

UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL



**Viabilidad de producción de energía eléctrica con residuos de la industria
molinera Angie SAC para la reducción costos operativos**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO INDUSTRIAL**

AUTOR

Ibrahim Aramis Guisseppi Escalante Medina

ASESOR

Ysabel Nevado Rojas

<https://orcid.org/0000-0001-9995-0011>

Chiclayo, 2023

Viabilidad de producción de energía eléctrica con residuos de la industria molinera Angie SAC para la reducción costos operativos

PRESENTADA POR

Ibrahim Aramis Guisseppi Escalante Medina

A la Facultad de Ingeniería de la
Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo
para optar el título de

INGENIERO INDUSTRIAL

APROBADA POR

María Raquel Maxe Malca
PRESIDENTE

Fiorella Paola del Carmen Ruiz Rondón
SECRETARIO

Ysabel Nevado Rojas
VOCAL

Dedicatoria

A mis padres y hermana por siempre apoyarme durante todo el transcurso de mi carrera profesional y la ayuda que me brindaron durante la elaboración de este trabajo de investigación.

Agradecimientos

A Dios por brindarme salud y brindarme las fuerzas necesarias para seguir adelante.
A mis padres por darme la oportunidad de estudiar una carrera profesional además de apoyarme en todos mis años de estudio.
A mi hermana por acompañarme y siempre animarme a seguir adelante
A los docentes de la Universidad Santo Toribio de Mogrovejo por brindarme muchos conocimientos a lo largo de estos 5 años.
A la ingeniera Ysabel Nevado Rojas por guiarme y brindarme su ayuda durante el desarrollo de esta investigación

INFORME DE ORIGINALIDAD

24%

INDICE DE SIMILITUD

23%

FUENTES DE INTERNET

6%

PUBLICACIONES

10%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	4%
2	tesis.usat.edu.pe Fuente de Internet	1%
3	riunet.upv.es Fuente de Internet	1%
4	repository.uamerica.edu.co Fuente de Internet	1%
5	repositorio.uss.edu.pe Fuente de Internet	1%
6	www.dspace.espol.edu.ec Fuente de Internet	1%
7	repositorio.espe.edu.ec Fuente de Internet	<1%
8	sigaa.unifei.edu.br Fuente de Internet	<1%
9	www.coursehero.com Fuente de Internet	<1%

Índice

Resumen	7
Abstract	8
Introducción.....	9
Revisión de literatura.....	11
Materiales y métodos.....	16
Resultados y discusión	17
Discusiones.....	32
Conclusiones	34
Recomendaciones	35
Referencias	36
Anexos	44

Lista de tablas

Tabla 1: Producción de sacos de 50 Kg de arroz pilado periodo 2012-2021.....	18
Tabla 2: Producción de cascarilla de arroz en sacos de 50 Kg periodo 2012-2021	19
Tabla 3: Sacos de 50 Kg de cascarilla de arroz vendidos 2012-2021	20
Tabla 4: Consumo energético en kWh, del proceso productivo 2012-2021	21
Tabla 5: Promedios de producción de sacos de arroz, cascarilla y consumo energético	22
Tabla 6: Análisis Elemental de la cascarilla de arroz.....	22
Tabla 7: Análisis inmediato de la cascarilla de arroz.....	23
Tabla 8: Composición del syngas producido	24
Tabla 9: Resumen de Balance de masa	28
Tabla 10: Resumen de Balance de Energía	29
Tabla 9: Costo de maquinaria para la propuesta	30
Tabla 10: Costo de Mano de obra directa.....	30
Tabla 11: Costo operativos.....	30
Tabla 12: Resumen de costos de la propuesta	30
Tabla 13: Beneficios de la propuesta	31
Tabla 14: Gastos Administrativos	31
Tabla 15: Flujo de Caja Anual	31

Lista de figuras

Figura 1: Sustancias que ingresan y salen del gasificador	24
Figura 2: Sustancias que ingresan y salen del separador de partículas	26
Figura 3: Sustancias que ingresan y salen del intercambiador de calor.....	26
Figura 4: Sustancias que ingresan y salen del sistema de lavado.....	27
Figura 5: Sustancias que ingresan y salen del filtrado	27
Figura 6: Sustancias que ingresan y salen del motor a gas.....	28

Resumen

El objetivo de este trabajo de investigación es proponer la producción de energía eléctrica a partir de la cascarilla de arroz para la Molinera Angie SAC, con el fin de reducir sus costos operativos.

La empresa genera mensualmente 14,73 toneladas de cascarilla de arroz, de las cuales el 10,3% no se utiliza para otras actividades y el consumo eléctrico se promediaba en 2 946,85 kW mensuales para su proceso productivo.

La caracterización de la cascarilla mediante un análisis inmediato y elemental, obteniendo los siguientes porcentajes: 47,65% de C, 4,60% de H, 31,4% de O, 0,51% de N, 0,16% de S, 15,7% de cenizas, 14,67% de carbono fijo, 65,31% de carbono volátil, 8,5% de humedad y 16,73 MJ/kg de PCI. Con estos datos, el requerimiento energético y las formas en que la podemos usar, se propuso la gasificación como proceso a seguir.

Diseñado el sistema de gasificación, se realiza un balance de masa y energía, determinando que 0,1 kg de biomasa produce 5,18 kW, se calculó que la empresa produce en promedio 58,3 kg de cascarilla diariamente, que generaría 3 023,58 kW. Por lo tanto, el sistema satisface la cantidad de energía necesaria para el proceso productivo de la empresa.

El análisis financiero demostró que el proyecto es viable, con un TIR del 19,3%, el TMAR de 15%.

Así se concluye que la cascarilla de Molinera Angie SAC tiene el potencial de ser utilizada en la producción de energía eléctrica, y reducir sus costos operativos permitiendo usarla en todo su proceso productivo.

Palabras clave: Cascarilla de arroz, Gasificación, Biomasa, Syngas, energía eléctrica.

Abstract

The objective of this research work is to propose the production of electrical energy from rice husk for Molinera Angie SAC, in order to reduce its operating costs.

The company generates 14.73 tons of rice husk per month, of which 10.3% is not used for other activities and the electricity consumption averaged 2,946.85 kW per month for its production process.

The characterization of the scale through an immediate and elemental analysis, obtaining the following percentages: 47.65% C, 4.60% H, 31.4% O, 0.51% N, 0.16% S, 15.7% ash, 14.67% fixed carbon, 65.31% volatile carbon, 8.5% moisture, and 16.73 MJ/kg PCI. With these data, the energy requirement and the ways in which we can use it, gasification was proposed as a process to follow.

Designed the gasification system, a balance of mass and energy is carried out, determining that 0.1 kg of biomass produces 5.18 kW, it was calculated that the company produces an average of 58.3 kg of husk daily, which would generate 3,023, 58 kW. Therefore, the system satisfies the amount of energy necessary for the productive process of the company.

The financial analysis showed that the project is viable, with an IRR of 19.3%, the MARR of 15%.

Thus, it is concluded that the husk of Molinera Angie SAC has the potential to be used in the production of electrical energy, and to reduce its operating costs, allowing it to be used throughout its production process.

Keywords: Rice husk, Gasification, Biomass, Syngas, electrical energy.

Introducción

En la actualidad, las industrias usan diferentes tipos de energía comercial, pero principalmente usan la energía eléctrica o aquella producida por la combustión de hidrocarburos esta energía se utiliza para mover todo tipo de maquinaria y así poder realizar los procesos necesarios para convertir la materia prima en productos terminados.

Este tipo de energía tiene desventajas, una de las principales es que afectan al medio ambiente ya que las emisiones producidas en la combustión, generan la contaminación del aire, además, el consumo de energía en esta industria es elevada ya que es requerida en todas las maquinarias lo que conlleva a que aumenten los gastos de la misma, por esto en los últimos tiempos las empresas buscan el uso de energías renovables pues se reducirían sus costos energéticos y al mismo tiempo convierten su proceso en uno más amigable con el medio ambiente.

En el caso de los molinos de arroz, el principal residuo que se obtiene es la cascarilla de arroz, este residuo puede ser usado para la generación de energía como lo señalan Quiceno y Mosquera [1], en su investigación “Alternativas tecnológicas para el uso de cascarilla de arroz como combustible”, mencionan que la cascarilla de arroz ha comenzado a ser usada por muchos países para generar energía eléctrica más limpia y a bajo costo, es aprovechado mediante procesos de combustión, gasificación, pirolisis u otros.

El instituto tecnológico agroalimentario y la empresa valenciana Dacsa, en España utilizaron la cascarilla de arroz como biomasa para la instalación de una planta de cogeneración eléctrica, la cual generaría una potencia de 2 MW. [2]

La cascarilla de arroz es un residuo agrícola que se obtiene a partir del proceso de molienda de arroz, que constituye alrededor del 20% de la producción mundial de arroz [3], para el Perú en febrero del 2022 se produjo alrededor de 189 mil 440 toneladas de cascarilla de arroz [4]. Puede ser usado como materia prima para poder producir energía mediante la combustión podemos aprovechar este residuo como fuente de materia prima para alimentar un gasificador y este a su vez produzca energía para el molino.

Según el INEI en octubre del año 2021 se señaló que la producción de cáscara de arroz cáscara fue de 328 mil 734 toneladas y aumento en un 17,2% con respecto al año pasado, siendo los mayores productores de nuestro país los departamentos de Piura (233,6%) y San Martín (16,9%) que aportaron el 68% del total nacional, en el caso de Lambayeque aporta un 23,8%. [5]

En el trabajo se plantea que la cascarilla debe ser usada para producir energía por lo que, evaluar el consumo energético del país es necesario, por ello podemos decir que en el año 2019

según [6] el consumo total final para este año del país fue de 921 788,5 TJ de la cual se puede identificar las siguientes fuentes energéticas usadas: 25,9% DB5/MGO; 19,5% electricidad; 11% gas; 10% GLP; 9,3% leña; 8,9% gasohol y un 15,4% distribuido entre otros como el carbón mineral, turbo, gasolina, motor, bagazo y bosta & yareta.

Para el mes de diciembre del año 2021 según [7] la producción de energía eléctrica a nivel nacional se registró que fue de 4 984,3 GWh, del cual un 61,21% fue generado por energía hidráulica; 32,20% por gas natural; 2,89% por energía eólica; 1,48% por energía solar, 1,16% por diésel; 1,04% por bagazo/biogás y un 0,02% por vapor o cogeneración.

Durante la producción de energía también se produce grandes cantidades de CO₂ las cuales son emitidas al aire y lo contaminan, en el año 2019 la cantidad de las emisiones de CO₂ generadas durante la producción de energía fue de 16 758,7 millones de kilogramos; de los cuales se divide en 74,79% CO₂ por producción de energía con hidrocarburos sólidos y gases; de 15,92% de CO₂ por producción de energía con biomasa; 5,98% CO₂ por producción de energía con hidrocarburos líquidos y 3,31% de CO₂ por producción de energía con carbón y sus derivados. [6].

La Molinera Angie SAC, se dedica a la producción y venta de sacos de arroz en la presentación de sacos de 50 kg, con una producción registrada en el año 2021 de 3 752 sacos de 50 kg de arroz mensual. Asimismo, la empresa vende el 92% de la cascarilla que es obtenida como residuo en su proceso productivo, quedando un 10,3% de residuo por aprovechar. Estas grandes cantidades de cascarilla sobrante puede ser aprovechada con una valoración energética que permitirá cubrir el requerimiento de energía de la empresa reduciendo sus costos y contribuyendo, además a la reducción de impactos generados por la cascarilla residual.

La molinera para producir un saco de arroz en la presentación de 50 Kg consume un total de 167 kW, también gracias a datos brindados por la empresa podemos saber que en promedio usa 43 114,89 kWh de manera mensual, esto durante el periodo del año 2021, por lo que si la empresa pudiera producir su propia energía puede utilizarla en su línea de producción sus costos operativos disminuirían puesto que los costos energéticos que forman parte de los costos operativo que representa un promedio de S/. 18 635,20 nuevos soles se reducirían ya que el consumo de energía pública también disminuiría.

Por lo tanto, este trabajo de investigación plantea el siguiente problema:

¿Cuál es la viabilidad de producir energía eléctrica a partir de la cascarilla de arroz en la Molinera Angie S.A.C. para reducir sus costos operativos?

Para lograr esto se ha planteado como objetivo general: “Determinar la viabilidad técnica y económica de la producción de energía eléctrica a partir de la cascarilla de arroz para reducir

los costos operativos en la molinera Angie SAC” y como objetivos específicos: “diagnosticar la situación actual del proceso productivo de arroz y su consumo energético de la Molinera Angie SAC”, “determinar y caracterizar la cascarilla de arroz de la Molinera Angie SAC”, “realizar un estudio técnico y tecnológico de la producción de energía a partir de la cascarilla de arroz”, “determinar el impacto económico financiero de la de la propuesta de producción de energía eléctrica en la molinera Angie SAC”.

Revisión de literatura

En la presente investigación se emplearán diferentes terminologías de las cuales debemos tener presente sus conceptos con el fin de que sea mejor el entendimiento del tema propuesto.

Tenemos a la biomasa que, según la RAE, es aquella materia orgánica que resulta de un proceso biológico, espontáneo o provocado y que puede ser utilizado para producir energía [8]. Otros autores como el IDAE de España, menciona que es un conjunto de materia orgánica de origen vegetal o animal procedentes de una transformación natural o artificial, además de poder ser usada para producir energía renovable [9]

El balance de masa y energía es otro concepto básico para esta investigación, pues, es un método muy usado por la ingeniería que permite determinar el flujo de materia y energía que posee un proceso industrial o entre las diferentes operaciones que lo integran. Para realizar este tipo de cálculo se debe tener en cuenta el principio de equilibrio es decir que todo lo que entra al sistema analizado debe salir [10].

Uno de los términos que también debemos tener presentes es la entalpía la cual es una reacción química que representa la cantidad de energía absorbida o cedida por un sistema termodinámico, esta se calcula a una presión constante de 1 atm [11].

Otro de los conceptos que debemos tener en cuenta es mediante que procesos la cascarilla de arroz puede convertirse en un combustible para producir energía, entre los cuales tenemos a la combustión que, según la RAE, la combustión es una reacción química entre el oxígeno y un material oxidable que produce energía que se manifiesta como una llama [12], este proceso se produce a altas temperaturas y de este se obtiene CO₂ agua y cenizas.

El siguiente proceso es la pirolisis se da en un medio que no tenga oxígeno, se hace uso del calor llegando a una temperatura entre los 300 y 800 °C para degradar térmicamente una sustancia sin que se produzca la reacción de combustión, de este proceso se obtiene CO₂, CO, H₂ y CH₄ también se obtiene dependiendo del residuo a tratar alquitranes, fenoles, cenizas [13].

Como último proceso se encuentra la gasificación que es una reacción termoquímica que se produce con poco oxígeno que forma gases que pueden ser usado para calderas, motores o turbinas y de esta manera poder producir energía, el gas resultante también es denominado

“syngas” y está compuesto por CO, CO₂, CH₄, H₂, SO₂, N₂, además cabe resaltar que este proceso se da a temperaturas superiores a los 750 °C, y su eficiencia de rendimiento eléctrico puede ser entre el 30 y 32% eficiencia la cual aumentará según el tipo de equipo usado para producir energía con la ayuda del syngas resultante [14].

Para determinar si es posible que la cascarilla de arroz se puede usar para la producción de energía eléctrica se consultaron trabajos de investigación de otros autores:

Araujo Laura, Silva dos Santos Iván Felipe, Machado Oliveira Gabriel, Tiago Filho Geraldo Lucio, Mambeli Barros Regina [15] en su investigación “Rice husk energy production in Brasil: An economic and energy extensive analysis”, ellos analizaron el potencial energético que tiene la cascarilla de arroz para producir energía por ello se plantearon como objetivos determinar la cantidad de energía que se produce con la cascarilla de arroz, como metodología para llevar a cabo la investigación determinaron el potencial energético de la cascarilla, luego se determinó el proceso para la generación de energía, y por último se realizó un estudio de viabilidad económica. Como resultado, el potencial energético de la cascarilla en Brasil era entre 2 a 3 MW. El estudio de viabilidad económica demostró que, se evitó emitir 3,08 Mt de CO, lo que representa el 0,37% de CO producido a nivel de todo Brasil una cifra pequeña pero significativa al ser un solo tipo de residuo, para llevar a cabo este proyecto se necesita una inversión de 59,14 USD/MWh.

Quispe Isabel, Navia Rodrigo, Kahhat Ramzy [16] en su investigación “Evaluación del ciclo de vida de la cáscara de arroz como fuente de energía. un estudio de caso peruano”, se analizó cuanto tiempo de vida tiene la cascarilla de arroz al ser usada como energía en el Perú, plantearon como objetivos realizar una evaluación técnica y ambiental de la producción de energía con la cascarilla de arroz siendo esta una fuente de energía alternativa al carbón. Se aplicó la siguiente metodología: identificar y cuantificar los aspectos ambientales y potenciales desde obtener la materia prima, la distribución de la misma y el uso final de la disposición, analizar los inventarios de materia prima, determinar el mejor proceso para obtener energía con cáscara de arroz y por último se analizó el impacto ambiental. Como resultados, se obtuvo que el análisis del inventario sirvió para identificar el grado del impacto ambiental; el proceso que se escogió fue el de realizar una combustión haciendo uso un lecho fluidizado debido a los costos bajos y porque existía una limitación de materia prima a usar. El análisis del impacto ambiental demostró que la cáscara de arroz produce un impacto del 93%, el cual se vería reducido a un 74% si se usa a este residuo como materia prima de producción de energía.

Lopes Grotto Carlos Guilherme, Gomes Colares Carla Joviana, Rodrigues Lima Daniel, Henrique Pereira Douglas y Teixeira do Vale Ailton [17] en su investigación “Potencial

energético de la biomasa a partir de dos tipos de organismos genéticamente mejoradas de arroz las cáscaras en Brasil: una teórico-experimental”, analizaron cuál era el potencial energético que tendría las biomásas de cáscara de arroz modificadas, para lo cual se plantearon como objetivo caracterizar y evaluar el potencial energético de la biomasa residual de organismos que fueron modificados genéticamente de diferentes variedades de arroz. Realizaron un análisis químico proximal, análisis termogravimétrico, un análisis del valor calorífico, y un análisis estadístico de tres muestras de arroz. El análisis químico proximal arrojó como resultados los valores de humedad que fueron de 9,89%, 10,50% y 10,93%, para el análisis estadístico se utilizó un método de análisis de varianza por el cual se demostró que existía un 5% de diferencia entre los promedios de FCC (Fija contenida de carbono), la realización del valor calorífico arrojó como resultado valores de 4 409,50 kcal/kg, 4 488,00 kcal/kg y 4 34300 kcal/kg. El análisis termogravimétrico mostro que hubo una pérdida de masa de 7%, 8% y 9%.

Diemuodeke Ogheneruona E., Mulugetta Yacob y Imran Muhammad [18] en su investigación “Análisis tecno-económico y ambiental de factibilidad de cáscaras de arroz despedido sistema de energía para su aplicación en un clúster de molinos de arroz”, analizaron la viabilidad de la instalación de un sistema energético a partir de cáscara de arroz para molinos de arroz. El objetivo del trabajo fue presentar un estudio tecno-económico y demostrar si es viable instalar un sistema energético empleando cáscara de arroz para molinos de arroz. Se definieron los límites y descripción del sistema, la evaluación de la demanda de la energía producida, la realización del modelo teórico del sistema. Como resultados del análisis técnico encontrado dentro del modelo teórico se menciona en este que el sistema debe tener una temperatura de combustión de 825 °C y una presión de 101,325 kPa, el análisis de demanda muestra que existe un 1,61 MW de demanda con un déficit de 36,6%, determinaron también que la eficiencia del sistema es de 79,9%. En cuanto a los costos para este sistema, se estima que se necesita una inversión de 0,123 USD/kWh.

Tipanluisa Luis, Barriga Alfredo [19] en su investigación “Valoración energética de la cascarilla de arroz utilizando un sistema térmico con capacidad de 60 000 kcal / h.” analizaron el potencial energético de la cascarilla de arroz si es usada en un sistema térmico de 60 000 kcal/h, se plantearon como objetivo realizar una valorización energética de la cascarilla de arroz. Para realizar esta valorización primero se hizo un análisis de de contenido de humedad, caracterización de la biomasa usada como materia prima, cálculo del flujo energético de la cámara de combustión y la eficiencia de la combustión de la biomasa. En los resultados del análisis de humedad se determinó que se haría uso del arroz con 10% de humedad, por parte de la biomasa al quemar un 1 kg de esta produce 3,6 kW, al analizar el flujo energético se pudo

determinar que con este sistema térmico se genera en promedio 90,72/106 MJ lo que equivale a 14,823 barriles de petróleo, también se caracterizó las propiedades del sistema como la temperatura de combustión la cual debe ser de 680 °C la temperatura a la que debe ingresar el aire debe ser de 25,48 °C y la salida 139,98 °C.

Ortega Ramírez Tatiana, Quispe Trinidad María [20] en su investigación titulada “Alternativas del uso de la cascarilla de arroz como fuente energética”, se analiza la posibilidad de poder utilizar la cascarilla de arroz como fuente de energía, por ello se propuso como objetivo el de determinar el potencial que posee la cascarilla de arroz como fuente de energía para cubrir la demanda de esta en Colombia. Para lograr esto, primero se realizó una investigación de fuentes de información sobre que usos se le puede dar a cascarilla de arroz, luego realizó una investigación sobre la producción de arroz y de cascarilla en Colombia, luego analizó los métodos de conversión de energía y por último determinó si la cascarilla tenía el potencial de poder ser usada como fuente de energía. Como resultado obtuvo los usos más comunes de la cascarilla que abarcaba ser usada como abono, como parte de materiales de construcción para mejorar las propiedades de los ladrillos y el cemento, bioaceite, biocarbón y como biocombustible, posterior a ello se buscó información sobre cómo llevar a cabo el proceso de conversión de la cascarilla en energía eléctrica y por último se concluyó que si era factible debido a que en Colombia, la producción de cascarilla de arroz llegaba a las 400 000 toneladas de cascarilla de arroz al año, de esta cantidad solo un 15% es aprovechada.

Osorio Aguirre Liliana [21] en su investigación titulada “Análisis técnico económico para el uso de la cascarilla de arroz en la generación de energía eléctrica a partir del proceso de gasificación. caso de estudio: molino de arroz Pacande de la ciudad de Villavicencio – meta”, en el que se analiza el uso alternativo de la cascarilla producida por el molino Pacande teniendo como objetivo general el de realizar un análisis técnico-económico para el uso de la biomasa residual del molino Pacande, como objetivos específicos era determinar la estructura fisicoquímica de la cascarilla, estimar el potencial energético para la gasificación de la cascarilla y realizar un análisis técnico económico sobre el aprovechamiento de la cascarilla en la generación de energía eléctrica, como metodología a seguir fue analizar la estructura fisicoquímica de la cascarilla, luego se dimensionó el sistema de gasificación y se realizó un estudio de VAN y TIR para la parte económica. Como resultado de esto, se obtuvo que su cascarilla contaba con 36% de carbono, 5,83% de hidrógeno, nitrógeno 3,31%, azufre 0,01%, oxígeno 36,65%, humedad 9,3%, cenizas 17,6%, carbono volátil 57,6% y carbono fijo 15,4%, su sistema de gasificación tiene un 65% de eficiencia y produce 4,705 kWh/año y por último se obtiene que le permite a la empresa ahorrar \$182 por cada kWh que consume.

Alcántara Gómez Edwin Jhohannes [22] en su investigación “Diseño de una central termoeléctrica utilizando cascarilla de arroz para reducir costos de consumo de energía eléctrica en los molinos de arroz de la provincia de Jaén” se desea reducir los costos energéticos de los molinos de Jaén esto utilizando la cascarilla de arroz que producen, como objetivo general se planteó el diseño de una central termoeléctrica que use como combustible la cascarilla de arroz y como objetivos específicos determinar el consumo de energía eléctrica y la producción de los molinos, calcular la potencial energético de la central termoeléctrica y realizar un análisis económico, para ello empleo como metodología, la recolección de datos para su propuesta, registro de máquinas necesarias para la central termoeléctrica, cálculo del potencial energético y un análisis de VAN y TIR. Como resultado se obtuvo que su sistema generaba 300 kWh, y la inversión del proyecto de \$579 169,76 soles se recuperarán en 5 años.

Catagua Gavilanez Jimmy D., Méndez Rodríguez Steven A. [23] en su investigación “Diseño de un sistema de generación de energía usando la cascarilla de arroz como fuente de energía”, se busca la implementación de un sistema generador de energía para cubrir la demanda energética de las empresas que producen arroz, como objetivo general es el diseñar un sistema de generación de energía con cascarilla de arroz, como específicos es el constatar que la cascarilla de arroz puede ser usada como combustible, estudiar las tecnologías necesarias para llevar a cabo la propuesta y evaluar la factibilidad técnica, económica y tecnológica, como metodología se buscó fuentes de información sobre cómo se puede convertir la cascarilla en combustible, se buscó información sobre la tecnología necesaria, cálculo del potencial energético y el análisis económico de la propuesta. Como se resultados se obtuvo que se usará una turbina en su sistema, y su potencia energética es de 350 kWh y posee un VAN de US\$ 6 600 000 y un TIR de 18%.

Peña Amaya Juan Fernando [24] en su investigación “Simulación del aprovechamiento de biogás a partir de la cáscara de arroz para cogeneración de energía eléctrica en un campo petrolero de la cuenca de llanos orientales” busca el reducir la contaminación y los gastos energéticos del campo petrolero por ello se plantearon como objetivo general el simular el aprovechamiento de bigas producido a partir de cascarilla de arroz, caracterización de la biomasa, determinar el potencial energético del biogás obtenido, así como también determinar la tecnología necesaria para llevar a cabo la propuesta y por último el análisis económico. En cuanto a sus resultados tenemos que su biogás posee 57% de metano, 43% de dióxido de carbono, su generación de energía está dada por una cogeneración por turbo gas y cogeneración de CHP lo cual permite aprovechar un 80,05% de la energía del biogás produciendo así 1,2 MWh y se obtuvo que el proyecto posee un VAN de US\$ 23 169,67 dólares y un TIR del 10%.

Materiales y métodos

Por el tipo de investigación, el presente trabajo posee las características de una investigación de tipo descriptiva debido a que el objetivo principal es el describir el sistema con el que se puede conseguir transformar la cascarilla en energía eléctrica, así como determinar los criterios que debe tener la cascarilla para poder ser usada como materia prima en el proceso de conversión en energía eléctrica, además se describió el cómo la producción de esta energía influyen en la reducción de los costos operativos de la empresa.

Para poder lograr el primer objetivo se realizó la observación de las instalaciones de la empresa para identificar las diferentes máquinas que forman parte del proceso productivo y aquellas que consumen corriente eléctrica, también se consideró el diagrama de flujo del proceso de la empresa, para de esta manera determinar la cantidad de energía eléctrica que consumen en su proceso de pilado de arroz. Se solicitó información a la empresa sobre las cantidades de arroz pilado y la cantidad de cascarilla que producen para así, determinar si se generan grandes cantidades de esta última debido a que es la materia prima que se usará en este proyecto. Por último, se recolectó información de la empresa sobre su consumo energético mensual identificado la cantidad de kWh que utiliza al mes y también el costo de este consumo para determinar la cantidad de gastos que realiza la empresa en energía eléctrica. Así mismo se evaluará el estado en que se encuentran las instalaciones eléctricas.

Para determinar y caracterizar la cascarilla de arroz se aplicó un análisis elemental el cual según [25] es una técnica que proporciona el contenido total de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre que se presenta en un amplio abanico de muestras de naturaleza orgánica e inorgánica, tanto sólidas como líquidas. Esta técnica ayuda a conocer las propiedades químicas que posee la materia prima y a la par se determina el análisis inmediato de la cascarilla que ayudará a conocer la proporción de carbón fijo, carbón volátil y humedad, con esta información se seleccionó el proceso de valorización energética que permita la viabilidad de poder convertir la cascarilla en un gas capaz de ser usado en la producción de energía eléctrica. Con el gas obtenido también se realizó el mismo tipo de análisis que con la cascarilla y poder determinar sus propiedades y el poder calorífico del gas obtenido además de determinar el sistema de conversión que permite la mejor eficiencia en la generación de energía eléctrica con este gas.

Con estas características se prosiguió con una búsqueda de información en fuentes bibliográficas sobre los diferentes procesos con los que se puede llegar a convertir la cascarilla de arroz en gas y así determinar según las características cuál de los métodos dará como resultado un gas apropiado para que sea usado después como fuente de alimentación para un sistema que generará la energía eléctrica.

En la determinación, el estudio técnico se consideró la información recopilada anteriormente y se establece la búsqueda de información sobre los equipos necesarios para la conversión de biomasa en un gas combustible y a partir de este la conversión en corriente eléctrica, según esto se deben considerar dos etapas la primera siendo la conversión de biomasa en gas y la segunda etapa la conversión del gas en energía eléctrica. El estudio tecnológico consiste en la evaluación de los diferentes tipos de equipos que sirven en las transformaciones deseadas los cuales se seleccionarán en función propiedades físicas y químicas de la cascarilla y las propiedades del gas deseado el cual tendrá como destino la conversión de corriente eléctrica.

Se realizó un balance de materia la cual como menciona [26] es una técnica que nos ayuda a contabilizar las entradas y salidas de los materiales de un proceso con el fin de obtener productos estandarizados, en el caso de nuestra investigación este balance de masa nos permite saber la cantidad en kg de cada producto que ingresa y sale de los diferentes procesos que abarca el sistema de producción de energía. También se realizó un balance de energía que al igual que el balance de materia registra las entradas y salidas, pero de la energía que hay en un proceso, con el cual se determinó la cantidad de energía en kWh que se generó con “x Kg” de cascarilla teniendo en cuenta que como mínimo se debe producir los kW necesarios para que funcione la línea de producción.

Por último, para determinar el impacto económico financiero se realizó un presupuesto de costo total de las máquinas empleadas para la conversión de la cascarilla en energía eléctrica de esta manera se determinó la inversión que necesitaba realizar la empresa, con esto en cuenta se procedió a determinar el VAN, TIR y el beneficio costo estos indicadores sirvieron para demostrar que se logró obtener un impacto económico positivo para la empresa.

Resultados y discusión

La Molinera Angie SAC es una empresa de la provincia de Chiclayo que se encuentra ubicada en la carretera Chiclayo-Ferreñafe N°UC14PR Vista Alegre y anexos Sector Laurel Km 4 (-6.739847658042445, -79.7941550010596), dedicada a la producción y comercialización de sacos de arroz pilado en la presentación de sacos de 50 Kg.

Se realizó una observación al proceso productivo de la empresa para de esa forma poder determinar los procesos que llevan a cabo y así conseguir su producto terminado sacos de arroz pilado y también poder identificar los equipos eléctricos que se usa en cada una de las áreas y de esta manera poder determinar la cantidad de consumo energético de la empresa como se muestra en el Anexo 1.

Una vez definido el proceso se prosiguió con la recolección de datos de producción de sacos de 50 Kg de arroz pilado y de la cascarilla producida por la empresa, esto debido a que la

materia prima que se planteó usar en el trabajo de investigación es la cascarilla de arroz la cual servirá para producción de energía eléctrica. También se debe resaltar que la empresa ensaca y vende la cascarilla de arroz de manera que esta sea usada como abono, sin embargo, no logra vender todos los sacos con cascarilla por lo que la empresa no recibe ganancias de esta, por lo que el proyecto plantea darle una utilidad a la cascarilla no vendida.

En la tabla 1 se muestra las cantidades de sacos de 50 Kg de arroz pilado producidos por la empresa en el periodo del año 2012 al 2021 estos datos nos ayudaron a conocer la actividad comercial de la empresa, así como determinar el tamaño de producción de la empresa, esto debido que a mayor producción de arroz pilado hay más producción de cascarilla de arroz la cual es la materia prima del proyecto.

Tabla 1: Producción de sacos de 50 Kg de arroz pilado periodo 2012-2021

Año	Mes	# de Sacos	Año	Mes	# de Sacos	Año	Mes	# de Sacos	Año	MES	# de Sacos
2012	Enero	15 990	2015	Enero	17 680	2018	Enero	15 860	2021	Enero	20 670
	Febrero	15 600		Febrero	17 810		Febrero	15 990		Junio	20 410
	Marzo	15 340		Marzo	17 550		Marzo	16 120		Julio	23 400
	Abril	15 470		Abril	17 420		Abril	16 120		Agosto	24 440
	Mayo	15 600		Mayo	16 640		Mayo	16 250		Setiembre	24 960
	Junio	16 120		Junio	15 470		Junio	15 990		Octubre	25 220
	Julio	15 470		Julio	16 120		Julio	15 860		Noviembre	25 090
	Agosto	15 990		Agosto	15 600		Agosto	15 600		Diciembre	25 350
	Setiembre	16 380		Setiembre	17 680		Setiembre	16 380			
	Octubre	16 640		Octubre	17 940		Octubre	15 340			
	Noviembre	17 030		Noviembre	18 200		Noviembre	15 210			
	Diciembre	17 160		Diciembre	18 460		Diciembre	15 860			
2013	Enero	17 550	2016	Enero	17 940	2019	Enero	15 600			
	Febrero	17 420		Febrero	17 680		Febrero	16 120			
	Marzo	17 030		Marzo	17 810		Marzo	15 860			
	Abril	17 290		Abril	17 550		Abril	15 990			
	Mayo	17 420		Mayo	17 420		Mayo	16 640			
	Junio	17 940		Junio	16 770		Junio	15 340			
	Julio	17 810		Julio	16 250		Julio	16 250			
	Agosto	17 550		Agosto	18 460		Agosto	16 380			
	Setiembre	17 290		Setiembre	18 070		Setiembre	15 080			
	Octubre	17 030		Octubre	17 810		Octubre	15 470			
	Noviembre	17 420		Noviembre	18 070		Noviembre	15 600			
	Diciembre	17 550		Diciembre	18 590		Diciembre	15 860			
2014	Enero	17 940	2017	Enero	18 460	2020	Enero	16 380			
	Febrero	16 640		Febrero	18 200		Febrero	16 900			
	Marzo	17 030		Marzo	17 940		Marzo	18 200			
	Abril	16 900		Abril	17 680		Abril	18 720			
	Mayo	18 070		Mayo	16 120		Mayo	18 200			
	Junio	17 940		Junio	16 250		Junio	17 940			
	Julio	17 680		Julio	16 120		Julio	18 590			
	Agosto	17 290		Agosto	18 200		Agosto	19 630			
	Setiembre	16 900		Setiembre	16 380		Setiembre	18 590			
	Octubre	17 030		Octubre	15 600		Octubre	19 890			
	Noviembre	17 420		Noviembre	17 420		Noviembre	19 760			
	Diciembre	17 290		Diciembre	16 120		Diciembre	20 150			

Fuente: Molinera Angie SAC

En la tabla 2 se muestra la cantidad de sacos de 50 Kg de cascarilla de arroz generada de manera mensual por la actividad productiva de la empresa, como fue indicado anteriormente la cascarilla es vendida para ser usada como abono para ello la cascarilla se coloca en sacos de 50 Kg.

Tabla 2: Producción de cascarilla de arroz en sacos de 50 Kg periodo 2012-2021

Año	Mes	#de sacos	Año	Mes	#de sacos	Año	Mes	#de sacos	Año	Mes	#de sacos
2012	Enero	3 198	2015	Enero	3 536	2018	Enero	3 172	2021	Enero	4 134
	Febrero	3 120		Febrero	3 562		Febrero	3 198		Junio	4 082
	Marzo	3 068		Marzo	3 510		Marzo	3 224		Julio	4 680
	Abril	3 094		Abril	3 484		Abril	3 224		Agosto	4 888
	Mayo	3 120		Mayo	3 328		Mayo	3 250		Setiembre	4 992
	Junio	3 224		Junio	3 094		Junio	3 198		Octubre	5 044
	Julio	3 094		Julio	3 224		Julio	3 172		Noviembre	5 018
	Agosto	3 198		Agosto	3 120		Agosto	3 120		Diciembre	5 070
	Setiembre	3 276		Setiembre	3 536		Setiembre	3 276			
	Octubre	3 328		Octubre	3 588		Octubre	3 068			
	Noviembre	3 406		Noviembre	3 640		Noviembre	3 042			
	Diciembre	3 432		Diciembre	3 692		Diciembre	3 172			
2013	Enero	3 510	2016	Enero	3 588	2019	Enero	3 120			
	Febrero	3 484		Febrero	3 536		Febrero	3 224			
	Marzo	3 406		Marzo	3 562		Marzo	3 172			
	Abril	3 458		Abril	3 510		Abril	3 198			
	Mayo	3 484		Mayo	3 484		Mayo	3 328			
	Junio	3 588		Junio	3 354		Junio	3 068			
	Julio	3 562		Julio	3 250		Julio	3 250			
	Agosto	3 510		Agosto	3 692		Agosto	3 276			
	Setiembre	3 458		Setiembre	3 614		Setiembre	3 016			
	Octubre	3 406		Octubre	3 562		Octubre	3 094			
	Noviembre	3 484		Noviembre	3 614		Noviembre	3 120			
	Diciembre	3 510		Diciembre	3 718		Diciembre	3 172			
2014	Enero	3 588	2017	Enero	3 692	2020	Enero	3 276			
	Febrero	3 328		Febrero	3 640		Febrero	3 380			
	Marzo	3 406		Marzo	3 588		Marzo	3 640			
	Abril	3 380		Abril	3 536		Abril	3 744			
	Mayo	3 614		Mayo	3 224		Mayo	3 640			
	Junio	3 588		Junio	3 250		Junio	3 588			
	Julio	3 536		Julio	3 224		Julio	3 718			
	Agosto	3 458		Agosto	3 640		Agosto	3 926			
	Setiembre	3 380		Setiembre	3 276		Setiembre	3 718			
	Octubre	3 406		Octubre	3 120		Octubre	3 978			
	Noviembre	3 484		Noviembre	3 484		Noviembre	3 952			
	Diciembre	3 458		Diciembre	3 224		Diciembre	4 030			

Fuente: Molinera Angie SAC.

En la tabla 3 se muestran la cantidad de sacos vendidos del 2012 al 2021, puesto que no se venden todos en su totalidad.

Tabla 3: Sacos de 50 Kg de cascarilla de arroz vendidos 2012-2021

Año	Mes	Sacos vendidos	Ganancias	Año	Mes	Sacos vendidos	Ganancias	Año	Mes	Sacos vendidos	Ganancias
2012	Ene	2 960	s/14 800,00	2013	Ene	2 970	s/14 850,00	2014	Ene	2 985	s/14 925,00
	Feb	2 990	s/14 950,00		Feb	2 975	s/14 875,00		Feb	2 980	s/14 900,00
	Mar	2 980	s/14 900,00		Mar	2 985	s/14 925,00		Mar	2 970	s/14 850,00
	Abr	2 995	s/14 975,00		Abr	2 970	s/14 850,00		Abr	2 965	s/14 825,00
	May	3 000	s/15 000,00		May	3 000	s/15 000,00		May	2 975	s/14 875,00
	Jun	3 015	s/15 075,00		Jun	2 980	s/14 900,00		Jun	2 985	s/14 925,00
	Jul	2 990	s/14 950,00		Jul	2 995	s/14 975,00		Jul	2 980	s/14 900,00
	Ago	2 995	s/14 975,00		Ago	3 010	s/15 050,00		Ago	2 970	s/14 850,00
	Set	2 980	s/14 900,00		Set	2 990	s/14 950,00		Set	2 960	s/14 800,00
	Oct	2 970	s/14 850,00		Oct	2 970	s/14 850,00		Oct	2 965	s/14 825,00
	Nov	2 975	s/14 875,00		Nov	2 985	s/14 925,00		Nov	2 970	s/14 850,00
	Dic	2 980	s/14 900,00		Dic	2 975	s/14 875,00		Dic	2 980	s/14 900,00
2015	Ene	3 000	s/15 000,00	2016	Ene	2 995	s/14 975,00	2017	Ene	2 960	s/14 800,00
	Feb	2 990	s/14 950,00		Feb	2 990	s/14 950,00		Feb	2 970	s/14 850,00
	Mar	2 985	s/14 925,00		Mar	3 000	s/15 000,00		Mar	2 965	s/14 825,00
	Abr	3 010	s/15 050,00		Abr	2 980	s/14 900,00		Abr	2 975	s/14 875,00
	May	2 995	s/14 975,00		May	2 975	s/14 875,00		May	2 980	s/14 900,00
	Jun	2 990	s/14 950,00		Jun	2 970	s/14 850,00		Jun	2 985	s/14 925,00
	Jul	3 000	s/15 000,00		Jul	2 980	s/14 900,00		Jul	2 975	s/14 875,00
	Ago	2 980	s/14 900,00		Ago	2 990	s/14 950,00		Ago	2 990	s/14 950,00
	Set	2 975	s/14 875,00		Set	2 985	s/14 925,00		Set	3 000	s/15 000,00
	Oct	2 970	s/14 850,00		Oct	2 970	s/14 850,00		Oct	2 995	s/14 975,00
	Nov	2 980	s/14 900,00		Nov	2 965	s/14 825,00		Nov	3 000	s/15 000,00
	Dic	2 985	s/14 925,00		Dic	2 960	s/14 800,00		Dic	2 990	s/14 950,00
2018	Ene	2 980	s/14 900,00	2019	Ene	2 970	s/14 850,00	2020	Ene	2 980	s/14 900,00
	Feb	2 980	s/14 900,00		Feb	3 000	s/15 000,00		Feb	3 000	s/15 000,00
	Mar	2 975	s/14 875,00		Mar	2 980	s/14 900,00		Mar	3 400	s/17 000,00
	Abr	2 970	s/14 850,00		Abr	2 995	s/14 975,00		Abr	3 400	s/17 000,00
	May	2 975	s/14 875,00		May	3 010	s/15 050,00		May	3 500	s/17 500,00
	Jun	2 990	s/14 950,00		Jun	3 015	s/15 075,00		Jun	3 250	s/16 250,00
	Jul	2 980	s/14 900,00		Jul	2 990	s/14 950,00		Jul	3 450	s/17 250,00
	Ago	2 975	s/14 875,00		Ago	2 985	s/14 925,00		Ago	3 600	s/18 000,00
	Set	2 960	s/14 800,00		Set	2 980	s/14 900,00		Set	3 500	s/17 500,00
	Oct	2 985	s/14 925,00		Oct	2 970	s/14 850,00		Oct	3 500	s/17 500,00
	Nov	2 995	s/14 975,00		Nov	2 975	s/14 875,00		Nov	3 700	s/18 500,00
	Dic	3 000	s/15 000,00		Dic	2 985	s/14 925,00		Dic	3 700	s/18 500,00
2021	Ene	3 890	s/19 450,00								
	Jun	3 890	s/19 450,00								
	Jul	4 100	s/20 500,00								
	Ago	4 500	s/22 500,00								
	Set	4 500	s/22 500,00								
	Oct	4 800	s/24 000,00								
	Nov	4 850	s/24 250,00								
Dic	4 900	s/24 500,00									

Fuente: Molinera Angie SAC.

Nos enfocamos en la producción de energía eléctrica para el proceso productivo del molino por lo que es necesario determinar los equipos que consumen electricidad así mismo determinar la cantidad de kW mínimos que necesita para funcionar como se presenta en el Anexo 2. En

tabla 4 se muestra la cantidad de kWh que se consume de manera mensual en la empresa en su proceso productivo.

Tabla 4: Consumo energético en kWh, del proceso productivo 2012-2021

Año	Mes	kWh	Año	Mes	kWh	Año	Mes	kWh	Año	Mes	kWh
2012	Enero	31 980	2015	Enero	35 360	2018	Enero	31 720	2021	Enero	41 340
	Febrero	31 200		Febrero	35 620		Febrero	31 980		Junio	40 820
	Marzo	30 680		Marzo	35 100		Marzo	32 240		Julio	46 800
	Abril	30 940		Abril	34 840		Abril	32 240		Agosto	48 880
	Mayo	31 200		Mayo	33 280		Mayo	32 500		Setiembre	49 920
	Junio	32 240		Junio	30 940		Junio	31 980		Octubre	50 440
	Julio	30 940		Julio	32 240		Julio	31 720		Noviembre	50 180
	Agosto	31 980		Agosto	31 200		Agosto	31 200		Diciembre	50 700
	Setiembre	32 760		Setiembre	35 360		Setiembre	32 760			
	Octubre	33 280		Octubre	35 880		Octubre	30 680			
	Noviembre	34 060		Noviembre	36 400		Noviembre	30 420			
	Diciembre	34 320		Diciembre	36 920		Diciembre	31 720			
2013	Enero	35 100	2016	Enero	35 880	2019	Enero	31 200			
	Febrero	34 840		Febrero	35 360		Febrero	32 240			
	Marzo	34 060		Marzo	35 620		Marzo	31 720			
	Abril	34 580		Abril	35 100		Abril	31 980			
	Mayo	34 840		Mayo	34 840		Mayo	33 280			
	Junio	35 880		Junio	33 540		Junio	30 680			
	Julio	35 620		Julio	32 500		Julio	32 500			
	Agosto	35 100		Agosto	36 920		Agosto	32 760			
	Setiembre	34 580		Setiembre	36 140		Setiembre	30 160			
	Octubre	34 060		Octubre	35 620		Octubre	30 940			
	Noviembre	34 840		Noviembre	36 140		Noviembre	31 200			
	Diciembre	35 100		Diciembre	37 180		Diciembre	31 720			
2014	Enero	35 880	2017	Enero	36 920	2020	Enero	32 760			
	Febrero	33 280		Febrero	36 400		Febrero	33 800			
	Marzo	34 060		Marzo	35 880		Marzo	36 400			
	Abril	33 800		Abril	35 360		Abril	37 440			
	Mayo	36 140		Mayo	32 240		Mayo	36 400			
	Junio	35 880		Junio	32 500		Junio	35 880			
	Julio	35 360		Julio	32 240		Julio	37 180			
	Agosto	34 580		Agosto	36 400		Agosto	39 260			
	Setiembre	33 800		Setiembre	32 760		Setiembre	37 180			
	Octubre	34 060		Octubre	31 200		Octubre	39 780			
	Noviembre	34 840		Noviembre	34 840		Noviembre	39 520			
	Diciembre	34 580		Diciembre	32 240		Diciembre	40 300			

Fuente. Molinera Angie SAC

De los datos recolectados en las tablas 1-4, nos permite concluir que dentro de la empresa se produjeron en el año 2021 en promedio 23 693 de sacos de 50 Kg de arroz pilado, en el mismo

periodo se produjo 4 739 de sacos de 50 Kg de cascarilla de arroz y por último se identificó que en promedio su consumo energético es de 47 385 KWh. En la Tabla 6 se muestra las cantidades en promedio de producción de sacos de arroz y cascarilla, así como también el consumo energético del año 2012 al año 2021.

Tabla 5: Promedios de producción de sacos de arroz, cascarilla y consumo energético

Año	Promedio de producción de arroz pilado	Promedio de producción de cáscara de arroz	Consumo promedio de kW
2012	16 066	3 213	32 132
2013	17 442	3 488	34 883
2014	17 344	3 469	34 688
2015	17 214	3 443	34 428
2016	17 702	3 540	35 403
2017	17 041	3 408	34 082
2018	15 882	3 176	31 763
2019	15 849	3 170	31 698
2020	18 579	3 716	37 158
2021	23 693	4 739	47 385

Fuente: Elaboración propia

Se realizó un análisis a las instalaciones de la empresa para poder diagnosticar si existía problemas de conexiones que provocaran algún tipo de pérdida eléctrica, por lo que, mediante la observación directa se encontró que el problema más preocupante es de cables picados y refaccionados con cinta aislante presentes en la máquina de pulido, clasificado y envasado haciendo peligrosa la conexión, provocando pérdidas eléctricas y poniendo en riesgo al operario ver Anexo 3.

La composición elemental de los combustibles es carbono (C), hidrógeno (H), Azufre (S), oxígeno (O), nitrógeno (N), Humedad y cenizas, por ello estas serán las sustancias que analizaremos en la cascarilla de arroz para así determinar en qué proceso de conversión de energía puede ser usada. En la tabla 6 se nos muestra el porcentaje en masa de los elementos anteriormente mencionados de la cascarilla de arroz de nuestra empresa, obtenidos mediante el análisis elemental.

Tabla 6: Análisis Elemental de la cascarilla de arroz

Parámetro	% en masa
Carbono	47,65%
Hidrógeno	4,60%
Oxígeno	31,40%
Nitrógeno	0,51%
Azufre	0,16

Fuente: Molinera Angie SAC

Se realizó también un análisis inmediato de la cascarilla de arroz para obtener la cantidad de carbono fijo, cenizas, humedad y material volátil como se muestra en la tabla 7 dando el porcentaje en masa de cada uno de los parámetros anteriormente mencionados.

Tabla 7: Análisis inmediato de la cascarilla de arroz

Parámetro	% en masa
Cenizas	15,7%
Carbono Fijo	14,67%
Carbón Volátil	65,31%
Humedad	8,5%

Fuente: Molinera Angie SAC

Teniendo las características de la materia prima, se determinó el poder calorífico aproximado de la cascarilla esto mediante un análisis de materia presentado en el anexo 4 y un análisis de temperatura presentado en el Anexo 5 dando como resultado 16,73 MJ/Kg lo siguiente es determinar el método por el cual, se obtendrá la transformación de la cascarilla de arroz en gas por lo cual debemos determinar los estándares de la cascarilla de arroz para ser usada con el proceso de pirolisis o gasificación.

En la Anexo 6, se encuentra los valores estándares que debe tener la cascarilla de arroz para poder ser usada en el proceso de pirolisis, dando resultados de un análisis elemental, análisis próximo y poder calorífico.

En la Anexo 7, se encuentran los Valores estándares que tienen diferentes biomásas para poder ser usadas como parte del proceso de gasificación en esta tabla se presenta el % humedad, % cenizas, materia volátil, densidad de energía y el poder calorífico.

Realizando una comparación entre los valores estándares y los valores obtenidos de la cascarilla de arroz de la Molinera Angie SAC se concluyó que esta cascarilla por su % de carbono fijo y % de carbono volátil que posee es apta para ser usada en el proceso de gasificación puesto que estos valores se encuentran dentro de los parámetros obtenidos en la revisión bibliográfica.

Una vez identificado el proceso se realizó una investigación sobre la tecnología necesaria para llevar a cabo el proceso de gasificación. La primera parte del sistema está conformado por el gasificador del cual existen diferentes tipos y por lo tanto primero debemos escoger el gasificador que sea más conveniente para poder ser usado en nuestra empresa, tenemos gasificador corriente ascendente (Updraft), gasificador corriente descendente (Downdraft), gasificador corriente cruzada (Crossdraft), gasificador de lecho fluidizado burbujeante, gasificador de lecho fluidizado circulante. Anexo 8 se encuentran las características de los

gasificadores mencionados con anterioridad teniendo en cuenta su implementación, tipo de contaminación gas producido potencia en kW producido, y la tecnología disponible.

Teniendo en cuenta estas características se determinó que el mejor gasificador para usar sería el downdraft el cual según [27] es un reactor que experimenta procesos de secado y pirolisis, cuenta con una zona el cual se produce el proceso de oxidación esto debido al uso del agente gasificante que es el aire esto para mantener la temperatura del proceso. El gas resultante del proceso de de gasificación dependiendo de la materia usada, en el caso de la cascarilla de arroz se produce %CO₂, %CO, % H₂, %CH₄ %N₂ y SO₂, en la tabla 8 se muestra el % por de cada gas que compone el syngas producido por el proceso de gasificación.

Tabla 8: Composición del syngas producido

Parámetro	% de composición
CO ₂	28%
CO	28%
H ₂	20%
CH ₄	23%
N ₂	0,47%
SO ₂	0,53%

Fuente: [28]

A continuación, se realizó un estudio de la tecnología que usa el gas como fuente de alimentación para producir electricidad, durante esta investigación se destacó a dos tecnologías que podían ser usadas para la generación de electricidad las cuales sería el motor a gas y la turbina a gas. En el Anexo 9 se presenta una comparación entre las dos tecnologías mencionadas anteriormente esto se realizó con el fin de determinar cuál se iba a usar.

Determinado el tipo de reactor a usar y el syngas producido se diseñó un sistema de producción de energía para la empresa como se muestra en la Anexo 10.

Con el diseño determinado se procede a realizar los cálculos correspondientes para determina la cantidad de potencia eléctrica que genera la cascarilla analizada para ello primero comenzamos con el balance en le gasificador.

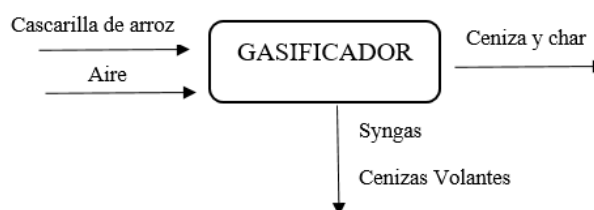


Figura 1: Sustancias que ingresan y salen del gasificador

Fuente: Elaboración propia

La molinera Angie S.A.C produce en promedio 176,8 ton/año de cascarilla de arroz, esta materia prima se introducirá en el gasificador a condiciones normales ($T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p=101,3\text{ kPa}$).

- El caudal de la Biomasa se expresará en kg/s, arroja lo siguiente:

$$\text{Caudal de Biomasa} = 176,8 \frac{\text{ton}}{\text{año}} \times \frac{1}{8760} \frac{\text{año}}{\text{h}} \times 1000 \frac{\text{kg}}{\text{ton}} \times \frac{1}{3600} \frac{\text{h}}{\text{s}} = 0,01 \text{ kg/s}$$

- Poder calorífico de la Biomasa = 16,73 MJ/kg
- Potencia térmica de la biomasa = $\frac{0,01 \text{ kg}}{\text{s}} \times 16,73 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} = 0,094 \text{ MW} \times 1000 \frac{\text{KW}}{\text{MW}} = 93,79 \text{ KW}$

A continuación, se halla la cantidad de moles de oxígeno que se necesita para poder llevar a cabo la gasificación con ayuda de los coeficientes de repartición como se muestra en el Anexo 13.

Teniendo esto en cuenta obtenemos que la cantidad de moles de oxígeno entregados por el aire son de 0,00456 Kmol aire/kg de biomasa. Además, se considera que todo el carbono ha reaccionado y no hay alquitranes debido a que el gasificador utilizado es un downdraft el cual produce cantidades muy pequeñas de este compuesto [29]

Determinamos el caudal de aire que se usará para la gasificación de nuestra cascarilla

- Masa molar del aire = 28,96 kg aire/kmol aire [30]
- Masa de aire = $0,00456 \frac{\text{kmol aire}}{\text{kg biomasa}} \times 28,96 \frac{\text{kg aire}}{\text{kmol aire}} = 0,13 \frac{\text{kg aire}}{\text{kg biomasa}}$
- Caudal de aire = $0,13 \frac{\text{kg aire}}{\text{kg biomasa}} \times 0,01 \text{ kg/s} = 0,0013 \text{ kg aire/s}$

Luego se determinó el caudal del syngas producido que depende del gasificador usado que según [31] es de 0,1 Kg/s

Luego se calcula el caudal de ceniza que se producirá que según el análisis inmediato realizado será el 15,7%.

- $q_{\text{ceniza}} = \% \text{ de cenizas } (q_{\text{biomasa}}) = 0,157(0,01 \text{ kg/s}) = 0,00157 \text{ kg ceniza/s}$

Posteriormente se debe determinar la potencia de nuestro syngas que según [28], se considera que entra al gasificador a una temperatura de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (298,15 K) y sale a una temperatura de $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1123,15 K), con estas temperaturas se halla las entalpías de entrada y salida del syngas como se detalla en el Anexo 14, 15 y 16.

Realizados los cálculos se obtiene que la potencia del syngas es de 364,60 kW, luego se calcula la potencia de la ceniza volante que sale junto con el syngas teniendo en cuenta que la ceniza volante es el 10% de la ceniza total que sale [32].

- $q_{\text{ceniza volante}} = 0,00056 \text{ kg ceniza/s}$

Luego integramos la siguiente fórmula $cp = 4,184 (0,180 + 7,78 \cdot 10^{-5} \cdot T)$ donde, cp: calor específico del conjunto de cenizas, en kJ/kg·F y t: temperatura a la salida del gasificador, en F, con lo que obtendremos la potencia de las cenizas volantes.

- $H_{\text{ceniza}} = \int cp \, dT = 4,14(0,180T + 7,78 \times 10^{-5} (\frac{1562^2}{2})) = 1\,573,47 \text{ kJ/kg ceniza}$
- $P_{\text{ceniza volante}} = 0,00056 \text{ kg ceniza/s} (1\,573,47 \text{ kJ/Kg ceniza volante}) = 0,96 \text{ kW}$

Posterior a esto se realizan los cálculos para el separador de partículas en la figura 2 se muestra las sustancias que ingresan y salen en este proceso.

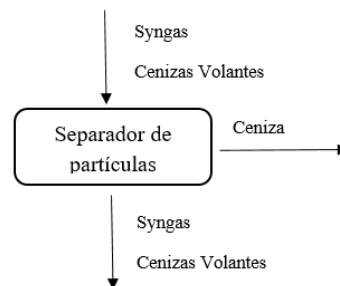


Figura 2: Sustancias que ingresan y salen del separador de partículas

Fuente: Elaboración propia

Según [33] el ciclo posee un 80% de eficiencia, esta máquina solo limpiará las cenizas volantes dentro del gas.

- $q_{\text{cenizas eliminadas}} = 0,8(0,00056) = 0,00044 \text{ kg cenizas volantes/s}$

El siguiente proceso es que el syngas pase por el intercambiador de calor como se muestra en la figura 3.

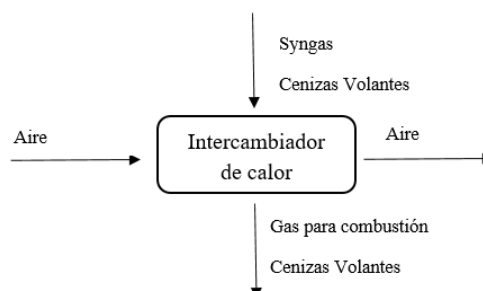


Figura 3: Sustancias que ingresan y salen del intercambiador de calor

Fuente: Elaboración propia

Según [28] el syngas debe ser enfriado desde los 850 °C hasta los 518 °C y el aire se calentará desde los 50 °C hasta los 646 °C, con estas temperaturas se determina las variaciones de entalpía del syngas y el aire de manera que podemos determinar la cantidad de potencia que ha perdido el syngas como se muestra en los Anexos 17,18 y 19. Realizado los cálculos se determina que el gas pierde 156,31 kW por lo que su nueva potencia será 208,29 kW.

A continuación, el gas ingresa al sistema de lavado de Venturi para ser nuevamente limpiado en la figura 4 se muestran las sustancias que ingresarán y saldrán de este sistema.

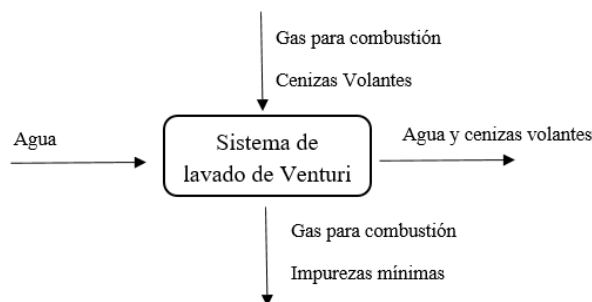


Figura 4: Sustancias que ingresan y salen del sistema de lavado

Fuente: Elaboración propia

Este sistema lava el syngas de manera que remueve las cenizas volantes sobrantes del ciclón, funciona con agua que ingresa a temperatura estándar de 25 °C, además, según [28] que el caudal óptimo de agua a utilizar es de 8 000 kg/h, pero para esta investigación se tomará la equivalencia de 80 kg/h o 0,022 kg/s al tener menor cantidad de biomasa, el gas se enfriará hasta una temperatura de 50 °C para que pueda ingresar al motor escogido. Se realizarán los cálculos para determinar las nuevas entalpías de los compuestos del gas y se determinará la potencia cedida como se muestra en los Anexos 20, 21 y 22. Realizado los cálculos se determinó que la nueva potencia del gas sería de 9,88 kW.

La siguiente operación es que el gas pase por un filtrado, el cual permitirá limpiar las impurezas mínimas que se encuentren en nuestro gas de manera que llegue lo más limpio posible en la Figura 5 se presentan las sustancias que ingresan y salen del proceso de filtrado.

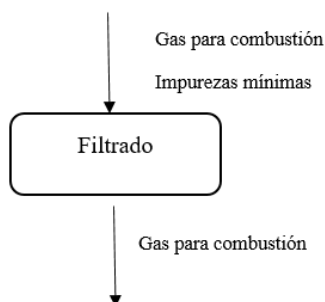


Figura 5: Sustancias que ingresan y salen del filtrado

Fuente: Elaboración propia

Por último, el gas ingresa al motor a gas el que permite producir la electricidad en la figura 6 muestra las sustancias que ingresan y salen de esta operación.

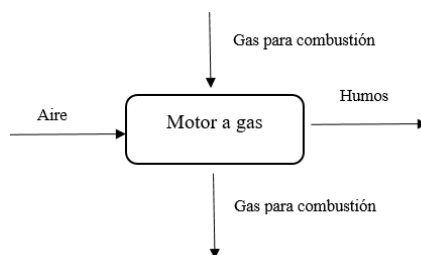


Figura 6: Sustancias que ingresan y salen del motor a gas
Fuente: Elaboración propia

Según la selección del equipo, el motor puede llegar a tener una eficiencia entre 80% -90%, se escogió un motor a gas Jenbacher tipo 3 [34]. El motor funciona con la ayuda de aire que se encuentra a 25 ° C para poder llevar a cabo la combustión por lo que esto aumentará la potencia que recibirá el motor.

- $P_{\text{aire}} = c_p(q_{\text{aire}})(T) = 1,0032(0,13)(25) = 3,30 \text{ kW}$
- $P_{\text{motor}} = P_{\text{gas}} + P_{\text{aire}} = 9,88 + 3,30 = 13,14 \text{ kW}$

Según [34], la eficiencia eléctrica del motor es de 39,4% entonces

- $P_{\text{eléctrica}} = 0,394(13,14) = 5,18 \text{ kW}$

Terminado los cálculos se determina que un 0,1 kg de biomasa generará 5,18 kW de electricidad después de pasar por el sistema de gasificación.

Tabla 9: Resumen de Balance de masa

	Gasificador		Separador de partículas		Intercambiador de calor		Sistema de lavado de Venturi		Filtrador		Motor a gas	
	Entra	Sale	Entra	Sale	Entra	Sale	Entra	Sale	Entra	Sale	Entra	Sale
Cascarilla de arroz	0,1 kg/s											
Aire	0,0013 kg/s				0,0013 kg/s						0,0003 kg/s	
Cenizas		0,00101 kg/s		0,0044 kg/s								
Syngas		0,1 kg/s	0,1 kg/s	0,1 kg/s	0,1 kg/s							
Cenizas volantes		0,00056 kg/s	0,00056 kg/s	0,00012 kg/s	0,00012 kg/s	0,00012 kg/s	0,00012 kg/s	0,00012 kg/s	0,00012 kg/s			
Agua							0,022 kg/s	0,022 kg/s				
Gas de combustión						0,1 kg/s	0,1 kg/s	0,1 kg/s	0,1 kg/s	0,1 kg/s	0,1 kg/s	
Humos												0,0273 kg/s
Electricidad												Resto de masa

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10: Resumen de Balance de Energía

	Gasificador		Separador de partículas		Intercambiador de calor		Sistema de lavado de Venturi		Filtrador		Motor a gas	
	Entra	Sale	Entra	Sale	Entra	Sale	Entra	Sale	Entra	Sale	Entra	Sale
Cascarilla de arroz	93,79											
	kW											
Aire	272,39				272,39	428,7					3,30	
	kW				kW	kW					kW	
Cenizas		1,58		0,77								
		kW		kW								
Syngas		364,6	364,6	364,6	364,6							
		kW	kW	kW	kW							
Cenizas volantes		0,96	0,96	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19				
		kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW				
Agua							198,41	595,2				
							kW	3 kW				
Gas de combustión						208,29	208,29	9,88	9,88	9,88	9,88	
						kW	kW	kW	kW	kW	kW	
Humos												1,4
												kW
Electricidad												5,18
												kW

Fuente: Elaboración propia

Teniendo como base el análisis de masa y energía se escogió un gasificador downdraft de la marca KEXIN, el cual es un gasificador con una capacidad máxima de 750 kg/h y puede llegar a soportar una temperatura máxima de hasta 900 °C [35]. También se escogió un separador de partículas KARAT MACHINERY posee una capacidad de hasta 300 kg/h y una eficiencia del 80% para eliminar partículas [36]. Se escogió un intercambiador de calor de la marca AIDEAR es un intercambiador de calor horizontal que soporta hasta 1000 °C de entrada este permitirá disminuir la temperatura del syngas [37], para el sistema de lavado de Venturi se seleccionó un lavador de gases de la marca ALONG, el cual funciona como mínimo con 30 kg/h de agua y tiene una capacidad de hasta 2 290 kg/s [37], para el filtrador se tomó un filtrador vertical de la marca JHENTEN, con una capacidad de hasta 300 kg/h [38] por último, para el motor se escogió un motor a gas tipo 3 de la marca Jenbacher que tiene entre 80 y 90% de eficiencia y una eficiencia eléctrica de 39,4% [34].

En cuanto a los equipos auxiliares, se seleccionó una tolva de la marca FLIGHT que soporta hasta 500 kg/h [39], se escogieron tuberías de la marca GRAINGER que son aptas para gases [39], también consideramos bomba de aire de la marca Lihua Hailea que puede suministrar hasta 5 kg/h de aire [40], tenemos bomba de agua de la marca HUMBOLT que suministra hasta

10 000 kg/h de agua [42] y por último se escogió una faja transportadora que soporta un peso máximo de hasta 1 000 kg [43].

Inversión de Maquinaria

Tabla 11: Costo de maquinaria para la propuesta

Máquina	Precio	Depreciación
Gasificador	S/45 715,00	S/9 143,00
Separador de partículas	S/3 961,50	S/792,30
Intercambiador de calor	S/5 810,98	S/1 162,20
Sistema de lavado de Venturi	S/23 769,00	S/4 753,80
Filtrador	S/2 917,89	S/583,58
Motor	S/10 000,00	S/2 000,00
Tolva	S/3 169,00	S/633,80
Faja transportadora	S/13 907,00	S/2 781,40
Bomba de aire	S/320,00	S/64,00
Bomba de agua	S/549,00	S/109,80
Tuberías	S/3 132,00	S/626,40
Total	S/113 251,37	S/22 650,7

Fuente: Elaboración propia. En base a [34], [35], [36], [37], [41], [38], [42], [39] [40], [43], [44]

Para el logro del último objetivo se realiza un flujo de caja teniendo en cuenta la inversión, el costo anual y la depreciación, dado que la eficiencia del motor es de 80% se considera que esto es lo que nos permitirá ahorrar la propuesta con respecto a los costos operativos energéticos que tiene la empresa, por último, cabe recalcar que esta inversión se recuperará en 5 años.

Tabla 12: Costo de Mano de obra directa

Mano de obra directa					
Cargo	Cantidad	Sueldo	Beneficios 30%	Total mensual	Total Anual
Operarios	5	S/ 1 100,00	S/ 330,00	S/ 1 430,00	S/ 85 800,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13: Costo operativos

Costos operativos		
Mantenimiento	S/	8 000,00
Mano de obra	S/	85 800,00
Total	S/	93 800,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14: Resumen de costos de la propuesta

		INVERSIÓN	COSTO ANUAL	DEPRECIACIÓN
PROPUESTA	Sistema de Gasificación	S/113 251,37	S/93 800,00	S/22 650,27
TOTAL		S/113 251,37	S/93 800,00	S/22 650,27

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15: Beneficios de la propuesta

	Antes	Después	Ahorro
Ingresos no percibidos		80%	
	S/ 176 810,83		S/ 141 448,67

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16: Gastos Administrativos

Descripción	und	cantidad total	Gasto unitario (S/.)	Gasto total (S/.)
Papel bond	6	6	S/20,00	S/120,00
Teléfono	1	1	S/100,00	S/100,00
Internet	12 serv/mes	12	S/100,00	S/1 200,00
Agua	12 serv/mes	12	S/200,00	S/2 400,00
TOTAL				S/3 820,00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 17: Flujo de Caja Anual

Estado de resultados						
Año	0	1	2	3	4	5
Ingresos		S/141 448,66	S/141 448,66	S/141 448,66	S/141 448,66	S/141 448,66
costos operativos		S/93 800,00	S/93 800,00	S/93 800,00	S/93 800,00	S/93 800,00
depreciación		S/22 847,72	S/22 847,72	S/22 847,72	S/22 847,72	S/22 847,72
GAV		S/3 820,00	S/3 820,00	S/3 820,00	S/3 820,00	S/3 820,00
utilidad antes de impuestos		S/20 980,94	S/20 980,94	S/20 980,94	S/20 980,94	S/20 980,94
Impuestos (29.5%)		S/6 189,38	S/6 189,38	S/6 189,38	S/6 189,38	S/6 189,38
utilidad después de impuestos		S/14 791,57	S/14 791,57	S/14 791,57	S/14 791,57	S/14 791,57
Flujo de caja						
Año	0	1	2	3	4	5
utilidad después de impuestos		S/14 791,57	S/14 791,57	S/14 791,57	S/14 791,57	S/14 791,57
depreciación		S/22 847,72	S/22 847,72	S/22 847,72	S/22 847,72	S/22 847,72
Inversión	S/114 238,60	S/37 639,29	S/37 639,29	S/37 639,29	S/37 639,29	S/37 639,29
Año	0	1	2	3	4	5
FNE	-S/114 238,60	S/37 639,29	S/37 639,29	S/37 639,29	S/37 639,29	S/37 639,29
VAN	S/11 934,12					
TIR	19,3%		TMAR	15%		
Año	0	1	2	3	4	5
Ingresos		S/141 448,66	S/141 448,66	S/141 448,66	S/141 448,66	S/141 448,66
Egresos	S/114 238,60	S/103 809,38	S/103 809,38	S/103 809,38	S/103 809,38	S/103 809,38
VAN Ingresos	S/474 157,86					
VAN Egresos	S/462 223,74					
B/C	1,03					

Fuente: Elaboración propia

Luego de haber realizado el análisis de flujo de caja se pudo observar que nuestra propuesta presenta un VAN de S/11 934,12 soles y un TIR del 19,3% que supera el TMAR de 15% por lo que con estos datos se puede decir que la propuesta planteada es viable.

Discusiones

Como primer objetivo específico se consideró, diagnosticar la situación actual del proceso productivo de arroz y su consumo energético de la Molinera Angie S.A.C. en base a esto se analizó la investigación de Diemuodeke Ogheneruona, Mulugetta Yacob y Imran Muhammad [18] titulada “Análisis tecno-económico y ambiental de factibilidad de cáscaras de arroz despedido sistema de energía para su aplicación en un clúster de molinos de arroz”, en la cual se menciona que en esta empresa se considera las etapas de recepción, secado, limpieza, descascarado, pulido, clasificado, pulido II, selección, envasado y almacenamiento, el análisis fue realizado en un conjunto de empresas grandes que para producir arroz necesitan como mínimo entre 4 a 91 MW y producen en conjunto un promedio de 50 000 a 100 000 toneladas de arroz al mes.

Teniendo en cuenta este antecedente en nuestra empresa se necesita menos cantidad de energía eléctrica dado que nuestro proceso tiene menos máquinas que requieren electricidad como lo son limpieza, descascarado, pulido, clasificado, selección, envasado, además de que nuestra empresa es más pequeña y produce en promedio de 885 toneladas de sacos de arroz al mes y para ello consume un promedio de 3,55 MW mensual.

Como segundo objetivo específico se consideró, el determinar y caracterizar la cascarilla de arroz de la Molinera Angie S.A.C. en base a ello se analizó el estudio de Silva Araujo L., Silva dos Santos I., Machado Oliveira Gabriel, Tiago Filho Geraldo Lucio, Mambeli Barros Regina [15] titulado “Rice husk energy production in Brazil: An economic and energy extensive analysis” en este trabajo se realizó un análisis del uso de la cascarilla de arroz de Brasil. Sus resultados indican que la cascarilla de arroz de Brasil a nivel químico presenta una composición de 37,6% de carbono, 4,88% de hidrógeno, 0,094% de azufre, 1,88% de nitrógeno 36,21% de oxígeno, y además con su análisis próximo determinó que posee 6% de humedad, 16,92% de cenizas, 51,98% de carbón volátil y 25,1% de carbono fijo. El antecedente y sus resultados coinciden con la investigación presente que para poder determinar y caracterizar la cascarilla de arroz se debe realizar un análisis elemental y un análisis próximo para que de esta manera poder conocer su composición química y físicas estas dependen del tipo de cascarilla de arroz analizada.

Como tercer objetivo específico se consideró, realizar un estudio técnico y tecnológico de la producción de energía a partir de la cascarilla de arroz, en base a este se realizó un análisis del trabajo de investigación de Silva Araújo Laura, Silva dos Santos Iván Felipe, Machado Oliveira Gabriel, Tiago Filho Geraldo Lucio, Mambeli Barros Regina [15] titulado “Rice husk energy production in Brazil: An economic and energy extensive analysis” en este trabajo se menciona

que se empleó un gasificador de tipo updraft debido a que se realizó en una empresa más grande por lo que necesitaba una mayor producción de electricidad, su sistema logró llegar a producir entre 2 a 3 MW con 2,2 toneladas de cascarilla de arroz y ellos necesitaban como mínimo 1,6 MW para poder funcionar debido a que en este estudio no se limitaba a producir electricidad para el proceso productivo sino que también se incluía a las otras áreas de la empresa.

Otra investigación que apoya este objetivo es la de Quispe Isabel, Navia Rodrigo, Kahhat Ramzy [16] en su investigación “Evaluación del ciclo de vida de la cáscara de arroz como fuente de energía. un estudio de caso peruano” en esta investigación se hizo uso de un reactor downdraft y un motor a gas para el proceso del sistema puesto que tenía que generar para la empresa 990 kW aproximadamente con 1 tonelada de cascarilla de arroz.

Teniendo en cuenta este antecedente en nuestra empresa se necesita generar como mínimo 170 kW debido a que solo se enfoca al proceso productivo de la empresa, por cual se escogió usar un gasificador downdraft y se usó una turbina a gas para transformar el gas en electricidad y se realizó los cálculos respectivos obteniéndose que con 0,1 Kg de biomasa se produce 5,18 kW.

Como último, objetivo se consideró, el terminar el impacto financiero del proyecto este objetivo se apoya en la investigación de Catagua Gavilanez Jimmy D., Méndez Rodríguez Steven A. [23] en su investigación “Diseño de un sistema de generación de energía usando la cascarilla de arroz como fuente de energía” menciona que para su proyecto tiene un VAN de US\$ 6 600 000 y un TIR de 18% en un periodo de 5 años. La investigación que ayuda a este objetivo es la de Peña Amaya Juan Fernando [24] en su investigación “Simulación del aprovechamiento de biogás a partir de la cáscara de arroz para cogeneración de energía eléctrica en un campo petrolero de la cuenca de llanos orientales”, que obtuvo un VAN de US\$ 23 169,67 dólares y un TIR del 10%. Es nuestra investigación se obtuvo que la propuesta es viable porque tenemos un VAN de S/11 934,12 soles y un TIR del 19,3% que supera el TMAR de 15%.

Conclusiones

Se concluye que, a partir de la investigación realizada la cascarilla de arroz de la Molinera Angie SAC posee el potencial para poder usada como materia prima para la producción de energía eléctrica por lo que puede generar suficiente energía para poder realizar sus procesos de producción y de esta manera reducir sus costos operativos.

A partir de la investigación, se pudo observar que de la cascarilla de arroz que la empresa obtiene el 10,3% representa la cantidad de sacos de cascarilla que la empresa no logra vender por lo que esta cantidad es desperdiciada, por lo que puede ser aprovechada para poder convertirla en energía eléctrica lo que permite que la empresa pueda disminuir sus costos energéticos y por ende sus costos operativos también disminuyen.

Como resultado del análisis elemental y el análisis inmediato se obtuvo que la cascarilla posee 47,65% de carbono, 4,60% de hidrógeno, 31,4% de oxígeno, 0,51% de nitrógeno y 0,16% de azufre, 15,7% de cenizas, 14,67% de carbono fijo, 65,31% de carbono volátil y 8,5% de humedad. Y luego de realizar el proceso de gasificación se caracterizó el syngas el poseía 28% de CO, 28% de CO₂, 20% de H₂, 23% de S₂, 0,47% de N₂ y 0,53% de SO₂.

Realizada la investigación, se determinó que para la conversión de la biomasa en energía eléctrica se usará el método de la gasificación usando un gasificador de tipo downdraft para obtener el syngas y para obtener la electricidad se usará un motor a gas. Y también se calculó que con un 0,1 Kg de biomasa se produce 5,18 kW por lo que si es viable la conversión de la cascarilla en energía eléctrica para ser usada en el proceso de producción de arroz.

Con respecto al impacto económico del proyecto, se concluye que la propuesta si es viable porque posee un VAN de S/11 934,12 soles y un TIR del 19,3% que supera el TMAR de 15%.

Recomendaciones

Se recomienda realizar un plan de capacitaciones para que los operarios, de manera que puedan utilizar correctamente el sistema de gasificación, y así el sistema siempre trabaje con su máximo potencial.

Se recomienda proponer el desarrollo de un plan de mantenimiento para todas las máquinas que forman parte del sistema de gasificación debido a que, este estará en funcionamiento constante durante todo el tiempo que se realice el proceso de pilado de arroz.

Se recomienda realizar investigaciones futuras para aprovechar los humos generados por el sistema de gasificación puesto que el CO₂ liberado en estos provoca un efecto contaminante en el medio ambiente.

Referencias

- [1] D. Quiceno Villada y M. Mosquera Gutierrez, «Repositorio de tesis Universidad Autónoma de occidente,» 2010. [En línea]. Available: <https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/1327/TME00462.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Último acceso: 24 Septiembre 2021].
- [2] Y. A. Lucero de la Cruz, «Repositorio UNPRG,» 2019. [En línea]. Available: <https://repositorio.unprg.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12893/4944/BC-TES-3755%20LUCERO%20DE%20LA%20CRUZ.pdf?sequence=1>. [Último acceso: 1 Octubre 2021].
- [3] P. E. Matthey, R. A. Robayo, J. E. Díaz, S. Delvasto y J. Monzó, «Aplicación de ceniza de cascarilla de arroz obtenida de un proceso agro-industrial para la fabricación de bloques en concreto no estructurales,» *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, vol. XXXV, n° 2, pp. 285-294, 2015.
- [4] INEI, «INEI,» 25 abril 2022. [En línea]. Available: <https://m.inei.gob.pe/prensa/noticias/produccion-de-arroz-cáscara-crecio-30-en-febrero-del-presente-ano-13562/#:~:text=En%20febrero%20de%202022%2C%20la,grano%2C%20destinado%20principalmente%20al%20mercado>. [Último acceso: 02 setiembre 2023].
- [5] «INEI,» 03 Febrero 2022. [En línea]. Available: <http://m.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/noticias/nota-de-prensa-no-030-2022-inei.pdf>. [Último acceso: 29 Marzo 2022].
- [6] MINEM, «Ministerio de energía y minas,» 2020. [En línea]. Available: https://www.minem.gob.pe/_publicacion.php?idSector=12&idPublicacion=633. [Último acceso: 17 abril 2022].
- [7] MINEM, «Ministerio de energía y minas,» enero 2022. [En línea]. Available: <https://www.minem.gob.pe/minem/archivos/2%20Cifras%20preliminares%20del%20Sector%20Electrico%20-%20Diciembre%202021a.pdf>. [Último acceso: 17 abril 2022].
- [8] Real Academia Española, «Real Academia Española,» Fundación "la Caxia", 2021. [En línea]. Available: <https://dle.rae.es/biomasa>. [Último acceso: 26 Octubre 2022].

- [9] IDAE, «IDAE,» Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico España, 2021. [En línea]. Available: <https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/uso-termico/biomasa>. [Último acceso: 26 Octubre 2022].
- [10] Universidad abierta y a distancia de Mexico, «Universidad abierta y a distancia de Mexico,» 2014. [En línea]. Available: https://dmd.unadmexico.mx/contenidos/DCSBA/BLOQUE1/BI/04/BBME/unidad_01/descargables/BBME_U1_Contenido.pdf. [Último acceso: 5 Noviembre 2022].
- [11] Khan Academy, «Khan Academy,» 2019. [En línea]. Available: <https://es.khanacademy.org/science/ap-chemistry/thermodynamics-ap/enthalpy-tutorial-ap/a/bond-enthalpy-and-enthalpy-of-reaction>. [Último acceso: 1 Noviembre 2022].
- [12] Real Academia Española, «Real Academia Española,» "la Caxia", 2021. [En línea]. Available: <https://dle.rae.es/combusti%C3%B3n?m=form>. [Último acceso: 27 Octubre 2022].
- [13] MITECO, «MITECO,» Ministerio para la transición ecológica y el reto deográfico, 2018. [En línea]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/domesticos/gestion/sistema-tratamiento/Pirolisis.aspx#:~:text=La%20pirolisis%20es%20una%20degradaci%C3%B3n,produzcan%20las%20reacciones%20de%20combusti%>. [Último acceso: 25 Octubre 2022].
- [14] IDAE, «IDAE,» 2007. [En línea]. Available: https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/documentos_10737_biomasa_gasificacion_07_d2adcf3b.pdf. [Último acceso: 1 Noviembre 2022].
- [15] L. Silva Araújo, I. F. Silva dos Santos, G. Machado de Oliveira, G. L. Tiago Filho y R. Mambeli Barros, «La cáscara de arroz la producción de energía en Brasil: Una económica y energética de un extenso análisis,» *ELSEVIER*, vol. I, nº 290, pp. 1-13, 2020.
- [16] I. Quispe, R. Navia y R. Kahhat, «Evaluación del Ciclo de vida de la cáscara de arroz como fuente de energía. Un estudio de caso Peruano,» *ELSEVIER*, nº 209, pp. 1235-1244, 2018.
- [17] C. G. Lopes Grotto, C. . J. Gomes Colares , D. Henrique Pereira, A. Teixeira do Vale y D. Rodrigues Lima, «Potencial energético de la biomasa a partir de dos tipos de organismos genéticamente mejoradas de arroz las cáscaras en Brasil: Una teórico-experimental,» *ELSEVIER*, vol. CXLII, pp. 1-9, 2020.
- [18] O. E. Diemuodeke, Y. Mulugetta y M. Imran, «Análisis Tecno-económico y ambiental de factibilidad de cáscaras de arroz despididosistema de energía para su aplicación en un clúster

de molinos de arroz,» *ELSEVIER-Las energías renovables y Sostenibles Comentarios*, vol. CXLIX, pp. 1-12, 2021.

- [19] L. Tipanluisa, A. Barriga y J. Guasumba, «VALORACIÓN ENERGÉTICA DE LA CASCARILLA DE ARROZ UTILIZANDO UN SISTEMA TÉRMICO CON CAPACIDAD DE 60000 kcal / h,» *Revista del Instituto Nacional de Eficiencia energética y Energías renovables*, vol. I, nº 1, pp. 1-8, 2018.
- [20] A. T. Ortega Ramírez y M. I. Quispe Trinidad, «Revistas UIS,» 2021. [En línea]. Available: <https://revistas.uis.edu.co>. [Último acceso: 15 agosto 2022].
- [21] L. Osorio Aguirre, «Repositorio de tesis de la Universidad Libre de Colombia,» 2019. [En línea]. Available: <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/18602/AN%20LISIS%20T%20ECON%20MICO%20PARA%20EL%20USO%20DE%20CASCARILLA%20DE%20ARROZ%202809-08-2019%29%20versi%20final.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Último acceso: 14 Junio 2022].
- [22] E. J. Alcántara Gómez, «Respositorio de tesis de la Universidad Señor de Sipan,» 2020. [En línea]. Available: <https://repositorio.uss.edu.pe/handle/20.500.12802/6893>. [Último acceso: 15 Junio 2022].
- [23] J. D. Catagua Gavilanez y S. A. Méndez Rodríguez, «Repositorio de la Escuela Superior Politécnica del Litoral,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/54731/1/T-112189%20CATAGUA%20GAVILANEZ%20JIMMY%20MENEDEZ%20RODRIGUEZ%20STEVEN.pdf>. [Último acceso: 12 Julio 2022].
- [24] J. F. Peña Amaya, «Repositorio de tesis de la Fundación Universidad de América,» 2021. [En línea]. Available: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/8632/1/5161521-2021-2-IP.pdf>. [Último acceso: 20 Julio 2022].
- [25] Campillo Seva, «Universidad de murcia,» 2011. [En línea]. Available: <https://www.um.es/documents/4874468/11830096/tema-1.pdf/1c49a077-8b02-405d-9100-ee5f7f1b1b7b>. [Último acceso: 18 abril 2022].
- [26] R. Díaz Torres, «Repositorio de tesis de la Universidad pública en Machala,» 2018. [En línea]. Available:

- <http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/14370/1/Cap.2%20El%20balance%20de%20materia.pdf>.. [Último acceso: 18 abril 2022].
- [27] E. Velo García y C. G. Cuba Arroyo, «Repositorio de tesis de la Universidad de Catalunya,» 08 Abril 2011. [En línea]. Available: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/11591?show=full>. [Último acceso: 01 Junio 2022].
- [28] A. Sánchez Lario, «Repositorio de tesis de la Universidad Politécnica de Madrid.,» Junio 2017. [En línea]. Available: https://oa.upm.es/47702/1/TFG_ALEJANDRO_SANCHEZ_LARIO.pdf. [Último acceso: 29 agosto 2022].
- [29] . C. Igado Gracia, «Repositorio de tesis de la Universidad de Zaragoza,» 2013. [En línea]. Available: <https://zaguan.unizar.es/record/10202/files/TAZ-TFM-2013-088.pdf>. [Último acceso: 14 octubre 2022].
- [30] Food and Agriculture Organization of the United Nations, «Food and Agriculture Organization of the United Nations,» 2019. [En línea]. Available: [https://www.fao.org/3/x5027s/x5027S0n.htm#:~:text=La%20masa%20molecular%20aparente%20del,12%20\(Ashrae%2C%201977\)..](https://www.fao.org/3/x5027s/x5027S0n.htm#:~:text=La%20masa%20molecular%20aparente%20del,12%20(Ashrae%2C%201977)..) [Último acceso: 30 Agosto 2022].
- [31] KEXIN, «alibaba.com,» 2022. [En línea]. Available: https://spanish.alibaba.com/p-detail/Chip-60250066834.html?spm=a2700.galleryofferlist.topad_creative.d_title.d51a7e6eDJsE3h. [Último acceso: 10 Septiembre 2022].
- [32] C. G. Cuba Arroyo, «Repositorio de tesis de la Universidad de Catalunya,» 2011. [En línea]. Available: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/11591>. [Último acceso: 14 septiembre 2022].
- [33] KARAT Machinery Equipment, «alibaba.com,» 2022. [En línea]. Available: <https://spanish.alibaba.com/p-detail/Chemical-1600505539069.html?spm=a2700.7724857.0.0.3c44352c8vrXl9&s=p>. [Último acceso: 2022].
- [34] GE Jenbacher , «INNIO,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.innio.com/es/productos/jenbacher/tipo-3#:~:text=El%20nivel%20de%20eficiencia%20de,90%20%25%20o%20m%C3%A1s%20en%20cogeneraci%C3%B3n..> [Último acceso: 2022].

- [35] KEXIN, «Alibaba.com,» 2017. [En línea]. Available: https://spanish.alibaba.com/p-detail/Chip-60250066834.html?spm=a2700.galleryofferlist.topad_creative.d_title.d51a7e6eDJsE3h. [Último acceso: 1 Septiembre 2022].
- [36] KARAT MACHINERY, «Alibaba.com,» 2017. [En línea]. Available: <https://spanish.alibaba.com/p-detail/Chemical-1600505539069.html?spm=a2700.7724857.0.0.3c44352c8vrxI9&s=p>. [Último acceso: 30 septiembre 2022].
- [37] AIDEAR, «Alibaba.com,» [En línea]. Available: https://spanish.alibaba.com/p-detail/Stainless-60703736971.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_image.7934410669XAu7&s=p. [Último acceso: 2 Septiembre 2022].
- [38] JHENTEN, «Alibaba.com,» 2017. [En línea]. Available: https://spanish.alibaba.com/p-detail/Factory-60458682815.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_image.5a8fa4863fCVrg&s=p. [Último acceso: 4 Septiembre 2022].
- [39] GRAINGER, «GRAINGER,» 2022. [En línea]. Available: https://www.grainger.com/product/4EHF3?cm_mmc=PPC:Google--GlobalExport--PE--Acquisition--2020009&gclid=Cj0KCQiA99ybBhD9ARIsALvZavUPfmk-kz1NgtVmhzvpkkNBQiL6J0M9TZzjuJb6dUA1XxiCfyFLHrAaAmlwEALw_wcB. [Último acceso: 15 Noviembre 2022].
- [40] Lihua Hailea, «Alibaba,» 2022. [En línea]. Available: https://www.alibaba.com/pla/Lihua-Hailea-Air-Pump-ACO-009D-135w_62388792715.html?mark=google_shopping&biz=pla&searchText=laser+equipment+parts&product_id=62388792715&language=es&field=UG&src=sem_ggl&from=sem_ggl&cmpgn=18664245327&adgrp=&fditm=&tgt=&locint. [Último acceso: 15 Noviembre 2022].
- [41] ALONG, «Alibaba.com,» 2017. [En línea]. Available: https://www.alibaba.com/product-detail/Gas-Scrubber-Gas-Scrubber-Biogas-H2S_1600499837939.html?spm=a2700.7735675.0.0.7e9977f6YkzQAH. [Último acceso: 3 septiembre 2022].

- [42] FLIGHT, «Alibaba,» 2022. [En línea]. Available: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/Factory-wholesale-high-quality-industrial-conical-62068882155.html>. [Último acceso: 15 Noviembre 2022].
- [43] Humbolt, «SODIMAC,» 2022. [En línea]. Available: https://www.sodimac.com.pe/sodimac-pe/product/2408554/bomba-de-agua-centrifuga-20-hp-humboldt/2408554/?kid=goosho_213039&shop=googleShopping&gclid=Cj0KcQIA99ybBhD9ARIsALvZavXU2AQMMyBJioPsRZVq2HU-1JqrL7FtfhefXenQ1c1XHLkM31__HOGEaAk6hEALw_wcB. [Último acceso: 15 Noviembre 2022].
- [44] LIANGZO, «Alibaba,» 2022. [En línea]. Available: https://spanish.alibaba.com/product-detail/Original-1600437614526.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_image.a149797ebSrUN3. [Último acceso: 15 Noviembre 2022].
- [45] A. Gómez, W. Klose y S. Rincón, «Pirólisis de la Biomasa,» de *Pirólisis de la Biomasa Cuesco de Palma de Aceite*, Bogotá, Kassel, 2008, p. 27.
- [46] M. C. Méndez Vives, «Repositorio de tesis de la Universidad de los Andes,» Mayo 2010. [En línea]. Available: <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/24547/u419491.pdf?sequence=1>. [Último acceso: 24 Mayo 2022].
- [47] J. G. Speight, *Gasification of Unconventional Feedstocks*, Laramie, Wyoming: Book Aid internacional, 2014.
- [48] M. Aristizábal Álvarez y L. Valencia Naranjo, «Repositorio de tesis de la Universidad EAFIT,» 2015. [En línea]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/47250806.pdf>. [Último acceso: 24 mayo 2022].
- [49] X. E. Castells, *Tratamiento y valorización energética de residuos*, Cartoné: TIRANT, 2005.
- [50] P. Alegría Castellanos, «Repositorio de Tesis de la Universidad de Piura,» Enero 2017. [En línea]. Available: https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/2737/IME_213.pdf?sequence=1&isAllowed=y. [Último acceso: 25 Mayo 2022].
- [51] O. Eguren García, «Repositorio de tesis de la Universidad de Cantabria,» 2021. [En línea]. Available: <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/22195>. [Último acceso: 1 Junio 2022].

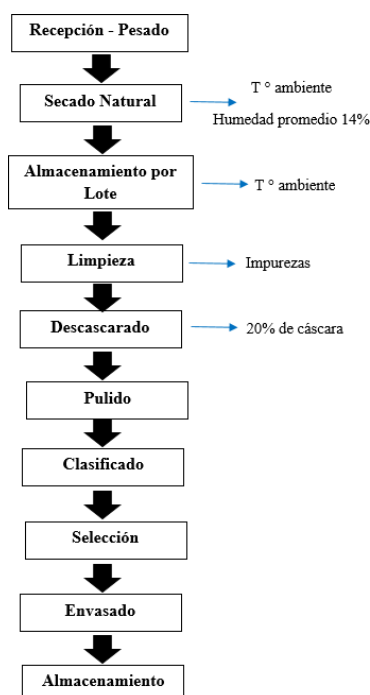
- [52] D. A. Amaro Rosas, E. A. Avilés Encalada, L. M. García Juárez y J. S. Virgen Suárez, «Revista de la facultad de ingeniería y arquitectura de la Universidad de Lima,» 2021. [En línea]. Available: https://revistas.ulima.edu.pe/index.php/Ingenieria_industrial/article/view/5814. [Último acceso: 2 Junio 2022].
- [53] C. Arrascue Villegas, «gestionparticipativa.pe.iica.int,» Octubre 2020. [En línea]. Available: [https://gestionparticipativa.pe.iica.int/getattachment/e0c0b5c2-ca02-4bb3-b867-2da4c7aded6c/PLANIFICACION-DE-LA-CAMPANA-AGRICOLA-DE-ARROZ-2020.aspx#:~:text=En%20la%20Regi%C3%B3n%20Lambayeque%2C%20el,T.M\)%20de%20la%20producci%C3%B3n%20nacional..](https://gestionparticipativa.pe.iica.int/getattachment/e0c0b5c2-ca02-4bb3-b867-2da4c7aded6c/PLANIFICACION-DE-LA-CAMPANA-AGRICOLA-DE-ARROZ-2020.aspx#:~:text=En%20la%20Regi%C3%B3n%20Lambayeque%2C%20el,T.M)%20de%20la%20producci%C3%B3n%20nacional..) [Último acceso: 22 Septiembre 2021].
- [54] C. Y. Huaraz Choi, «Repositorio de Tesis PUCP,» Abril 2013. [En línea]. Available: https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/4497/HUARAZ_CARLOS_GASIFICADOR_25KW.pdf?sequence=1&isAllowed=y. [Último acceso: 23 Septiembre 2021].
- [55] C. D. Fasabi Mozombite, «Repositorio de tesis UNSM,» 2019 Repositorio de tesis UNSM. [En línea]. Available: <http://repositorio.unsm.edu.pe/bitstream/handle/11458/3739/FIAI%20-%20Corina%20Doylith%20Fasabi%20Mozombite.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Último acceso: 1 Octubre 2021].
- [56] A. VALVERDE G, B. SARRIA L. y J. P. MONTEAGUDO Y., «ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DE LA CASCARILLA DE ARROZ,» *Scientia Et Technica*, vol. XIII, nº 37, pp. 255-260, 2007.
- [57] a. y. m. a. d. G. d. E. Ministerio de Agricultura, «CEDEX,» 2013. [En línea]. Available: <http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/37/residuos-plasticos/gestion-del-residuo/valorizacion-material/252/valorizacion-energetica.html>. [Último acceso: 24 04 2022].
- [58] J. E. Carrasco García, «Escuela de negocios EOI,» 2007. [En línea]. Available: <https://www.eoi.es/es/savia/publicaciones/20204/combustion-directa-de-la-biomasa>. [Último acceso: 24 abril 2022].
- [59] M. Klug, «Pirólisis, un proceso para derretir la biomasa,» *Revista de Química PUCP*, vol. XXVI, nº 1-2, pp. 37-40, 2012.
- [60] L. Garcia Faure, R. Lesme Jaén, L. Oliva Ruiz, J. Pajrin Rodriguez y D. Revilla Suarez, «Gasificación de biomasa para la generación de electricidad con motores de combustión

interna. Eficiencia del proceso.,» *Revista Científica de Tecnología Química*, vol. XXXVI, n° 2, pp. 1-6, 2016.

- [61] J. Muñoz y A. Posada , «SIMULACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO Y METANOL A PARTIR DE LA GASIFICACIÓN DE CASCARILLA DE ARROZ CON VAPOR,» 18 Marzo 2010. [En línea]. Available: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/download/25646/39144>. [Último acceso: 15 Mayo 2022].
- [62] J. Muñoz y A. Posada , «SIMULACIÓN DELA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO Y METANOL A PARTIR DELAGASIFICACIÓN DE CASCARILLA DE ARROZCON VAPOR,» *Dyna*, vol. LXXVIII, n° 165, pp. 122-131, 2011.

Anexos

Anexo 1 Proceso productivo de la Molinera Angie SAC



Fuente: Molinera Angie SAC.

Anexo 2: Consumo energético en kW/saco, en la etapa de proceso por saco producido.

ETAPA	Máquinas	Consumo de kW	Cantidad	Consumo total de kW	Subtotal
Limpieza	Pre- limpieza	2,20	1	2,20	8,70
	Lavadora	2,25	2	4,50	
	Faja transportadora	1,00	2	2,00	
Descascarado	Descascaradora	7,00	2	14,00	27,20
	Circuito	4,00	2	8,00	
	Elevador	1,00	1	1,00	
	Compresora	2,00	1	2,00	
	Sinfin de pajilla	2,20	1	2,20	
	Llenador de pajilla	14,00	1	14,00	
	Separadora	Mesa separadora	3,00	1	
Succionador de polvo		14,00	1	14,00	
Elevador		1,00	2	2,00	
Pulido	Pulidora vertical	13,00	2	26,00	93,70
	Succionador de polvillo	20,50	1	20,50	
	Ventilador de pajilla	8,00	1	8,00	
	sinfin para polvillo	2,20	1	2,20	
	Pulidora de agua	7,00	2	14,00	
	bomba de agua	10,00	2	20,00	
	Elevador	1,00	3	3,00	
	Clasificado	Mesa rotativa	2,50	2	
Clasificador		2,50	2	5,00	
Faja transportadora		1,00	2	2,00	
Selección	Selectora	1,20	1	1,20	2,20
	Faja transportadora	1,00	1	1,00	
Envasado	Envasadora de sacos	3,10	1	3,10	4,60
	Faja transportadora	1,00	1	1,00	
	Cosedora	0,50	1	0,50	
CONSUMO TOTAL DE kW					167,40

Fuente: Molinera Angie SAC

Anexo 3: Estado de las máquinas de las áreas productivas del molino

Etapa	Estado			Observaciones
	Bueno	Regular	Malo	
Limpieza	X			No hay observaciones
Descascarado	X			No hay observaciones
Separación	X			No hay observaciones
Pulido			X	Cables picados y con cinta
Clasificación			X	Cables picados y con cinta
Selección	X			No hay observaciones
Envasado			X	Cables picados y con cinta

Anexo 4: Balance de materia para poder calorífico

Análisis elemental	% de elemento	Kg de elemento	Factor kg oxígeno /elemento	Kg de oxígeno	Gases formados/liberados por chimenea	kg de gas
%C	47,65	0,4765(1) kg 0,4765 kg	2,67	2,67(0,4765) = 1,2723	CO ₂	0,4765+1,2723= 1,7488 kg
%H	4,6	0,046(1) kg 0,046 kg	8	8(0,046) =0,368	H ₂ O	0,046+0,368= 0,0828 kg
%S	0,16	0,0016(1) kg 0,0016 kg	0,5	0,5(0,0016) = 0,0008	SO ₂	0,0016+0,0008= 0,0024 kg
%N	0,51	0,0051(1) kg 0,0051 kg	2,29	2,29(0,0051) = 0,01168	NO ₂	0,0051+0,01168= 0,01678 kg
CENIZAS	15,7	0,157(1) kg 0,157 kg				
Aire necesario teórico				13,8667 kg	N ₂ del aire 0,77(72,36) =55,72 kg	55,72 kg
Aire en exceso				72,36 kg aire	O ₂ (exceso) 0,23(72,36)-13,8667 =2,7761	2,7761 kg

Fuente: Elaboración propia

Anexo 5: Balance de energía para poder calorífico de la cascarilla de arroz

Análisis elemental	#moles de cada gas	entalpia de formación para cada gas	Entalpia o calor de reacción kj/Kg gas
%C	(1748,8/44) = 39,75	-393 kj/ mol	-15621,75 kj
%H	(82,8/18) = 4,6	-241 kj/mol	-1108,6 kj
%S	(2,4/64) = 0,0375	-296,8 kj/mol	-11,13 kj
%N	(16,78/46) = 0,3648	33,2 kj/mol	12,11 kj
Total			-16729,38 kj

Fuente: Elaboración propia

Anexo 6: Parámetros de la caracterización de diferentes tipos de biomasa para pirolisis

Biomasa	Análisis elemental %				Análisis próximo %			Poder calorífico MJ/kg	
	<i>cvaf</i>	<i>hwaf</i>	<i>nwaf</i>	<i>owaf</i> 1	<i>w</i>	<i>Fwaf</i>	<i>avf</i>	<i>Ho, wf</i> 2	<i>Hu, wf</i> 2
Cuesco	52,8	5,7	<1	40,5	11,2	79	1,4	22,2 ³	21,1 ³
Cascarilla de Arroz	48,7	6,3	<1	44,4	5,2	79	5,2	18,4	17,1
Almendra	62,5	8,8	2,1	26,6	6,5	93	1,7	28,7	26,8
Afrecho (palma)	59,6	5,5	2,4	42,5	10,5	81	3,5	18,5	17,3
Cascarilla de café	50,3	5,3	<1	43,8	10,1	82	1,2	18,7	17,5
Bagazo	53,1	4,7	<1	41,7	15,0	87	8,1	17,9	16,9
Madera de haya	48,9	0,5	<1	45,4	5,53	90	0,39	18,3	17,1

Fuente: Pirólisis de Biomasa. Kassel University [45]

Anexo 7: Parámetros de la caracterización de diferentes tipos de biomasa para gasificación

Biomasa	Humedad seca (%)	Ceniza (%)	Materia Volátil (Kg/m ³)	Densidad de energía	Poder Calorífico Superior (kJ/Kg)
Carbón	2-10	2-5	5-30	200-300	30
Madera	20-40	0,1-1,0	70-80	600-800	20
Cascarilla de Arroz	5-10	15-25	60	100	15
Concha de coco	25	0,8	79	N.A.	20

Fuente: Universidad de los Andes [46]

Anexo 8: Características de los gasificadores

Factores	Gasificador Corriente Updraft	Gasificador Corriente Downdraft	Gasificador Corriente Crossdraft	Gasificador de lecho fluidizado burbujeante	Gasificador de lecho fluidizado Circulante
Implementación	Posee un tipo de proceso simple y de bajo costo, es usado para materias que contengan un alto nivel de humedad.	Es de uso sencillo y son usados para cuando se quiere realizar el proceso de gasificación a una pequeña escala, al ser el sistema simple los costos también son bajos	Este tipo de sistema se usa a pequeña escala, una de las ventajas que presenta es su tiempo de arranque y su bajo costo	Este tipo de gasificadores son de bajo costo y de gran flexibilidad, este sistema es aplicado mayormente a gran escala, es decir que se tiene grandes cantidades de materia prima	Este tipo de gasificadores son de bajo costo y de gran flexibilidad, es adecuado si se requiere una reacción rápida altas tasas de transporte de calor
Tipo de contaminación	Se genera un gas con alto contenido de aceites, alquitranes, fenoles, amoniaco y ácido sulfúrico, estos son ampliamente contaminantes para el medio ambiente	Genera un gas de bajo contenido de cenizas de menos de 5% y es un gas que es el más adecuado para ser usados en motores	En este sistema se genera cenizas, sin embargo, estas caen al fondo y no contaminan mucho, sin embargo, genera metano y alquitranes	El gas producido presenta grandes cantidades de alquitrán y carbono no convertido	Tiene bajo contenido de alquitrán y carbono no convertido por lo que su contaminación al medio ambiente es baja
Gas Producido	El gas producido es rico en hidrocarburos y esto conlleva a que exista un poder calorífico más alto, por lo tanto, son más usado para producir calor, pero para producir energía necesita que el gas sea limpiado.	El gas producido es el más limpio de todos debido a que el sistema cumple el 99% de los alquitranes presentes por lo que no necesita de ningún tipo de tratamiento posterior	El gas producido tiene bajo poder calorífico, porque para poder obtener una mejor eficiencia del gas necesita de grandes cantidades de oxígeno	El gas producido se denomina Syngas Pobre, para mejorar su eficiencia el gas debe pasar por un proceso de limpieza	Se obtienen gases de síntesis con un poder calorífico 3 veces superior al de los gasificadores convencionales, se denomina al gas producto de este tipo de gasificador como syngas medio.
Potencia en kW producida	Este tiempo de sistema genera alrededor de 10 MW como máximo.	La producción de kW depende del tamaño del sistema, sin embargo, este es usado mayormente para producir como máximo 1 MW	Debido a que se aplica a pequeñas escalas este puede generar como máximo 1 MW	El sistema es eficaz para producir de ente 1 MW a 100 MW	El sistema es eficaz para producir de ente 1 MW a 100 MW
Tecnología disponible	Es uno de los sistemas más antiguos el cual ha sido usado por diferentes tipos de industrias por lo cual si existe la tecnología para llevar este modelo acabo.	Es uno de los primeros gasificadores implementados por lo cual esta técnica ha sido perfeccionada por lo que es aplicada en diferentes industrias, por lo tanto, se puede decir que si existe tecnología disponible	Este gasificado ya ha sido utilizado con anterioridad en diferentes industrias por lo tanto la tecnología si está disponible para ser usada y ser perfeccionada.	Los gasificadores de lecho fluidizado fueron uno de los primeros en desarrollarse por lo que la tecnología para implementarlos ya existe.	Los gasificadores de lecho fluidizado fueron uno de los primeros en desarrollarse por lo que la tecnología para implementarlos ya existe.

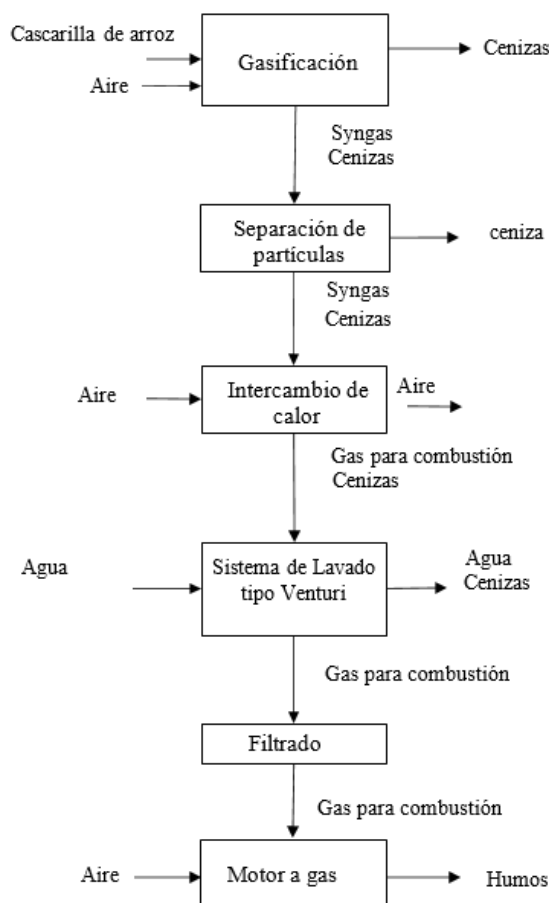
Fuente: Gasification of Unconventional Feedstocks [47], UNIVERSIDAD EAFIT [48], Tratamiento y valorización energética de residuos [49], Universidad de Piura [50]

Anexo 9: Comparación de tecnologías de producción de energía

	Motor de gas	Turbina a gas
Definición	Un motor de gas es un motor de combustión interna que funciona con un combustible gaseoso, como gas de carbón, gas pobre, biogás, gas de vertedero o gas natural.	Es una turbomáquina motora cuyo fluido de trabajo es un gas. La operación básica de la turbina de gas es similar a la máquina de vapor, excepto que en lugar de agua se usa el aire.
Implementación	De implementación sencilla, fácil uso, pero requiere de un gran espacio	Son la tecnología más disponible, de fácil implementación, así como de fácil uso
Contaminación	Liberan grandes cantidades de dióxido de carbono y dióxido de azufre	Produce bajas emisiones debido a que usa gases renovables
Costo	El costo varío según el tamaño, pero en comparación a otras tecnologías tiene mayor costo económico	Tantos sus costos de implementación como sus costos de operación son bajos
Producción de electricidad	La cantidad de kW producidos depende del tamaño del motor y su producción varía desde 10 kW hasta 18 MW	Según su tamaño puede llegar a generar hasta 500 MW

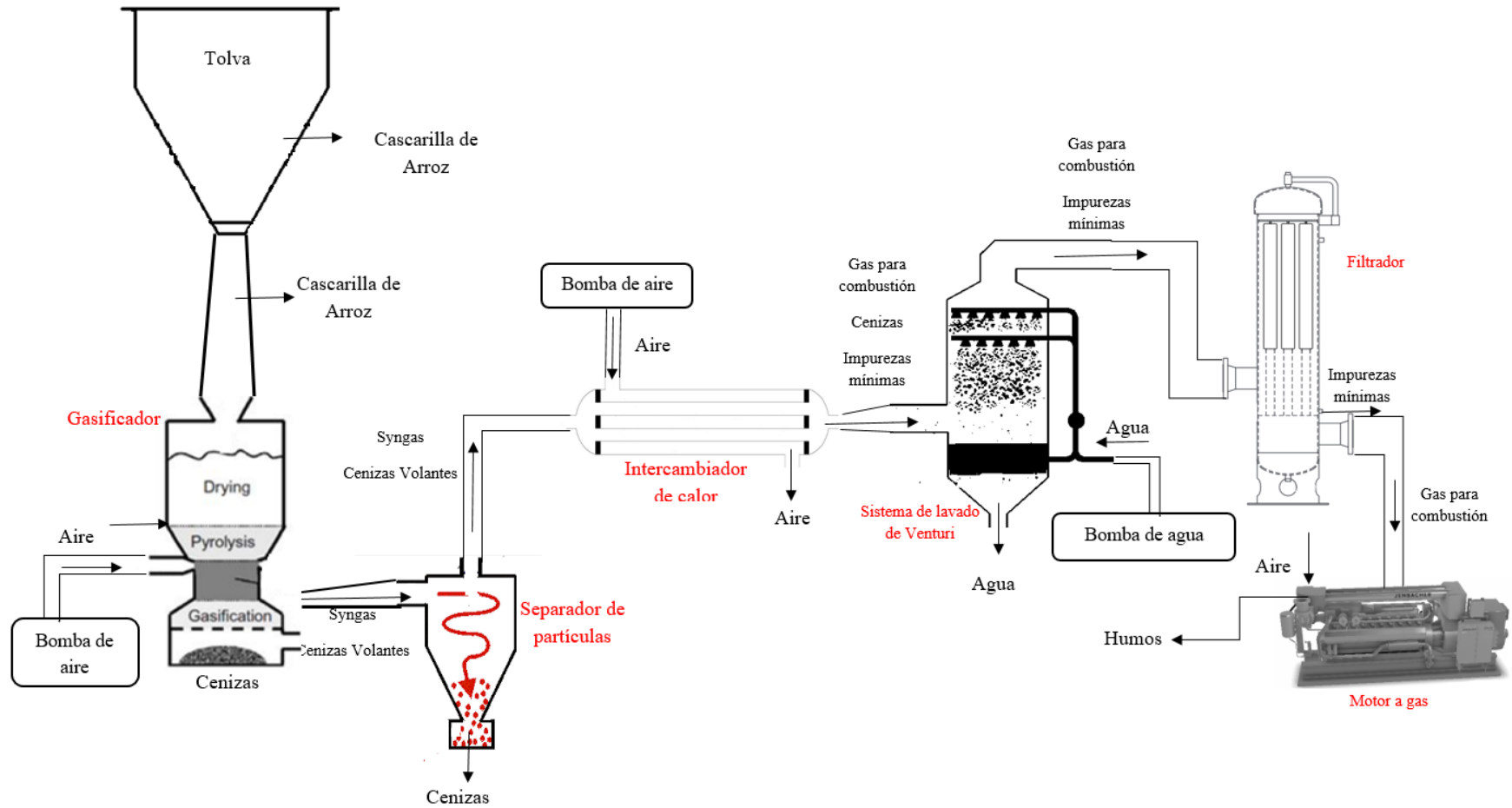
Fuente: Repositorio de tesis de la Universidad de Cantabria [51], Revista de la facultad de ingeniería y arquitectura de la Universidad de Lima [52]

Anexo 10 Sistema de conversión de energía



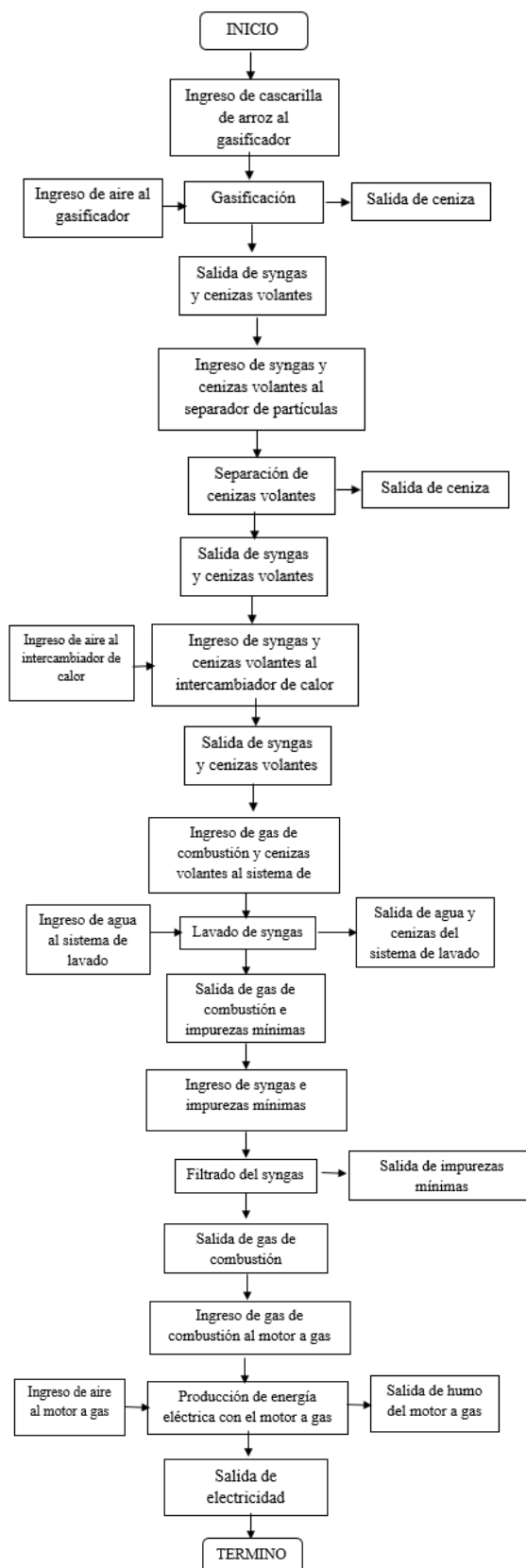
Fuente: Elaboración Propia

Anexo 11: Diagrama de flujo de equipos



Fuente: Elaboración Propia

Anexo 12: Diagrama de flujo de proceso



Fuente: Elaboración Propia

Anexo 13: Cantidad moles de cada elemento presente en los diferentes gases producidos por la gasificación

Compuesto	Composición	Elementos (kmol/kg)				
		C	H	O	N	S
CO	48%	0,01906		0,00026		
CO ₂	48%	0,01906		0,00013		
CH ₄	4%	0,00159	0,00431			
N ₂	-				0,01562	
H ₂ O	-		0,00907	0,00330		
H ₂	-		0,00064			
SO ₂	-			0,02049		0,00005
TOTAL	100%	0,03971	0,01403	0,02418	0,01562	0,00005

Fuente: Elaboración propia

Anexo 14: Entalpías de entrada del gasificador

Fórmula para calcular las entalpías:

$$H = \int cp(T) dT$$

$$cp = a + b \cdot T + c \cdot T^2 + d \cdot T^3$$

- cp: calor específico molar de cada compuesto químico, en kJ/(kmol·K).

- a, b, c, d: constantes, diferentes para cada compuesto químico.

- T: temperatura, en K

Entalpía de entrada para el CO

$$a = 28,16 \quad b = 0,0017 \quad c = 5,4 \cdot 10^{-6} \quad d = -2,2 \cdot 10^{-9}$$

$$H_{CO} = 28,16(298,15) + 0,0017 \left(\frac{298,15^2}{2} \right) + 5,4 \times 10^{-6} \left(\frac{298,15^3}{3} \right) - 2,2 \times 10^{-9} \left(\frac{298,15^4}{4} \right) = 8514,82 \text{ kJ/kmol}$$

Entalpía de entrada para el CO₂

$$a = 22,26 \quad b = 0,0598 \quad c = -3,5 \cdot 10^{-5} \quad d = 7,5 \cdot 10^{-9}$$

$$H_{CO_2} = 22,26(298,15) + 0,0598 \left(\frac{298,15^2}{2} \right) - 3,5 \times 10^{-5} \left(\frac{298,15^3}{3} \right) + 7,5 \times 10^{-9} \left(\frac{298,15^4}{4} \right) = 9000,34 \text{ kJ/kmol}$$

Entalpía de entrada para el H₂

$$a = 29,11 \quad b = -0,0019 \quad c = 4 \cdot 10^{-6} \quad d = -8,7 \cdot 10^{-10}$$

$$H_{H_2} = 29,11(298,15) - 0,0019 \left(\frac{298,15^2}{2} \right) + 4 \times 10^{-6} \left(\frac{298,15^3}{3} \right) - 8,7 \times 10^{-10} \left(\frac{298,15^4}{4} \right) = 628,32 \text{ kJ/kmol}$$

Entalpía de entrada para el CH₄

$$a = 19,89 \quad b = 0,0502 \quad c = 1,3 \cdot 10^{-5} \quad d = -1,1 \cdot 10^{-8}$$

$$H_{CH_4} = 19,89(298,15) + 0,0502 \left(\frac{298,15^2}{2} \right) + 1,3 \times 10^{-5} \left(\frac{298,15^3}{3} \right) - 1,1 \times 10^{-8} \left(\frac{298,15^4}{4} \right) = 8254,55 \text{ kJ/kmol}$$

Entalpía de entrada para el N₂

$$a = 28,9 \quad b = -0,0016 \quad c = 8,1 \cdot 10^{-6} \quad d = -2,9 \cdot 10^{-9}$$

$$H_{N_2} = 28,9(298,15) - 0,0016 \left(\frac{298,15^2}{2} \right) + 8,1 \times 10^{-6} \left(\frac{298,15^3}{3} \right) - 2,9 \times 10^{-9} \left(\frac{298,15^4}{4} \right) = 611,25 \text{ kJ/kmol}$$

Entalpía de entrada para el SO₂

$$a = 25,78 \quad b = 0,058 \quad c = -3,81 \cdot 10^{-5} \quad d = 8,61 \cdot 10^{-9}$$

$$H_{SO_2} = 25,78(298,15) + 0,058 \left(\frac{298,15^2}{2} \right) - 3,81 \times 10^{-5} \left(\frac{298,15^3}{3} \right) + 8,61 \times 10^{-9} \left(\frac{298,15^4}{4} \right) = 9944,63 \text{ kJ/kmol}$$

Fuente: Elaboración propia

Anexo 15: Entalpías de salida del gasificador

Fórmula para calcular las entalpías:

$$H = \int cp(T) dT$$

$$cp = a + b \cdot T + c \cdot T^2 + d \cdot T^3$$

- cp: calor específico molar de cada compuesto químico, en kJ/(kmol·K).

- a, b, c, d: constantes, diferentes para cada compuesto químico.

- T: temperatura, en K

Entalpía de salida para el CO

$$a = 28,16 \quad b = 0,0017 \quad c = 5,4 \cdot 10^{-6} \quad d = -2,2 \cdot 10^{-9}$$

$$H_{CO} = 28,16(1123,15) + 0,0017 \left(\frac{1123,15^2}{2} \right) + 5,4 \cdot 10^{-6} \left(\frac{1123,15^3}{3} \right) - 2,2 \cdot 10^{-9} \left(\frac{1123,15^4}{4} \right) = 34\,375,32 \text{ kJ/kmol}$$

Entalpía de salida para el CO₂

$$a = 22,26 \quad b = 0,0598 \quad c = -3,5 \cdot 10^{-5} \quad d = 7,5 \cdot 10^{-9}$$

$$H_{CO_2} = 22,26(1123,15) + 0,0598 \left(\frac{1123,15^2}{2} \right) - 3,5 \cdot 10^{-5} \left(\frac{1123,15^3}{3} \right) + 7,5 \cdot 10^{-9} \left(\frac{1123,15^4}{4} \right) = 49\,173,32 \text{ kJ/kmol}$$

Entalpía de salida para el H₂

$$a = 29,11 \quad b = -0,0019 \quad c = 4 \cdot 10^{-6} \quad d = -8,7 \cdot 10^{-10}$$

$$H_{H_2} = 29,11(1123,15) - 0,0019 \left(\frac{1123,15^2}{2} \right) + 4 \cdot 10^{-6} \left(\frac{1123,15^3}{3} \right) - 8,7 \cdot 10^{-10} \left(\frac{1123,15^4}{4} \right) = 33\,039,48 \text{ kJ/kmol}$$

Entalpía de salida para el CH₄

$$a = 19,89 \quad b = 0,0502 \quad c = 1,3 \cdot 10^{-5} \quad d = -1,1 \cdot 10^{-8}$$

$$H_{CH_4} = 19,89(1123,15) + 0,0502 \left(\frac{1123,15^2}{2} \right) + 1,3 \cdot 10^{-5} \left(\frac{1123,15^3}{3} \right) - 1,1 \cdot 10^{-8} \left(\frac{1123,15^4}{4} \right) = 55\,765,72 \text{ kJ/kmol}$$

Entalpía de salida para el N₂

$$a = 28,9 \quad b = -0,0016 \quad c = 8,1 \cdot 10^{-6} \quad d = -2,9 \cdot 10^{-9}$$

$$H_{N_2} = 28,9(1123,15) - 0,0016 \left(\frac{1123,15^2}{2} \right) + 8,1 \cdot 10^{-6} \left(\frac{1123,15^3}{3} \right) - 2,9 \cdot 10^{-9} \left(\frac{1123,15^4}{4} \right) = 34\,121,57 \text{ kJ/kmol}$$

Entalpía de salida para el SO₂

$$a = 25,78 \quad b = 0,058 \quad c = -3,81 \cdot 10^{-5} \quad d = 8,61 \cdot 10^{-9}$$

$$H_{SO_2} = 25,78(1123,15) + 0,058 \left(\frac{1123,15^2}{2} \right) - 3,81 \cdot 10^{-5} \left(\frac{1123,15^3}{3} \right) + 8,61 \cdot 10^{-9} \left(\frac{1123,15^4}{4} \right) = 50\,952,20 \text{ kJ/kmol}$$

Fuente: Elaboración propia

Anexo 16: Variaciones de entalpía de cada uno de los compuestos del syngas y su potencia

Variaciones de entalpía de cada compuesto

- $\Delta H_{CO} = 25\,860,38 \text{ kJ/kmol}$
- $\Delta H_{CO_2} = 40\,172,98 \text{ kJ/kmol}$
- $\Delta H_{H_2} = 24\,411,16 \text{ kJ/kmol}$
- $\Delta H_{CH_4} = 47\,511,16 \text{ kJ/kmol}$
- $\Delta H_{N_2} = 25\,510,32 \text{ kJ/kmol}$
- $\Delta H_{SO_2} = 41\,007,57 \text{ kJ/kmol}$

Entalpía total del syngas:

$$H_{\text{syngas}} = \left(\frac{0,28 \text{ kg}}{28 \text{ kmol}}\right) \left(25\,860,38 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}\right) + \left(\frac{0,28 \text{ kg}}{44 \text{ kmol}}\right) \left(40\,172,98 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}\right) + \left(\frac{0,20 \text{ kg}}{2 \text{ kmol}}\right) \left(24\,411,16 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}\right) + \left(\frac{0,23 \text{ kg}}{16 \text{ kmol}}\right) \left(47\,511,16 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}\right) + \left(\frac{0,0047 \text{ kg}}{28 \text{ kmol}}\right) \left(25\,510,32 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}\right) + \left(\frac{0,0053 \text{ kg}}{64 \text{ kmol}}\right) \left(41\,007,57 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}\right) = 3\,646,02 \text{ kJ/kg}$$

Potencia del syngas

$$P_{\text{syngas}} = 0,1 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \left(3\,646,02 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right) = 364,60 \text{ kW}$$

Fuente: Elaboración propia

Anexo 17: Entalpías de entrada de los compuestos al intercambiador de calor

H_{CO}	$34\,375,32 \text{ kJ/kmol}$
----------	------------------------------

H_{CO_2}	$49\,173,32 \text{ kJ/kmol}$
------------	------------------------------

H_{H_2}	$33\,039,48 \text{ kJ/kmol}$
-----------	------------------------------

H_{CH_4}	$55\,765,72 \text{ kJ/kmol}$
------------	------------------------------

H_{N_2}	$34\,121,57 \text{ kJ/kmol}$
-----------	------------------------------

H_{SO_2}	$50\,952,20 \text{ kJ/kmol}$
------------	------------------------------

Fuente: Elaboración propia

Anexo 18: Entalpías de salida del intercambiador de calor

Fórmula para calcular las entalpías:

$$H = \int cp(T) dT$$

$$cp = a + b \cdot T + c \cdot T^2 + d \cdot T^3$$

- cp: calor específico molar de cada compuesto químico, en kJ/(kmol·K).

- a, b, c, d: constantes, diferentes para cada compuesto químico.

- T: temperatura, en K

Entalpía de salida para el CO

$$a = 28,16 \quad b = 0,0017 \quad c = 5,4 \cdot 10^{-6} \quad d = -2,2 \cdot 10^{-9}$$

$$H_{CO} = 28,16(791,15) + 0,0017 \left(\frac{791,15^2}{2} \right) + 5,4 \times 10^{-6} \left(\frac{791,15^3}{3} \right) - 2,2 \times 10^{-9} \left(\frac{791,15^4}{4} \right) = 23\,486,69 \text{ kJ/kmol}$$

Entalpía de salida para el CO₂

$$a = 22,26 \quad b = 0,0598 \quad c = -3,5 \cdot 10^{-5} \quad d = 7,5 \cdot 10^{-9}$$

$$H_{CO_2} = 22,26(791,15) + 0,0598 \left(\frac{791,15^2}{2} \right) - 3,5 \times 10^{-5} \left(\frac{791,15^3}{3} \right) + 7,5 \times 10^{-9} \left(\frac{791,15^4}{4} \right) = 31\,283,25 \text{ kJ/kmol}$$

Entalpía de salida para el H₂

$$a = 29,11 \quad b = -0,0019 \quad c = 4 \cdot 10^{-6} \quad d = -8,7 \cdot 10^{-10}$$

$$H_{H_2} = 29,11(791,15) - 0,0019 \left(\frac{791,15^2}{2} \right) + 4 \times 10^{-6} \left(\frac{791,15^3}{3} \right) - 8,7 \times 10^{-10} \left(\frac{791,15^4}{4} \right) = 23\,010,80 \text{ kJ/kmol}$$

Entalpía de salida para el CH₄

$$a = 19,89 \quad b = 0,0502 \quad c = 1,3 \cdot 10^{-5} \quad d = -1,1 \cdot 10^{-8}$$

$$H_{CH_4} = 19,89(791,15) + 0,0502 \left(\frac{791,15^2}{2} \right) + 1,3 \times 10^{-5} \left(\frac{791,15^3}{3} \right) - 1,1 \times 10^{-8} \left(\frac{791,15^4}{4} \right) = 32\,514,99 \text{ kJ/kmol}$$

Entalpía de salida para el N₂

$$a = 28,9 \quad b = -0,0016 \quad c = 8,1 \cdot 10^{-6} \quad d = -2,9 \cdot 10^{-9}$$

$$H_{N_2} = 28,9(791,15) - 0,0016 \left(\frac{791,15^2}{2} \right) + 8,1 \times 10^{-6} \left(\frac{1123,15^3}{3} \right) - 2,9 \times 10^{-9} \left(\frac{1123,15^4}{4} \right) = 23\,416,49 \text{ kJ/kmol}$$

Entalpía de salida para el SO₂

$$a = 25,78 \quad b = 0,058 \quad c = -3,81 \cdot 10^{-5} \quad d = 8,61 \cdot 10^{-9}$$

$$H_{SO_2} = 25,78(791,15) + 0,058 \left(\frac{791,15^2}{2} \right) - 3,81 \times 10^{-5} \left(\frac{791,15^3}{3} \right) + 8,61 \times 10^{-9} \left(\frac{791,15^4}{4} \right) = 33\,101,79 \text{ kJ/kmol}$$

Fuente: Elaboración propia

Anexo 19: Variaciones de entalpia de cada uno de los compuestos del gas y su potencia

Variaciones de entalpia de cada compuesto

- $\Delta H_{CO} = -10\,888,51 \text{ kJ/kmol}$
- $\Delta H_{CO_2} = -17\,890,07 \text{ kJ/kmol}$
- $\Delta H_{H_2} = -10\,028,68 \text{ kJ/kmol}$
- $\Delta H_{CH_4} = -23\,250,73 \text{ kJ/kmol}$
- $\Delta H_{N_2} = -10\,705,08 \text{ kJ/kmol}$
- $\Delta H_{SO_2} = -17\,850,41 \text{ kJ/kmol}$

Entalpia total del syngas:

$$H_{cedida} = \left(\frac{0,28 \text{ kg}}{28 \text{ kmol}}\right) \left(-10\,888,51 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}\right) + \left(\frac{0,28 \text{ kg}}{44 \text{ kmol}}\right) \left(-17\,890,07 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}\right) + \left(\frac{0,20 \text{ kg}}{2 \text{ kmol}}\right) \left(-10\,028,68 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}\right) + \left(\frac{0,23 \text{ kg}}{16 \text{ kmol}}\right) \left(-23\,250,73 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}\right) + \left(\frac{0,0047 \text{ kg}}{28 \text{ kmol}}\right) \left(-10\,705,08 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}\right) + \left(\frac{0,0053 \text{ kg}}{64 \text{ kmol}}\right) \left(-17\,850,41 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}\right) = -1\,563,10 \text{ kJ/kg}$$

Potencia Cedida

$$P_{gas} = 0,1 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \left(-1\,563,10 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right) = -156,31 \text{ kW}$$

$$P_{gas} = 364,60 - 156,31 = 208,29 \text{ kW}$$

Fuente: Elaboración propia

Anexo 20: Entalpías de entrada de los compuestos al intercambiador de calor

H_{CO}	23 486,69 kJ/kmol
H_{CO_2}	31 283,25 kJ/kmol
H_{H_2}	23 010,8 kJ/kmol
H_{CH_4}	32 514,99 kJ/kmol
H_{N_2}	23 416,49 kJ/kmol
H_{SO_2}	33 101,79 kJ/kmol

Fuente: Elaboración propia

Anexo 21: Entalpías de salida del sistema de lavado

Fórmula para calcular las entalpías:

$$H = \int cp(T) dT$$

$$cp = a + b \cdot T + c \cdot T^2 + d \cdot T^3$$

- cp: calor específico molar de cada compuesto químico, en kJ/(kmol·K).

- a, b, c, d: constantes, diferentes para cada compuesto químico.

- T: temperatura, en K

Entalpía de salida para el CO

$$a = 28,16 \quad b = 0,0017 \quad c = 5,4 \cdot 10^{-6} \quad d = -2,2 \cdot 10^{-9}$$

$$H_{CO} = 28,16(323,15) + 0,0017 \left(\frac{323,15^2}{2} \right) + 5,4 \times 10^{-6} \left(\frac{323,15^3}{3} \right) - 2,2 \times 10^{-9} \left(\frac{323,15^4}{4} \right) = 9\,243,41 \text{ kJ/kmol}$$

Entalpía de salida para el CO₂

$$a = 22,26 \quad b = 0,0598 \quad c = -3,5 \cdot 10^{-5} \quad d = 7,5 \cdot 10^{-9}$$

$$H_{CO_2} = 22,26(323,15) + 0,0598 \left(\frac{323,15^2}{2} \right) - 3,5 \times 10^{-5} \left(\frac{323,15^3}{3} \right) + 7,5 \times 10^{-9} \left(\frac{323,15^4}{4} \right) = 9\,942,41 \text{ kJ/kmol}$$

Entalpía de salida para el H₂

$$a = 29,11 \quad b = -0,0019 \quad c = 4 \cdot 10^{-6} \quad d = -8,7 \cdot 10^{-10}$$

$$H_{H_2} = 29,11(323,15) - 0,0019 \left(\frac{323,15^2}{2} \right) + 4 \times 10^{-6} \left(\frac{323,15^3}{3} \right) - 8,7 \times 10^{-10} \left(\frac{323,15^4}{4} \right) = 9\,350,31 \text{ kJ/kmol}$$

Entalpía de salida para el CH₄

$$a = 19,89 \quad b = 0,0502 \quad c = 1,3 \cdot 10^{-5} \quad d = -1,1 \cdot 10^{-8}$$

$$H_{CH_4} = 19,89(323,15) + 0,0502 \left(\frac{323,15^2}{2} \right) + 1,3 \times 10^{-5} \left(\frac{323,15^3}{3} \right) - 1,1 \times 10^{-8} \left(\frac{323,15^4}{4} \right) = 9\,165,90 \text{ kJ/kmol}$$

Entalpía de salida para el N₂

$$a = 28,9 \quad b = -0,0016 \quad c = 8,1 \cdot 10^{-6} \quad d = -2,9 \cdot 10^{-9}$$

$$H_{N_2} = 28,9(323,15) - 0,0016 \left(\frac{323,15^2}{2} \right) + 8,1 \times 10^{-6} \left(\frac{323,15^3}{3} \right) - 2,9 \times 10^{-9} \left(\frac{323,15^4}{4} \right) = 9\,156,48 \text{ kJ/kmol}$$

Entalpía de salida para el SO₂

$$a = 25,78 \quad b = 0,058 \quad c = -3,81 \cdot 10^{-5} \quad d = 8,61 \cdot 10^{-9}$$

$$H_{SO_2} = 25,78(323,15) + 0,058 \left(\frac{323,15^2}{2} \right) - 3,81 \times 10^{-5} \left(\frac{323,15^3}{3} \right) + 8,61 \times 10^{-9} \left(\frac{323,15^4}{4} \right) = 10\,954,07 \text{ kJ/kmol}$$

Fuente: Elaboración propia

Anexo 22: Variaciones de entalpía de cada uno de los compuestos del gas y su potencia

Variaciones de entalpía de cada compuesto

- $\Delta H_{CO} = -14\,243,28 \text{ kJ/kmol}$
- $\Delta H_{CO_2} = -21\,340,84 \text{ kJ/kmol}$
- $\Delta H_{H_2} = -13\,660,49 \text{ kJ/kmol}$
- $\Delta H_{CH_4} = -23\,349,09 \text{ kJ/kmol}$
- $\Delta H_{N_2} = -14\,260,01 \text{ kJ/kmol}$
- $\Delta H_{SO_2} = -22\,147,72 \text{ kJ/kmol}$

Entalpía total del syngas:

$$H_{cedida} = \left(\frac{0,28 \text{ kg}}{28 \text{ kmol}}\right) \left(-14\,243,28 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}\right) + \left(\frac{0,28 \text{ kg}}{44 \text{ kmol}}\right) \left(-21\,340,84 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}\right) + \left(\frac{0,20 \text{ kg}}{2 \text{ kmol}}\right) \left(-13\,660,49 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}\right) + \left(\frac{0,23 \text{ kg}}{16 \text{ kmol}}\right) \left(-23\,349,09 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}\right) + \left(\frac{0,0047 \text{ kg}}{28 \text{ kmol}}\right) \left(-14\,260,01 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}\right) + \left(\frac{0,0053 \text{ kg}}{64 \text{ kmol}}\right) \left(-22\,147,72 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}\right) = -1\,984,16 \text{ kJ/kg}$$

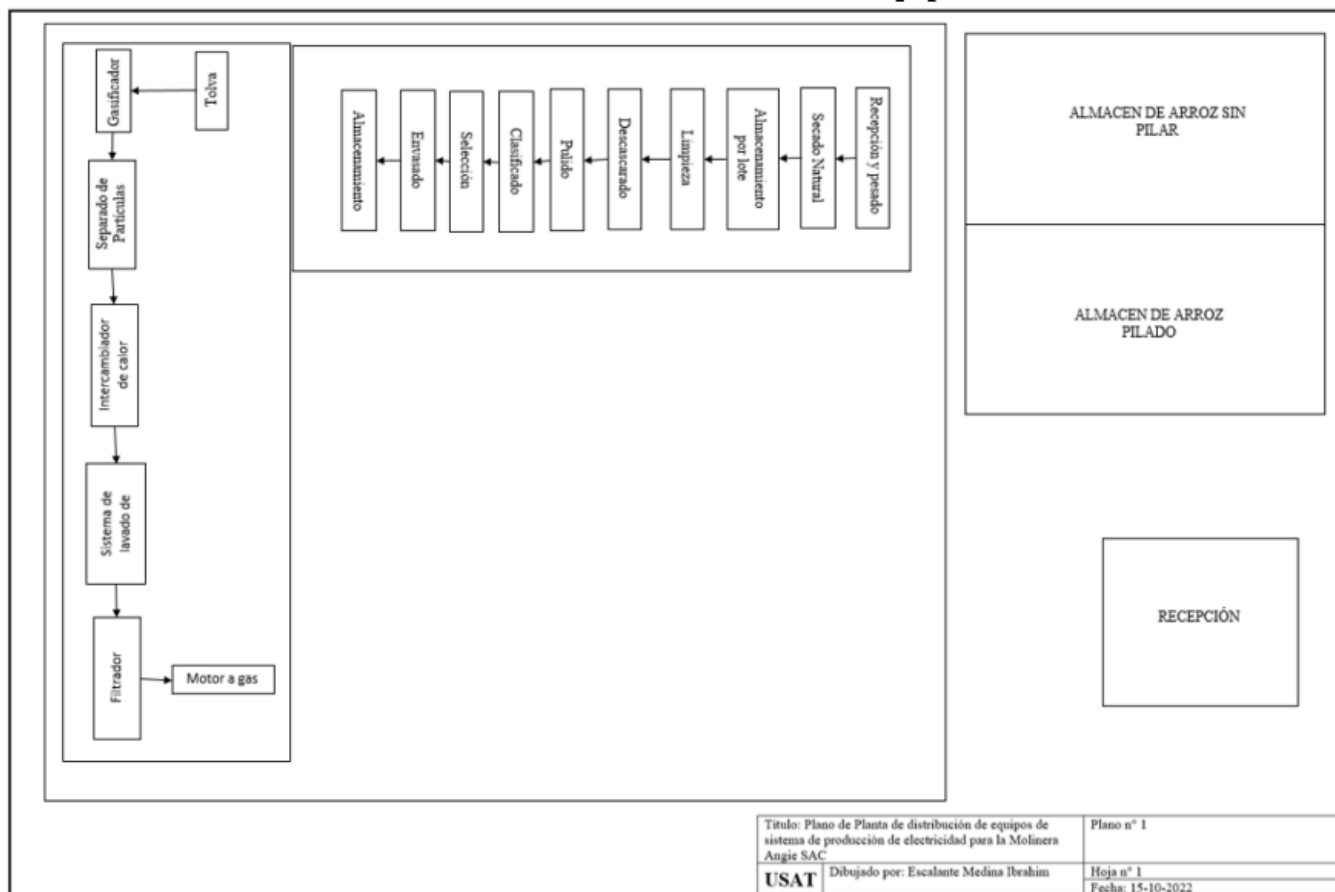
Potencia Cedida

$$P_{gas} = 0,1 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \left(-1\,984,16 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right) = -198,42 \text{ kW}$$

$$P_{gas} = 208,29 - 198,42 = 9,88 \text{ kW}$$

Fuente: Elaboración propia

Anexo 23: Plano de distribución de equipos



Elaboración propia