



**UNIVERSIDAD NACIONAL
"PEDRO RUIZ GALLO"**



Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

TESIS

**Para Optar el Título Profesional de
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

**"GENERACIÓN DE ENERGÍA
ELÉCTRICA MEDIANTE GASIFICACIÓN
DE LA CASCARILLA DE ARROZ PARA
UN MOLINO EN LAMBAYEQUE"**

Autor:

Br. EDWARD ANTONIO FERNÁNDEZ GARCÍA

Asesor:

M.Sc. Ing. CIP. AMADO AGUINAGA PAZ

Lambayeque – Perú

Abril, 2019



**UNIVERSIDAD NACIONAL
“PEDRO RUIZ GALLO”**



Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

TESIS

**Para Optar el Título Profesional de
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

**“GENERACIÓN DE ENERGÍA
ELÉCTRICA MEDIANTE GASIFICACIÓN
DE LA CASCARILLA DE ARROZ PARA
UN MOLINO EN LAMBAYEQUE”**

Presentado Por:

Br. EDWARD ANTONIO FERNÁNDEZ GARCÍA

Aprobado por el Jurado Examinador

PRESIDENTE : Dr. ANIBAL JESUS SALAZAR MENDOZA

SECRETARIO : ING. CARLOS YUPANQUI RODRIGUEZ

MIEMBRO : ING. ROBINSON TAPIA ASENJO

ASESOR : M.SC. ING. AMADO AGUINAGA PAZ

Lambayeque – Perú

Abril, 2019



**UNIVERSIDAD NACIONAL
"PEDRO RUIZ GALLO"**

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica



TESIS

TÍTULO

**"GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA
MEDIANTE GASIFICACIÓN DE LA CASCARILLA
DE ARROZ PARA UN MOLINO EN LAMBAYEQUE"**

CONTENIDOS

CAPITULO I: PROBLEMA DE LA INVESTIGACION.

CAPITULO II: MARCO TEORICO.

CAPITULO III: MARCO METODOLOGICO.

CAPITULO IV: ANÁLISIS E INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS.

CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

CAPÍTULO VI: REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

CAPITULO VII: ANEXOS.

AUTOR: Br. EDWARD ANTONIO FERNÁNDEZ GARCÍA

PRESIDENTE

SECRETARIO

MIEMBRO

ASESOR

Lambayeque – Perú

Abril, 2019

DEDICATORIA

A toda mi familia, a mis padres, Norbil y María

*Porque todo lo que soy se los debo a ellos y por siempre brindarme todo su amor
y apoyo.*

A mis abuelos, Patrocinio, Santos, Adolfo y Anita

Por siempre haberme brindado su cariño y preocuparse por mí.

A mi hermano Jhonatan

Por siempre ser mi compañero de vida

AGRADECIMIENTO

A Dios, por darme la vida, por estar conmigo en cada paso que doy e iluminar mi alma y mente para siempre ir por el buen camino.

A mi familia, por brindarme todo su apoyo, los ánimos y su cariño, para seguir adelante, ya que sin ellos esto no hubiera sido posible.

Al Ing. Amado Aguinaga, mi asesor de tesis, por su apoyo incondicional en cada una de las asesorías.

A Molinera Los Ángeles, Lambayeque, por brindarme las facilidades en la recolección de la información que necesitaba para la realización del presente proyecto de investigación.

A la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo y su Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica (FIME), mi alma mater, la cual fue la base fundamental para la adquisición de todos los conocimientos necesarios para comenzar mi vida profesional, así como a todos los buenos docentes que la conforman.

RESUMEN

En la Provincia de Lambayeque existen Molinos que no aprovechan todo el potencial de la cascarilla de arroz, el Investigador con el propósito de mejorar la calidad de vida, ofrecer energía eléctrica a precio competitivo, reducir el impacto ambiental, presenta el objetivo, "Proponer un sistema de generación de energía eléctrica mediante la gasificación de la cascarilla de arroz para un Molino en Lambayeque".

De acuerdo al objetivo propuesto se formula la pregunta a ser investigada ¿Cómo generar energía eléctrica a partir de la gasificación de la cascarilla de arroz para un molino en Lambayeque?

De los resultados obtenidos del estudio se pudo determinar lo siguiente:

El estudio propone un Sistema de Gasificación de lecho móvil en corrientes paralelas (down draft), que utilizará la cantidad de Biomasa 6307,2 Tn/año obteniendo una potencia a la salida del generador de 607 kW.

Se determinó la viabilidad técnica determinando la cantidad de cascarilla de arroz producida por el Molino los Ángeles mediante la alimentación para el gasificador de 0,28 kg/s, de un 10% de humedad para generar 500 a 750 kW_e de acuerdo a la capacidad del generador según el estudio propuesto.

Mediante el estudio propuesto se presenta la viabilidad económica financiera con un valor actual neto (VAN) de 113293 y de un 4% mayor al teórico y un TIR es de un 11,53 % considerándose viable la propuesta.

PALABRAS CLAVES: Gasificación, Cascarilla de arroz, generación de energía eléctrica, viabilidad económica financiera.

ABSTRACT

In the Province of Lambayeque there are Mills that do not take advantage of the full potential of the rice husk, the Researcher with the purpose of improving the quality of life, offer electric energy at a competitive price, reduce the environmental impact, presents the objective, "Propose a system of electric power generation through the gasification of the rice husk for a Mill in Lambayeque".

According to the proposed objective, the question to be investigated is asked: How to generate electric power from the gasification of the rice husk for a mill in Lambayeque?

From the results obtained from the study it was possible to determine the following: The design proposes a Gasification System of mobile bed in parallel streams (down draft), which will use the amount of Biomass 6307.2 Tn / year, obtaining a power at the output of the generator 607 kW.

The technical feasibility was determined by determining the amount of rice husk produced by the Los Ángeles Mill by feeding the gasifier 0.28 kg / s, 10% moisture to generate 500 to 750 kWe according to the capacity of the generator according to the proposed study.

Through the proposed study, the economic and financial viability is presented with a net present value (NPV) of 113293 and 4% higher than the theoretical one and an IRR is of 11.53% considering the proposal viable.

KEYWORDS: Gasification, rice husk, electric power generation, financial economic feasibility.

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS	11
ÍNDICE DE FIGURAS	13
INTRODUCCIÓN	14
CAPITULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	16
1.1. Realidad problemática.....	16
1.2. Formulación del problema	17
1.3. Delimitación de la Investigación	17
1.4. Justificación e importancia de la investigación	18
1.4.1. Justificación teórica	18
1.4.2. Justificación práctica	19
1.4.3. Justificación metodológica	19
1.4.4. Importancia de la Investigación	20
1.5. Limitaciones de la Investigación	22
1.6. Objetivos de la Investigación.....	23
1.6.1. Objetivo General	23
1.6.2. Objetivos Específicos	23
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO	24
2.1. Antecedentes de Estudios.....	24
2.1.1. Antecedentes Internacionales	24
2.1.2. Antecedentes Nacionales.....	26
2.1.3. Antecedentes Locales	28
2.2. Desarrollo de la temática correspondiente al tema investigado	31
2.2.1. Historia de la Biomasa	31
2.2.2. Análisis energético y ciclo de vida del carbono	32
2.2.3. Fuentes de biomasa para fines energéticos.....	34
2.2.4. Procesos de conversión de la biomasa.....	35
2.2.5. Caracterización de la biomasa en el ámbito de la energía	38

2.2.6. La Gasificación energética	41
2.3. Definición conceptual de la terminología empleada	52
2.3.1. Agente gasificante	52
2.3.2. Alquitranes	52
2.3.3. Ambiente	52
2.3.4. Biomasa	53
2.3.5. Cascarilla de arroz	53
2.3.6. Energía eléctrica	53
2.3.7. Energía sostenible.....	53
2.3.8. Gasificación.....	53
CAPITULO III: MARCO METODOLÓGICO.....	54
3.1. Tipo y Diseño de investigación.....	54
3.2. Población y Muestra	54
3.2.1. Población	54
3.2.2. Muestra	54
3.3. Hipótesis.....	55
3.4. Variables – Operacionalización	55
3.5. Métodos y Técnicas de investigación	57
3.5.1. Fuentes primarias.....	57
3.5.2. Fuentes secundarias	57
CAPITULO IV: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS	58
4.1. Diseño de la Planta de Gasificación	58
4.1.1. Cascarilla de arroz como biocombustible.....	58
4.1.2. Efectos del alto contenido en materia volátil sobre el proceso de combustion de la cascarilla de arroz.	62
4.1.3. Ubicación del Molino los Ángeles.....	64
4.1.4. Cálculo de materia y energía del Sistema de Gasificación	65
4.2. Viabilidad Técnica del Sistema de Gasificación	79
4.2.1. Gasificador	79

4.2.2. Intercambiador de calor.....	81
4.2.3. Sistema de lavado o scrubber tipo Venturi.....	83
4.2.4. Filtros para la operación continua	85
4.2.5. Quemador	85
4.2.6. Motor de combustión.....	86
4.2.7. Propuesta técnica del sistema de gasificación por el estudio	87
4.3. Viabilidad económica financiera	94
4.3.1. Costos del Sistema de Gasificación	95
4.3.2. Parámetros Operacionales.....	96
4.3.3. Costos de Operación.....	96
4.3.4. Costo de Mano de Obra anual	97
4.3.5. Gastos en Reparación y costos de mantenimiento anual	97
4.3.6. Gastos Totales anuales en Sistema de Gasificación	98
4.3.7. Ingreso por Costo de Electricidad	98
4.3.8. Caracterización del Sistema de Gasificación	99
4.4. Discusión de Resultados.....	104
CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	106
5.1. Conclusiones.....	106
5.2. Recomendaciones.....	108
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	109
ANEXOS	111

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Valor de Calentamiento de combustibles	41
Tabla 2: Composición y uso del gas de síntesis en función al agente gasificante	49
Tabla 3: Producción de Cascarilla de arroz Molino los Ángeles.....	55
Tabla 4: Matriz de Consistencia	56
Tabla 5: Propiedades fisicoquímicas de la cascarilla de arroz en función del grado de humedad.	61
Tabla 6: Composición en materia volátil.....	63
Tabla 7: Caudal y Potencia de biomasa.....	65
Tabla 8: Contenido de componentes en Moles de compuestos.....	66
Tabla 9: Moles estequiométricos y Volumen de aire	67
Tabla 10: Indicadores de los componentes de la gasificación	68
Tabla 11: Composición y contenido del Gasificador.....	69
Tabla 12: Cantidad de sustancia a la entrada	70
Tabla 13: Porcentaje y numero de moles de Componentes.....	71
Tabla 14: Capacidad calorífica Inferior.....	71
Tabla 15: Densidad y cauda del Gas	72
Tabla 16: Densidad del Gas.....	74
Tabla 17: Densidad del gas de síntesis.....	75
Tabla 18: Caudal del gas y humos	76
Tabla 19: Temperatura del gas en la combustión	77
Tabla 20: LHV de la base seca	77
Tabla 21: Gas y humos, Caudal másico del gas de síntesis	78
Tabla 22: Datos de entrada del gasificador.....	80
Tabla 23: Composición del gas de síntesis en base seca.....	80
Tabla 24: Cálculos realizados del sistema de gasificación.....	81
Tabla 25: Datos de entrada del recuperador de calor	81
Tabla 26: Temperatura de entrada y salida del recuperador de calor.....	82
Tabla 27: Entrada y salida del recuperador.....	82
Tabla 28: Datos de entrada del lavador	83
Tabla 29: Composición del gas de síntesis	84
Tabla 30: Los datos de salida del lavador	84
Tabla 31: Composición de los humos	85

Tabla 32: Datos de entrada del motor	86
Tabla 33: Entrada y salida del motor	86
Tabla 34: Entrada y salida del motor balance de potencias	87
Tabla 35: Sistema de gasificación	88
Tabla 36: Sistema de alimentación	89
Tabla 37: Propuesta del sistema de gasificación	90
Tabla 38: Costos del Sistema de gasificación	95
Tabla 39: Parámetros operacionales.....	96
Tabla 40: Consumo de la biomasa.....	97
Tabla 41: Costo de mano de obra anual	97
Tabla 42: Gastos en reparaciones y costos de mantenimiento	98
Tabla 43: Gastos del sistema de gasificación	98
Tabla 44: Ingresos por costo de electricidad	99
Tabla 45: Caracterización del sistema de gasificación.....	99
Tabla 46: Costes totales.....	100
Tabla 47: Periodos de amortización	100
Tabla 48: Necesidad de financiación.....	101
Tabla 49: Condiciones del préstamo	101
Tabla 50: Cuenta de resultados 1	102
Tabla 51: Cuenta de resultados 2	103
Tabla 52: Flujo neto actualizado.....	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ubicación Geográfica de Molino Los Ángeles.....	18
Figura 2: Sistema de gasificación de biomasa	47
Figura 3: Gasificador Down Draft	52
Figura 4: Aspecto y forma comunes de la cascarilla de arroz.	60
Figura 5: Plano del Sistema de Gasificación	91
Figura 6: Diagrama esquemático	92
Figura 7: Esquema del proceso de Gas limpio.....	93

INTRODUCCIÓN

La biomasa ha sido el primer combustible empleado por el hombre y el principal hasta la revolución industrial. Se utilizaba para cocinar, para calentar el hogar, para hacer cerámica y, posteriormente, para producir metales y para alimentar las máquinas de vapor. Fueron precisamente estos nuevos usos, que progresivamente requerían mayor cantidad de energía en un espacio cada vez más reducido, los que promocionaron el uso del carbón como combustible sustitutivo, a mediados del siglo XVIII.

A pesar de ello, la biomasa aún continúa jugando un papel destacado como fuente energética en diferentes aplicaciones industriales y domésticas. Por otro lado, el carácter renovable y no contaminante que tiene y el papel que puede jugar en el momento de generar empleo y activar la economía de algunas zonas, hacen que la biomasa sea considerada una clara opción de futuro. (ENERGIA 2008, 5)

El Capítulo I. Planteamiento del problema, nos indica lo siguiente:

En la Provincia de Lambayeque existen Molinos que no saben qué hacer con la cascarilla de arroz, el Investigador con el propósito de mejorar la calidad de vida, ofrecer energía eléctrica a precio competitivo, reducir el impacto ambiental, presenta el objetivo, “Proponer un sistema de generación de energía eléctrica mediante la gasificación de la cascarilla de arroz para un Molino en Lambayeque”.

De acuerdo al objetivo propuesto se formula la pregunta a ser investigada ¿Cómo generar energía eléctrica a partir de la gasificación de la cascarilla de arroz para un molino en Lambayeque?

El investigador desarrolla la propuesta para el Molino los Ángeles ubicado en la Panamericana Norte km. 778 Carretera a Lambayeque.

Capitulo II. Marco Teórico, sustenta la generación de energía eléctrica mediante gasificación de la cascarilla de arroz. La biomasa residual para su uso energético destaca la reducción de la contaminación y el deterioro del medio ambiente, así como los riesgos de incendio, costes de producción reducidos, ya que normalmente están cargados al producto principal, siendo el más importante el de recogida, reducción del espacio ocupado, los gastos de transporte son muy bajos. (Sánchez 2017)

Capitulo III. Marco Metodológico de la presente investigación de enfoque cuantitativo, para la generación de energía eléctrica mediante la gasificación de la cascarilla de arroz, determinó el tipo de investigación según (Hernández, Fernández, & Baptista 2014) de diseño no experimental, transaccional de correlación causal. (p. 154)

Capitulo IV. Análisis e interpretación de resultados, se determinó lo siguiente:

El estudio propone un Sistema de Gasificación que utilizará la cantidad de Biomasa 6307,2 Tn/año obteniendo una potencia a la salida del generador de $P_{\text{eléctrica}} = P_{\text{motor}} * \eta_e = 2,428 \text{ MW} * 0,25 = 0,607 \text{ MW} = 607 \text{ kW}$.

Se determinó la viabilidad técnica determinando la cantidad de cascarilla de arroz producida por el Molino los Ángeles mediante la alimentación para el gasificador de 0,28 kg/s, de un 10% de humedad para generar 500 a 750 kWe de acuerdo a la capacidad del generador según el estudio propuesto.

Mediante el estudio propuesto se presenta la viabilidad económica financiera con un valor actual neto (VAN) de 113293 y de un 4% mayor al teórico y un TIR es de un 11,53 % considerándose viable la propuesta.

CAPITULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Realidad problemática

Según Psetizki, Empresario quien mencionó a BBC Mundo, que Estamos frente a "un problema bastante serio, que no se sabe qué hacer con los residuos del arroz en el Uruguay, encontramos que había una muy buena oportunidad de generar energía a través de biomasa".

A eso se sumó el hecho de que en la zona hay dos molinos arroceros, que también se enfrentaban al problema de qué hacer con la cáscara de arroz.

En el proceso de producción del arroz, la cáscara generada en los molinos se deposita en canteras. Muchas veces estos residuos se queman, con el consiguiente impacto en la calidad del aire. (Psetizki 2009)

Cuando no se queman, se acumulan en pilas donde se fermentan y se descomponen lentamente, produciendo emisiones de metano a la atmósfera.

Ahora, la quema de la cáscara para producir energía evitará la contaminación.

Según el INEI 2018, la producción de arroz cáscara ha sido de 2096748,8 de Toneladas en el 2017, en abril de 2018 registró un incremento de 379 mil 659 toneladas y se incrementó en 55,6% al compararlo con el volumen reportado en similar mes del año pasado. Este resultado se sustentó en las mayores superficies sembradas y buenas condiciones climáticas para este cultivo, en contraste con lo ocurrido durante los primeros meses del año 2017 afectado por el Fenómeno de El Niño Costero. (INEI 2018)

Según el Ministerio de Agricultura y Riego, el total de 2476407,8 Ton de producción de arroz anuales en el Perú, el 25% del arroz cáscara es la cascarilla del arroz, de este resultado se obtiene 619101,91 Ton de cascarilla,

esta cantidad en un 90% es quemada al aire libre, contaminando el medio ambiente.

En la región de Lambayeque, existen muchas industrias Molineras de Arroz (98 según reporte de MINAGRI 2017), éstas generan una gran cantidad de recursos en biomasa en su proceso final, mencionando a la cascarilla de arroz, la cual no es aprovechada, generando desperdicio y contaminando el ambiente.

El Investigador plantea la posibilidad de mejorar la calidad de vida, ofrecer energía eléctrica a precio competitivo, reducir el impacto ambiental, y aprovechar este recurso, formulando así la pregunta a ser investigada:

¿Cómo generar energía eléctrica a partir de la gasificación de la cascarilla de arroz para un molino en Lambayeque?

1.2. Formulación del problema

¿Cómo generar energía eléctrica a partir de la gasificación de la cascarilla de arroz para un molino en Lambayeque?

1.3. Delimitación de la Investigación

La investigación se desarrolla en la Provincia de Lambayeque

Espacio geográfico:

Lugar: Ubicado en la Panamericana Norte km. 778 Carretera a Lambayeque.

Empresa: Molino los Ángeles S.R.L.

Sujetos, objetos participantes de la Investigación: Personal del Molino los Ángeles (Jefes, Supervisores de área), el Investigador.

Periodo de tiempo en el que se realizó la investigación: El periodo para el desarrollo de la Investigación es de 1 año, desde el estudio, la viabilidad técnica y la viabilidad económica financiera del estudio.

Figura 1: Ubicación Geográfica de Molino Los Ángeles



Fuente: Google Maps

1.4. Justificación e importancia de la investigación

De acuerdo a la metodología científica la justificación se desarrolla según:

1.4.1. Justificación teórica

El presente estudio se desarrolla con el propósito de aportar al conocimiento existente la utilización de tecnología para generar energía mediante el proceso de gasificación utilizando la cascarilla de arroz, estudio que propone un uso eficiente de la biomasa existente en el Molino los Ángeles ubicado en la Provincia de Lambayeque, el cual tiene una potencia contratada de 500 kW, proponiendo así nuevos métodos para la generación de energía eléctrica,

otorgando electricidad a precio competitivo, reduciendo el impacto ambiental, generando calidad de vida para el planeta y creando responsabilidad social, demostrado en la correlación del estudio propuesto mediante el método científico.

1.4.2. Justificación práctica

La justificación práctica para el estudio es la factibilidad y viabilidad económica financiera del sistema de gasificación mediante la biomasa producto de la cascarilla de arroz en el Molino los Ángeles ubicada en la Provincia de Lambayeque.

La investigación se desarrolla con la necesidad y búsqueda de alternativas para la generación de electricidad con cero efectos y consecuencias en el medio ambiente.

El sistema de gasificación permitirá una rentabilidad favorable para la empresa encargada del proceso y bienestar medioambiental para el planeta generando la calidad de vida para los seres vivos, mediante la propuesta sustentada en la presente investigación.

1.4.3. Justificación metodológica

La selección, la factibilidad y viabilidad técnica financiera del estudio desarrollado, Sistema de Gasificación mediante la cascarilla de arroz para generar energía eléctrica para el Molino los Ángeles en la Provincia de Lambayeque, propone al conocimiento existente un antecedente teórico más para futuras investigaciones, desarrollado con el propósito de contribuir un desarrollo sostenible para el medio ambiente y generar una mejor calidad de vida, el estudio se sustenta en el coeficiente de determinación positivo mostrado

a través de la bondad de ajuste favorable en mayor grado de la viabilidad de la propuesta presentada en la presente investigación, una vez demostrada la validez de la hipótesis alterna.

1.4.4. Importancia de la Investigación

De acuerdo al (INEI 2018), La producción de arroz cáscara ha sido de 2096748,8 de Ton en el 2017, en abril de 2018 registró un incremento de 379 mil 659 toneladas y se incrementó en 55,6% al compararlo con el volumen reportado en similar mes del año pasado; informó el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) en el Informe Técnico Perú: Panorama Económico Departamental, realizado con información suministrada por el Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI), Ministerio de Energía y Minas (MINEM), Superintendencia Nacional de Aduanas y de Administración Tributaria (SUNAT), entre otros.

Este resultado se sustentó en las mayores superficies sembradas y buenas condiciones climáticas para este cultivo, en contraste con lo ocurrido durante los primeros meses del año 2017 afectado por el Fenómeno de El Niño Costero.

Según MINAGRI, el total de 2476407,8 Ton de producción de arroz anuales en el Perú, el 25% del arroz cáscara es la cascarilla del arroz, de este resultado se obtiene 619101,91 Ton de cascarilla, esta cantidad en un 90% es quemada al aire libre, contaminando el medio ambiente.

Además para mencionar sobre la generación de energía eléctrica de acuerdo con el Ministerio de Energía y Minas para el año 2017 en el Perú se alcanzó una producción de 52643 GWh, siendo el 55% de esta de generación hídrica, 42% térmica, el 2% eólica y el 1% solar.

En la actualidad, y debido a los problemas medioambientales que existen en nuestro planeta, el uso de combustibles no contaminantes es una opción prioritaria en la sociedad, siendo la biomasa un recurso que se puede aprovechar al máximo debido a todas sus propiedades que ofrece.

Todavía siguen siendo necesarios ciertos combustibles que por desgracia sí contaminan, como el gasóleo en cualquiera de sus tipologías, pero hay situaciones en las que sí que es posible sustituirlo por un combustible mucho más sano para el medio natural, como es la biomasa.

La biomasa tiene un papel destacado como fuente energética en diferentes aplicaciones industriales y domésticas. Por otro lado, el carácter renovable y no contaminante que tiene y el papel que puede jugar en el momento de generar empleo y activar la economía de algunas zonas, hacen que la biomasa sea considerada una clara opción de futuro, por lo cual debe comenzar a desempeñar un rol más prioritario. (ENERGIA 2008, 5)

Al reunir las citas antes presentadas y resaltar la producción del arroz, la generación de energía eléctrica, y la generación de energía mediante la biomasa producto de la cascarilla arroz, el estudio asume la importancia para proponer la combinación de la necesidad del sistema de gasificación mediante el uso de la biomasa (miles de toneladas de cascarilla de arroz) producidas durante cada año para aprovechar el recurso de la cascarilla, con el propósito de crear responsabilidad ambiental en el Molino los Ángeles, mejorar la calidad de vida, generar electricidad a un precio competitivo, a través de la propuesta eco eficiente.

De acuerdo a esto podría ser el inicio no solo para generar energía a precio competitivo, además podría generar valor en la educación y responsabilidad

ambiental para las empresas. Actualmente la mayoría de las aplicaciones térmicas en edificios o redes centralizadas con biomasa generan un ahorro, derivado del consumo de energía, superior al 10% respecto a uso de combustibles fósiles, pudiendo alcanzar niveles aún mayores según el tipo de biomasa, la localidad y el combustible fósil sustituido.

Como ha ocurrido con la eólica y la solar, la implantación de la biomasa en determinados territorios facilita también el desarrollo de experiencias y proyectos de educación ambiental en los que se intenta resaltar la importancia de esta fuente energética. En este mismo ámbito se inscriben experiencias de visitas escolares y de vecinos a las plantas de biomasa para enseñar y demostrar sus ventajas ambientales, energéticas y sociales. (IDAE 2007, 48)

1.5. Limitaciones de la Investigación

El presente estudio considera las siguientes limitaciones presentadas durante su desarrollo.

La empresa no cuenta con datos sistematizados, el aplicativo que cuenta es un sistema de ventas mas no de gestión avanzada, no existe informes de producción exactos, los datos y la información obtenida en los procesos de producción se guardan manualmente, para obtener los datos se ha tenido que revisar cuadernos y visitar las diferentes áreas de la empresa, considerando que esta no se encuentra centralizada en un solo lugar o aplicativo.

Los trabajos que se realizan en la empresa en muchos de los procesos son empíricos, para recabar la información para realizar la investigación se ha tenido que consultar a supervisores, jefes de área y operarios de planta, permitiendo tomar apuntes de manera personal, generando retrasos y espera para el desarrollo del estudio.

1.6. Objetivos de la Investigación

En el estudio “Generación de energía eléctrica mediante gasificación de la cascarilla de arroz para un Molino en Lambayeque” se propone los siguientes objetivos:

1.6.1. Objetivo General

Proponer un sistema de generación de energía eléctrica mediante la gasificación de la cascarilla de arroz para un Molino en Lambayeque.

1.6.2. Objetivos Específicos

- Selección del Sistema de gasificación usando la cascarilla de arroz como combustible para la generación de energía eléctrica en un Molino de Lambayeque.
- Demostrar la viabilidad Técnica del Sistema de generación eléctrica mediante la gasificación de la cascarilla de arroz para un Molino de Lambayeque.
- Demostrar la viabilidad económica financiera del Sistema de generación eléctrica mediante la gasificación de la cascarilla de arroz para un Molino de Lambayeque.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de Estudios

2.1.1. Antecedentes Internacionales

En la Investigación presentada por Silva Guerrero en su tesis: “Diseño de una planta de procesamiento de cascarilla de arroz para la producción de óxido de silicio amorfo y de energía eléctrica”, en la Universidad Escuela Politécnica Nacional de Quito Ecuador, sustenta:

El procesamiento de 36 toneladas de cascarilla de arroz por día, trabajando 345 días al año, genera 1696,08 toneladas de dióxido de silicio amorfo y 51119200,00 kWh de energía eléctrica por año. La pureza del dióxido de silicio amorfo producido es 82,33%.

El estudio de pre factibilidad económica calcula un valor de inversión inicial para la realización del proyecto de 6111067,20 USD. El punto de equilibrio se alcanza con la producción de 696,21 toneladas de dióxido de silicio amorfo al año.

Los indicadores TIR y VAN, a 10 años de proyecto, con una tasa de interés pasiva referencial de 4,96%, son 4,08% y 296197,09 USD, respectivamente. Esto hace que el proyecto no sea rentable.

Se analiza además la inversión a 20 años plazo. Se obtiene un TIR del 10,83% con un VAN de 3529261,64 USD.

El aumento de la producción también aumenta los valores TIR y VAN, ya sea a 10 o a 20 años plazo. Con una producción de dióxido de silicio de 3000 toneladas por año, lo que representa un aumento del 76,88% con respecto a la producción inicial, se obtienen valores de TIR de 24,82% a 10 años plazo y

27,69% a 20 años plazo. El VAN es 7521434,74 USD a 10 años y 16273424,74 USD a 20 años. (Silva Guerrero 2017, 118)

Para el Investigador Asprilla en su tesis: “Estudio de Sistemas Híbridos de energía renovable (solar - gasificación de biomasa) como alternativa para satisfacer necesidades energéticas en zonas no interconectadas del Departamento de Chocó” en la Universidad Nacional de Colombia, sustenta lo siguiente:

Al analizar, el recurso biomásico en las ZNI del Departamento del Choco, se encontró que se tiene un potencial significativo, ya que para los municipios analizados se obtuvo una gran variedad en los recursos de biomasa, los cuales pueden ser utilizados energéticamente mediante el proceso de gasificación para dar solución al problema de interconexión que se viene en esta región y mejorar la calidad de vida.

Se tiene un potencial de biomasa de 680 kWh/año, en consecuencia, para suplir de energía eléctrica. (Asprilla 2016, 62-63)

En el estudio presentado por Ruiz M. en su tesis: “Simulación del proceso de gasificación termoquímica para la obtención de gas combustible, aplicado a cascarilla de café” en la Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica, sustenta:

Se concluye que el uso de gas obtenido de la gasificación pirolítica de cascarilla de café, para el secado de café verde, no es conveniente desde el punto de vista termodinámico, ya que se pierde demasiada energía en el proceso de gasificación. Una mejor opción es la quema directa de la cascarilla de café, para aprovechar al máximo su valor de calentamiento, ... se debe recordar que la gasificación de biomasa sigue siendo una opción atractiva, ya

que disminuye la cantidad de contaminantes liberados al ambiente en comparación a la combustión directa de la biomasa, además de convertir a la biomasa en un combustible más versátil, pues el gas obtenido se puede utilizar en una máquina de combustión interna para producir energía mecánica y eléctrica . (Ruiz 2015, 101)

2.1.2. Antecedentes Nacionales

El estudio propuesto por el Investigador Huaraz C. en su tesis: “Diseño de un gasificador de 25kW para aplicaciones domesticas usando como combustible cascarilla de arroz” en la Pontificia Universidad Católica del Perú, sustenta lo siguiente:

La cascarilla de arroz reúne las características necesarias para su utilización en la producción de energía mediante el proceso de gasificación, debido al bajo porcentaje de nitrógeno (<0,6%), cloro (<0,1%) y azufre (<0,2%), y altos contenidos en materia volátil; además en el año 2012 se generó 599 800 TM de cascarilla de arroz, esto equivale aproximadamente 189 400 TEP (tonelada equivalente de petróleo) de energía que está disponible, también el costo del combustible es casi nulo.

El gasificador tipo Downdraft fue seleccionado por ser adecuado para la aplicación en los procesos de cocción (mayores a 50 raciones), eso se debe a la potencia que se necesita, tipo de combustible a utilizar y la aplicación.

Las características del gasificador son los siguientes: 25 kW de potencia, una eficiencia del 60%, temperatura máxima dentro del reactor de 700°C y temperatura externa de 48°C., altura de 1,40 m, diámetro de 0,30 m y 0,105 m³ de capacidad de almacenamiento de la cascarilla de arroz, además utiliza

11,60 kg de cascarilla de arroz por batch; por las dimensiones el gasificador no ocupa demasiado espacio en el área de trabajo. (Huaraz 2013, 100)

En el estudio realizado por Estremadoyro J. en su tesis: “Análisis de factibilidad para producción de energía utilizando un gasificador de hojas de caña de azúcar” en la Universidad de Piura, sustenta:

Las características del gasificador son las siguientes: 70 kW de potencia térmica, eficiencia del 60%, temperatura del lecho de 800°C, altura de 2.2 metros y diámetro de 0.24 m. Necesita 32 kg de biomasa para producir 69 Nm³ de syngas por hora. Para la alimentación de la biomasa se necesitará un tornillo sin fin de una pulgada de diámetro, aproximadamente, que sea accionado por un motor a 27 rpm. Por otro lado, para la separación de sólidos, se utilizará un ciclón con una altura total de 0.65 m, diámetro de cuerpo de 0.17 m y diámetro de salida de 0.07 m, como parámetros principales. Por último, se utilizará una placa perforada para asegurar una fluidización homogénea del lecho. Esta constará de 10680 huecos, con un diámetro de 1.5 mm cada uno y paso de 2 mm en disposición cuadrada. (Estremadoyro 2015, 85)

En el estudio presentado por Huaripoma D. en su tesis: “Diseño de un gasificador Downdraft invertido de 2600 kcal/h que emplea cascarilla de arroz como combustible” en la Pontificia Universidad Católica del Perú, sustenta en la investigación presentada lo siguiente:

La cascarilla de arroz es una biomasa residual seca de origen agrícola con un valor de calentamiento de 13 MJ/kg y que posee un bajo porcentaje de elementos contaminantes (nitrógeno, cloro y azufre) lo que lo convierte en un combustible sólido apto para el proceso termoquímico de gasificación.

Además, el abundante contenido de dióxido de silicio (SiO_2) en la composición de las cenizas de esta biomasa permite que no haya problemas de escorificación en la operación del gasificador downdraft invertido, pues la temperatura de fusión de las cenizas está por encima de $1400\text{ }^\circ\text{C}$, mientras que la máxima temperatura de reacción en el reactor del gasificador es $500\text{ }^\circ\text{C}$. Por otro lado, en el Perú se producen grandes cantidades anuales de cascarilla de arroz que son poco aprovechadas.

El gasificador downdraft invertido diseñado tiene las siguientes dimensiones diámetro interior de $0,19\text{ m}$, diámetro exterior de $0,24\text{ m}$, altura total de $1,12\text{ m}$ y una capacidad de $0,02\text{ m}^3$. Se utilizaron, principalmente, dos materiales, acero inoxidable AISI 304L para los componentes expuestos a grandes cambios de temperatura y acero galvanizado para las demás partes. Las condiciones previstas de operación son eficiencia de 30% , temperatura máxima de reacción de $500\text{ }^\circ\text{C}$, temperatura exterior de $27,5\text{ }^\circ\text{C}$ y tiempo de operación de $3/4$ de hora. El proceso se realiza por lotes y se necesitarían $2,1\text{ kg}$ de cascarilla de arroz para que el sistema opere durante el tiempo especificado. El caudal de aire para el proceso de gasificación es $3,33\text{ m}^3/\text{h}$ y la presión a vencer es $56,2\text{ Pa}$. El equipo que permite satisfacer los requerimientos de caudal y presión es un ventilador axial de 12VDC . (Huaripoma 2015, 79)

2.1.3. Antecedentes Locales

En la investigación presentada por Quintana, S. J. y Salazar, J. E. "Diseño de una Mini central Termoeléctrica de 5kW , utilizando la cascarilla de arroz como combustible en el Caserío Miraflores – Monsefú del Departamento de

Lambayeque” para optar el Título de Ingeniero Mecánico Eléctrico en la Universidad Señor de Sipán, Chiclayo, sustenta:

... Se logró calcular la propuesta de la mini central termoeléctrica la cual fue satisfactorio y llegar a la potencia de 5kW que se pretendió en dicha investigación, ya que su materia prima es lo suficiente para satisfacer las necesidades de energía eléctrica en cada vivienda y la mejor calidad de vida del poblador.

Se logró calcular y seleccionar los diferentes equipos que conforman la mini central termoeléctrica, obteniendo la capacidad del silo con un volumen de 1,0045 m³ radio de 0,509 m, la altura total de 1,764 m con una capacidad de almacenamiento de 110,5 kg, que estará fabricado de acero galvanizado de (1,8x1,200x2,400) mm, el soporte del silo será fabricado de acero estructural de 2"x2"x2,5mm, las dimensiones del quemador de cascarilla de arroz radio de reactor es 0,3 m con una altura de 1m y ancho de 0.8m, estará conformada con ladrillo refractario como aislante térmico de (10x20x2,5)cm, con una temperatura de combustión de 600°C y temperatura ambiente de 20°C, con la finalidad del seleccionamiento correcto del turbocompresor, alternador e inversor, con un ventilador centrifugo de 1150 rpm y potencia de 125 w para su puesta en marcha de la planta termoeléctrica.

Se evaluó la viabilidad económica del diseño de la mini central termoeléctrica, evaluando la rentabilidad del proyecto teniendo como resultado un promedio de 8 años, siendo un proyecto rentable y viable desde el punto de vista económico del VAN y TIR, Inversión inicial S/. 17 055,54, VAN S/. 4 709,64; TIR del 22%. (Quintana, S. J. y Salazar, J. E. 2017, 181-182)

En la Investigación presentada por Rojas C. en su tesis: “Generación de biogás a partir de la cascarilla de arroz para reducir costos energéticos en la Piladora la Merced S.R.L.” en la Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, sustenta en la conclusión:

El potencial energético de la cascarilla de arroz de la Piladora La Merced es muy elevada, ello se debe a que se obtiene más de 100 toneladas mensuales durante el proceso de pilado de arroz, lo que permite producir un gas combustible con gran contenido energético. Por ello, el molino dispone de muchas posibilidades para aprovechar la energía contenida en este gas, lo cual posibilita plantear un proyecto de generación de biogás para la producción de electricidad, logrando un tratamiento responsable de este residuo y reduciendo las emisiones de CO₂.

La producción de cascarilla de arroz en los próximos cinco años garantizará que se contará con la materia prima necesaria para la generación de biogás, pues de 1 771 953 kg de este residuo pronosticado para el año 2023, solo será necesario utilizar 1 105 707 kg, siendo aprovechado por el grupo electrógeno para generar 323 827 kWh. Este equipo contará con una cubierta de ionización, el cual derivará a los motores del área de producción, pues la autonomía y sencillez de estos los hacen ser la tecnología más adecuada y empleada en proyectos de este tipo.

El análisis costo-beneficio develó que el sistema diseñado en el presente proyecto es viable económicamente, pues por cada sol invertido se obtiene una ganancia de S/.0, 39. En este análisis se obtiene que el sistema será rentable a partir de los 3 años y 24 días, lo cual se considera un resultado muy favorable, donde los ingresos están representados por la energía eléctrica a

sustituir, el ahorro por pago de multas de incineración, los bonos de carbono y la venta de biol. Por otro lado, el incremento de precio de los combustibles fósiles es algo inevitable, ya que se trata de recursos limitados, y esto podría favorecer las posibilidades de la autogeneración obteniendo incluso mayores ahorros económicos o posibilitando la venta de electricidad.

La energía ahorrada para el año 2023 es de 323 827 kWh, que representaría un importe total de S/. 143 262. La importancia de obtener un valor de consumo que sea realista radica en que será este el dato que determine el ahorro en términos monetarios. La reducción del importe de la energía eléctrica representaría el 100% para los próximos años, el cual cumple con el objetivo de minimizar los costos energéticos. (Rojas 2018, 119)

2.2. Desarrollo de la temática correspondiente al tema investigado

2.2.1. Historia de la Biomasa

La biomasa ha sido el primer combustible empleado por el hombre y el principal hasta la revolución industrial. Se utilizaba para cocinar, para calentar el hogar, para hacer cerámica y, posteriormente, para producir metales y para alimentar las máquinas de vapor. Fueron precisamente estos nuevos usos, que progresivamente requerían mayor cantidad de energía en un espacio cada vez más reducido, los que promocionaron el uso del carbón como combustible sustitutivo, a mediados del siglo XVIII.

Desde ese momento se empezaron a utilizar otras fuentes energéticas más intensivas (con un mayor valor de calentamiento), y el uso de la biomasa fue bajando hasta mínimos históricos que coincidieron con el uso masivo de los derivados del petróleo.

A pesar de ello, la biomasa aún continúa jugando un papel destacado como fuente energética en diferentes aplicaciones industriales y domésticas. Por otro lado, el carácter renovable y no contaminante que tiene y el papel que puede jugar en el momento de generar empleo y activar la economía de algunas zonas, hacen que la biomasa sea considerada una clara opción de futuro. (ENERGIA 2008, 5)

2.2.2. Análisis energético y ciclo de vida del carbono

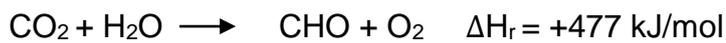
El sol es una estrella tipo G con un radio $R \cong 700.000$ km, una temperatura superficial $T \cong 6.000$ °C, una distancia media a nuestro planeta $d \cong 150 \times 10^6$ km y un espectro de densidad de energía radiada similar a la de un cuerpo negro. La potencia total por unidad de superficie normal fuera del límite de la atmosfera (k_i), cuando la tierra está a su distancia media, puede deducirse a partir de la constante radiactiva de Stefan – Boltzmann ($\sigma = 5,67 \times 10^{-11}$ kW/m²K⁴), la temperatura, el área emisora y la distancia.

La radiación solar que llega a la superficie terrestre es sensiblemente inferior a la recibida en el límite superior de la atmosfera (G_0), debido a efectos de reflexión y absorción: La radiación incidente al nivel del suelo es aproximadamente un 46%, con una densidad energética del 10% de la existente en el límite de la atmosfera, debido a la atenuación y la esfericidad de la tierra.

La mitad aproximadamente del total de energía absorbida en la superficie terrestre (23%) se emplea en los ciclos hídricos, el movimiento de los vientos, el oleaje y la fotosíntesis; el resto es energía re-emitida al espacio, lo que

representa un gran potencial recuperable como energía solar fotovoltaica, térmica y gradientes oceánicos.

El efecto de los cuantos de luz sobre las plantas verdes (fotosintéticas) es el origen de la fijación del carbono en la biosfera, y a su vez la energía de los seres vivos y de los combustibles fósiles. La cantidad total de biomasa fijada fotosintéticamente ($f=0,023\%$) se estima en:



Adicionalmente, la biomasa es una fuente renovable de materias primas y combustibles tradicionales (leña, residuos y productos derivados). Mención especial merecen los cultivos energéticos, como las plantas herbáceas, las oleaginosas (para biodiesel) o las algas (de cuyas proteínas pueden obtenerse hidrocarburos por pirolisis o digestión)

Es generalmente aceptado el hecho de que la combustión de biomasa no contribuye al aumento de la emisión de gases de efecto invernadero. Esto es debido a que la cantidad de CO_2 liberada durante el proceso termoquímico en el que se obtiene la energía es la misma que la ha absorbido la biomasa durante su fase de crecimiento gracias al proceso de la fotosíntesis.

La energía que contiene la biomasa es energía solar almacenada a través de la fotosíntesis, proceso por el cual algunos organismos vivos, como las plantas, utilizan esa energía para convertir los compuestos inorgánicos que absorben (CO_2 , agua y sales minerales) en compuestos orgánicos. (Sánchez 2017, 24-25)

2.2.3. Fuentes de biomasa para fines energéticos

Biomasa natural.

La biomasa natural, es la producida espontáneamente en las tierras no cultivadas (principalmente tierras forestales) y que el hombre ha utilizado tradicionalmente para satisfacer sus necesidades calóricas (leñas). Este tipo de biomasa no es la más adecuada para su aprovechamiento energético masivo, debido al riesgo de deforestación que conllevaría si no se toman las precauciones adecuadas.

La biomasa natural constituye la base del consumo energético de los pueblos en vías de desarrollo y a medida que aumenta la demografía y su demanda de energía, mayor es la presión que se ejerce sobre los ecosistemas, pudiendo llegar incluso a situaciones de desertización. (Sánchez 2017)

Biomasa residual.

La biomasa residual es la que se genera como consecuencia de cualquier proceso en que se consuma biomasa. Se producen en explotaciones agrícolas (poda de olivos, viñedos, árboles frutales y cosecha de cereales o maíz), forestales (limpieza, poda y corte de maderas y resinas) o ganaderas, así como los residuos de origen orgánico generados en las industrias y núcleos urbanos. Este tipo de biomasa requiere de un astillado empacado previo a su transporte que, unido a la estacionalidad, recolección y variación, aconseja disponer de centros de acopio de biomasa para centralizar su distribución.

Entre las ventajas que ofrece la biomasa residual para su uso energético destaca la reducción de la contaminación y el deterioro del medio ambiente, así como los riesgos de incendio, costes de producción reducidos, ya que

normalmente están cargados al producto principal, siendo el más importante el de recogida, reducción del espacio ocupado, los gastos de transporte son muy bajos. (Sánchez 2017)

Excedentes de cosechas agrícolas.

Según el INEI 2018, La producción de arroz cáscara ha sido de 2096748,8 de Ton en el 2017, en abril de 2018 registró un incremento de 379 mil 659 toneladas y se incrementó en 55,6% al compararlo con el volumen reportado en similar mes del año pasado; informó el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) en el Informe Técnico Perú: Panorama Económico Departamental, realizado con información suministrada por el Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI), Ministerio de Energía y Minas (MINEM), Superintendencia Nacional de Aduanas y de Administración Tributaria (SUNAT), entre otros.

Los excedentes de cosechas agrícolas siempre han estado seleccionados para fines alimenticios, por lo que los productos energéticos que se obtienen de ellos suelen resultar a un precio no competitivo con respecto a los combustibles que pretenden sustituir. Su estacionalidad depende de la actividad industrial. Destacan las astillas, cortezas o serrines de las industrias de primera y segunda transformación de la madera, huesos, cascaras, aceite de oliva o frutos secos. (Sánchez 2017)

2.2.4. Procesos de conversión de la biomasa

El proceso de conversión de la biomasa desde el punto de vista del aprovechamiento energético, la biomasa se caracteriza por tener un bajo contenido de carbono, un elevado contenido de oxígeno y compuestos volátiles. Estos compuestos volátiles (formados por cadenas largas del tipo

CnHm, y presencia de CO₂, CO e H₂) son los que concentran una gran parte del valor de calentamiento de la biomasa. El valor de calentamiento de la biomasa depende mucho del tipo de biomasa considerada y de su humedad. Así normalmente estos valores de calentamiento de la biomasa se pueden dar en base seca o en base húmeda.

En general se puede considerar que el valor de calentamiento de la biomasa puede oscilar entre los 12,6 – 14,6 MJ/kg para los residuos ligno - celulósicos, los 8,4 – 10,5 MJ/kg para los residuos urbanos y finalmente las 41,8 MJ/kg para los combustibles líquidos provenientes de cultivos energéticos. Estas características, juntamente con el bajo contenido de azufre de la biomasa, la convierten en un producto especialmente atractivo para ser aprovechado energéticamente.

Cabe destacar que, desde el punto de vista ambiental, el aprovechamiento energético de la biomasa no contribuye al aumento de los gases de efecto invernadero, dado que el balance de emisiones de CO₂ a la atmósfera es neutro. En efecto, el CO₂ generado en la combustión de la biomasa es reabsorbido mediante la fotosíntesis en el crecimiento de las plantas necesarias para su producción y, por lo tanto, no aumenta la cantidad de CO₂ presente en la atmósfera. Al contrario, en el caso de los combustibles fósiles, el carbono que se libera a la atmósfera es el que está fijo a la tierra desde hace millones de años. (Sánchez 2017)

Procesos termoquímicos (vía seca):

Son procesos de conversión a elevadas temperaturas que se aplica fundamentalmente a la biomasa seca, y en particular, a la paja o a la madera, así como a la biomasa de tipo residual. (Sánchez 2017, 28)

- **Combustión:**

Consiste en la descomposición térmica de la biomasa en presencia de oxígeno. En el proceso se libera agua, dióxido de carbono con el fin de obtener energía térmica, que puede ser utilizada para la calefacción doméstica o para la producción de calor industrial. Los hornos de combustión pueden ser de parrilla, rotatorios, inyección o lecho fluido.

Teniendo en cuenta las pérdidas de calor y la combustión incompleta en gases y cenizas, así como por radiación – convección, los rendimientos típicos alcanzan el 75-85%. (Sánchez 2017, 28)

- **Pirolisis:**

En la pirolisis es la degradación térmica de la biomasa en ausencia de oxígeno o que se lleva a cabo en una cantidad reducida del mismo. Durante el proceso se produce la ruptura por calor de las moléculas más grandes en otras de tamaño más pequeño, originando gases y un sólido carbonoso (char), cuyas cantidades y composición dependen de la biomasa original, el tiempo de residencia, la temperatura de pirolisis, la velocidad de calentamiento y el tipo de reactor a emplear. (Sánchez 2017, 28)

- **Gasificación:**

El proceso de gasificación se trata de un proceso termoquímico por el cual la biomasa es transformada en un combustible de bajo valor de calentamiento mediante la combinación de pirolisis y agentes gasificantes como el vapor de agua, oxígeno, dióxido de carbono o hidrógeno, los cuales deben estar presentes en la atmósfera en cantidades pequeñas para que no se produzca la combustión. (Sánchez 2017, 28)

2.2.5. Caracterización de la biomasa en el ámbito de la energía

La caracterización de la biomasa puede realizarse a varios niveles, en función del objetivo que se pretenda, siendo los más usuales el análisis elemental, el análisis de los compuestos orgánicos, el análisis inmediato y el valor de calentamiento, estos dos últimos utilizados principalmente con fines energéticos y sobre los que se hablara con más detalle. (Sánchez 2017, 30)

Análisis elemental:

El análisis elemental consiste en evaluar la proporción de los principales elementos que componen la biomasa que se quiere caracterizar, normalmente en base seca. Se determina el contenido en carbono, nitrógeno, azufre, hidrogeno y oxigeno mediante equipos automáticos, así como el contenido en cloro, fosforo y sodio. A partir del contenido de la biomasa se puede obtener por formulas empíricas una estimación del valor de calentamiento de la biomasa. (Sánchez 2017, 30)

Análisis de componentes orgánicos:

Consiste en la determinación del contenido en hidratos de carbono, lípidos y proteínas. Este tipo de análisis se suele referir siempre a materia seca. (Sánchez 2017, 30)

Análisis inmediato:

El análisis inmediato es el conjunto de ensayos mediante los cuales se determinan los porcentajes de humedad, materia volátil, carbono fijo y cenizas, que se sirven para realizar una caracterización inmediata del combustible. El contenido en humedad se suele expresar en base húmeda y los restantes en base seca. (Sánchez 2017, 30)

- **Contenido de humedad:**

El estudio para la generación de energía eléctrica mediante la gasificación se realiza calentando la muestra en estufa hasta obtener una masa constante. Se realiza a 105°C (+/- 2°C) en el caso de que no existan compuestos orgánicos que se volatilicen a dicha temperatura. Si existen dichos compuestos, se puede realizar en atmosfera de nitrógeno. (Sánchez 2017, 30)

- **Contenido en materias volátiles:**

El contenido en materias volátiles se determina sometiendo una muestra seca a una temperatura de 900 °C (+- 10°C), sin contacto con el ambiente, durante 7 minutos obteniendo la proporción que representa la disminución de la masa sobre la masa seca inicial. (Sánchez 2017, 30)

- **Contenido en cenizas:**

Se obtiene a partir de la masa de las cenizas obtenidas de una muestra de biomasa sometida a 550 °C (+/- 10°C) durante un tiempo variable. En una primera fase se sube la temperatura hasta los 250°C según una rampa de subida de 4,5-7,5 °C/min y llegado a ese punto se mantiene la temperatura durante 60 minutos para permitir que se eliminen los compuestos volátiles y, acto seguido, se eleva la temperatura a razón de 10°C/min durante 30 minutos, hasta conseguir los 550 °C, dejando que se complete el proceso durante un periodo de al menos 120 minutos. Si no se hubiese completado, se vuelve a introducir la muestra en el horno por periodos de 30 minutos hasta conseguir que la variación de la masa sea inferior a 0,5 mg. (Sánchez 2017, 31)

- **Carbono fijo:**

Es la fracción de carbono que queda después de eliminar la humedad y las materias volátiles, y se determina como diferencia entre la masa obtenida tras la eliminación de la humedad y las materias volátiles junto con la masa de las cenizas, refiriendo dicha diferencia al peso seco de la muestra y expresada en porcentaje. Es la fracción de los biocombustibles que produce las brasas en la combustión. (Sánchez 2017, 31)

Valor de calentamiento (Poder calorífico):

Se consideran dos conceptos: El valor de calentamiento superior (HHV) y el valor de calentamiento inferior (LHV). Ambos pueden referirse a la biomasa seca o la biomasa con una determinada humedad.

El valor de calentamiento superior (HHV), representa la energía total que se desprende en la combustión completa y a volumen constante de 1kg de biomasa. Se expresa en kJ/kg.

Existen fórmulas empíricas que se estima el HHV a partir del contenido en carbono [C], hidrogeno [H] y oxígeno [O].

Las condiciones normales en que se realiza la combustión son a presión constante, por lo que es normal que junto con los humos se vaya el agua producida en la combustión y la contenida en la biomasa, en forma de vapor, arrastrando con él la energía consumida en la vaporización del agua. Por este motivo resulta más útil, a efectos prácticos, conocer el valor de calentamiento inferior (LHV), que se obtiene de restar al HHV el calor latente de vaporización del agua. (Sánchez 2017, 31-32)

Para el caso de biocombustibles secos se puede utilizar la fórmula siguiente, en la que [H] se expresa en g/kg de biomasa:

$$\text{LHV} = (\text{HHV} - 540 ([\text{H}] \times 9)/1000) \times 4.187 \text{ (valores expresados en kJ/kg)}$$

La fórmula de Dulong modificada da una estimación del LHV a partir del análisis elemental:

$$\text{LHV (kJ/kg)} = [8.066 [\text{C}] + 33.910 ([\text{H}] - 1/8 [\text{O}]) + 2.222 [\text{S}] + 556 [\text{N}]] \times 4.187$$

Tabla 1: Valor de Calentamiento de combustibles

Biocombustible	HHV (MJ/kg), humedad = 0%	LHV a la humedad x (MJ/kg)			
		I	LHV	I	LHV
Paja de cereales	18,5	10%	15,2	20%	13,2
	18,5	30%	11,3	20%	13,2
Cascarilla de arroz	17,3	10%	12,6	15%	13,6

Fuente: IDEA, s.f. citado en Sánchez, (2017)

2.2.6. La Gasificación energética

Definición de Gasificación

Consiste en la quema de biomasa (fundamentalmente residuos foresto industriales) en presencia de oxígeno, en forma controlada, de manera de producir un gas combustible denominado “gas pobre” por su bajo contenido energético.

La gasificación se realiza en un recipiente cerrado, conocido por gasógeno, en el cual se introduce el combustible y una cantidad de aire menor a la que se requeriría para su combustión completa.

El gas pobre obtenido puede quemarse luego en un quemador para obtener energía térmica, en una caldera para producir vapor, o bien ser enfriado y acondicionado para su uso en un motor de combustión interna que produzca, a su vez, energía mecánica. (ENERGIA 2008, 7)

De entre todas las opciones que existen para gasificar biomasa, una de las tecnológicamente más avanzadas consiste en la gasificación en oxígeno puro, vapor de agua o en CO₂. El producto generado en estas condiciones se denomina gas de síntesis o syngas. Al no estar diluido en nitrógeno, su valor de calentamiento es más elevado (12 – 20 MJ/Nm³) lo que facilita su uso en aplicaciones de alta eficiencia (turbinas de gas o motores de combustión interna).

Ventajas y desventajas de la gasificación

Las ventajas y desventajas de acuerdo con el estudio realizado para generar energía eléctrica mediante la gasificación de biomasa de cascarilla de arroz sustentan que la utilización del proceso de gasificación para la obtención de energía mediante producción de syngas presenta las siguientes: (Sánchez 2017, 37-38)

Ventajas:

- Balance de emisiones de CO₂ nulo, esto es debido a que durante el proceso de combustión del gas de síntesis se emite una cantidad de dióxido de carbono equivalente a la absorbida por la biomasa durante el proceso de la fotosíntesis.
- Plantas de pequeño tamaño (<5 MW) técnica y económicamente viables, con lo que se favorece la generación distribuida y la consiguiente reducción de las pérdidas por transporte de electricidad.
- Disponibilidad de la biomasa in situ. La ubicación de las plantas de generación junto a las fuentes de biomasa repercute en un ahorro en los costes de transporte.

- Aprovechamiento de los residuos. Muchas de las plantas llevan a cabo el proceso de gasificación a partir de la biomasa producida como residuos de un proceso industrial o agrícola, con lo que se facilita su eliminación y, además, contribuye a minimizar el impacto medioambiental.
- Costes de la biomasa mínimos, especialmente por tratarse de un residuo, lo que supone la revalorización energética de un combustible a muy bajo precio.
- Versatilidad del gas, ya que puede alimentar turbinas de vapor, motores de combustión interna o calderas.
- Operación y mantenimiento sencillos.

Desventajas:

- Es necesario adecuar el gasificador al combustible a emplear para lograr optimizar su funcionamiento.
- El gas de síntesis contiene alquitranes y restos en forma de cenizas, lo que implica un lavado y acondicionamiento previos.

Proceso de gasificación de biomasa

La gasificación desarrolla una serie de etapas, cada una de las cuales tiene lugar en un rango determinado de temperaturas.

- **Etapas de secado (entre 70 – 150 °C)**

La etapa de secado en el sistema de gasificación nos indica que el aporte de agua en forma de humedad implica un elevado consumo de energía que se emplea en su calentamiento hasta los 100°C, su evaporación y en el calentamiento del vapor hasta la temperatura de proceso. Para mantener dicha temperatura, este consumo se debe compensar con un aporte energético que proviene en su mayor parte de la etapa de

combustión. Además, el agua liberada en esta etapa actúa como agente gasificante en la etapa de gasificación. (Sánchez 2017, 39)

- **Etapa pirolítica (entre 250 – 600 °C)**

Proceso similar a la gasificación (a la cual en realidad incluye) por el cual se realiza una oxigenación parcial y controlada de la biomasa, para obtener como producto una combinación variable de combustibles sólidos (carbón vegetal), líquidos (efluentes pireleñosos) y gaseosos (gas pobre). Generalmente, el producto principal de la pirólisis es el carbón vegetal, considerándose a los líquidos y gases como subproductos del proceso.

La pirólisis con aprovechamiento pleno de subproductos tuvo su gran auge antes de la difusión masiva del petróleo, ya que constituía la única fuente de ciertas sustancias (ácido acético, metanol, etc.) que luego se produjeron por la vía petroquímica. Hoy en día, sólo la producción de carbón vegetal reviste importancia cuantitativa.

El carbón vegetal como combustible sólido presenta la ventaja frente a la biomasa que le dio origen, de tener un poder calórico mayor o, lo que es lo mismo, un peso menor para igual cantidad de energía, lo que permite un transporte más fácil. No obstante, debe hacerse notar que la carbonización representa una pérdida muy importante de la energía presente en la materia prima, ya que en el proceso consume gran cantidad de ella. (ENERGIA 2008)

En la etapa pirolítica para el estudio gasificación de biomasa para la generación de energía eléctrica, tiene lugar la descomposición térmica de los componentes de la biomasa. Como resultado, la biomasa original se transforma en un sólido carbonizado, a la vez que se liberan al medio una

mezcla de gases (CO_2 , CO , H_2 o CH_4). Las reacciones de pirolisis son más rápidas que las de combustión y gasificación, por lo que estas últimas tienen lugar sobre los productos degradados (vapores, gases y sólido carbonizado) y no sobre la biomasa en sí. (Sánchez 2017, 39)

- **Etapas de combustión (> 400°C).**

Durante la gasificación de carbonizados se llevan a cabo dos tipos de reacciones: reacciones heterogéneas en las cuales el medio de reacción y los gases producidos reaccionan con el carbonizado (producto sólido), estas también se conocen como reacciones primarias; y reacciones homogéneas en la fase gaseosa en las cuales los productos de las reacciones primarias reaccionan entre sí y con el agente de reacción. La composición del gas obtenido depende del nivel de avance de todas estas reacciones. Las principales reacciones que describen el proceso de gasificación de carbonizados junto con las entalpías de reacción. (Rincon, S., Gomez, A. y Klose, W. 2011, 16)

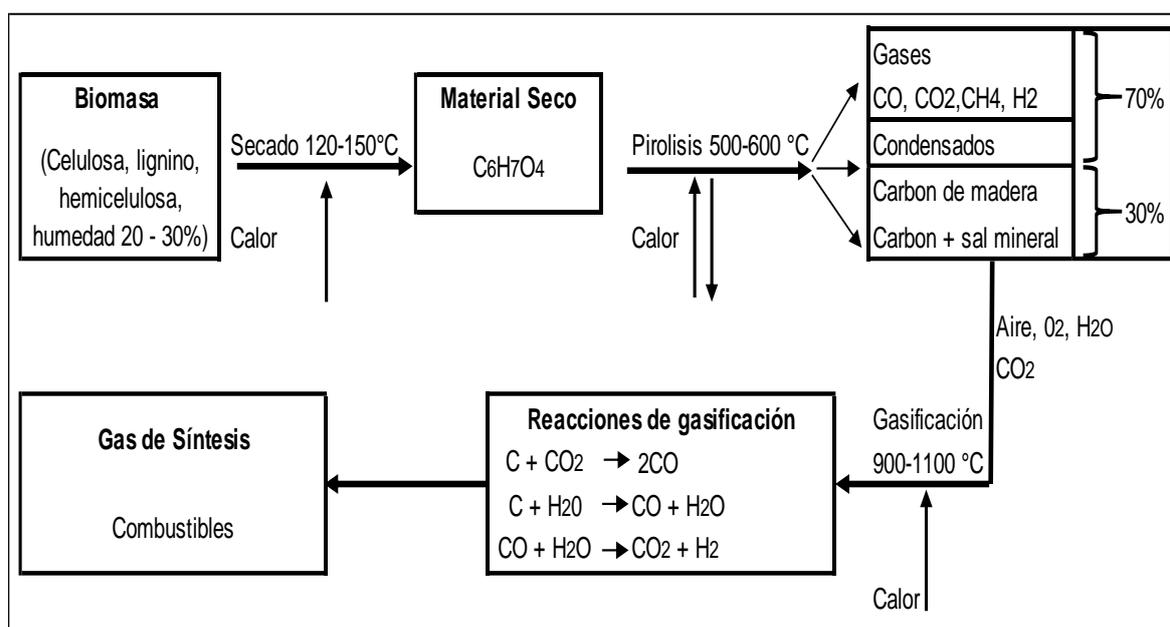
Esta etapa se caracteriza por ser muy exotérmica, quemando definidos el equilibrio energético y la temperatura del proceso de gasificación. El grado de combustión depende principalmente de la relación aire/combustible incorporada al sistema. Cuanto mayor sea esta relación, mayor será la temperatura del proceso, pero mayor será también el grado de oxidación de los gases, influyendo de manera negativa en su valor de calentamiento y en el rendimiento del proceso. El aporte de oxígeno suele estar entre el 25 y el 35% del estequiométrico, en función del grado de humedad. (Sánchez 2017, 39)

- **Etapa de gasificación (> 800°C)**

Para la etapa de gasificación el agente de reacción utilizado en el proceso define la calidad del gas obtenido y el tiempo requerido para la conversión final. Como agentes de reacción se pueden utilizar O₂ o aire, H₂, CO₂ y H₂O. La configuración más utilizada es la gasificación con aire; el uso de este gas tiene la ventaja de su amplia disponibilidad y bajo costo y que la energía requerida el proceso se obtiene por medio de la combustión parcial del carbonizado. (Rincon, S., Gomez, A. y Klose, W. 2011, 18)

La etapa de gasificación se produce la oxidación parcial del sustrato de gasificación por parte de los agentes gasificantes (vapor de agua y CO₂). Esta etapa es endotérmica y tiene como resultado la formación de gases combustibles (H₂ y CO). Si la etapa de gasificación no es demasiado intensa, el gas producto estará acompañado de partículas y compuestos volátiles que pueden condensarse formando alquitranes. Durante la etapa de gasificación tienen lugar otras reacciones químicas que condicionan la composición final del gas, y que se detallan a continuación. (Sánchez 2017, 40)

Figura 2: Sistema de gasificación de biomasa



Fuente: (IDAE 2007)

Algunas de las reacciones importantes que tienen lugar durante el proceso de gasificación son:

Reacciones de pirolisis.

La fracción orgánica de biomasa se transforma en un sólido carbonizado, una fracción volátil (agua y compuestos orgánicos de distinto peso molecular) y una mezcla de gases. Los vapores sufren reacciones secundarias y se recombinan formando alquitranes, vapor de agua y gases permanentes. (Sánchez 2017)

Reacciones de combustión:

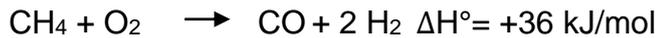
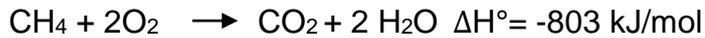
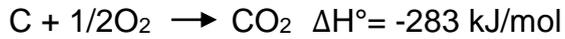
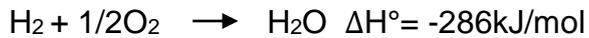
Las reacciones de combustión según (Sánchez 2017) la combustión completa del carbono: $C + O_2 \rightarrow CO_2 \quad \Delta H^\circ = -394 \text{ kJ/mol}$.

Combustión completa del hidrogeno: $2H + 1/2O_2 \rightarrow H_2O \quad \Delta H^\circ = -286 \text{ kJ/mol}$

Combustión parcial del carbono: $C + 1/2 O_2 \rightarrow CO \quad \Delta H^\circ = -111 \text{ kJ/mol}$

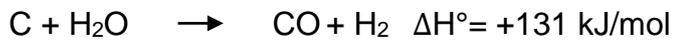
Combustión de los productos de gasificación:

Para el estudio presentado por (Sánchez 2017) en la combustión de productos gasificantes se tiene:



Reacciones de gasificación y reformado

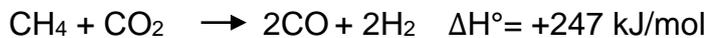
Gasificación húmeda de la fracción carbonizada:



Gasificación seca de la fracción carbonizada:



Reforma (oxidación por parte del vapor de agua y el CO_2) del metano:



El gas de síntesis

Según la Secretaría de Energía Renovable de la República Argentina sobre el gas de síntesis afirma: La gasificación se realiza en un recipiente cerrado, conocido por gasógeno, en el cual se introduce el combustible y una cantidad de aire a la que se requeriría para su combustión completa.

El gas pobre obtenido puede quemarse luego en un quemador para obtener energía térmica, en una caldera para producir vapor, o bien ser enfriado y acondicionado para su uso en un motor de combustión interna produzca, a su vez, energía mecánica. (ENERGIA 2008, 8)

Cuando el carbón, la biomasa y otro combustible sólido se someten a un proceso de gasificación se obtiene un combustible denominado gas de síntesis o syngas, formado mayoritariamente por CO, H₂, CH₄, H₂O, N₂ y CO₂. La composición del gas dependerá del tipo de reactor (lecho móvil en co-corriente o contra-corriente, lecho fluidizado burbujeante o circulante, lecho arrastrado), de las condiciones de operación (presión y temperatura) y fundamentalmente de la naturaleza del agente gasificante (aire, oxígeno, vapor, hidrógeno o alguna de sus mezclas). El rendimiento del proceso de gasificación también se ve modificado por estos factores, en un grado de 70-80%. (Sánchez 2017)

Tabla 2: Composición y uso del gas de síntesis en función al agente gasificante

Agente gasificante	Poder calorífico (MJ/Nm ³)	Composición del gas obtenido (% en volumen)						Uso final del gas
		H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	N ₂	C ₂	
Aire	< 6	16	20	12	2	50	-	Combustible
Oxígeno	10 - 20	32	48	15	2	3	-	Combustible Gas de síntesis
Vapor de agua	10 - 20	50	20	22	6	-	2	Combustible Gas de síntesis
Hidrógeno	> 30							Sustituto del gas natural

Fuente: Sánchez, (2017)

De acuerdo a la tabla, las condiciones de operación y la gasificación van a delimitar el uso final del gas: generación de calor por combustión del gas pobre en una caldera o en un motor de gas, generación de calor y electricidad por combustión en una turbina de gas y en una turbina de vapor en el proceso denominado gasificación en ciclo combinado.

En lo que respecta al acondicionamiento del syngas, excepto en el caso en el que el gas se vaya a alimentar a una caldera para producir calor, el resto de aplicaciones exige una limpieza mas o menos exhaustiva. La limpieza de los gases se ha realizado tradicionalmente por via humeda, lo que implica el enfriamiento de los gases a temperatura ambiente o inferior, aunque la limpieza de los gases en caliente ($T > 300\text{ }^{\circ}\text{C}$) puede suponer un aumento de la eficiencia global del proceso de gasificacion integrada en ciclo combinado desde el punto de vista energetico, unido a una disminucion en los costes. (Sánchez 2017, 42)

Reactores operacionales

Los gasificadores a parte de la procedencia y tipo de material combustible empleado el proceso de gasificación, existe una serie de variables que pueden ser modificadas para determinar de una forma más predecible las características de los productos obtenidos. (CONAMA 2014)

La gasificación de biomasa se puede realizar en distintos sistemas de reacción. El diseño del reactor condiciona distintos aspectos del proceso incluyendo la naturaleza del sustrato (biomasa, carbón mineral, carbón vegetal, residuos orgánicos), las necesidades de acondicionamiento (granulometría, humedad, propiedades mecánicas), la capacidad del sistema, la composición y el valor de calentamiento del gas producto, la concentración de elementos contaminantes (alquitranes, partículas), así como los costos de inversión, de operación y mantenimiento. (Sánchez 2017)

De acuerdo al estudio propuesto se estudiará al lecho móvil en corrientes paralelas (Down draft).

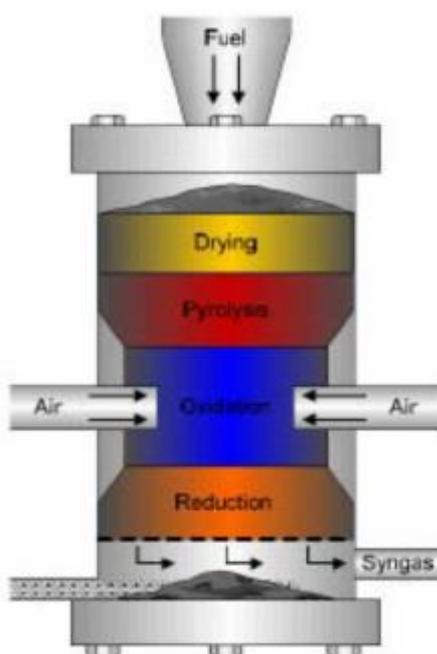
- **Lecho móvil en corrientes paralelas (Down Draft)**

También conocido como gasificador de corriente descendente o tiro invertido, en los cuales el aire de primera gasificación se introduce en la zona de oxidación (combustión) del gasificador o por encima de ésta. El gas pobre sale por el fondo del gasificador de modo que el combustible y el gas se mueven en la misma dirección.

Se caracterizan por generar un gas relativamente limpio de alquitranes y con una conversión de carbono elevada. La temperatura de salida es alta, debido a que el gas atraviesa la zona de oxidación antes de salir del reactor. Sin embargo, su capacidad específica es baja y su potencial de escalado, muy limitado. En estos gasificadores, sólido y gas se mueven en el mismo sentido, normalmente descendente.

Este gasificador es de fácil construcción y operación. La tendencia actual es a unir las zonas de pirólisis y oxidación en una sola, de forma que los productos de pirólisis se forman y se queman simultáneamente, por lo que en una zona inferior se produce la reducción de forma análoga al Downdraft tradicional. La principal ventaja de este tipo de gasificador es la de producir un gas relativamente limpio de alquitranes, aunque a una temperatura más alta que mediante el Updraft. Sin embargo, no es muy apto para trabajar con sólidos de humedad elevada, y la experiencia que se tiene de estos tipos de gasificadores acoplados a plantas de cierta potencia es escasa. (CONAMA 2014)

Figura 3: Gasificador Down Draft



Fuente: Gasificador Downdraft (Bull, D., 2008 citado en CONAMA, 2014)

2.3. Definición conceptual de la terminología empleada

2.3.1. Agente gasificante

La etapa de combustión requiere de la intervención de un agente oxidante para llevarse a cabo. En el panorama actual, se están utilizando cuatro tipos de agentes para este propósito: aire, oxígeno, vapor de agua e hidrógeno. El aire es el agente gasificante de más práctica y fácil utilización.

2.3.2. Alquitrane

Son una mezcla compleja de compuestos orgánicos, es muy difícil hablar de una composición o fórmula específicas del alquitrán, ya que esta varía dependiendo del tamaño de cadena de carbonos, temperatura, el proceso de destilación utilizados y el origen del mismo.

2.3.3. Ambiente

Atmósfera o aire que se respira o rodea a los seres vivos.

2.3.4. Biomasa

Conjunto de materia orgánica de origen vegetal, animal o resultado de la transformación natural o artificial de la misma, que se puede emplear como fuente directa o indirecta de energía.

2.3.5. Cascarilla de arroz

La cascarilla de arroz es un subproducto de la industria molinera, que resulta abundantemente en las zonas arroceras de muchos países.

2.3.6. Energía eléctrica

Forma de energía que resulta de la existencia de una diferencia de potencial entre dos puntos, lo que permite establecer una corriente eléctrica entre ambos cuando se los pone en contacto por medio de un conductor eléctrico.

2.3.7. Energía sostenible

Se puede definir como aquella energía capaz de satisfacer las necesidades presentes sin comprometer los recursos y capacidades de las futuras generaciones. La energía sostenible está compuesta de energías renovables y alternativas, además de la energía de fusión.

2.3.8. Gasificación

Es un proceso termoquímico en el que un sustrato carbonoso (carbón, biomasa, plástico) es transformado en un gas combustible mediante una serie de reacciones que ocurren en presencia de un agente gasificante (aire, oxígeno, vapor de agua o hidrógeno).

CAPITULO III: MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo y Diseño de investigación

La presente investigación es de enfoque cuantitativo, para determinar como la generación de energía eléctrica se desarrolla mediante la gasificación de la cascarilla de arroz, se determinó el tipo de investigación según (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014) de diseño no experimental, transaccional de correlación causal.

3.2. Población y Muestra

3.2.1. Población

Una población es el conjunto de todos los casos que concuerdan con una serie de especificaciones según Lepkowski, 2008 citado en (Hernandez, Fernandez y Baptista 2015).

“Las poblaciones deben situarse claramente por sus características de contenido, lugar y tiempo”. (Hernandez, Fernandez y Baptista 2015, 174)

Según lo descrito se considera como población a todos los molinos de arroz ubicados en la región de Lambayeque.

3.2.2. Muestra

La ventaja de una muestra no probabilística desde la visión cuantitativa es su utilidad para determinados diseños de estudio que requieren no tanto una “representatividad” de elementos de una población, sino una cuidadosa y controlada elección de casos con ciertas características especificadas previamente en el planteamiento del problema. (Hernandez, Fernandez y Baptista 2015, 190)

De acuerdo a la población establecida para la presente investigación, se toma como muestra al Molino los Ángeles.

Tabla 3: Producción de Cascarilla de arroz Molino los Ángeles

Produccion de Cascarilla de arroz - Molino los Ángeles		
	Producción/Día	Cascarilla de arroz
Proceso de pilado de arroz	140 Ton	35 Ton
Venta de cascarilla de arroz		3 Ton
Consumo de la Piladora de arroz		4 Ton

Fuente: Molino los Ángeles, 2018

Para el presente estudio se utilizará la cascarilla disponible para el proceso de gasificación para la generación de energía eléctrica.

3.3. Hipótesis

Mediante la propuesta del uso de un Gasificador que emplea como combustible cascarilla de arroz, se obtendrá un gas combustible, que a través de diversos procesos será aprovechado para la generación de energía eléctrica y así poder suministrar la energía demandada por el Molino Los Ángeles.

3.4. Variables – Operacionalización

Las variables objeto de estudio son las siguientes:

Variable Independiente: Sistema de gasificación

Variable Dependiente: Generación de energía eléctrica

A más biomasa en el gasificador mayor potencia en el generador de acuerdo al estudio propuesto en la presente investigación.

La Operacionalización de las variables se presenta en la tabla matriz de consistencia.

Tabla 4: Matriz de Consistencia

Generación de energía eléctrica mediante gasificación de la cascarilla de arroz para un Molino en Lambayeque								
Formulación del problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Dimensiones	Indicadores	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	Metodología	Población y muestra
Pregunta general	Objetivo general	Hipótesis General	Generación de energía eléctrica	Selección del sistema de generación de energía eléctrica	kWh	Fuentes Primarias: Información proporcionada por la Empresa Molino los Ángeles. Fuentes Secundarias: Libros, artículos científicos. Biblioteca de la Universidad Nacional Pedro Ruíz Gallo. Investigaciones o tesis y otros documentos.	Inductivo - Para analizar la presente investigación y aportar evidencia respecto de los lineamientos de la investigación según el enfoque cuantitativo de las variables en estudio, se utilizó según (Hernandez, Fernandez, & Baptista, 2014), el diseño no experimental, transaccional de correlación causal. (p. 154)	Molinos de la región Lambayeque - Molino los Ángeles
¿Cómo generar energía eléctrica a partir de la gasificación de la cascarilla de arroz para un molino en Lambayeque?	Proponer un sistema de generación de energía eléctrica mediante la gasificación de la cascarilla de arroz para un Molino en Lambayeque.	Generación de Energía Eléctrica mediante gasificación de la cascarilla de arroz para un molino en Lambayeque		Viabilidad técnica del sistema de generación de energía eléctrica	kW/h			
				Viabilidad económica del sistema de generación de energía eléctrica	\$ (Dolares)			
Preguntas auxiliares	Objetivos específicos	Hipótesis Específicas	Gasificación mediante la cascarilla de arroz	Eficiencia	Ton cascarilla arroz / kW			
1. ¿Cómo diseñar un Sistema de generación eléctrica mediante la gasificación de la cascarilla de arroz para un Molino de Lambayeque?	1. Diseño del Sistema de generación eléctrica mediante la gasificación de la cascarilla de arroz para un Molino de Lambayeque.	1. El diseño del sistema de energía eléctrica genera mediante gasificación de la cascarilla de arroz para un molino en Lambayeque						
2. ¿Cómo la viabilidad Técnica del Sistema de generación eléctrica mediante la gasificación de la cascarilla de arroz para un Molino de Lambayeque es factible?	2. Viabilidad Técnica del Sistema de generación eléctrica mediante la gasificación de la cascarilla de arroz para un Molino de Lambayeque.	2. La viabilidad de la energía eléctrica permite la generación mediante gasificación de la cascarilla de arroz para un molino en Lambayeque						
3. ¿Cómo la Viabilidad económica financiera del Sistema de generación eléctrica mediante la gasificación de la cascarilla de arroz para un Molino de Lambayeque es positiva > 1?	3. Viabilidad económica financiera del Sistema de generación eléctrica mediante la gasificación de la cascarilla de arroz para un Molino de Lambayeque.	3. Existe viabilidad económica positiva en la generación de energía eléctrica se genera mediante gasificación de la cascarilla de arroz para un molino en Lambayeque		Rendimiento				

Fuente: Elaboración propia del Investigador

3.5. Métodos y Técnicas de investigación

3.5.1. Fuentes primarias

Información proporcionada por la jefatura y personal de producción, mantenimiento, personal del área de ventas de la empresa Molino los Ángeles.

Base de datos del sistema de compras del Molino de los Ángeles.

Visitas al almacén

3.5.2. Fuentes secundarias

Libros, artículos de gestión de inventarios.

Biblioteca de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Investigaciones o tesis y otros documentos para gasificadores de biomasa.

CAPITULO IV: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1. Diseño de la Planta de Gasificación

4.1.1. Cascarilla de arroz como biocombustible

La cáscara de arroz, un residuo de la industrialización del cereal que hasta ahora no era aprovechado, será quemada con fines energéticos.

De esta forma, no sólo se generará energía eléctrica para abastecer a la red del país, sino que a la vez se reducirán las emisiones de metano que se producen cuando estos desechos quedan en canteras a cielo abierto. (Psetizki 2009)

La cascarilla de arroz es la corteza dura que recubre el grano de arroz, y constituye aproximadamente el 25% del volumen de arroz que es procesado. (...) La cascarilla de arroz tiene forma de canoa, una superficie rugosa y un color amarillento. Sus dimensiones dependen de la variedad obtenida, aunque el tamaño típico suele ser de 8-10 mm de longitud y 1-2 mm de ancho. De acuerdo con su tamaño, pesa entre 2,5-4,8 mg. En lo que respecta a la densidad, y de acuerdo con los residuos agrícolas, se distinguen tres tipos: densidad a granel (masa de cascarilla suelta contenida en un metro cubico de volumen; su valor se encuentra en 100 kg/m^3 aunque si es sometida a procesos de compactación y molienda, su valor puede situarse en torno a los $180\text{-}250 \text{ kg/m}^3$, densidad aparente (cociente entre la masa y el volumen de una sola cascarilla; es igual a 115 kg/m^3) y densidad especifica o real (diferencia entre la densidad aparente y la densidad de los poros que forman la cascarilla; equivale a 1.570 kg/m^3). El grado de porosidad (relación entre el

volumen de aire en la cascarilla y el volumen de aire en los poros) se encuentra en torno al 92,7% en volumen, mientras que la conductividad térmica se encuentra en 0,036 W/m*K, lo que denota su buen uso en la fabricación de materiales aislantes. (Sánchez 2017)

Se suma el hecho de que en la zona hay varios molinos arroceros, que también se enfrentaban al problema de qué hacer con la cáscara de arroz.

En el proceso de producción del arroz, la cáscara generada en los molinos se deposita en canteras. Muchas veces estos residuos se queman, con el consiguiente impacto en la calidad del aire.

Cuando no se queman, se acumulan en pilas donde se fermentan y se descomponen lentamente, produciendo emisiones de metano a la atmósfera.

Ahora, la quema de la cáscara para producir energía evitará la contaminación.

La cascarilla de arroz es un desecho agro industrial que presenta altos volúmenes de producción en las zonas próximas a la siembra y posterior procesamiento. Debido a su alto contenido en sílice, se puede utilizar para la obtención de silicatos ya que, normalmente, la cascarilla se incinera con el objetivo de reducir su volumen, generando humos contaminantes. Otras aplicaciones que tiene la cascarilla de arroz son según (Sánchez 2017, 64):

- Uso como combustible en procesos de generación de energía eléctrica y térmica.
- Procesos de combustión para su uso como sustrato y cenizas en cultivos.
- Compostaje en estaciones depuradoras de aguas residuales (EDARs), lodos de depuración o purines.

- Producción de tableros, cerámicas, cemento y materiales aislantes destinados a su uso en la construcción.

Composición de la cascarilla de arroz.

La composición inmediata de la cascarilla de arroz se basa en un análisis del contenido en carbono fijo, materia volátil, cenizas y humedad. Los volátiles tienen un papel fundamental durante la ignición en las etapas iniciales de la combustión de la biomasa. El contenido en humedad de la cascarilla de arroz después del proceso de descascarillado varía entre un 5% y un 40%, y se define como la relación de la masa de agua contenida por kilogramo de materia seca. Luego de estar expuesta a la intemperie, en época no lluviosa, la humedad promedio de la cascarilla está en torno a un 8-15%.

Para la mayoría de los procesos de conversión de energía es imprescindible que la biomasa tenga un contenido en humedad inferior al 30%. Muchas veces, los residuos salen del proceso productivo con un contenido en humedad muy superior, que obliga a implementar operaciones de acondicionamiento previo. (Sánchez 2017)

Figura 4: Aspecto y forma comunes de la cascarilla de arroz.



Fuente: Molino Los Ángeles 2018

Tabla 5: Propiedades fisicoquímicas de la cascarilla de arroz en función del grado de humedad.

Grado de humedad (%)	Composición inmediata (%)							Composición elemental (%)					LHV (MJ/kg)
	C	H	O	N	S	Cenizas	Total (%)	Materia volátil	Carbono fijo	Cenizas	Humedad	Total (%)	
8.60	42.5	6	36.2	0.21	0.49	14.6	100	60.2	13.6	17.6	8.6	100	14.58
8.90	39.1	5.2	37.2	0.27	0.43	17.8	100	58.8	14.5	17.8	8.9	100	14.09
9.40	37.4	3.7	38.5	0.32	0.38	19.7	100	55.7	15.2	19.7	9.4	100	13.34
10.00	36.8	2.9	39.1	0.4	0.3	20.5	100	52.9	15.7	21.4	10	100	12.54
20.00	21.2	1.9	50.4	0.52	0.08	25.9	100	37.2	16.9	25.9	20	100	7.07
30.00	12.6	0.5	57.3	0.8	-	28.8	100	22.9	18.3	28.8	30	100	4.36

Fuente: Sánchez, (2017)

La composición elemental de la cascarilla de arroz se basa en un análisis del contenido en carbono [C], hidrógeno [H], oxígeno [O], azufre [S] o nitrógeno [N]. Es la característica técnica más importante del combustible y constituye la base de la obtención del volumen necesario de gases o aire, condiciones de presión y temperatura o las entalpías del proceso. El porcentaje de cenizas indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de biomasa. En los procesos que incluyen combustión de biomasa es importante conocer el porcentaje de ceniza y su composición, pues en algunos casos puede ser empleada como aditivo en mezclas o en la fabricación de filtros de carbón activo.

El valor de calentamiento mide directamente la cantidad de energía por unidad de masa disponible en el combustible, y está directamente relacionado con su contenido en humedad. Un elevado porcentaje de humedad reduce la eficiencia del proceso de combustión debido a que una gran parte del calor liberado se usa para evaporar el agua y no en la descomposición química de la biomasa. (Sánchez 2017, 64-65)

4.1.2. Efectos del alto contenido en materia volátil sobre el proceso de combustión de la cascarilla de arroz.

En la Revista Tecnológica ESPOL informa que al utilizar residuos de actividades agrícolas como la cascarilla de arroz para su combustión, significa un reciclaje y disminución de este tipo de residuo proveniente de las labores del pilado. Es decir, se cumple con las labores de canalizar estos excedentes agrícolas alimentarios, permitiendo un correcto aprovechamiento, permite la disminución de la dependencia del abastecimiento de combustibles. (Urquiza, J., Acero, H. y Rodríguez, J. 2015, 4)

En cualquiera de las formas en que se encuentran los residuos agrícolas, se requieren unos conocimientos previos de los mecanismos de combustión como la alta eficiencia del proceso, el diseño y operación del sistema efectivo. En dicho proceso, toda partícula de biomasa está sometida a diferentes etapas interrelacionadas entre sí, las cuales son: calentamiento, secado, desvolatilización y combustión de los volátiles y el char. Se necesita, además, conocer las características y parámetros más importantes del proceso como la temperatura y composición de los productos de desvolatilización y combustión del char o la influencia del secado, de modo que en el intervalo de 200 °C a 300 °C las partículas sufren una considerable pérdida en masa correspondiente a la liberación y combustión de la materia volátil. En el intervalo de 300 °C a 550 °C se produce la combustión del char sin que exista pérdida de masa alguna en la biomasa. (Sánchez 2017, 66)

En la siguiente tabla se muestra el efecto de la temperatura sobre la composición en materia volátil de la cascarilla de arroz.

Tabla 6: Composición en materia volátil

Temperatura °C	Materia volátil (Composición en %)			
	H2	CO	CO2	CH4
400	1	38	47	14
500	4	33	46	17
600	13	30	36	21
700	20	28	28	24

Fuente: Sanchez, (2017)

Se observa, por tanto, como durante el proceso de desvolatilización las partículas están sometidas a la descomposición térmica con la consiguiente liberación de los compuestos volátiles y formación del char y alquitranes. La cantidad de estos compuestos depende de su composición y de las condiciones de operación. Con el incremento de temperatura, el contenido en CO₂ disminuye mientras que el contenido en H₂, CO y CH₄ aumenta. (Sánchez 2017)

Se conoce que el valor de calentamiento de la cascarilla de arroz es superior a 3 veces la del diesel por lo que se requiere el triple de cascarilla que de diesel para obtener la misma cantidad de energía. (Urquiza, J., Acero, H. y Rodríguez, J. 2015, 3)

Para obtener combustibles a partir de biomasa, se realizarán una serie de transformaciones físicas y químicas:

Fragmentación. Su objetivo es aumentar la superficie específica, lo que facilita su ignición y combustión, y se consigue un tamaño más homogéneo.

Secado. Su objetivo es incrementar el valor de calentamiento del combustible. Es especialmente utilizado en la obtención utilizado en la obtención de pellets y briquetas.

Compactación. Sirve para incrementar la densidad del combustible, y reducir los gastos de transporte y almacenamiento.

Las transformaciones químicas dependen de la materia prima empleada y del combustible que se desea obtener. (Sánchez 2017, 66)

4.1.3. Ubicación del Molino los Ángeles

Molino los Ángeles

Para (MolinoLosÁngeles 2018) este se fundó el año 1995 en Lambayeque, Perú con el objetivo de mejorar los estándares de calidad y consumo de arroz en las familias peruanas. Con el tiempo se adecuó a las nuevas reglas de libre mercado dando siempre mayor prioridad a la calidad de nuestros servicios, filosofía que conservamos para servir mejor al productor, comerciante y consumidor final.

Molinos los Ángeles cuenta con una planta de 22500 m² ubicado en la Panamericana Norte km. 778 Carretera a Lambayeque.

Servicio de Pilado

Recepción: La recepción y pesado del arroz en cascara ingresante al molino, se informa correctamente al agricultor del estado de su arroz, realizan descascarado del arroz con personal especializado y se planifica la secada y el turno de pilado del arroz.

Secado: El secado de arroz en cascara para lotes mayores de 150 sacos se puede dar en proceso de máquinas secadoras el cual es recomendable porque reduce el quebrado de lote, también hay secado en tendido.

Pilado: Es el proceso de descascarado, pulimento, clasificación, selección y envasado el cual se hace con mucho profesionalismo para asegurar mejores calidades en los parámetros finales.

Almacenaje: Los sacos pilados se almacenan en un ambiente apropiado con limpieza y orden, haciéndose inventarios de arroz y subproductos constantemente, hay también control de plaga

4.1.4. Cálculo de materia y energía del Sistema de Gasificación

Gasificador Down Draft o Flujo Concurrente

El sistema propuesto utilizará la cantidad de Biomasa para el gasificador de 6307,2 Tn/año, representa un caudal biomasa = 0,28 kg/s, para generar un valor de calentamiento Inferior (LHV) al 10% humedad (MJ/kg) = 12,54 MJ/kg. De acuerdo al estudio propuesto la potencia térmica de la cascarilla de arroz (P_{casc}) se calcula multiplicando el caudal de biomasa por el LHV teniendo en cuenta que se ha reducido el contenido en humedad de acuerdo a la biomasa procedente del Molino los Ángeles, de modo que:

$$P_{casc} \text{ (MW)} = \text{Biomasa residual (kg/s)} \cdot \text{LHV}_h \text{ al 10\% humedad (MJ/kg)}$$

$$P_{casc} \text{ (MW)} = 0,28 \text{ Kg/s} * 12,54 \text{ MJ/kg}$$

$$P \text{ (MW)} = 3,51 \text{ MW}$$

Tabla 7: Caudal y Potencia de biomasa

Caudal de biomasa disponible (kg/s)	0.28
Potencia térmica que aporta la cascarilla (MW)	3.51

Fuente: Elaborado por el Investigador

Se determina la cantidad de oxígeno necesario para la combustión completa en el gasificador, se considera para determinar este indicador de acuerdo con (Sánchez 2017) la prueba en 100 kg de cascarilla de arroz con un contenido de humedad al 10% obteniéndose los resultados mostrados en la siguiente tabla.

Tabla 8: Contenido de componentes en Moles de compuestos

Componente	Porcentaje en masa, m(%)	Masa molar, Mm (kg/kmol)	Cantidad de sustancia por cada 100 kg de biomasa, n=m/mm (kmol/100 kg biomasa)	Productos de la combustión completa	Fracción de O que se consume en la combustión completa	Moles estequiométricos de O consumidos en la combustión completa, $n_{eO} = n \cdot Y$ (kmol/100 kg biomasa)
C	36.8	12	3.067	CO ₂	2	6.134
H	2.9	1	2.9	H ₂ O	0.5	1.45
O	39.1	16	2.444	-	-1	-2.444
N	0.4	14	0.03	N ₂	0	0
S	0.3	32	0.0094	SO ₂	2	0.0188
H ₂ O	10	18	0.56	-	-	0
						5.1588

Fuente: Elaborado por el Investigador

De acuerdo a la tabla presentada según (Sánchez 2017) el número de moles de oxígeno (O₂) necesarios serán la mitad de los moles de oxígeno puro (O) calculados. Composición en nitrógeno en el aire atmosférico es de 79% y en Oxígeno del 21%.

Moles estequiométricos de O, $n_{eO} = 5,16 \text{ kmol O}/100 \text{ kg biomasa}$

Moles estequiométricos de O₂, $n_{eO_2} = 2,6 \text{ kmol O}_2/100 \text{ kg biomasa}$

Moles estequiométricos de aire, $n_{e\text{aire}} = 2,6 \text{ kmol O}_2/100 \text{ kg biomasa} \cdot 100/21$
 $\text{kmol aire}/\text{kmol O}_2 = 12,4 \text{ kmol aire}/100 \text{ kg biomasa}$.

La masa de aire, conociendo su masa molar media mediante su composición es la siguiente:

$$M_{\text{aire}} = 14 \cdot 2 \cdot 0,79 (\text{N}_2) + 16 \cdot 2 \cdot 0,21 (\text{O}_2)$$

$$M_{\text{aire}} = 28,84 \text{ kg aire}/\text{kmol aire}$$

$$\text{Masa de aire } M_{e\text{aire}} = 12,4 \text{ kmol aire}/100 \text{ kg biomasa} \cdot 28,84 \text{ kg aire}/\text{kmol aire}$$

$$M_{e\text{aire}} = 357,62 \text{ kg aire}/100 \text{ kg biomasa}$$

De acuerdo con la ley de los gases, para condiciones normales ($T=273,15 \text{ K}$, $p = 101325 \text{ Pa}$) según esto se obtiene el volumen de aire:

La formula $PV = nRT$:

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

$$V = (12,4 \text{ kmol aire}/100 \text{ kg biomasa} * 8,314 \text{ J/mol.K} * 273,15 \text{ K}) / 101325$$

$$\text{Pa} * 1000 \text{ kmol aire/mol aire}$$

$$V_{\text{aire}} = 277,9 \text{ Nm}^3 \text{ aire} / 100 \text{ kg biomasa.}$$

Tabla 9: Moles estequiométricos y Volumen de aire

Moles estequiométricos de O neO	5,16 kmo O/100 kg biomasa
Moles estequiométricos de O2 neO2	2,6 kmol O2/100 kg biomasa
Moles estequiométricos de aire, ne aire	12,4 kmol aire/100 kg biomasa
Masa estequiométricos de aire, me aire	357,62 kg aire/100 kg biomasa
Volumen de aire necesario, Vaire	277,9 Nm3 aire/100 kg biomasa

Fuente: Elaborado por el Investigador

De esta manera para (Sánchez 2017) el proceso me permite determinar lo realizado dentro del gasificador el cual utiliza el aire caliente que proviene del intercambiador de calor, para obtener el flujo de aire necesario y así convertir en syngas la cascarilla de arroz, para esto se multiplica la masa de aire (en kg aire/kg de biomasa) por la relación de equivalencia, osea la cantidad de oxígeno utilizada en relación a la empleada en la combustión completa. El ratio equivalente (ER) viene expresado de acuerdo a la fórmula:

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

Los procesos optimizados de gasificación de biomasa suelen operar con Relaciones de Equivalencia (ER) próximas a 0,30; es así que se considerará este valor para encontrar la masa real del aire.

Masa estequiométrica de aire, $m_{\text{aire}} = 357,62 \text{ kg aire}/100 \text{ kg biomasa}$

$$m_{\text{aire}} = 3,57 \text{ kg aire}/\text{kg biomasa}$$

Donde el ER = (Caudal de aire / Biomasa consumida)/(Caudal de aire / Biomasa consumida) estequiométrico = 0,3

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

$m_{\text{aire}} = 3,57 \text{ kg aire/kg biomas} * 0,3$

$m_{\text{aire}} = 1,07 \text{ kg aire/kg biomasa.}$

El caudal de biomasa disponible, $\text{Biomasa}_{\text{disp}} = 0,28 \text{ kg biomasa/s}$

Caudal de aire, $\text{Aire}_{\text{esteq.}} = m_{\text{aire}} * \text{Biomasa}_{\text{disp}}$

$\text{Aire}_{\text{esteq.}} = 3,57 \text{ kg aire/kg biomasa} * 0,28 \text{ kg biomasa/s}$

$\text{Aire}_{\text{esteq.}} = 1,0 \text{ kg aire/s}$

Caudal de aire real, $\text{Aire}_{\text{real}} = m_{\text{aire}} * \text{Biomasa}_{\text{disp}}$

$\text{Aire}_{\text{real}} = 1,07 \text{ kg aire/kg biomasa} * 0,28 \text{ kg biomasa/s}$

$\text{Aire}_{\text{real}} = 0,29 \text{ kg aire/s}$

Tabla 10: Indicadores de los componentes de la gasificación

Ratio Equivalente, ER	0.3
Masa de aire estequiometrico, m_{aire}	3,57 kg aire/kg biomasa
Masa de aire real, m_{aire}	1,07 kg aire/kg biomasa
Caudal de biomasa disponible, $\text{Biomasa}_{\text{disp}}$	0,28 kg biomasa/s
Caudal de aire estequiometrico, $\text{Aire}_{\text{esteq}}$	1,0 kg aire/s
Caulda de aire real, $\text{Aire}_{\text{real}}$	0,29 kg aire/s

Fuente: Elaborado por el Investigador

Segun la prueba realizada la Presión de salida del Gasificador esta medida por la formula: $\Delta P = P_e - P_s$

Se obtuvo como resultados de acuerdo con (Sánchez 2017) para P_s :

$P_s = P_e - \Delta P$ donde:

$P_s = 101,325 \text{ kPa} - 0,98 \text{ kPa}$

$P_s = 100,345 \text{ kPa.}$

El contenido de la composición de la biomasa se realizó de acuerdo al análisis que realiza Sanchez, (2017) para determinar la composición y características del gas de síntesis, se han obtenido a partir de un estudio de caracterización del combustible (cascarilla de arroz) basado en un análisis elemental y un análisis inmediato. La biomasa entra en el gasificador con un contenido en humedad del 10% y se compone mayoritariamente de materia volátil, tal y como muestran los siguientes datos extraídos de la tabla presentada y teniendo en cuenta que la temperatura de los gases de salida en un gasificador.

Tabla 11: Composición y contenido del Gasificador

Temperatura (°C)	Composición	Contenido (%)
700	H ₂	20
	CO	28
	CO ₂	28
	CH ₄	24
		100

Fuente: (Ankur 2018)

Del análisis de resultados se obtiene la composición de nitrógeno y oxígeno, los cuales son necesarios para calcular el número de moles de N y O presentes en la composición del aire.

Los moles obtenidos de O en el aire, $n_{O_{\text{aire}}} = n_{eO} * ER$

$$n_{O_{\text{aire}}} = 5,16 \text{ kmol O/100 kg biomasa} * 0,3$$

$$n_{O_{\text{aire}}} = 1,548 \text{ kmol O/100 kg aire.}$$

De igual forma se encuentra los Moles de N en el aire,

$$n_{N_{\text{aire}}} = n_{eO} * ER * 79/21$$

$$n_{\text{N}_{\text{aire}}} = 5,16 \text{ kmol O}/100 \text{ kg biomasa} * 0,3 * 79/21$$

$$n_{\text{N}_{\text{aire}}} = 5,82 \text{ kmol N}/100 \text{ kg aire.}$$

Se presenta la tabla para mostrar los moles de los elementos y compuestos presentes en la biomasa y el aire y sumados dan:

Tabla 12: Cantidad de sustancia a la entrada

Cantidad de sustancia a la entrada (biomasa + aire)			
	Componente	n (kmol/100 kg biomasa)	Total
Biomasa	C	3.067	3.067
	H	2.9	4.02
	O	2.444	4.552
	N	0.03	5.85
	S	0.0094	0.0094
	H ₂ O	0.56	
	Componente	n (kmol/100 kg aire)	
Aire	O	1.548	
	N	5.82	
Temperatura a la salida del gasificador (°C)		850	

Fuente: Elaborado por el Investigador

De acuerdo a la tabla presentada y los datos antes presentados se determina la cantidad total de cada elemento químico presente en la mezcla del syngas (para estos cálculos se ha suprimido el porcentaje de H₂ presente en la mezcla porque éste reacciona con los compuestos volátiles en el gasificador y se ha sumado al resto de porcentajes), mediante la siguiente tabla:

Tabla 13: Porcentaje y numero de moles de Componentes

Compuesto	Composición (%)	C	H	N	O	S	Número de moles, n (kmol/100 kg biomasa)
C	48	1.472	-	-	1.4722	-	1.4722
CO2	48	1.472	-	-	2.9444	-	1.4722
CH4	4	0.1227	0.4908	-	-	-	0.1227
N2	-	-	-	5.85	-	-	2.925
H2O	-	-	0.2332	-	0.1166	-	0.1166
H2	-	-	3.296	-	-	-	1.648
SO2	-	-	-	-	0.0188	0.009400	0.0094
Total	100	3.067	4.02	5.85	4.552	0.009400	7.7661

Fuente: (Sánchez 2017)

Donde se obtiene el porcentaje de los elementos y compuestos del syngas se determina el valor de calentamiento (LHV) a partir de la composición volumetrica y de los datos del LHV de H₂, CO y CH₄ utilizando la siguiente formula: $X_i = (n_i * M_{mi}) / [\sum (n_i * M_{mi})]$

Presentados en la siguiente tabla:

Tabla 14: Capacidad calorífica Inferior

Compuesto	Masa molar, Mm (g/mol)	Y(% en volumen)		X (% en masa)		Gas húmedo Mm*Y	Gas seco Mm*Y	LHV kJ/Nm3	LHV*Y (base seca) kJ/Nm3
		Base húmeda	Base seca	Base húmeda	Base seca				
C	12	18.96	10	21.05	21.28	5.31	5.39	12618	1261.8
CO2	44	18.96	19.24	33.09	33.44	8.34	8.47	0	0
CH4	16	1.58	1	1	1.01	0.25	0.26	35807	358.07
N2	28	37.66	38.22	41.83	42.28	10.54	10.7	0	0
H2O	18	1.5	-	1.07	-	0.27	-	0	0
H2	2	21.22	10	1.68	1.7	0.42	0.43	10788	1078.8
SO2	64	0.12	0.12	0.31	0.31	0.08	0.08	0	0
Total		100	100	100	100	25.21	25.33	59213	2698.67

Fuente: Elaborado por el Investigador

De la información obtenida de acuerdo a las tablas presentadas se determina el LHV del gas de síntesis = 2698,67 kJ/Nm³ = 2,69 MJ/Nm³, así asumiendo la potencia calorífica inferior del gas de síntesis para el proceso utilizado en la presente investigación.

Para el estudio propuesto además se calcula el volumen de gas necesario por kilogramo de biomasa en el proceso de combustión completa, para lo cual aplicamos la ley de los gases perfectos ($R = 8,314 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$) sometiendo al gas bajo condiciones normales ($T = 273,15 \text{ K}$, $P = 101325 \text{ Pa}$)

Tenemos entonces: $T = 273,15 \text{ K}$, $P = 101325 \text{ Pa}$, $R = 8,314 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$, $n = 6,978 \text{ kmol}/100 \text{ kg biomasa}$, Volumen molar del gas, $V_{\text{molar}} = 22,41 \text{ Nm}^3/\text{kmol}$.

Entonces de acuerdo a la fórmula $PV = nRT$

$$V_{\text{gas}} = (n \cdot R \cdot T) / P = (7,7661 \text{ kmol}/100 \text{ kg biomasa} \cdot (1/100) \cdot 100 \text{ kg biomasa}/\text{kg biomasa} \cdot 1000 \text{ mol}/\text{kmol} \cdot 8,314 \text{ J/mol}\cdot\text{K} \cdot 273,15 \text{ K}) / 101325 \text{ Pa}$$

$V_{\text{gas}} = 1,7406 \text{ Nm}^3/\text{kg biomasa}$.

$M_m (\text{gas húmedo}) = 25,21 \text{ kg}/\text{kmol}$, $M_m (\text{gas seco}) = 25,33 \text{ kg}/\text{kmol}$

Tabla 15: Densidad y cauda del Gas

Densidad del gas húmedo, $D_{\text{húmedo}}$	1,125 kg/Nm ³
Densidad del gas seco, D_{seco}	1,13 kg/Nm ³
Caudal volumétrico del gas húmedo, $Q_v \text{ húmedo}$	0,487 Nm ³ /s
Caudal volumétrico del gas seco, $Q_v \text{ seco}$	0,4801 Nm ³ /s
Caudal másico del gas húmedo, $Q_m \text{ húmedo}$	0,548 kg/s
Caudal másico del gas seco, $Q_m \text{ seco}$	0,543 kg/s
Caudal másico de vapor presente en el gas, $Q_m \text{ vapor}$	0,00576 kg/s

Fuente: Elaborado por el Investigador

Del estudio realizado se determina la Potencia térmica que aporta el gas de síntesis considerando además a la temperatura de rocío del syngas, el cual permite que el vapor de agua contenido en el gas se condense.

La temperatura de rocío en función de la presión del vapor de agua a la salida del gasificador, presenta la siguiente fórmula:

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

La presión del vapor de agua

$$P_{\text{vapor}} = [(0,0057 \text{ kg/s} / 0,48 \text{ Nm}^3/\text{s}) * 8,314 \text{ J/mol.K} * 273,15 \text{ K}] / 0,018 \text{ kg/mol}$$

$$P_{\text{vapor}} = 1498,2 \text{ Pa} = 1,49 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{aire}} = 100,3 \text{ kPa} - 1,49 \text{ kPa} = 98,81 \text{ kPa}$$

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

P_{vapor} : presión del vapor de agua contenido en el gas de síntesis, kPa.

$$T_{\text{rocío}} = 286 \text{ K}$$

Para el presente estudio la Potencia del gas seco como combustible; es el producto del valor de calentamiento del gas de síntesis por el caudal volumétrico del gas seco,

$$P_{\text{seco}} = \text{LHV} * Q_{\text{Vseco}} = 2.69 \text{ MJ/Nm}^3 * 0,4801 \text{ Nm}^3/\text{s} = 1,29 \text{ MW}$$

Además se determina la Potencia térmica del gas de síntesis usado por el sistema de gasificación de acuerdo a la presente investigación.

La suma de potencias aportadas por el gas seco ($P_{G_{\text{seco}}}$) y la aportada por el gas húmedo ($P_{G_{\text{húmedo}}}$).

$$P_{\text{térmica}} = P_{G_{\text{seco}}} + P_{G_{\text{húmedo}}}$$

De acuerdo al estudio propuesto se calculó las entalpías según (Sánchez 2017) a la entrada del gasificador, entalpías a la salida del gasificador, entalpías de cada uno de los compuestos químicos presentes en el syngas.

Tabla 16: Densidad del Gas

Componente	Calor específico de cada componente Cp (T) = a + b*T+cT ² +d*T ³ (kJ/kmol*K)				Tentrada		Tsalida		hi,entrada (kJ/kmol)	hi, (kJ/kmol)	hi,Gas (kJ/kg)	Σhi, GAS (kJ/kg)
	a	b	c	d	°C	K	°C	K				
CO	28.16	0.0017	5,4*10 ⁻⁶	-2,2*10 ⁻⁹	25	298.2	850	1123	8514.82	34375.2	196.54	1126.53
CO ₂	22.26	0.0598	-3,5*10 ⁻⁵	7,5*10 ⁻⁹					9000.34	49173.32	305.3	
CH ₄	19.89	0.0502	1,3*10 ⁻⁵	-1,1*10 ⁻⁸					8254.55	55765.72	29.99	
N ₂	28.9	-0.0016	8,1*10 ⁻⁶	-2,9*10 ⁻⁹					8611.25	34121.57	385.21	
H ₂	29.11	-0.0019	4*10 ⁻⁶	-8,7*10 ⁻¹⁰					8628.32	33039.48	207.5	
SO ₂	25.78	0.058	-3,81*10 ⁻⁵	8,61*10 ⁻⁹					9944.63	50952.2	1.99	

Fuente: Elaborado por el Investigador

Entonces para el estudio la potencia termica equivale al caudal masico del gas seco por la suma de entalpias de los compuestos quimicos.

$$PG_{\text{seco}} = Qm_{\text{seco}} * \Sigma hi, \text{gas} = 0,543 \text{ kg/s} * 1126,53 \text{ kJ/kg} = 611,71 \text{ kW}$$

$$PG_{\text{seco}} = 0,6117 \text{ MW}$$

Potencia termica disponible en el gas humedo:

$$PG_{\text{humedo}} = Qm_{\text{vapor}} * hG_{\text{humedo}} = 0,0057 \text{ kg/s} * 4036,11 \text{ kJ/kg} = 23 \text{ kW}$$

$$PG_{\text{humedo}} = 0,023 \text{ MW}$$

$$P_{\text{térmica}} = PG_{\text{seco}} + PG_{\text{humedo}}$$

$$P_{\text{térmica}} = 0,611 \text{ MW} + 0,023 \text{ MW}$$

$$P_{\text{térmica}} = 0,635 \text{ MW}$$

$$P_{\text{total}} = P_{\text{seco}} + P_{\text{térmica}} = 1.29 \text{ MW} + 0,635 \text{ MW}$$

Potencia total aportada por el gas de síntesis:

$$P_{\text{total}} = 1,93 \text{ MW}$$

Intercambiador de calor

De acuerdo con el estudio una vez que el aire pasa por el intercambiador es calentado a una temperatura de 646 °C, siendo la caída de presión del aire de 1,314 kPa. El syngas se enfría desde los 850 °C, temperatura a la que sale del gasificador, hasta los 518 °C.

La presión del gas de síntesis disminuye desde los 100,3 kPa, presión con la que entra al recuperador de calor, hasta los 99 kPa a la salida del mismo.

Calor cedido por el gas de acuerdo a la entalpía del syngas a la temperatura de salida y entrada del recuperador se determina mediante la siguiente tabla:

Tabla 17: Densidad del gas de síntesis

Componente	Calor específico de cada componente Cp(T) = a+bT+cT ² +dT ³ (kJ/kmol*K)				Tentrada		Tsalida		hi,salida (kJ/kmol)	hi,entrada (kJ/kmol)	hi,gas (kJ/kmol)	Σhi, GAS (kJ/kg)
	a	b	c	d	°C	K	°C	K				
CO	28.16	0.0017	5,4*10 ⁻⁶	-2,2*10 ⁻⁹	850	1123	518	791.2	23486.69	34375	81.86	475.96
CO ₂	22.26	0.0598	-3,5*10 ⁻⁵	7,5*10 ⁻⁹					31283	49173	134.54	
CH ₄	19.89	0.0502	1,3*10 ⁻⁵	-1,1*10 ⁻⁸					32514	55765	14.53	
N ₂	28.9	-0.0016	8,1*10 ⁻⁶	-2,9*10 ⁻⁹					23416	34121	159.93	
H ₂	29.11	-0.0019	4,10*10 ⁻⁶	-8,7*10 ⁻¹⁰					23010	33039	84.24	
SO ₂	25.78	0.058	-3,81*10 ⁻⁶	8,61*10 ⁻⁹					33101	50952	0.86	

Fuente: Elaborado por el Investigador

De acuerdo a la tabla propuesta la potencia cedida por el gas equivale al producto de su caudal por la suma de las entalpías de todos los compuestos químicos que conforman el syngas, $P_{cedida\ Gas} = Q_{m\ húmedo} * \Sigma h_{i, Gas}$

$$P_{cedida\ Gas} = 1,06 \text{ kg/s} * 475,96 \text{ kJ/kg} = 504,52 \text{ kW}.$$

Sistema de lavado o scrubber tipo Venturi

El sistema de lavado o scrubber lo que realiza es al mezclar el agua con el gas de síntesis para reducir la temperatura y eliminar alquitranes, se obtiene un gas acondicionado.

La limpieza del gas requiere disminuir su concentración hasta valores del orden de 50-100 mg/m³ para su uso en motores de combustión interna

El tipo Venturi para el lavado y secado presenta un coste energético reducido y una baja caída de presión en su interior.

Quemador

El quemador para realizar la combustión dentro de la antorcha necesita aire comburente en condiciones normales de presión y temperatura. Se muestra los datos correspondientes al gas de síntesis y producción de humos a la salida de la antorcha.

Tabla 18: Caudal del gas y humos

Gas	Caudal masico del gas de sintesis, Q_{mgas} (kg/s)	1.005
	Caudal molar del gas de sintesis, $Q_{\text{molar gas}}$ (kmol/s)	0.04
	Caudal volumetrico del gas de sintesis, Q_{vgas} (Nm ³ /s)	0.8964
Humos	Caudal masico de los humos, $Q_{\text{m humedo}}$ (kg/s)	2.347
	Caudal molar de los humos, $Q_{\text{molarhumos}}$ (kmol/s)	0.09
	Caudal volumetrico de los humos, Q_{vhumos} (Nm ³ /s)	1.94
	Temperatura de los humos, T_{humos} (°C)	200
	Presión de los humos, P_{humos} (kPa)	101.325

Fuente: Elaborado por el Investigador

De la tabla se observa los niveles de gas y humos del quemador o antorcha, datos necesarios para desarrollar el estudio del calor necesario para la generación de energía para el siguiente proceso.

Motor de combustión interna con alternador

El rendimiento del motor para el proceso de gasificación utilizando biomasa según los datos de las tablas presentadas, como combustible con un rendimiento eléctrico al 25% se tiene el gas de síntesis procedente de la antorcha, el LHV se presenta en las siguientes condiciones según la tabla propuesta:

Tabla 19: Temperatura del gas en la combustión

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

Fuente: Elaboración propia del Investigador

Tabla 20: LHV de la base seca

Compuesto	Masa molar, Mm (g/mol)	Y (% en volumen)		X (% en masa)		Gas húmedo Mm*Y	Gas seco Mm*Y	PCI kJ/Nm ³	PCI*Y (base seca) kJ/Nm ³
		Base húmeda	Base seca	Base húmeda	Base seca				
CO	28	18.13	10	21.05	21.28	5.08	5.16	12618	1261.8
CO ₂	44	17.34	17.62	33.09	33.44	7.63	7.75	0	0
CH ₄	16	1.73	1	1	1.01	0.28	0.28	35807	358
N ₂	28	41.04	41.69	42.28	42.28	11.49	11.67	0	0
H ₂ O	18	1.59	-	-	-	0.29	-	9	0
H ₂	2	10	20.22	1.7	1.7	0.4	0.4	10788	1078.8
SO ₂	64	0.12	0.12	0.31	0.31	0.008	0.08	0	0
Total		100	100	100	100	25.21	25.33		2698.6

Fuente: Elaborado por el Investigador

El LHV para la generación de energía se muestra de acuerdo a la suma total de los compuestos encontrados del proceso anterior, entonces el LHV del gas de síntesis = 2,6986 MJ/Nm³, el cual al multiplicarse por el caudal volumétrico de gas de síntesis se obtiene:

$$\text{Potencia disponible en el gas de síntesis} = 2,69 \text{ MJ/Nm}^3 * 0,8964 \text{ Nm}^3/\text{s} \\ = 2,41 \text{ MW.}$$

Las características del aire de la antorcha que entra en el motor para realizar la combustión

$$\text{Caudal másico de aire, } Q_{\text{maire}} (\text{motor}) = Q_{\text{maire}} (\text{antorcha})/1,2 = 1,342 \text{ kg/s}/1,2 \\ = 1,12 \text{ kg/s}$$

Entalpia del aire en el motor se mantiene constante y la relación estequiometria aire-combustible, $(A/C)_{\text{esteq.}} = 13,2 \text{ kg aire/kg combustible}$

Relación real aire-combustible, $(A/C) = 1,062 \text{ kg aire/kg combustible}$

$$n = (A/C)_{\text{esteq.}} / (A/C) = 13,2/1,062 = 12,43 > 1 \text{ (exceso de aire)}$$

$$n_{\text{e O}_2} (\text{antorcha}) = n_{\text{e O}_2} (\text{aire}) * n = 2,58 \text{ kmol O}_2 * 12,43 = 32,07 \text{ kmol O}_2.$$

El gas de síntesis y producción de humos a la salida de la antorcha se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 21: Gas y humos, Caudal másico del gas de síntesis

GAS	Caudal másico del gas de síntesis, $Q_{\text{m gas}} (\text{kg/s})$	1
	Caudal molar del gas de síntesis, $Q_{\text{molar gas}} (\text{kmol/s})$	0.04
	Caudal volumétrico del gas de síntesis, $Q_{\text{v gas}} (\text{Nm}^3/\text{s})$	1
HUMOS	Caudal másico de los humos, $Q_{\text{m humos}} (\text{kg/s})$	2
	Caudal molar de los humos, $Q_{\text{molar humos}} (\text{kmol/s})$	0.1
	Caudal volumétrico de los humos, $Q_{\text{v humos}} (\text{Nm}^3/\text{s})$	1.8
	Temperatura de los humos, $T_{\text{humos}} (^\circ\text{C})$	200
	Presión de los humos, $P_{\text{humos}} (\text{kPa})$	101

Fuente: Elaborado por el Investigador

De acuerdo al gas de síntesis y los humos se presenta la siguiente potencia a la entrada del motor, y es la suma de potencias aportadas por el aire y el syngas.

$$P_{\text{aire}} = C_p \cdot q_{\text{maire}} \cdot T = 0,0281 \text{ MW}$$

$$P_{\text{motor}} = P_{\text{síntesis}} + P_{\text{aire}} = 2,4 \text{ MW} + 0,0281 \text{ MW} = 2,428 \text{ MW}$$

La potencia eléctrica a la salida del motor es

$$P_{\text{eléctrica}} = P_{\text{motor}} \cdot \eta_e = 2,428 \text{ MW} \cdot 0,25 = 0,607 \text{ MW} = 607 \text{ kW}$$

4.2. Viabilidad Técnica del Sistema de Gasificación

4.2.1. Gasificador

El sistema de gasificación en el gasificador para procesar la biomasa de cascarilla de arroz de acuerdo a la proporción del consumo y la producción del Molino los Ángeles, se sustenta en las siguientes características técnicas. Con las especificaciones de la cascarilla de arroz debe de tener de tamaño (mm) mínimo de 2mm en cualquier dimensión y máximo diámetro hasta de 3 mm, longitud de 20mm.

El material de combustible debe contener una humedad < 10%.

La potencia del gasificador en el flujo de gas calculado de 2040 (Nm³/h) con un valor de calentamiento de gas promedio > 4,39 kJ/Nm³.

Consumo de biomasa calculado máximo de 1020 kg/h a una temperatura de gasificación de 1050 a 1100 °C.

La temperatura de gas entrante al gasificador debe de estar dentro de los 300 a 500 °C.

El sistema de alimentación de biomasa de modo manual de acuerdo a las indicaciones del fabricante, con una frecuencia de alimentación a través de gravedad continua desde un bunker, el retiro de cenizas es continuo y

automatizado, el enfriado de gas es depurador tipo Venturi con sistema de recirculación de agua.

Los datos de entrada para la generación de energía eléctrica se deben considerar las siguientes características técnicas como datos en la entrada del gasificador.

Tabla 22: Datos de entrada del gasificador

Datos de entrada del Gasificador	
Caudal de biomasa disponible, Biomasa disp (kg/s)	0.28
Potencia disponible en la biomasa, P _{cas} (kW)	504
Ratio Equivalente, ER	0.3
Temperatura de salida del gas de síntesis, T _{salida} (°C)	850
Caudal másico de aire, Q _{aire} (kg/s)	0.33
Temperatura del flujo másico de aire, T _{aire} (°C)	646
Potencia térmica disponible en el aire, P _{aire} (kW)	0.21

Fuente: Elaborado por el Investigador

Las composiciones del gas de síntesis en base seca se deben dar de acuerdo a la siguiente proporción de los compuestos.

Tabla 23: Composición del gas de síntesis en base seca

Composicion del gas de síntesis en base seca							
Compuesto	CO	CO ₂	CH ₄	N ₂	H ₂ O	H ₂	SO ₂
% volumen	19	19	1.5	38	1.5	20.9	0.1

Fuente: Elaborado por el Investigador

La composición se determina por el gasificador, proceso anterior de los compuestos en los gases y humos anterior al ingreso del generador.

Tabla 24: Cálculos realizados del sistema de gasificación

Cálculos realizados	
LHV del syngas, LHV (MJ/Nm ³)	5.33
Volumen del syngas por unidad de biomasa, V _{gas} (Nm ³ /kg)	8703
Caudal másico del gas húmedo, Q _{mhúmedo} , Q _{vhumedo} (Nm ³ /s)	0.47
Caudal volumétrico del gas húmedo, Q _{vhumedo} (Nm ³ /s)	523
Caudal másico de las cenizas y el char, Q _{m ceniza+char} (kg/s)	0.413
Caudal volumétrico del gas seco, Q _{vseco} (Nm ³ /s)	0.00135
Potencia disponible en las cenizas y el char, P _{ceniza+char}	0.00212
Caudal másico de volantes, Q _{mvolantes} (kg/s)	0.0001
Potencia disponible en las cenizas volantes, P _{volantes} (MW)	0.00021
Caudal másico de los alquitranes, Q _{malquitranes} (kg/s)	0.0014
Potencia disponible en los alquitranes, P _{alquitranes} (MW)	0.0037

Fuente: Elaboración propia del Investigador

El volumen de acuerdo a las características técnicas está determinado de acuerdo a la presente tabla para determinar la potencia necesaria para la generación.

4.2.2. Intercambiador de calor

Cálculos de entrada, salida y balances de materia y potencias del mismo mediante las siguientes tablas.

Tabla 25: Datos de entrada del recuperador de calor

Datos de entrada del recuperador de calor	
Temperatura del gas de síntesis a la entrada, T _{síntesis} (°C)	850
Temperatura del aire a la entrada, T _{aire} (°C)	50
Caudal másico del gas de síntesis húmedo, Q _{m síntesis} (kg/s)	0.503
Caudal másico del aire, Q _{maire} (kg/s)	0.28

Fuente: Elaboración propia del Investigador

El intercambiador trabaja de acuerdo a las temperaturas presentadas y el caudal másico del gas de síntesis y el caudal másico del aire.

Tabla 26: Temperatura de entrada y salida del recuperador de calor

	Gas	Aire
Temperatura a la salida, Tsalida (°C)	518	646
Presión a la entrada, Pentrada (kPa)	100	110
Presión a la salida, Psalida (kPa)	99	100
Calor cedido/recuperado (MW)	0.252	0.204
Potencia aportada por el aire a la entrada (MW)	-	0.012
Perdidas del 5% (MW)	0.012	-

Fuente: Elaboración propia del Investigador

La temperatura de salida, la presión a la entrada y salida, el calor cedido y la potencia aportada son las características del intercambiador de calor necesario para sustentar el estudio.

El balance de potencias en entrada y salida del recuperador

Tabla 27: Entrada y salida del recuperador

Entrada y salida del Recuperador (Balances de Potencias)	
Potencia disponible en el gas húmedo, Pghumedo (MW)	3.2
Potencia disponible en el aire, Paire (MW)	0.12
Total (MW)	3.32
Potencia disponible en el gas humedo, Pghumedo (MW)	3.11
Potencia disponible en el aire, Paire (MW)	0.024
Perdidas (MW)	0.012
Total (MW)	3.146

Fuente: Elaborado por el Investigador

De acuerdo a los cálculos establecidos el intercambiador de casco y tubo ampliamente utilizado en la industria química con las consideraciones de diseño mejor definidas, el más adecuado para este proceso.

La temperatura del gas de síntesis es desconocida, más se conoce la temperatura de entrada y de salida.

4.2.3. Sistema de lavado o scrubber tipo Venturi

El syngas es introducido en el sistema de limpieza y acondicionamiento de partículas contaminantes, donde se encuentra a una temperatura mayor a los 80°C para ser quemado en el motor de combustión interna.

El sistema de lavado utilizando agua agente de limpieza, elimina partículas contaminantes acondicionando la temperatura del gas de síntesis, en función al caudal de agua disponible para determinar la temperatura del syngas a la salida del lavador.

Tabla 28: Datos de entrada del lavador

Datos a la entrada del lavador	
Temperatura del gas de síntesis, Tentrada (°C)	518
Temperatura del agua, Tagua (°C)	25
Caudal másico del gas de síntesis húmedo, Qmsíntesis (kg/s)	0.503
Caudal másico de cenizas volantes, Qmvolante (kg/s)	0.00003
Caudal másico de alquitranes, Qmalquitranes (kg/s)	0.0014
Potencia disponible en el gas de síntesis húmedo, Pgas (MW)	3.02
Potencia disponible en las cenizas volantes, Pvolantes (MW)	0.00004
Potencia disponible en los alquitranes, Palquitranes (MW)	0.0037

Fuente: Elaborado por el Investigador

Los datos son características de las condiciones necesarias para el sistema. La composición del syngas debe estar considerado de acuerdo a la siguiente tabla.

Tabla 29: Composición del gas de síntesis

Composicion del syngas										
Compuesto	CO	CO2	CH4	N2	H2O	H2	SO2	CH2O2	C6H6	C10H8
% en volumen	18	16.3	1.5	40.05	1.5	19	0.13	0	1.5	0

Fuente: Elaborado por el Investigador

El gas de síntesis reacciona con el agua que ingresa en el lavador y la energía necesaria para realizar la limpieza se la proporciona el syngas, con el cual disminuye el caudal másico del mismo.

Tabla 30: Los datos de salida del lavador

Datos a la salida del lavador		
	Gas	Agua
Caudal másico disponible, Q_{mdisp} (kg/h)	1808.8	4054.35
Temperatura de salida, T_{salida} (°C)	33.63	70.91
Presión de salida, P_{salida} (kPa)	97.42	98.42
Potencia disponible a la salida, P_{salida} (MW)	2.37	0.38

Fuente: Elaborado por el Investigador

La temperatura del agua en la salida y la entrada del lavador están de acuerdo a la tabla propuesta en el estudio presentado generando una potencia de:

$$P_{agua} = 0,38 \text{ MW}$$

Las condiciones presentadas sustentan el uso del diseño propuesto en el presente estudio para el sistema de gasificación.

4.2.4. Filtros para la operación continua

Considerando de acuerdo a la propuesta presentada el proceso de gasificación genera partículas (alquitranes), es necesario eliminarlos del syngas. Los filtros que se hacen uso en el diseño destaca el tipo propuesto que, durante la caída de presión constante, es directa a la cantidad de partículas absorbidas por los filtros.

4.2.5. Quemador

El gas de síntesis en el proceso de gasificación no es precisamente el adecuado para ingresar en el motor, uno de los métodos para suplir esta deficiencia es quemando el gas siempre y cuando así sea necesario.

El proceso de combustión del gas se realiza mediante el quemador de acuerdo a las especificaciones técnicas.

En la tabla propuesta se muestra la composición de los humos de acuerdo a los datos del fabricante para quemadores de syngas.

Tabla 31: Composición de los humos

Composición de los humos				
Compuesto	CO ₂	N ₂	O ₂	H ₂ O
% en volumen	19	37.03	5.3	5.01

Fuente: Elaborado por el Investigador

El quemador debe contener la composición de humos de acuerdo a los siguientes porcentajes para pasar al siguiente proceso de generación de energía eléctrica.

4.2.6. Motor de combustión

El syngas proveniente de la etapa anterior esta acondicionada para ser ingresada al motor. La temperatura adecuada incrementa la densidad del mismo y es eficiente para ser quemado dentro del motor.

El objetivo de este motor propuesto en el presente estudio transforma la energía química del proceso de gasificación en energía eléctrica que será utilizada por el Molino.

Tabla 32: Datos de entrada del motor

Datos de entrada del motor	
Temperatura del gas de síntesis a la entrada, $T_{\text{síntesis}}$ (°C)	33.63
Caudal másico del gas de síntesis, $Q_{\text{msíntesis}}$ (kg/s)	0.5002
Potencia disponible en el gas de síntesis, $P_{\text{síntesis}}$ (kW)	2.3
Presión del gas de síntesis a la entrada, $P_{\text{síntesis}}$ (kPa)	97
LHV del gas de síntesis en base seca, LHV síntesis (MJ/Nm ³)	2.6

Fuente: Elaborado por el Investigador

Los datos de entrada y salida deben estar consideradas de acuerdo a las características de balance de materia del motor, deben estar de acuerdo a las siguientes tablas:

Tabla 33: Entrada y salida del motor

Entrada y salida del motor (balance de materia)	
Caudal másico del syngas, $Q_{\text{msíntesis}}$ (kg/s)	0.502
Caudal másico del aire, Q_{maire} (kg/s)	0.56
Total (kg/s)	1.062
Caudal másico de los humos, Q_{mhumos} (kg/s)	1.062
Total (kg/s)	1.062

Fuente: Elaborado por el Investigador

Los datos presentes de entrada y salida del motor deben corresponder a los siguientes datos para la generación de energía eléctrica necesaria para suplir las necesidades del Molino los Ángeles.

Para la generación del total se debe considerar la potencia disponible del gas de síntesis antes del proceso, presentados de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 34: Entrada y salida del motor balance de potencias

Entrada y salida del motor (Balance de potencias)	
Potencia disponible en el gas de síntesis, $P_{\text{síntesis}}$ (MW)	2.4
Potencia disponible de aire, P_{aire} (MW)	0.028
Total (MW)	2.428
Potencia eléctrica obtenida, $P_{\text{eléctrica}}$ (MW)	0.6
Total (MW)	0.6

Fuente: Elaborado por el Investigador

De acuerdo al estudio presentado el motor de combustión interna genera la potencia necesaria para realizar el trabajo por el molino, el modelo propuesto está dentro de los límites y especificaciones técnicas planteadas en el diseño. De acuerdo a los datos propuestos se determina el motor a emplear para el uso del syngas.

4.2.7. Propuesta técnica del sistema de gasificación por el estudio

La cascarilla de arroz producida por el Molino los Ángeles es de 28 Ton por día, representa la cantidad necesaria para alimentar el gasificador de 0,28 kg/s equivalente a 1020 kg/h de un 10% de humedad para generar 600 kWe de acuerdo a la capacidad del generador según el estudio propuesto.

De acuerdo al estudio realizado, el Investigador propone el siguiente Sistema de Gasificación con las características para suplir las necesidades técnicas desarrolladas en la presente investigación.

Se propuso las características técnicas al Vendor y de acuerdo a los datos presentados la propuesta es el siguiente:

Sistema de Gasificación con una vida útil de 65000 horas (trabajando anual a razón de 8640 horas), de 7 años y medio de funcionamiento antes de su primer mantenimiento.

El esquema propuesto se presenta mediante las siguientes tablas y planos:

Tabla 35: Sistema de gasificación

Sistema de Gasificación	
Modelo Gasificador	FBG-850 (Gas-500)
Tipo de Gasificador	Down Draft o Flujo Concurrente
Especificaciones del Material Combustible	
Tamaño (mm)	Mínimo: 2 mm en cualquier dimensión Máximo: Diametro 3mm, Longitud - 20 mm
Contenido de Humedad (%)	< 10% (Base de Humedad)
Potencia del Gasificador	
Flujo de Gas Calculado (Nm ³ /h)	2.04
Poder Calorífico de Gas Promedio (Kcal/Nm ³)	>1,050
Promedio Térmico (Kcal/h)	2142000
Consumo de Biomasa Calculado (Kg/h)	Máximo 1,020
Temperatura de Gasificación (°C)	1050 - 1100
Eficiencia de Gasificación Indicativa (%)	
Modo Caliente de Gas (No purificado)	> 75%
Modo Frio de Gas (Purificado)	> 65%
Temperatura de Gas entrante al Gasificador (°C)	300 a 500 °C

Fuente: (Ankur 2018)

Especificaciones técnicas del Gasificador

Características técnicas del sistema de alimentación del Sistema de Gasificación.

Tabla 36: Sistema de alimentación

Sistema de Alimentación		
Modo	Manual	
Frecuencia	A través de gravedad continua (desde un bunker)	
Sistema de Alimentación Biomasa		
Retiro de Cenizas	Continuo y automatizado	
Enfriado de Gas (Para Modos de Gas Ultra Limpio y Restregado)	Depurador Tipo Venturi con Sistema Recirculador de Agua	
Limpieza de Gas (Modo de Gas Ultra Limpio)	A través de Filtros Delgados Patentados	
Arranque/Encendido	A través de una Bomba Depuradora/Blower	
Composición Típica del Gas	CO - 18+-3%	H2 -16+-2%
	CO2 - 10 +-%	CH4 - Mayor a 3%
	N2 - 50%	

Fuente: (Ankur 2018)

Propuesta del Sistema de Gasificación y sus características técnicas de la propuesta.

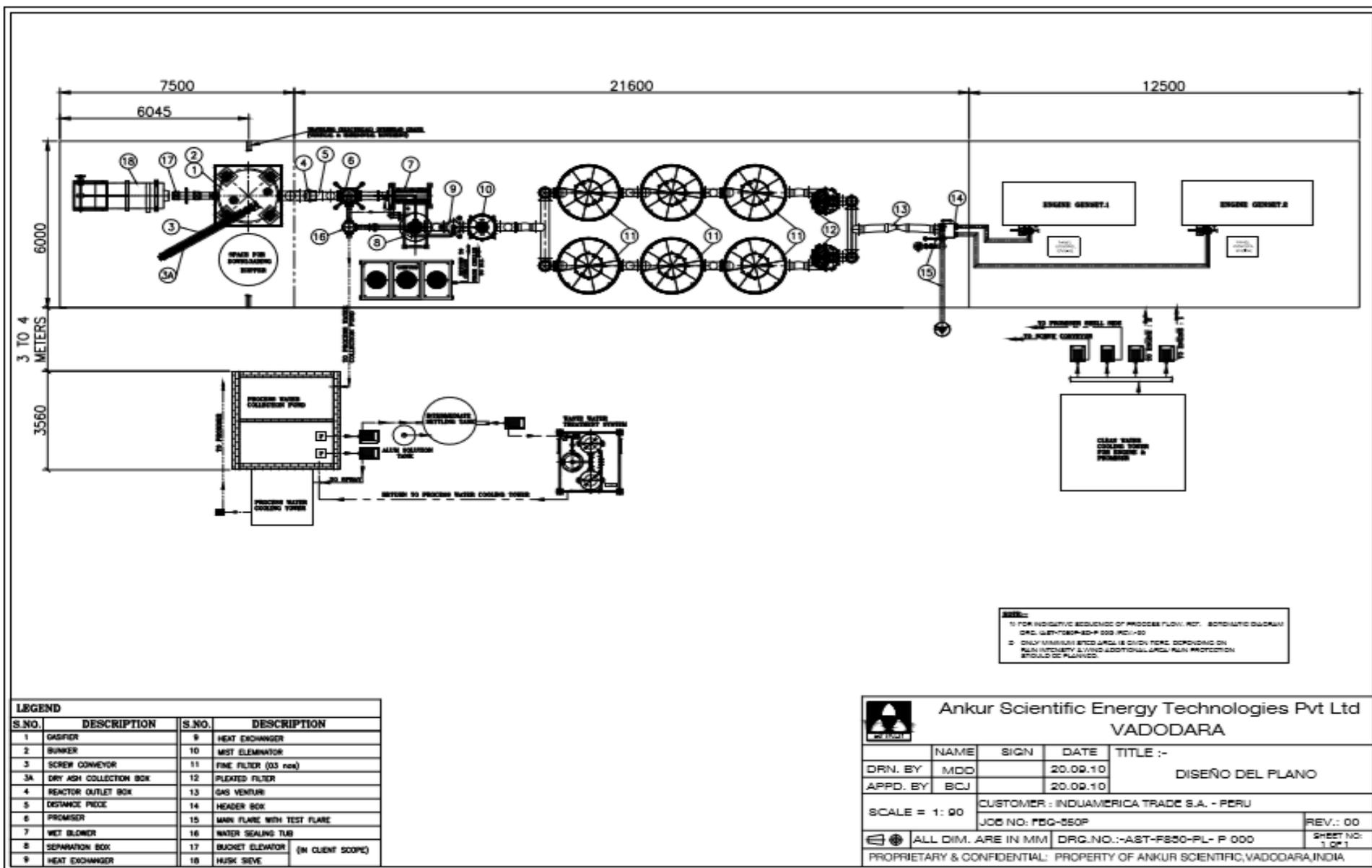
Tabla 37: Propuesta del sistema de gasificación

Propuesta del Sistema de Gasificación	
Descripcion	Cant.
a. Gasificador "Ankur" basado en el Modelo Power Pack "Ankur GAS-500, consiste en lo siguiente:	
* Gasificador Biomasa "Ankur" Modelo FBG-850 junto con accesorios básicos y auxiliares	1
* Generador Modelo - LH500GFJ Alternador Siemens con Panel de Control Debidamente modificado para operar 100% en modo gas con un conveniente alternador para proveer una potencia bruta de al menos 500 kWe hasta los 750 kWe (en modo conectado a una red junto con una provisión para el control de carga variable.	1
b. Línea Paralela de Filtros para operación continua	
a. Torre de Enfriamiento del Gasificador	1
b. Torre de Enfriamiento del Generador	1
Intercambiador de Calor / Enfriador de Gas (Construcción M.S.) - Para enfriar el gas a 25 grados Celsius y eliminar la humedad del mismo. (El aislamiento o montaje del Intercambiador de Calor así como las tuberías, Bomba, Tanque de Almacenamiento del agua enfriada le corresponde al Vendedor)	1
Chiller (Unidad Enfriadora) de 18 TR (Toneladas de Refrigeración)	1
Planta de Tratamiento de Agua	1
Sistema de Extracción de Cenizas	1

Fuente: Elaborado por el Investigador

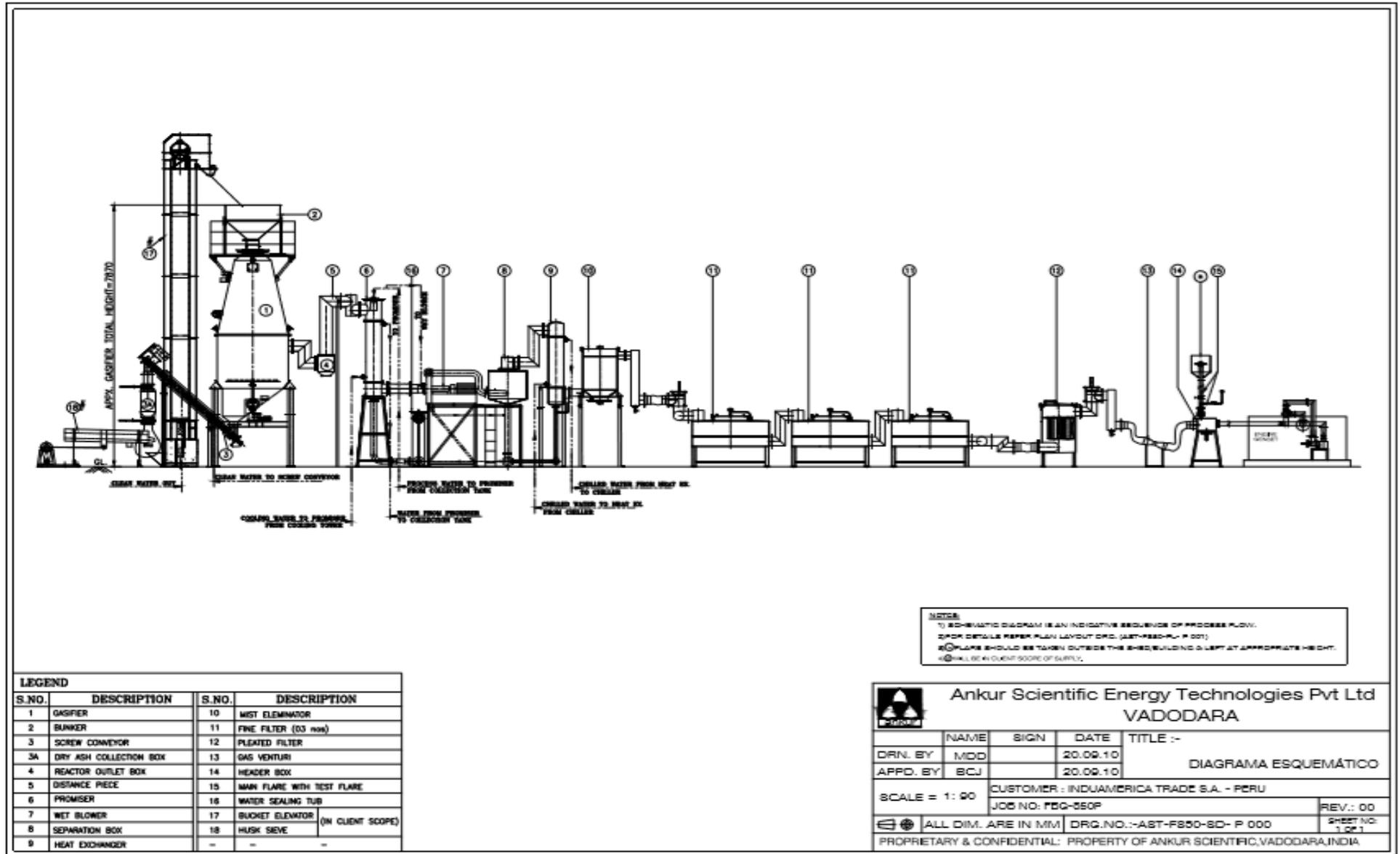
Se adjunta los planos de la propuesta del sistema de gasificación de acuerdo al estudio propuesto en la presente investigación.

Figura 5: Plano del Sistema de Gasificación



Fuente: Ankur 2018

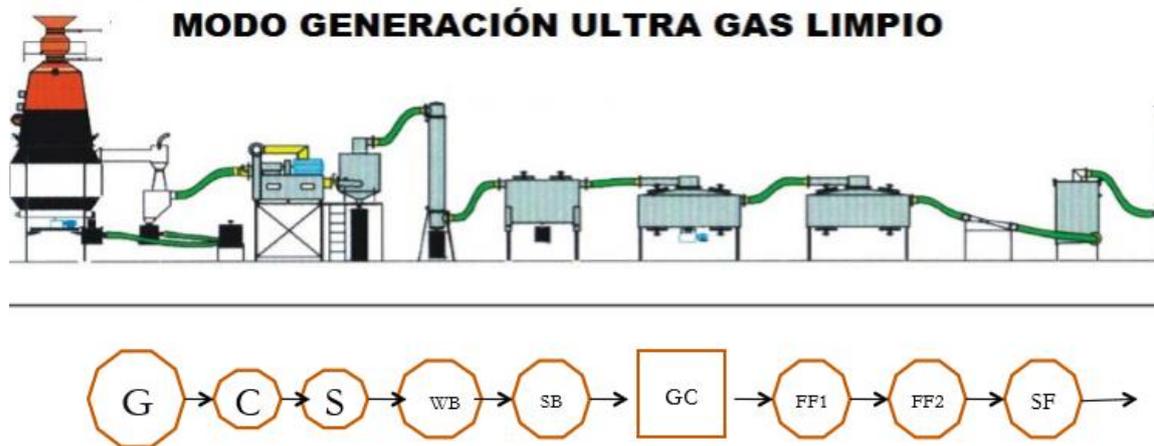
Figura 6: Diagrama esquemático



Fuente: Ankur 2018

El diagrama indicativo para un Gasificador Biomasa 'Ankur' en un Modo de Gas Ultra Limpio se indica a continuación:

Figura 7: Esquema del proceso de Gas limpio



Fuente: Ankur, 2018

G – Gasificador (Gasifier): La Biomasa es utilizada para alimentar esto. A través de una serie de procesos químicos, el combustible sólido (biomasa) es convertido a un combustible gaseoso (Gas Pobre o Seco). El gas en el tubo de descarga tendrá algo de ceniza y partículas de alquitrán que estarán por encima de los 400°C.

C – Separador de Ciclón (Cyclone): Retiene las partículas gruesas que vienen con la corriente de gas generada inicialmente.

S – Torre de Lavado (Scrubber): Enfría el gas a una temperatura ambiente. Al mismo tiempo, el gas es también limpiado por el choque de agua.

WB – Separador de Humedad (Wet Blower): Esto proporciona la fuerza motriz al sistema entero. Crea una succión en el gasificador que internamente permite la entrada controlada del aire (el control es a través del diseño del sistema) en el sistema. De esta forma, la biomasa es parcialmente quemada y reducida para generar el Gas Pobre.

SB – Caja Separadora (Separation Box): Utilizamos un aspersor de agua en el Separador de Humedad. La Caja Separadora es utilizada para separar el gas y agua.

GC – Intercambiador de Calor (Heat Exchanger): Enfría el gas y a la vez elimina la humedad de la misma. Esto inclusive aumenta la eficiencia volumétrica en los generadores debido a que el gas es más frío.

FF1 – Filtro Delgado 1 (Fine Filter1): Es un filtro de partículas de madera que limpia considerablemente el gas. Tiene un mecanismo patentado que permite que las partículas de madera sean reemplazadas periódicamente. Las partículas de madera necesitarán ser cambiadas periódicamente.

FF2 – Filtro Delgado 2 (Fine Filter 2): Otro tipo de filtro de partículas de madera en serie que ayuda en la depuración adicional del gas. No tiene ningún mecanismo activo. Las partículas de madera necesitarán ser cambiadas periódicamente.

SF – Filtro de Seguridad (Safety Filter): Un nuevo filtro de tela que actúa como seguridad antes de que el gas entre al Equipo Generador.

4.3. Viabilidad económica financiera

La viabilidad financiera se propone en función a la información proporcionada por el Molino los Ángeles, en donde se hace mención a la Potencia suministrada por la empresa proveedora de energía eléctrica de 500 kW, detalle de facturación del mes de noviembre del 2018 (información confidencial del Molino los Ángeles, de acuerdo a las normas éticas de la investigación no se adjunta dentro de la investigación), datos del Vendor para el Sistema de Gasificación, y criterios del Investigador propios de la metodología de estudio.

4.3.1. Costos del Sistema de Gasificación

El costo del Sistema de Gasificación de acuerdo al estudio propuesto y las características de diseño se propone de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 38: Costos del Sistema de gasificación

Sistema de Gasificación - Precio 1 * GAS-500				
No	Descripcion del Item	Cant.	Unidad	Total
1	a. Gasificador "Ankur" basado en el Modelo Power Pack "Ankur GAS-500, consiste en lo siguiente:			
	* Gasificador Biomasa "Ankur" Modelo FBG-850 junto con accesorios básicos y auxiliares	1	140100	140100
	* Generador Modelo - LH500GFJ Alternador Siemens con Panel de Control	1	155000	155000
	Debidamente modificado para operar 100% en modo gas con un conveniente alternador para proveer una potencia bruta de al menos 500 kWe hasta los 750 kWe (en modo conectado a una red junto con una provisión para el control de carga variable.	1	11300	11300
	b. Línea Paralela de Filtros para operación continua			
2	a. Torre de Enfriamiento del Gasificador	1	13500	13500
	b. Torre de Enfriamiento del Generador	1	12500	12500
3	Intercambiador de Calor / Enfriador de Gas (Construcción M.S.) - Para enfriar el gas a 25 grados Celsius y eliminar la humedad del mismo. (El aislamiento o montaje del Intercambiador de Calor así como las tuberías, Bomba, Tanque de Almacenamiento del agua enfriada le corresponde al Vendor)	1	7500	7500
4	Chiller (Unidad Enfriadora) de 18 TR (Toneladas de Refrigeracion)	1	15000	15000
5	Planta de Tratamiento de Agua	1	14500	14500
6	Sistema de Extracción de Cenizas	1	9100	9100
7	Cargos de Embalaje (Precios FOB)	1	17175	17175
Total \$				395675

Fuente: (Ankur 2018)

El total de costo del Sistema de Gasificación se asume en \$ 395675 precios FOB en la Provincia de Lambayeque.

4.3.2. Parámetros Operacionales

Los parámetros operacionales de generación de energía son las siguientes para determinar el ingreso por la operación anual propuesto para el Molino los Ángeles.

Tabla 39: Parámetros operacionales

Parámetros Operacionales	
Generación de energía	
Generación de energía bruta / Equipo (kWh)	240
Consumo de energía cautiva / Equipo (kWh)	28.8
Generación de energía neta / Equipo (kWh)	211.2
Generación de energía bruta en un día / Equipo (kW)	5760
Generación de energía neta en un día / Equipo (kW)	5068.8
Generación de energía bruta en un año / serie (kW)	1576800
Generación de energía neta en un año / set (kW)	1387584
Generador Modelo - LH500GFJ Alternador Siemens con Panel de Control	1
Generación de energía bruta en un día (kW/día)	11520
Generación de energía neta en un día (kW/día)	10137.6
Generación de energía bruta en un año (kW/año)	3153600
Generación de energía neta en un año (kW/año)	2775168

Fuente: (Ankur 2018)

4.3.3. Costos de Operación

Los costos de operación están en función al consumo de Biomasa del Sistema de Gasificación.

El consumo de biomasa se da de acuerdo a la siguiente tabla

Tabla 40: Consumo de la biomasa

Consumo de biomasa	
Consumo de biomasa específica	2 kg/kWhr
Generación bruta de energía en un año	3153600 kW/año
Consumo anual de biomasa	6307200 kgs/año

Fuente: Elaborado por el Investigador

4.3.4. Costo de Mano de Obra anual

El costo de mano de obra está determinado por la siguiente tabla:

Tabla 41: Costo de mano de obra anual

Costo de mano de obra anual \$			
Descripción	Número	Tarifa	Costo
Proyecto a cargo	0	0	0
Supervisor	1	500	500
Labor	4	300	1200
		Por mes	1700
		Por año	20400

Fuente: Elaborado por el Investigador

El costo de la mano de obra está en \$ y es anual.

4.3.5. Gastos en Reparación y costos de mantenimiento anual

Los gastos en reparación y costos de mantenimiento anual están determinados por la siguiente tabla.

Tabla 42: Gastos en reparaciones y costos de mantenimiento

Gastos en Reparaciones y costos de mantenimiento anual - Gasificador y sus accesorios	
Año	Costo - Reparación y Mantenimiento (\$)
1	7030
2	7381.5
3	7750.6
4	8138.1
5	8545.0

Fuente: Elaborado por el Investigador

4.3.6. Gastos Totales anuales en Sistema de Gasificación

Los gastos totales anuales en el Sistema de Gasificación están propuestos mediante la siguiente tabla:

Tabla 43: Gastos del sistema de gasificación

Gastos Totales	Años					
	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Mano de Obra		20400	20400	20400	20400	20400
Gastos en Reparaciones y costos de mantenimiento		7030	7381.5	7750.6	8138.1	8545.0
Total		27430	27781.5	28150.58	28538.1	28945.01

Fuente: Elaborado por el Investigador

Los valores están en dólares Norteamericanos (\$)

4.3.7. Ingreso por Costo de Electricidad

El ingreso por costo de electricidad que paga el Molino los Ángeles por consumo se da en función a la siguiente tabla:

Tabla 44: Ingresos por costo de electricidad

Ingresos por costo de electricidad	
Asumiendo el costo actual de la electricidad. (\$)	0.14
Coste de la electricidad del sistema. (\$/kWh)	0.0956
Beneficio total por unidad (\$)	0.0444
Generación de energía neta en un año (kWh)	2775168
Ingresos anuales por año (\$)	123127.68
Ingresos por Costos asociados al almacenaje y Transporte (\$)	14775.32
Ingresos Totales por Servicio de Generacion de Energia (\$)	137903.0016

Fuente: Elaborado por el Investigador

4.3.8. Caracterización del Sistema de Gasificación

Para encontrar el retorno de la inversión propuesta y sustentar la viabilidad económica Sistema de Gasificación en la presente investigación se presenta las siguientes tablas:

Tabla 45: Caracterización del sistema de gasificación

CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE GASIFICACIÓN	
Modelo Gasificador	FBG-850 (Gas-500)
Gasificador Biomasa "Ankur" Modelo FBG-850	1
Generador Modelo - LH500GFJ Alternador Siemens con Panel de Control	1
Consumo de Biomasa Calculado (kg/h)	Máximo 1,020
Consumo anual de biomasa kg/año	6307200
Generación de energía neta en un año kWh	2775168
Precio de venta kWh – Año 0	0.044367649
Aumento del precio de venta	0.014
Gastos Operativos anuales	27430
Incremento costes anuales	0.02

Fuente: Elaborado por el Investigador

Las características técnicas del Sistema de Gasificación para el Molino los Ángeles.

Los costos totales

Los costos totales del Sistema de Gasificación se determinan mediante la siguiente tabla:

Tabla 46: Costes totales

COSTES TOTALES (\$)	
Coste Sistema de Gasificación	395675
Instalación y Montaje del Sistema de Gasificación	15000
Obras Civiles	10000
Inversión inicial	420675
Valor Residual	0

Fuente: Elaborado por el Investigador

El costo del sistema de gasificación presenta la inversión inicial de \$ 420675 incluye el coste del sistema de gasificación, la instalación y montaje y obras civiles.

El periodo de amortización para la financiación es de 6 años determinada por la siguiente tabla:

Tabla 47: Periodos de amortización

PERIODOS DE AMORTIZACIÓN	
Amortización Obra Civil	6 años
Amortización Equipos	6 años

Fuente: Elaboración propia del Investigador

Las necesidades de financiación se proponen mediante la siguiente tabla:

Tabla 48: Necesidad de financiación

NECESIDADES DE FINANCIACIÓN		
Inversión Total	100%	\$ 420675
Recurso Propios	10%	\$ 42067.5
Recursos Ajenos	90%	\$ 378607.5

Fuente: Elaborado por el Investigador

Del total propuesto a invertir el 90% del total de costo del Sistema de Gasificación es financiado.

La condición del préstamo se propone mediante la siguiente tabla:

Tabla 49: Condiciones del préstamo

CONDICIONES DEL PRÉSTAMO			
Principal	378607.5	Cuota anual	
Duración (años)	6		
Tipo interés (%)	4.55%		
Comisión apertura	0.75%	2839.5563	Estos costes se suman a los financieros del primer año
Gastos Tramitación	1000		

Fuente: Elaboración propia del Investigador

El interés, la duración y las comisiones, así como los gastos de tramitación están propuestos en la tabla.

Según la siguiente tabla se presenta la cuenta de resultados, determinándose la inversión, la producción, los ingresos, gastos por generación de energía eléctrica para el Molino los Ángeles.

Tabla 50: Cuenta de resultados 1

Cuenta de Resultados						
Año	Inversion	Producción	Precio prima	Ingresos	Gastos (inc. Gastos generales)	Margen Operativo Bruto
	Dolares	MWh	c\$/kWh	Dolares	Dolares	Dolares
2018	420675					
2019		2775168	0.0496918	137903	27430	110473
2020		2775168	0.0503875	139833.64	27978.6	111855.04
2021		2775168	0.0510929	141791.31	28538.172	113253.14
2022		2775168	0.0518082	143776.39	29108.935	114667.46
2023		2775168	0.0525335	145789.26	29691.114	116098.15
2024		2775168	0.053269	147830.31	30284.936	117545.38

Fuente: Elaborado por el Investigador

Para la siguiente tabla de la cuenta de resultados se presenta los costes financieros, la amortización por los equipos, amortización por obras civiles además de los beneficios antes de impuestos y cuotas de impuestos, determinando el beneficio neto después de impuestos.

Tabla 51: Cuenta de resultados 2

Cuenta de Resultados					
Costes Financieros	Amortización Equipos (6 años)	Amortización Obra Civil (6 años)	Beneficio antes de Impuestos	Cuota Impuestos (18%)	Beneficio neto después impuestos
Dolares	Dolares	Dolares	Dolares	Dolares	Dolares
21066.1975	82135	2000	5271.8041	948.92474	4322.8794
14355.53438	95935	3300	-1735.4908	0	0
11484.4275	95935	3300	2533.7151	456.06872	2077.6464
8613.320625	95935	3300	6819.137	1227.4447	5591.6923
5742.21375	95935	3300	11120.935	2001.7682	9119.1664

Fuente: Elaborado por el Investigador

De la presente tabla se determina los indicadores necesarios para determinar la viabilidad del presente estudio.

Tabla 52: Flujo neto actualizado

Depreciación activos fijos	Flujo Neto Caja	FNC Actualizado (cálculo del VAN)	Flujo Neto Caja Acumulado	n
Dolares	Dolares	Dolares	Dolares	
	-420675	-420675	-420675	0
84135	88457.8794	85055.6532	-335619.35	1
99235	99235	91748.3358	-243871.01	2
99235	101312.646	90066.5737	-153804.44	3
99235	104826.692	89606.2959	-64198.141	4
99235	108354.166	89059.2265	24861.0852	5
99235	111895.201	88432.4023	113293.488	6
TIR (%)	11.54%	113293.488		
Pay-Back	6 años			
Interés para VAN	4%			
VAN	113293.4875			

Fuente: Elaborado por el Investigador

El indicador financiero económico es el valor actual neto (VAN) de 113293 y de un 4% mayor al teórico para determinar la viabilidad del estudio propuesto. El estudio propuesto determinado por los flujos proyectados al descontar la inversión queda la ganancia en el 6to periodo de ciento trece mil doscientos noventa y tres Dólares Americanos (\$ 113293).

El retorno de la Inversión determinado por el TIR es de un 11,53 %, indicador que muestra la inversión recuperada durante los 5 primeros años con una ganancia en el 6to año en la generación de energía eléctrica, considerándose rentable al TIR esperado del 10% para proyectos de la proporción de inversión económica como el propuesto, además de ser mayor a tasas de financiación de mercados financieros.

Por lo tanto, se acepta la viabilidad técnica, financiera económica al Sistema de Gasificación propuesto en la presente investigación.

4.4. Discusión de Resultados

De acuerdo a la Investigación presentada por (Silva Guerrero 2017) “Diseño de una planta de procesamiento de cascarilla de arroz para la producción de óxido de silicio amorfo y de energía eléctrica” en la Universidad Escuela Politécnica Nacional de Quito Ecuador, sustenta:

El procesamiento de 36 toneladas de cascarilla de arroz por día, trabajando 345 días al año, genera 1696,08 toneladas de dióxido de silicio amorfo y 51119200,00 kWh de energía eléctrica por año. La pureza del dióxido de silicio amorfo producido es 82,33%.

El estudio de pre factibilidad económica calcula un valor de inversión inicial para la realización del proyecto de 6111067,20 USD. El punto de equilibrio se

alcanza con la producción de 696,21 toneladas de dióxido de silicio amorfo al año.

Los indicadores TIR y VAN, a 10 años de proyecto, con una tasa de interés pasiva referencial de 4,96%, son 4,08% y 296197,09 USD, respectivamente. Esto hace que el proyecto no sea rentable.

Se analiza además la inversión a 20 años plazo. Se obtiene un TIR del 10,83% con un VAN de 3529261,64 USD.

El aumento de la producción también aumenta los valores TIR y VAN, ya sea a 10 o a 20 años plazo. Con una producción de dióxido de silicio de 3000 toneladas por año, lo que representa un aumento del 76,88% con respecto a la producción inicial, se obtienen valores de TIR de 24,82% a 10 años plazo y 27,69% a 20 años plazo. El VAN es 7521434,74 USD a 10 años y 16273424,74 USD a 20 años. (Silva Guerrero 2017, 18)

En la presente investigación realizada para la generación de energía eléctrica mediante gasificación de la cascarilla de arroz para el Molino los Ángeles en la Provincia de Lambayeque, se utilizó un consumo de biomasa de 6307200 ton/año con una inversión de \$ 420675 de Generación de energía neta en un año de 2775168 kWh, con un TIR favorable de 11,53% con un VAN del 4%, recuperado en 6 años, el retorno de la inversión se tiene ya en el 5to año del estudio según la cuenta de resultados, una proporción adecuada al estudio en discusión presentada por la Universidad Politécnica Nacional de Quito Ecuador.

CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

El estudio “Generación de energía eléctrica mediante gasificación de la cascarilla de arroz para un Molino en Lambayeque” se encontró las siguientes conclusiones para los objetivos propuestos:

5.1.1. Se propone un Sistema de Gasificación que utilizará la cantidad de Biomasa para el gasificador de 6307,2 Tn/año representando un caudal biomasa = 0,28 kg/s para generar un valor de calentamiento Inferior (LHV) al 10% humedad (MJ/kg) = 12,54 MJ/kg y una potencia térmica de la cascarilla de arroz que se calcula multiplicando el caudal de biomasa por el LHV teniendo en cuenta que se ha reducido el contenido de humedad de acuerdo a la biomasa procedente del Molino los Ángeles, de modo que: $P_{casc} \text{ (MW)} = 3,51 \text{ MW}$.

El gas de síntesis y los humos permitirán una generación de 2,428 MW, obteniendo una potencia a la salida del generador de 607 kW. Dicha potencia abastece totalmente la potencia demandada por el Molino Los Ángeles.

5.1.2. Se demostró la viabilidad técnica determinando la cantidad de cascarilla de arroz producida por el Molino los Ángeles es de 28 Ton por día, representa la cantidad necesaria para alimentar el gasificador de 0,28 kg/s equivalente a 1020 kg/h de un 10% de humedad para generar 500 a 750 kWe de acuerdo a la capacidad del generador según el estudio propuesto. De acuerdo al estudio realizado, el Investigador propone el siguiente Sistema de Gasificación con las características para suplir las necesidades técnicas por el Molino Los Ángeles. Se propuso las características técnicas al Vendor y de acuerdo a los datos presentados la propuesta es el siguiente: Sistema de Gasificación con una vida útil de 65000 horas (trabajando anual a razón de 8640 horas), de 7 años y

medio de funcionamiento antes de su primer mantenimiento, con las características siguientes: Gasificador "Ankur" basado en el Modelo Power Pack "Ankur" Modelo FBG-850 junto con accesorios básicos y auxiliares y un Generador Modelo - LH500GFJ Alternador Siemens con Panel de Control, Debidamente modificado para operar 100% en modo gas con un conveniente alternador para proveer una potencia bruta de al menos 500 kWe hasta los 750 kWe, en modo conectado a una red junto con una provisión para el control de carga variable.

5.1.3. Se logró demostrar la viabilidad económica financiera para el estudio propuesto, obteniendo los siguientes indicadores financieros económicos: Un valor actual neto (VAN) de 113293 y de un 4% mayor al teórico para determinar la viabilidad del estudio propuesto.

El estudio propuesto determinado por los flujos proyectados al descontar la inversión queda la ganancia en el 6to periodo de ciento trece mil doscientos noventa y tres Dólares Americanos (\$ 113293).

El retorno de la Inversión determinado por el TIR es de un 11,53 %, indicador que muestra la inversión recuperada durante los 5 primeros años con una ganancia en el 6to año en la generación de energía eléctrica, considerándose rentable al TIR esperado del 10% para proyectos de la proporción de inversión económica como el propuesto, además de ser mayor a tasas de financiación de mercados financieros. Por lo tanto, se acepta la viabilidad técnica, financiera económica al Sistema de Gasificación propuesto en la presente investigación.

5.2. Recomendaciones

5.2.1. Es posible obtener una mayor eficiencia en estos sistemas de gasificación si se usa como agente gasificante oxígeno o hidrógeno, ya que el uso de uno u otro influye en la composición y en el valor de calentamiento del gas de síntesis que se obtendrá. Esto implica un nuevo estudio y una nueva propuesta para adecuarlo totalmente al sistema de gasificación que usa como agente gasificante el aire.

5.2.2. El uso de un Software para la simulación del proceso de gasificación de la cascarilla de arroz, selección de los equipos adecuados y obtención de cálculos según el volumen disponible de biomasa, puede ayudar a un mejor estudio y planteamiento de propuestas de generación de energía eléctrica a través de sistemas de gasificación de biomasa.

5.2.3. Existen entidades y organizaciones que financian proyectos de energía renovable que contribuyen a mitigar la emisión de gases efecto invernadero (GEI) al medioambiente, siendo uno de estos mecanismos el de “Bonos de Carbono”, establecido en el Protocolo de Kyoto.

Este sistema ofrece incentivos económicos para que empresas privadas contribuyan a la mejora de la calidad ambiental y se consiga regular la emisión generada por sus procesos productivos. Es así que se puede realizar el estudio para poder cumplir con todas las exigencias que demandan dicha certificación y poder contribuir con el medio ambiente y obtener una mejor viabilidad del proyecto.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Ankur. *Cotización del Sistema de Gasificación*. México, 2018.
- Asprilla, D. B. *Estudio de Sistemas Híbridos de energía renovable (solar - gasificación de biomasa) como alternativa para satisfacer necesidades energeticas en zonas no interconectadas del Departamento de Chocó*. Tesis, Universidad Nacional de Colombia, Medellin - Colombia, 2016.
- CONAMA. *Análisis comparativo de las tecnologías de valorización de residuos basados en la gasificación*. España, 2014.
- ENERGIA, SECRETARIA ARGENTINA. *Energías Renovables 2008 - Energía Biomasa*. 2008.
- Estremadoyro, J. *Análisis de factibilidad para producción de energía utilizando un gasificador de hojas de caña de azúcar*. Tesis, Universidad de Piura, Lima - Perú, 2015.
- Hernandez, Roberto, Carlos Fernandez, y Maria Baptista. *Metodología de Investigacion*. Cap. 8, 174-176. Mexico D.F.: McGraw-Hill, 2015.
- Huaraz, C. Y. *Diseño de un gasificador de 25kW para aplicaciones domésticas usando como combustible cascarilla de arroz*. Tesis, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima - Perú, 2013.
- Huaripoma, D. A. *Diseño de un gasificador Downdraft invertido de 2600 kcal/h que emplea cascarilla de arroz como combustible*. Tesis, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima - Perú, 2015.
- IDAE. *Energía de la Biomasa*. Instituto para la Diversificación y ahorro de la energía, España, 2007.

INEI. *Producción de arroz cáscara creció 55,6% en abril del presente año*. Lima, 2018.

MolinoLosÁngeles. *Molino los Ángeles*. Lambayeque, 2018.

Psetizki, V. *Energía eléctrica con cáscara de arroz*. *BBC Mundo*, Noviembre 2009.

Quintana, S. J. y Salazar, J. E. *Diseño de una Minicentral Termoeléctrica de 5kW, utilizando la cascarilla de arroz como combustible en el Caserío Miraflores - Monsefú del Departamento de Lambayeque*. Tesis, Universidad Señor de Sipán, Chiclayo - Perú, 2017.

Rincon, S., Gomez, A. y Klose, W. *Gasificación de biomasa residual de procesamiento agroindustrial*. Instituto de Energia Térmica, Colombia, 2011.

Rojas, C. A. *Generación de biogas a partir de la cascarilla de arroz para reducir costos energeticos en la piladora la Merced S.R.L.* Tesis, Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, Chiclayo, Peru, 2018.

Ruiz, Martínez. *Simulación del proceso de gasificación termoquímica para la obtención de gas combustible, aplicado a cascarilla de café*. Tesis, Universidad Veracruzana, México, 2015.

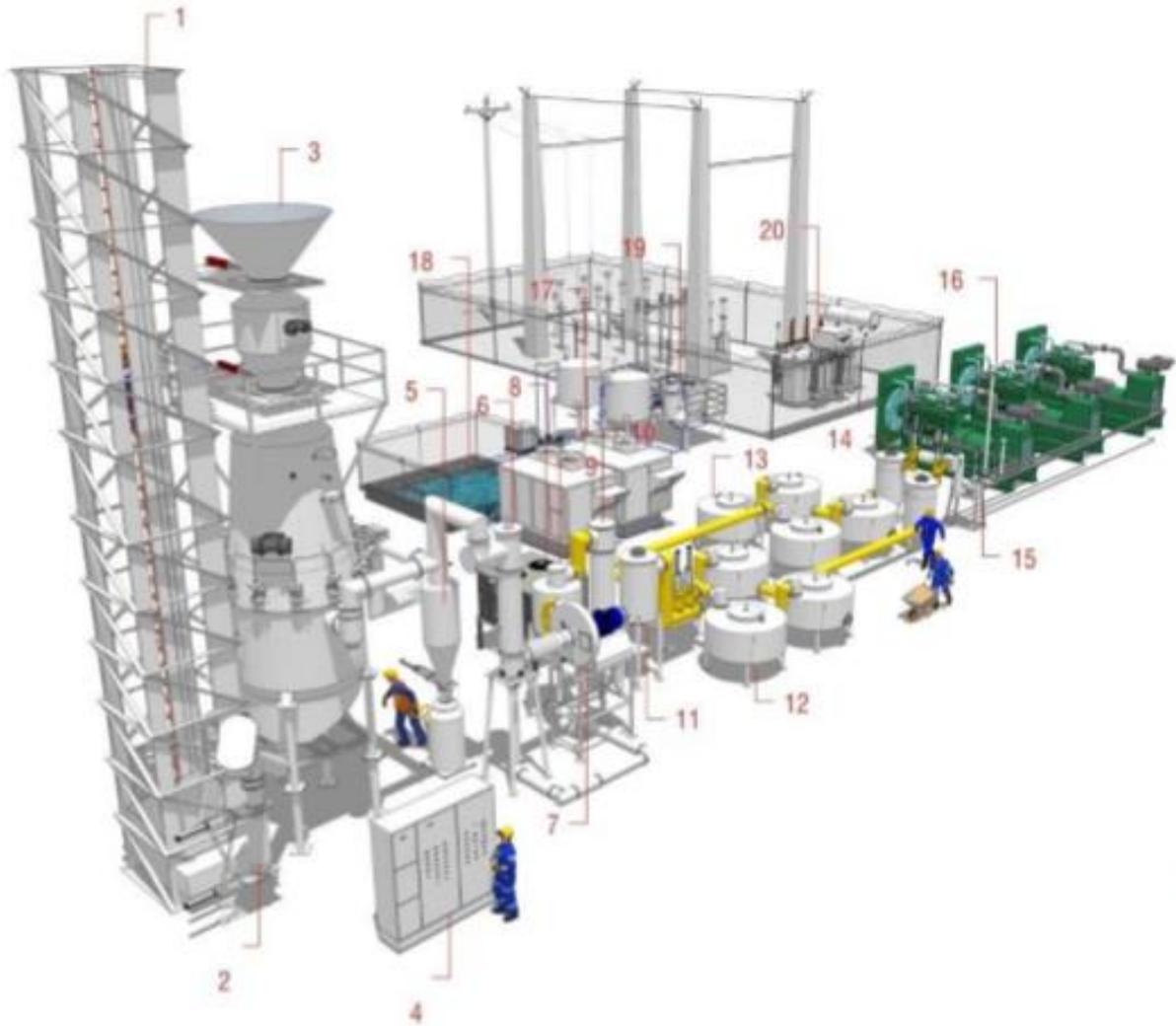
Sánchez, A. *Diseño de una planta de gasificación con cogeneración para el aprovechamiento energético de la cascarilla de arroz en un proceso industrial*. Madrid, 2017.

Silva Guerrero, P. E. *Diseño de una planta de procesamiento de cascarilla de arroz para la producción de óxido de silicio amorfo y de energía eléctrica*. Tesis, Escuela Politécnica Nacional, Quito - Ecuador, 2017.

Urquizo, J., Acero, H. y Rodriguez, J. *Reemplazar el uso de diesel por cascarilla de arroz empleado para generación de vapor, aspectos técnicos y económicos*. *Revista Tecnológica ESPOL*, 2015.

ANEXOS

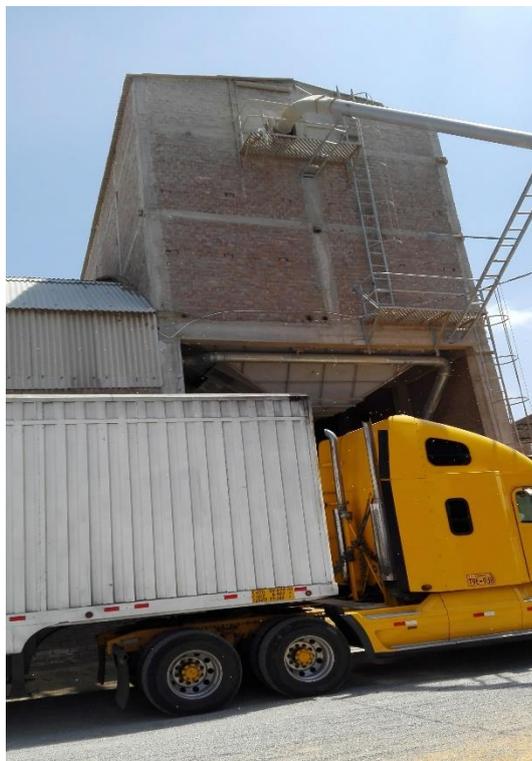
ANEXO 1: ESQUEMA TÍPICO PARA UNA PLANTA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON GASIFICACIÓN DE CASCARILLA DE ARROZ



Legend					
No.	Description	No.	Description	No.	Description
1	Skip Charger	8	Chiller	15	Header Box and Flare
2	Dry Ash Collection Box	9	Separation Box	16	Biomass Generator Sets
3	Gasifier	10	Heat Exchanger	17	Cooling Towers
4	Control Panel	11	Mist Eliminator	18	Water Pond
5	Cyclone	12	Primary Fine Filters	19	Water Treatment Plant
6	Promiser	13	Secondary Fine Filters	20	Transformer
7	Blower	14	Pleated Filters		

Fuente: Ankur, 2018

ANEXO 2: TRANSPORTE Y ALMACENAJE DE CASCARILLA DE ARROZ EN MOLINO LOS ÁNGELES



Fuente: Elaboración Propia

ANEXO 3: SOLICITUD DE VISITA TÉCNICA A MOLINO LOS ÁNGELES

“Año del Diálogo y Reconciliación Nacional”

Lambayeque, 05 de Diciembre de 2018

**RECURSOS HUMANOS
MOLINO LOS ANGELES
PRESENTE.-**

De mi consideración:

Me place extenderle mi cordial saludo, en ocasión de solicitarle que yo, Edward Antonio Fernández García, identificado con DNI N° 77474434, Bachiller de la carrera profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, pueda tener el debido permiso de ustedes para realizar un proyecto de investigación en su prestigiosa empresa molinera “LOS ANGELES”.

He decidido visitar sus instalaciones para obtener información que me permita completar mi Proyecto sobre el tema de investigación relacionado con la “GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE GASIFICACIÓN DE LA CASCARILLA DE ARROZ PARA UN MOLINO EN LAMBAYEQUE”.

Por lo cual pido lo siguiente:

Se me permita una visita al interior de la empresa molinera mencionada y a la vez una entrevista con uno de los encargados de dicha empresa.

Agradecido por su cooperación y apoyo me despido de usted renovándole mi consideración y estima.

Atentamente,



EDWARD A. FERNANDEZ GARCIA
DNI: 77474434
CEL: 952867201



MOLINOS LOS ANGELES S.R.L.
Angel Salvador Eraz Delgado
GERENTE GENERAL