% | 24.69% | 8.89% | 5.63% | 6.65% | 1.96% | 2.11% | 7.35% | 53.20 | 44.90 | 29 | 2.84 |
| 114 | 29.89% | 12.25% | 21.63% | 11.52% | 3.17% | 5.20% | 1.99% | 3.41% | 10.94% | 46.06 | 38.90 | 30 | 2.94 |
| 115 | 44.26% | 7.56% | 19.85% | 14.56% | 1.12% | 3.25% | 1.01% | 0.84% | 7.55% | 65.00 | 54.72 | 32 | 3.14 |
| 116 | 40.15% | 7.63% | 13.65% | 30.04% | 2.04% | 1.48% | 0.08% | 0.34% | 4.59% | 60.78 | 51.43 | 29 | 2.84 |
| 117 | 41.03% | 8.96% | 17.36% | 11.26% | 6.26% | 3.85% | 1.19% | 3.06% | 7.03% | 63.02 | 53.15 | 27 | 2.65 |
| 118 | 38.96% | 21.23% | 10.54% | 5.30% | 4.16% | 2.98% | 2.10% | 5.36% | 9.37% | 58.82 | 49.51 | 21 | 2.06 |

Continúa 

| | | | | | | | | | | | | | |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|----|------|
| 119 | 33.36% | 18.96% | 10.22% | 14.56% | 4.84% | 3.11% | 3.56% | 3.85% | 7.54% | 52.97 | 44.84 | 21 | 2.06 |
| 120 | 34.52% | 16.36% | 14.23% | 16.65% | 1.14% | 0.09% | 1.52% | 3.32% | 12.17% | 51.75 | 43.68 | 21 | 2.06 |
| 121 | 33.97% | 16.26% | 15.20% | 14.82% | 2.76% | 6.65% | 1.12% | 2.57% | 6.65% | 51.47 | 43.44 | 20 | 1.96 |
| 122 | 35.74% | 10.26% | 26.36% | 8.56% | 3.01% | 2.24% | 1.76% | 5.70% | 6.37% | 53.80 | 45.33 | 23 | 2.26 |
| 123 | 30.26% | 12.36% | 24.30% | 12.20% | 8.96% | 0.85% | 0.71% | 1.24% | 9.12% | 49.16 | 41.61 | 18 | 1.77 |
| 124 | 30.98% | 10.30% | 26.09% | 6.51% | 12.63% | 1.11% | 1.01% | 3.57% | 7.80% | 51.77 | 43.80 | 19 | 1.86 |
| 125 | 31.06% | 16.25% | 21.16% | 5.26% | 6.69% | 1.58% | 3.96% | 3.16% | 10.88% | 50.01 | 42.28 | 20 | 1.96 |
| 126 | 29.86% | 16.40% | 18.52% | 4.85% | 10.60% | 3.96% | 2.03% | 5.55% | 8.23% | 49.43 | 41.81 | 20 | 1.96 |
| 127 | 37.54% | 10.26% | 16.02% | 10.85% | 7.01% | 5.56% | 1.85% | 4.03% | 6.88% | 58.81 | 49.66 | 16 | 1.57 |
| 128 | 35.26% | 21.52% | 8.80% | 13.63% | 6.95% | 3.25% | 3.65% | 0.03% | 6.91% | 56.76 | 48.06 | 14 | 1.37 |
| 129 | 34.05% | 17.30% | 8.97% | 19.52% | 8.89% | 2.04% | 3.34% | 0.80% | 5.09% | 56.55 | 48.01 | 16 | 1.57 |
| 130 | 44.21% | 13.23% | 19.89% | 8.89% | 2.65% | 2.16% | 0.11% | 0.25% | 8.61% | 64.74 | 54.41 | 12 | 1.18 |
| 131 | 41.23% | 14.56% | 17.02% | 10.45% | 3.69% | 6.02% | 1.08% | 0.03% | 5.92% | 61.76 | 52.01 | 11 | 1.08 |
| 132 | 37.25% | 21.60% | 11.15% | 7.36% | 3.11% | 1.52% | 2.51% | 5.23% | 10.27% | 56.25 | 47.39 | 13 | 1.27 |
| 133 | 42.11% | 19.63% | 4.56% | 11.26% | 5.63% | 2.15% | 3.67% | 2.25% | 8.74% | 65.47 | 55.28 | 16 | 1.57 |
| 134 | 40.36% | 21.36% | 5.96% | 10.36% | 1.58% | 7.17% | 1.06% | 3.58% | 8.57% | 59.35 | 49.94 | 16 | 1.57 |
| 135 | 36.27% | 30.26% | 8.89% | 5.21% | 2.59% | 2.04% | 2.20% | 0.98% | 11.56% | 54.21 | 45.62 | 17 | 1.67 |
| 136 | 17.12% | 22.36% | 16.95% | 4.81% | 0.23% | 6.36% | 0.81% | 0.96% | 30.40% | 25.16 | 21.18 | 29 | 2.84 |
| 137 | 16.32% | 20.16% | 24.16% | 5.68% | 2.10% | 5.15% | 0.11% | 3.13% | 23.19% | 24.79 | 20.90 | 27 | 2.65 |
| 138 | 16.02% | 21.62% | 26.30% | 7.16% | 1.01% | 6.89% | 0.18% | 3.12% | 17.70% | 23.95 | 20.20 | 26 | 2.55 |
| 139 | 17.02% | 20.36% | 24.56% | 11.26% | 2.15% | 6.88% | 0.21% | 3.16% | 14.40% | 26.41 | 22.36 | 29 | 2.84 |

Continúa 

| | | | | | | | | | | | | | |
|-----|--------|--------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|----|------|
| 140 | 14.56% | 21.06% | 23.63% | 10.35% | 5.01% | 6.65% | 0.09% | 1.00% | 17.65% | 24.36 | 20.69 | 30 | 2.94 |
| 141 | 12.62% | 21.23% | 21.45% | 9.63% | 4.36% | 5.25% | 1.16% | 2.97% | 21.33% | 21.74 | 18.51 | 30 | 2.94 |
| 142 | 19.26% | 13.52% | 24.63% | 7.58% | 2.36% | 7.89% | 2.51% | 3.02% | 19.23% | 30.49 | 25.81 | 30 | 2.94 |
| 143 | 18.26% | 11.56% | 31.26% | 9.63% | 3.65% | 5.21% | 1.14% | 0.51% | 18.78% | 29.30 | 24.82 | 27 | 2.65 |
| 144 | 15.92% | 17.25% | 24.54% | 7.21% | 2.11% | 9.52% | 0.16% | 2.25% | 21.04% | 24.41 | 20.61 | 29 | 2.84 |
| 145 | 13.52% | 24.15% | 18.52% | 5.20% | 1.12% | 10.25% | 0.85% | 3.29% | 23.10% | 20.63 | 17.42 | 21 | 2.06 |
| 146 | 12.21% | 14.56% | 26.65% | 8.81% | 1.24% | 8.56% | 2.00% | 2.15% | 23.82% | 19.80 | 16.83 | 20 | 1.96 |
| 147 | 12.06% | 24.20% | 16.96% | 5.56% | 2.06% | 8.69% | 2.63% | 1.84% | 26.00% | 20.04 | 17.02 | 22 | 2.16 |
| 148 | 15.50% | 16.52% | 31.26% | 4.65% | 2.25% | 8.54% | 0.16% | 3.15% | 17.97% | 23.64 | 19.93 | 21 | 2.06 |
| 149 | 16.13% | 15.23% | 24.10% | 6.63% | 0.45% | 7.56% | 0.87% | 3.57% | 25.46% | 24.10 | 20.33 | 17 | 1.67 |
| 150 | 14.21% | 21.45% | 19.85% | 2.69% | 2.09% | 5.41% | 0.01% | 2.16% | 32.13% | 21.46 | 18.06 | 19 | 1.86 |
| 151 | 18.32% | 16.65% | 24.12% | 5.03% | 1.11% | 7.16% | 0.01% | 2.73% | 24.87% | 26.95 | 22.67 | 21 | 2.06 |
| 152 | 16.52% | 17.85% | 31.02% | 3.13% | 0.98% | 9.52% | 0.24% | 1.12% | 19.62% | 24.27 | 20.40 | 23 | 2.26 |
| 153 | 16.18% | 24.11% | 26.33% | 5.01% | 0.67% | 6.21% | 0.21% | 1.14% | 20.14% | 23.79 | 20.02 | 24 | 2.35 |
| 154 | 13.05% | 21.45% | 19.56% | 2.11% | 2.63% | 7.15% | 2.21% | 1.56% | 30.28% | 21.18 | 17.92 | 14 | 1.37 |
| 155 | 14.58% | 18.27% | 21.33% | 3.69% | 1.03% | 5.69% | 0.32% | 2.36% | 32.73% | 21.66 | 18.23 | 16 | 1.57 |
| 156 | 12.41% | 23.69% | 18.47% | 4.56% | 1.58% | 4.66% | 1.09% | 1.82% | 31.72% | 19.38 | 16.38 | 15 | 1.47 |
| 157 | 13.23% | 18.52% | 20.14% | 6.58% | 1.23% | 8.57% | 1.17% | 3.01% | 27.55% | 20.59 | 17.42 | 17 | 1.67 |
| 158 | 12.06% | 21.58% | 17.52% | 8.52% | 2.26% | 9.68% | 0.17% | 2.01% | 26.20% | 19.18 | 16.26 | 17 | 1.67 |
| 159 | 12.85% | 26.32% | 14.52% | 4.05% | 0.33% | 8.20% | 1.07% | 1.47% | 31.19% | 19.25 | 16.23 | 16 | 1.57 |
| 160 | 17.85% | 16.69% | 24.78% | 6.52% | 1.28% | 5.69% | 1.58% | 0.57% | 25.04% | 27.33 | 23.08 | 13 | 1.27 |
| 161 | 17.21% | 23.26% | 21.11% | 3.65% | 1.87% | 8.98% | 0.54% | 0.82% | 22.56% | 25.93 | 21.84 | 14 | 1.37 |
| 162 | 12.47% | 21.20% | 19.63% | 6.24% | 1.29% | 8.24% | 1.18% | 3.01% | 26.74% | 19.52 | 16.52 | 14 | 1.37 |

Tabla 16

Resultados del análisis cromatográfico y presiones obtenidas – réplica N°3

| Ord | H ₂ | O ₂ | N ₂ | CO | CH ₄ | CO ₂ | C ₂ H ₆ | H ₂ O | N/I | PCS (MJ/Kg) | PCI (MJ/Kg) | P mmH ₂ O | P (KPa) |
|-----|----------------|----------------|----------------|-------|-----------------|-----------------|-------------------------------|------------------|-------|----------------|----------------|-------------------------|------------|
| 163 | 59.21% | 5.62% | 21.56% | 3.26% | 0.12% | 2.24% | 0.71% | 1.13% | 6.15% | 84.24 | 70.61 | 28 | 2.75 |
| 164 | 55.24% | 4.26% | 27.56% | 4.11% | 2.01% | 3.60% | 0.89% | 1.12% | 1.21% | 79.86 | 67.01 | 25 | 2.45 |
| 165 | 54.98% | 6.12% | 21.47% | 8.11% | 2.49% | 0.87% | 0.45% | 3.03% | 2.48% | 79.93 | 67.13 | 25 | 2.45 |
| 166 | 58.17% | 6.58% | 24.79% | 3.28% | 1.96% | 2.04% | 1.37% | 0.06% | 1.75% | 84.12 | 70.58 | 29 | 2.84 |
| 167 | 52.97% | 6.96% | 21.50% | 6.69% | 4.69% | 2.11% | 2.11% | 2.01% | 0.96% | 79.01 | 66.45 | 28 | 2.75 |
| 168 | 54.20% | 6.19% | 23.21% | 6.98% | 4.10% | 2.47% | 2.06% | 0.08% | 0.71% | 80.42 | 67.63 | 28 | 2.75 |
| 169 | 57.14% | 3.16% | 29.84% | 3.10% | 0.98% | 0.52% | 2.96% | 1.18% | 1.12% | 82.93 | 69.62 | 28 | 2.75 |
| 170 | 56.21% | 2.58% | 26.87% | 6.21% | 1.08% | 3.14% | 1.02% | 2.00% | 0.89% | 80.99 | 67.97 | 24 | 2.35 |
| 171 | 55.98% | 1.12% | 28.85% | 4.01% | 1.65% | 1.26% | 0.70% | 1.27% | 5.16% | 80.60 | 67.61 | 28 | 2.75 |
| 172 | 49.01% | 4.11% | 28.88% | 2.59% | 4.05% | 1.89% | 1.00% | 4.10% | 4.37% | 72.09 | 60.54 | 22 | 2.16 |
| 173 | 47.25% | 1.69% | 30.56% | 3.67% | 3.58% | 0.85% | 2.36% | 1.52% | 8.52% | 70.16 | 58.98 | 23 | 2.26 |
| 174 | 43.28% | 3.25% | 32.28% | 2.05% | 1.49% | 3.36% | 2.43% | 2.89% | 8.97% | 63.29 | 53.15 | 22 | 2.16 |
| 175 | 51.27% | 9.62% | 24.23% | 2.58% | 3.68% | 1.20% | 2.01% | 1.00% | 4.41% | 75.59 | 63.50 | 22 | 2.16 |
| 176 | 50.25% | 3.69% | 24.15% | 1.15% | 3.69% | 2.58% | 2.75% | 3.06% | 8.68% | 74.40 | 62.50 | 21 | 2.06 |
| 177 | 47.61% | 4.21% | 22.07% | 2.89% | 4.78% | 4.56% | 2.10% | 2.98% | 8.80% | 71.11 | 59.78 | 20 | 1.96 |
| 178 | 57.13% | 6.21% | 31.20% | 1.27% | 0.21% | 0.04% | 1.03% | 0.16% | 2.75% | 81.32 | 68.15 | 21 | 2.06 |

Continúa 

| | | | | | | | | | | | | | |
|-----|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|----|------|
| 179 | 54.97% | 2.26% | 31.25% | 4.25% | 2.23% | 0.21% | 1.11% | 2.00% | 1.72% | 79.72 | 66.91 | 23 | 2.26 |
| 180 | 53.04% | 6.36% | 30.04% | 5.24% | 0.41% | 2.00% | 0.46% | 1.89% | 0.56% | 75.77 | 63.55 | 22 | 2.16 |
| 181 | 54.35% | 1.28% | 31.25% | 5.87% | 1.13% | 0.87% | 2.01% | 1.15% | 2.09% | 78.87 | 66.23 | 14 | 1.37 |
| 182 | 46.58% | 3.26% | 24.58% | 9.68% | 3.95% | 1.54% | 1.50% | 2.56% | 6.35% | 69.58 | 58.57 | 16 | 1.57 |
| 183 | 51.24% | 3.69% | 31.47% | 4.20% | 1.68% | 2.01% | 0.29% | 0.08% | 5.34% | 73.74 | 61.85 | 15 | 1.47 |
| 184 | 47.25% | 2.68% | 31.24% | 9.52% | 3.78% | 1.11% | 2.00% | 0.12% | 2.30% | 70.67 | 59.49 | 16 | 1.57 |
| 185 | 49.31% | 3.57% | 30.04% | 6.68% | 0.48% | 1.17% | 0.29% | 3.21% | 5.25% | 70.61 | 59.24 | 13 | 1.27 |
| 186 | 42.28% | 9.63% | 31.57% | 3.47% | 2.58% | 3.15% | 1.71% | 3.02% | 2.59% | 62.25 | 52.30 | 13 | 1.27 |
| 187 | 55.23% | 3.59% | 24.89% | 10.12% | 1.12% | 0.58% | 1.36% | 0.27% | 2.84% | 80.20 | 67.39 | 14 | 1.37 |
| 188 | 54.79% | 3.28% | 26.51% | 6.67% | 3.30% | 2.14% | 2.96% | 0.02% | 0.33% | 81.25 | 68.32 | 13 | 1.27 |
| 189 | 49.63% | 6.25% | 21.48% | 9.51% | 4.41% | 1.19% | 2.06% | 1.36% | 4.11% | 74.40 | 62.63 | 15 | 1.47 |
| 190 | 30.58% | 13.65% | 25.81% | 10.26% | 0.65% | 3.14% | 1.85% | 3.02% | 11.04% | 45.45 | 38.31 | 26 | 2.55 |
| 191 | 29.54% | 9.25% | 29.85% | 10.11% | 3.27% | 3.54% | 0.54% | 2.46% | 11.44% | 44.73 | 37.72 | 26 | 2.55 |
| 192 | 25.68% | 16.52% | 18.96% | 4.45% | 6.01% | 2.87% | 1.09% | 6.13% | 18.29% | 40.50 | 34.18 | 28 | 2.75 |
| 193 | 32.09% | 12.87% | 26.07% | 4.36% | 4.98% | 0.97% | 3.48% | 5.07% | 10.11% | 50.19 | 42.35 | 29 | 2.84 |
| 194 | 33.16% | 10.02% | 21.47% | 10.69% | 4.28% | 8.43% | 2.11% | 0.97% | 8.87% | 51.25 | 43.27 | 30 | 2.94 |
| 195 | 30.29% | 10.12% | 26.98% | 7.39% | 5.32% | 3.20% | 1.76% | 2.28% | 12.66% | 47.26 | 39.89 | 31 | 3.04 |
| 196 | 41.56% | 4.39% | 19.52% | 14.20% | 5.13% | 0.26% | 2.12% | 1.11% | 11.71% | 63.92 | 53.96 | 33 | 3.24 |
| 197 | 42.02% | 11.23% | 20.01% | 17.56% | 0.98% | 1.39% | 0.49% | 0.70% | 5.62% | 61.80 | 52.07 | 30 | 2.94 |
| 198 | 40.54% | 12.12% | 16.90% | 17.52% | 2.85% | 1.01% | 1.93% | 0.88% | 6.25% | 61.47 | 51.89 | 28 | 2.75 |
| 199 | 36.33% | 26.52% | 7.69% | 3.12% | 0.91% | 2.04% | 3.99% | 1.16% | 18.24% | 54.08 | 45.50 | 22 | 2.16 |

Continúa 

| | | | | | | | | | | | | | |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|----|------|
| 200 | 33.52% | 26.32% | 11.18% | 9.69% | 1.01% | 3.19% | 0.90% | 3.16% | 11.03% | 49.25 | 41.45 | 22 | 2.16 |
| 201 | 30.12% | 31.23% | 8.28% | 5.63% | 7.74% | 1.02% | 2.16% | 1.54% | 12.28% | 48.38 | 40.87 | 20 | 1.96 |
| 202 | 35.41% | 21.16% | 12.58% | 11.47% | 6.36% | 2.16% | 1.29% | 0.77% | 8.80% | 55.22 | 46.63 | 19 | 1.86 |
| 203 | 36.01% | 16.58% | 17.51% | 8.71% | 3.69% | 1.03% | 2.31% | 2.47% | 11.69% | 54.85 | 46.25 | 22 | 2.16 |
| 204 | 30.56% | 10.26% | 19.85% | 17.13% | 5.55% | 3.19% | 3.25% | 1.81% | 8.40% | 49.51 | 42.00 | 18 | 1.77 |
| 205 | 32.28% | 12.17% | 16.87% | 5.01% | 11.08% | 1.19% | 0.63% | 3.16% | 17.61% | 52.41 | 44.26 | 18 | 1.77 |
| 206 | 30.98% | 11.01% | 14.32% | 6.02% | 7.48% | 4.00% | 2.65% | 1.04% | 22.50% | 49.74 | 42.03 | 19 | 1.86 |
| 207 | 28.45% | 17.46% | 22.19% | 6.67% | 7.71% | 1.13% | 2.38% | 3.16% | 10.85% | 46.22 | 39.09 | 19 | 1.86 |
| 208 | 36.32% | 10.25% | 11.16% | 10.25% | 7.14% | 6.11% | 2.26% | 2.98% | 13.53% | 57.31 | 48.41 | 16 | 1.57 |
| 209 | 36.54% | 25.63% | 7.16% | 11.20% | 8.52% | 2.20% | 2.09% | 1.05% | 5.61% | 58.38 | 49.35 | 14 | 1.37 |
| 210 | 32.24% | 10.23% | 6.39% | 21.46% | 9.92% | 0.89% | 3.83% | 2.10% | 12.94% | 55.00 | 46.80 | 16 | 1.57 |
| 211 | 43.12% | 18.36% | 8.25% | 12.36% | 4.56% | 7.10% | 0.08% | 1.55% | 4.62% | 64.58 | 54.38 | 13 | 1.27 |
| 212 | 39.66% | 17.26% | 11.36% | 8.06% | 5.96% | 8.01% | 0.41% | 1.06% | 8.22% | 60.20 | 50.70 | 12 | 1.18 |
| 213 | 36.39% | 16.58% | 10.02% | 21.63% | 5.26% | 0.08% | 3.15% | 1.99% | 4.90% | 57.97 | 49.14 | 14 | 1.37 |
| 214 | 40.38% | 21.18% | 12.63% | 9.25% | 4.96% | 3.65% | 0.50% | 0.09% | 7.36% | 60.84 | 51.23 | 16 | 1.57 |
| 215 | 41.23% | 18.52% | 7.36% | 10.25% | 2.18% | 3.27% | 1.09% | 3.87% | 12.23% | 60.91 | 51.26 | 17 | 1.67 |
| 216 | 35.47% | 30.16% | 8.52% | 10.11% | 1.91% | 1.36% | 3.02% | 1.78% | 7.67% | 53.62 | 45.22 | 17 | 1.67 |
| 217 | 15.88% | 21.53% | 12.47% | 9.51% | 2.12% | 4.50% | 0.21% | 1.96% | 31.82% | 24.61 | 20.82 | 29 | 2.84 |
| 218 | 14.56% | 19.56% | 21.47% | 9.28% | 0.59% | 5.20% | 0.12% | 0.96% | 28.26% | 21.85 | 18.46 | 26 | 2.55 |
| 219 | 12.56% | 22.41% | 17.36% | 5.23% | 2.98% | 3.16% | 1.16% | 0.10% | 35.04% | 20.46 | 17.33 | 25 | 2.45 |
| 220 | 17.01% | 18.62% | 21.69% | 4.68% | 0.88% | 8.52% | 0.11% | 5.16% | 23.33% | 24.99 | 21.03 | 28 | 2.75 |

Continúa 

| | | | | | | | | | | | | | |
|-----|--------|--------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|----|------|
| 221 | 14.91% | 23.05% | 19.55% | 5.16% | 3.16% | 6.37% | 1.48% | 2.11% | 24.21% | 24.03 | 20.34 | 31 | 3.04 |
| 222 | 14.07% | 15.45% | 21.69% | 8.81% | 3.65% | 6.14% | 1.17% | 2.53% | 26.49% | 23.32 | 19.80 | 31 | 3.04 |
| 223 | 16.58% | 18.11% | 25.47% | 5.26% | 1.01% | 3.74% | 1.66% | 3.13% | 25.04% | 25.31 | 21.36 | 31 | 3.04 |
| 224 | 14.03% | 16.31% | 24.23% | 2.54% | 3.62% | 5.14% | 2.11% | 2.10% | 29.92% | 23.10 | 19.55 | 28 | 2.75 |
| 225 | 15.01% | 22.63% | 23.41% | 5.12% | 1.20% | 6.51% | 2.64% | 0.82% | 22.66% | 23.69 | 20.05 | 30 | 2.94 |
| 226 | 16.08% | 18.11% | 21.49% | 5.01% | 2.05% | 6.13% | 1.01% | 2.74% | 27.38% | 24.82 | 20.95 | 20 | 1.96 |
| 227 | 12.54% | 19.41% | 24.18% | 3.16% | 0.85% | 8.12% | 1.16% | 3.19% | 27.39% | 19.06 | 16.07 | 19 | 1.86 |
| 228 | 12.98% | 16.95% | 24.55% | 6.12% | 2.16% | 7.79% | 1.21% | 2.55% | 25.69% | 20.72 | 17.55 | 21 | 2.06 |
| 229 | 16.55% | 16.41% | 21.01% | 6.16% | 1.85% | 7.71% | 1.13% | 3.01% | 26.17% | 25.55 | 21.58 | 21 | 2.06 |
| 230 | 14.27% | 21.11% | 31.28% | 3.16% | 0.41% | 8.65% | 0.24% | 2.15% | 18.73% | 20.79 | 17.47 | 16 | 1.57 |
| 231 | 12.69% | 26.87% | 30.14% | 3.58% | 0.87% | 5.47% | 0.44% | 1.09% | 18.85% | 18.95 | 15.97 | 19 | 1.86 |
| 232 | 18.81% | 21.16% | 24.36% | 5.02% | 0.33% | 8.14% | 0.88% | 2.00% | 19.30% | 27.66 | 23.28 | 21 | 2.06 |
| 233 | 16.13% | 21.34% | 31.13% | 3.16% | 2.81% | 9.26% | 1.47% | 1.51% | 13.19% | 25.35 | 21.40 | 22 | 2.16 |
| 234 | 12.35% | 21.45% | 16.25% | 6.11% | 2.13% | 8.12% | 1.17% | 2.70% | 29.72% | 19.79 | 16.77 | 23 | 2.26 |
| 235 | 12.86% | 21.11% | 18.96% | 8.66% | 2.85% | 9.10% | 2.46% | 2.02% | 21.98% | 21.82 | 18.58 | 13 | 1.27 |
| 236 | 16.29% | 23.02% | 15.74% | 4.16% | 1.24% | 10.02% | 0.70% | 1.57% | 27.26% | 24.42 | 20.57 | 17 | 1.67 |
| 237 | 12.05% | 23.56% | 27.63% | 6.16% | 1.11% | 8.35% | 0.54% | 0.12% | 20.48% | 18.49 | 15.63 | 16 | 1.57 |
| 238 | 15.05% | 19.00% | 23.55% | 4.21% | 2.21% | 8.21% | 0.87% | 3.02% | 23.88% | 23.30 | 19.66 | 18 | 1.77 |
| 239 | 13.68% | 16.21% | 20.41% | 4.90% | 3.16% | 9.91% | 0.83% | 2.86% | 28.04% | 21.94 | 18.56 | 18 | 1.77 |
| 240 | 12.06% | 23.60% | 18.74% | 6.15% | 2.00% | 8.13% | 1.29% | 3.16% | 24.87% | 19.38 | 16.42 | 16 | 1.57 |
| 241 | 16.27% | 16.54% | 29.87% | 3.16% | 1.34% | 6.57% | 0.51% | 1.20% | 24.54% | 24.25 | 20.41 | 14 | 1.37 |
| 242 | 13.24% | 19.81% | 21.49% | 3.26% | 2.11% | 8.87% | 1.05% | 1.87% | 28.30% | 20.69 | 17.47 | 15 | 1.47 |
| 243 | 12.69% | 16.54% | 29.74% | 5.33% | 1.96% | 5.26% | 1.56% | 0.28% | 26.64% | 20.30 | 17.19 | 15 | 1.47 |

4.2.2. TEMPERATURAS DURANTE EL PROCESO

Durante el proceso se tomaron las temperaturas registradas por las termocuplas. Se realizó esto para ver como varían las temperaturas con las distintas combinaciones de las variables registradas (Ver Figura 27).

Las tablas 17, 18 y 19 muestran las temperaturas registradas al momento de la extracción de la muestra del gas de síntesis.

Tabla 17

Registro de temperaturas - réplica N°1

| Ord. | t1 (°C) | t2 (°C) | t3 (°C) | t4 (°C) | t5 (°C) | t6 (°C) | t7 (°C) | t8 (°C) | PCS (MJ/Kg) | PCI (MJ/Kg) |
|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------------|------------------------|
| 1 | 756.33 | 226.95 | 1024.21 | 70.36 | 121.16 | 114.67 | 102.69 | 81.20 | 83.20 | 70.32 |
| 2 | 702.36 | 211.14 | 1031.58 | 56.21 | 119.63 | 99.15 | 87.56 | 59.85 | 80.84 | 67.80 |
| 3 | 698.63 | 202.21 | 995.63 | 50.26 | 100.03 | 110.26 | 80.63 | 55.36 | 79.64 | 66.99 |
| 4 | 800.65 | 197.63 | 1006.95 | 60.16 | 89.63 | 98.52 | 112.36 | 95.21 | 82.05 | 68.86 |
| 5 | 667.24 | 200.58 | 980.00 | 70.26 | 113.65 | 94.19 | 83.18 | 56.86 | 81.00 | 67.88 |
| 6 | 663.70 | 192.10 | 945.85 | 65.36 | 95.03 | 104.75 | 76.60 | 52.59 | 81.38 | 68.35 |
| 7 | 760.62 | 187.75 | 956.60 | 80.16 | 85.15 | 93.59 | 106.74 | 90.45 | 84.26 | 70.61 |
| 8 | 633.88 | 190.55 | 931.00 | 75.36 | 107.97 | 89.48 | 79.02 | 54.01 | 83.22 | 69.81 |
| 9 | 618.65 | 182.49 | 898.56 | 62.36 | 90.28 | 99.51 | 72.77 | 49.96 | 78.90 | 66.22 |
| 10 | 836.68 | 206.52 | 1052.26 | 70.23 | 93.66 | 102.95 | 117.42 | 99.49 | 71.72 | 60.13 |
| 11 | 697.27 | 209.61 | 1024.10 | 82.90 | 118.76 | 98.43 | 86.93 | 59.42 | 65.41 | 54.84 |
| 12 | 680.52 | 200.74 | 988.41 | 68.60 | 99.30 | 109.46 | 80.05 | 54.96 | 53.92 | 45.19 |
| 13 | 820.63 | 227.18 | 1157.49 | 61.75 | 103.03 | 113.25 | 109.65 | 81.20 | 79.40 | 66.58 |
| 14 | 698.36 | 201.45 | 1015.69 | 55.85 | 111.33 | 108.57 | 80.53 | 60.29 | 78.94 | 66.75 |
| 15 | 612.46 | 180.67 | 954.32 | 75.21 | 89.37 | 98.51 | 72.04 | 49.46 | 70.46 | 59.10 |
| 16 | 919.11 | 254.44 | 1296.39 | 59.01 | 115.39 | 126.84 | 122.81 | 90.94 | 80.11 | 67.13 |

Continúa 

| | | | | | | | | | | |
|----|--------|--------|---------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| 17 | 782.16 | 225.62 | 1137.57 | 62.55 | 124.69 | 121.60 | 90.20 | 67.52 | 73.51 | 61.59 |
| 18 | 685.96 | 202.35 | 1068.84 | 86.62 | 100.10 | 110.34 | 80.69 | 55.40 | 83.53 | 70.04 |
| 19 | 808.81 | 223.90 | 1140.82 | 51.93 | 101.55 | 111.62 | 108.07 | 80.03 | 76.18 | 63.90 |
| 20 | 688.30 | 198.55 | 1001.06 | 55.05 | 109.73 | 107.01 | 79.37 | 59.42 | 68.99 | 57.95 |
| 21 | 603.64 | 178.07 | 960.25 | 76.23 | 88.09 | 97.10 | 71.00 | 48.75 | 80.57 | 67.57 |
| 22 | 881.61 | 244.06 | 1243.50 | 56.60 | 110.69 | 121.66 | 117.80 | 87.23 | 76.70 | 64.54 |
| 23 | 750.25 | 216.42 | 1091.16 | 60.00 | 119.60 | 116.64 | 86.52 | 64.77 | 70.55 | 59.26 |
| 24 | 657.97 | 194.09 | 1046.67 | 83.09 | 96.02 | 105.83 | 77.39 | 53.14 | 56.82 | 47.67 |
| 25 | 847.78 | 244.55 | 1233.01 | 67.80 | 135.15 | 131.80 | 97.76 | 73.19 | 77.22 | 64.81 |
| 26 | 743.51 | 219.33 | 1182.74 | 93.89 | 108.50 | 119.59 | 87.46 | 60.05 | 72.68 | 61.00 |
| 27 | 678.98 | 187.41 | 993.65 | 61.23 | 112.52 | 89.51 | 78.21 | 61.26 | 66.17 | 55.94 |
| 28 | 605.06 | 181.56 | 956.68 | 56.29 | 96.93 | 91.74 | 82.15 | 64.96 | 50.57 | 42.60 |
| 29 | 561.89 | 168.91 | 1001.02 | 44.97 | 95.70 | 79.32 | 70.05 | 57.65 | 45.61 | 38.29 |
| 30 | 558.90 | 161.77 | 965.88 | 40.21 | 80.02 | 88.21 | 64.50 | 44.29 | 42.35 | 35.72 |
| 31 | 653.47 | 196.08 | 1033.21 | 60.79 | 104.68 | 99.07 | 88.72 | 70.16 | 52.11 | 43.94 |
| 32 | 606.84 | 182.42 | 1081.10 | 48.57 | 103.36 | 85.67 | 75.65 | 62.26 | 49.14 | 41.43 |
| 33 | 603.62 | 174.71 | 1043.15 | 43.42 | 86.43 | 95.26 | 69.66 | 47.83 | 49.91 | 42.02 |
| 34 | 686.14 | 205.89 | 1084.88 | 63.83 | 109.92 | 104.03 | 93.16 | 73.66 | 62.81 | 52.93 |
| 35 | 637.18 | 191.55 | 1135.16 | 50.99 | 108.53 | 89.95 | 79.43 | 65.38 | 60.97 | 51.54 |
| 36 | 633.80 | 183.44 | 1095.31 | 45.60 | 90.75 | 100.03 | 73.15 | 50.22 | 59.77 | 50.50 |
| 37 | 651.84 | 195.59 | 1030.63 | 60.64 | 104.42 | 98.83 | 88.50 | 69.98 | 55.14 | 46.52 |

Continúa 

| | | | | | | | | | | |
|----|--------|--------|---------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| 38 | 605.32 | 181.97 | 1078.40 | 48.44 | 103.10 | 85.45 | 75.46 | 62.11 | 52.76 | 44.58 |
| 39 | 602.11 | 174.27 | 1040.54 | 43.32 | 86.21 | 95.03 | 69.49 | 47.71 | 50.95 | 42.66 |
| 40 | 723.54 | 217.11 | 1014.65 | 67.31 | 115.91 | 109.70 | 98.24 | 77.68 | 55.84 | 47.11 |
| 41 | 671.91 | 201.99 | 1097.65 | 53.77 | 114.44 | 94.85 | 83.76 | 68.94 | 53.78 | 45.26 |
| 42 | 668.34 | 193.44 | 955.69 | 48.08 | 95.69 | 105.48 | 77.13 | 52.96 | 52.43 | 44.21 |
| 43 | 738.01 | 221.45 | 1034.94 | 68.66 | 118.22 | 111.89 | 100.20 | 79.23 | 49.67 | 41.97 |
| 44 | 685.35 | 206.03 | 1119.60 | 54.85 | 116.73 | 96.75 | 85.44 | 70.32 | 51.72 | 43.78 |
| 45 | 681.71 | 197.31 | 974.80 | 49.04 | 97.61 | 107.59 | 78.68 | 54.02 | 52.29 | 44.34 |
| 46 | 656.83 | 197.09 | 951.10 | 61.10 | 105.22 | 99.58 | 89.18 | 70.52 | 61.11 | 51.68 |
| 47 | 609.96 | 183.36 | 996.45 | 48.82 | 103.89 | 86.11 | 76.04 | 62.58 | 59.60 | 50.39 |
| 48 | 606.72 | 175.61 | 967.25 | 43.65 | 86.87 | 95.75 | 70.02 | 48.08 | 59.39 | 50.31 |
| 49 | 729.08 | 218.77 | 1055.72 | 67.82 | 116.79 | 110.54 | 98.99 | 78.27 | 60.93 | 57.21 |
| 50 | 677.05 | 203.53 | 1106.06 | 54.18 | 115.32 | 95.58 | 84.41 | 69.47 | 59.94 | 50.38 |
| 51 | 673.46 | 194.92 | 1073.65 | 48.45 | 96.43 | 106.29 | 77.72 | 53.37 | 51.11 | 43.00 |
| 52 | 758.24 | 227.52 | 997.69 | 70.54 | 121.47 | 114.96 | 102.95 | 81.41 | 65.22 | 54.96 |
| 53 | 704.13 | 211.67 | 1150.30 | 56.35 | 119.93 | 99.40 | 87.78 | 72.24 | 64.49 | 54.21 |
| 54 | 700.40 | 202.72 | 1116.59 | 50.39 | 100.28 | 110.54 | 80.83 | 55.50 | 56.04 | 47.09 |
| 55 | 625.63 | 163.40 | 1011.87 | 50.66 | 97.85 | 60.21 | 73.94 | 58.46 | 23.49 | 19.76 |
| 56 | 594.35 | 155.23 | 961.28 | 48.13 | 92.96 | 57.20 | 70.24 | 55.54 | 22.71 | 19.24 |
| 57 | 564.63 | 147.47 | 1002.23 | 45.72 | 88.31 | 54.34 | 66.73 | 52.76 | 24.11 | 20.47 |
| 58 | 688.19 | 179.74 | 1113.06 | 55.73 | 107.64 | 66.23 | 81.33 | 64.31 | 24.17 | 20.43 |

Continúa 

| | | | | | | | | | | |
|----|--------|--------|---------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 59 | 653.78 | 170.76 | 1057.40 | 52.94 | 102.25 | 62.92 | 77.26 | 61.09 | 22.44 | 19.11 |
| 60 | 621.09 | 162.22 | 1102.45 | 50.29 | 97.14 | 59.77 | 73.40 | 58.04 | 19.98 | 16.95 |
| 61 | 701.96 | 183.34 | 1135.32 | 56.84 | 109.79 | 67.56 | 82.96 | 65.60 | 27.64 | 23.36 |
| 62 | 666.86 | 174.17 | 1078.55 | 54.00 | 104.30 | 64.18 | 78.81 | 62.32 | 26.63 | 22.38 |
| 63 | 633.52 | 165.46 | 1124.50 | 51.30 | 99.08 | 60.97 | 74.87 | 59.20 | 25.41 | 21.47 |
| 64 | 617.72 | 161.34 | 999.08 | 50.02 | 96.61 | 59.45 | 73.00 | 57.73 | 22.92 | 19.35 |
| 65 | 586.84 | 153.27 | 1049.36 | 47.52 | 91.78 | 56.48 | 69.35 | 54.84 | 20.84 | 17.58 |
| 66 | 557.49 | 145.61 | 989.56 | 45.14 | 87.19 | 53.65 | 65.88 | 52.10 | 21.83 | 18.38 |
| 67 | 654.79 | 171.02 | 1059.02 | 53.02 | 102.41 | 63.02 | 77.38 | 61.19 | 23.71 | 19.97 |
| 68 | 622.05 | 162.47 | 1012.32 | 50.37 | 97.29 | 59.87 | 73.51 | 58.13 | 22.32 | 18.79 |
| 69 | 590.94 | 154.34 | 1008.85 | 47.85 | 92.42 | 56.87 | 69.84 | 55.22 | 22.17 | 18.64 |
| 70 | 713.72 | 186.41 | 1154.34 | 57.79 | 111.63 | 68.69 | 84.35 | 66.70 | 24.87 | 21.03 |
| 71 | 678.03 | 177.09 | 1103.43 | 54.90 | 106.05 | 65.25 | 80.13 | 63.36 | 24.72 | 20.79 |
| 72 | 644.13 | 168.24 | 995.74 | 52.16 | 100.74 | 61.99 | 76.12 | 60.19 | 21.72 | 18.34 |
| 73 | 606.66 | 158.45 | 981.19 | 49.12 | 94.88 | 58.38 | 71.69 | 56.69 | 22.16 | 18.65 |
| 74 | 576.33 | 150.53 | 1037.28 | 46.67 | 90.14 | 55.47 | 68.11 | 53.86 | 22.06 | 18.56 |
| 75 | 547.51 | 143.00 | 997.59 | 44.33 | 85.63 | 52.69 | 64.70 | 51.16 | 19.23 | 16.21 |
| 76 | 673.39 | 175.88 | 1089.12 | 54.53 | 105.32 | 64.81 | 79.58 | 62.93 | 23.76 | 19.99 |
| 77 | 639.72 | 167.08 | 951.25 | 51.80 | 100.05 | 61.57 | 75.60 | 59.78 | 22.20 | 18.67 |
| 78 | 607.74 | 158.73 | 1107.32 | 49.21 | 95.05 | 58.49 | 71.82 | 56.79 | 22.42 | 18.87 |
| 79 | 727.26 | 189.95 | 1076.69 | 58.89 | 113.75 | 69.99 | 85.95 | 67.96 | 26.50 | 22.27 |
| 80 | 690.90 | 180.45 | 1007.35 | 55.94 | 108.06 | 66.49 | 81.65 | 64.56 | 24.09 | 20.29 |
| 81 | 656.35 | 171.43 | 1195.91 | 53.15 | 102.66 | 63.17 | 77.57 | 61.34 | 20.36 | 17.23 |

Tabla 18

Registro de temperaturas - réplica N°2

| Ord. | t1 (°C) | t2 (°C) | t3 (°C) | t4 (°C) | t5 (°C) | t6 (°C) | t7 (°C) | t8 (°C) | PCS (MJ/Kg) | PCI (MJ/Kg) |
|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------------|------------------------|
| 82 | 718.51 | 215.60 | 983.24 | 66.84 | 115.10 | 110.08 | 97.56 | 77.14 | 81.31 | 68.26 |
| 83 | 667.24 | 200.58 | 990.32 | 53.40 | 113.65 | 95.18 | 83.18 | 56.86 | 81.64 | 68.43 |
| 84 | 663.70 | 192.10 | 955.80 | 47.75 | 95.03 | 105.85 | 76.60 | 52.59 | 79.12 | 66.48 |
| 85 | 760.62 | 187.75 | 1066.36 | 57.15 | 85.15 | 94.58 | 106.74 | 90.45 | 79.79 | 66.98 |
| 86 | 633.88 | 190.55 | 940.80 | 66.75 | 107.97 | 90.42 | 79.02 | 54.01 | 77.45 | 64.92 |
| 87 | 630.51 | 182.49 | 1008.54 | 62.09 | 90.28 | 100.56 | 72.77 | 49.96 | 80.23 | 67.26 |
| 88 | 722.59 | 178.36 | 1018.54 | 76.15 | 80.89 | 89.85 | 101.40 | 85.93 | 83.33 | 69.86 |
| 89 | 602.19 | 181.03 | 993.26 | 71.59 | 102.57 | 85.90 | 75.07 | 51.31 | 80.07 | 67.21 |
| 90 | 587.72 | 173.37 | 962.54 | 59.24 | 85.76 | 95.53 | 69.13 | 47.46 | 80.23 | 67.23 |
| 91 | 794.85 | 196.20 | 1010.17 | 66.72 | 88.98 | 98.84 | 111.55 | 94.52 | 74.15 | 62.21 |
| 92 | 662.40 | 199.13 | 983.14 | 78.75 | 112.82 | 94.49 | 82.58 | 56.45 | 75.67 | 63.50 |
| 93 | 646.49 | 190.71 | 998.54 | 65.17 | 94.34 | 105.08 | 76.04 | 52.21 | 69.12 | 57.94 |
| 94 | 779.60 | 215.82 | 1111.19 | 58.66 | 97.88 | 108.72 | 104.17 | 77.14 | 82.97 | 69.60 |
| 95 | 663.44 | 191.38 | 975.06 | 53.06 | 105.76 | 104.23 | 76.51 | 57.28 | 75.14 | 63.09 |
| 96 | 581.84 | 171.64 | 1003.64 | 71.45 | 84.91 | 94.57 | 68.44 | 46.99 | 75.97 | 63.74 |
| 97 | 873.15 | 241.71 | 1244.53 | 56.06 | 109.62 | 121.77 | 116.67 | 86.40 | 78.59 | 65.96 |

Continúa 

| | | | | | | | | | | |
|-----|--------|--------|---------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| 98 | 743.06 | 214.34 | 1092.07 | 59.42 | 118.46 | 116.73 | 85.69 | 64.15 | 72.94 | 61.31 |
| 99 | 651.66 | 192.23 | 1026.08 | 82.29 | 95.09 | 105.92 | 76.65 | 52.63 | 71.74 | 60.16 |
| 100 | 768.37 | 212.71 | 1095.19 | 49.33 | 96.47 | 107.15 | 102.67 | 76.03 | 75.30 | 63.26 |
| 101 | 653.89 | 188.62 | 961.02 | 52.29 | 104.24 | 102.73 | 75.40 | 56.45 | 73.39 | 61.64 |
| 102 | 573.46 | 169.16 | 1000.47 | 72.41 | 83.68 | 93.21 | 67.45 | 46.31 | 78.39 | 65.79 |
| 103 | 837.53 | 231.85 | 1193.76 | 53.77 | 105.15 | 116.80 | 111.91 | 82.87 | 80.69 | 67.68 |
| 104 | 712.74 | 205.60 | 1047.51 | 57.00 | 113.62 | 111.97 | 82.19 | 61.53 | 78.36 | 65.84 |
| 105 | 625.07 | 184.39 | 1004.81 | 78.93 | 91.21 | 101.60 | 73.52 | 50.48 | 71.78 | 60.22 |
| 106 | 805.39 | 232.33 | 1183.69 | 64.41 | 128.39 | 126.53 | 92.88 | 69.53 | 71.17 | 59.69 |
| 107 | 706.33 | 208.36 | 1135.43 | 89.19 | 103.07 | 114.81 | 83.08 | 57.04 | 73.56 | 61.71 |
| 108 | 645.03 | 178.04 | 987.93 | 58.17 | 106.89 | 85.93 | 74.30 | 58.20 | 74.34 | 62.48 |
| 109 | 653.47 | 196.08 | 1004.51 | 60.79 | 94.99 | 99.07 | 88.72 | 70.16 | 45.81 | 38.59 |
| 110 | 606.84 | 182.42 | 1051.07 | 48.57 | 93.79 | 85.67 | 75.65 | 62.26 | 47.78 | 40.23 |
| 111 | 603.62 | 174.71 | 1014.17 | 43.42 | 78.42 | 95.26 | 69.66 | 47.83 | 44.73 | 37.75 |
| 112 | 705.75 | 211.77 | 1084.88 | 65.65 | 102.59 | 107.00 | 95.82 | 75.77 | 54.66 | 46.09 |
| 113 | 655.39 | 197.02 | 1135.16 | 52.45 | 101.29 | 92.52 | 81.70 | 67.24 | 53.20 | 44.90 |
| 114 | 651.91 | 188.69 | 1095.31 | 46.90 | 84.70 | 102.89 | 75.24 | 51.66 | 46.06 | 38.90 |
| 115 | 741.03 | 222.36 | 1139.12 | 68.94 | 107.72 | 112.35 | 100.61 | 79.56 | 65.00 | 54.72 |
| 116 | 688.16 | 206.87 | 1191.91 | 55.07 | 106.36 | 97.14 | 85.79 | 70.61 | 60.78 | 51.43 |
| 117 | 684.50 | 198.12 | 1150.07 | 49.24 | 88.93 | 108.03 | 79.00 | 54.24 | 63.02 | 53.15 |
| 118 | 703.98 | 211.24 | 1082.16 | 65.49 | 102.33 | 106.73 | 95.58 | 75.58 | 58.82 | 49.51 |

Continúa 

| | | | | | | | | | | |
|-----|--------|--------|---------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| 119 | 653.75 | 196.53 | 1132.32 | 52.32 | 101.04 | 92.29 | 81.50 | 67.07 | 52.97 | 44.84 |
| 120 | 650.28 | 188.21 | 1092.57 | 46.78 | 84.49 | 102.63 | 75.05 | 51.53 | 51.75 | 43.68 |
| 121 | 781.42 | 234.48 | 1065.38 | 72.69 | 113.59 | 118.47 | 106.10 | 83.89 | 51.47 | 43.44 |
| 122 | 725.66 | 218.14 | 1152.53 | 58.07 | 112.15 | 102.44 | 90.46 | 74.45 | 53.80 | 45.33 |
| 123 | 721.81 | 208.92 | 1003.47 | 51.93 | 93.78 | 113.92 | 83.30 | 57.20 | 49.16 | 41.61 |
| 124 | 797.05 | 239.17 | 1086.69 | 74.15 | 115.86 | 120.84 | 108.22 | 85.57 | 51.77 | 43.80 |
| 125 | 740.17 | 222.51 | 1175.58 | 59.24 | 114.40 | 104.49 | 92.27 | 75.94 | 50.01 | 42.28 |
| 126 | 736.24 | 213.10 | 1023.54 | 52.97 | 95.65 | 116.20 | 84.97 | 58.34 | 49.43 | 41.81 |
| 127 | 709.37 | 212.86 | 998.66 | 65.99 | 103.12 | 107.55 | 96.31 | 76.16 | 58.81 | 49.66 |
| 128 | 658.75 | 198.03 | 1046.27 | 52.72 | 101.81 | 92.99 | 82.12 | 67.59 | 56.76 | 48.06 |
| 129 | 655.26 | 189.66 | 1015.61 | 47.14 | 85.13 | 103.41 | 75.62 | 51.92 | 56.55 | 48.01 |
| 130 | 787.40 | 236.27 | 1108.51 | 73.25 | 114.46 | 119.38 | 106.91 | 84.54 | 64.74 | 54.41 |
| 131 | 731.22 | 219.81 | 1161.36 | 58.52 | 113.01 | 103.22 | 91.16 | 75.02 | 61.76 | 52.01 |
| 132 | 727.33 | 210.52 | 1127.33 | 52.32 | 94.50 | 114.79 | 83.94 | 57.63 | 56.25 | 47.39 |
| 133 | 818.90 | 245.73 | 1047.57 | 76.18 | 119.04 | 124.16 | 111.19 | 87.92 | 65.47 | 55.28 |
| 134 | 760.47 | 228.61 | 1207.81 | 60.86 | 117.53 | 107.35 | 94.80 | 78.02 | 59.35 | 49.94 |
| 135 | 756.43 | 218.94 | 1172.42 | 54.42 | 98.28 | 119.38 | 87.30 | 59.94 | 54.21 | 45.62 |
| 136 | 694.45 | 181.38 | 991.63 | 56.23 | 107.64 | 66.83 | 82.81 | 64.90 | 25.16 | 21.18 |
| 137 | 659.73 | 172.31 | 942.05 | 53.42 | 102.25 | 63.49 | 78.67 | 61.65 | 24.79 | 20.90 |
| 138 | 626.74 | 163.69 | 982.19 | 50.75 | 97.14 | 60.32 | 74.74 | 58.57 | 23.95 | 20.20 |
| 139 | 763.89 | 199.52 | 1090.80 | 61.85 | 118.40 | 73.52 | 91.09 | 71.38 | 26.41 | 22.36 |

Continúa 

| | | | | | | | | | | |
|-----|--------|--------|---------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 140 | 725.70 | 189.54 | 1036.26 | 58.76 | 112.48 | 69.84 | 86.54 | 67.82 | 24.36 | 20.69 |
| 141 | 689.41 | 180.06 | 1080.40 | 55.82 | 106.85 | 66.35 | 82.21 | 64.42 | 21.74 | 18.51 |
| 142 | 779.17 | 203.51 | 1112.61 | 63.09 | 120.77 | 74.99 | 92.91 | 72.81 | 30.49 | 25.81 |
| 143 | 740.21 | 193.33 | 1056.98 | 59.94 | 114.73 | 71.24 | 88.27 | 69.17 | 29.30 | 24.82 |
| 144 | 703.20 | 183.66 | 1102.01 | 56.94 | 108.99 | 67.68 | 83.85 | 65.71 | 24.41 | 20.61 |
| 145 | 685.67 | 179.09 | 979.10 | 55.52 | 106.27 | 65.99 | 81.76 | 64.07 | 20.63 | 17.42 |
| 146 | 651.39 | 170.13 | 1028.37 | 52.74 | 100.96 | 62.69 | 77.67 | 60.87 | 19.80 | 16.83 |
| 147 | 618.82 | 161.62 | 969.77 | 50.11 | 95.91 | 59.55 | 73.79 | 57.83 | 20.04 | 17.02 |
| 148 | 726.81 | 189.83 | 1037.84 | 58.85 | 112.65 | 69.95 | 86.67 | 67.92 | 23.64 | 19.93 |
| 149 | 690.47 | 180.34 | 992.07 | 55.91 | 107.02 | 66.45 | 82.33 | 64.52 | 24.10 | 20.33 |
| 150 | 655.95 | 171.32 | 988.67 | 53.11 | 101.67 | 63.13 | 78.22 | 61.30 | 21.46 | 18.06 |
| 151 | 792.22 | 206.92 | 1131.25 | 64.15 | 122.79 | 76.24 | 94.47 | 74.03 | 26.95 | 22.67 |
| 152 | 752.61 | 196.57 | 1081.36 | 60.94 | 116.65 | 72.43 | 89.74 | 70.33 | 24.27 | 20.40 |
| 153 | 714.98 | 186.74 | 975.83 | 57.89 | 110.82 | 68.81 | 85.26 | 66.81 | 23.79 | 20.02 |
| 154 | 673.39 | 175.88 | 961.56 | 54.53 | 104.37 | 64.81 | 80.30 | 62.93 | 21.18 | 17.92 |
| 155 | 639.72 | 167.08 | 1016.53 | 51.80 | 99.15 | 61.57 | 76.28 | 59.78 | 21.66 | 18.23 |
| 156 | 607.74 | 158.73 | 977.64 | 49.21 | 94.19 | 58.49 | 72.47 | 56.79 | 19.38 | 16.38 |
| 157 | 747.46 | 195.23 | 1067.33 | 60.52 | 115.85 | 71.94 | 89.13 | 69.85 | 20.59 | 17.42 |
| 158 | 710.09 | 185.46 | 932.23 | 57.50 | 110.06 | 68.34 | 84.67 | 66.36 | 19.18 | 16.26 |
| 159 | 674.59 | 176.19 | 1085.18 | 54.62 | 104.56 | 64.92 | 80.44 | 63.04 | 19.25 | 16.23 |
| 160 | 807.26 | 210.84 | 1055.16 | 65.37 | 125.12 | 77.69 | 96.26 | 75.44 | 27.33 | 23.08 |
| 161 | 766.90 | 200.30 | 987.20 | 62.10 | 118.86 | 73.81 | 91.45 | 71.67 | 25.93 | 21.84 |
| 162 | 728.55 | 190.29 | 1171.99 | 58.99 | 112.92 | 70.12 | 86.88 | 68.08 | 19.52 | 16.52 |

Tabla 19

Registro de temperaturas - réplica N°3

| Ord. | t1 (°C) | t2 (°C) | t3 (°C) | t4 (°C) | t5 (°C) | t6 (°C) | t7 (°C) | t8 (°C) | PCS (MJ/Kg) | PCI (MJ/Kg) |
|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------------|------------------------|
| 163 | 786.58 | 239.43 | 1044.69 | 73.17 | 128.43 | 119.26 | 109.88 | 84.45 | 84.24 | 70.61 |
| 164 | 730.45 | 222.75 | 1052.21 | 58.46 | 126.81 | 103.12 | 93.69 | 62.24 | 79.86 | 67.01 |
| 165 | 726.58 | 213.33 | 1015.54 | 52.27 | 106.03 | 114.67 | 86.27 | 57.57 | 79.93 | 67.13 |
| 166 | 832.68 | 208.50 | 1027.09 | 62.57 | 95.01 | 102.46 | 120.23 | 99.02 | 84.12 | 70.58 |
| 167 | 693.93 | 211.62 | 999.60 | 73.07 | 120.47 | 97.96 | 89.00 | 59.13 | 79.01 | 66.45 |
| 168 | 690.25 | 202.66 | 964.77 | 67.97 | 100.73 | 108.94 | 81.96 | 54.70 | 80.42 | 67.63 |
| 169 | 791.04 | 198.07 | 975.73 | 83.37 | 90.26 | 97.34 | 114.21 | 94.07 | 82.93 | 69.62 |
| 170 | 659.24 | 201.03 | 949.62 | 78.37 | 114.44 | 93.06 | 84.55 | 56.18 | 80.99 | 67.97 |
| 171 | 643.40 | 192.53 | 916.53 | 64.85 | 95.69 | 103.49 | 77.86 | 51.96 | 80.60 | 67.61 |
| 172 | 870.15 | 217.88 | 1073.31 | 73.04 | 99.28 | 107.07 | 125.64 | 103.47 | 72.09 | 60.54 |
| 173 | 725.16 | 221.14 | 1044.58 | 86.21 | 125.89 | 102.37 | 93.01 | 61.79 | 70.16 | 58.98 |
| 174 | 707.74 | 211.78 | 1008.18 | 71.34 | 105.26 | 113.84 | 85.65 | 57.16 | 63.29 | 53.15 |
| 175 | 853.46 | 239.67 | 1180.64 | 64.22 | 109.21 | 117.78 | 117.33 | 84.45 | 75.59 | 63.50 |
| 176 | 726.29 | 212.53 | 1036.00 | 58.08 | 118.01 | 112.91 | 86.17 | 62.70 | 74.40 | 62.50 |
| 177 | 636.96 | 190.61 | 973.41 | 78.22 | 94.74 | 102.46 | 77.08 | 51.44 | 71.11 | 59.78 |
| 178 | 955.87 | 268.43 | 1322.32 | 61.37 | 122.32 | 131.91 | 131.40 | 94.58 | 81.32 | 68.15 |

Continúa 

| | | | | | | | | | | |
|-----|--------|--------|---------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| 179 | 813.45 | 238.03 | 1160.32 | 65.05 | 132.17 | 126.46 | 96.51 | 70.23 | 79.72 | 66.91 |
| 180 | 713.40 | 213.48 | 1090.22 | 90.08 | 106.11 | 114.75 | 86.33 | 57.61 | 75.77 | 63.55 |
| 181 | 841.17 | 236.22 | 1163.64 | 54.01 | 107.64 | 116.08 | 115.64 | 83.23 | 78.87 | 66.23 |
| 182 | 715.84 | 209.47 | 1021.09 | 57.25 | 116.31 | 111.29 | 84.93 | 61.80 | 69.58 | 58.57 |
| 183 | 627.79 | 187.86 | 979.46 | 79.27 | 93.37 | 100.98 | 75.97 | 50.70 | 73.74 | 61.85 |
| 184 | 916.87 | 257.48 | 1268.36 | 58.87 | 117.33 | 126.53 | 126.04 | 90.72 | 70.67 | 59.49 |
| 185 | 780.26 | 228.32 | 1112.98 | 62.40 | 126.78 | 121.30 | 92.57 | 67.36 | 70.61 | 59.24 |
| 186 | 684.29 | 204.77 | 1067.61 | 86.41 | 101.78 | 110.07 | 82.81 | 55.26 | 62.25 | 52.30 |
| 187 | 881.69 | 258.00 | 1257.67 | 70.51 | 143.26 | 137.07 | 104.61 | 76.12 | 80.20 | 67.39 |
| 188 | 773.25 | 231.39 | 1206.39 | 97.64 | 115.01 | 124.38 | 93.58 | 62.45 | 81.25 | 68.32 |
| 189 | 706.14 | 197.72 | 1013.52 | 63.68 | 117.02 | 93.09 | 83.68 | 63.71 | 74.40 | 62.63 |
| 190 | 577.84 | 173.39 | 918.41 | 53.76 | 101.87 | 87.61 | 76.81 | 62.04 | 45.45 | 38.31 |
| 191 | 536.60 | 161.31 | 960.98 | 42.94 | 100.58 | 75.75 | 65.49 | 55.06 | 44.73 | 37.72 |
| 192 | 533.75 | 154.49 | 927.24 | 38.40 | 84.11 | 84.24 | 60.31 | 42.30 | 40.50 | 34.18 |
| 193 | 624.06 | 187.26 | 991.89 | 58.06 | 110.02 | 94.62 | 82.96 | 67.00 | 50.19 | 42.35 |
| 194 | 579.53 | 174.22 | 1037.86 | 46.38 | 108.63 | 81.81 | 70.73 | 59.46 | 51.25 | 43.27 |
| 195 | 576.45 | 166.85 | 1001.42 | 41.47 | 90.83 | 90.98 | 65.14 | 45.68 | 47.26 | 39.89 |
| 196 | 655.27 | 196.62 | 1041.48 | 60.96 | 115.52 | 99.35 | 87.10 | 70.35 | 63.92 | 53.96 |
| 197 | 608.51 | 182.93 | 1089.75 | 48.70 | 114.06 | 85.90 | 74.27 | 62.43 | 61.80 | 52.07 |
| 198 | 605.28 | 175.19 | 1051.50 | 43.54 | 95.38 | 95.53 | 68.39 | 47.96 | 61.47 | 51.89 |
| 199 | 622.50 | 186.79 | 989.41 | 57.91 | 109.75 | 94.38 | 82.75 | 66.83 | 54.08 | 45.50 |

Continúa 

| | | | | | | | | | | |
|-----|--------|--------|---------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| 200 | 578.08 | 173.78 | 1035.26 | 46.26 | 108.36 | 81.61 | 70.56 | 59.31 | 49.25 | 41.45 |
| 201 | 575.01 | 166.43 | 998.92 | 41.37 | 90.61 | 90.75 | 64.97 | 45.56 | 48.38 | 40.87 |
| 202 | 690.98 | 207.34 | 974.06 | 64.28 | 121.82 | 104.76 | 91.85 | 74.18 | 55.22 | 46.63 |
| 203 | 641.67 | 192.90 | 1053.74 | 51.35 | 120.28 | 90.58 | 78.32 | 65.84 | 54.85 | 46.25 |
| 204 | 638.26 | 184.74 | 917.46 | 45.92 | 100.57 | 100.73 | 72.12 | 50.58 | 49.51 | 42.00 |
| 205 | 704.80 | 211.49 | 993.55 | 65.57 | 124.25 | 106.86 | 93.69 | 75.67 | 52.41 | 44.26 |
| 206 | 654.50 | 196.75 | 1074.82 | 52.38 | 122.69 | 92.39 | 79.89 | 67.15 | 49.74 | 42.03 |
| 207 | 651.03 | 188.43 | 935.81 | 46.84 | 102.58 | 102.75 | 73.56 | 51.59 | 46.22 | 39.09 |
| 208 | 627.27 | 188.22 | 913.06 | 58.35 | 110.59 | 95.10 | 83.38 | 67.34 | 57.31 | 48.41 |
| 209 | 582.51 | 175.11 | 956.59 | 46.62 | 109.19 | 82.23 | 71.10 | 59.77 | 58.38 | 49.35 |
| 210 | 579.42 | 167.70 | 928.56 | 41.68 | 91.30 | 91.45 | 65.47 | 45.91 | 55.00 | 46.80 |
| 211 | 696.27 | 208.93 | 1013.49 | 64.77 | 122.75 | 105.56 | 92.56 | 74.75 | 64.58 | 54.38 |
| 212 | 646.59 | 194.37 | 1061.81 | 51.75 | 121.20 | 91.28 | 78.92 | 66.34 | 60.20 | 50.70 |
| 213 | 643.15 | 186.15 | 1030.70 | 46.27 | 101.34 | 101.50 | 72.67 | 50.96 | 57.97 | 49.14 |
| 214 | 724.12 | 217.28 | 957.78 | 67.36 | 127.66 | 109.79 | 96.26 | 77.74 | 60.84 | 51.23 |
| 215 | 672.45 | 202.15 | 1104.29 | 53.82 | 126.05 | 94.93 | 82.08 | 68.99 | 60.91 | 51.26 |
| 216 | 668.88 | 193.60 | 1071.93 | 48.12 | 105.40 | 105.56 | 75.58 | 53.00 | 53.62 | 45.22 |
| 217 | 586.84 | 153.27 | 949.13 | 47.52 | 91.78 | 56.48 | 69.35 | 54.84 | 24.61 | 20.82 |
| 218 | 557.50 | 145.61 | 901.68 | 45.14 | 87.19 | 53.65 | 65.89 | 52.10 | 21.85 | 18.46 |
| 219 | 529.62 | 138.33 | 940.09 | 42.89 | 82.83 | 50.97 | 62.59 | 49.49 | 20.46 | 17.33 |
| 220 | 645.53 | 168.60 | 1044.05 | 52.27 | 100.96 | 62.12 | 76.29 | 60.32 | 24.99 | 21.03 |

Continúa 

| | | | | | | | | | | |
|-----|--------|--------|---------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 221 | 613.25 | 160.17 | 991.85 | 49.66 | 95.91 | 59.02 | 72.47 | 57.31 | 24.03 | 20.34 |
| 222 | 582.59 | 152.16 | 1034.10 | 47.17 | 91.12 | 56.07 | 68.85 | 54.44 | 23.32 | 19.80 |
| 223 | 658.44 | 171.97 | 1064.93 | 53.32 | 102.98 | 63.37 | 77.81 | 61.53 | 25.31 | 21.36 |
| 224 | 625.51 | 163.37 | 1011.68 | 50.65 | 97.83 | 60.20 | 73.92 | 58.45 | 23.10 | 19.55 |
| 225 | 594.24 | 155.20 | 1054.78 | 48.12 | 92.94 | 57.19 | 70.23 | 55.53 | 23.69 | 20.05 |
| 226 | 579.42 | 151.34 | 937.14 | 46.92 | 90.62 | 55.76 | 68.48 | 54.15 | 24.82 | 20.95 |
| 227 | 550.45 | 143.77 | 984.30 | 44.57 | 86.09 | 52.97 | 65.05 | 51.44 | 19.06 | 16.07 |
| 228 | 522.93 | 136.58 | 928.21 | 42.34 | 81.79 | 50.33 | 61.80 | 48.87 | 20.72 | 17.55 |
| 229 | 614.19 | 160.42 | 993.37 | 49.73 | 96.06 | 59.11 | 72.58 | 57.39 | 25.55 | 21.58 |
| 230 | 583.48 | 152.39 | 949.56 | 47.25 | 91.26 | 56.15 | 68.96 | 54.53 | 20.79 | 17.47 |
| 231 | 554.31 | 144.78 | 946.30 | 44.88 | 86.69 | 53.35 | 65.51 | 51.80 | 18.95 | 15.97 |
| 232 | 669.47 | 174.85 | 1082.77 | 54.21 | 104.71 | 64.43 | 79.12 | 62.56 | 27.66 | 23.28 |
| 233 | 635.99 | 166.11 | 1035.02 | 51.50 | 99.47 | 61.21 | 75.16 | 59.43 | 25.35 | 21.40 |
| 234 | 604.19 | 157.80 | 934.00 | 48.92 | 94.50 | 58.15 | 71.40 | 56.46 | 19.79 | 16.77 |
| 235 | 569.05 | 148.63 | 920.35 | 46.08 | 89.00 | 54.76 | 67.25 | 53.18 | 21.82 | 18.58 |
| 236 | 540.59 | 141.19 | 972.97 | 43.77 | 84.55 | 52.03 | 63.89 | 50.52 | 24.42 | 20.57 |
| 237 | 513.56 | 134.13 | 935.74 | 41.58 | 80.32 | 49.42 | 60.69 | 47.99 | 18.49 | 15.63 |
| 238 | 631.64 | 164.97 | 1021.59 | 51.15 | 98.79 | 60.79 | 74.65 | 59.03 | 23.30 | 19.66 |
| 239 | 600.06 | 156.73 | 892.27 | 48.59 | 93.85 | 57.75 | 70.91 | 56.07 | 21.94 | 18.56 |
| 240 | 570.06 | 148.89 | 1038.67 | 46.16 | 89.16 | 54.86 | 67.37 | 53.27 | 19.38 | 16.42 |
| 241 | 682.17 | 178.17 | 1009.94 | 55.24 | 106.69 | 65.65 | 80.62 | 63.75 | 24.25 | 20.41 |
| 242 | 648.06 | 169.26 | 944.89 | 52.48 | 101.36 | 62.37 | 76.59 | 60.56 | 20.69 | 17.47 |
| 243 | 615.66 | 160.80 | 1121.76 | 49.85 | 96.29 | 59.25 | 72.76 | 57.53 | 20.30 | 17.19 |

4.2.3. ANÁLISIS DE MATERIAL PARTICULADO Y ALQUITRANES

El contenido de alquitrán y de impurezas (material particulado) en el gas de síntesis no se pudo realizar ya que tipo de pruebas requiere de equipos especiales y sus costos son elevados.

4.3. EVALUACIÓN ENERGÉTICA DEL GAS DE SÍNTESIS

4.3.1. BALANCE DE MASA

La ley de conservación de la materia dice que la materia no se crea ni se destruye, solo se transforma; esto quiere decir que en un sistema cerrado la materia permanece constante.

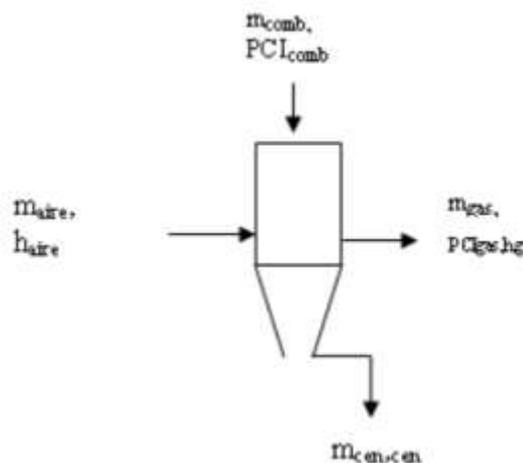


Figura 35 Flujo de masa y energía

Según la figura 39 el balance de masa se lo puede representar por:

$$\dot{m}_{biomasa} + \dot{m}_{aire} = \dot{m}_{gas} + \dot{m}_{cen}$$

El flujo másico de cenizas y de biomasa se obtuvieron experimentalmente; con la ayuda de la balanza del gasificador, se obtuvo el peso inicial de la biomasa y se determinó el tiempo de consumo de la misma, en el caso de la ceniza, esta fue pesada luego de realizado el proceso.

El flujo másico de aire se obtuvo a partir del aire que pasaba a través del Venturi (tubería de 1/2 de pulgada) cuando la apertura de la válvula era del 100, 50 y 25% y se consideró el 30% del flujo de aire calculado ya que la gasificación ocurre con defecto de aire como lo indica la figura 40.

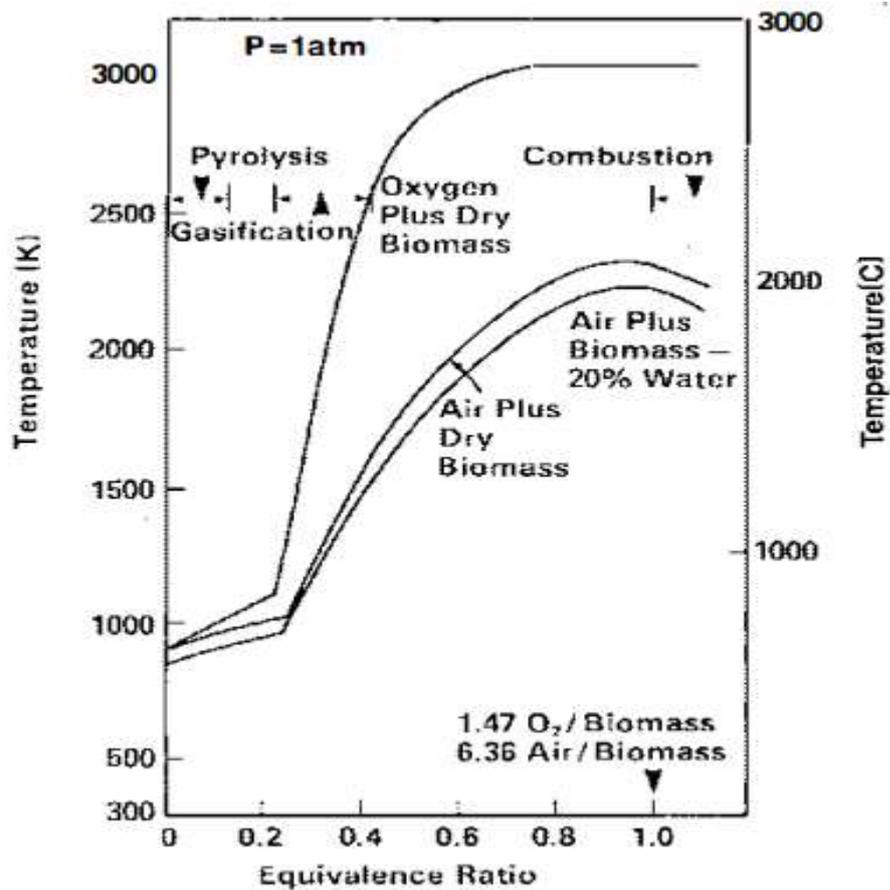


Figura 36 Reacción de temperatura adiabática para la biomasa

Fuente: (Reed, S., 1981)

Para el cálculo del flujo másico de aire:

$$\dot{m}_{aire} = 30\% \cdot A_{tubería} \cdot \delta \cdot V$$

Donde:

$$\delta = 1.18 \frac{Kg}{m^3} @ 25^{\circ}C$$

Tabla 20

Flujo másico de entrada de aire

| Apertura de la Válvula (%) | $\dot{m}_{aire} \left(\frac{Kg}{h} \right)$ |
|-------------------------------|--|
| 100 | 12.95 |
| 50 | 6.85 |
| 25 | 3.50 |

Dicho esto, las tablas 21, 22 y 23 muestra el promedio de los datos obtenidos para el balance de masa de los tres tipos de biomasa, aserrín, cascarilla de arroz y lechuguín.

Cabe mencionar que la humedad de la biomasa no fue un factor determinante en este análisis, ya que los valores obtenidos de tiempo y flujos másicos de ceniza y biomasa no variaron considerablemente por lo que se los consideró como constantes.

En el Anexo A se muestran los resultados en detalle del balance de masa en el gasificador.

Tabla 21

Balance de masa con el 100% de apertura de válvula de entrada de aire

| Biomasa | $\dot{m}_{biomasa}(kg/h)$ | $\dot{m}_{aire}(kg/h)$ | $\dot{m}_{ceniza}(kg/h)$ | $\dot{m}_{gas}(kg/h)$ |
|------------|---------------------------|------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Aserrín | 5.56 | 12.95 | 0.33 | 18.17 |
| Cascarilla | 7.14 | 12.95 | 0.79 | 19.31 |
| Lechuguín | 7.69 | 12.95 | 0.38 | 20.26 |

Tabla 22

Balance de masa con el 50% de apertura de válvula de entrada de aire

| Biomasa | $\dot{m}_{biomasa}(kg/h)$ | $\dot{m}_{aire}(kg/h)$ | $\dot{m}_{ceniza}(kg/h)$ | $\dot{m}_{gas}(kg/h)$ |
|----------------|---------------------------|------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Aserrín | 2.78 | 6.85 | 0.17 | 9.46 |
| Cascarilla | 3.57 | 6.85 | 0.39 | 10.03 |
| Lechuguín | 3.85 | 6.85 | 0.19 | 10.50 |

Tabla 23

Balance de masa con el 25% de apertura de válvula de entrada de aire

| Biomasa | $\dot{m}_{biomasa}(kg/h)$ | $\dot{m}_{aire}(kg/h)$ | $\dot{m}_{ceniza}(kg/h)$ | $\dot{m}_{gas}(kg/h)$ |
|----------------|---------------------------|------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Aserrín | 1.39 | 3.50 | 0.08 | 4.81 |
| Cascarilla | 1.79 | 3.50 | 0.20 | 5.09 |
| Lechuguín | 1.92 | 3.50 | 0.10 | 5.33 |

4.3.2. BALANCE DE ENERGÍA

Se realiza un balance de energía con el fin de determinar las pérdidas de calor del proceso de obtención de gas de síntesis. Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{biomasa} \times PCI_{biomasa} + \dot{m}_{aire} \times h_{aire} \\ = \dot{m}_{gas} \times PCI_{gas} + \dot{m}_{gas} \times h_{gas} + Q_{cen} \\ + Q_{perdido} \end{aligned}$$

Donde tenemos que:

$$h_{aire} = Cp_{aire} \cdot T(^{\circ}K)$$

$$h_{aire} = 1.005 \frac{kJ}{kg \cdot K} * (25 + 273.15)K$$

$$h_{aire} = 300 \frac{kJ}{kg}$$

Para el cálculo de la entalpía del gas producido (h_{gas}) se suman las entalpías de sus componentes.

$$h_{gas} = (C_{CO} \cdot h_{CO}) + (C_{CO2} \cdot h_{CO2}) + (C_{CH4} \cdot h_{CH4}) + (C_{H2} \cdot h_{H2})$$

$$h_{gas} = 2342.03 \frac{KJ}{Kg}$$

(Lesme J. et. al., 2008)

Para el cálculo del calor de cenizas Q_{cen} tenemos:

$$Q_{cen} = m_{cen} \times Cp_{cen} \times (T_{cen} - T_{\alpha})$$

Consideramos la temperatura ambiente de 25°C.

El calor específico de la ceniza:

$$Cp_{cen} = 0.96 \frac{KJ}{Kg}$$

En las tablas 24, 25 y 26 se muestran los valores del balance de energía realizado; y en el Anexo B, de forma más detallada.

4.3.3. EFICIENCIA DEL GASIFICADOR

Podemos calcular la eficiencia del gasificador en cada experimento realizado, tanto en frío como en caliente. (Ver Tablas 24, 25 y 26)

La eficiencia en frío ($\eta_{frío}$) se puede definir como la relación entre el flujo de energía en el gas y la energía contenida en el combustible. Se denomina eficiencia en frío, ya que no tiene en cuenta que el gas de síntesis que sale del gasificador está caliente. Cuanto mayor sea la $\eta_{frío}$, mejor será la conversión de combustible.

Por su parte, para el cálculo de la eficiencia en caliente (η_{cal}), se toma en cuenta que el gas sale con una elevada temperatura, y que este calor producto de la alta temperatura del gas también es útil y aprovechable, por lo tanto, a

veces, la eficiencia de gas caliente también se utiliza para aplicaciones térmica. (Phillips, J., 2012)

$$\eta_{cal} = \frac{\dot{m}_{gas} \cdot PCI_{gas} + \dot{m}_{gas} \cdot h_{gas}}{\dot{m}_{bio} \cdot PCI_{bio} + \dot{m}_{aire} \cdot h_{aire}}$$

$$\eta_{frío} = \frac{\dot{m}_{gas} \cdot PCI_{gas}}{\dot{m}_{bio} \cdot PCI_{bio} + \dot{m}_{aire} \cdot h_{aire}}$$

(Lesme J. et. al., 2008)

Tabla 24

Balance de energía y eficiencia – réplica N°1

| Ord | Biomasa | $\dot{m}_{bio} \cdot PCI_{bio}$ (kW) | $\dot{m}_{aire} \cdot h_{aire}$ (kW) | $\dot{m}_{gas} \cdot PCI_{gas}$ (kW) | $\dot{m}_{gas} \cdot h_{gas}$ (kW) | \dot{Q}_{ceniza} (kW) | $\dot{Q}_{perdido}$ (kW) | $\eta_{cat}(\%)$ | $\eta_{frio}(\%)$ |
|-----|---------|---|---|---|---------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|------------------|-------------------|
| 1 | Aserrín | 29.32 | 1.08 | 14.20 | 11.82 | 0.085 | 4.29 | 85.59 | 46.71 |
| 2 | Aserrín | 29.32 | 1.08 | 13.69 | 11.82 | 0.084 | 4.80 | 83.92 | 45.03 |
| 3 | Aserrín | 29.32 | 1.08 | 13.53 | 11.82 | 0.067 | 4.98 | 83.38 | 44.50 |
| 4 | Aserrín | 29.32 | 1.08 | 13.90 | 11.82 | 0.057 | 4.62 | 84.62 | 45.73 |
| 5 | Aserrín | 29.32 | 1.08 | 13.71 | 11.82 | 0.079 | 4.79 | 83.98 | 45.09 |
| 6 | Aserrín | 29.32 | 1.08 | 13.80 | 11.82 | 0.062 | 4.71 | 84.29 | 45.40 |
| 7 | Aserrín | 29.32 | 1.08 | 14.26 | 11.82 | 0.053 | 4.27 | 85.79 | 46.90 |
| 8 | Aserrín | 29.32 | 1.08 | 14.10 | 11.82 | 0.074 | 4.41 | 85.25 | 46.36 |
| 9 | Aserrín | 29.32 | 1.08 | 13.37 | 11.82 | 0.058 | 5.15 | 82.87 | 43.98 |
| 10 | Aserrín | 14.67 | 0.57 | 6.32 | 6.16 | 0.031 | 2.74 | 81.85 | 41.47 |
| 11 | Aserrín | 14.67 | 0.57 | 5.77 | 6.16 | 0.042 | 3.28 | 78.20 | 37.82 |
| 12 | Aserrín | 14.67 | 0.57 | 4.75 | 6.16 | 0.033 | 4.30 | 71.54 | 31.16 |
| 13 | Aserrín | 14.67 | 0.57 | 7.00 | 6.16 | 0.035 | 2.05 | 86.30 | 45.92 |
| 14 | Aserrín | 14.67 | 0.57 | 7.02 | 6.16 | 0.038 | 2.03 | 86.41 | 46.03 |
| 15 | Aserrín | 14.67 | 0.57 | 6.21 | 6.16 | 0.029 | 2.85 | 81.14 | 40.76 |
| 16 | Aserrín | 14.67 | 0.57 | 7.06 | 6.16 | 0.040 | 1.99 | 86.68 | 46.30 |

Continúa 

| | | | | | | | | | |
|----|------------|-------|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|
| 17 | Aserrín | 14.67 | 0.57 | 6.47 | 6.16 | 0.044 | 2.57 | 82.85 | 42.48 |
| 18 | Aserrín | 14.67 | 0.57 | 7.36 | 6.16 | 0.033 | 1.69 | 88.68 | 48.30 |
| 19 | Aserrín | 7.34 | 0.29 | 3.41 | 3.13 | 0.017 | 1.07 | 85.72 | 44.73 |
| 20 | Aserrín | 7.34 | 0.29 | 3.09 | 3.13 | 0.019 | 1.39 | 81.55 | 40.57 |
| 21 | Aserrín | 7.34 | 0.29 | 3.61 | 3.13 | 0.014 | 0.88 | 88.29 | 47.30 |
| 22 | Aserrín | 7.34 | 0.29 | 3.45 | 3.13 | 0.019 | 1.04 | 86.16 | 45.18 |
| 23 | Aserrín | 7.34 | 0.29 | 3.16 | 3.13 | 0.021 | 1.32 | 82.47 | 41.49 |
| 24 | Aserrín | 7.34 | 0.29 | 2.55 | 3.13 | 0.016 | 1.94 | 74.35 | 33.37 |
| 25 | Aserrín | 7.34 | 0.29 | 3.46 | 3.13 | 0.024 | 1.02 | 86.35 | 45.37 |
| 26 | Aserrín | 7.34 | 0.29 | 3.26 | 3.13 | 0.019 | 1.23 | 83.69 | 42.70 |
| 27 | Aserrín | 7.34 | 0.29 | 2.99 | 3.13 | 0.019 | 1.50 | 80.14 | 39.16 |
| 28 | Cascarilla | 27.37 | 1.08 | 9.14 | 12.56 | 0.151 | 6.60 | 76.27 | 32.12 |
| 29 | Cascarilla | 27.37 | 1.08 | 8.21 | 12.56 | 0.148 | 7.53 | 73.02 | 28.87 |
| 30 | Cascarilla | 27.37 | 1.08 | 7.66 | 12.56 | 0.115 | 8.11 | 71.09 | 26.93 |
| 31 | Cascarilla | 27.37 | 1.08 | 9.43 | 12.56 | 0.167 | 6.29 | 77.29 | 33.14 |
| 32 | Cascarilla | 27.37 | 1.08 | 8.89 | 12.56 | 0.164 | 6.84 | 75.39 | 31.24 |
| 33 | Cascarilla | 27.37 | 1.08 | 9.01 | 12.56 | 0.129 | 6.75 | 75.83 | 31.68 |
| 34 | Cascarilla | 27.37 | 1.08 | 11.36 | 12.56 | 0.178 | 4.35 | 84.07 | 39.92 |
| 35 | Cascarilla | 27.37 | 1.08 | 11.06 | 12.56 | 0.175 | 4.66 | 83.02 | 38.86 |
| 36 | Cascarilla | 27.37 | 1.08 | 10.83 | 12.56 | 0.138 | 4.92 | 82.23 | 38.08 |
| 37 | Cascarilla | 13.69 | 0.57 | 5.18 | 6.52 | 0.083 | 2.46 | 82.13 | 36.36 |

Continúa 

| | | | | | | | | | |
|----|------------|-------|------|------|------|-------|------|-------|-------|
| 38 | Cascarilla | 13.69 | 0.57 | 4.97 | 6.52 | 0.082 | 2.68 | 80.61 | 34.84 |
| 39 | Cascarilla | 13.69 | 0.57 | 4.75 | 6.52 | 0.064 | 2.91 | 79.11 | 33.34 |
| 40 | Cascarilla | 13.69 | 0.57 | 5.25 | 6.52 | 0.095 | 2.39 | 82.59 | 36.82 |
| 41 | Cascarilla | 13.69 | 0.57 | 5.04 | 6.52 | 0.094 | 2.60 | 81.14 | 35.37 |
| 42 | Cascarilla | 13.69 | 0.57 | 4.93 | 6.52 | 0.074 | 2.73 | 80.32 | 34.56 |
| 43 | Cascarilla | 13.69 | 0.57 | 4.68 | 6.52 | 0.098 | 2.96 | 78.57 | 32.81 |
| 44 | Cascarilla | 13.69 | 0.57 | 4.88 | 6.52 | 0.096 | 2.76 | 79.99 | 34.22 |
| 45 | Cascarilla | 13.69 | 0.57 | 4.94 | 6.52 | 0.076 | 2.71 | 80.42 | 34.66 |
| 46 | Cascarilla | 6.86 | 0.29 | 2.92 | 3.31 | 0.042 | 0.88 | 87.14 | 40.85 |
| 47 | Cascarilla | 6.86 | 0.29 | 2.85 | 3.31 | 0.041 | 0.95 | 86.11 | 39.83 |
| 48 | Cascarilla | 6.86 | 0.29 | 2.84 | 3.31 | 0.032 | 0.97 | 86.06 | 39.77 |
| 49 | Cascarilla | 6.86 | 0.29 | 3.24 | 3.31 | 0.048 | 0.56 | 91.51 | 45.22 |
| 50 | Cascarilla | 6.86 | 0.29 | 2.85 | 3.31 | 0.047 | 0.95 | 86.11 | 39.83 |
| 51 | Cascarilla | 6.86 | 0.29 | 2.43 | 3.31 | 0.037 | 1.37 | 80.28 | 33.99 |
| 52 | Cascarilla | 6.86 | 0.29 | 3.11 | 3.31 | 0.051 | 0.68 | 89.73 | 43.45 |
| 53 | Cascarilla | 6.86 | 0.29 | 3.07 | 3.31 | 0.050 | 0.73 | 89.14 | 42.86 |
| 54 | Cascarilla | 6.86 | 0.29 | 2.66 | 3.31 | 0.039 | 1.14 | 83.51 | 37.22 |
| 55 | Lechuguín | 12.82 | 2.16 | 4.45 | 7.91 | 0.075 | 2.54 | 82.51 | 29.71 |
| 56 | Lechuguín | 12.82 | 2.16 | 4.33 | 7.91 | 0.070 | 2.67 | 81.72 | 28.91 |
| 57 | Lechuguín | 12.82 | 2.16 | 4.61 | 7.91 | 0.065 | 2.39 | 83.58 | 30.77 |
| 58 | Lechuguín | 12.82 | 2.16 | 4.60 | 7.91 | 0.085 | 2.38 | 83.51 | 30.71 |

Continúa 

| | | | | | | | | | |
|----|-----------|-------|------|------|------|-------|------|-------|-------|
| 59 | Lechuguín | 12.82 | 2.16 | 4.30 | 7.91 | 0.079 | 2.69 | 81.53 | 28.73 |
| 60 | Lechuguín | 12.82 | 2.16 | 3.81 | 7.91 | 0.074 | 3.18 | 78.27 | 25.47 |
| 61 | Lechuguín | 12.82 | 2.16 | 5.26 | 7.91 | 0.087 | 1.72 | 87.91 | 35.11 |
| 62 | Lechuguín | 12.82 | 2.16 | 5.04 | 7.91 | 0.081 | 1.95 | 86.45 | 33.65 |
| 63 | Lechuguín | 12.82 | 2.16 | 4.83 | 7.91 | 0.076 | 2.16 | 85.07 | 32.26 |
| 64 | Lechuguín | 6.42 | 1.14 | 2.26 | 4.10 | 0.037 | 1.16 | 84.13 | 29.89 |
| 65 | Lechuguín | 6.42 | 1.14 | 2.05 | 4.10 | 0.034 | 1.37 | 81.39 | 27.14 |
| 66 | Lechuguín | 6.42 | 1.14 | 2.15 | 4.10 | 0.032 | 1.28 | 82.63 | 28.38 |
| 67 | Lechuguín | 6.42 | 1.14 | 2.33 | 4.10 | 0.040 | 1.09 | 85.08 | 30.83 |
| 68 | Lechuguín | 6.42 | 1.14 | 2.19 | 4.10 | 0.037 | 1.23 | 83.26 | 29.02 |
| 69 | Lechuguín | 6.42 | 1.14 | 2.17 | 4.10 | 0.035 | 1.25 | 83.02 | 28.78 |
| 70 | Lechuguín | 6.42 | 1.14 | 2.45 | 4.10 | 0.044 | 0.96 | 86.72 | 32.47 |
| 71 | Lechuguín | 6.42 | 1.14 | 2.43 | 4.10 | 0.042 | 0.99 | 86.35 | 32.10 |
| 72 | Lechuguín | 6.42 | 1.14 | 2.14 | 4.10 | 0.039 | 1.28 | 82.56 | 28.32 |
| 73 | Lechuguín | 3.20 | 0.58 | 1.10 | 2.08 | 0.018 | 0.58 | 84.13 | 29.17 |
| 74 | Lechuguín | 3.20 | 0.58 | 1.10 | 2.08 | 0.017 | 0.59 | 83.99 | 29.03 |
| 75 | Lechuguín | 3.20 | 0.58 | 0.96 | 2.08 | 0.016 | 0.73 | 80.31 | 25.35 |
| 76 | Lechuguín | 3.20 | 0.58 | 1.18 | 2.08 | 0.021 | 0.50 | 86.24 | 31.28 |
| 77 | Lechuguín | 3.20 | 0.58 | 1.10 | 2.08 | 0.019 | 0.58 | 84.17 | 29.21 |
| 78 | Lechuguín | 3.20 | 0.58 | 1.12 | 2.08 | 0.018 | 0.57 | 84.48 | 29.52 |
| 79 | Lechuguín | 3.20 | 0.58 | 1.32 | 2.08 | 0.023 | 0.36 | 89.80 | 34.84 |
| 80 | Lechuguín | 3.20 | 0.58 | 1.20 | 2.08 | 0.021 | 0.48 | 86.70 | 31.74 |
| 81 | Lechuguín | 3.20 | 0.58 | 1.02 | 2.08 | 0.020 | 0.66 | 81.91 | 26.95 |

Tabla 25

Balance de energía y eficiencia – réplica N°2

| Ord | Biomasa | $\dot{m}_{bio} \cdot PCI_{bio}$ (kW) | $\dot{m}_{aire} \cdot h_{aire}$ (kW) | $\dot{m}_{gas} \cdot PCI_{gas}$ (kW) | $\dot{m}_{gas} \cdot h_{gas}$ (kW) | \dot{Q}_{ceniza} (kW) | $\dot{Q}_{perdido}$ (kW) | η_{cal} (%) | η_{frio} (%) |
|-----|---------|---|---|---|---------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|------------------|-------------------|
| 82 | Aserrín | 29.32 | 1.08 | 13.78 | 11.82 | 0.080 | 4.72 | 84.22 | 45.34 |
| 83 | Aserrín | 29.32 | 1.08 | 13.82 | 11.82 | 0.079 | 4.68 | 84.34 | 45.45 |
| 84 | Aserrín | 29.32 | 1.08 | 13.42 | 11.82 | 0.062 | 5.09 | 83.05 | 44.16 |
| 85 | Aserrín | 29.32 | 1.08 | 13.52 | 11.82 | 0.053 | 5.00 | 83.38 | 44.49 |
| 86 | Aserrín | 29.32 | 1.08 | 13.11 | 11.82 | 0.074 | 5.40 | 82.00 | 43.12 |
| 87 | Aserrín | 29.32 | 1.08 | 13.58 | 11.82 | 0.058 | 4.94 | 83.56 | 44.67 |
| 88 | Aserrín | 29.32 | 1.08 | 14.11 | 11.82 | 0.050 | 4.42 | 85.29 | 46.40 |
| 89 | Aserrín | 29.32 | 1.08 | 13.57 | 11.82 | 0.069 | 4.94 | 83.53 | 44.64 |
| 90 | Aserrín | 29.32 | 1.08 | 13.58 | 11.82 | 0.054 | 4.95 | 83.54 | 44.65 |
| 91 | Aserrín | 14.67 | 0.57 | 6.54 | 6.16 | 0.028 | 2.52 | 83.28 | 42.91 |
| 92 | Aserrín | 14.67 | 0.57 | 6.68 | 6.16 | 0.039 | 2.37 | 84.17 | 43.79 |
| 93 | Aserrín | 14.67 | 0.57 | 6.09 | 6.16 | 0.031 | 2.97 | 80.34 | 39.96 |
| 94 | Aserrín | 14.67 | 0.57 | 7.32 | 6.16 | 0.032 | 1.74 | 88.38 | 48.00 |
| 95 | Aserrín | 14.67 | 0.57 | 6.63 | 6.16 | 0.036 | 2.42 | 83.89 | 43.51 |
| 96 | Aserrín | 14.67 | 0.57 | 6.70 | 6.16 | 0.027 | 2.36 | 84.34 | 43.96 |
| 97 | Aserrín | 14.67 | 0.57 | 6.93 | 6.16 | 0.038 | 2.12 | 85.87 | 45.49 |

Continúa 

| | | | | | | | | | |
|-----|------------|-------|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|
| 98 | Aserrín | 14.67 | 0.57 | 6.45 | 6.16 | 0.042 | 2.60 | 82.66 | 42.28 |
| 99 | Aserrín | 14.67 | 0.57 | 6.32 | 6.16 | 0.031 | 2.73 | 81.87 | 41.49 |
| 100 | Aserrín | 7.34 | 0.29 | 3.38 | 3.13 | 0.016 | 1.11 | 85.27 | 44.28 |
| 101 | Aserrín | 7.34 | 0.29 | 3.29 | 3.13 | 0.018 | 1.19 | 84.14 | 43.15 |
| 102 | Aserrín | 7.34 | 0.29 | 3.51 | 3.13 | 0.013 | 0.98 | 87.04 | 46.05 |
| 103 | Aserrín | 7.34 | 0.29 | 3.61 | 3.13 | 0.018 | 0.87 | 88.36 | 47.37 |
| 104 | Aserrín | 7.34 | 0.29 | 3.52 | 3.13 | 0.020 | 0.97 | 87.08 | 46.09 |
| 105 | Aserrín | 7.34 | 0.29 | 3.22 | 3.13 | 0.015 | 1.27 | 83.14 | 42.16 |
| 106 | Aserrín | 7.34 | 0.29 | 3.19 | 3.13 | 0.023 | 1.29 | 82.77 | 41.79 |
| 107 | Aserrín | 7.34 | 0.29 | 3.30 | 3.13 | 0.017 | 1.19 | 84.18 | 43.20 |
| 108 | Aserrín | 7.34 | 0.29 | 3.34 | 3.13 | 0.018 | 1.15 | 84.72 | 43.74 |
| 109 | Cascarilla | 27.37 | 1.08 | 8.28 | 12.56 | 0.147 | 7.46 | 73.25 | 29.10 |
| 110 | Cascarilla | 27.37 | 1.08 | 8.63 | 12.56 | 0.144 | 7.11 | 74.49 | 30.34 |
| 111 | Cascarilla | 27.37 | 1.08 | 8.10 | 12.56 | 0.112 | 7.68 | 72.62 | 28.47 |
| 112 | Cascarilla | 27.37 | 1.08 | 9.89 | 12.56 | 0.163 | 5.84 | 78.91 | 34.76 |
| 113 | Cascarilla | 27.37 | 1.08 | 9.63 | 12.56 | 0.160 | 6.10 | 78.01 | 33.86 |
| 114 | Cascarilla | 27.37 | 1.08 | 8.35 | 12.56 | 0.125 | 7.42 | 73.49 | 29.33 |
| 115 | Cascarilla | 27.37 | 1.08 | 11.74 | 12.56 | 0.173 | 3.98 | 85.41 | 41.26 |
| 116 | Cascarilla | 27.37 | 1.08 | 11.03 | 12.56 | 0.170 | 4.68 | 82.93 | 38.78 |
| 117 | Cascarilla | 27.37 | 1.08 | 11.40 | 12.56 | 0.134 | 4.35 | 84.23 | 40.08 |
| 118 | Cascarilla | 13.69 | 0.57 | 5.52 | 6.52 | 0.081 | 2.13 | 84.47 | 38.70 |

Continúa 

| | | | | | | | | | |
|-----|------------|-------|------|------|------|-------|------|-------|-------|
| 119 | Cascarilla | 13.69 | 0.57 | 5.00 | 6.52 | 0.080 | 2.66 | 80.82 | 35.05 |
| 120 | Cascarilla | 13.69 | 0.57 | 4.87 | 6.52 | 0.062 | 2.80 | 79.91 | 34.14 |
| 121 | Cascarilla | 13.69 | 0.57 | 4.84 | 6.52 | 0.093 | 2.80 | 79.72 | 33.96 |
| 122 | Cascarilla | 13.69 | 0.57 | 5.05 | 6.52 | 0.091 | 2.59 | 81.19 | 35.43 |
| 123 | Cascarilla | 13.69 | 0.57 | 4.64 | 6.52 | 0.072 | 3.02 | 78.29 | 32.52 |
| 124 | Cascarilla | 13.69 | 0.57 | 4.88 | 6.52 | 0.095 | 2.76 | 80.00 | 34.24 |
| 125 | Cascarilla | 13.69 | 0.57 | 4.71 | 6.52 | 0.094 | 2.93 | 78.81 | 33.05 |
| 126 | Cascarilla | 13.69 | 0.57 | 4.66 | 6.52 | 0.074 | 3.00 | 78.44 | 32.68 |
| 127 | Cascarilla | 6.86 | 0.29 | 2.81 | 3.31 | 0.041 | 0.99 | 85.54 | 39.25 |
| 128 | Cascarilla | 6.86 | 0.29 | 2.72 | 3.31 | 0.040 | 1.08 | 84.27 | 37.99 |
| 129 | Cascarilla | 6.86 | 0.29 | 2.71 | 3.31 | 0.031 | 1.10 | 84.24 | 37.95 |
| 130 | Cascarilla | 6.86 | 0.29 | 3.08 | 3.31 | 0.047 | 0.72 | 89.30 | 43.01 |
| 131 | Cascarilla | 6.86 | 0.29 | 2.94 | 3.31 | 0.046 | 0.86 | 87.40 | 41.11 |
| 132 | Cascarilla | 6.86 | 0.29 | 2.68 | 3.31 | 0.036 | 1.13 | 83.74 | 37.46 |
| 133 | Cascarilla | 6.86 | 0.29 | 3.13 | 3.31 | 0.049 | 0.67 | 89.98 | 43.70 |
| 134 | Cascarilla | 6.86 | 0.29 | 2.82 | 3.31 | 0.048 | 0.97 | 85.76 | 39.48 |
| 135 | Cascarilla | 6.86 | 0.29 | 2.58 | 3.31 | 0.038 | 1.22 | 82.35 | 36.06 |
| 136 | Lechuguín | 12.82 | 2.16 | 4.77 | 7.91 | 0.085 | 2.22 | 84.64 | 31.84 |
| 137 | Lechuguín | 12.82 | 2.16 | 4.70 | 7.91 | 0.079 | 2.28 | 84.22 | 31.42 |
| 138 | Lechuguín | 12.82 | 2.16 | 4.55 | 7.91 | 0.074 | 2.45 | 83.17 | 30.36 |
| 139 | Lechuguín | 12.82 | 2.16 | 5.03 | 7.91 | 0.096 | 1.94 | 86.41 | 33.61 |

Continúa 

| | | | | | | | | | |
|-----|-----------|-------|------|------|------|-------|------|-------|-------|
| 140 | Lechuguín | 12.82 | 2.16 | 4.66 | 7.91 | 0.090 | 2.32 | 83.90 | 31.10 |
| 141 | Lechuguín | 12.82 | 2.16 | 4.17 | 7.91 | 0.084 | 2.82 | 80.63 | 27.83 |
| 142 | Lechuguín | 12.82 | 2.16 | 5.81 | 7.91 | 0.098 | 1.16 | 91.60 | 38.79 |
| 143 | Lechuguín | 12.82 | 2.16 | 5.59 | 7.91 | 0.092 | 1.39 | 90.11 | 37.30 |
| 144 | Lechuguín | 12.82 | 2.16 | 4.64 | 7.91 | 0.086 | 2.34 | 83.78 | 30.98 |
| 145 | Lechuguín | 6.42 | 1.14 | 2.03 | 4.10 | 0.042 | 1.38 | 81.14 | 26.90 |
| 146 | Lechuguín | 6.42 | 1.14 | 1.96 | 4.10 | 0.039 | 1.45 | 80.23 | 25.99 |
| 147 | Lechuguín | 6.42 | 1.14 | 1.99 | 4.10 | 0.036 | 1.44 | 80.52 | 26.28 |
| 148 | Lechuguín | 6.42 | 1.14 | 2.33 | 4.10 | 0.045 | 1.09 | 85.01 | 30.77 |
| 149 | Lechuguín | 6.42 | 1.14 | 2.37 | 4.10 | 0.042 | 1.04 | 85.64 | 31.39 |
| 150 | Lechuguín | 6.42 | 1.14 | 2.11 | 4.10 | 0.039 | 1.31 | 82.13 | 27.89 |
| 151 | Lechuguín | 6.42 | 1.14 | 2.65 | 4.10 | 0.050 | 0.76 | 89.25 | 35.01 |
| 152 | Lechuguín | 6.42 | 1.14 | 2.38 | 4.10 | 0.047 | 1.03 | 85.75 | 31.50 |
| 153 | Lechuguín | 6.42 | 1.14 | 2.34 | 4.10 | 0.044 | 1.08 | 85.17 | 30.92 |
| 154 | Lechuguín | 3.20 | 0.58 | 1.06 | 2.08 | 0.020 | 0.62 | 83.00 | 28.04 |
| 155 | Lechuguín | 3.20 | 0.58 | 1.08 | 2.08 | 0.019 | 0.61 | 83.48 | 28.52 |
| 156 | Lechuguín | 3.20 | 0.58 | 0.97 | 2.08 | 0.018 | 0.72 | 80.59 | 25.63 |
| 157 | Lechuguín | 3.20 | 0.58 | 1.03 | 2.08 | 0.023 | 0.65 | 82.21 | 27.25 |
| 158 | Lechuguín | 3.20 | 0.58 | 0.96 | 2.08 | 0.022 | 0.72 | 80.40 | 25.44 |
| 159 | Lechuguín | 3.20 | 0.58 | 0.96 | 2.08 | 0.020 | 0.72 | 80.36 | 25.40 |
| 160 | Lechuguín | 3.20 | 0.58 | 1.37 | 2.08 | 0.026 | 0.31 | 91.07 | 36.11 |
| 161 | Lechuguín | 3.20 | 0.58 | 1.29 | 2.08 | 0.024 | 0.39 | 89.12 | 34.16 |
| 162 | Lechuguín | 3.20 | 0.58 | 0.98 | 2.08 | 0.023 | 0.70 | 80.81 | 25.85 |

Tabla 26

Balance de energía y eficiencia – réplica N°3

| Ord | Biomasa | $\dot{m}_{bio} \cdot PCI_{bio}$ (kW) | $\dot{m}_{aire} \cdot h_{aire}$ (kW) | $\dot{m}_{gas} \cdot PCI_{gas}$ (kW) | $\dot{m}_{gas} \cdot h_{gas}$ (kW) | \dot{Q}_{ceniza} (kW) | $\dot{Q}_{perdido}$ (kW) | $\eta_{cal}(\%)$ | $\eta_{frio}(\%)$ |
|-----|---------|---|---|---|---------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|------------------|-------------------|
| 163 | Aserrín | 29.32 | 1.08 | 14.26 | 11.82 | 0.092 | 4.23 | 85.79 | 46.90 |
| 164 | Aserrín | 29.32 | 1.08 | 13.53 | 11.82 | 0.090 | 4.96 | 83.39 | 44.51 |
| 165 | Aserrín | 29.32 | 1.08 | 13.55 | 11.82 | 0.072 | 4.95 | 83.47 | 44.59 |
| 166 | Aserrín | 29.32 | 1.08 | 14.25 | 11.82 | 0.062 | 4.26 | 85.77 | 46.88 |
| 167 | Aserrín | 29.32 | 1.08 | 13.42 | 11.82 | 0.085 | 5.08 | 83.03 | 44.14 |
| 168 | Aserrín | 29.32 | 1.08 | 13.65 | 11.82 | 0.067 | 4.86 | 83.80 | 44.92 |
| 169 | Aserrín | 29.32 | 1.08 | 14.06 | 11.82 | 0.058 | 4.46 | 85.13 | 46.24 |
| 170 | Aserrín | 29.32 | 1.08 | 13.72 | 11.82 | 0.080 | 4.77 | 84.04 | 45.15 |
| 171 | Aserrín | 29.32 | 1.08 | 13.65 | 11.82 | 0.063 | 4.86 | 83.79 | 44.90 |
| 172 | Aserrín | 14.67 | 0.57 | 6.36 | 6.16 | 0.033 | 2.69 | 82.13 | 41.75 |
| 173 | Aserrín | 14.67 | 0.57 | 6.20 | 6.16 | 0.045 | 2.84 | 81.05 | 40.67 |
| 174 | Aserrín | 14.67 | 0.57 | 5.59 | 6.16 | 0.036 | 3.46 | 77.03 | 36.66 |
| 175 | Aserrín | 14.67 | 0.57 | 6.68 | 6.16 | 0.037 | 2.38 | 84.17 | 43.79 |
| 176 | Aserrín | 14.67 | 0.57 | 6.57 | 6.16 | 0.041 | 2.48 | 83.48 | 43.10 |
| 177 | Aserrín | 14.67 | 0.57 | 6.28 | 6.16 | 0.031 | 2.77 | 81.61 | 41.23 |
| 178 | Aserrín | 14.67 | 0.57 | 7.16 | 6.16 | 0.043 | 1.88 | 87.38 | 47.00 |

Continúa 

| | | | | | | | | | |
|-----|------------|-------|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|
| 179 | Aserrín | 14.67 | 0.57 | 7.03 | 6.16 | 0.048 | 2.01 | 86.53 | 46.15 |
| 180 | Aserrín | 14.67 | 0.57 | 6.68 | 6.16 | 0.036 | 2.37 | 84.21 | 43.83 |
| 181 | Aserrín | 7.34 | 0.29 | 3.54 | 3.13 | 0.018 | 0.95 | 87.35 | 46.36 |
| 182 | Aserrín | 7.34 | 0.29 | 3.13 | 3.13 | 0.020 | 1.35 | 81.98 | 41.00 |
| 183 | Aserrín | 7.34 | 0.29 | 3.30 | 3.13 | 0.015 | 1.18 | 84.28 | 43.30 |
| 184 | Aserrín | 7.34 | 0.29 | 3.18 | 3.13 | 0.021 | 1.30 | 82.63 | 41.65 |
| 185 | Aserrín | 7.34 | 0.29 | 3.16 | 3.13 | 0.023 | 1.32 | 82.46 | 41.47 |
| 186 | Aserrín | 7.34 | 0.29 | 2.79 | 3.13 | 0.017 | 1.69 | 77.60 | 36.61 |
| 187 | Aserrín | 7.34 | 0.29 | 3.60 | 3.13 | 0.026 | 0.88 | 88.16 | 47.17 |
| 188 | Aserrín | 7.34 | 0.29 | 3.65 | 3.13 | 0.020 | 0.83 | 88.81 | 47.83 |
| 189 | Aserrín | 7.34 | 0.29 | 3.34 | 3.13 | 0.020 | 1.14 | 84.83 | 43.84 |
| 190 | Cascarilla | 27.37 | 1.08 | 8.22 | 12.56 | 0.161 | 7.51 | 73.04 | 28.88 |
| 191 | Cascarilla | 27.37 | 1.08 | 8.09 | 12.56 | 0.158 | 7.64 | 72.59 | 28.44 |
| 192 | Cascarilla | 27.37 | 1.08 | 7.33 | 12.56 | 0.124 | 8.43 | 69.92 | 25.77 |
| 193 | Cascarilla | 27.37 | 1.08 | 9.09 | 12.56 | 0.178 | 6.62 | 76.09 | 31.94 |
| 194 | Cascarilla | 27.37 | 1.08 | 9.28 | 12.56 | 0.175 | 6.43 | 76.78 | 32.63 |
| 195 | Cascarilla | 27.37 | 1.08 | 8.56 | 12.56 | 0.138 | 7.19 | 74.23 | 30.08 |
| 196 | Cascarilla | 27.37 | 1.08 | 11.57 | 12.56 | 0.190 | 4.12 | 84.84 | 40.69 |
| 197 | Cascarilla | 27.37 | 1.08 | 11.17 | 12.56 | 0.187 | 4.53 | 83.41 | 39.26 |
| 198 | Cascarilla | 27.37 | 1.08 | 11.13 | 12.56 | 0.147 | 4.61 | 83.28 | 39.13 |
| 199 | Cascarilla | 13.69 | 0.57 | 5.07 | 6.52 | 0.089 | 2.57 | 81.33 | 35.57 |

Continúa 

| | | | | | | | | | |
|-----|------------|-------|------|------|------|-------|------|-------|-------|
| 200 | Cascarilla | 13.69 | 0.57 | 4.62 | 6.52 | 0.087 | 3.03 | 78.16 | 32.40 |
| 201 | Cascarilla | 13.69 | 0.57 | 4.55 | 6.52 | 0.069 | 3.11 | 77.71 | 31.95 |
| 202 | Cascarilla | 13.69 | 0.57 | 5.20 | 6.52 | 0.101 | 2.43 | 82.21 | 36.45 |
| 203 | Cascarilla | 13.69 | 0.57 | 5.15 | 6.52 | 0.100 | 2.48 | 81.91 | 36.15 |
| 204 | Cascarilla | 13.69 | 0.57 | 4.68 | 6.52 | 0.079 | 2.97 | 78.59 | 32.83 |
| 205 | Cascarilla | 13.69 | 0.57 | 4.93 | 6.52 | 0.104 | 2.70 | 80.36 | 34.60 |
| 206 | Cascarilla | 13.69 | 0.57 | 4.68 | 6.52 | 0.102 | 2.95 | 78.62 | 32.85 |
| 207 | Cascarilla | 13.69 | 0.57 | 4.36 | 6.52 | 0.081 | 3.29 | 76.32 | 30.56 |
| 208 | Cascarilla | 6.86 | 0.29 | 2.74 | 3.31 | 0.045 | 1.06 | 84.55 | 38.27 |
| 209 | Cascarilla | 6.86 | 0.29 | 2.79 | 3.31 | 0.044 | 1.01 | 85.30 | 39.01 |
| 210 | Cascarilla | 6.86 | 0.29 | 2.65 | 3.31 | 0.035 | 1.16 | 83.28 | 36.99 |
| 211 | Cascarilla | 6.86 | 0.29 | 3.08 | 3.31 | 0.051 | 0.72 | 89.27 | 42.99 |
| 212 | Cascarilla | 6.86 | 0.29 | 2.87 | 3.31 | 0.050 | 0.93 | 86.36 | 40.08 |
| 213 | Cascarilla | 6.86 | 0.29 | 2.78 | 3.31 | 0.040 | 1.02 | 85.13 | 38.85 |
| 214 | Cascarilla | 6.86 | 0.29 | 2.90 | 3.31 | 0.054 | 0.89 | 86.78 | 40.49 |
| 215 | Cascarilla | 6.86 | 0.29 | 2.90 | 3.31 | 0.053 | 0.89 | 86.81 | 40.52 |
| 216 | Cascarilla | 6.86 | 0.29 | 2.56 | 3.31 | 0.042 | 1.24 | 82.03 | 35.75 |
| 217 | Lechuguín | 12.82 | 2.16 | 4.69 | 7.91 | 0.068 | 2.31 | 84.10 | 31.30 |
| 218 | Lechuguín | 12.82 | 2.16 | 4.15 | 7.91 | 0.064 | 2.85 | 80.55 | 27.75 |
| 219 | Lechuguín | 12.82 | 2.16 | 3.90 | 7.91 | 0.059 | 3.11 | 78.86 | 26.05 |
| 220 | Lechuguín | 12.82 | 2.16 | 4.73 | 7.91 | 0.078 | 2.26 | 84.41 | 31.60 |

Continúa 

| | | | | | | | | | |
|-----|-----------|-------|------|------|------|-------|------|-------|-------|
| 221 | Lechuguín | 12.82 | 2.16 | 4.58 | 7.91 | 0.073 | 2.42 | 83.37 | 30.57 |
| 222 | Lechuguín | 12.82 | 2.16 | 4.46 | 7.91 | 0.068 | 2.54 | 82.57 | 29.77 |
| 223 | Lechuguín | 12.82 | 2.16 | 4.81 | 7.91 | 0.080 | 2.18 | 84.91 | 32.11 |
| 224 | Lechuguín | 12.82 | 2.16 | 4.40 | 7.91 | 0.075 | 2.59 | 82.19 | 29.39 |
| 225 | Lechuguín | 12.82 | 2.16 | 4.51 | 7.91 | 0.070 | 2.49 | 82.93 | 30.13 |
| 226 | Lechuguín | 6.42 | 1.14 | 2.44 | 4.10 | 0.034 | 0.98 | 86.59 | 32.35 |
| 227 | Lechuguín | 6.42 | 1.14 | 1.88 | 4.10 | 0.031 | 1.55 | 79.06 | 24.82 |
| 228 | Lechuguín | 6.42 | 1.14 | 2.05 | 4.10 | 0.029 | 1.38 | 81.34 | 27.09 |
| 229 | Lechuguín | 6.42 | 1.14 | 2.52 | 4.10 | 0.036 | 0.90 | 87.56 | 33.32 |
| 230 | Lechuguín | 6.42 | 1.14 | 2.04 | 4.10 | 0.034 | 1.39 | 81.22 | 26.98 |
| 231 | Lechuguín | 6.42 | 1.14 | 1.86 | 4.10 | 0.032 | 1.56 | 78.90 | 24.65 |
| 232 | Lechuguín | 6.42 | 1.14 | 2.72 | 4.10 | 0.041 | 0.70 | 90.19 | 35.94 |
| 233 | Lechuguín | 6.42 | 1.14 | 2.50 | 4.10 | 0.038 | 0.92 | 87.29 | 33.05 |
| 234 | Lechuguín | 6.42 | 1.14 | 1.96 | 4.10 | 0.036 | 1.47 | 80.14 | 25.89 |
| 235 | Lechuguín | 3.20 | 0.58 | 1.10 | 2.08 | 0.016 | 0.59 | 84.02 | 29.06 |
| 236 | Lechuguín | 3.20 | 0.58 | 1.22 | 2.08 | 0.015 | 0.47 | 87.15 | 32.19 |
| 237 | Lechuguín | 3.20 | 0.58 | 0.93 | 2.08 | 0.014 | 0.76 | 79.41 | 24.45 |
| 238 | Lechuguín | 3.20 | 0.58 | 1.16 | 2.08 | 0.019 | 0.52 | 85.72 | 30.76 |
| 239 | Lechuguín | 3.20 | 0.58 | 1.10 | 2.08 | 0.018 | 0.59 | 83.99 | 29.03 |
| 240 | Lechuguín | 3.20 | 0.58 | 0.97 | 2.08 | 0.016 | 0.72 | 80.65 | 25.69 |
| 241 | Lechuguín | 3.20 | 0.58 | 1.21 | 2.08 | 0.021 | 0.48 | 86.89 | 31.93 |
| 242 | Lechuguín | 3.20 | 0.58 | 1.03 | 2.08 | 0.020 | 0.65 | 82.29 | 27.33 |
| 243 | Lechuguín | 3.20 | 0.58 | 1.02 | 2.08 | 0.018 | 0.67 | 81.85 | 26.89 |

4.4. ANÁLISIS

Para la realización del análisis, se tomó en cuenta la relación entre las distintas variables y el poder calorífico del gas de síntesis obtenido.

4.4.1. PODER CALORÍFICO

En las figuras 41, 42 y 43 se puede ver la diferencia en el poder calorífico obtenido de los tres distintos tipos de biomasa que se utilizaron en los experimentos. Se observa, sin embargo, que relativamente existe poca diferencia entre el aserrín y la cascarilla de arroz; el lechuguín, por el contrario, muestra una disminución considerable en el poder calorífico obtenido.

La tendencia se repite en las tres réplicas realizadas.

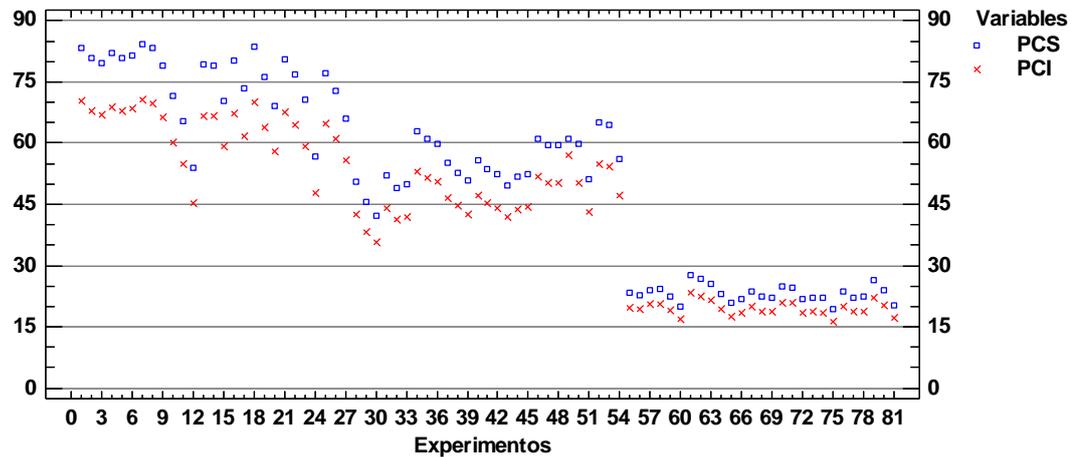


Figura 37 PCI y PCS para experimentos de réplica N°1 (en MJ/Kg)

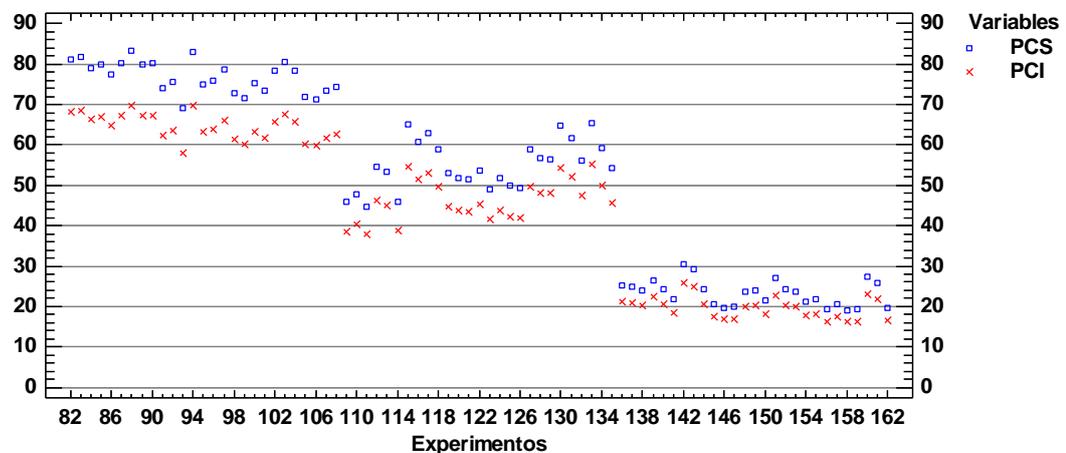


Figura 38 PCI y PCS para experimentos de réplica N°2 (en MJ/Kg)

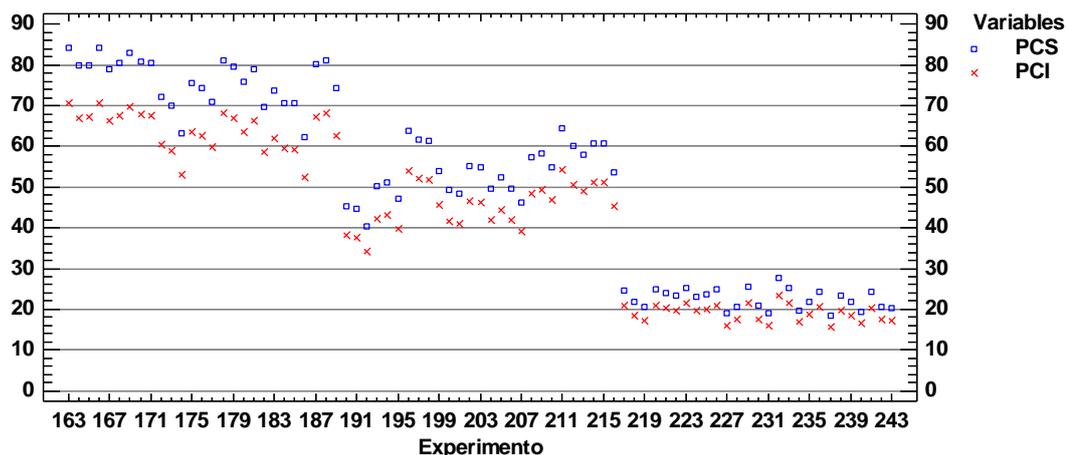


Figura 39 PCI y PCS para experimentos de réplica N°3 (en MJ/Kg)

Las tablas 27 y 28 muestran los experimentos y sus combinaciones con las que se obtuvo los valores más altos y bajos de PCI y PCS en el gas de síntesis para las tres réplicas realizadas.

Tabla 27

Experimentos con valores altos de PCI y PCS

| Biomasa | Exp. | PCI (MJ/Kg) | PCS (MJ/Kg) | Hum. (%) | Ap. Valv. (%) | Cant. (Kg) | Réplica |
|---------------------|------|-------------|-------------|----------|---------------|------------|---------|
| Aserrín | 7 | 84.26 | 70.61 | 0.12 | 1 | 5 | 1 |
| | 88 | 83.33 | 69.86 | 0.12 | 1 | 5 | 2 |
| | 163 | 84.24 | 70.51 | 0.2 | 1 | 5 | 3 |
| Cascarilla de arroz | 52 | 65.22 | 54.96 | 0.12 | 0.25 | 5 | 1 |
| | 133 | 65.47 | 55.28 | 0.12 | 0.25 | 5 | 2 |
| | 211 | 64.58 | 54.38 | 0.16 | 0.25 | 5 | 3 |
| Lechuguín | 61 | 27.64 | 23.36 | 0.12 | 1 | 5 | 1 |
| | 142 | 30.49 | 25.81 | 0.12 | 1 | 5 | 2 |
| | 232 | 27.66 | 23.28 | 0.12 | 0.5 | 5 | 3 |

Tabla 28

Experimentos con valores bajos de PCI y PCS

| Biomasa | Exp. | PCI (MJ/Kg) | PCS (MJ/Kg) | Hum. (%) | Ap. Valv. (%) | Cant. (Kg) | Réplica |
|---------------------|------|-------------|-------------|----------|---------------|------------|---------|
| Aserrín | 12 | 53.92 | 45.19 | 0.2 | 0.5 | 1 Kg | 1 |
| | 93 | 69.12 | 57.94 | 0.2 | 0.5 | 1 Kg | 2 |
| | 186 | 62.25 | 52.30 | 0.16 | 0.25 | 1 Kg | 3 |
| Cascarilla de arroz | 30 | 42.35 | 35.72 | 0.2 | 1 | 1 Kg | 1 |
| | 111 | 44.73 | 37.75 | 0.2 | 1 | 1 Kg | 2 |
| | 192 | 40.50 | 34.18 | 0.2 | 1 | 1 Kg | 3 |
| Lechuguín | 75 | 19.23 | 16.21 | 0.2 | 0.25 | 1 Kg | 1 |
| | 158 | 19.18 | 16.26 | 0.16 | 0.25 | 3 Kg | 2 |
| | 231 | 18.95 | 15.97 | 0.16 | 0.5 | 1 Kg | 3 |

De las tablas 27 y 28 podemos obtener las siguientes conclusiones:

Se obtienen los mejores resultados (PC en el gas de síntesis) con las siguientes combinaciones de las variables en los experimentos:

Tabla 29

Combinaciones con las que se obtuvieron los mejores resultados

| Biomasa | PC biomasa | Hum. (%) | Ap. Valv. (%) | Cantidad |
|---------------------|------------|----------|---------------|----------|
| Aserrín | Alto | Baja | Alta | Alta |
| Cascarilla de arroz | Alto | Baja | Baja | Alta |
| Lechuguín | Bajo | Baja | Alta | Alta |

Se obtienen los peores resultados (PC en el gas de síntesis) con las siguientes combinaciones de las variables en los experimentos:

Tabla 30

Combinaciones con las que se obtuvieron los peores resultados

| Biomasa | PC biomasa | Hum. (%) | Ap. Valv. (%) | Cantidad |
|---------------------|------------|------------|---------------|----------|
| Aserrín | Alto | Alto | Medio-Bajo | Bajo |
| Cascarilla de arroz | Medio | Alto | Alto | Bajo |
| Lechuguín | Bajo | Medio-Alto | Medio-Bajo | Bajo |

4.4.2. EFICIENCIA EN CALIENTE

Las figuras 44, 45 y 46 muestran que la eficiencia en caliente no tiene relación con las variables de los experimentos, sin embargo muestran que la curva de la eficiencia en caliente sigue la misma tendencia que la curva del PCI.

Se puede ver que el lechuguín pese a tener un menor poder calorífico, genera la casi la misma eficiencia en el gasificador que el aserrín y la cascarilla de arroz, con lo cual podemos concluir que la eficiencia en caliente del gasificador es casi constante, independientemente del tipo de biomasa a utilizarse.

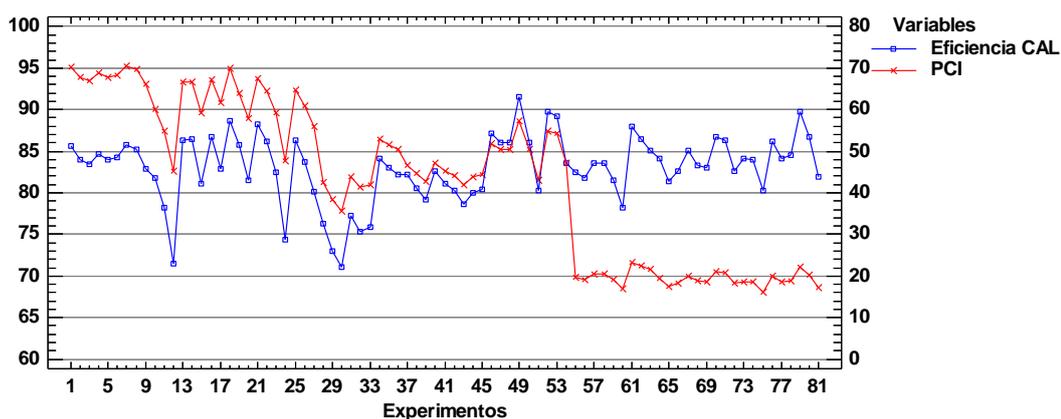


Figura 40 PCI (MJ/Kg) vs η_{cal} (%) para experimentos de réplica N°1

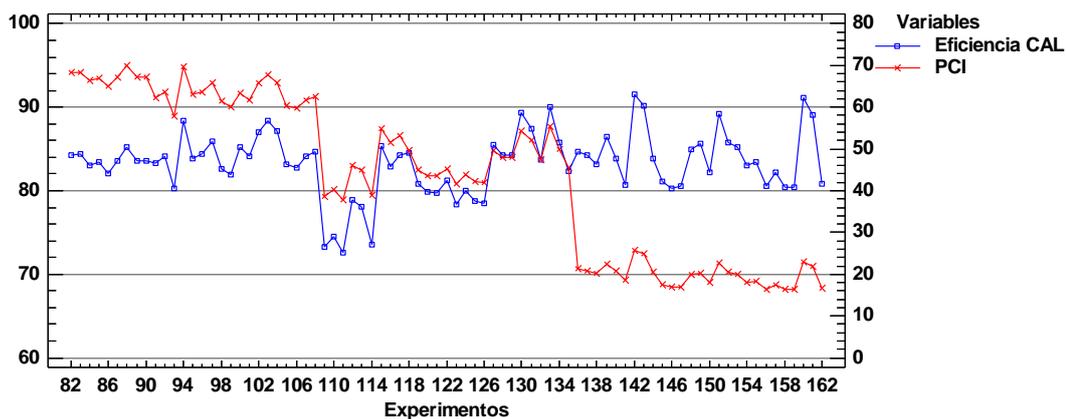


Figura 41 PCI (MJ/Kg) vs η_{cat} (%) para experimentos de réplica N°2

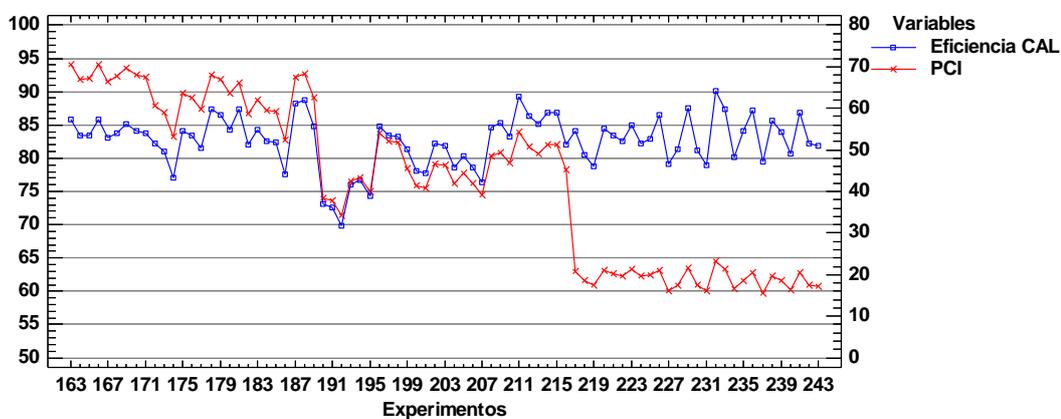


Figura 42 PCI (MJ/Kg) vs η_{cat} (%) para experimentos de réplica N°3

4.4.3. EFICIENCIA EN FRÍO

Al igual que con la eficiencia en caliente, la eficiencia en frío mantiene la misma tendencia que la curva del poder calorífico, tal como se puede observar en las figuras 47, 48 y 49.

Esto quiere decir que la eficiencia en frío del gasificador es directamente proporcional al poder calorífico del gas de síntesis obtenido.

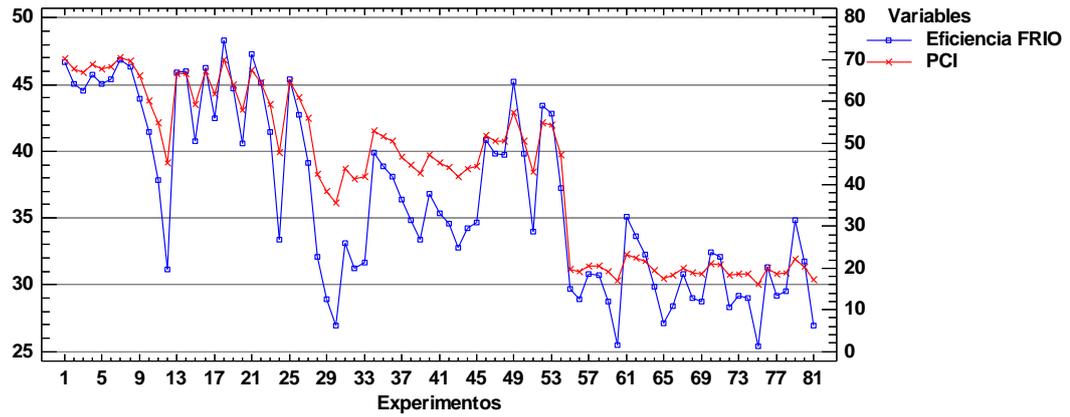


Figura 43 PCI (MJ/Kg) vs η_{frio} (%) para experimentos de réplica N°1

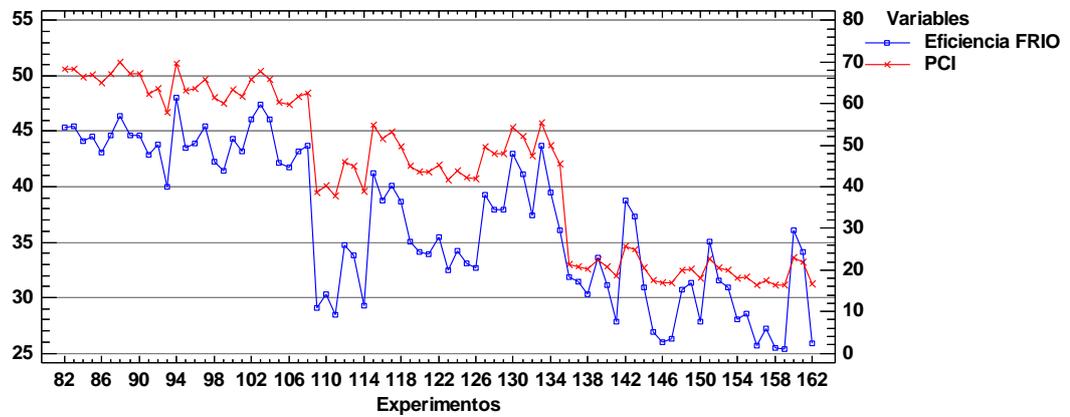


Figura 44 PCI (MJ/Kg) vs η_{frio} (%) para experimentos de réplica N°2

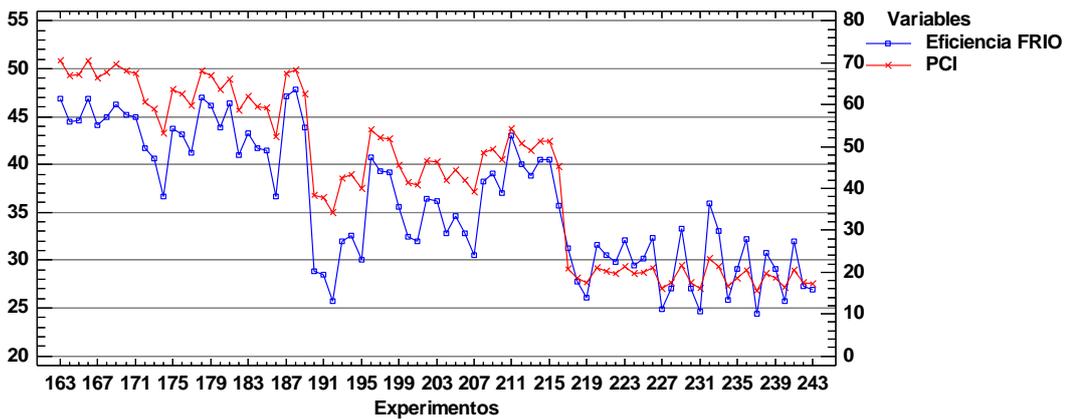


Figura 45 PCI (MJ/Kg) vs η_{frio} (%) para experimentos de réplica N°3

4.4.4. CALOR PERDIDO

En las figuras 50, 51 y 52 se puede observar que el calor perdido es directamente proporcional a la apertura de la válvula de aire comprimido (presión dentro del reactor) debido a la forma escalonada en la que se presenta la curva. Adicionalmente, la cascarilla de arroz presenta una mayor pérdida de calor, seguido por el aserrín y finalmente el lechuguín que tiene menor pérdida de calor en el proceso de gasificación.

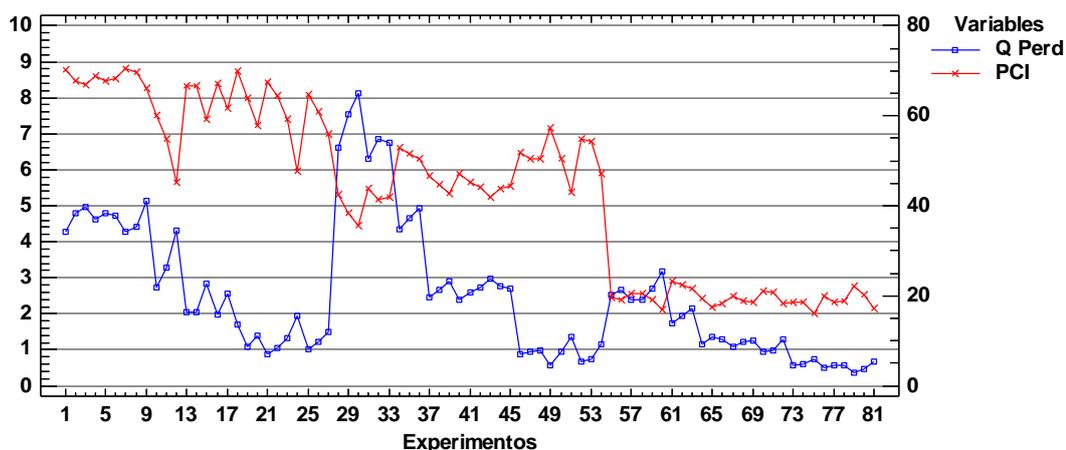


Figura 46 PCI (MJ/Kg) vs \dot{Q}_{perd} (KW) para experimentos de réplica N°1

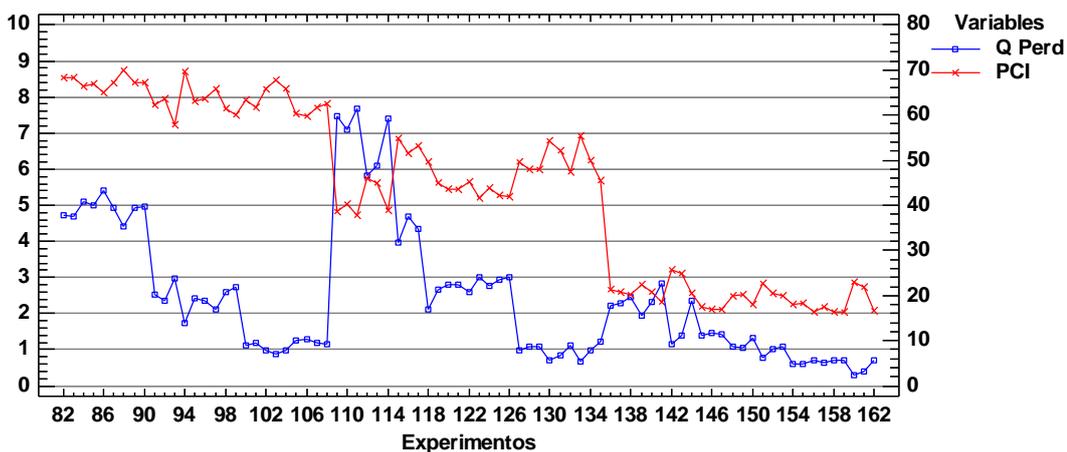


Figura 47 PCI (MJ/Kg) vs \dot{Q}_{perd} (KW) para experimentos de réplica N°2

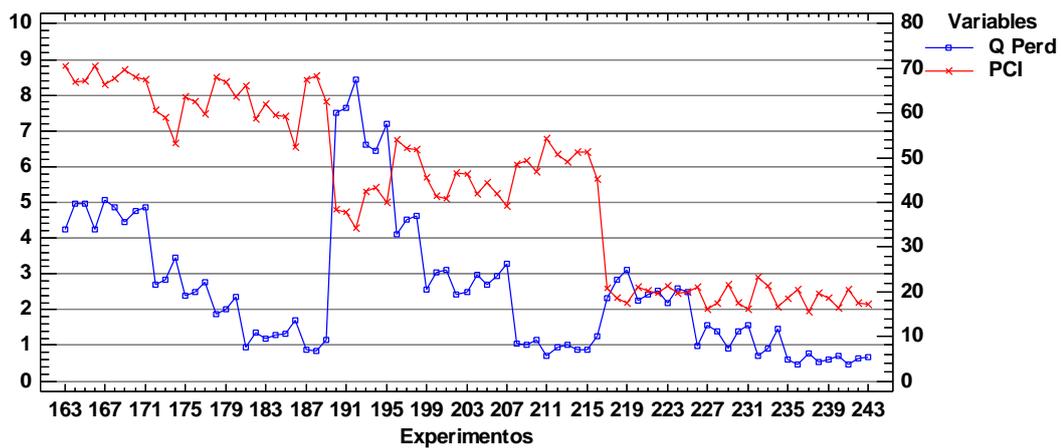


Figura 48 PCI (MJ/Kg) vs \dot{Q}_{perd} (KW) para experimentos de réplica N°3

4.5. ANÁLISIS AMBIENTAL

El uso del gas de síntesis producto del proceso de gasificación de biomasa como combustible para motores de combustión interna, producción de hidrógeno o a la generación de electricidad a través de plantas de gasificación de biomasa hacen que esta tenga un alto potencial como fuente de energía renovable.

Existen varios beneficios medioambientales que esto conlleva:

- Se reducen las emisiones de los gases responsables del efecto invernadero, CO₂ (dióxido de carbono) y CH₄ (metano).

El dióxido de carbono está presente en todo proceso de combustión, sin embargo solo se lo considera nocivo para el medio ambiente cuando se obtiene a partir de una combustión de origen fósil, puesto que cuando se lo obtiene a través del proceso de gasificación de biomasa, la cantidad de dióxido de carbono generado no aumenta en la corteza terrestre, por el contrario, se devuelve a la atmósfera a través del proceso de fotosíntesis, cumpliendo así el denominado ciclo de dióxido de carbono.

- Se reducen también las emisiones de metano, puesto que al usar como biomasa los residuos naturales y agrícolas para obtener el gas de síntesis, se evita la descomposición natural de los mismos, y así, se logra una emisión controlada de estos gases al medio ambiente.

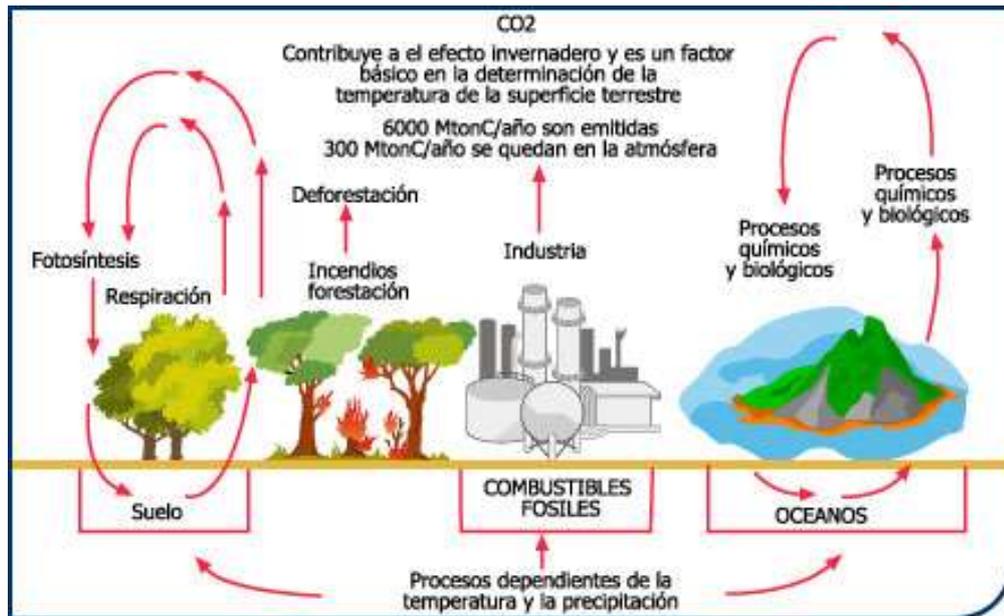


Figura 49 Ciclo de carbono

Fuente: (PDVSA, 2005)

- Ayuda en el desecho de los desechos naturales y agrícolas, puesto que muchos de los residuos que se generan contribuyen a la contaminación del suelo y de aguas tanto superficiales como subterráneas.
- Se eliminan casi por completo las emisiones de óxidos de azufre y de óxidos de nitrógeno, elementos que se forman durante la combustión de combustibles fósiles y que se transforman en ácido sulfúrico (óxidos de nitrógeno) lo cual produce lluvias ácidas. La biomasa contiene cantidades de azufre mínimas, por lo que su impacto en la generación de lluvias ácidas es casi nulo.
- Los combustibles gaseosos como los es el gas de síntesis, reacciona de mejor manera con el aire que los combustibles líquidos, por lo que es más eficiente.
- El proceso de gasificación es una tecnología con alto potencial en nuestro país y el mundo que no requiere de altos recursos tecnológicos, técnicos y económicos.

CAPÍTULO 5

5. ANÁLISIS ECONÓMICO

5.1. COSTOS DIRECTOS

Materiales

Tabla 31

Costos directos

| Ord. | Descripción | Cantidad | Valor Unit. (USD) | Valor Total (USD) |
|-------|--------------------------------|----------|-------------------|-------------------|
| 1 | Biomasa Lechuguín | 40 kg | 2.50 | 100.00 |
| 2 | Termocupla tipo K | 2 | 12.50 | 25.00 |
| 3 | Cables extensión de termocupla | 2 m | 4.80 | 9.60 |
| 4 | Durallama | 16 | 3.50 | 56.00 |
| 5 | Carbón | 30 | 1.50 | 45.00 |
| 6 | Sellante Térmico | 8 | 2.70 | 21.60 |
| 7 | Acoples de tubería | 3 | 0.70 | 2.10 |
| 8 | Teflón para rosca | 11 | 0.35 | 3.85 |
| 9 | Fundas recolectoras | 9 | 1.80 | 16.20 |
| TOTAL | | | | 279.35 |

5.2. COSTOS INDIRECTOS

Tabla 32

Costos indirectos

| Ord. | Descripción | Valor (USD) |
|-------|------------------------|-------------|
| 1 | Suministros De Oficina | 10 |
| 2 | Internet | 10 |
| 3 | Transporte | 20 |
| 4 | Impresiones y copias | 35 |
| 5 | Asesoría Profesional | 40 |
| 6 | Cromatografías | 1505 |
| TOTAL | | 1620 |

5.3. COSTO TOTAL DEL PROYECTO

Tabla 33

Costo del proyecto

| COSTOS TOTALES | |
|-----------------------|------------------------|
| Descripción | Valor (USD) |
| Costos Directos | 279.35 |
| Costos Indirectos | 1620 |
| Total | 1899.35 |
| Imprevistos (5%) | 94.97 |
| TOTAL PROYECTO | 1994.32 |

CAPÍTULO 6

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- Se consideró como las variables más importantes dentro del proceso de gasificación downdraft al poder calorífico, cantidad y humedad de la biomasa; y la presión en el reactor las cuales fueron relacionadas entre sí mediante un diseño factorial.
- La realización del experimento siguiendo un diseño factorial permite obtener resultados de las distintas combinaciones de las variables en distintas réplicas o corridas, lo que garantiza que los resultados sean cercanos a la realidad.
- Con el aserrín y la cascarilla de arroz se obtuvieron los mejores resultados en cuanto a poder calorífico del gas se refiere, sin embargo con el lechuguín se obtuvo una mejor eficiencia y una menor pérdida de calor durante el proceso.
- Con el aserrín, se obtuvo un mayor poder calorífico en el gas de síntesis cuando el porcentaje de humedad es bajo, la apertura de la válvula de entrada del agente gasificante es alta (alta presión en el reactor) y cuando se introduce al sistema alta cantidad de biomasa.
- Con la cascarilla de arroz, se obtuvo un mayor poder calorífico en el gas de síntesis cuando el porcentaje de humedad es bajo, la apertura de la válvula de entrada del agente gasificante es baja (baja presión en el reactor) y cuando se introduce al sistema alta cantidad de biomasa.
- Con el lechuguín, se obtuvo un mayor poder calorífico en el gas de síntesis cuando el porcentaje de humedad es bajo, la apertura de la válvula de entrada del agente gasificante es alta (alta presión en el reactor) y cuando se introduce al sistema alta cantidad de biomasa.
- En general, no se obtuvieron buenos resultados cuando el contenido de humedad de la biomasa fue alto y la cantidad de biomasa fue baja.
- El análisis cromatográfico nos permitió obtener los componentes del gas de síntesis de manera sencilla, para de este modo obtener su

contenido de gases y su poder calorífico, característica determinante para el procesamiento de los resultados finales.

- La gasificación de biomasa es un proceso de impacto ambiental bajo, debido a que gases como el metano son controlados; óxidos de nitrógeno y óxidos de azufre son casi nulos; y el dióxido de carbono cumple con el ciclo de carbono, es decir, cuando se lo obtiene a través del proceso de gasificación de biomasa, la cantidad de dióxido de carbono generado no aumenta en la corteza terrestre, por el contrario, se devuelve a la atmósfera a través del proceso de fotosíntesis.
- Las aplicaciones del gas de síntesis van desde la obtención de hidrógeno, combustible gaseoso para motores de combustión interna, generación de energía eléctrica mediante plantas de gasificación de biomasa; hasta la generación de fertilizantes y productos químicos.

6.2. RECOMENDACIONES

- El uso de protección personal como mascarillas y gafas es vital durante la operación del gasificador ya que el gas contiene monóxido de carbono, gas altamente tóxico.
- De ser posible, colocar una campana para la extracción de gases hacia los exteriores donde está ubicado el gasificador.
- Verificar y encerer el indicador de la balanza previo a la realización de cualquier ensayo.
- Previo a cualquier ensayo, verificar que el tamaño de los cortes de la biomasa sean lo suficientemente pequeños para que no se atasquen en el tornillo sin fin y puedan pasar sin problemas de la tolva al reactor.
- Cambiar los filtros (esponja, malla y material particulado) después de por lo menos 50 ensayos, ya que se obstruyen e impiden la salida del gas de manera fluida.
- Se recomienda la colocación de un sistema de monitoreo de gases para controlar los mismos durante la realización de los ensayos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGENCIA DE REGULACIÓN Y CONTROL DE ELECTRICIDAD. (2016).

Recuperado el 04 de Mayo de 2016, de

<http://www.regulacionelectrica.gob.ec/>

AGENCIA DE REGULACIÓN Y CONTROL DE ELECTRICIDAD. (Marzo de

2016). *Ecuador posee un 51,78% de energía renovable*. Recuperado

el 06 de Mayo de 2016, de

<http://www.regulacionelectrica.gob.ec/ecuador-posee-un-5155-de-energia-renovable/>

Angiolani, A. (2006). *Introducción a la Química Industrial. Fundamentos*

químicos y tecnológicos. Santiago de Chile: Editorial Andres Bello.

Cabrera, G. et. al. (2013). *Evaluación de índices de conversión energética en*

la producción de gas combustible a partir de biomasa. Cauca:

Universidad del Valle.

Castells, X. E. (2012). *Biomasa y Bioenergía*. Madrid: Díaz de Santos.

CELEC. (2014). Recuperado el 05 de Mayo de 2016, de

<https://www.celec.gob.ec/>

Chicharro, M. (s.f.). *Cromatografía: principios y aplicaciones*. Recuperado el

16 de Enero de 2016, de

<https://es.scribd.com/doc/19050563/Cromatografia-Principios-y-Aplicaciones>

Delgado, R. (2004). *Iniciación a la probabilidad y la estadística*. Cataluña:

Universidad Autónoma de Barcelona.

EPEC. (2007). *Energía renovable: la biomasa*. Córdoba: La Tabada.

IER. (1992). *Biomasa. Manuales de Energías Renovables*. Madrid: IDAE.

- IER. (2007). *Energía de la biomasa. Manual de energías renovables 2*. Madrid: IDAE.
- INER. (2015). Recuperado el 06 de Enero de 2016, de <http://www.iner.gob.ec/>
- Klass, D. (1998). *Biomass for Renewable Energy, Fuels and Chemicals*. San Diego, CA: Academic Press.
- Lapuerta, M. (2007). *Comparison between the kinetics of devolatilisation* (Vol. 31). Madrid: Biomass and Bioenergy.
- Lesme J. et. al. (2008). *Análisis termográfico de un gasificador "Ankur" modelo WBG-10 trabajando con diferentes biomásas*. Santiago de Cuba: Universidad de Oriente.
- Mayorga, L & Garzón, G. (2015). *Desarrollo e implementación de un software para la operación óptima de un sistema energético mixto de gasificación de biomasa y solar fotovoltaico con automatización en la toma de datos*. Sangolquí: ESPE.
- MINITAB. (s.f.). *Réplicas y repeticiones en experimentos diseñados*. Recuperado el 28 de Enero de 2016, de <http://support.minitab.com/es-mx/minitab/17/topic-library/modeling-statistics/doe/basics/replicates-and-repeats-in-designed-experiments/>
- Nogués, F. et al. (2010). *Energía de la Biomasa (volumen I)*. Zaragoza: Unizar.
- Oriol, P. et. al. (2013). *Electrificación rural en la República del Chad por gasificación de corazones de mazorcas de maíz*. Chad: Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo.
- PDVSA. (2005). *Petróleos de Venezuela S.A.* Recuperado el 12 de noviembre de 2016, de http://www.pdvsa.com/PESP/Pages_pespe/aspectostecnicos/produccion/hidro_ambiente.html

- Pérez, J. F. (2009). *Gasificación de biomasa: Estudios teórico-experimentales en lecho fijo equicorriente*. Medellín: Universidad de Antioquia.
- Pérez, M. (2009). *Biomass and waste gasification*. Elsevier: Hamburg University.
- Phillips, J. (2012). *Different Types of Gasifiers and Their Integration with Gas Turbines*. Charlotte: NETL.
- Reed, S. (1981). *A Survey of Biomass Gasification, Vol. 1-3*. Golden, Colorado: Solar Energy Research Institute.
- Rincón, S. et. al. (2011). *Gasificación de biomasa residual de procesamiento agroindustrial*. Bogotá: Kassel University Press.
- Rostrup-Nielsen, J y Christiansen, L. (2011). *Concepts in Syngas Manufacture*. Londres: Imperial College Press.
- RUA. (2013). *Repositorio Institucional de la Universidad de Alicante*. Recuperado el 16 de Enero de 2016
- SEA. (2008). *Energía Biomasa: Energías Renovables*. Recuperado el 12 de Abril de 2016, de http://energia3.mecon.gov.ar/contenidos/archivos/Reorganizacion/contenidos_didacticos/publicaciones/libro_energia_biomasa.pdf
- SENPLADES. (s.f.). *Objetivos del Buen Vivir*. Recuperado el 08 de Enero de 2016, de <http://plan.senplades.gob.ec/>
- Valcárcel, C. & Gómez, A. (1998). *Técnicas Analíticas de Separación*. Córdoba: Reverté.
- WEIZS. (s.f.). *WEIZS Instrumentos*. Recuperado el 01 de mayo de 2016, de http://www.weisz.com/informacion/tablas%20tecnicas_pdf/Caracteristicas%20tecnicas%20de%20termocuplas.pdf