

**ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO PARA EL USO DE LA CASCARILLA DE  
ARROZ EN LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DEL  
PROCESO DE GASIFICACIÓN. CASO DE ESTUDIO: MOLINO DE ARROZ  
PACANDE DE LA CIUDAD DE VILLAVICENCIO – META.**

**LILIANA OSORIOAGUIRRE**



**UNIVERSIDAD LIBRE**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA CON ÉNFASIS EN ENERGÍAS ALTERNATIVAS**

**BOGOTA 2019**

**ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO PARA EL USO DE LA CASCARILLA DE  
ARROZ EN LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DEL  
PROCESO DE GASIFICACIÓN. CASO DE ESTUDIO: MOLINO DE ARROZ  
PACANDE DE LA CIUDAD DE VILLAVICENCIO – META.**

**Proponente:**

**ING. LILIANA OSORIO AGUIRRE**

**Trabajo de grado para optar el título de:**

**MÁSTER EN INGENIERÍA CON ÉNFASIS EN ENERGÍAS ALTERNATIVAS**

**Director:**

**PhD. QUELBIS ROMAN QUINTERO BERTEL**

**UNIVERSIDAD LIBRE**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA CON ÉNFASIS EN ENERGÍAS ALTERNATIVAS**

**BOGOTA**

**2019**

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

---

---

**Firma de Jurado**

---

**Firma de Jurado**

---

**Firma de director**

**Bogotá, agosto de 2019**

## **DEDICATORIA**

A Dios, por haber propiciado todo para llegar a este punto. Su infinito amor hace que en mi vida cada persona tenga un propósito y aporte valiosas enseñanzas para mi desarrollo personal y profesional. A mis padres, por su dedicación, su incondicionalidad, su amor desinteresado, gracias a ellos soy quien soy en la vida. A mi esposo, por apoyarme en todo, por insistir hasta el cansancio, por animarme y creer en mí. Y a ti hijita, porque ahora eres la razón para seguir creciendo en todos los aspectos de mi vida, porque eres la más hermosa motivación para cada día querer ser mejor.

**Liliana Osorio Aguirre**

## **AGRADECIMIENTOS**

Después de muchos intentos, de retomar en más de una ocasión este trabajo, puedo decir: **por fin lo he logrado**; pero no sola, muchas fueron las personas, las circunstancias y un poco de ayuda divina los que hicieron que este resultado pudiera concretarse.

Dios mío gracias por cada oportunidad que pones en mi vida, siempre de tu mano y gracias a tu divina voluntad he logrado cada cosa. Tu bondad es inmensa y veo cómo te manifiestas en cada paso que logro dar.

A mis padres infinitas gracias por haberme ofrecido la educación y las oportunidades necesarias para lograr cada objetivo. Se por todas las dificultades que hemos tenido que pasar, pero su decisión fue apoyarme en todo y brindarme las herramientas necesarias para triunfar en la vida, vamos por muy buen camino.

A mi esposo gracias por su amor, por sus asesorías, y, sobre todo, por su insistencia, sin sus constantes recordatorias no hubiera logrado finalizar con éxito esta etapa. Este logro es de nuestra familia, tu, Emma y yo somos un equipo fuerte que va a lograr todo lo que se propone en la vida. Familia (hermanos, abuela, tíos) gracias por siempre creer en mí, no han duda nunca en mis capacidades y siempre me han animado a seguir creciendo.

Finalmente, mil y mil gracias al Dr. Quelbis Quintero y M.Sc. Ricardo Vega, por insistirme, por estar tan pendientes de que no dejara a un lado mi trabajo de grado, por poner a mi servicio todas sus capacidades, son ustedes unas personas con unas calidades humanas maravillosas que enriquecen el ejercicio de educar.

**Liliana Osorio Aguirre**

## **RESUMEN**

El presente trabajo de grado realiza el análisis técnico – económico para la utilización del RAI (Residuo Agrícola Industrial) procedente de la industria arrocera de los Llanos Orientales. El caso de estudio se centra específicamente en la biomasa residual, cascarilla de arroz, generada en el molino de arroz PACANDE de la ciudad de Villavicencio. Este recurso será analizado en el proceso de gasificación, con el fin de generar energía eléctrica.

La oportunidad surge dado que en la transformación del arroz el 20% de la cosecha equivale a cascarilla de arroz que debe ser dispuesta de manera adecuada.

Con la bibliografía existente se determinaron los datos de análisis elemental, análisis último y poder calorífico requeridos para realizar los cálculos necesarios para el dimensionamiento de la planta de gasificación. Posteriormente se estimó el potencial energético de la industria arrocera de los Llanos Orientales, evidenciándose la gran oportunidad que tiene la industria molinera de la región para generar su energía y ser autosuficientes en términos energéticos. Finalmente, se realizaron los cálculos técnico – económicos que permitieron desarrollar el caso de estudio en el molino de arroz PACANDE de la ciudad de Villavicencio, proponiendo una planta de gasificación acorde a la disponibilidad del combustible a emplear, en este caso, cascarilla de arroz.

Con el fin de confirmar la funcionalidad de la tecnología empleando como combustible cascarilla de arroz, se realizaron ensayos en el gasificador existente en el Jardín Botánico de Bogotá. El equipo utilizado fue el Power Pallet – PP20 facilitado por el Jardín Botánico de Bogotá a través de convenio entre la Universidad Libre y el JBB.

Con el objetivo de demostrar la viabilidad de la planta de gasificación propuesta se realizaron los análisis financieros mediante el costo – beneficio que ofrece el proyecto y los indicadores empleados para concluir frente a las alternativas financieras planteadas fueron el VPN y la TIR.

## **ABSTRACT**

This degree work carries out the technical - economic analysis for the use of RAI (Industrial Agricultural Waste) from the rice industry of the Eastern Plains. The case study specifically focuses on the residual biomass, rice husk, generated in the PACANDE rice mill in the city of Villavicencio. This resource will be analyzed in the gasification process, in order to generate electricity.

The opportunity arises because in the transformation of rice 20% of the harvest is equivalent to rice husk that must be properly disposed.

With the existing bibliography, the elementary analysis, final analysis and calorific value data required to perform the calculations necessary for the sizing of the gasification plant were determined. Subsequently, the energy potential of the East Llanos rice industry was estimated, showing the great opportunity that the mill industry in the region has to generate its energy and be self-sufficient in terms of energy. Finally, technical and economic calculations were carried out that allowed the development of the case study in the PACANDE rice mill in the city of Villavicencio, proposing a gasification plant according to the availability of the fuel to be used, in this case, rice husk.

In order to confirm the functionality of the technology using rice husk as fuel, tests were carried out on the existing gasifier in the Botanical Garden of Bogotá. The equipment

used was the Power Pallet - PP20 provided by the Botanical Garden of Bogotá through an agreement between the Free University and the JBB.

In order to demonstrate the viability of the proposed gasification plant, the financial analyzes were carried out using the cost-benefit offered by the project and the indicators used to conclude against the financial alternatives proposed were the VPN and the TIR.

**Palabras Claves:** Energía renovable, RAI (Residuo Agrícola Industrial), biomasa residual, gasificación, cascarilla de arroz.



## Tabla de contenido

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	4
<b>3. JUSTIFICACIÓN</b>	5
<b>4. ANTECEDENTES</b>	8
<b>5. OBJETIVOS</b>	12
5.1. OBJETIVO PRINCIPAL	12
5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
<b>6. MARCO TEORICO</b>	13
6.1. BIOMASA	13
6.2. CARACTERÍSTICAS DE LA BIOMASA	13
6.3. PROCESOS TERMOQUÍMICOS	17
6.4. PROCESOS BIOQUÍMICOS	18
6.5. PROCESO DE GASIFICACIÓN	19
6.6. TIPOS DE GASIFICADORES	23
6.6.1. Gasificadores de lecho fijo	23
6.6.2. Gasificadores de lecho fluidizado	25
6.6.3. Gasificadores de lecho de flujo de arrastre	26
<b>7. ALCANCE DEL PROYECTO Y METODOLOGÍA</b>	28
<b>8. CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LA BIOMASA, CASCARILLA DE ARROZ, PARA SU USO COMO COMBUSTIBLE EN LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA</b>	29
8.1. PROPIEDADES QUÍMICAS DE LA CASCARILLA DE ARROZ	29
8.2. PROPIEDADES FÍSICAS DE LA CASCARILLA DE ARROZ	30
8.3. PODER CALORÍFICO	31
<b>9. POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA BIOMASA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA ARROCERA DE LOS LLANOS ORIENTALES</b>	33
9.1. POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA BIOMASA EN COLOMBIA	33
9.2. POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA BIOMASA EN LOS LLANOS ORIENTALES	35
9.3. INDUSTRIA MOLINERA EN LOS LLANOS ORIENTALES	37

<b>10. ANÁLISIS TÉCNICO: CASO DE ESTUDIO MOLINO DE ARROZ PACANDE DE LA CIUDAD DE VILLAVICENCIO</b>	<b>39</b>
10.1. FUNCIONALIDAD DE LA TECNOLOGÍA – EQUIPO EMPLEADO PARA EL PROCESO DE GASIFICACIÓN.	39
10.1.1. Proceso de gasificación	40
10.1.2. Preparación del Gasificador Power Pallet – PP20	42
10.1.3. Equipo empleado para análisis de gases - Analizador portátil de combustión	44
10.2. UBICACIÓN DEL PROYECTO	45
10.3. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO EN MOLINO DE ARROZ PACANDE - PLANTA ACTUAL	46
10.4. CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN MOLINO DE ARROZ PACANDE	48
10.5. PLANTA DE GASIFICACIÓN PROPUESTA	50
10.5.1. Gasificador de lecho fluido burbujeante	52
10.5.1.1. Balance de Energía	52
10.5.1.2. Selección de equipo	67
10.5.2. Ciclón	70
10.5.2.1. Balance de Energía	70
10.5.2.2. Selección de equipo	71
Nota: Fuente (Elaboración propia)	72
10.5.3. Recuperador o intercambiador de calor	72
10.5.3.1. Balance de Energía	72
10.5.3.2. Selección de equipo	77
10.5.4. Scrubber o lavador	77
10.5.4.1. Balance de Energía	77
10.5.4.2. Selección de equipo	78
10.5.5. Antorcha	79
10.5.6. Motor de combustión interna alternativo	80
10.5.6.1. Balance de Energía	80
10.5.6.2. Selección de equipo	83
10.6. BALANCE ENERGÉTICO GLOBAL	85

<b>11. ANÁLISIS ECONOMICO: CASO DE ESTUDIO MOLINO DE ARROZ PACANDE DE LA CIUDAD DE VILLAVICENCIO</b>	<b>86</b>
11.1. FACTORES A TENER EN CUENTA PARA EL ÉXITO DEL PROYECTO	86
11.2. ANÁLISIS DOFA	87
11.3. VIABILIDAD ECONÓMICA DE LA PLANTA	88
<b>12. CONCLUSIONES</b>	<b>95</b>
<b>13. RECOMENDACIONES</b>	<b>98</b>
<b>14. BIBLIOGRAFIA</b>	<b>99</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Características de gasificadores de lecho fijo o móvil.....	27
Tabla 2: Análisis elemental.....	30
Tabla 3: Análisis ultimo.....	31
Tabla 4: Poder Calorífico.....	32
Tabla 5: Área sembrada y cosechada (ha), producción (t) y rendimiento (t/ha) de arroz mecanizado .....	36
Tabla 6: Subproductos de la transformación del arroz paddy seco .....	36
Tabla 7: Potencia térmica que aporta la cascarilla de arroz .....	52
Tabla 8: Calculo moles estequiométricas de O consumidos en la combustión completa .....	53
Tabla 9: Calculo volumen de aire necesario .....	54
Tabla 10: Cálculos caudal de aire real .....	56
Tabla 11: Cantidad de sustancia a la entrada del gasificador (Biomasa + Aire).....	57
Tabla 12: Composición del gas .....	58
Tabla 13: Calculo del poder calorífico inferior del syngas .....	58
Tabla 14: Resumen cálculos base húmeda, base seca, densidad, caudales másicos y volumétricos del gas de síntesis.....	59
Tabla 15: Entalpías requeridas para el cálculo de la potencia del gas seco .....	62
Tabla 16: Entalpías requeridas para el cálculo de la potencia del gas húmedo .....	63
Tabla 17: Resumen potencia total.....	64
Tabla 18: Datos de entrada del gasificador .....	67
Tabla 19: Balance de materia gasificador .....	67
Tabla 20: Balance de potencias Gasificador .....	68
Tabla 21. Matriz multi-atributo selección Gasificador .....	68
Tabla 22: Gasificadores ofrecidos por el fabricante Dong Ding Heavy Industry .....	69
Tabla 23: Intervalo de eficiencia de remoción para las diferentes familias de ciclones .....	70
Tabla 24: Datos de entrada y salida del ciclón.....	70
Tabla 25: Distribución de tamaño de partículas en el gas de síntesis .....	71
Tabla 26: Características de los ciclones de alta eficiencia .....	71
Tabla 27: Características del gas húmedo en el recuperador. ....	73
Tabla 28: Entalpías a la entrada y salida del recuperador .....	73
Tabla 29: Características del aire en el recuperador .....	74
Tabla 30: Calculo de entalpías para hallar potencia del aire seco.....	74
Tabla 31: Entalpías requeridas para el cálculo de la potencia del aire húmedo .....	76
Tabla 32:Potencia total recuperada por el aire.....	76
Tabla 33: Datos a la entrada del recuperador de calor .....	77
Tabla 34: Datos gas - aire del recuperador de calor.....	77
Tabla 35: Especificaciones técnicas antorchas EMISON .....	80
Tabla 36: Características del gas de síntesis procedente de la antorcha .....	81

Tabla 37: Poder calorífico del gas de síntesis .....	81
Tabla 38: Motores Jenbacher GE.....	84
Tabla 39: Balance energético global.....	85
Tabla 40: Equipos mayores seleccionados para la planta de gasificación .....	85
Tabla 41: Costos totales instalados de las tecnologías de generación a partir de biomasa por país / región– Planta de gasificación con cascarilla de arroz.....	88
Tabla 42: Indicadores financieros - Con Proyecto Sin financiamiento.....	94
Tabla 43: Indicadores financieros - Con Proyecto Con financiamiento .....	94

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Curva de decrecimiento de combustibles fósiles.....	8
Figura 2 Potenciales zonas para proyectos de energía renovable .....	9
Figura 3: Tipos de Biomasa .....	14
Figura 4: Proceso Termoquímico de conversión .....	17
Figura 5: Etapas y características principales en el proceso de gasificación .....	20
Figura 6: Esquema de un gasificador de gas pobre.....	21
Figura 7: Posibles usos del gas de gasificación .....	22
Figura 8: Gasificador de lecho fijo “downdraft”, corriente descendente.....	24
Figura 9: Gasificador de lecho fijo “updraft”, corriente ascendente.....	24
Figura 10: Gasificador de lecho fluidizado burbujeante .....	25
Figura 11: Gasificador de lecho fluidizado circulante .....	26
Figura 12: Interpretación grafica del PCI .....	31
Figura 13: Representación gráfica PCS .....	32
Figura 14: Biomasa residual agrícola. Cultivos de arroz. ....	34
Figura 15: Molinos y cultivos de arroz .....	37
Figura 16: Gasificador Power Pallet – PP20 - Vista frontal .....	39
Figura 17: Gasificador Power Pallet – PP20 - Vista lateral .....	40
Figura 18: Limpieza tubería. Fuente propia.....	42
Figura 19: Limpieza de ciclón. Fuente propia .....	42
Figura 20: Retiro de material carbonizado. Fuente propia.....	43
Figura 21: Limpieza de tolva. Fuente propia .....	43
Figura 22: Retiro de material carbonizado. Fuente propia.....	43
Figura 23: Armado de filtro. Fuente propia. ....	43
Figura 24: Fragmentación y tamizaje del carbón. Fuente propia.....	43
Figura 25: Retiro de filtro existente. Fuente propia .....	43
Figura 26: Ensamble de filtro. Fuente propia. ....	44
Figura 27: Armado de filtro. Fuente propia. ....	44
Figura 28: Armado de filtro. Fuente propia. ....	44
Figura 29: Analizador portátil de combustión Bacharach Pca3.....	44
Figura 30: Ubicación del proyecto (Meta, 2018).....	45
Figura 31: Ubicación Inversiones Molino Pacandé .....	45
Figura 32: Consumo de energía - Inversiones molino Pacande SAS.....	49
Figura 33: Diagrama de bloques equipos principales .....	50
Figura 34: Diagrama de flujo del proceso.....	51
Figura 36: Composición típica del gas producto en función de la cantidad de oxígeno ingresada al proceso .....	55
Figura 37: unidades de sistema de lavado tipo Venturi .....	79

Figura 38: Costos totales instalados de las tecnologías de generación a partir de biomasa por país /  
región ((Renewable & Agency, 2018)).....88

## 1. INTRODUCCIÓN

El sector arrocero está expuesto ante la problemática de la disposición inadecuada del residuo agroindustrial, específicamente de la cascarilla de arroz. En el proceso de transformación del arroz el 20% de la cosecha equivale a cascarilla de arroz (Fedesarrollo, 2013), subproducto considerado un residuo y que en la actualidad no es manejado de manera adecuada para su disposición final; se acude entonces a almacenar este residuo en terrenos que podrían ser empleados para otras actividades, acumulándose sin ningún fin en particular o realizándose quemas a cielo abierto trayendo consigo contaminación de la atmosfera y el suelo.

Dada esta situación surge la oportunidad de emplear la cascarilla de arroz, para la generación de energía eléctrica que podrá satisfacer las necesidades de energía de los molinos que cuentan con este recurso.

Inicialmente se realizó la caracterización fisicoquímica de la biomasa residual, cascarilla de arroz, para su uso como combustible en la producción de energía eléctrica; para ello se acudió a la bibliografía existente con la que se determinaron los datos de análisis elemental, análisis ultimo y poder calorífico requeridos para realizar los cálculos necesarios para el dimensionamiento de la planta de gasificación. A través de los ensayos realizados en el gasificador del Jardín Botánico de Bogotá, se pudo evidenciar que la cascarilla de arroz se comporta eficientemente como combustible en el proceso de gasificación. Por medio de bibliografía existente se estimó el potencial energético de la industria arrocera de los Llanos Orientales, evidenciándose la gran oportunidad que tiene la industria molinera de la región para generar su energía y ser autosuficientes en términos energéticos. Finalmente, se



## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

realizaron los cálculos técnico – económicos que permitieron desarrollar el caso de estudio en el molino de arroz PACANDE de la ciudad de Villavicencio, proponiendo una planta de gasificación acorde a la disponibilidad del combustible a emplear, en este caso, cascarilla de arroz.

Con el fin de confirmar la funcionalidad de la tecnología empleando como combustible cascarilla de arroz, se realizaron ensayos en el gasificador existente en el Jardín Botánico de Bogotá. El equipo utilizado fue el Power Pallet – PP20 facilitado por el Jardín Botánico de Bogotá a través de convenio entre la Universidad Libre y el JBB.

Para el dimensionamiento de la planta de gasificación se realizaron los balances de energía y la selección de equipos principales, a saber: Gasificador, Ciclón, Recuperador o intercambiador de calor, Scrubber o lavador y el motor de combustión interna. La propuesta de la planta de gasificación considera el tratar la cascarilla de arroz que produce el molino (0.24 kg/s), equivalente a 858.3 kg/h con una humedad de 10%. Esta producción puede alimentar una planta de gasificación de unos 0.70MWe. Finalmente, se proyectó una planta de aproximadamente 1MWe de potencia instalada.

Con el objetivo de demostrar la viabilidad de la planta de gasificación propuesta se realizaron los análisis financieros mediante el costo – beneficio que ofrece el proyecto y los indicadores empleados para concluir frente a las alternativas financieras planteadas fueron el VPN y la TIR.

En resumen, el presente proyecto realizó el análisis técnico – económico para la utilización de la cascarilla de arroz procedente de la industria arrocera de los Llanos

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

Orientales, específicamente la generada en el molino de arroz PACANDE de la ciudad de Villavicencio. Este recurso fue analizado en el proceso de gasificación, con el fin de generar energía eléctrica.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Dada la alta demanda del arroz como alimento y las condiciones favorables para producción del mismo en Colombia, se tiene un total de 293.179 hectáreas sembradas (DANE, Encuesta nacional de arroz mecanizado , 2013), de las cuales 155.519 se encuentran en los Llanos Orientales las que producen 177.641 toneladas de arroz (DANE, Encuesta nacional de arroz mecanizado , 2013), lo que representa un 20,84% de la producción nacional.

Dentro de las dificultades que surgen a partir del cultivo de arroz está la disposición y uso final que se le da a la cascarilla de arroz, esta representa el 20% de la cosecha, o sea algo más de 58.635 toneladas anuales de esta biomasa es considerada residuo una vez finaliza el proceso de producción (Fedesarrollo, 2013) . En la actualidad la mayor parte de la cascarilla de arroz que se obtiene se elimina a través de la combustión a cielo abierto, en algunas ocasiones se deposita en los ríos, se utiliza como cama en los camiones para transportar el ganado y una mínima parte es empleada como abono (LOPEZ & SUAREZ, 2005), esto genera un impacto ambiental negativo, además de no cumplir con la reglamentación ambiental vigente, ley 99 de 1993 Ley general ambiental en Colombia, en donde se hace mención a las afectaciones e implicaciones de atentar de manera directa o indirecta contra la atmósfera, el agua o el suelo.

### 3. JUSTIFICACIÓN

El progresivo aumento de la demanda de energía para abastecer las necesidades mundiales ha hecho que crezca aceleradamente el consumo de combustibles fósiles, petróleo, carbón y gas natural. En Colombia, tras la bonanza petrolera que se vivió en el periodo comprendido entre 1983 a 1993, con los hallazgos de Caño Limón, Cusiana y Cupiagua se aseguraron reservas por 20 años. Entre los años de 2008 a 2014 se vivió una aparente bonanza en la que se vio el aumento de la producción en un 17% comparada con el año 2007, sin embargo, este aumento obedeció a la optimización de los medios de extracción mas no a un aumento en las reservas encontradas (H, UN Periódico, 2010). La situación actual no es la misma, en los últimos diez años no se han podido encontrar reservas nuevas que aseguren la suficiencia energética del país a largo plazo, por lo anterior se recurren a métodos cuestionados fuertemente en términos medio ambientales, ejemplo de ello es la exploración sísmica a la cual se le atribuye el deterioro de fuentes hídricas o el fracking o fracturamiento hidráulico que se encuentra en debate mundial por representar una amenaza para el medio ambiente, métodos que están siendo utilizados para extraer a cualquier costo la mayor cantidad del recurso.

Pero no solo las necesidades energéticas aquejan a los gobiernos, también la situación ambiental cobra cada día más relevancia. Es por ello que en diciembre de 2015 en París se llevó a cabo la cumbre del clima (COP21) en donde se llegó a un acuerdo universal de lucha contra el cambio climático. 195 países participaron en la cumbre, de ellos 186 se comprometen a fijar cada cinco años sus objetivos nacionales para reducir las emisiones de gas efecto invernadero (DINERO A. , 2015). Para cumplir con las metas fijadas por el COP21

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

es necesario diversificar la matriz energética colombiana, buscando que aumente el uso de energías alternativas y disminuyendo paralelamente la dependencia de los combustibles fósiles. En búsqueda de esa diversificación el gobierno creó la ley 1715 de 2014 que busca regular la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. Esta ley impulsa el uso de fuentes de energía tales como biomasa agrícola, energía de residuos, energía solar, energía eólica, energía geotérmica, pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, energía de los mares.

Es por ello que se deben buscar alternativas que permitan suplir las necesidades, energéticamente hablando, con procedimientos amigables con el ambiente y eficientes en términos económicos. Dada a la posición geográfica de Colombia y a su variedad de climas, las actividades agropecuarias son una fuente importante de biomasa residual, siendo esta una alternativa a desarrollar para solventar las necesidades en materia energética.

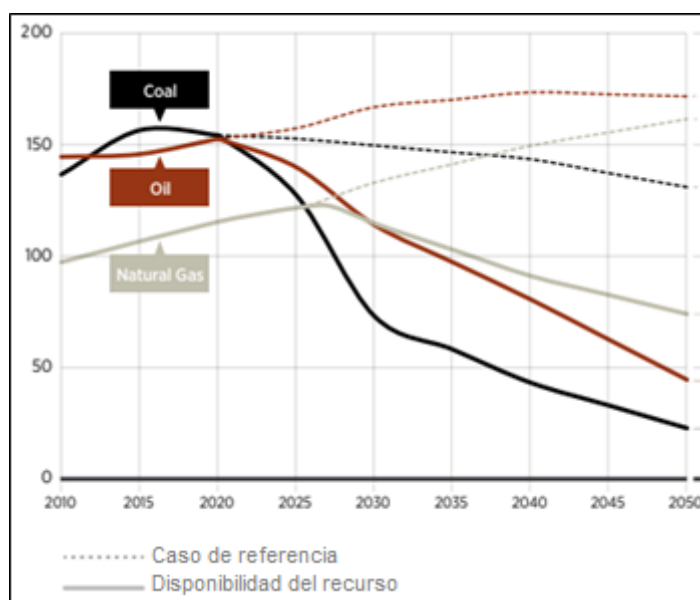
La biomasa residual del Arroz (Cascarilla de arroz) ha sido objeto de estudio para su aprovechamiento energético en múltiples tipos de procesos, bioquímicos y termoquímicos, esto con el fin de establecer su potencial energético (Romero Salvador, 2010). Estos estudios han arrojado resultados prometedores en relación a las condiciones favorables que representa emplear la cascarilla de arroz como combustible sólido, pues tiene características importantes como su poder calorífico, contenido de carbono, hidrógeno y baja humedad (Villada, Yair, & Gutierrez, 2010). Específicamente, para generación de energía a partir de la cascarilla de arroz, alrededor del mundo se han logrado materializar una cantidad importante de proyectos que permiten evidenciar la oportunidad que ello representa. Colombia en la actualidad no cuenta con el establecimiento de un proceso de aprovechamiento que permita el manejo de

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

cantidades tales como las obtenidas del cultivo de arroz a escala industrial., y evidentemente es una oportunidad para explorar. Este estudio realizara un análisis técnico – económico del uso de la cascarilla de arroz proveniente del proceso de molienda en el molino de arroz Pacande en procesos de gasificación de biomasa que permita concluir sobre las bondades de emplear su propia biomasa residual en la generación de energía eléctrica, energía que podría ser aprovechada para sus propios procesos.

#### 4. ANTECEDENTES

La disminución de las reservas de combustibles fósiles es una realidad. De acuerdo a proyecciones realizadas por IRENA – Agencia Internacional de Energías Renovables, para el año 2050 el uso de combustibles fósiles, petróleo, carbón y gas, se reducirá a un tercio de los niveles actuales (figura 1), lo que motivaría el desarrollo de tecnologías alternativas de generación de energía, conclusión a la que se llega en el informe Transformación Global de la Energía de IRENA (Renewable & Agency, 2018).



**Figura 1: Curva de decrecimiento de combustibles fósiles.**

Fuente: GLOBAL ENERGY, Renewable, I., & Agency, E. (2018). GLOBAL ENERGY. Y (Renewable & Agency, 2018). La Línea punteada indica el caso referencia y la tendencia actual de los requerimientos, la línea continua muestra la tendencia de la disponibilidad del recurso.

Colombia por su ubicación geográfica tiene las condiciones para el desarrollo de las energías renovables, tales como: energía solar, energía eólica, biomasa, energía hidráulica, energía de los océanos y energía geotérmica. Como se aprecia en la figura 2, la biomasa presenta gran potencial en las regiones Caribe, Andina y Orinoquia (Monterrosa, 2018).

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ



**Figura 2 Potenciales zonas para proyectos de energía renovable**

Fuente: (Monterrosa, 2018)

Las fuentes de biomasa residual son clasificadas por la UPME – Unidad de Planeación Minero-Energética en tres sectores:

- Sector agrícola: Residuos agrícolas de cosecha y residuos agroindustriales
- Sector pecuario: estiércol bovino, estiércol porcino y estiércol avícola.
- Sector residuos sólidos orgánicos urbanos: residuos de plazas de mercado, residuo de centros de abastos, residuos de poda.

Los cultivos generadores de biomasa residual son: los transitorio (arroz y maíz), y los permanentes (banano, café, caña de azúcar, caña de panela, palma aceite y plátano) (Universidad Industrial de Santander. Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales, Unidad de Planeación MInero Energética, & Instituto de Hidrología, 2011).El residuo generado de la producción de arroz es la cascarilla de arroz. El tratamiento que se le ha dado



## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

a este residuo es la quema directa a cielo abierto trayendo consigo problemas ambientales tanto para la atmosfera como para el suelo (LOPEZ & SUAREZ, 2005). Igualmente, la industria se está viendo enfrentada a procesos legales pues las regulaciones ambientales están siendo cada vez más estrictas frente a la afectación que pueda generar sus procesos al entorno ambiental, social, entre otros. El sector arrocero específicamente debe cumplir con las directrices consignadas en la Guía Ambiental en donde se indica claramente los lineamientos metodológicos y procedimentales para el manejo del arroz bajo un enfoque de gestión ambiental (MinAmbiente, 2012) .

La comunidad científica ha venido adelantando estudios que permiten analizar diferentes alternativas de aprovechamiento de la cascarilla de arroz, esto con el fin de aportar en la solución de la problemática que se genera por la disposición inadecuada de estos desechos, y paralelamente crear valor agregado a los procesos de la industria. Es por ello que se han podido identificar usos alternos tales como la utilización de la ceniza de cascarilla de arroz para su desempeño como agregado fino en adhesivos tipo mortero para colocación de baldosas cerámicas (Novoa Galeano, Becerra León, & Vásquez Piñeros, 2016), empleo de la cascarilla de arroz con y sin pretratamientos, como una adición en la fabricación de morteros ligeros (Serrano, Borrachero, Monzo, & Paya, 2012), mejoramiento de las propiedades mecánicas de durabilidad y compresión del cemento a partir de la mezcla con cascarilla de arroz (Jaider Sierra Aguilar, 2009), uso de la cascarilla de arroz en la remoción de metales pesados para solucionar problemas de contaminación de afluentes (Llanos Páez, Ríos Navarro, Jaramillo Páez, & Rodríguez Herrera, 2016), elaboración de sustrato de cascarilla

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

de arroz como alternativa sanitaria y de productividad para la producción de miniclaveles (Quintero C., Guzmán P., & Valenzuela, 2012).

En cuanto a la utilización de la cascarilla de arroz como combustible, se encuentra bastante interés de la comunidad científica pues se requiere un combustible alternativo a los combustibles fósiles, que permita diversificar la canasta energética y que sea económicamente viable. Se cuenta con información importante de experimentos de combustión con cascarilla de arroz que permiten determinar las propiedades energéticas de esta biomasa y su capacidad para la generación de energía (Daniel et al., 2010). Se pudo evidenciar de acuerdo a la bibliografía encontrada que existe una igualdad entre los distintos rangos de características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz en países tan distintos como China, Canadá, Estados Unidos y Colombia (Agustin Valverde G., Bienvenido Sarria L., & José P. Monteagudo Y., 2007) y que esta biomasa representa una verdadera oportunidad para los Llanos Orientales.

Los estudios deben seguir refinándose ya que de acuerdo a las conclusiones obtenidas por Estrada y Meneses (2004), los gases combustibles con bajo poder calorífico generados durante la gasificación de biomasa se prevén como combustibles alternativos para diferentes aplicaciones como son calderas, motores de combustión interna, quemadores y turbinas de gas. Sin embargo, esta fuente alternativa de energía presenta varias dificultades en su utilización; entre otras, la necesidad de la adecuación de un sistema eficiente de filtrado y la adaptación de los sistemas de combustión para recibir un mayor flujo de combustible.

## **5. OBJETIVOS**

### **5.1. OBJETIVO PRINCIPAL**

Realizar análisis técnico – económico para el uso de la biomasa residual (cascarilla de arroz) en la generación de energía a partir del proceso de gasificación. Caso de estudio: molino de arroz PACANDE de la ciudad de Villavicencio – Meta.

### **5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Verificar la caracterización fisicoquímica de la cascarilla de arroz para su uso como combustible en la producción de energía eléctrica.
- Estimar el potencial energético para gasificación de la biomasa residual en la industria arrocera (Cascarilla de Arroz) de los Llanos Orientales.
- Realizar análisis técnico- económico sobre el aprovechamiento de la cascarilla de arroz para generación de energía eléctrica a partir del proceso de gasificación, caso de estudio molino de arroz PACANDE de la ciudad de Villavicencio.

## 6. MARCO TEORICO

### 6.1. BIOMASA

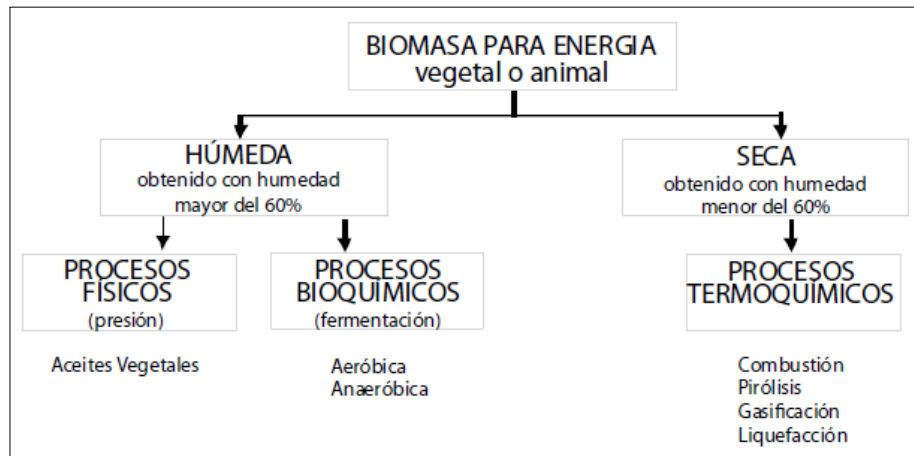
Gracias al proceso de fotosíntesis se puede obtener energía de la Biomasa. La luz es absorbida y almacenada por los vegetales, y los animales la toman en forma de energía y alimento. Cuando la materia orgánica almacena la energía solar, también crea subproductos que no pueden ser empleados por los animales ni tampoco para fabricar alimentos, pero sí pueden ser utilizados para generar energía. Algunos ejemplos de la biomasa son: residuos forestales, residuos agrícolas, estiércol, residuos sólidos urbanos, entre otros. La biomasa es un material formado principalmente por carbono, hidrógeno y oxígeno; estos compuestos son los que reaccionan exotérmicamente cuando el residuo cede energía (LA UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA, 2006)

### 6.2. CARACTERÍSTICAS DE LA BIOMASA

La caracterización de la Biomasa debe considerar determinados parámetros, a saber:

- **Tipo de Biomasa:** Desde el punto de vista energético podrían considerarse la división de la biomasa en dos grupos (SECRETARIA DE ENERGIA DE ARGENTINA, 2008):

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ



**Figura 3: Tipos de Biomasa**

Fuente: (SECRETARIA DE ENERGIA DE ARGENTINA, 2008)

**Biomasa seca:** Aquella que puede obtenerse en forma natural con un tenor de humedad menor al 60%, como la leña, paja, cascarilla de arroz, entre otros. Este tipo se presta mejor a ser utilizada energéticamente mediante procesos TERMOQUÍMICOS o FISICOQUÍMICOS, que producen directamente energía térmica o productos secundarios en la forma de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos (SECRETARIA DE ENERGIA DE ARGENTINA, 2008).

**Biomasa húmeda:** Se denomina así cuando el porcentaje de humedad supera el 60%, como por ejemplo en los residuos vegetales, residuos animales, vegetación acuática, etc. Resulta especialmente adecuada para su tratamiento mediante PROCESOS QUÍMICOS, o en algunos casos particulares, mediante simples PROCESOS FÍSICOS, obteniéndose combustibles líquidos y gaseosos (SECRETARIA DE ENERGIA DE ARGENTINA, 2008).

- **Composición química y física:** La caracterización fisicoquímica de un material involucra realizar a la muestra un análisis último y uno próximo. Estos análisis se expresan en base seca, razón por la cual se requiere previamente evaluar el contenido

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

de humedad. Con el análisis elemental se determina el contenido de compuestos simples y/o estructuras compuestas que se gasifican y que aportan energía en las reacciones de combustión. Este análisis incluye cuantificar en la muestra el porcentaje en peso de carbono (C), hidrogeno (H), azufre (S) y nitrógeno (N) (LA UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA [UPME], 2006).

**Densidad aparente:** Se define como el peso por unidad de volumen del material en el estado físico que presenta, bajo condiciones dadas. Combustibles con alta densidad aparente favorecen la relación de energía por unidad de volumen, requiriéndose menores tamaños de los equipos y aumentando los períodos entre cargas. Por otro lado, materiales con baja densidad aparente necesitan mayor volumen de almacenamiento y transporte, algunas veces presentan problemas para fluir por gravedad, lo cual complica el proceso de combustión y eleva los costos del proceso (ALBAN, 2012).

**Contenido de Humedad (HR):** Es la cantidad de agua presente dentro de una muestra de materia. Es usual expresar la humedad como una relación de masa de agua por masa de materia seca. El proceso de conversión energética de la biomasa se ve afectado por su contenido de humedad (LA UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA [UPME], 2006).

**Azufre:** Elemento que da lugar a las escorias perjudiciales y forma óxidos muy contaminantes (Universidad Industrial de Santander. Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales et al., 2011).

**Porcentaje de cenizas:** Corresponden a la cantidad de materia sólida no combustible presente en un material. Es usual expresar la cantidad de ceniza por kilogramo de

muestra. El poder calórico de un material se reduce de acuerdo a su contenido de cenizas (LA UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA [UPME], 2006).

**Material volátil:** Compuesto por combinaciones de carbono, hidrogeno y otros elementos. Su contenido da idea de la longitud de la llama (Universidad Industrial de Santander. Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales et al., 2011).

**Celulosa:** Polisacárido (carbohidrato no reductor), de peso molecular elevado, insoluble en agua e insípido (Universidad Industrial de Santander. Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales et al., 2011).

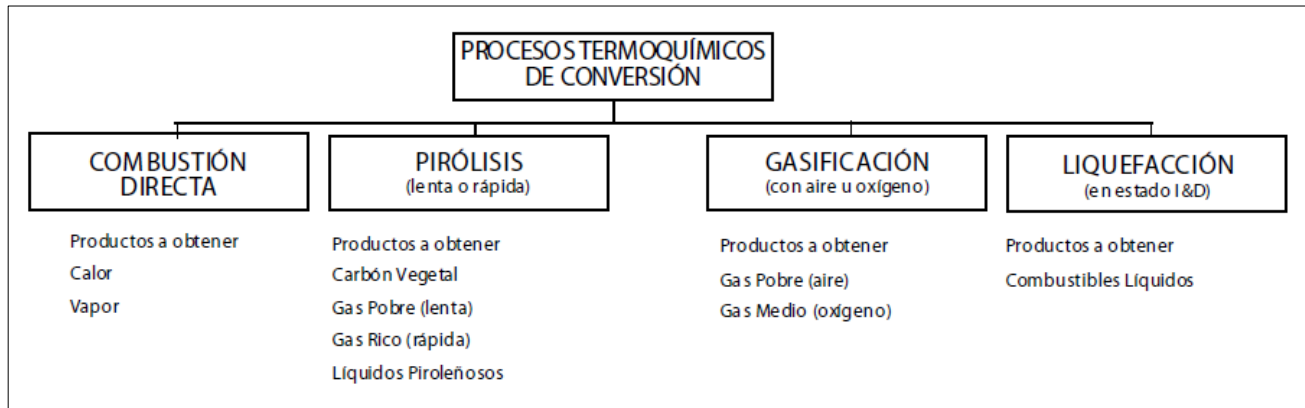
**Lignina:** Es un polímero ramificado, amorfo y heterogéneo (Universidad Industrial de Santander. Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales et al., 2011).

**Hemicelulosa:** Son carbohidratos que forman una estructura polimérica compleja, ramificada compuesta por la unión de diferentes unidades de pentosa, hexosas y ácidos de estos azúcares (Universidad Industrial de Santander. Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales et al., 2011).

**Poder Calorífico:** Corresponde a la cantidad de energía disponible en el material. La calidad de un combustible está determinada por la cantidad de energía que contiene y que puede liberar en el proceso de conversión energética. Esta cantidad de calor, referida a la unidad de masa, se denomina poder o potencia calorífica. El contenido energético de un compuesto se enuncia en unidades de energía por unidad de masa [J/kg] [cal/g] (ALBAN, 2012).

### 6.3. PROCESOS TERMOQUÍMICOS

Comprenden la combustión, gasificación y pirólisis, encontrándose aún en etapa de desarrollo la licuefacción directa. La Figura 4 describe los procesos termoquímicos aplicables a la biomasa junto con los principales productos a obtener:



**Figura 4: Proceso Termoquímico de conversión**

Fuente: (Castellanos, Vargas, & Fajardo, 2012)

A continuación, se hace una descripción del proceso típico de gasificación de biomasa:

- **Secado:** Es necesario quitar el exceso de humedad de la biomasa antes de introducirla al gasificador. Para la producción de un gas combustible con un valor de calentamiento razonablemente alto, la mayoría de los sistemas de gasificación utilizan biomasa seca con un contenido de humedad de 10-20% (Galiano, 2014).
- **Pirólisis:** La pirólisis implica la descomposición térmica de las moléculas de hidrocarburos más grandes de la biomasa en moléculas de gas más pequeñas (condensables e incondensables) sin reacción química importante con aire, gas o cualquier otro medio de gasificación. Esta reacción generalmente precede a la etapa de gasificación. Un producto importante de la pirólisis es el alquitrán formado a través de la condensación



## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

del vapor condensable producido en el proceso. Al ser un líquido pegajoso, el alquitrán crea una gran dificultad en el uso industrial del producto de gasificación.

- **Combustión:** Permite obtener energía térmica, ya sea para usos domésticos (cocción, calefacción) o industriales (calor de proceso, vapor mediante una caldera, energía mecánica utilizando el vapor de una máquina). Las tecnologías utilizadas para la combustión directa de la biomasa abarcan desde el sencillo fogón a fuego abierto (aún utilizado en vastas zonas para la cocción de alimentos) hasta calderas de alto rendimiento utilizadas en la industria (PEREZ, 2010).
- **Gasificación:** Consiste en la conversión del residuo en un gas combustible y reductor por medio de la adición de gases reactivos, generalmente, vapor de agua, oxígeno o aire. Es la continuación del proceso de pirolisis a temperaturas por encima de los 700°C transformando el residuo carbonoso en productos gaseosos, en condiciones por debajo de las cantidades estequiométricas de oxígeno ((GEA), 2004).

### 6.4. PROCESOS BIOQUÍMICOS

Este proceso degrada la biomasa por acción de microorganismos, dividiéndose en dos grupos: los que se producen en ausencia de aire (anaeróbicos) y los que se producen en presencia de aire (aeróbicos) (Universidad Industrial de Santander. Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales et al., 2011): Este proceso degrada la Biomasa por acción de microorganismos, dividiéndose en dos grupos: los que se producen en ausencia de aire (anaeróbicos) y los que se producen en presencia de aire (aeróbicos) (Universidad Industrial de Santander. Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales et al., 2011):

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

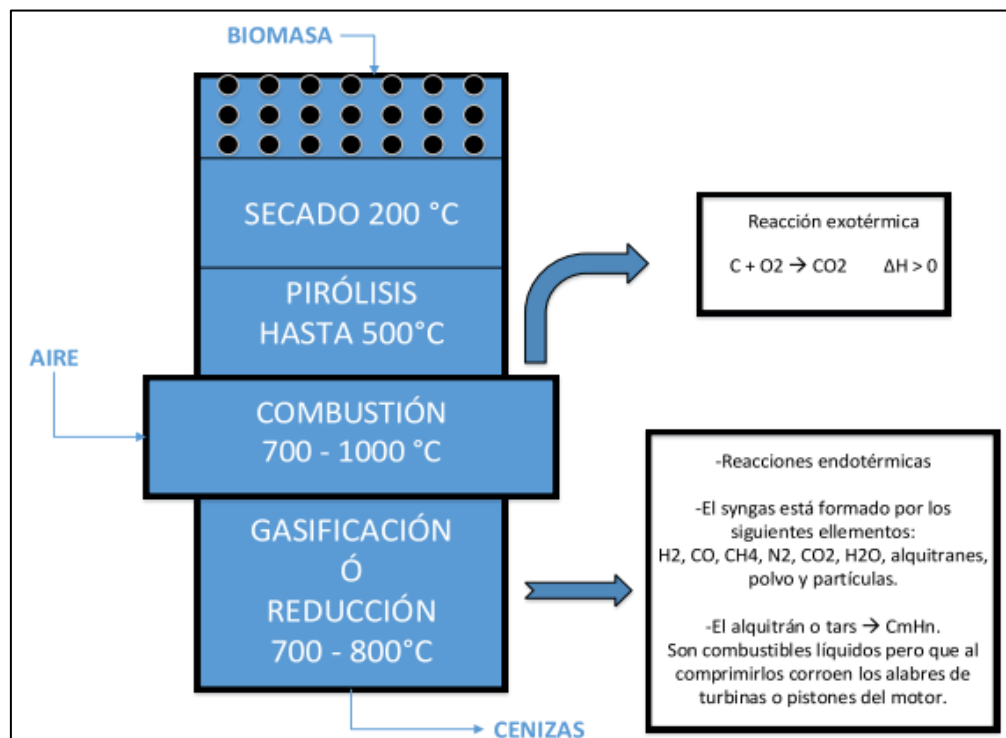
- **Procesos anaeróbicos:** En este proceso se emplea, por lo general, residuos animales o vegetales de baja relación carbono/nitrógeno, se realiza en un recipiente cerrado llamado digestor y da origen a la producción de un gas combustible denominado biogás. La biomasa resultante después de efectuar el proceso constituye un muy buen fertilizante para cultivos agrícolas. El biogás, constituido básicamente por metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), es un combustible que puede ser empleado de la misma forma que el gas natural. También puede comprimirse para su uso en vehículos de transporte, debiéndose eliminar primero su contenido de  $\text{CO}_2$  (Universidad Industrial de Santander. Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales et al., 2011).
- **Procesos aeróbicos:** La fermentación aeróbica de biomasa de alto contenido de azúcares o almidones, da origen a la formación de alcohol (etanol), que es un combustible líquido de características similares a los que se obtienen por medio de la refinación del petróleo. Las materias primas más comunes utilizadas para la producción de alcohol son la caña de azúcar, mandioca, sorgo dulce y maíz. El proceso incluye una etapa de trituración y molienda para obtener una pasta homogénea, una etapa de fermentación y una etapa de destilación y rectificación (Universidad Industrial de Santander. Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales et al., 2011).

### 6.5. PROCESO DE GASIFICACIÓN

Es un proceso termoquímico en el que un sustrato carbonoso (residuo orgánico) es transformado en un gas combustible, mediante una serie de reacciones que ocurren a una

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

temperatura determinada en presencia de un agente gasificante (aire, oxígeno y/o vapor de agua) en una cantidad menor a la cantidad estequiométrica para la combustión. En este proceso se producen gases como monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrógeno, metano e hidrocarburos de cadena pequeña (ALBAN, 2012). El potencial uso del gas obtenido del proceso como combustible en equipos de generación de potencia lo hace interesante para la formulación de alternativas sostenibles ya que permite diversificar la matriz energética. En la figura 5 se muestra un esquema general del proceso de gasificación y en la figura 6 se aprecia un esquema de un gasificador de gas pobre desde la preparación del combustible hasta lograr obtener energía eléctrica a partir de dicho gas pobre.



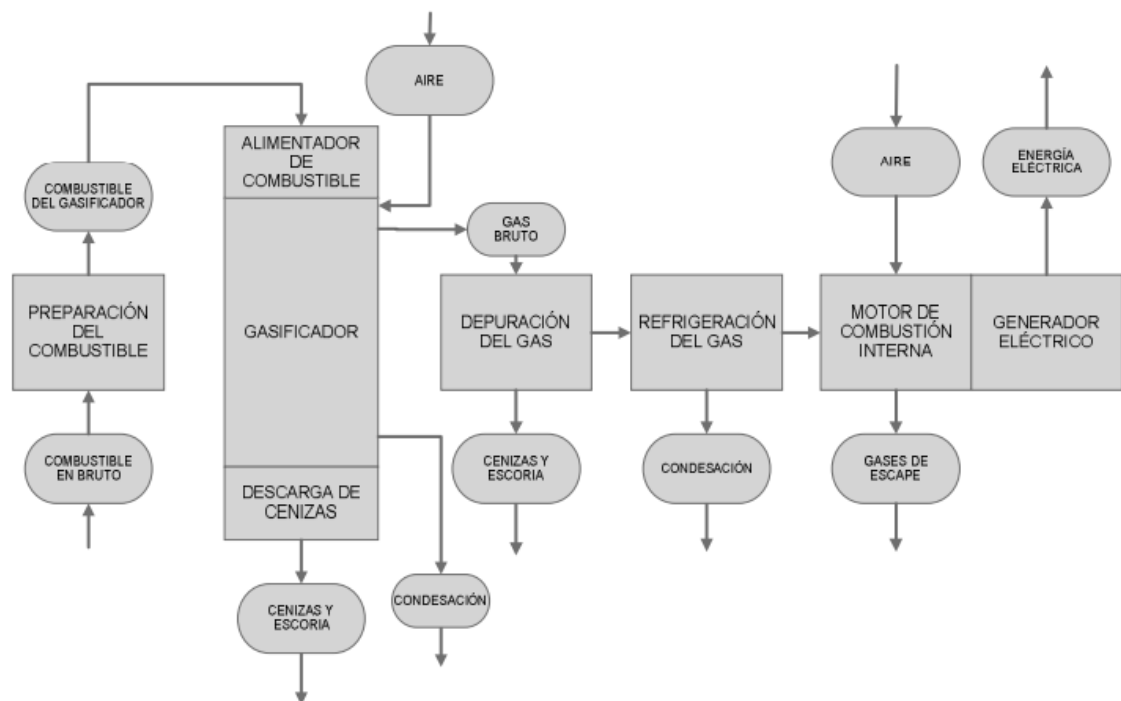
**Figura 5: Etapas y características principales en el proceso de gasificación**

Fuente: (Galiano, 2014)

Un esquema típico de un gasificador de gas pobre se aprecia en la figura 6. Como primer paso se debe preparar el combustible que será enviado al gasificador, con esto se busca

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

homogenizar la granulometría de la biomasa y el tamaño deseado. La biomasa se introduce en el gasificador y a este se le inyecta el agente gasificante (aire, oxígeno o hidrógeno). Como salidas se obtiene, residuos como cenizas y escorias que deberán ser dispuestas de manera adecuada y gas bruto. El gas en mención debe ser depurado con el fin de quitar la mayor cantidad de cenizas y escorias, y a su vez enfriado en un intercambiador. El calor desprendido de dicho proceso, y en la misma gasificación, puede ser aprovechado para calentar el agente gasificante. El gas una vez refrigerado, pasa a un sistema de filtrado que separa el agua, naftalenos y cenizas arrastradas. Existen sistemas que emplean agua externa para la limpieza de los gases. A continuación, el gas es acondicionado para su posterior alimentación a un motor de combustión interna, y a su vez, genera energía eléctrica.

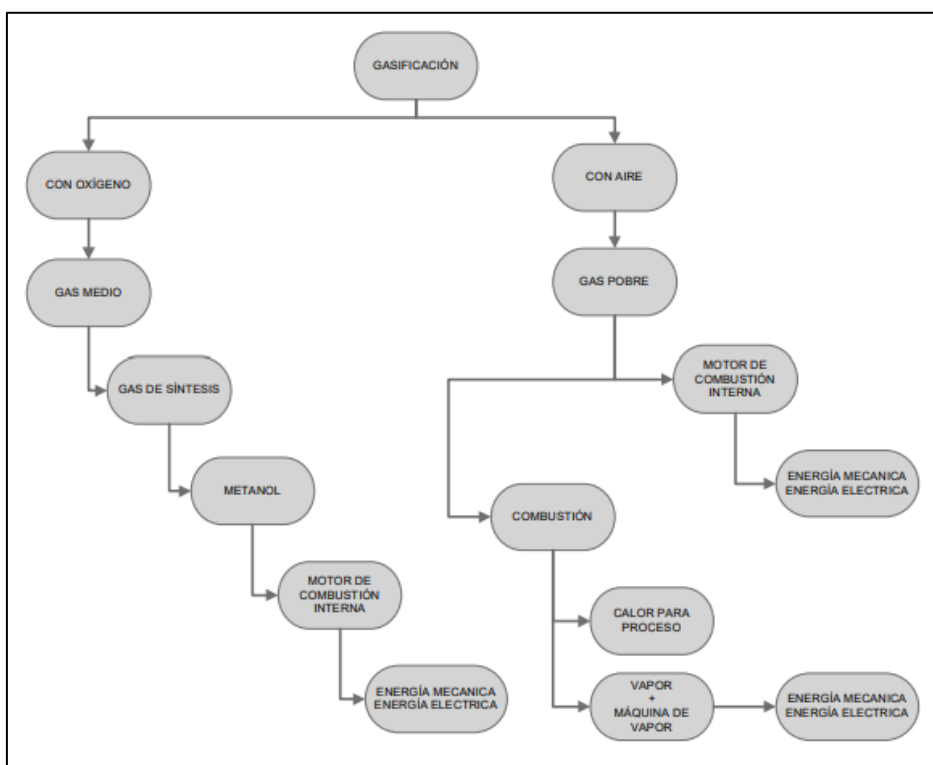


**Figura 6: Esquema de un gasificador de gas pobre**  
Fuente: (ALBERTO GÓMEZ BAREA, 2011)

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

El gas generado en el proceso de gasificación contiene una mezcla de gases combustible y no combustibles agua, polvo y compuestos de sulfuro como ( $H_2S$ ) y compuestos de nitrógeno como ( $NH_3$ ,  $HCN$ ) que son indeseables por generar condensados corrosivos y contaminantes en los gases de escape como los  $NO_x$  que son grandes contribuyentes al fenómeno de la lluvia ácida.

Una característica general de los gases combustibles producto de la gasificación de biomasa es el valor de su poder calorífico bajo (LHV) que oscila entre 4.5 y 5  $MJ/m^3$ . En la figura 7 se muestra los posibles usos del gas obtenido del proceso de gasificación.



**Figura 7: Posibles usos del gas de gasificación**

Fuente: (ALBERTO GÓMEZ BAREA, 2011)

## 6.6. TIPOS DE GASIFICADORES

Existen distintos tipos de gasificadores, los cuales se clasifican en función de cómo se relacionan en el interior del gasificador el flujo del agente gasificante y los sólidos.

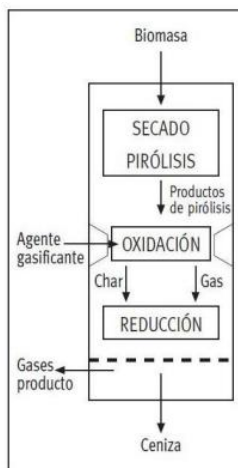
### 6.6.1. Gasificadores de lecho fijo

La clasificación que se mencionará a continuación hace referencia al movimiento del sólido fluidizado en conjunto con la fase gaseosa formando un "lecho".

- **Lecho fijo o empaquetado:** Las partículas se encuentran en un estado estacionario sobre una rejilla perforada a través de la cual los gases fluyen ejerciendo una fuerza de arrastre sobre la fase sólida y produciendo una caída de presión cambiante a lo largo del lecho. Existe una variante de este régimen que se conoce como lecho empaquetado móvil en el que los sólidos se mueven con respecto a los muros del gasificador. Se define la velocidad superficial del gas como la tasa de cambio temporal del flujo de gas por unidad de área o sección transversal del lecho (HERNÁNDEZ, 2009) .

**Lecho Fijo – Downdraft:** Con gasificadores de lecho fijo downdraft, el agente gasificante (aire u oxígeno) desciende a través del gasificador, mediante un flujo en contracorriente. La gasificación ocurre cerca en la zona inferior del gasificador, en una zona de reacción caliente poco profunda que consta de una capa de carbonilla (GONZÁLEZ, 2010). En la figura 8 se puede apreciar un gasificador de lecho fijo “downdraft.”.

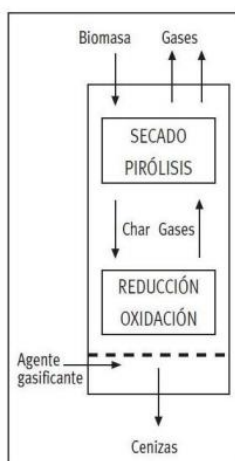
## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ



**Figura 8:** Gasificador de lecho fijo “downdraft”, corriente descendente

Fuente: (ALBERTO GÓMEZ BAREA, 2011)

**Lecho fijo – updraft:** El agente gasificante asciende a través de la zona caliente del reactor, cerca de la parte baja del gasificador, en dirección contracorriente al flujo de material sólido. Reacciones exotérmicas entre aire/oxígeno y el char, teniendo lugar en el lecho conducen el proceso de gasificación (GONZÁLEZ, 2010). En la figura 9 se puede apreciar un gasificador de lecho fijo “updraft”.



**Figura 9:** Gasificador de lecho fijo “updraft”, corriente ascendente.

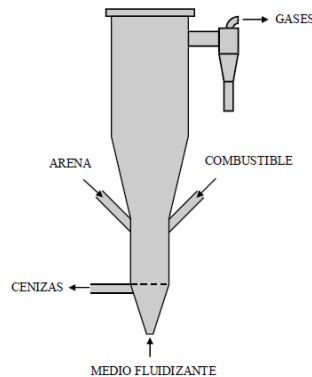
Fuente: (ALBERTO GÓMEZ BAREA, 2011)

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

### 6.6.2. Gasificadores de lecho fluidizado

Este tipo de gasificador se caracteriza porque el medio gasificante se alimenta por el fondo del reactor a través de un lecho de partículas sólidas (arena de cuarzo) a una velocidad tal que mantenga estas partículas en estado de suspensión. El lecho de arena mejora la transferencia de calor entre las partículas de la biomasa, además que favorece el mezclado y las reacciones de gasificación

- Gasificador de lecho fluidizado burbujeante:** La biomasa se alimenta mezclado o encima del lecho de arena y el medio gasificante se introduce en el fondo del gasificador, a una velocidad de alrededor de 2 a 3 m/s con el fin que se produzcan burbujas que viajen a través del lecho. El producto gaseoso abandona el gasificador por la parte superior después de pasar por un ciclón para retirar partículas de arena y cenizas volantes.



**Figura 10: Gasificador de lecho fluidizado burbujeante**

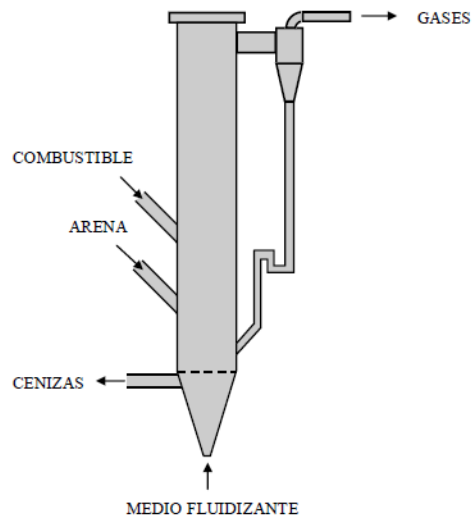
**Fuente:** (ALBERTO GOMEZ BAREA, 2011)



## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

## 6.6.3. Gasificadores de lecho de flujo de arrastre

La biomasa se alimenta conjuntamente con la arena y el agente gasificante se introduce por el fondo del gasificador. El medio gasificante se alimenta a una velocidad que permita que cierta cantidad del material del lecho sea arrastrado junto con el gas producido. El gas producido abandona el gasificador por la parte alta de un ciclón y el material del lecho es recirculado al mismo.



**Figura 11: Gasificador de lecho fluidizado circulante**

**Fuente:** (ALBERTO GÓMEZ BAREA, 2011)

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

Tabla 1: Características de gasificadores de lecho fijo o móvil.

Parámetros	Lecho Fijo/Móvil	Lecho Fluidizado	Lecho de flujo de arrastre
Tamaño de la partícula Entrante de combustible.	< 51mm	< 6mm	< 0.15mm
Tolerancia a las partículas Finas.	Limitada	Buena	Excelente
Tolerancia a las partículas Gruesas.	Muy buena	Buena	Pobre
Temperatura de salida Del gas de síntesis.	450 – 650°C	800 - 1000°C	> 1260°C
Velocidad superficial.	0.2m/s (Incinerador)	1 - 2m/s (Burbujeante) y 10- 30m/s (Circulante)	27 - 45m/s
Demanda de agente Oxidante	Baja	Moderada	Alta
Temperatura de combustión.	1090°C	800 - 1000°C	> 1990°C
Demanda de vapor de Agua.	Alta	Moderada	Baja
Eficiencia del gas frío.	80%	89.2%	80%
Escala de producción De energía.	Capacidad pequeña y Mediana	Capacidad mediana.	Gran Escala.
Subtipos de gasificadores.	Descendente, Ascendente y Cruzado	Burbujeante y Circulante.	
Valor calórico	Bajo valor calórico	Alto valor calórico.	Valor calórico alto.
Contenido de alquitranes En el gas de síntesis.	Muy alto en gasificador ascendente y muy bajo en gasificador descendente	Bajo	Bajo
Velocidad de encendido. Capacidad de control	Muy Lenta Moderada	Rápida. Alta	Muy Rápida. Alta
Problemas específicos Asociados	Producción alta de alquitranes y bajo desempeño con partículas finas	Conversión de carbón baja.	Enfriamiento del gas de síntesis.
Emisión de óxido nítrico NO	400 - 600ppm	50 - 200ppm	a) - 600ppm

Nota: Fuente (HERNÁNDEZ, 2009)

## 7. ALCANCE DEL PROYECTO Y METODOLOGÍA

Este proyecto estableció como su alcance máximo el determinar el potencial uso de la cascarilla de arroz como recurso energético para generación de energía eléctrica mediante el proceso de gasificación de la biomasa residual. Para tal fin, se emplearon los datos bibliográficos del análisis inmediato, elemental y de poder calorífico de la cascarilla de arroz y se realizaron los balances energéticos pertinentes para el dimensionamiento de equipos, con el objetivo de viabilizar técnica y económicamente el proyecto.

El caso de estudio se focalizó en el de molino de arroz Pacande de la ciudad de Villavicencio – Meta. Se dimensionó la planta de gasificación de acuerdo a la biomasa residual que estaba en capacidad de recibir este molino, se tomó como base de análisis la producción de arroz disponible en el año y su equivalente en cascarilla de arroz. Dentro de la evaluación económica se evaluó el valor actual neto, la tasa interna de retorno, la relación beneficio - costo, el periodo de recuperación de la inversión y se concluyó con respecto a la rentabilidad de dicha inversión.

Con el fin de tener un acercamiento tangible al proceso de gasificación, se realizaron pruebas experimentales de dicho proceso en el Gasificador del Jardín Botánico de Bogotá, empleando como biomasa residual la cascarilla de arroz proveniente del molino de arroz Pacande ubicado en la ciudad de Villavicencio.

## **8. CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LA BIOMASA, CASCARILLA DE ARROZ, PARA SU USO COMO COMBUSTIBLE EN LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

La caracterización de la biomasa residual corresponde a un análisis fisicoquímico y de contenido energético. El resultado del análisis próximo, ultimo y el poder calorífico fue tomado del trabajo realizado por el Grupo de Investigaciones ambientales de la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín Colombia, quienes desarrollaron experimentos de combustión con cascarilla de arroz proveniente de la ciudad de Ibagué – Tolima. Se asume son válidos los datos para la región de la Orinoquia de acuerdo a las conclusiones de la investigación realizada por las universidades de Canadá, California, RP China y de Ibagué Colombia en donde se concluye que existe una igualdad entre los rangos de las características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz para regiones tan distantes y diferentes como China, Canadá, Estados Unidos y Colombia (Agustin Valverde G. et al., 2007)

### **8.1. PROPIEDADES QUÍMICAS DE LA CASCARILLA DE ARROZ**

Para determinar las propiedades químicas de la cascarilla de arroz se recurre al análisis elemental, el cual muestra las fracciones en masa de los elementos presentes, tales como: carbono, hidrogeno, nitrógeno, azufre y oxígeno. Estas fracciones son los datos de entrada para realizar el balance de masa de la materia a utilizar, debido a que influyen directamente en la proporción del agente gasificante.

Tabla 2: Análisis elemental

<b>Propiedad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Mat. Seco (Libre de cenizas)</b>
Carbón	%	36.60
Hidrogeno	%	5.83
Nitrógeno	%	3.31
Azufre	%	0.01
Oxigeno	%	36.65

Fuente: (Daniel et al., 2010)

La combustión estequiométrica se da cuando la combustión de la cascarilla de arroz se realiza con la mínima cantidad de aire capaz de oxidar completamente el combustible. Si la cantidad de aire no es suficiente la combustión es incompleta y los gases contienen compuestos parcialmente quemados como monóxido de carbono y restos de combustible sin quemar como hidrogeno, partículas de carbono, etc., además de producir una menor cantidad de energía liberada (Antonio, Cruz, Antonio, & Mena, 2010).

En la práctica debido a la disposición de los granos de cascarilla no se produce combustión estequiométrica, por lo que es necesario exceso de aire y asegurar una combustión completa y controlar la temperatura de los gases generados (Antonio et al., 2010). En el capítulo 10.5.1. Gasificador de lecho fluido burbujeante, se detalla cual debe ser el exceso de aire requerido para asegurar una combustión completa.

## **8.2. PROPIEDADES FÍSICAS DE LA CASCARILLA DE ARROZ**

Las propiedades físicas son determinadas por el análisis ultimo (llamado también análisis próximo) que muestra la fracción en peso del contenido de cenizas, material volátil y carbono fijo. El material volátil se refiere al material que deja el sólido durante el proceso de pirolisis (800°C). El sólido residual es el carbono fijo y las cenizas.

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

Tabla 3: Análisis último.

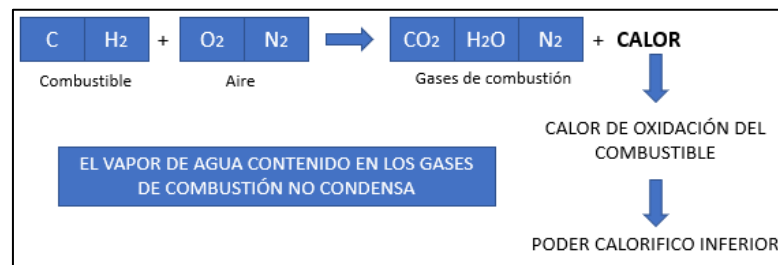
Propiedad	Unidad	Mat. Seco (Libre de cenizas)
Contenido de humedad	%	9.3
Contenido de cenizas	%	17.60
Material volátil	%	57.70
Carbono fijo	%	15.40

Nota: Fuente (Daniel et al., 2010)

### 8.3. PODER CALORÍFICO

El poder calorífico es la variable que permite cuantificar la energía liberada en los procesos de combustión de la materia. El grado de humedad influye directamente sobre el poder calorífico, ya que a mayores porcentajes de humedad menor será el valor del poder calorífico.

El poder calorífico inferior (PCI) hace referencia a la cantidad de calor que puede proporcionar el combustible cuando toda el agua en los productos permanece como vapor, los gases de combustión no se enfrían, debido a la temperatura alta de escape de estos (Antonio et al., 2010).

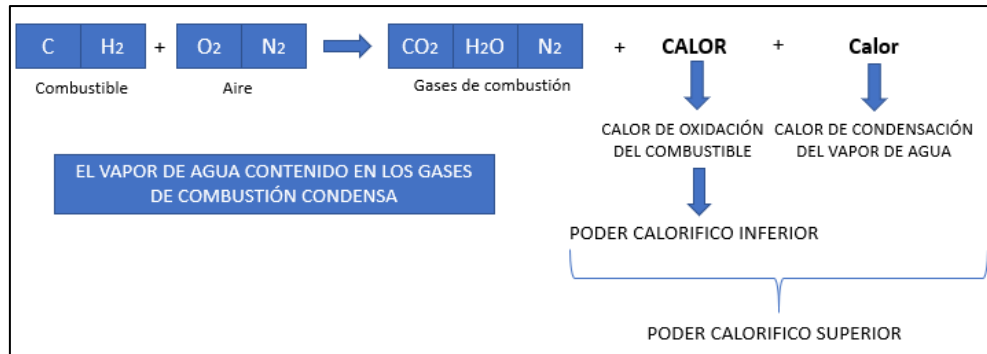


**Figura 12: Interpretación gráfica del PCI**

Fuente: (Antonio et al., 2010)

El poder calorífico superior refleja el calor que puede liberar el combustible cuando toda el agua en los productos condensa por enfriamiento (Antonio et al., 2010).

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

**Figura 13: Representación gráfica PCS**

Fuente: (Antonio et al., 2010)

Tabla 4: Poder Calorífico

Propiedad	Unidad	Mat. Seco (Libre de cenizas)
Poder calorífico inferior	MJ/kg	14.61

Nota: Fuente (Daniel et al., 2010)

## **9. POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA BIOMASA RESIDUAL EN LA INDUSTRIA**

### **ARROCERA DE LOS LLANOS ORIENTALES**

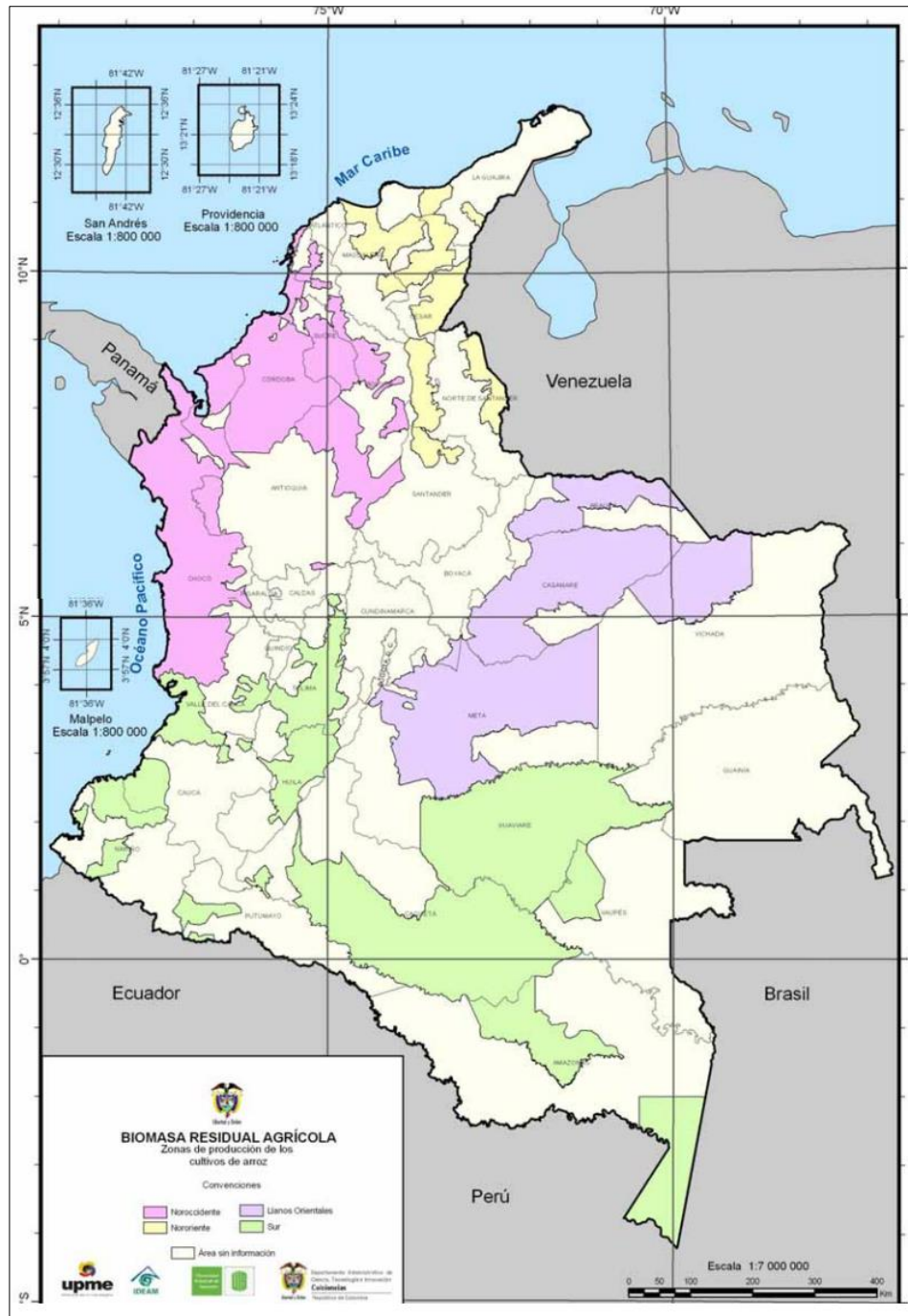
#### **9.1. POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA BIOMASA EN COLOMBIA**

Dentro del sector agrícola en Colombia el arroz ocupa el tercer lugar en extensión, dominando un 13% del área cosechada del país (Mora guevara, 2013). Su producción representa el 11% del volumen de la producción agrícola nacional, lo que hace que este producto sea de gran relevancia para el desempeño agrícola del país (Mora guevara, 2013)

El arroz concentra el 9,4% del área agrícola nacional (Angélica María Areiza Segura, 2015) y es el primer cultivo de ciclo corto en importancia. Su producción se concentra en 18 departamentos del país (figura 11). Los departamentos del Meta, Casanare, Tolima y Huila representan el 75% del total de la producción nacional de arroz paddy verde. (Agricultura, 2016)



## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ



**Figura 14: Biomasa residual agrícola. Cultivos de arroz.**

Fuente: (Ambientales, 2011)

En Colombia, los residuos asociados al cultivo de arroz son aprox. 6.3 millones de toneladas/año (Universidad Industrial de Santander. Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales et al., 2011). Cuando este material no tiene una adecuada disposición causa problemas ambientales relacionados con la dispersión de polvo y cascarilla. Aunque parte de

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

la cascarilla se comercializa para uso en establos, caballerizas, avicultura y para labores de jardinería, este mercado no posee la capacidad de consumir toda la biomasa disponible, no se conoce la cantidad de cascarilla que se consume en estos usos, pero estimaciones a priori establecen que no es más del 5% del total de la cascarilla producida. El uso que demanda los mayores volúmenes es la semi-quema controlada al aire libre, que garantiza la comercialización del producto final (cascarilla semi-quemada) usada como sustrato en los cultivos de flores. El área sembrada en Colombia no ha crecido de manera significativa a pesar de que constituye un alimento importante en la dieta de la población. Con un área de siembra de aproximadamente 490.000 hectáreas, y con una producción de 5,8 toneladas/hectárea, se calcula una generación de 580.000 toneladas/año de cascarilla de arroz, especialmente en los departamentos de Casanare, Huila, Meta y Tolima (Castro, 2014)

### 9.2. POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA BIOMASA EN LOS LLANOS ORIENTALES

En los Llanos Orientales los meses donde se concentra la mayor cantidad de las siembras se relacionan directamente con la temporada de lluvias (marzo, abril, mayo y junio). Esta condición especial constituye el más grande factor de desventaja de esta zona: la estacionalidad de las siembras y posteriormente la concentración de la cosecha (Aleman, 2011).

La recolección de arroz de las siembras del primer semestre de cada año permite observar que la salida de cosecha en los Llanos Orientales se concentra desde el mes de julio hasta octubre. De acuerdo a los resultados arrojados en la encuesta nacional de arroz mecanizado se dio una producción en los llanos orientales de 346.492 toneladas de arroz paddy verde (tabla (Departamento Nacional de Estadística, 2018).

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

Tabla 5: Área sembrada y cosechada (ha), producción (t) y rendimiento (t/ha) de arroz mecanizado

DEPARTAMENTOS	Área Sembrada			Área cosechada <sup>2</sup>			Producción <sup>3</sup>			Rendimiento		
	2017-II	2018-II	Variación	2017-II	2018-II	Variación	2017-II	2018-II	Variación	2017-II	2018-II	Variación
	Área (ha)	Área (ha)		Área (ha)	Área (ha)		Toneladas (t)	Toneladas (t)		t/ha	t/ha	
<b>TOTAL NACIONAL</b>	<b>181.315</b>	<b>167.146</b>	<b>-7,8%</b>	<b>406.092</b>	<b>333.377</b>	<b>-17,9%</b>	<b>2.059.035</b>	<b>1.904.819</b>	<b>-7,5%</b>			
Meta	14.705	14.334	-2,5%	68.052	51.873	-23,8%	319.637	277.336	-13,2%	4,7	5,3	13,8%
Casanare	16.326	17.120	4,9%	161.822	129.549	-19,9%	755.562	706.979	-6,4%	4,7	5,5	16,9%
Tolima	54.421	51.189	-5,9%	53.090	55.206	4,0%	381.769	411.463	7,8%	7,2	7,5	3,6%
Huila	16.403	18.067	10,1%	17.169	16.219	-5,5%	127.332	119.624	-6,1%	7,4	7,4	-0,5%
Resto Departamentos <sup>1</sup>	79.461	66.436	-16,4%	105.959	80.531	-24,0%	474.736	389.417	-18,0%	4,5	4,8	7,9%

Fuente: (Departamento Nacional de Estadística, 2018)

Es importante aclarar que el arroz paddy seco no se transforma en un 100% en arroz blanco grano entero. En promedio, por cada 1.000 kilogramos (una tonelada) de arroz paddy seco se obtienen 580 kilogramos de arroz blanco grano entero. Adicionalmente, para el promedio nacional por cada 1.000 kilogramos de arroz paddy seco se obtienen los siguientes subproductos, en kilogramos

Tabla 6: Subproductos de la transformación del arroz paddy seco

SUBPRODUCTO	Kg.	%
Arroz blanco grano entero	580	58%
Arroz medio grano (Arroz cristal)	65	7%
Arroz partido industrial	35	4%
Harina de pulimiento o salvado del arroz	100	10%
Cascarilla	190	19%
Impurezas	30	3%

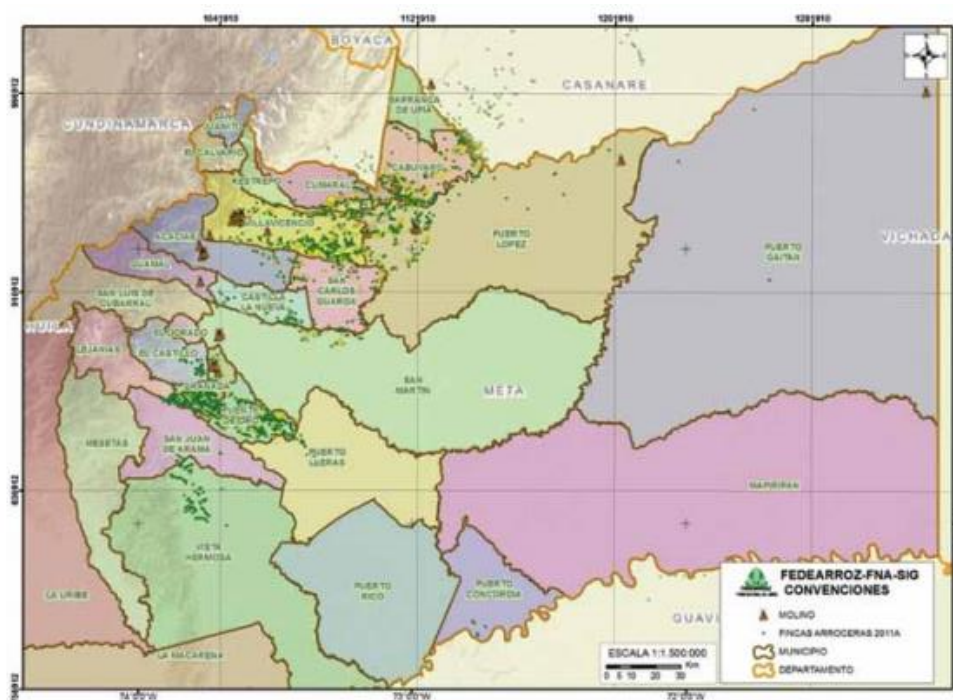
Nota: Fuente (Daniel Gómez, 2013)

Se puede concluir entonces, que para el año 2016 los Llanos Orientales presentaron una RAI (Residuo Agrícola Industrial) equivalente a 258.502.79 toneladas. Para el caso de estudio objeto de este trabajo, se empleó la cascarilla de arroz disponible en el molino de arroz PACANDE que corresponde a 7518 ton/año.

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

### 9.3. INDUSTRIA MOLINERA EN LOS LLANOS ORIENTALES

Los molinos son los encargados del recibo, acopio, almacenamiento y posterior comercialización. En el Meta, los molinos se asentaron y distribuyeron en Villavicencio (15) y en los otros municipios arroceros del departamento (Acacías (5), Guamal (1), Granada (2) y San Martín (4)) (Figura 13). La industria arrocera de los Llanos Orientales está conformada por 33 molinos, 27 de ellos están activos, 3 molinos grandes comercializan el 16% de lo producido en el país (alrededor de 311.000 toneladas de paddy seco), 16 molinos medianos comercializan el 14% de la producción nacional, y el resto son molinos pequeños. En el departamento del Casanare los molinos se encuentran en los municipios de Yopal (3), Aguazul (5) y Villanueva (1). Actualmente la industria molinera de los Llanos Orientales se ha consolidado en torno a un número reducido de empresas. Se destacan 4 empresas agroindustriales en el mercado arrocero de los Llanos Orientales: Molino Roa S.A., Flor Huila, Arroz Diana S.A. y Procearroz Ltda. (Alemán, 2011)



**Figura 15: Molinos y cultivos de arroz**

Fuente: (Fedearroz, 2011)

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

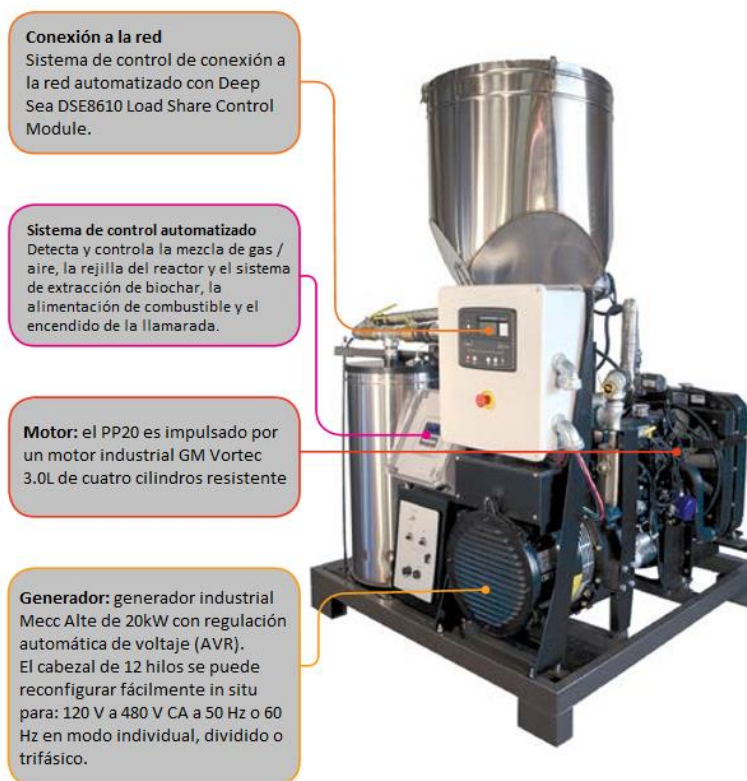
Considerando toda el área sembrada de arroz en los Llanos Orientales, la producción del producto y la masa de residuo generado se puede estimar un potencial energético que ronda los 7,255.26 TJ/año (Universidad Industrial de Santander. Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales et al., 2011), que están asociados a las 1,637,471 ton/año de cascarilla de arroz procedente de esta región. Esto evidencia la gran oportunidad que ofrece esta biomasa para ser aprovechada en generación de energía.

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

## 10. ANÁLISIS TÉCNICO: CASO DE ESTUDIO MOLINO DE ARROZ PACANDE DE LA CIUDAD DE VILLAVICENCIO

### 10.1. FUNCIONALIDAD DE LA TECNOLOGÍA – EQUIPO EMPLEADO PARA EL PROCESO DE GASIFICACIÓN.

Se realizaron ensayos de gasificación con el fin de obtener datos reales de funcionamiento de un gasificador generando energía. Para ello se utilizó el gasificador de lecho fijo existente en el Jardín Botánico de Bogotá. Los ensayos para analizar el proceso de gasificación, empleando como combustible la cascarilla de arroz, fueron realizados en el equipo Power Pallet – PP20 facilitado por el Jardín Botánico de Bogotá a través de convenio entre la Universidad Libre y el JBB. En las figuras 16 y 17 se aprecia el equipo y se describen sus partes principales. Las características técnicas del equipo se detallan en el anexo No. 1.

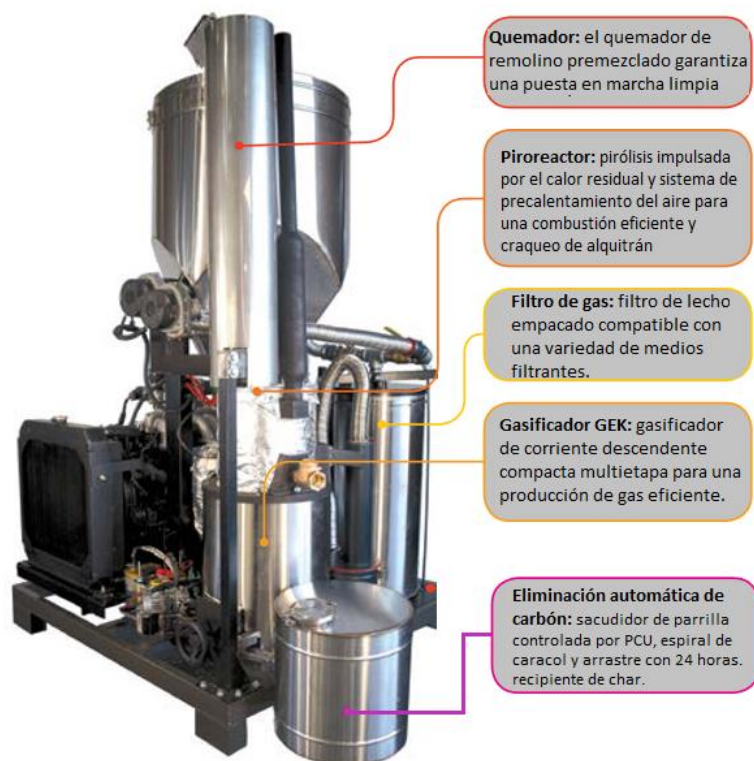


**Figura 16: Gasificador Power Pallet – PP20 - Vista frontal**

Fuente: (labs, 2018)



## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ



**Figura 17: Gasificador Power Pallet – PP20 - Vista lateral**

Fuente: (labs, 2018)

### 10.1.1. Proceso de gasificación

El proceso de gasificación se lleva a cabo en etapas que son determinadas de acuerdo con la temperatura que van alcanzando. A continuación, se describen cada una de ellas:

**Etapas 1 – Secado (70°C – 150°C):** La cascarilla de arroz se introduce por la tolva y llega al área de secado (Drying bucket) en donde el agua en forma de humedad se evapora llegando hasta la temperatura del proceso. El agua liberada en esta etapa actúa como agente gasificante.

**Etapas 2 – Pirolisis ( 250°C – 600°C):** Etapa en la que ocurre la descomposición térmica de los componentes de la biomasa. La biomasa es convertida en sólido carbonizado, liberando al medio una mezcla de gases (CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>).

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

Etapa 3 – Combustión ( $>400^{\circ}\text{C}$ ): El grado de combustión depende, principalmente de la relación aire/gas. A mayor relación, mayor temperatura del proceso y mayor grado de oxidación de los gases, influyendo negativamente en el poder calorífico y el rendimiento del proceso.

Etapa 4 – Gasificación ( $>800^{\circ}\text{C}$ ): Se produce la oxidación parcial por parte de los agentes gasificantes (Aire, oxígeno, vapor de agua o hidrógeno). Como resultado de esta etapa se tiene la formación de gases combustibles ( $\text{H}_2$  y  $\text{CO}$ ).

Como resultado del proceso de gasificación se obtienen un combustible gaseoso llamado gas de síntesis o syngas formado por  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$  y  $\text{CO}_2$ . La composición del gas depende del tipo de reactor, de las condiciones de operación (presión y temperatura) y del agente gasificante (aire, oxígeno, vapor, hidrógeno) (ALLENDES, 2015).



## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

### 10.1.2. Preparación del Gasificador Power Pallet – PP20

A continuación, se detallan las actividades que tuvieron que realizarse para dejar el equipo listo para los ensayos de gasificación empleando cascarilla de arroz como combustible:

- Limpieza del equipo: esta actividad cobra importancia debido a los sedimentos que van quedando adheridos a las paredes de las piezas, lo que podría alterar los resultados de los ensayos propios del proyecto. Como se puede apreciar en las figuras 18 y 19 se evidencia abundante hollín tanto en las mangueras como en el ciclón. Igualmente se realizó limpieza de la tolva para evitar mezcla de biomazas y se retiró material sobrante del gasificador.



Figura 18: Limpieza tubería.  
Fuente propia



Figura 19: Limpieza de ciclón.  
Fuente propia

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ



Figura 22: Retiro de material carbonizado.  
Fuente propia



Figura 20: Retiro de material carbonizado. Fuente propia



Figura 21: Limpieza de tolva.  
Fuente propia

- Cambio de filtro: Se retiró el material existente del filtro que se tenía instalado. Se preparó carbón vegetal fragmentándolo y tamizándolo para posterior aplicación al filtro. Se instaló capa de guata y se ensambló nuevamente el filtro en el equipo.



Figura 25: Retiro de filtro existente. Fuente propia



Figura 24: Fragmentación y tamizaje del carbón. Fuente propia



Figura 23: Armado de filtro.  
Fuente propia.



## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ



Figura 28: Armado de filtro.  
Fuente propia.



Figura 27: Armado de filtro.  
Fuente propia.



Figura 26: Ensamble de filtro.  
Fuente propia.

### 10.1.3. Equipo empleado para análisis de gases - Analizador portátil de combustión

El analizador portátil Bacharach PCA®3 es una herramienta que permite determinar la eficiencia de la combustión y realizar pruebas de emisiones. Se pueden instalar hasta 4 sensores, que miden todos los gases simultáneamente, incluido NO<sub>x</sub> (calculado a partir de NO o medido desde NO + NO<sub>2</sub>). PCA®3 calcula valores como eficiencia, CO<sub>2</sub> y CO sin aire para ayudar a monitorear los procesos de combustión de manera efectiva y precisa (labs, 2018).



Figura 29: Analizador portátil de combustión Bacharach Pca3  
Fuente: (Bacharach, 2018)

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

### 10.2. UBICACIÓN DEL PROYECTO

El análisis técnico económico para la generación de energía eléctrica a partir del proceso de gasificación, empleando como combustible la cascarilla de arroz, fue realizado en la empresa Inversiones Molino Pacandé, en la sucursal ubicada en la ciudad de Villavicencio – Meta, Kilómetro 1.5 Carretera del amor puente caído.

El municipio de Villavicencio se encuentra a 86km de distancia de la ciudad de Bogotá, sus coordenadas geográficas son 04°09 N 73°38 O. La altura sobre el nivel de mar es de 467 msnm y presenta una temperatura media de 27°C (Meta, 2018).

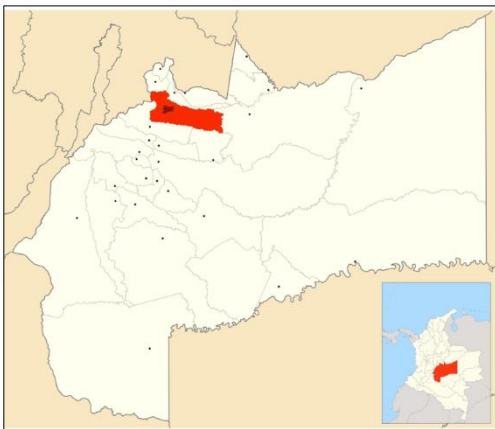


Figura 30: Ubicación del proyecto (Meta, 2018)

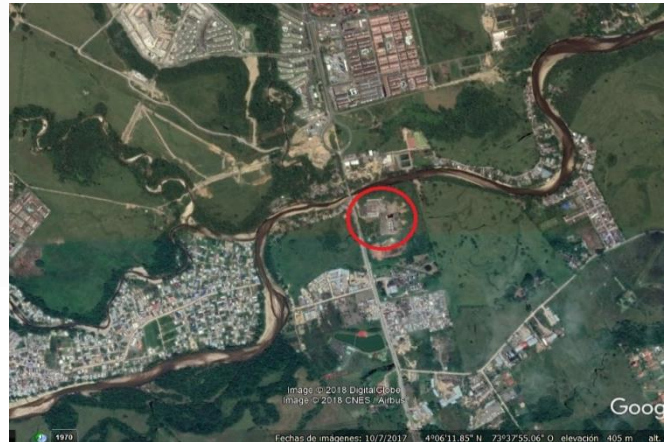


Figura 31: Ubicación Inversiones Molino Pacandé

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

## 10.3. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO EN MOLINO DE ARROZ PACANDE - PLANTA ACTUAL

**1. RECIBO**

El arroz llega al molino proveniente de los cultivos, se determina su calidad y se procede a establecer un precio

**2. PRE-LIMPIEZA**

Se remueve gran parte de los materiales extraños al grano: residuos de cosechas, piedras, metales, entre otros.

**3. SECADO**

Utilizando una corriente de aire caliente, se remueve el agua excesiva que contiene el grano, cuidando que los granos no se partan durante el proceso

**4. ALMACENAMIENTO**

Luego del proceso de secamiento el grano se almacena en silos y/o bodegas con el fin de conservarlo y dosificarlo de acuerdo con las necesidades del molino

**5. LIMPIEZA**

Dependiendo de la pre-limpieza y con el fin de eliminar todo material extraño, se realiza una limpieza antes de descascarar y empezar la trilla

**6. DESCARCARADO**

Al grano seco y limpio se le remueve la cascara por medio de la acción de dos rodillos que giran a grandes velocidades



## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ



### 7. SEPARACIÓN DE PADDY

Después de descascarar, los granos de paddy (con cascara) remanentes son separados y recirculados al descascarador



### 8. BLANQUEO Y PULIDO

Descascarados los granos de arroz son sometidos a procesos de fricción y/o abrasión con el fin de remover las capas de salvado (harina) y darle tonalidad blanca y brillante características del arroz comercial



### 9. CLASIFICACIÓN

El arroz blanco y pulido se clasifica según su tamaño y color para estandarizar el producto final, separando los granos partidos y defectuosos



### 10. MEZCLA

Antes de empacar se controla una mezcla entre granos partidos (cristal) y enteros para obtener el arroz de calidad comercial deseada



### 11. EMPAQUE

Una vez mezclado, el arroz comercial es empacado y almacenado de acuerdo con la demanda del mercado



### 12. DESPACHO

Dependiendo de los requerimientos del mercado, el arroz listo y almacenado se carga y transporta a los centros de distribución y comercialización

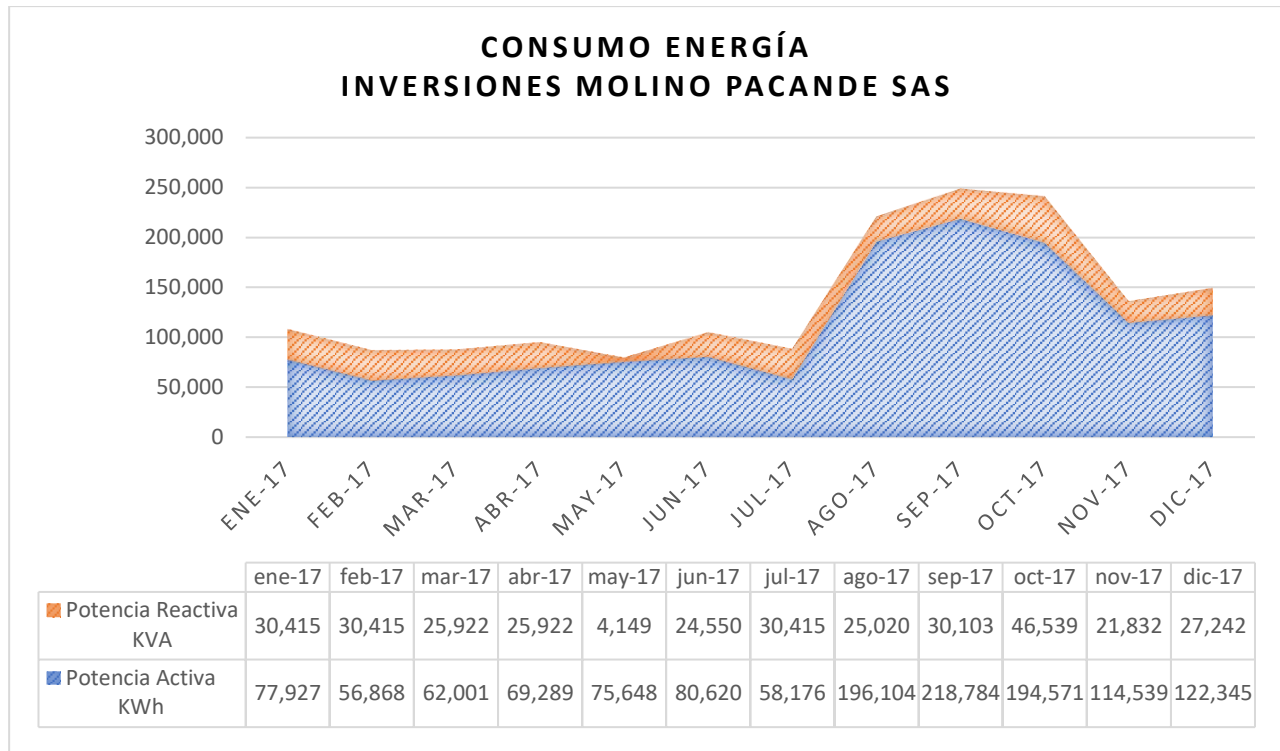
## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

### **10.4. CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN MOLINO DE ARROZ PACANDE**

La unidad de planeación minero-energética (UPME) bajo el informe CARACTERIZACIÓN DEL CONSUMO FINAL DE ENERGÍA EN EL SECTOR AGROINDUSTRIAL, elaborado en su momento por la UNIÓN TEMPORAL AGROPLAN, estimó el consumo energético de los procesos más representativos del sector agroindustrial, dentro de ellos el consumo de la trilla de arroz. Los resultados arrojados por el estudio en mención llegaron a la conclusión de que el consumo energético específico por tonelada de arroz es de 131,54kWh/Ton (AGROPLAN, Caracterización del consumo final de energía en el sector agroindustrial , 2007), resaltando que Colombia hace un uso eficiente en materia de energía comparado con otros países con características climáticas similares como Perú y Brasil.

Revisando específicamente el consumo de energía eléctrica de INVERSIONES MOLINO PACANDE SAS (figura 32) se puede apreciar que presenta un alza en la demanda durante los meses de julio a diciembre que coincide con la recepción de la cosecha del primer semestre del año.

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ



**Figura 32: Consumo de energía - Inversiones molino Pacande SAS.**

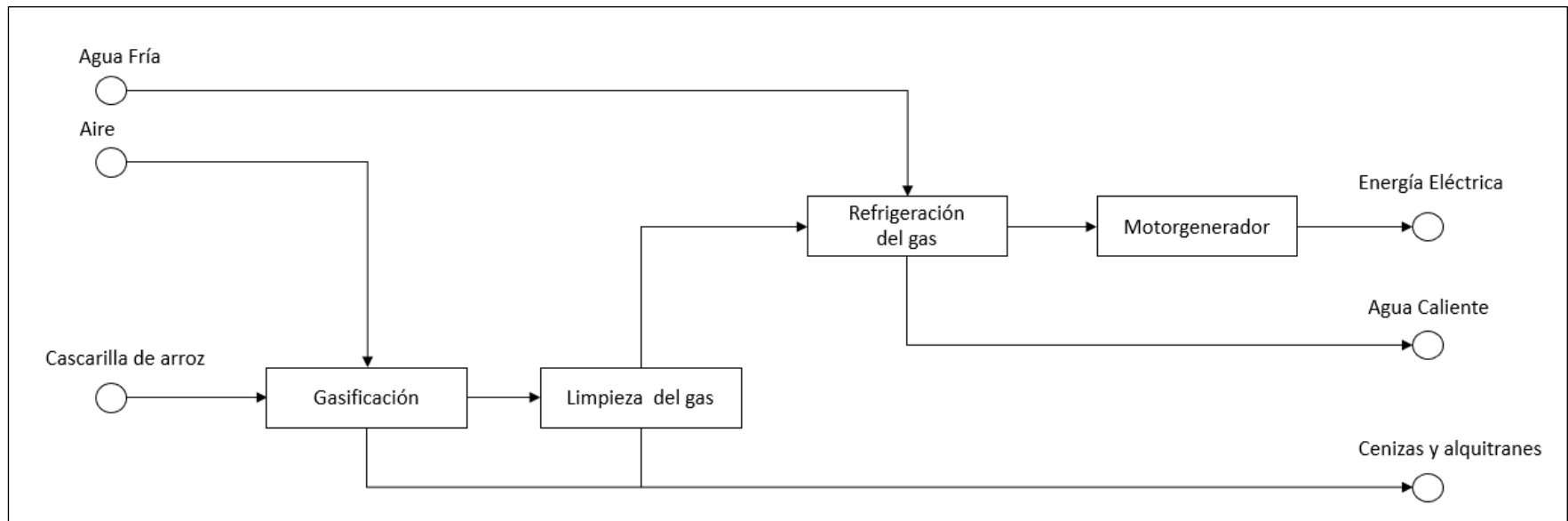
Considerando que el consumo energético por tonelada de arroz es de 131,54kWh/Ton (Unión Temporal AGROPLAN, 2007), y que el molino de arroz PACANDE tiene una capacidad para atender 37.593 Ton/año, se estarían requiriendo  $564.50KW = 0.56MW$  para atender las necesidades del molino. Como se detallará en los siguientes capítulos, con la cascarilla de arroz resultando del proceso del molino en análisis se proyecta una plata de gasificación de 1MWe de potencia instalada que permitiría suplir las necesidades del molino y considerar una venta de excedente de hasta el 44% de la energía generada.



## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

**10.5. PLANTA DE GASIFICACIÓN PROPUESTA**

A continuación, se presenta el diagrama de bloques y diagrama de flujo del proceso con los equipos principales de la planta de gasificación propuesta:



**Figura 33: Diagrama de bloques equipos principales**

GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

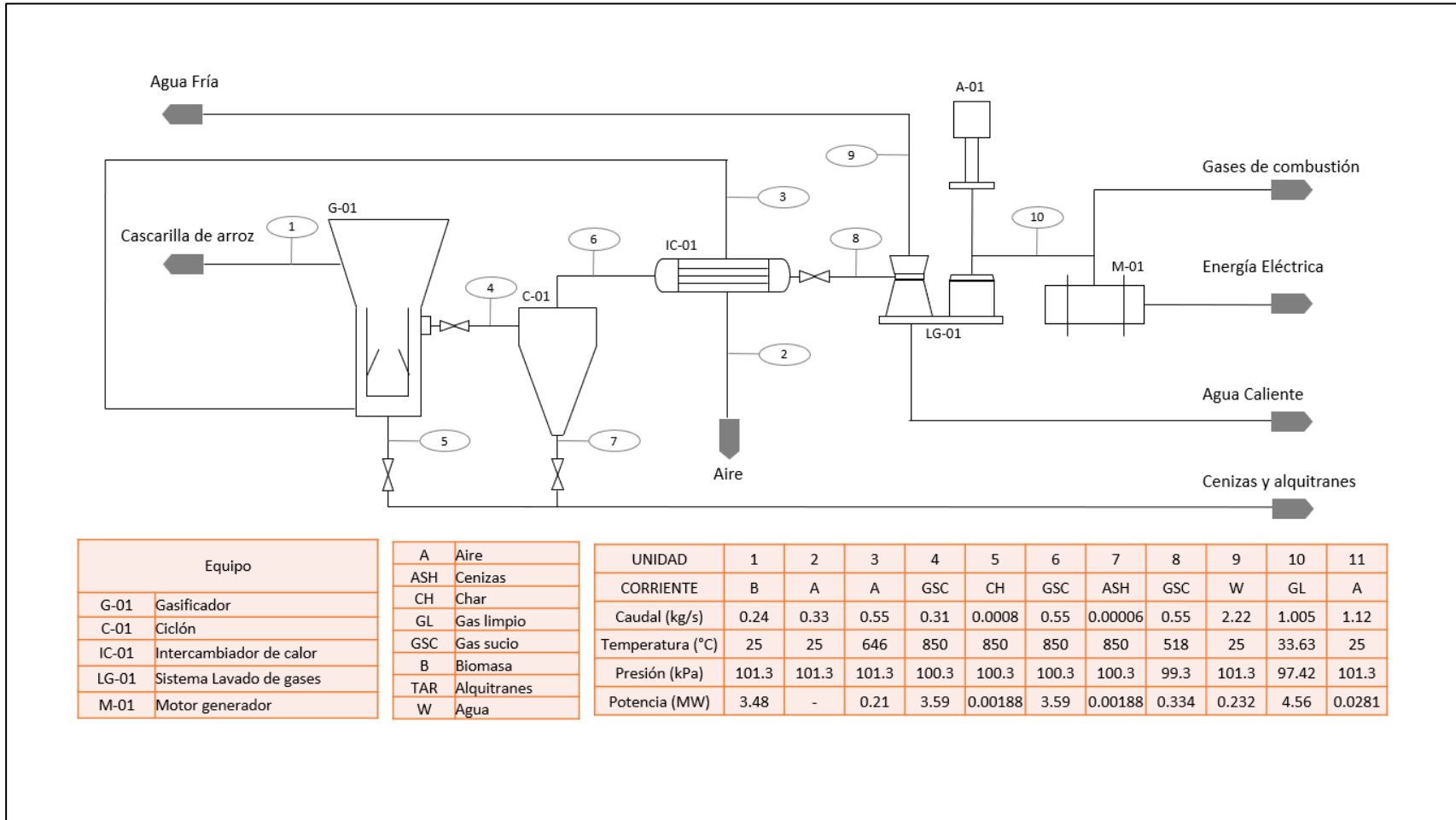


Figura 34: Diagrama de flujo del proceso

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

## 10.5.1. Gasificador de lecho fluido burbujeante

## 10.5.1.1. Balance de Energía

Molinos de arroz PACANDE recibe en sus instalaciones 37593 toneladas de arroz Paddy al año. De esta cantidad 7518.6 ton/año, 20% del arroz Paddy, corresponde a cascarilla de arroz que es el insumo a emplear para el dimensionamiento de la planta. Esta biomasa será introducida al gasificador en condiciones normales ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ,  $p=101.3\text{kPa}$ ).

El caudal de biomasa, expresado en kg/s, arroja el siguiente resultado:

$$\text{Caudal de Biomasa} = 7518.6\text{ton/año} * 1/8760\text{año/h} = 0.86\text{t/h}$$

$$\text{Caudal de Biomasa} = 0.86\text{t/h} * 1000\text{kg/t} * 1/3600\text{h/s} = \mathbf{0.24\text{kg/s}}$$

Para calcular la potencia térmica que aporta la cascarilla de arroz a la entrada del gasificador, se multiplica el caudal de biomasa disponible por el poder calorífico inferior (PCI), 14.61 MJ/kg (Daniel et al., 2010) ; así las cosas se tiene:

Tabla 7: Potencia térmica que aporta la cascarilla de arroz

Caudal de biomasa disponible	kg/s	0.24
Poder calorífico inferior	MJ/kg	14.61
Potencia térmica que aporta la cascarilla	MW	3.48

Seguidamente, se determina la cantidad estequiométrica de oxígeno que se requiere para efectuar una combustión completa en el gasificador. Se toma como base 100kg de biomasa con un contenido de humedad en la cascarilla de arroz del 10%:

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

Tabla 8: Calculo moles estequiométricas de O consumidos en la combustión completa

Componente	Porcentaje en masa, m (%)	Masa molar, Mm (g/kmol)	Cantidad de sustancia por cada 100kg de biomasa, $n=m/Mm$ (kmol/100kg biomasa)	Productos combustión completa	Fracción de O que consume la combustión completa, Y	Moles estequiométricas O consumidos en la combustión completa $ne_0=n*Y$ (kmol/100kg biomasa)
C	36.60	12.01	3.047	CO2	2	6.0949
H	5.83	1.01	5.784	H2O	0.5	2.8920
O	36.65	16.00	2.291	-	-1	-2.2908
N	3.31	14.01	0.236	N2	0	0.0000
S	0.01	32.07	0.000	SO2	2	0.0006
						<b>6.70</b>

(Daniel et al., 2010)

El número de moles de oxígeno ( $O_2$ ) requeridos corresponde a la mitad de los moles de oxígeno puro (O) calculados. Se asume que el aire atmosférico presenta la siguiente composición: Nitrógeno (N) 79% y Oxígeno (O) 21%. Para obtener el número de moles de aire estequiométrico resultantes del proceso de combustión completa, se dividen los moles estequiométricos de O consumidos en la combustión completa entre la fracción de oxígeno presente en el aire atmosférico:

$$\text{Moles estequiometricos de O, } ne_0 = 6.70 \text{ kmol O/100kg biomasa}$$

$$\text{Moles estequiometricos de } O_2, ne_{o_2} = 3.35 \text{ kmol O/100kg biomasa}$$

$$\text{Moles estequiometricos de aire, } ne_{aire}$$

$$= 3.35 \text{ kmol } O_2 / 100 \text{ kg biomasa} * 0.21 \text{ kmol aire / kmol } O_2$$

$$= 15.945 \text{ kmol aire / 100 kg biomasa}$$

A continuación, la masa de aire estequiométrica, conociendo a través de su composición su masa molar media:

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

$$Mm_{aire} = 14 * 2 * 0.79(N_2) + 16 * 2 * 0.21(O_2) = 28.84 \text{ kg aire/kmol aire}$$

$$\text{Masa de aire estequiometrica, } me_{aire}$$

$$= 15.945 \text{ kmol aire/100 kg biomasa} * 28.84 \text{ kg aire/kmol aire}$$

$$= 459.85 \text{ kg aire/100kg biomasa}$$

Para obtener el volumen de aire necesario, se aplica la ley de los gases perfectos, asumiendo que el proceso se realiza en condiciones normales (T=273.15K, p= 101325 Pa):

$$P * V = n * R * T$$

$$V = (n * R * T)/P$$

$$= (15.945 \text{ kmol aire/100 kg biomasa} * 8.314 \text{ J/mol} * 273.15 \text{ K}) / 101325 \text{ Pa}$$

$$* 1000 \text{ kmol aire/mol aire} = 357.37 \text{ Nm}^3 \text{ aire /100kg biomasa}$$

Tabla 9: Calculo volumen de aire necesario

Moles estequiometricos de O, $ne_o$	6.70 kmol O/100g biomasa
Moles estequiometricos de O <sub>2</sub> , $ne_{o2}$	3.35 kmol O <sub>2</sub> /100g biomasa
Moles estequiometricos de aire, $ne_{aire}$	15.945 kmol aire/100 kg biomasa
Masa de aire estequiometrica, $me_{aire}$	459.85 kg aire/100kg biomasa
Volumen de aire necesario, $v_{aire}$	357.37 Nm <sup>3</sup> aire /100kg biomasa

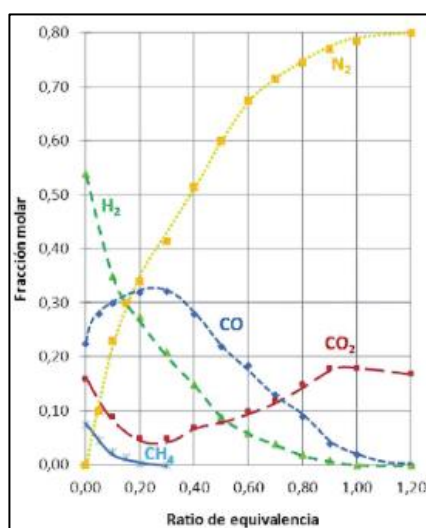
Fuente: Elaboración propia. Nota 1: Se supone aire seco para el proceso.

El agente gasificante empleado es el aire caliente que proviene del intercambiador de calor aire-gas. El flujo de aire real necesario para gasificar la cascarilla de arroz se obtiene de multiplicar la masa de aire estequiométrica por la relación de equivalencia, es decir, la cantidad de oxígeno utilizada en el proceso en relación con la utilizada en la combustión completa:

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

$$ER = (\text{Caudal de aire}/\text{Biomasa consumida})/(\text{Caudal de aire}/\text{Biomasa consumida})_{\text{estequiométrico}}$$

La cantidad de oxígeno que se aporta al sistema es el parámetro fundamental en un proceso de gasificación con aire. Los procesos optimizados de gasificación de biomasa suelen operar con relaciones de equivalencia (ER) próximas a 0,30 (Sánchez Lario, 2017). En estas condiciones se optimiza el poder calorífico del gas (normalmente entre 4 y 6 MJ/Nm<sup>3</sup>) y se maximiza el rendimiento energético del proceso (hasta 75-80%) (Sánchez Lario, 2017). La reducción progresiva de ER supone un incremento en la concentración de especies parcialmente oxidadas (H<sub>2</sub> y CO) que aportan energía química al gas producto. A valores de ER en torno a 0,30 se observa una máxima concentración de CO y un mínimo de CO<sub>2</sub>. La concentración de metano e hidrógeno aumenta al disminuir el aporte de oxígeno para llegar a un máximo de valores ER próximos a cero (Condiciones de pirólisis). En esas condiciones se maximiza el poder calorífico del gas producto, pero el caudal total del mismo es mínimo y las reacciones exotérmicas de combustión no son suficientes como para mantener la temperatura del proceso (Sánchez Lario, 2017). Por tanto, se tomará como ratio equivalente óptimo el valor medio del rango de valores típicos, es decir, se tomará el valor de 0,3.



**Figura 35: Composición típica del gas producto en función de la cantidad de oxígeno ingresada al proceso**

Fuente: (Guillermo San Miguel, 2015) La figura muestra la composición típica del gas producto a distintas relaciones de equivalencia.

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

$$\text{Masa de aire real, } m_{\text{aire}} = m_{e_{\text{aire}}} * ER$$

$$\text{Caudal de aire estequímico, } Aire_{\text{esteq.}} = m_{e_{\text{aire}}} * Biomasa_{\text{disp}}$$

$$\text{Caudal de aire real, } Aire_{\text{real}} = m_{\text{aire}} * Biomasa_{\text{disp}}$$

Tabla 10: Cálculos caudal de aire real

<i>Ratio equivalente, ER</i>	0.30
<i>Masa de aire estequímico, <math>m_{e_{\text{aire}}}</math></i>	4.60kg aire/kg biomasa
<i>Masa de aire real, <math>m_{\text{aire}}</math></i>	1.38kg aire/kg biomasa
<i>Caudal de biomasa disponible, <math>Biomasa_{\text{disp}}</math></i>	0.24kg biomasa/s
<i>Caudal de aire estequímico, <math>Aire_{\text{esteq.}}</math></i>	1.10 kg aire/s
<i>Caudal de aire real, <math>Aire_{\text{real}}</math></i>	0.33kg aire/s

Nota: Fuente (Elaboración propia)

Como hipótesis se tomará que la caída de presión del gasificador es de 100mm de c.a. (Sánchez Lario, 2017), no debe superar este valor pues con ello se garantiza el correcto funcionamiento del gasificador de lecho fluidizado. La caída de presión en mención es la diferencia entre la presión a la entrada y a la salida del gasificador:

$$100\text{mm de c. a.} = 0.98\text{kPa}$$

$$\Delta p = p_e - p_s$$

$$p_s = p_e - \Delta p = 101.325\text{kPa} - 0.98\text{kPa} = 100.345\text{kPa}$$

Para obtener la cantidad de sustancia a la entrada del gasificador (Biomasa + Aire) se calculará el número de moles de cada componente por cada 100kg de biomasa. Es necesario

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

también conocer el número de moles de nitrógeno (N) y Oxígeno (O) presentes en la composición del aire:

$$\begin{aligned} \text{Moles de O en el aire, } n_{\text{aire}} &= n_{e_0} * ER = 6.70 \text{ kmol O/100g biomasa} * 0.3 \\ &= 2.009 \text{ kmol O/100kg aire} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Moles de N en el aire, } n_{\text{aire}} &= n_{e_0} * ER * 79/21 \\ &= 6.23 \text{ kmol O/100g biomasa} * 0.3 * 79/21 = 7.558 \text{ kmol O/100kg aire} \end{aligned}$$

Se procede con la suma de todos los componentes:

Tabla 11: Cantidad de sustancia a la entrada del gasificador (Biomasa + Aire)

<b>Cantidad de sustancia a la entrada del gasificador (Biomasa + Aire)</b>			
	Componente	n(kmol/100kg biomasa)	Total
Biomasa	C	3.05	3.05
	H	5.78	6.89
	O	2.29	4.85
	N	0.24	7.79
	S	0.0003	0.0003
	H <sub>2</sub> O	0.56	
Aire	O	2.009	
	N	7.558	
<b>Temperatura a la salida del gasificador (°C)</b>			<b>850</b>

Seguidamente, se calculará el balance total en la composición del gas, estimando la cantidad de cada uno de los elementos químicos presentes en los compuestos orgánicos y volátiles y su porcentaje en volumen:



## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

Tabla 12: Composición del gas

Compuesto	Composición (%)	C	H	N	O	S	Número de moles, n (kmol/100 kg biomasa)	Porcentaje en volumen, Y(%)
CO	48%	1.4628			1.4628		1.4628	14.414
CO <sub>2</sub>	48%	1.4628			2.9256		1.4628	14.414
CH <sub>4</sub>	4%	0.1219	0.4876				0.1219	1.201
N <sub>2</sub>	-			7.7941			3.897	38.402
H <sub>2</sub> O	-		0.9319		0.4659		0.4659	4.591
H <sub>2</sub>	-		5.4748				2.737394	26.974
SO <sub>2</sub>	-				0.0006	0.0003	0.0003	0.003
	100%	3.047	6.8942	7.7941	4.8549	0.0003	10.148	100.000

Fuente: (Sánchez Lario, 2017)

A continuación, se determina el poder calorífico inferior (PCI) del syngas, tomando como base la composición volumétrica y de los datos del PCI de H<sub>2</sub>, CO y CH<sub>4</sub>.

$$X_i = (n_i * Mm_i) / \left[ \sum n_i * Mm_i \right]$$

Tabla 13: Calculo del poder calorífico inferior del syngas

Compuesto	Masa molar, Mm (g/mol)	Y (% en volumen)		X (% en masa)		Gas húmedo	Gas seco	PCI	PCI * Y (base seca)
		Base húmeda	Base seca	Base húmeda	Base seca	Mm * Y	Mm * Y	kJ/Nm <sup>3</sup>	kJ/Nm <sup>3</sup>
CO	28	14.41	15.11	17.79	18.46	4.04	4.23	12618	1906.31
CO <sub>2</sub>	44	14.41	15.11	27.95	29.01	6.34	6.65	0	0.00
CH <sub>4</sub>	16	1.20	1.26	0.85	0.88	0.19	0.20	35807	430.11
N <sub>2</sub>	28	38.40	40.25	47.39	49.18	10.75	11.27	0	0.00
H <sub>2</sub> O	18	4.59	0.00	3.64	0	0.83	0.00	0	0.00
H <sub>2</sub>	2	26.97	28.27	2.38	2.47	0.54	0.57	10788	2909.98
SO <sub>2</sub>	64	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0	0.00
		100.00	100.00	100.00	100.00	22.69	22.92		5246.40

Nota: Fuente (Elaboración propia)

El poder calorífico inferior del gas de síntesis arroja un valor de 5.24MJ/Nm<sup>3</sup>, posteriormente se procede a determinar el volumen de gas necesario por kilogramo de biomasa en

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

la combustión completa, asumiendo condiciones normales ( $T=0^{\circ}\text{C} = 273,15\text{K}$ ,  $P = 1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa}$ ) y aplicando la ley de los gases perfectos ( $R=8,314 \text{ J/molK}$ ):

$$V = (n * R * T)/P$$

$$= (10.148\text{kmol aire}/100 \text{ kg biomasa} * 8.314\text{J/mol} * 273.15\text{K})/ 101325\text{Pa}$$

$$* 1000\text{kmol aire/mol aire} = 2.2745\text{Nm}^3\text{aire} /100\text{kg biomasa}$$

A continuación, se calcula la base húmeda y la base seca, la densidad y los caudales másicos y volumétrico del gas de síntesis, ver tabla 13:

Tabla 14: Resumen cálculos base húmeda, base seca, densidad, caudales másicos y volumétricos del gas de síntesis

<i>Densidad del gas húmedo</i>	$\rho_{\text{húmedo}} = \frac{(P * M_{\text{mhúmedo}})}{R * T}$	<i>1.012 kg/Nm<sup>3</sup></i>
<i>Densidad del gas seco</i>	$\rho_{\text{seco}} = \frac{(P * M_{\text{mseco}})}{R * T}$	<i>1.022kg/Nm<sup>3</sup></i>
<i>Caudal volumétrico del gas húmedo</i>	$qv_{\text{húmedo}} = V_{\text{molar}} * n * \text{Biomasa}_{\text{disp}}$	<i>0.542 Nm<sup>3</sup>/s</i>
<i>Caudal volumétrico del gas seco</i>	$qv_{\text{seco}} = V_{\text{molar}} * (n - n_{\text{H}_2\text{O}} * \text{Biomasa}_{\text{disp}})$	<i>0.536 Nm<sup>3</sup>/s</i>
<i>Caudal másico del gas húmedo</i>	$qm_{\text{húmedo}} = qv_{\text{húmedo}} * \rho_{\text{húmedo}}$	<i>0.55 kg/s</i>
<i>Caudal másico del gas seco</i>	$qm_{\text{seco}} = qv_{\text{seco}} * \rho_{\text{seco}}$	<i>0.548 kg/s</i>
<i>Caudal másico de vapor presente en el gas</i>	$qm_{\text{vapor}} = qm_{\text{húmedo}} - qm_{\text{seco}}$	<i>0.001 kg/s</i>

Nota: Fuente (Elaboración propia)

Con los datos anteriores se procede a hallar la potencia térmica que aporta el gas de síntesis. Para tal fin se requiere conocer la temperatura de rocío del syngas:

$$p_{\text{salida}} = p_{\text{aire}} + p_{\text{vapor}}$$

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

$$p_{aire} = p_{salida} - p_{vapor}$$

Aplicando la ley de los gases perfectos:

$$p_{vapor} = \frac{n * R * T}{V} = \frac{\rho_v * R * T}{Mm_v} = \frac{\left[\left(\frac{qm_{vapor}}{qv_{seco}}\right) * R * T\right]}{Mm_v} = 3.26kPa$$

$$p_{aire} = 100.3kPa - 3.26kPa = 97.04kPa$$

Como la presión de vapor es inferior a 15kPa se puede suponer que es un gas ideal.

Se procede entonces a hallar la temperatura de rocío:

$$T_{rocío} = 6.54 + 14.526 \ln(p_{vapor}) + 0.7389 \ln(p_{vapor})^2 + 0.09486 \ln(p_{vapor})^3 + 0.4569 (p_{vapor})^{0.1984}$$

Donde:

$T_{rocío}$ : Temperatura de rocío, en °C

$p_{vapor}$ : presión del vapor de agua contenido en el gas de síntesis, en kPa

$$T_{rocío} = 25.35^{\circ}C = 298.50K$$

Para hallar la potencia total disponible es necesario encontrar las entalpias de cada uno de los componentes del gas. Se procederá primero con el cálculo de la potencia del gas seco como combustible en función del poder calorífico inferior, posteriormente se hallará la potencia térmica del gas. La potencia total será la suma de la potencia térmica y la potencia del gas seco:

$$P_{Total} = P_{seco} + P_{térmica}$$

$$P_{seco} = PCI * qv_{seco} = 2.81MW$$

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

La potencia térmica del gas de síntesis se obtiene sumando las potencias aportadas por el gas seco y la aportada por el gas húmedo:

$$P_{Térmica} = P_{G.seco} + P_{G.húmedo}$$

Pasos a seguir para hallar la potencia térmica disponible en el gas seco:

- Se halla la entalpía del syngas a la salida del gasificador ( $T_{salida} = 850^{\circ}C$ )
- Se calcula la entalpía en función de la temperatura en condiciones normales ( $T_{entrada} = 25^{\circ}C$ )
- Se halla la entalpía de cada uno de los compuestos químicos presentes en el gas de síntesis.
- Se suman las entalpías de cada compuesto y se multiplica por el caudal másico del gas seco.

$$h_{i,salida} = \int c_{p,i}(T) * dT$$

$$h_{i,entrada} = \int c_{p,i}(T) * dT$$

$$\sum h_{i,GAS} = (h_{i,salida} - h_{i,entrada}) * (x_i / Mm_i)$$

$$P_{G.seco} = qm_{seco} * \sum h_{i,GAS}$$

El calor específico de cada componente, dependiendo de la temperatura, se calculará así (Naranjo Valencia & Aristizábal Álvarez, 2015):

$$c_p = a + b * T + c * T^2 + d * T^3$$

Donde:

Cp: Calor específico molar de cada compuesto químico, en kJ/(kmol\*K)

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

a,b,c,d: Constantes, diferentes para cada compuesto químico. De acuerdo a bibliografía consultada.

T: Temperatura en K.

Tabla 15: Entalpías requeridas para el cálculo de la potencia del gas seco

Componente	Calor específico de cada componente				Tentrada		Tsalida		hi,entrada	hi,salida	hi,gas	sumatoria
	cp(T)= a + bT+cT2+dT3 (kJ/kmolK)											hi, gas
	a*	d*	c*	d*	°C	K	°C	K	kJ/kmol	kJ/kmol	kJ/kg	kJ/kg
CO	28.16	0.0017	0.0000	0.0000					8514.82	34375.20	170.49	
CO2	22.26	0.0598	0.0000	0.0000					9000.34	49173.32	264.84	
CH4	19.89	0.0502	0.0000	0.0000					8254.55	55765.72	26.10	
N2	28.9	-0.0016	0.0000	0.0000	25	298.15	850	1123.15	8611.25	34121.57	448.05	1415.61
H2	29.11	-0.0019	0.0000	0.0000					8628.32	33039.48	0.00	
SO2	25.78	0.058	0.0000	0.0000					9944.63	50969.03	506.12	

Fuente: \* (Meléndez Mendizabal, 2017)

A continuación, la potencia térmica disponible en el gas seco:

$$P_{G.seco} = qm_{seco} * \sum h_{i,gas} = 0.548kg/s * 1415.61kJ/kg = 0.78MW$$

Pasos a seguir para obtener la potencia térmica disponible en el gas húmedo:

- Se halla la entalpía del vapor de agua a la temperatura de salida del gasificador ( $h_{H_2O, salida}$  a  $850^{\circ}C$ )
- Se obtiene la entalpía del agua a la temperatura de rocío ( $h_{H_2O, rocío}$  a  $16,55^{\circ}C$ )
- Se divide la diferencia de ambas entalpías por la masa molar del agua
- Dicho resultado se multiplica por el caudal másico de vapor presente en el gas

$$h_{H_2O, salida} = \int c_{p,H_2O}(T) * dT$$

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

$$h_{H_2O,rocío} = \int c_{p,H_2O}(T) * dT$$

$$h_{H_2O} = (h_{H_2O,salida} - h_{H_2O,rocío})/Mm_{H_2O}$$

$$P_{G.húmedo} = qm_{vapor} * h_{H_2O}$$

El calor específico del H<sub>2</sub>O, dependiendo de la temperatura se calculará así:

$$c_p = a + b * T + c * T^2 + d * T^3$$

Tabla 16: Entalpias requeridas para el cálculo de la potencia del gas húmedo

Componente	Calor específico de cada componente				Trocío °C	Tsalida K	Tsalida °C	K	h <sub>H<sub>2</sub>O, rocío</sub> kJ/kmol
	cp(T)= a + bT+cT <sup>2</sup> +dT <sup>3</sup> (kJ/kmolK)								
	a	d	c	d					
H <sub>2</sub> O	32.24	0.0019	0.0000	0.0000	25.35	298.5	850	1123.15	9798.80

h <sub>H<sub>2</sub>O, entrada</sub>	h <sub>H<sub>2</sub>O, salida</sub>	h <sub>v, H<sub>2</sub>O</sub>	Tablas		h <sub>v-L</sub>	h <sub>L,H<sub>2</sub>O</sub>	h <sub>Ghúmedo</sub>
			h <sub>v</sub>	h <sub>L</sub>			
kJ/kmol	kJ/kmol	kJ/Kg	kJ/Kg	kJ/Kg	kJ/Kg	kJ/Kg	kJ/Kg
9786.87	41171.57	1742.93	2675.8	417.51	2258.29	-0.66	4000.56

$$P_{G.húmedo} = qm_{vapor} * h_{G.húmedo} = 0.001kg/s * 4000.56kJ/kg = 0.0036MW$$

El balance de potencia aportado por el gas de síntesis es el siguiente:

$$P_{G.seco} = 0.78MW$$

$$P_{G.húmedo} = 0.0036MW$$

$$P_{térmica} = P_{G.seco} + P_{G.húmedo} = 0.78MW + 0.0036MW = 0.78MW$$

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

$$P_{seco} = 2.81MW$$

$$P_{TOTAL} = P_{seco} + P_{térmica} = 2.81MW + 0.78MW = 3.59MW$$

Tabla 17: Resumen potencia total

$P_{Gseco}$	Potencia térmica aportada por el gas seco	MW	0.78
$P_{Ghúmedo}$	Potencia térmica aportada por el gas húmedo	MW	0.0036
$P_{térmica}$	Potencia térmico total	MW	0.78
$P_{seco}$	Potencia aportada por el gas seco como combustible	MW	2.81
$P_{TOTAL}$	Potencia total aportada por el gas de síntesis	MW	3.59

Nota: Fuente (Elaboración propia)

Las cenizas, char y alquitranes hacen parte de los inquemados resultantes de las reacciones al interior del gasificador. Se procederá inicialmente a calcular los flujos de materia y energía de las cenizas y el char, y posteriormente los cálculos correspondientes a los alquitranes.

Como hipótesis se asume la presencia de inquemados en el reactor de gasificación, se obtiene la entalpía del syngas a la temperatura de salida del gasificador ( $T=850^{\circ}C$ ). De acuerdo a la bibliografía consultada existe una proporción típica de cenizas y char en relación a la biomasa disponible, es de 0.5kg de cenizas por cada 100kg de biomasa (Naranjo Valencia & Aristizábal Álvarez, 2015).

El calor específico de las cenizas y el char está dado por (Naranjo Valencia & Aristizábal Álvarez, 2015):

$$c_p = 4.184 * (0.180 + 7.78 \times 10^{-5} * t)$$

En donde:

$c_p$ : calor específico del conjunto de cenizas y char, en kJ/kgF

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

T: temperatura a la salida del gasificador, en F

$$t_{salida} = 850^{\circ}C = (850^{\circ}C * 1.8 + 32)F/^{\circ}C = 1562F$$

$$\begin{aligned} h_{cenizas+char} &= \int c_p(T)dT = \int [4.184 * (0.180 + 7.78x10^{-5} * T)]dT \\ &= 1573.5kJ/kg cenizas \end{aligned}$$

$$Ratio_{C-B} = 0.5kg \text{ cenizas}/100kg \text{ biomasa} = 0.005kg \text{ cenizas}/100kg \text{ biomasa}$$

*Caudal másico total de la ceniza disponible*

$$qm_{cenizas} = Ratio_{C-B} * Biomasa_{disponible} = 0.0012 \text{ kg cenizas}/s$$

Las cenizas volantes son arrastradas por el syngas fuera del gasificador. De acuerdo con la bibliografía encontrada, se supone que estas equivalen al 10% del total de cenizas formadas en la gasificación (Sánchez Lario, 2017):

*Caudal másico de cenizas volantes disponibles*

$$qm_{volantes} = 0.1 * qm_{cenizas} = 0.00012kg \text{ volantes}/s$$

*Caudal másico de char extraído*

$$qm_{char} = qm_{ceniza} - qm_{volantes} = 0.00107kg \text{ char}/s$$

*Potencia disponible de las cenizas y el char*

$$P_{cenizas+char} = qm_{cenizas} * h_{cenizas+char} = 1.88KW = 0.00188MW$$

Pasos a seguir para obtener los flujos de masa y energía de los alquitranes:

Se halla la entalpía del syngas a la temperatura de salida del gasificador (T = 850°C)



## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

Se asume, de acuerdo con información consultada, que la proporción de alquitranes con respecto a la cantidad de syngas obtenido es de 0,5 a 3 g por Nm<sup>3</sup> de gas húmedo (Sánchez Lario, 2017).

Se tomará como hipótesis la proporción más elevada, es decir, 3 g/Nm<sup>3</sup> de gas húmedo.

$$c_p = 4.22 \times 10^{-3} * T$$

C<sub>p</sub>: calor específico del conjunto de cenizas y char, en kJ/kg\*K

T: temperatura a la salida del gasificador, en K.

$$t_{salida} = 850^{\circ}C = 1123.15K$$

$$h_{alquitranes} = \int c_p(T) dT = \int [4.22 \times 10^{-3} * T] dT = 2574.04 kJ/kg \text{ alquitranes}$$

$$Ratio_{A-B} = 3 \text{ g alquitranes/Nm}^3 \text{ gas húmedo} = 0.003 \text{ kg alquitranes/Nm}^3 \text{ gas húmedo}$$

*Caudal másico de alquitranes disponible*

$$qm_{alquitranes} = Ratio_{A-B} * qv_{húmedo} = 0.0016 \text{ kg alquitranes/s}$$

*Potencia disponible en los alquitranes*

$$P_{alquitranes} = qm_{alquitranes} * h_{alquitranes} = 0.00419 \text{ MW}$$

A continuación, se calcula el rendimiento del proceso de gasificación:

$$\eta_G = \text{Energía del gas} / \text{Energía del combustible}$$

$$E_{gas} = v_{gas} (\text{Nm}^3 / \text{kg biomasa}) * PCI_{gas} (\text{kJ/Nm}^3) = 11932.85 \text{ kJ/kg}$$

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

$$E_{combustible} = PCI_{Cascarilla\ de\ arroz} (kJ/kg) = 14610\ kJ/kg$$

$$\eta_G = \left( \frac{E_{gas}}{E_{combustible}} \right) * 100 = 81.68\%$$

## 10.5.1.2. Selección de equipo

La propuesta de la planta de gasificación considera el tratar la cascarilla de arroz que produce el molino 0.24 kg/s, equivalente a 858.3 kg/h con una humedad de 10%. Esta producción puede alimentar una planta de gasificación de unos 0.70MWe. Se proyecta entonces una planta de aproximadamente 1MWe de potencia instalada.

A continuación, los datos de entrada del gasificador, balance de materia y potencias:

Tabla 18: Datos de entrada del gasificador

DATOS DE ENTREGA DEL GASIFICADOR		
1	Caudal de biomasa disponible, $Biomasa_{disp.}(kg/s)$	0.24
2	Potencia disponible de la biomasa, $P_{casc}(MW)$	3.48
3	Ratio equivalente, ER	0.3
4	Temperatura de salida del gas de síntesis, $T_{salida}(^{\circ}C)$	850.00
5	Caudal másico de aire, $q_{m_{aire}}(kg/s)$	0.33
6	Temperatura del flujo másico de aire, $T_{aire}(^{\circ}C)$	646.00
7	Potencia térmica disponible en el aire, $P_{aire}(MW)$	0.40

Fuente: Elaboración propia

Tabla 19: Balance de materia gasificador

BALANCE DE MATERIA			
Caudal másico de aire,	0.3	Caudal másico del gas húmedo	0.55
$q_{m_{aire}}(kg/s)$	3	$q_{m_{húmedo}}(kg/s)$	
Caudal de biomasa disponible,	0.2	Caudal másico cenizas y el char	0.001
$Biomasa_{disp.}(kg/s)$	4	$q_{m_{cenizas+char}}(kg/s)$	2
	0.5	Caudal másico de los alquitranes	0.001
<b>TOTAL (kg/s)</b>	7	$q_{m_{alquitranes}}(kg/s)$	6
		<b>TOTAL (kg/s)</b>	0.55

Fuente: Elaboración propia

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

Tabla 20: Balance de potencias Gasificador

<b>BALANCE DE POTENCIAS</b>			
Potencia disponible en el aire, Paire (MW)	0.21	Potencia disponible en el gas húmedo, Pghúmedo (MW)	3.59134
Potencia disponible en la biomasa, Pcasc (MW)	3.48	Potencia disponible en las cenizas y el char, Pcenizas+char (MW)	0.00188
<b>TOTAL (MW)</b>	<b>3.70</b>	Potencia disponible en los alquitranes, Palquitranes (MW)	0.00419
		<b>TOTAL (MW)</b>	<b>3.60</b>

Fuente: Elaboración propia

Para la elección del tipo de gasificador se realizó un análisis de los requerimientos y las ventajas de los tipos de gasificadores existentes. Para ello se elaboró una matriz multi-atributo con los criterios más representativos de las tecnologías existentes, en donde se dio una calificación de 1 a 3, siendo 1 la mejor calificación y 3 la menos favorable. La tecnología cuya sumatoria dio menor puntuación fue la seleccionada. A continuación, el desarrollo de la matriz multi-atributo.

Tabla 21. Matriz multi-atributo selección Gasificador

<b>CRITERIOS DE SELECCIÓN</b>	<b>TIPOS DE GASIFICADORES</b>		
	<b>Lecho Fijo/Móvil</b>	<b>Lecho Fluidizado</b>	<b>Lecho de flujo de arrastre</b>
Tolerancia a las partículas finas	1	2	3
Temperatura de salida del gas de síntesis	1	3	2
Tamaño de las partículas	3	2	1
Demanda de agente oxidante	1	3	2
Temperatura de combustión	2	1	3
Eficiencia del gas frío	2	1	2
Escala de producción de energía	2	1	3
Contenido de alquitranes en el gas de síntesis	3	1	1
Velocidad de encendido	3	2	1
Emisión de Óxido Nítrico NO	2	1	3
<b>SUMATORIA</b>	<b>20</b>	<b>17</b>	<b>21</b>

Nota: Fuente (Elaboración propia)

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

El gasificador seleccionado es el de lecho fluidizado, como se puede observar en la tabla 17. Este equipo es el sugerido, pues es un mecanismo a pequeña escala, económico en su construcción y puede manejar un gas de síntesis con poca cantidad de alquitranes, por ello se ajusta a las necesidades de la planta requerida.

Finalmente, para la elección del gasificador se recurre a los equipos ofrecidos por los fabricantes. Se tomó el catálogo del fabricante chino Dongding Heavy Industry y se estudiaron los equipos ofertados. El equipo seleccionado es el modelo QM2.6, pues se ajusta a las necesidades de la planta que se está proponiendo para implementar en el molino:

Tabla 22: Gasificadores ofrecidos por el fabricante Dong Ding Heavy Industry

Modelo (mm)	QM1.6	QM1.8	QM2.0	QM2.4	QM2.6	QM3.0
Cantidad de consumo de combustible (kg/h)	350-460	500-600	500-720	700-1040	850-1200	1700-2000
Gasificación agente	Aire					
Temperatura de salida de los gases (°C)	750-850					
Capacidad optima de generación (MWt)	1 – 20					
Diámetro de la cámara (M)	1600	1800	2000	2400	2600	3000
Hogar superficie activa	2.01	2.54	3.14	4.52	5.31	7.07
Poder calorífico del gas (kJ/Nm <sup>3</sup> )	5020-6000					
Peso bruto (T)	10	20	23.4	29.8	32	37.6
Potencia del motor (kW)	8	10	14	20	20	27

**Nota: Fuente** (Dong Ding Heavy Industry)

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

## 10.5.2. Ciclón

## 10.5.2.1. Balance de Energía

Una de las dificultades que se tiene en la generación de energía eléctrica a partir del proceso de gasificación es la calidad del gas que se va a inyectar a los motores, de allí la importancia en la selección de un ciclón con la capacidad de eliminar la mayor cantidad de partículas. Los ciclones de alta eficiencia pueden remover partículas de  $5\mu\text{m}$  con eficiencias que pueden alcanzar el 90% (Londoño Echeverri, 2006).

Tabla 23: Intervalo de eficiencia de remoción para las diferentes familias de ciclones

Familias de ciclones	Eficiencia		
	PST	PM10	PM2,5
Convencionales	70 - 90	30 - 90	0 - 40
Alta eficiencia	80 - 99	60 - 95	20 - 70
Alta capacidad	80 - 99	10 - 40	0 - 10

Nota; Fuente (Londoño Echeverri, 2006).

Para efectos del presente diseño se asume una eficiencia del 80% y las cenizas se consideran como partículas que son separadas del resto del ciclón:

Tabla 24: Datos de entrada y salida del ciclón

Rendimiento del ciclón (%), $\eta_{\text{ciclón}}$ (%)	80
<b>A LA ENTRADA DEL CICLÓN</b>	
Caudal másico del gas de síntesis húmedo, $q_{\text{m}_{\text{húmedo}}}$ (kg/s)	0.31
Caudal másico de las cenizas volantes, $q_{\text{m}_{\text{volantes}}}$ (kg/s)	0.00008
Caudal másico de alquitranes, $q_{\text{m}_{\text{alquitranes}}}$ (kg/s)	0.0008
<b>A LA SALIDA DEL CICLÓN</b>	
Caudal másico del gas de síntesis húmedo, $q_{\text{m}_{\text{húmedo}}}$ (kg/s)	0.31
Caudal másico de las cenizas volantes, $q_{\text{m}_{\text{volantes}}}$ (kg/s)	0
Caudal másico de alquitranes, $q_{\text{m}_{\text{alquitranes}}}$ (kg/s)	0.0008
Caudal másico de cenizas volantes eliminadas por el ciclón, $q_{\text{m}_{\text{eliminadas}}}$ (kg/s)	0.00006

Nota: Fuente (Elaboración propia)

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

A continuación, se muestra como fue calculado el caudal másico de cenizas volantes eliminadas por el ciclón:

$$qm_{eliminadas} = qm_{volantes} * \eta_{ciclón} = 0.00012 \text{kg/s} * 0.8 = 9.53 \times 10^{-5} \text{ kg volantes/s}$$

## 10.5.2.2. Selección de equipo

A razón de que se requiere una eliminación de partículas bastante exigente se determinó que el ciclón más apropiado es el de alta eficiencia. A continuación, se presentan las distribuciones de partículas presentes en el gas de síntesis y las características de los ciclones de alta eficiencia.

Tabla 25: Distribución de tamaño de partículas en el gas de síntesis

TAMAÑO	% MÁSSICO
Mayores a 1000 $\mu\text{m}$	1.7
1000 – 250 $\mu\text{m}$	24.7
250 – 102 $\mu\text{m}$	23.7
102 – 75 $\mu\text{m}$	7.1
75 – 60 $\mu\text{m}$	8.3
Menor a 60 $\mu\text{m}$	30.3
Perdidas	4.2

Nota: Fuente (Naranjo Valencia & Aristizábal Álvarez, 2015)

Tabla 26: Características de los ciclones de alta eficiencia

Dimensión	Nomenclatura	Tipo de ciclón		
		Stairmand	Swift	Echeverri
Diámetro del ciclón	Dc/Dc	1.00	1.00	1.00
Altura de entrada	a/Dc	0.50	0.44	0.50
Ancho de entrada	b/Dc	0.20	0.21	0.20
Altura de salida	S/Dc	0.50	0.50	0.63
Diámetro de salida	Ds/Dc	0.50	0.40	0.50
Altura parte cilíndrica	h/Dc	1.50	1.40	1.50
Altura parte cónica	z/Dc	2.50	2.50	2.50
Altura total del ciclón	H/Dc	4.00	3.90	4.00
Diámetro salida partículas	B/Dc	0.38	0.40	0.38
Factor de configuración	G	551.22	698.65	585.71
Número cabezas de velocidad	NH	6.40	9.24	6.40

Número de vórtices	N	5.50	6.00	5.50
--------------------	---	------	------	------

Nota: Fuente (Elaboración propia)

### 10.5.3. Recuperador o intercambiador de calor

#### 10.5.3.1. Balance de Energía

De acuerdo con bibliografía consultada, una vez el aire pasa por el intercambiador es calentado a 646°C (mediante procesos iterativos se llega a dicho valor), teniendo una caída de presión de aire de 1.314kPa. (Sánchez Lario, 2017) El syngas es enfriado de 850°C a 518°C (mediante procesos iterativos se llega a dicho valor) (Sánchez Lario, 2017). La presión cae de 100,3 kPa, presión con la que entra al recuperador de calor, hasta los 99kPa a la salida de este. Se toma como hipótesis unas pérdidas del 5% en el recuperador de calor (Sánchez Lario, 2017).

Pasos a seguir para hallar el calor cedido por el gas:

- Se halla la entalpía del syngas a la temperatura de salida del recuperador  $h_{s\ gas}$  a 518°C.
- Se halla la entalpía del syngas a la temperatura de entrada del recuperador  $h_{i\ gas}$  a 850°C.
- Se multiplica la diferencia de entalpías por el cociente entre la fracción másica de cada componente y su masa molar.
- Este proceso se repite con cada uno de los compuestos químicos, sumándose todos los resultados obtenidos.
- Se halla la potencia cedida por el gas multiplicando la suma de las entalpías de cada componente por el caudal másico del gas húmedo.

$$h_{i,salida} = \int c_{p,i}(T) * dT$$

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

$$h_{i,entrada} = \int c_{p,i}(T) * dT$$

$$\sum h_{i,GAS} = (h_{i,salida} - h_{i,entrada}) * (x_i(base húmeda)/Mm_i)$$

$$P_{Gas} = qm_{húmedo} * \sum h_{i,Gas}$$

Se asumirá un valor típico de caída de presión de 1kPa, dado que la diferencia a la entrada y salida del recuperador suele ser pequeña.

Tabla 27: Características del gas húmedo en el recuperador.

<b>CARACTERISTICAS DEL GAS HUMEDO EN EL RECUPERADOR</b>	
Caudal másico del gas húmedo $qm_{húmedo}$ (kg/s)	0.55
Temperatura a la entrada del recuperador, $T_{entrada}$ (°C)	850
Temperatura a la salida del recuperador, $T_{salida}$ (°C)	518
Presión a la entrada del recuperador, $p_{entrada}$ (kPa)	100.3
Presión a la salida del recuperador, $p_{salida}$ (kPa)	99.3

Nota: Fuente (Elaboración propia)

Tabla 28: Entalpías a la entrada y salida del recuperador

Componente	Calor específico de cada componente $cp(T) = a + bT + cT^2 + dT^3$ (kJ/kmolK)				$T_{entrada}$		$T_{salida}$		$h_{i,entrada}$	$h_{i,salida}$	$h_{i,gas}$	sumatoria
	a	D	c	D	°C	K	°C	K	kJ/kmol	kJ/kmol	kJ/kg	$h_{i,gas}$
												kJ/kg
CO	28.16	0.0017	0.0000	0.0000					34375.20	23486.69	69.17	
CO2	22.26	0.0598	0.0000	0.0000					49173.32	31283.25	113.65	
CH4	19.89	0.0502	0.0000	0.0000	850	1123.15	518	791.15	55765.72	32514.99	12.31	608.99
N2	28.9	-0.0016	0.0000	0.0000					34121.57	23416.49	181.17	
H2	29.11	-0.0019	0.0000	0.0000					33039.48	23010.80	20.29	
SO2	25.78	0.058	0.0000	0.0000					50969.03	33101.79	212.40	

Nota: Fuente (Elaboración propia)

A continuación, la potencia del gas cedido por el gas:

$$P_{cedidoGas} = qm_{húmedo} * \sum h_{i,gas} = 0.55kg/s * 608.99kJ/kg = 0.334MW$$



## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

Para calcular el calor recuperado por el aire se procederá con los análisis del aire seco y posteriormente con los del aire húmedo. Los valores de presión del aire a la entrada y salida del recuperador serán los típicos empleados a sus temperaturas de trabajo.

Tabla 29: Características del aire en el recuperador

CARACTERISTICAS DEL AIRE EN EL RECUPERADOR	
Caudal másico del gas húmedo $q_{m_{húmedo}}$ (kg/s)	0.33
Temperatura a la entrada del recuperador, $T_{entrada}$ (°C)	50
Temperatura a la salida del recuperador, $T_{salida}$ (°C)	646
Presión a la entrada del recuperador, $p_{entrada}$ (kPa)	110
Presión a la salida del recuperador, $p_{salida}$ (kPa)	108.9

Nota: Fuente (Elaboración propia)

Pasos a seguir para hallar la potencia del aire seco:

- Entalpía del aire seco a la temperatura de entrada del recuperador ( $h_{i,aire}$  a 50°C).
- Entalpía del aire seco a la temperatura de salida del recuperador ( $h_{i,aire}$  a 646°C).
- Se multiplica la diferencia de entalpías por el cociente entre la fracción másica de cada componente del aire y su masa molar.
- Se obtiene la potencia multiplicando este resultado por el caudal del aire

Se requiere saber el porcentaje en masa del nitrógeno y del oxígeno, moléculas que forman la composición del aire, estas se calculan así:

$$X_i(\%) = \left( \frac{Mm_i * n_i}{Mm_{aire} * n_{aire}} \right) * 100$$

Tabla 30: Calculo de entalpías para hallar potencia del aire seco

Componente	Porcentaje en volumen	Masa molar, Mm	Mm*Y	Porcentaje en masa	Tentrada		Tsalida	
	Y(%)	kg/kmol	kg/kmol	X(%)	°C	K	°C	K
N2	79	28	22.12	76.70	50	323.15	646	919.15

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

O2	21	32	6.72	23.3
----	----	----	------	------

Nota: Fuente (Elaboración propia)

Calor específico de cada componente cp(T)= a + bT+cT <sup>2</sup> +dT <sup>3</sup> (kJ/kmolK)				hi,entrada	hi,salida	hi,aire	sumatoria hi, aire
a	d	c	d	kJ/kmol	kJ/kmol	kJ/kg	kJ/kg
28.9	-0.0016	0.0000	0.0000	9338.70	27466.73	496.58	636.01
25.48	0.015	-0.00001	0.00000	8939.07	28088.82	139.43	

$$P_{aire\ seco} = qm_{aire} * \sum h_{i,aire} = 0.209MW$$

Pasos a seguir para hallar la potencia del aire húmedo:

- Se halla la entalpía del aire húmedo a la temperatura de salida del recuperador (hi a 646°C).
- Se halla la entalpía del aire húmedo a temperatura de rocío del vapor de agua (hi a Trocio).
- Se multiplica la diferencia de entalpías por el cociente entre la fracción másica de cada componente del vapor de agua y su masa molar.
- Se obtiene la potencia multiplicando este resultado por el caudal másico de vapor de agua

Teniendo que la temperatura del aire a la entrada del recuperador de calor es de 50°C se asume que la presión del vapor de agua saturado es de 12.352kPa.

Gráficamente para una temperatura de 50°C la humedad relativa del aire corresponde a un 64%.

Por lo anterior la presión de vapor de agua con dicho contenido de humedad será del 64%.

$$p_{vapor} = p_{vapor\ sat} * \%humedad = 7.905kPa$$

A continuación, el cálculo de la temperatura de rocío:

$$T_{rocío} = 6.54 + 14.526 \ln(p_{vapor}) + 0.7389 \ln(p_{vapor})^2 + 0.09486 \ln(p_{vapor})^3 + 0.4569 (p_{vapor})^{0.1984}$$

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

Donde:

$T_{rocío}$  : Temperatura de rocío, en °C

$p_{vapor}$ : presión del vapor de agua contenido en el gas de síntesis, en kPa

$$T_{rocío} = 6.54 + 14.526 \ln(7.905) + 0.7389 \ln(7.905)^2 + 0.09486 \ln(7.905)^3 + 0.4569 (7.905)^{0.1984}$$

$$= 41.3^{\circ}\text{C}$$

Tabla 31: Entalpías requeridas para el cálculo de la potencia del aire húmedo

Componente	Calor específico de cada componente $cp(T) = a + bT + cT^2 + dT^3$ (kJ/kmolK)				Trocío °C	Tsalida		Tsalida		
	a	B	c	d		°C		K		
						°C	K	°C	K	
H2O	32.24	0.0019	0.0000	0.0000	41.3	314.4084958	646	919.15	25	298.15

hH2O, rocío	hH2O, ambiente	hH2O, salida	hv, H2O	Tablas		hv-L	hL,H2O	hGhúmedo
				hv	hL			
				kJ/Kg	kJ/Kg			
kJ/kmol	kJ/kmol	kJ/kmol	kJ/Kg	kJ/Kg	kJ/Kg	kJ/Kg	kJ/Kg	kJ/Kg
10335.61	9786.87	32640.90	1239.18	2675.8	417.51	2258.29	30.49	3527.96

$$P_{aire húmedo} = qm_{vapor} * h_G \text{ húmedo} = 0.0032 \text{ MW}$$

$$P_{Totalaire} = P_{aire seco} + P_{aire húmedo} = 0.1197 \text{ MW}$$

Tabla 32: Potencia total recuperada por el aire

Potencia cedida por el gas seco	$P_{cedido \text{ gas}} \text{ (MW)}$	0.334
Potencia recuperada por el aire seco	$P_{aire \text{ seco}} \text{ (MW)}$	0.209
Potencia recuperada por el aire húmedo	$P_{aire \text{ húmedo}} \text{ (MW)}$	0.0032
Potencia total recuperada por el aire	$P_{Total \text{ aire}} \text{ (MW)}$	0.21

Nota: Fuente (Elaboración propia)

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

## 10.5.3.2. Selección de equipo

Tabla 33: Datos a la entrada del recuperador de calor

<b>DATOS A LA ENTRADA DEL RECUPERADOR DE CALOR</b>	
Temperatura del gas de síntesis, $T_{\text{Síntesis}}$ (°C)	850
Temperatura del aire a la entrada, $T_{\text{aire}}$ (°C)	50
Caudal másico del gas de síntesis húmedo, $q_{m_{\text{Síntesis}}}$ (kg/s)	0.55
Caudal másico del aire, $q_{m_{\text{aire}}}$ (kg/s)	0.33

Nota: Fuente (Elaboración propia)

Tabla 34: Datos gas - aire del recuperador de calor

	<b>GAS</b>	<b>AIRE</b>
Temperatura a la salida, $T_{\text{salida}}$ (°C)	518	646
Presión a la entrada, $P_{\text{entrada}}$ (kPa)	100.3	110
Presión a la salida, $P_{\text{salida}}$ (kPa)	99.3	108.9
Calor cedido/recuperado (MW)	0.334	0.21
Potencia aportada por el aire a la entrada (MW)	-	0.0167
Perdidas del 5% (MW)	0.0167	-

En las plantas de producción de energía son ampliamente utilizados los intercambiadores tipo BEM a contracorriente, por ello se va a emplear este tipo de dispositivo en la planta a proponer, dimensionado de acuerdo a los datos obtenidos a la entrada y salida del recuperador de calor.

## 10.5.4. Scrubber o lavador

## 10.5.4.1. Balance de Energía

El gas de síntesis a ser quemado en el motor de combustión interna debe ser tratado previamente para reducir su temperatura y eliminar los alquitranes. La limpieza del gas consiste en mezclar  $H_2O$  para disminuir el contenido de alquitranes llevándolo a valores del orden de 50 - 100 mg/m<sup>3</sup> para su uso en motores de combustión interna.

Se seleccionó el sistema de lavado venturi (sistema de eliminación de alquitranes por vía humedad) por presentar un coste energético reducido y baja caída de presión en su interior. Adicionalmente, se tiene una relación gas líquido 1/1 asegurando concentraciones de partículas y alquitranes

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

inferiores a 10ppmv. El rendimiento de la separación de alquitranes se encuentra entre el 51 y 91%. De acuerdo a la bibliografía consultada, el caudal óptimo para este proceso está en 8000kg/h (Sánchez Lario, 2017).

A continuación, se calcula la potencia del agua a la entrada y salida del sistema de limpieza:

$$P_{agua} = c_p * q_{agua} * T$$

Donde:

$P_{agua}$ : potencia que aporta el caudal de agua, kW.

$c_p$ : calor específico del agua, 4.184 kJ/kg\*°C

$q_{agua}$ : caudal de agua a la entrada del sistema de limpieza, l/s

T: temperatura a la entrada del agua, en °C

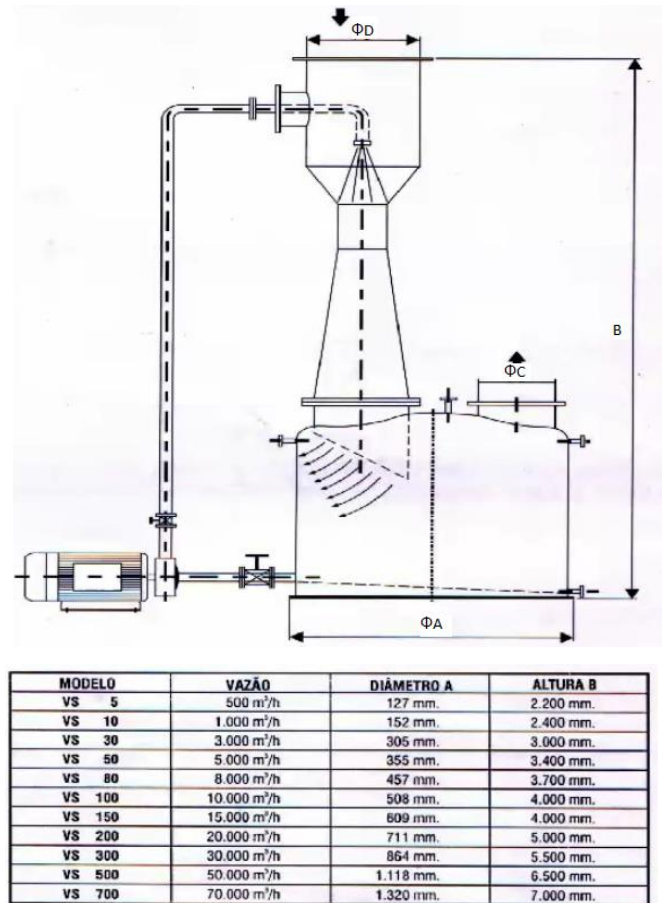
$$P_{agua} = 4.184 \text{ kJ/kg} * ^\circ\text{C} * 8000 \text{ kg/h} * (1/3600) \text{ h/s} * 25^\circ\text{C} = 232.44 \text{ kW} = 0.232 \text{ MW}$$

### 10.5.4.2. Selección de equipo

El syngas que viene de su paso por el ciclón continúa teniendo partículas contaminantes, alquitranes, y su temperatura sigue siendo elevada para ser empleado directamente en un motor de combustión interna. Para la eliminación de partículas contaminantes y acondicionamiento de la temperatura del gas de síntesis se plantea un sistema de lavado que emplea agua como agente de limpieza.

Para la selección del equipo se tuvo en cuenta al fabricante Hürner Argentina S.A. quien ofrece información sobre las unidades de sistema de lavado tipo venturi (sistema de eliminación de alquitranes por vía humedad) de acuerdo al caudal de agua óptimo para la limpieza del syngas.

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ



**Figura 36: unidades de sistema de lavado tipo Venturi**

Fuente: (Argentina, 2018)

### 10.5.5. Antorcha

El gas de síntesis que se va formando puede no ser el más adecuado para llevar al motor, para manejar esta situación se acude a quemar el gas, si así el sistema lo requiere. Esta quema debe cumplir con estándares que asegure el cumplimiento de la normatividad vigente en tema de emisiones.

Para la elección del equipo a emplear se acudió al fabricante de antorchas EMISON quien permite a través del caudal volumétrico del gas de síntesis seleccionar un modelo de la gama que ofrecen. A continuación, tabla con las características técnicas de las antorchas ofrecidas por el fabricante en mención:

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

Tabla 35: Especificaciones técnicas antorchas EMISON

MODELO		CAUDAL	TUBO ø mm	CUERPO ø * H mm	CUERPO INTERIOR ø * H mm	PLACAS	CUERPO EXTERIOR ø * H m
AT 250	LA 250	100-300	90	400*1.000	405*800	1) 30 * 35	1 * 4
AT 400	LA 400	250-500	125	500*1.000	460*800	1) 30 *30	1'2 * 5
AT 600	LA 600	400-700	150	600*1.000	600*800	1) 40 * 40	1'3 * 5'5
AT 800	LA 800	600-900	175	700*1.000	740*800	1) 50 * 50	1'5 * 6
AT 1.000	LA 1.000	800-1.100	200	750*1.000	740*800	1) 50 * 50	1'6 * 6.5
AT 1.250	LA 1.250	1.000- 1.300	200	900*1.000	890*800	4) 30* 30	1'7 * 7
AT 1.500	LA 1.500	1.200- 1.600	225	1.000*1.000	1.105*800	4) 35 * 35	1'8 * 7'5
AT 1.750	LA 1.750	1.500- 1.900	225	1.100*1.000	1.140*800	4) 40 * 35	1'9 * 8
AT 2.000	LA 2.000	1.800- 2.200	225	1.200*1.000	1.175*800	4) 40 * 40	2 * 8'5
AT 2.500	LA 2.500	2.000- 2.700	250	1.400*1.000	1.460*800	4) 50 * 50	2.2*10
AT 3.000	LA 3.000	2.500- 3.200	250	1.600*1.000	1.750*800	4) 60 * 60	2.5*12

Nota: Fuente (EMISON)

### 10.5.6. Motor de combustión interna alternativo

#### 10.5.6.1. Balance de Energía

Se consideran los siguientes supuestos:

- Se produce la combustión completa.
- Se introduce un exceso de aire de hasta el 10%.
- Durante el proceso no se forman óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>).
- Rendimiento eléctrico del motor de 25%.
- Rendimiento térmico del 35%.

A continuación, las características del gas de síntesis procedente de la antorcha, su poder calorífico y potencia:

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

Tabla 36: Características del gas de síntesis procedente de la antorcha

Temperatura del gas	°C	33.63
Presión del gas	kPa	97.42
Caudal másico del gas húmedo	kg/s	1.005

Nota: Fuente (Elaboración propia)

Tabla 37: Poder calorífico del gas de síntesis

Compuesto	Masa molar, Mm (g/mol)	Y (% en volumen)		X(% en volumen)		Gas húmedo	Gas seco	PCI kJ/Nm <sup>3</sup>	PCI * Y (base seca)
		Base húmeda	Base seca	Base húmeda	Base seca	Mm * Y	Mm * Y		kJ/Nm <sup>3</sup>
CO	28	18.13	18.42	21.05	21.28	5.08	5.16	12618	2324.60
CO <sub>2</sub>	44	17.34	17.62	33.09	33.45	7.63	7.75	0	0.00
CH <sub>4</sub>	16	1.73	1.76	1.00	1.01	0.28	0.28	35807	619.46
N <sub>2</sub>	28	41.04	41.70	41.83	42.28	11.49	11.68	0	0.00
H <sub>2</sub> O	18	1.59	0.00	1.07	0.00	0.29	0.00	0	0.00
H <sub>2</sub>	2	19.90	20.22	1.68	1.70	0.40	0.40	10788	2146.81
SO <sub>2</sub>	64	0.12	0.12	0.31	0.31	0.08	0.08	0	0.00
		99.85	99.85	100.03	100.03	25.24	25.35		5090.88

Potencia disponible del gas de síntesis:

$$P_{\text{síntesis}} = PCI_{G.\text{síntesis}} * qm_{g.\text{seco}} = 5.09 \text{ kJ/Nm}^3 * 0.542 \text{ kg/Nm}^3 = 4.56 \text{ MW}$$

A continuación, las características del aire procedente de la antorcha y que entra en el motor para realizar la combustión.

Caudal másico de aire:

$$qm_{\text{aire}}(\text{motor}) = qm_{\text{aire}}(\text{antorcha})/1.2 = 1.342 \text{ kg/s}/1.2 = 1.12 \text{ kg/s}$$

Caudal másico del aire, $qm_{\text{aire}}$ (kg/s)	1.12
Temperatura a la entrada, $T_{\text{entrada}}$ (°C)	25
Presión a la entrada, $p_{\text{entrada}}$ (kPa)	101.325



## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

Potencia que aporta el aire a la entrada del motor:

$$P_{aire} = c_p * qm_{aire} * T$$

$P_{aire}$ : potencia que aporta el aire, kW.

$c_p$ : calor específico del aire, equivale a 1.0032kJ/kg\*°C.

$qm_{aire}$ : caudal del aire necesario para realizar la combustión completa, kg/s.

$T$ : temperatura del aire a la entrada de la antorcha, en °C.

$$P_{aire} = 1.0032\text{kJ/kg} * ^\circ\text{C} * 1.12\text{kg/s} * 25^\circ\text{C} = 28.1\text{kW} = 0.0281\text{MW}$$

Potencia total:

$$P_{motor} = P_{sintesis} + P_{aire} = 2.76\text{MW} + 0.0281\text{MW} = 2.788\text{MW}$$

Potencia eléctrica:

$$P_{eléctrica} = P_{motor} * \eta_e = 2.788\text{MW} * 0.25 = 0.70\text{MW}_e$$

Potencia térmica:

$$P_{térmica} = P_{motor} * \eta_t = 2.788\text{MW} * 0.40 = 1.12\text{MW}_t$$

Con los datos de potencia térmica y potencia eléctrica hallados se puede obtener el autoconsumo eléctrico del sistema de gasificación a implementar, este se estima entre un 10% a un 14% de la potencia eléctrica total generada, siendo el 10% el valor típico ((IDAE), 2018).

$$\text{Autoconsumo eléctrico} = 0.1 * P_{eléctrica} = 0.1 * 0.70\text{MW} = 0.070\text{MW} = 70\text{kW}$$

Energía eléctrica que podría ser inyectada a la red: Se estiman 7500h/año de funcionamiento

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

$$\begin{aligned} \text{Energía eléctrica inyectada a la red} &= P_{\text{eléctrica}} * \text{No. horas} - P_{\text{auto consumo}} \\ &= 0.70MW_e * 7500h/año - 0.070MW = 4705MWh_e/año = 4.705kWh_e/año \end{aligned}$$

Rendimiento global de la planta:

$$\eta_T = \eta_e(\text{planta}) + \eta_t(\text{planta}) = \left( \frac{P_{\text{eléctrica}}}{P_{\text{motor}}} \right) + \left( \frac{P_{\text{térmica}}}{P_{\text{motor}}} \right)$$

$$\eta_T = \left( \frac{697.08kW_e}{2788.32kW} \right) + \left( \frac{1115.33kW_t}{2788.32kW} \right) = 65\%$$

## 10.5.6.2. Selección de equipo

Para el proyecto se ha optado por seleccionar motores de la marca GE, quien ofrece gran variedad de motores aplicables a la solución que se desea plantear. La división de motores a gas, Jenbacher de GE Energy, se encuentra entre los líderes mundiales de la fabricación de motores a gas, grupos generadores compactos, módulos de cogeneración para la generación de energía, y motores a gas para accionamiento mecánico de turbosoplantes. Los motores Jenbacher desarrollan potencias comprendidas entre los 0,25 y los 3 MW y funcionan tanto con gas natural como con otros gases (como p. ej., biogás, gas de vertedero, gas de mina, gas de depuradora, y los combustibles residuales de procesos industriales).

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

Tabla 38: Motores Jenbacher GE

TIPO DE MOTOR	MODELO	RANGO DE POTENCIAS	TIPO DE COMBUSTIBLE	DIMENSIONES GRUPO ELECTROGENO			PESO (kg)
				LARGO (mm)	ANCHO (mm)	ALTO (mm)	
Jenbacher tipo 2	J208	250 - 350 kW	Gas natural, flare-gas, biogás, propano, gas de vertedero, gas de depuradora	4900	1700	2000	6700
Jenbacher tipo 3	J312	400 - 1100 kW	Gas natural, flare-gas, biogás, propano, gas de vertedero, gas de depuradora. Gases especiales (p. ej., grisú, gas de coque, gas de madera, gas de pirolisis)	4700	2300	2300	9500
	J316		5300	2300	2300	11200	
	J320		5700	1900	2300	14400	
Jenbacher tipo 4	J412	800 - 1500 kW	Gas natural, flare-gas, biogás, gas de vertedero, gas de depuradora. Gases especiales (p. ej., grisú, gas de coque, gas de madera, gas de pirolisis)	6000	1800	2200	11800
	J416		6700	1800	2200	14100	
	J420		7100	1800	2200	17800	
Jenbacher tipo 6	J612	1,5 al 4,4 MW	Gas natural, flare-gas, biogás, gas de vertedero, gas de depuradora. Gases especiales (p. ej., grisú, gas de coque, gas de madera, gas de pirolisis)	7100	2200	2800	24000
	J616		8300	2200	2800	29200	
	J620		8900	2200	2800	36900	
	J624		12800	2500	2900	52100	

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

**10.6. BALANCE ENERGÉTICO GLOBAL**

La siguiente tabla muestra el balance energético global para la planta de gasificación, seguidamente se muestra el dimensionamiento de los equipos seleccionados:

Tabla 39: Balance energético global

<b>BALANCE ENÉRGÉTICO GLOBAL</b>			
<b>Item</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>
1	Cantidad de cascarilla de arroz deshidratada	kg/s	0.24
2	Humedad de la cascarilla de arroz seca	%	10
3	Cantidad de aire que entra al gasificador	kg/s	0.33
4	Cantidad de agua necesaria en la torre de lavado	kg/s	2.22
5	Potencia térmica del gasificador	kWt	2810
6	Potencia térmica del syngas	kWt	780
7	Necesidad de potencia térmica de la torre de lavado	kWt	2810
<b>Potencias térmica y eléctrica generadas por el MCIA con syngas</b>			
8	Potencia térmica requerida por el motor	kWt	1115.33
9	Potencia eléctrica generada	kWe	697.08
<b>Energía</b>			
10	Horas previstas de funcionamiento	h	7500
11	Energía eléctrica generada bruta	MWhe/año	5228
12	Autoconsumo eléctrico	%	10
13	Energía eléctrica generada neta	MWhe/año	4705
14	Rendimiento eléctrico	%	25
15	Consumo de gas natural	MWht/año	0

Nota: Fuente (Elaboración propia)

la 40: Equipos mayores seleccionados para la planta de gasificación

<b>ITEM</b>	<b>EQUIPO</b>	<b>NOMBRE</b>		<b>UNIDAD</b>	<b>CANTIDAD</b>
1	G-01	Gasificador	QM2.6 - Dong Ding Heavy Industry	Global	1
2	C-01	Ciclón	Stairmand	Global	1
3	IC-01	Intercambiador de calor	TEMA tipo BEM - FUNKE	Global	1
4	LG-01	Sistema Lavado de gases	VS-80 Hürner Argentina	Global	1
5	A-01	Antorcha	AT 2.000 – EMISON	Global	1
6	M-01	Motor generador	J-420 Jenbacher – GE	Global	1

## **11. ANÁLISIS ECONOMICO: CASO DE ESTUDIO MOLINO DE ARROZ PACANDE DE LA CIUDAD DE VILLAVICENCIO**

### **11.1. FACTORES A TENER EN CUENTA PARA EL ÉXITO DEL PROYECTO**

Con el fin de considerar medidas que apoyen la realización del proyecto se deberán considerar los siguientes aspectos:

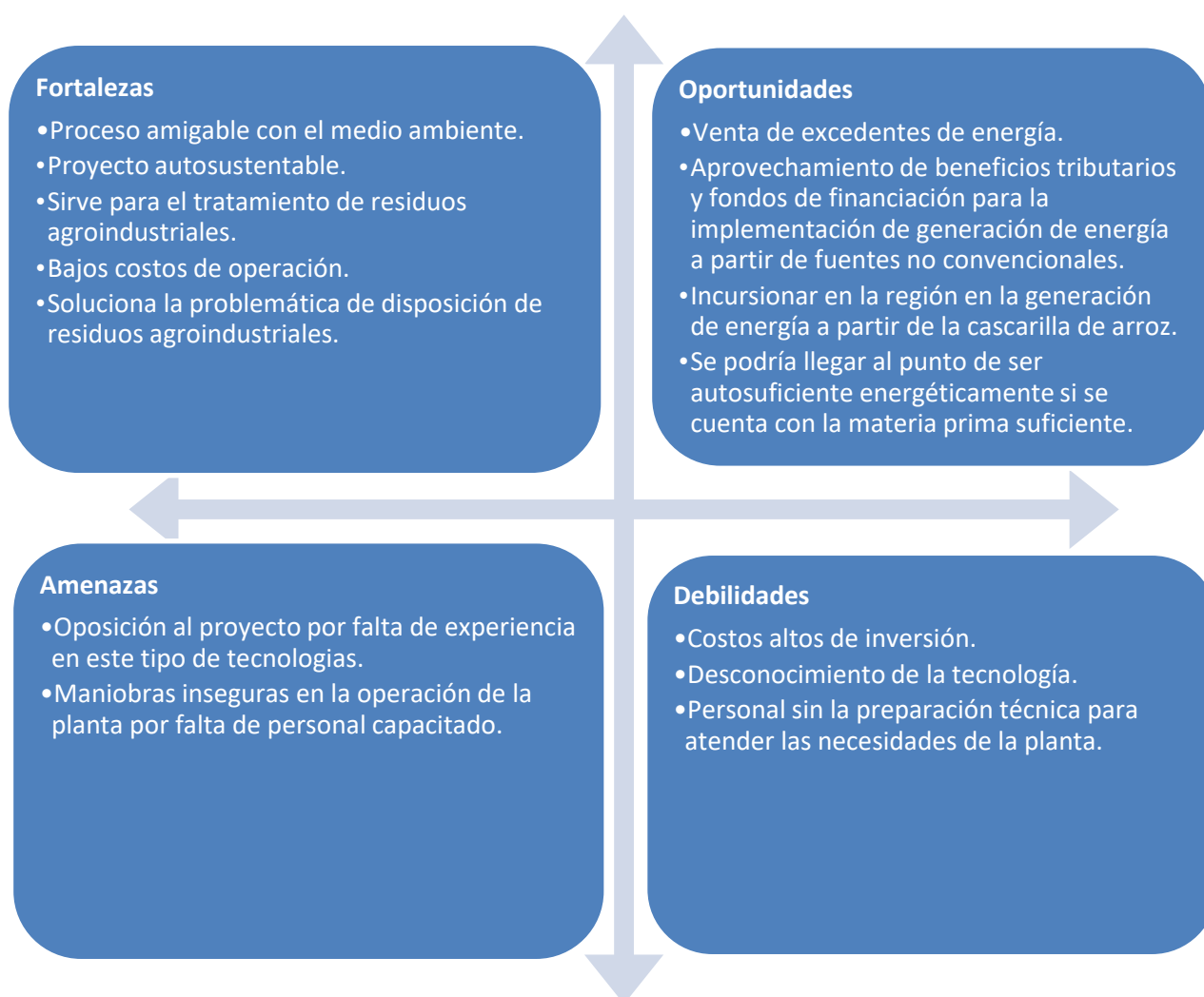
- Tarifas: las tarifas y costos de energía deberán ser proyectadas a largo plazo en la evaluación financiera del proyecto, con el objetivo de estimar los ahorros y posibles ventas de energía.
- Disponibilidad de la biomasa residual: Este aspecto es determinante para la producción del energético. Para el éxito del proyecto se debe asegurar el suministro de la materia prima. Se debe dimensionar la planta de acuerdo a la disponibilidad de la biomasa residual durante todo el año y hacer que esta opere a plena capacidad minimizando potencia instalada que no se vaya a utilizar.
- Ingresos extra por tratamiento de la biomasa residual: La cascarilla de arroz es un residuo abundante en la industria molinera de arroz. Su disposición final suele ser una dificultad para esta industria pues no se han explorado y aplicado alternativas que permitan emplear el 100% de este residuo en procesos productivos o útiles que eviten su inadecuada disposición final. Esta es una oportunidad para ofrecer un servicio que genere ingresos adicionales y que aporte a la problemática de la disposición final de este recurso.
- Financiamiento, subsidios y apoyo estatal: Para favorecer los flujos de caja es necesario evaluar las alternativas de financiamiento con bajas tasas de interés, los subsidios y beneficios que contempla la ley 1715 de 2014. Los beneficios estatales son determinantes

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

a la hora de comparar la generación de energía tradicional frente a la generación con tecnologías alternativas.

- **Impacto ambiental:** en la actualidad uno de los factores que determina la viabilidad de un proyecto es el impacto ambiental, es importante cuidar que la tecnología seleccionada cumpla con la reglamentación ambiental en cuanto a emisiones de gases de efecto invernadero y de otros contaminantes que se puedan generar.

### 11.2. ANÁLISIS DOFA



## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

**11.3. VIABILIDAD ECONÓMICA DE LA PLANTA**

Los costos de inversión de la planta de gasificación fueron tomados del informe completo de costos de la Agencia Internacional de Energía Renovable ((Renewable & Agency, 2018)) en el cual se presentan las tendencias para cada una de las principales tecnologías de energía renovable, en base a los últimos datos de costos y precios de subasta de proyectos en todo el mundo. Para el estudio en cuestión se toma el costo de la unidad de inversión para una planta de gasificación cuyo combustible es la cascarilla de arroz, dando como resultado la inversión que se detalla en la siguiente tabla:

Tabla 41: Costos totales instalados de las tecnologías de generación a partir de biomasa por país / región– Planta de gasificación con cascarilla de arroz

Region	5th percentile (USD/kW)	5th percentile (COP/kW)	Costo de planta (1000kW – COP/kW)
Rest of the world	632	2.022.400	2.0022.400.000

Nota: Fuente (((Renewable & Agency, 2018)))

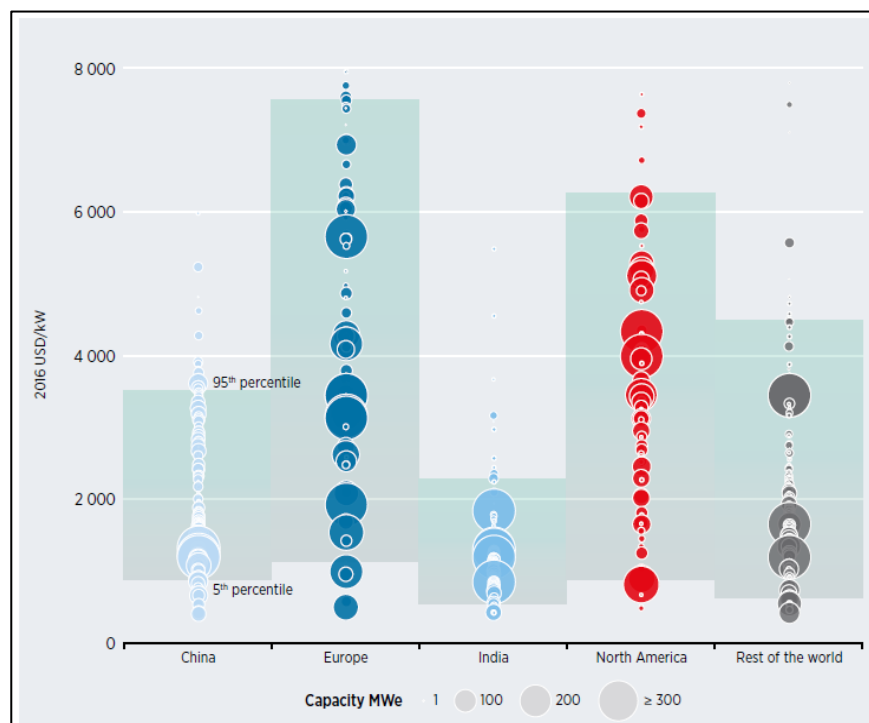


Figura 37: Costos totales instalados de las tecnologías de generación a partir de biomasa por país / región ((Renewable & Agency, 2018))

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

Los costos de inversión incluyen:

- Planeación y diseño: incluye estudios de factibilidad, desarrollo, ingeniería y trámites ante las autoridades.
- Sitio del proyecto: incluye construcción, conexión a servicios (electricidad, agua), Equipos, Transporte. Ensamblaje. No se incluyen costos por compra de terrenos, manejo del proyecto y administración, impuestos y aranceles, y costos de desmantelamiento de la planta. Todos los costos durante el periodo de construcción se descuentan a la fecha de inicio y se dividen entre la capacidad de generación neta de la planta (generación menos consumo propio) para obtener los costos específicos de inversión por MW.

Los costos de operación y mantenimiento incluyen:

- Costos fijos: costos que son independientes de cómo se opere la planta. Incluyen costos de administración, personal operativo, entre otros.
- Costos variables: Se refieren al consumo de insumos auxiliares (agua, lubricantes, aditivos, combustible), refacciones y reparaciones.

Para la realización del flujo de caja se determinó una vida útil de 15 años, una inflación interna anual de 4.09%, una inflación externa anual de 1.90%, una tasa de descuento del 10% y una tasa de cambio de \$3200 A continuación se puede observar los ingresos, egresos y el flujo de caja.

El análisis financiero de la planta de gasificación fue estudiado mediante el costo – beneficio que ofrece el proyecto. Los indicadores empleados para concluir frente a las alternativas financieras planteadas fueron el VPN y la TIR.

Los flujos de caja fueron planteados bajo tres escenarios:



## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

- **Flujo de caja Sin Proyecto:**

En donde se asume compras al SIN (Sistema interconectado nacional) para suplir todos los requerimientos de la planta en materia de energía eléctrica. La tarifa de compra de energía es proyectada considerando toda la problemática del sector, no entrada de Hidroituango corto plazo, fenómenos del niño, no entrada de proyectos de infraestructura de transmisión y distribución del STN (estimado realizado por una firma de consultoría colombiana, IEB Ingeniería Especializada).

Este flujo de caja muestra básicamente cual sería la compra de energía que tendría que realizar el molino en las condiciones operativas actuales:

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

DEFLACTORES	0	1	2	3	4	5	6	7
DFML	1	1.041	1.083	1.128	1.174	1.222	1.272	1.324
DFML TARIFA	1	1.050	1.103	1.158	1.216	1.276	1.340	1.407
DFME	1	1.019	1.038	1.058	1.078	1.099	1.120	1.141
Rubro	0	1	2	3	4	5	6	7
Tasa de cambio (\$/USD)	\$ 3,200	\$ 3,200	\$ 3,200	\$ 3,200	\$ 3,200	\$ 3,200	\$ 3,200	\$ 3,200
\$ Pesos del año 0								
Rubro	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7
Ingresos	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
<b>Costos de Operación (-)</b>	\$ 1,755,273,416	\$ 1,862,906,571	\$ 2,057,948,980	\$ 2,173,843,857	\$ 2,052,829,301	\$ 2,088,725,235	\$ 2,099,605,213	\$ 2,068,095,383
Costos disposición cascarilla de arroz	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Costo transporte a la fábrica	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Costo tarifa promedio diaria	\$ 1,755,273,416	\$ 1,862,906,571	\$ 2,057,948,980	\$ 2,173,843,857	\$ 2,052,829,301	\$ 2,088,725,235	\$ 2,099,605,213	\$ 2,068,095,383
Costo cargo mensual por potencia	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Costos fijos de operación	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Costos de operación variables	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Intereses (-)	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Costos deducibles: Depreciación (-)	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
<b>GANANCIAS GRAYABLES</b>	\$ (1,755,273,416)	\$ (1,862,906,571)	\$ (2,057,948,980)	\$ (2,173,843,857)	\$ (2,052,829,301)	\$ (2,088,725,235)	\$ (2,099,605,213)	\$ (2,068,095,383)
Impuestos (-)	\$ (579,240,227)	\$ (614,759,168)	\$ (679,123,163)	\$ (717,368,473)	\$ (677,433,669)	\$ (689,279,328)	\$ (692,869,720)	\$ (682,471,476)
Ingreso gravable por venta de activo (+)								
Impuestos a la utilidad venta de activos (-)								
Valor en libros activos vendidos (+)								
<b>GANANCIAS NETAS</b>	\$ (1,176,033,189)	\$ (1,248,147,402)	\$ (1,378,825,817)	\$ (1,456,475,384)	\$ (1,375,395,632)	\$ (1,399,445,908)	\$ (1,406,735,493)	\$ (1,385,623,906)
Depreciación (+)								
Valor de salvamento, activos no vendidos (+)								
Costos de inversión (-) (\$)								
Costos de inversión (-) (USD)								
Créditos recibidos (+)								
Amortización (-)								
<b>FLUJO NETO DE FONDOS</b>	\$ (1,176,033,189)	\$ (1,248,147,402)	\$ (1,378,825,817)	\$ (1,456,475,384)	\$ (1,375,395,632)	\$ (1,399,445,908)	\$ (1,406,735,493)	\$ (1,385,623,906)

DEFLACTORES	8	9	10	11	12	13	14	15
DFML	1.378	1.434	1.493	1.554	1.618	1.684	1.753	1.824
DFML TARIFA	1.477	1.551	1.629	1.710	1.796	1.886	1.980	2.079
DFME	1.163	1.185	1.207	1.230	1.253	1.277	1.301	1.326
Rubro	8	9	10	11	12	13	14	15
Tasa de cambio (\$/USD)	\$ 3,200	\$ 3,200	\$ 3,200	\$ 3,200	\$ 3,200	\$ 3,200	\$ 3,200	\$ 3,200
\$ Pesos del año 0								
Rubro	Año 8	Año 9	Año 10	Año 11	Año 12	Año 13	Año 14	Año 15
Ingresos	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
<b>Costos de Operación (-)</b>	\$ 2,171,500,152	\$ 2,280,075,160	\$ 2,394,078,918	\$ 2,513,782,863	\$ 2,639,472,007	\$ 2,771,445,607	\$ 2,910,017,887	\$ 3,055,518,782
Costos disposición cascarilla de arroz	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Costo transporte a la fábrica	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Costo tarifa promedio diaria	\$ 2,171,500,152	\$ 2,280,075,160	\$ 2,394,078,918	\$ 2,513,782,863	\$ 2,639,472,007	\$ 2,771,445,607	\$ 2,910,017,887	\$ 3,055,518,782
Costo cargo mensual por potencia	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Costos fijos de operación	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Costos de operación variables	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Intereses (-)	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Costos deducibles: Depreciación (-)	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
<b>GANANCIAS GRAYABLES</b>	\$ (2,171,500,152)	\$ (2,280,075,160)	\$ (2,394,078,918)	\$ (2,513,782,863)	\$ (2,639,472,007)	\$ (2,771,445,607)	\$ (2,910,017,887)	\$ (3,055,518,782)
Impuestos (-)	\$ (716,595,050)	\$ (752,424,803)	\$ (790,046,043)	\$ (829,548,345)	\$ (871,025,762)	\$ (914,577,050)	\$ (960,305,903)	\$ (1,008,321,198)
Ingreso gravable por venta de activo (+)								
Impuestos a la utilidad venta de activos (-)								
Valor en libros activos vendidos (+)								
<b>GANANCIAS NETAS</b>	\$ (1,454,905,102)	\$ (1,527,650,357)	\$ (1,604,032,875)	\$ (1,684,234,518)	\$ (1,768,446,244)	\$ (1,856,868,557)	\$ (1,949,711,984)	\$ (2,047,197,584)
Depreciación (+)								
Valor de salvamento, activos no vendidos (+)								
Costos de inversión (-) (\$)								
Costos de inversión (-) (USD)								
Créditos recibidos (+)								
Amortización (-)								
<b>FLUJO NETO DE FONDOS</b>	\$ (1,454,905,102)	\$ (1,527,650,357)	\$ (1,604,032,875)	\$ (1,684,234,518)	\$ (1,768,446,244)	\$ (1,856,868,557)	\$ (1,949,711,984)	\$ (2,047,197,584)

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

- Flujo de caja Con Proyecto:

El molino realiza la inversión total en el año cero sin ningún esquema de financiación que apalanque el proyecto.

DEFLACTORES	0	1	2	3	4	5	6	7
DFML	1	1.041	1.083	1.128	1.174	1.222	1.272	1.324
DFML TARIFA	1	1.050	1.103	1.158	1.216	1.276	1.340	1.407
DFME	1	1.019	1.038	1.058	1.078	1.099	1.120	1.141
Rubro	0	1	2	3	4	5	6	7
Tasa de cambio (\$/USD)	\$ 3,200	\$ 3,200	\$ 3,200	\$ 3,200	\$ 3,200	\$ 3,200	\$ 3,200	\$ 3,200
\$ Pesos del año 0								
Rubro	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7
Ingresos	\$ -	\$ 1,755,273,416	\$ 1,862,906,571	\$ 2,057,948,980	\$ 2,173,843,857	\$ 2,052,823,301	\$ 2,088,725,235	\$ 2,099,605,213
<b>Costos de Operación (-)</b>	\$ -	\$ 1,386,955,306	\$ 1,443,681,778	\$ 1,502,728,362	\$ 1,564,189,953	\$ 1,628,165,322	\$ 1,694,757,283	\$ 1,764,072,856
Costos disposición cascarilla de arroz	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Costo transporte a la fábrica	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Costo tarifa promedio diaria	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Costo cargo mensual por potencia	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Costos fijos de operación	\$ -	\$ 1,009,932,999	\$ 1,051,239,258	\$ 1,094,234,944	\$ 1,138,989,153	\$ 1,185,573,809	\$ 1,234,063,778	\$ 1,284,536,987
Costos de operación variables	\$ -	\$ 377,022,307	\$ 392,442,520	\$ 408,493,419	\$ 425,200,799	\$ 442,591,512	\$ 460,693,505	\$ 479,535,869
Intereses (-)	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Costos deducibles: Depreciación (-)	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
<b>GANANCIAS GRAVABLES</b>	\$ -	\$ 368,318,110	\$ 419,224,793	\$ 555,220,618	\$ 609,653,905	\$ 424,663,979	\$ 393,967,952	\$ 335,532,357
Impuestos (-)	\$ -	\$ 60,772,488	\$ 138,344,182	\$ 183,222,804	\$ 201,185,789	\$ 140,139,113	\$ 130,009,424	\$ 110,725,678
Ingreso gravable por venta de activo (+)								
Impuestos a la utilidad venta de activos (-)								
Valor en libros activos vendidos (+)								
<b>GANANCIAS NETAS</b>	\$ -	\$ 307,545,622	\$ 280,880,611	\$ 371,997,814	\$ 408,468,116	\$ 284,524,866	\$ 263,958,528	\$ 224,806,679
Depreciación (+)		\$ 421,023,232	\$ 438,243,082	\$ 456,167,224	\$ 474,824,464	\$ 494,244,784		
Valor de salvamento, activos no vendidos (+)								
Costos de inversión (-) (\$)	\$ 2,022,400,000							
Costos de inversión (-) (USD)								
Créditos recibidos (+)								
Amortización (-)		515,206,400	314,997,193	213,988,093				
<b>FLUJO NETO DE FONDOS</b>	\$ (2,022,400,000)	\$ 213,362,454	\$ 404,126,500	\$ 614,178,945	\$ 883,292,580	\$ 778,769,651	\$ 263,958,528	\$ 224,806,679

DEFLACTORES	8	9	10	11	12	13	14	15
DFML	1.378	1.434	1.493	1.554	1.618	1.684	1.753	1.824
DFML TARIFA	1.477	1.551	1.629	1.710	1.796	1.886	1.980	2.079
DFME	1.163	1.185	1.207	1.230	1.253	1.277	1.301	1.326
Rubro	8	9	10	11	12	13	14	15
Tasa de cambio (\$/USD)	\$ 3,200	\$ 3,200	\$ 3,200	\$ 3,200	\$ 3,200	\$ 3,200	\$ 3,200	\$ 3,200
\$ Pesos del año 0								
Rubro	Año 8	Año 9	Año 10	Año 11	Año 12	Año 13	Año 14	Año 15
Ingresos	\$ 2,068,095,383	\$ 2,171,500,152	\$ 2,280,075,160	\$ 2,394,078,918	\$ 2,513,782,863	\$ 2,639,472,007	\$ 2,771,445,607	\$ 2,910,017,887
<b>Costos de Operación (-)</b>	\$ 1,836,223,436	\$ 1,911,324,974	\$ 1,989,498,166	\$ 2,070,868,641	\$ 2,155,567,168	\$ 2,243,729,865	\$ 2,335,498,417	\$ 2,431,020,302
Costos disposición cascarilla de arroz	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Costo transporte a la fábrica	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Costo tarifa promedio diaria	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Costo cargo mensual por potencia	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Costos fijos de operación	\$ 1,337,074,550	\$ 1,391,760,899	\$ 1,448,683,919	\$ 1,507,935,092	\$ 1,569,609,637	\$ 1,633,806,671	\$ 1,700,629,364	\$ 1,770,185,105
Costos de operación variables	\$ 499,148,886	\$ 519,564,076	\$ 540,814,247	\$ 562,933,549	\$ 585,957,531	\$ 609,923,194	\$ 634,869,053	\$ 660,835,197
Intereses (-)	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Costos deducibles: Depreciación (-)	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
<b>GANANCIAS GRAVABLES</b>	\$ 231,871,947	\$ 260,175,177	\$ 290,576,994	\$ 323,210,277	\$ 358,215,695	\$ 395,742,141	\$ 435,947,190	\$ 478,997,585
Impuestos (-)	\$ 76,517,742	\$ 85,857,809	\$ 95,890,408	\$ 106,659,391	\$ 118,211,179	\$ 130,594,907	\$ 143,862,573	\$ 158,069,203
Ingreso gravable por venta de activo (+)								
Impuestos a la utilidad venta de activos (-)								
Valor en libros activos vendidos (+)								
<b>GANANCIAS NETAS</b>	\$ 155,354,204	\$ 174,317,369	\$ 194,686,586	\$ 216,550,885	\$ 240,004,516	\$ 265,147,235	\$ 292,084,617	\$ 320,928,382
Depreciación (+)								
Valor de salvamento, activos no vendidos (+)								
Costos de inversión (-) (\$)								
Costos de inversión (-) (USD)								
Créditos recibidos (+)								
Amortización (-)								
<b>FLUJO NETO DE FONDOS</b>	\$ 155,354,204	\$ 174,317,369	\$ 194,686,586	\$ 216,550,885	\$ 240,004,516	\$ 265,147,235	\$ 292,084,617	\$ 320,928,382

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

- **Flujo de caja Con Proyecto – Con financiación:**

El molino acude a un crédito, con una entidad financiera nacional bajo las siguientes premisas: financiación del 50% de la inversión con un periodo de gracia de 2 años, tasa de interés de 15% EA, amortizaciones iguales e intereses sobre saldos con un total de 6 cuotas.

<b>DEFLACTORES</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
DFML	1	1.041	1.083	1.128	1.174	1.222	1.272	1.324
DFML TARIFA	1	1.050	1.103	1.158	1.216	1.276	1.340	1.407
DFME	1	1.019	1.038	1.058	1.078	1.099	1.120	1.141
<b>Rubro</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
Tasa de cambio (\$/USD)	\$ 3,200	\$ 3,200	\$ 3,200	\$ 3,200	\$ 3,200	\$ 3,200	\$ 3,200	\$ 3,200
§ Pesos del año 0								
<b>Rubro</b>	<b>Año 0</b>	<b>Año 1</b>	<b>Año 2</b>	<b>Año 3</b>	<b>Año 4</b>	<b>Año 5</b>	<b>Año 6</b>	<b>Año 7</b>
Ingresos	\$ -	\$ 1,755,273,416	\$ 1,862,906,571	#####	\$ 2,173,843,857	\$ 2,052,829,301	\$ 2,088,725,235	\$ 2,099,605,213
<b>Costos de Operación (-)</b>	\$ -	\$ 1,386,955,306	\$ 1,443,681,778	\$ 1,502,728,362	\$ 1,564,189,953	\$ 1,628,165,322	\$ 1,694,757,283	\$ 1,764,072,856
Costos disposición cascarilla de arroz	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Costo transporte a la fábrica	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Costo tarifa promedio diaria	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Costo cargo mensual por potencia	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Costos fijos de operación	\$ -	\$ 1,009,932,999	\$ 1,051,239,258	\$ 1,094,234,944	\$ 1,138,989,153	\$ 1,185,573,809	\$ 1,234,063,778	\$ 1,284,536,987
Costos de operación variables	\$ -	\$ 377,022,307	\$ 392,442,520	\$ 408,493,419	\$ 425,200,799	\$ 442,591,512	\$ 460,693,505	\$ 479,535,869
Intereses (-)	\$ -	\$ 151,680,000	\$ 151,680,000	\$ 151,680,000	\$ 111,049,349	\$ 69,646,716	\$ 27,457,433	\$ (15,533,446)
Costos deducibles: Depreciación (-)	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
<b>GANANCIAS GRAVABLES</b>	\$ -	\$ 216,638,110	\$ 267,544,793	\$ 403,540,618	\$ 498,604,555	\$ 355,017,263	\$ 366,510,518	\$ 351,065,802
Impuestos (-)	\$ -	\$ 71,490,576	\$ 88,289,782	\$ 133,168,404	\$ 164,539,503	\$ 117,155,697	\$ 120,948,471	\$ 115,851,715
Ingreso gravable por venta de activo (+)								
Impuestos a la utilidad venta de activos (-)								
Valor en libros activos vendidos (+)								
<b>GANANCIAS NETAS</b>	\$ -	\$ 145,147,534	\$ 179,255,011	\$ 270,372,214	\$ 334,065,052	\$ 237,861,566	\$ 245,562,047	\$ 235,214,088
Depreciación (+)		\$ 421,023,232	\$ 438,243,082	\$ 456,167,224	\$ 474,824,464	\$ 494,244,784		
Valor de salvamento, activos no vendidos (+)								
Costos de inversión (-) (§)	\$ 2,022,400,000							
Costos de inversión (-) (USD)								
Créditos recibidos (+)	1,011,200,000							
Amortización (-)				270,871,004	276,017,553	281,261,886	286,605,862	292,051,374
<b>FLUJO NETO DE FONDOS</b>	\$ (1,011,200,000)	\$ 566,170,766	\$ 617,498,093	\$ 455,668,434	\$ 532,871,963	\$ 450,844,464	\$ (41,043,815)	\$ (56,837,296)

<b>DEFLACTORES</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>
DFML	1.378	1.434	1.493	1.554	1.618	1.684	1.753	1.824
DFML TARIFA	1.477	1.551	1.629	1.710	1.796	1.886	1.980	2.079
DFME	1.163	1.185	1.207	1.230	1.253	1.277	1.301	1.326
<b>Rubro</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>
Tasa de cambio (\$/USD)	\$ 3,200	\$ 3,200	\$ 3,200	\$ 3,200	\$ 3,200	\$ 3,200	\$ 3,200	\$ 3,200
§ Pesos del año 0								
<b>Rubro</b>	<b>Año 8</b>	<b>Año 9</b>	<b>Año 10</b>	<b>Año 11</b>	<b>Año 12</b>	<b>Año 13</b>	<b>Año 14</b>	<b>Año 15</b>
Ingresos	\$ 2,068,095,383	\$ 2,171,500,152	\$ 2,280,075,160	\$ 2,394,078,918	\$ 2,513,782,863	\$ 2,639,472,007	\$ 2,771,445,607	\$ 2,910,017,887
<b>Costos de Operación (-)</b>	\$ 1,836,223,436	\$ 1,911,324,974	\$ 1,989,498,166	\$ 2,070,868,641	\$ 2,155,567,168	\$ 2,243,729,865	\$ 2,335,498,417	\$ 2,431,020,302
Costos disposición cascarilla de arroz	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Costo transporte a la fábrica	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Costo tarifa promedio diaria	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Costo cargo mensual por potencia	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Costos fijos de operación	\$ 1,337,074,550	\$ 1,391,760,899	\$ 1,448,683,919	\$ 1,507,935,092	\$ 1,569,609,637	\$ 1,633,806,671	\$ 1,700,629,364	\$ 1,770,185,105
Costos de operación variables	\$ 499,148,886	\$ 519,564,076	\$ 540,814,247	\$ 562,933,549	\$ 585,957,531	\$ 609,923,194	\$ 634,869,053	\$ 660,835,197
Intereses (-)	\$ (59,341,152)	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Costos deducibles: Depreciación (-)	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
<b>GANANCIAS GRAVABLES</b>	\$ 291,213,099	\$ 260,175,177	\$ 290,576,994	\$ 323,210,277	\$ 358,215,695	\$ 395,742,141	\$ 435,947,190	\$ 478,997,585
Impuestos (-)	\$ 96,100,323	\$ 95,857,809	\$ 95,890,408	\$ 106,859,391	\$ 118,211,179	\$ 130,594,907	\$ 143,862,573	\$ 158,069,203
Ingreso gravable por venta de activo (+)								
Impuestos a la utilidad venta de activos (-)								
Valor en libros activos vendidos (+)								
<b>GANANCIAS NETAS</b>	\$ 195,112,776	\$ 174,317,369	\$ 194,686,586	\$ 216,550,885	\$ 240,004,516	\$ 265,147,235	\$ 292,084,617	\$ 320,928,382
Depreciación (+)								
Valor de salvamento, activos no vendidos (+)								
Costos de inversión (-) (§)								
Costos de inversión (-) (USD)								
Créditos recibidos (+)								
Amortización (-)	297,600,350							
<b>FLUJO NETO DE FONDOS</b>	\$ (102,487,574)	\$ 174,317,369	\$ 194,686,586	\$ 216,550,885	\$ 240,004,516	\$ 265,147,235	\$ 292,084,617	\$ 320,928,382

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

A continuación, se presentan los resultados obtenidos:

Tabla 42: Indicadores financieros - Con Proyecto Sin financiamiento

<b>Con Proyecto</b>	
<b>VPN</b>	\$ 922,590,009
<b>TIR</b>	19%

Tabla 43: Indicadores financieros - Con Proyecto Con financiamiento

<b>Proyecto Con Crédito Interno</b>	
<b>VPN</b>	1,431,838,620
<b>TIR</b>	46%

## 12. CONCLUSIONES

1. Con las pruebas realizadas en el gasificador facilitado por el Jardín Botánico de Bogotá - JBB, se pudo evidenciar la funcionalidad de la tecnología. Empleando como combustible cascarilla de arroz proveniente de Inversiones Molino Pacande con una humedad del 10%, y con aire como agente gasificante, se logró generar la energía necesaria para encender el motor industrial que posee el gasificador Power Pallet – PP20.
2. Al contar con 33 molinos en los Llanos Orientales se evidencia un gran potencial en cuanto a la utilización de la biomasa residual derivada de los procesos productivos propias de esta industria para la generación de energía eléctrica mediante el proceso de gasificación. Hablando específicamente del molino de arroz PACANDE se cuenta con un potencial teórico de 12539.58MJ/h y un potencial técnico de la planta de 9404.69MJ/h, esto considerando únicamente el recurso disponible del proceso productivo del arroz que se da en la actualidad.
3. El gasificador seleccionado fue el de Lecho fluidizado burbujeante, pues es un mecanismo a pequeña escala, económico en su construcción y puede manejar un gas de síntesis con poca cantidad de alquitranes, por ello se ajusta a las necesidades de la planta requerida.
4. En las pruebas experimentales realizadas en el gasificador del Jardín Botánico de Bogotá el agente gasificante empleado fue el aire. El flujo de aire real necesario para gasificar la cascarilla de arroz se obtuvo de la cantidad de oxígeno utilizada en el proceso en relación con la utilizada en la combustión completa. La producción de gas de síntesis aumenta con la temperatura y la ER, pero no necesariamente implica mayores eficiencias de gasificación pues a valores altos de ER hay efecto negativo sobre el poder calorífico (PCI) del gas de

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

síntesis. Bajo estas consideraciones se concluye que la temperatura optima es de 850°C con un ER cercano a 0.3.

5. La propuesta de la planta de gasificación considera el tratar la cascarilla de arroz que produce el molino 0.24 kg/s, equivalente a 858.3 kg/h con una humedad de 10%. Esta producción puede alimentar una planta de gasificación de unos 0.70MWe. Se proyecta entonces una planta de aproximadamente 1MWe de potencia instalada.
6. El esquema propuesto para la planta es el de Autogeneración, supliendo sus necesidades internas de energía eléctrica; para ello requiere generar como mínimo 564kW en promedio día para atender el proceso productivo de 37593 Ton/año de arroz Paddy. Considerando que el 20% de la producción del arroz pasa a ser biomasa residual, 7518.6 Ton/año, la planta de gasificación estaría en la capacidad de generar energía eléctrica para atender la producción, suplir su autoconsumo y presentar excedentes de energía equivalentes al 43% de la generación. Podría pensarse entonces en beneficios adicionales al proyecto por inyección de energía eléctrica al SIN del orden de 0.44MW.
7. De acuerdo con los indicadores financieros bajo los cuales se analizó el proyecto, este representa una oportunidad que podría generar unos ahorros frente a la compra de energía a la red del orden de los \$1,431,838,620 en los 15 años de vida del proyecto, con una TIR de 46%, en el mejor de los casos (Proyecto con financiamiento), lo que evidencia la conveniencia del proyecto.
8. Los buenos resultados que se obtienen con la implementación del proyecto están dados en gran medida a los costos operativos (OPEX), esto se debe a que la biomasa no requiere ser adquirida o transportada pues se asume que estos costos son tomados por la operación normal del molino en el proceso productivo del arroz y no el proceso de gasificación de la

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

biomasa. Aunque la inversión inicial es alta, se recuperaría en el primer trimestre del tercer año lo que hace bastante atractivo el proyecto.

9. Una vez implementado el proyecto se contará con una tarifa de energía de \$182kWh que enfrentada a la tarifa que se paga actualmente, 346.79 kWh, evidencia la conveniencia económica que representa el llevar a cabo el proyecto.



### 13. RECOMENDACIONES

- Para los alquitranes y las cenizas que quedan del proceso de gasificación es necesario analizar cuál sería el manejo y disposición final de los mismos con el fin de evitar posibles fuentes de contaminación. Podrían inclusive ser materia prima para otras industrias (Cementeras, agricultores, insumo para vías...)
- Podría considerarse una oportunidad de negocio el recibir cascarilla de arroz de otros molinos de la ciudad y generar energía a partir de esta. Este alcance no es competencia del proyecto en estudio, pero si se recomienda realizar el análisis técnico – financiero con el fin de obtener ingresos adicionales por el tratamiento de la cascarilla y venta de excedentes al SIN.
- Una de las dificultades que surgió al momento de realizar las pruebas experimentales en el gasificador del Jardín Botánico de Bogotá fue el tamaño de la cascarilla ya que se presentaron atascamientos de la tolva donde se depositaba la cascarilla de arroz y su paso a través del tornillo sinfín. Para futuros análisis, resulta conveniente ahondar en el estudio de la biomasa a depositar en el gasificador considerando paletizar hasta encontrar el tamaño que mejor se comporte en el proceso de gasificación.

#### 14. BIBLIOGRAFIA

- Agustin Valverde G., Bienvenido Sarria L., & José P. Monteagudo Y. (2007). ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DE LA CASCARILLA DE ARROZ. *Scientia et Technica*, 37, 255–260.
- ALBERTO GÓMEZ BAREA. (2011). DISEÑO DE UN REACTOR DE LECHO FLUIDO DE LABORATORIO PARA EL ESTUDIO DE LA CONVERSIÓN TERMOQUÍMICA DE BIOMASA, 15–44.
- Angélica María Areiza Segura. (2015). *DIAGNÓSTICO DEL MERCADO DE ARROZ EN COLOMBIA*. Bogotá.
- Antonio, M., Cruz, E., Antonio, O., & Mena, L. (2010). Escuela Politécnica Nacional Facultad De Ingeniería Mecánica Caracterización Energética De La Cascarilla De Arroz Para Su Aplicación En La Generación De Energía Termoeléctrica Proyecto Previo a La Obtención Del Título De Ingeniero Mecánico.
- Daniel, J., Ángel, M., Gisette, T., Vásquez, P., López Zapata, J. P., & Vélez, M. B. (2010). EXPERIMENTOS DE COMBUSTIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ EN LECHO FLUIDIZADO PARA LA PRODUCCIÓN DE CENIZA RICA EN SÍLICE . *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, 51, 97–104.
- Departamento Nacional de Estadística. (2018). Encuesta Nacional de Arroz Mecanizado (ENAM) I Semestre 2018 Gráfico, 1–17.
- Fedearroz. (2011). *DINAMICA DEL SECTOR ARROCERO EN LOS LLANOS ORIENTALES DE COLOMBIA*. Bogotá.
- Fedesarrollo. (2013). *POLÍTICA COMERCIAL PARA EL ARROZ - REPORTE FINAL*. Bogotá.
- Galiano, M. G. (2014). Estudio de emisión de gases procedentes de un sistema de aprovechamiento de biomasa.
- Jaider Sierra Aguilar. (2009). Alternativas de aprovechamiento de la cascarilla de arroz en Colombia.
- Llanos Páez, O., Ríos Navarro, A., Jaramillo Páez, C. A., & Rodríguez Herrera, L. F. (2016). La cascarilla de arroz como una alternativa en procesos de descontaminación. *Producción + Limpia*, 11(2), 150–160. <https://doi.org/10.22507/pml.v11n2a12>
- Londoño Echeverri, C. A. (2006). Diseño Óptimo De Ciclones. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 5(9), 123–139. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2014.23-2.11>
- Meléndez Mendizabal, E. R. (2017). Evaluación de la viabilidad de la gasificación de residuos sólidos municipales para la generación de energía eléctrica en Guatemala, 11. Retrieved from <http://digibuo.uniovi.es/dspace/handle/10651/43582>
- MinAmbiente. (2012). Guia Ambiental Del Arroz. *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*, 1–34.
- Monterrosa, H. (2018). Colombia tiene potencial en el desarrollo de proyectos de energías renovables. *La República*.
- Mora guevara, G. (2013). Caracterizacion De La Agroindustria Arroceras Del Departamento Del Meta. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Naranjo Valencia, L., & Aristizábal Álvarez, M. (2015). Diseño conceptual de un gasificador para la

## GASIFICACIÓN CON CASCARILLA DE ARROZ

producción de gas de síntesis a partir de residuos de poda generados en la universidad EAFIT, 76.

Novoa Galeano, M. A., Becerra León, L. D., & Vásquez Piñeros, M. P. (2016). La ceniza de cascarilla de arroz y su efecto en adhesivos tipo mortero. *Avances Investigación En Ingeniería*, 11(2). <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.2.233>

Quintero C., M. F., Guzmán P., J. M., & Valenzuela, J. L. (2012). Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 6(1), 76–87. Retrieved from [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2011-21732012000100008&lng=en&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2011-21732012000100008&lng=en&nrm=iso&tlng=es)

Renewable, I., & Agency, E. (2018). *GLOBAL ENERGRenewable, I., & Agency, E. (2018). GLOBAL ENERGY.Y.*

Romero Salvador, A. (2010). APROVECHAMIENTO DE LA BIOMASA COMO FUENTE DE ENERGÍA ALTERNATIVA A LOS COMBUSTIBLES FÓSILES. *Rev.R.Acad. Cienc.Exact.Fís.Nat(Esp)*, 104, 331–345.

Sánchez Lario, A. (2017). Diseño de una planta de gasificación con cogenreción para el aprovechamiento energético de la cascarilla de arroz en un proceso industrial.

Serrano, T., Borrachero, M., Monzo, J., & Paya, J. (2012). Lightweight mortars with rice husk: mix design and properties evaluation. *Dyna*, 128–136.

Unión Temporal AGROPLAN. (2007). *CARACTERIZACIÓN DEL CONSUMO FINAL DE ENERGÍA EN EL SECTOR AGROINDUSTRIAL*. Bogotá.

Universidad Industrial de Santander. Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales, Unidad de Planeación MInero Energética, & Instituto de Hidrología, M. y E. A. I. (2011). *ATLAS DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA BIOMASA RESIDUAL EN COLOMBIA*.

Villada, D. Q., Yair, M., & Gutierrez, M. (2010). *ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA EL USO DE LA CASCARILLA DE ARROZ COMO COMBUSTIBLE*. Universidad Autónoma de Occidente .