

UNIVERSIDAD EUROPEA DE CANARIAS

MÁSTER EN ENERGÍAS RENOVABLES

MÓDULO 10: TRABAJO FINAL DE MÁSTER

TUTOR: SANTIAGO MARTÍNEZ VARELA

**ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL USO DE
CASCARILLA DE ARROZ COMO FUENTE DE GENERACIÓN DE ENERGÍA EN
LA PLANTA ARROCERA “LA GLORIA”, UBICADA EN EL MUNICIPIO DE
FONSECA, GUAJIRA.**

JOSE MANUEL FERNÁNDEZ

JOHN JAMES MURIEL

DIEGO ANDRÉS PARRA

JORGE MARIO TORRES

FAIBER ALEXANDER ZORA HERNÁNDEZ

ABRIL DE 2025

TABLA DE CONTENIDO

1.	RESUMEN	7
2.	ABSTRACT	8
3.	INTRODUCCIÓN	9
4.	OBJETIVOS	10
4.1.	OBJETIVO GENERAL	10
4.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
5.	DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN	11
6.	JUSTIFICACIÓN	19
7.	MARCO TEÓRICO	22
7.1.	Definición de biomasa	22
7.1.1.	Composición química de la cascarilla de arroz	22
7.1.2.	Contenido de humedad cascarilla de arroz.....	22
7.2.	Definición de gasificación.....	22
7.3.	Definición Gas de síntesis	24
7.4.	Contenido de cenizas	24
7.5.	Tipos de Gasificadores	24
7.5.1.	Downdraft y Updraft.....	25
7.5.2.	De flujo arrastrado	25
7.5.3.	Lecho fluido burbujeante	26
7.6.	Agentes gasificantes	26
7.6.1.	Diagrama de flujo del proceso	27
7.7.	Sistemas generadores fotovoltaicos	29
8.	METODOLOGÍA	33
8.1.	Gasificación de la biomasa.....	33
8.2.	Sistema fotovoltaico.....	34
9.	ANÁLISIS TÉCNICO DE LA SOLUCIÓN ADOPTADA	36
9.1.	Balance de Masa	36
9.1.1.	Entrada de Biomasa.....	36
9.1.2.	Entrada de aire	36

9.1.3. Salida de Biomasa	37
9.2. Balance de Energía.....	37
9.2.1. Entrada de Energía.....	37
9.2.2. Salida de energía	38
9.3. Resumen de balance masa y energía	39
9.4. Potencia requerida para satisfacer la demanda energética	39
9.5. Potencia térmica necesaria	40
9.6. Biomasa requerida por hora.....	40
9.7. Biomasa mensual requerida para suplir demanda energética	41
9.8. Biomasa disponible en la instalación para suplir demanda energética	41
9.9. Excedentes de energía.....	41
9.10. Condiciones de máxima eficiencia.....	42
9.11. Cantidad de biomasa requerida por hora	43
9.12. Tiempo Operación máxima instalación	43
9.13. Excedentes a la red	43
9.14. Resumen de la instalación fotovoltaica propuesta.....	44
9.14.1. Energía generada	44
9.14.0. Cálculos eléctricos	45
9.14.1. Corriente continua. Fórmulas utilizadas	46
9.14.2 Corriente alterna.....	48
9.14.3 Cálculo estructural	51
10. ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PROYECTO	53
10.1. Análisis del Presupuesto por Fases y Tecnologías.....	53
10.1.1. Viabilidad financiera	54
10.2. Resultados del análisis base.....	55
10.2.1. Justificación del análisis de sensibilidad.....	56
10.2.2. Resultados del análisis	57
10.2.3. Resultados del análisis	58
10.2.4. Análisis de resultados	58
10.3. Situación actual vs sistema de generación	58
10.3.1. Situación actual.....	58
10.3.2. Situación con el proyecto de generación eléctrica	59
11. CONCLUSIONES	60

11.1 CONCLUSIONS 61

11.3 RECOMENDACIONES FUTURAS 62

12. BIBLIOGRAFÍA 63

TABLA DE IMAGENES

Imagen 1 Ubicación de la planta productora de arroz La Gloria.....	11
Imagen 2 Tableros eléctricos de la planta.	12
Imagen 3 Disposición y almacenamiento del arroz blanco y de la cascarilla de arroz.....	14
Imagen 4 Horno y proceso de secado del arroz	15
Imagen 5 Equipos de la planta.....	16
Imagen 6 Distribución de las áreas de la planta	17
Imagen 7 Variación anual del costo de la electricidad en Colombia.	18
Imagen 8 Área sembrada de arroz según zona arrocera en Colombia. [4]	21
Imagen 9 proceso de gasificación y generación de energía eléctrica. [6]	24
Imagen 10 Tipos de gasificadores según fuente externa de energía. [5]	24
Imagen 11 Diagrama de flujo del proceso de gasificación.....	27
Imagen 12 esquema de un sistema fotovoltaico [8].....	31
Imagen 13 esquema de un sistema fotovoltaico conectado a red [8]	31
Imagen 14 ubicación de los paneles solares en la planta arrocera La Gloria.....	35
Imagen 15 dimensionamiento del sistema fotovoltaico.	45
Imagen 16 tipología de la instalación AC y DC.....	46

TABLA DE TABLAS

Tabla 1 Área sembrada de arroz según zona arroceras en Colombia. [4]	21
Tabla 2 Cuadro de cargas actuales en oficinas.....	34
Tabla 3 Cuadro de cargas proyectadas en oficinas.....	34
Tabla 4 Resumen de balance de masa y energía.....	39
Tabla 5 resumen de los cálculos realizados	48
Tabla 6 Tabla de sección de tubos vs conductores.....	50
Tabla 7 Cuadro General de Mando y Protección	50
Tabla 8 Resumen calculo AC.....	51
Tabla 9 Tabla 3.1 del documento básico de Seguridad Estructural [14]	52
Tabla 10 presupuesto del proyecto.....	54
Tabla 11 Flujo de caja del proyecto.....	55
Tabla 12 Flujo de caja del proyecto - Escenario favorable.....	56
Tabla 13 Flujo de caja del proyecto - Escenario favorable.....	57
Tabla 14 Flujo de caja del proyecto - Escenario conservador	57

1. RESUMEN

La planta arrocera "La Gloria", ubicada en el municipio de Fonseca, departamento de La Guajira en Colombia, tiene un consumo eléctrico considerable para sus procesos industriales y administrativos, lo cual representa costos operativos altos, debido a este consumo. La biomasa resultante del proceso, es decir, la cascarilla de arroz, no se aprovecha en la generación de energía, sino que una parte de esta, se vende para hacer las camas y galpones de las gallinas y pollos en el sector avícola. Debido al potencial energético de la cascarilla, se propone un sistema de gasificación, mediante la combustión de la cascarilla de arroz para generar la energía requerida para el autoconsumo y vender los excedentes a la red. Adicionalmente, se propone implementar un sistema de energía fotovoltaica para independizar el consumo energético de las áreas de producción y administrativas y de esta manera, diversificar la matriz energética de la planta, teniendo una generación energética híbrida.

Por consiguiente, el estudio propone un Sistema de Gasificación de lecho fijo tipo downdraft, que utilizará la cantidad de biomasa disponible en la planta, alrededor de 224.400Kg/mes, con una humedad del 13% después del proceso de secado. Teniendo en cuenta el dimensionamiento realizado, se requiere de una potencia a instalar del grupo de electrógenos de 250 kW. Para esto, deberá suministrársele al gasificador, la cantidad de 440 kg/h de cascarilla para generar 213 kWe por hora.

Adicionalmente, el estudio propone aprovechar el recurso solar de la zona y los tejados de la infraestructura para construir un sistema de generación fotovoltaico de 30 kWp, que alimentará eléctricamente el área administrativa de la planta y cubrirá un futuro crecimiento de esta área. Mediante el estudio propuesto se presenta la viabilidad económica y financiera con un valor actual neto (VAN) de USD\$196.389,33, un 4% mayor al teórico y una TIR de 19% considerándose una propuesta viable y atractiva para el propietario de la planta arrocera.

PALABRAS CLAVE: Gasificación, Eficiencia Energética, Optimización de Procesos, Biomasa, Energía Solar.

2. ABSTRACT

The "La Gloria" rice plant, located in the municipality of Fonseca, department of La Guajira in Colombia, consumes considerable electricity for its industrial and administrative processes, which represents high operating costs, due to this consumption. The biomass resulting from the process, rice husks, is not used for energy generation; instead, a portion of it is sold to make bedding and sheds for hens and chickens in the poultry sector. Due to the energy potential of rice husks, a gasification system is proposed, through the combustion of rice husks to generate the energy required for self-consumption and sell the surplus to the grid. Additionally, a photovoltaic energy system is proposed to separate energy consumption from the production and administrative areas and thus diversify the plant's energy matrix, achieving hybrid energy generation.

Therefore, the study proposes a downdraft-type fixed-bed gasification system, which will utilize the available biomass at the plant—approximately 224,400 kg/month—with a moisture content of 13% after, the drying process. Considering the sizing, the generator set requires an installed capacity of 250 kW. To achieve this, the gasifier must be supplied with 440 kg/h of husk to generate 213 kWe per hour.

Additionally, the study proposes taking advantage of the area's solar resources and the infrastructure's rooftops to build a 30 kWp photovoltaic generation system, which will power the plant's administrative area and cover future growth in this area. The proposed study presents the economic and financial feasibility with a net present value (NPV) of USD \$196,389.33, 4% higher than the theoretical value, and an IRR of 19%, considering it a viable and attractive proposal for the owner of the rice plant.

KEY WORDS: Gasification, Energy Efficiency, Process Optimization, Biomass, Solar Energy.

3. INTRODUCCIÓN

Según cifras de la Federación Nacional de Arroceros (FNA), Colombia es el segundo país productor de arroz de América Latina y del Caribe. El arroz mecanizado representa el 98% de la producción Nacional y al menos el 95% del área total sembrada en el país, la cual fluctúa entre las 400 a 500 mil hectáreas por año. (Fedearroz)¹

Este potencial no se aprovecha en toda su extensión en áreas como la generación de energía a través de procesos de la reutilización de la biomasa derivada, gracias a su poder calorífico, sino que se subutiliza.

Por otra parte, la industria arrocera colombiana produce 400.000 toneladas de cascarilla de arroz al año, de las cuales cerca de un 15% es aprovechado como combustible y otro tanto como elemento para esparcir en establos, lo que significa que una gran proporción de esta fibra es incinerada infructuosamente o arrojada a cursos de agua, lo cual repercute negativamente en el ecosistema, dadas las exigentes condiciones que requiere su combustión completa y su elevada resistencia al ataque biótico, respectivamente. (UNAD, 2020)²

Adicionalmente, la Región Caribe colombiana, es decir, los departamentos que componen la parte norte del país, en donde se presentan habitualmente altas temperaturas y a la cual pertenece el departamento de La Guajira, lugar geográfico de ubicación del proyecto, atraviesa actualmente por una problemática energética compleja en donde los costos de la energía son altos, la demanda ha aumentado, principalmente porque la temperatura también ha subido, debido a los efectos del cambio climático, lo cual ha generado una alerta de posibles razonamientos o cortes de energía programados.

De ahí que, proyectos como el propuesto en esta zona particular del país, que aporten a resolver la problemática energética de la región y que, además, permitan aprovechar los recursos generados de la siembra del arroz, dándole un uso sostenible y eficiente a la biomasa, surgen como una gran oportunidad para el desarrollo de las empresas, aportando valor agregado a la producción de cultivos como el arroz y contribuyendo a generar ingresos adicionales a las empresas.

¹ (Fedearroz) Federación Nacional de Arroceros. www.fedarroz.com.co

² (UNAD 2020) “Alternativas de usos de la cascarilla de arroz en Colombia para el mejoramiento del sector productivo y la industria”. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Yopal, Casanare, 2020.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar una evaluación técnica y económica de la utilización de biomasa resultante del proceso productivo, es decir, cascarilla de arroz, con el fin de producir energía en la planta productora de arroz “La Gloria”, en el municipio de Fonseca, departamento de La Guajira, en Colombia, de tal forma que permita evaluar cuál alternativa es más rentable para la planta, entre autogenerar su propia energía, o vender la cascarilla a empresas del sector avícola.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar cuál es la mejor alternativa económica para la planta, entre continuar vendiendo la cascarilla de arroz al sector avícola, o autogenerar energía para disminuir costos operativos y vender excedente a la red, generando ingresos económicos adicionales.
- Diseñar un sistema fotovoltaico que permita independizar el consumo energético de la línea productiva, del consumo energético de las actividades administrativas y las oficinas con la implementación de un sistema híbrido de generación de energía paneles solares, dando respuesta a una de las preocupaciones y deseos del propietario de la planta.
- Realizar una revisión energética para identificar puntos de mejora en cuanto a eficiencia energética, teniendo en cuenta que en el proceso hay bombas, motores, tableros eléctricos y condiciones operativas que pueden optimizarse para lograr reducciones en consumos eléctricos y de esta manera, disminuir el costo energético operativo de la planta.

5. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN

La planta productora de arroz, La Gloria, está ubicada en el municipio de Fonseca, departamento de la Guajira, al norte de Colombia. Tiene principalmente 4 áreas: recibo de la materia prima (arroz de campo o *paddy verde*), secado, molinaje y área de oficinas.



Imagen 1 Ubicación de la planta productora de arroz La Gloria

La planta cuenta con todos los equipos necesarios para la producción de arroz. De manera general, hay elevadores, pre limpiadoras, hornos de secado, descascaradora, separadora, tornillos sinfín para transporte del grano en diferentes partes del proceso, ventadoras o ventiladoras, una máquina cárter para sacar la piedra y el arroz que no se alcanza a descascarar, polichadora, blanqueadora y una máquina para el pulimiento del arroz, compresores de aire, zaranda, cilindros, aires

acondicionados, iluminación, entre otros. En total, hay aproximadamente uno 25 a 30 motores, entre 1 HP y 70HPs de potencia. Más adelante, cuando se habla del consumo energético, se detallan los motores de mayor consumo y algunos problemas que se están presentando y que generan sobrecostos energéticos y económicos.

Solamente hay 3 tableros eléctricos, de los cuales destaca uno, el más grande, en donde se encuentra centralizado el manejo de 21 motores. Dentro de este tablero también hay un banco de condensadores.



Imagen 2 Tableros eléctricos de la planta.

A su vez, los motores de mayor consumo tienen sistemas de arranque estrella-triángulo y sólo el motor del ventilador, asociado al horno de secado, cuenta con un variador.

En términos generales, los equipos y motores tienen varios años de funcionamiento, lo cual incide directamente en su rendimiento y eficiencia energética. Las instalaciones eléctricas también tienen varios años y, en varios sitios de la planta, estas no cumplen con la normatividad eléctrica colombiana que regula este tipo de instalaciones.

Aunque se hizo una inspección eléctrica general a la planta y se evidenciaron varias acciones de mejora que se pueden implementar para reducir el consumo eléctrico, mediante estrategias de eficiencia energética, no es alcance de este proyecto investigativo el llevar a cabo estas acciones. No obstante, a continuación, se enumeran algunas de las acciones que se pueden implementar para lograr esta reducción.

- Medición de calidad de energía en puntos estratégicos.
- *Análisis termográfico para identificar "puntos calientes", o sitios en donde se pueden presentar anomalías en las instalaciones eléctricas.*
- Elaboración de la curva base y curva meta de energía.
- Implementación de sistemas más eficientes en los motores más grandes, para controlar de manera más óptima su funcionamiento y consumo energético.
- Implementación de sistemas de medición de variables y de control, para optimización de procesos. Actualmente, no hay ningún tipo de control implementado en la planta, ni tampoco de medición de variables operativas.
- Mejoramiento de instalaciones físicas y locativas, reemplazo y/o actualización de redes eléctricas

En cuanto a la producción de arroz y su correspondiente biomasa, en la actualidad, la planta recibe, aproximadamente, 1.020.000 kg/mes de arroz de campo o *paddy verde*, es decir, el grano con su cascarilla.

De esta cantidad, se obtienen aproximadamente 612.000 kg/mes de arroz blanco, equivalente al 60% de *paddy verde*, 224,400 kg/mes de cascarilla de arroz, equivalente al 22%, un 8% de harina y el resto, pérdidas por impurezas. La harina es un subproducto que se utiliza en la elaboración de concentrado para animales y no hace parte del estudio o desarrollo del presente proyecto.

El arroz blanco es empacado en bultos de 50 kilos, mientras que la cascarilla de arroz se dispone y almacena en pacas, en donde, cada paca equivalente a 43 – 45 kg.



Imagen 3 Disposición y almacenamiento del arroz blanco y de la cascarilla de arroz

La cascarilla de arroz tiene 2 usos principalmente. Sirve como combustible para el horno que genera el calor requerido para el proceso de secado. Este horno es un equipo de varios años de antigüedad, por lo cual ya ha perdido eficiencia. Adicionalmente, no hay una forma precisa de poder medir la temperatura del horno y de esta manera, cuantificar la cascarilla de arroz requerida para producir el calor necesario en el proceso de secado. Esta cantidad de calor tampoco se puede medir o cuantificar. Solo mediante mediciones manuales de humedad a muestras aleatorias del arroz que está en secamiento, cuando la humedad es del 13%, ahí es cuando dejan de generar calor. Esto hace que se presenten pérdidas energéticas en forma de calor y también que se desperdicie cascarilla.

De acuerdo con cifras que lleva la planta, en promedio, entre diciembre de 2024 y febrero de 2025, se quemaron 6204 kg/mes de cascarilla en el horno para generar el calor requerido en el secado del grano.

El otro uso que se le da a la cascarilla, y que tiene un peso importante por los ingresos económicos de la planta, es su venta, destinada al sector avícola, ya que la usan para las camas de las gallinas o los pollos en los galpones. Debido a su buen precio de venta, se ha convertido en una fuente de ingresos importante y continua para la planta, por lo que nunca se ha explorado la idea de utilizar la cascarilla para generación de energía.

Según cifras de la planta, en el mismo periodo de tiempo se vendieron 89.129 kg/mes, en promedio, de cascarilla de arroz, lo cual equivale a unos ingresos económicos estimados de \$26.300.000 COP, o a unos €5.700 euros. Por su parte, la cascarilla quemada, representa unos ingresos económicos que se dejaron de percibir, de unos €400 euros mensuales.

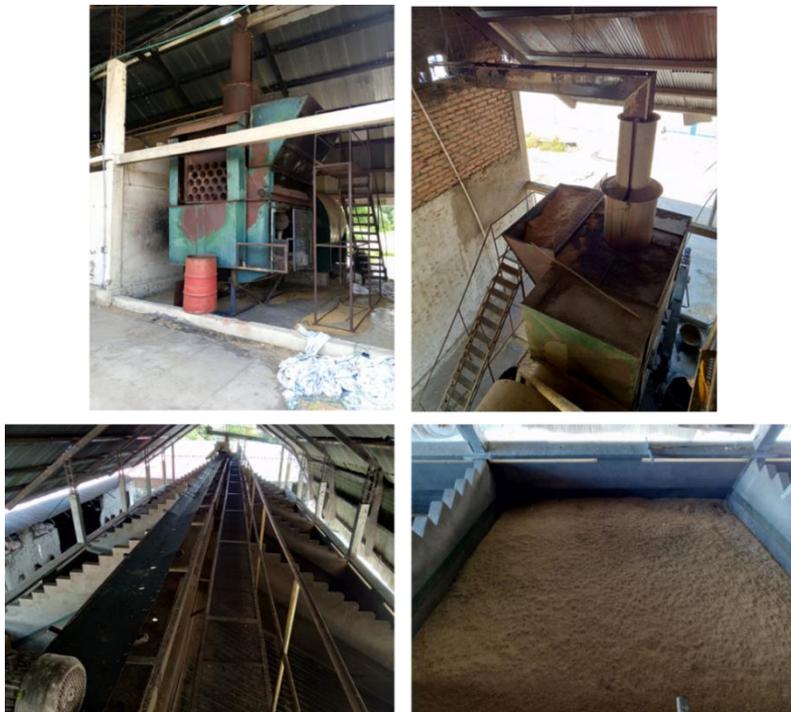


Imagen 4 Horno y proceso de secado del arroz

En cuanto al consumo energético de la planta, según se puede evidenciar en la factura del servicio de energía del operador de red, este es de 31.500 kWh/mes, en promedio, lo cual equivale a unos €5.900 euros de costo mensual asociado a este consumo.

La planta tiene principalmente 4 áreas, en donde se distribuye este consumo de energía. Estas áreas son: recibo de la materia prima (*paddy verde*), secado, molinaje y área de oficinas.

El mayor consumo energético está en las áreas de secado y molinaje, entre las cuales se suman unos 21 motores, dentro de los cuales hay 2 de 70 HPs y uno de 60 HP, que es el del ventilador asociado al horno, el cual llega a trabajar hasta 30 horas continuas, durante el proceso de secado del arroz. Destacan también otros 2 motores de 30 HPs, uno en el área de recibo y otro en el área de molinaje. El resto de motores se ubican en el rango de 2 a 10 HPs.



Imagen 5 Equipos de la planta

Solo uno de los motores grandes, el del ventilador de 60 HPs, cuenta con variador de frecuencia, mientras que los motores grandes tienen configuraciones estrella – triángulo o los demás, arrancadores directos. Esta situación produce una energía reactiva alta, que se mueve entre los 2.500 y 3.200 kWh/mes, generando una *penalidad económica mensual de entre €400 €500 euros mensuales, dependiendo de los consumos.*

Por su parte, el área de oficinas también tiene un consumo significativo, ya que cuenta con 2 aires acondicionados de 18.000 BTUs cada uno. Hay un tablero eléctrico principal en donde se centraliza y distribuye la energía. De ahí, hay una protección o breaker que independiza el área de oficinas y parqueadero, del área de molinaje.



Imagen 6 Distribución de las áreas de la planta

A todo lo anterior, hay que adicionarle que el costo de la energía en el departamento de La Guajira y en la Costa Atlántica en general, es bastante alto y el servicio presenta intermitencias, lo cual afecta la producción de arroz y el funcionamiento de los equipos.

La siguiente imagen muestra la variación y el incremento del costo de la energía por regiones en el país. Se toma la ciudad de Riohacha como referencia, por ser la más cercana al municipio de Fonseca, ambas, en el departamento de La Guajira. [1]

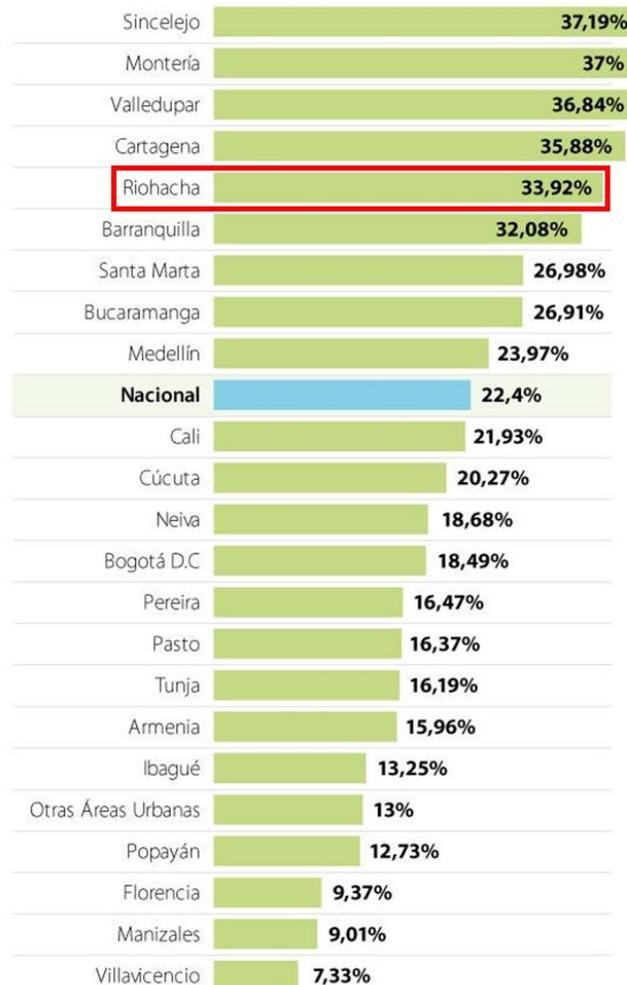


Imagen 7 Variación anual del costo de la electricidad en Colombia.

6. JUSTIFICACIÓN

Se hizo especial énfasis en el estudio del horno de secado de arroz existente en la planta, con el fin de ver si es viable su uso para mejorar su eficiencia energética y operativa, o si lo más conveniente es reemplazarlo por otro horno similar, u otra tecnología que permita generar el calor requerido para el proceso de secado y a su vez, producir la energía, total o parcial, que demanda la planta para reducir el consumo de electricidad de la red y los costos asociados a este consumo.

El horno actual se utiliza para secar el arroz, mediante el calor que genera por la quema de la cascarilla. El equipo tiene varios años de fabricación y operación, y aunque hace un año se le hizo una intervención y reparación significativa, no hay como medir e identificar las variables operativas del equipo como temperatura de calentamiento, cantidad de biomasa requerida para generar calor, gases, flujo másico de calor, entre otros, de tal forma que se pueda determinar o medir con precisión su eficiencia energética y si hay pérdidas de calor durante el proceso de secado. Adicionalmente, con este equipo, actualmente no es posible generar energía para aprovechar el resto de cascarilla sobrante del proceso, por lo que, parte del análisis del proyecto se centró en la viabilidad de cambiar el horno por uno más moderno, o integrar al proceso un equipo que permita llevar a cabo ambas funciones: generar energía eléctrica para el autoabastecimiento de la planta y generar calor para el secado del arroz.

Después de revisar aspectos como la infraestructura existente y cómo se pudiera integrar un nuevo equipo con doble propósito, económicos y logísticos, por todo lo que representaría sacar el horno de funcionamiento e incorporar un nuevo equipo al proceso, se optó por mantener el horno existente y centrarnos en el proceso de generación de energía mediante la implementación de un gasificador a base de cascarilla de arroz para producir parte de la energía, o eventualmente, la totalidad, que demanda la planta en su operación.

Teniendo en cuenta la alta producción de cascarilla de arroz, su poder calorífico, los elevados consumos energéticos de la planta y la problemática energética en general de la zona, se plantea la pregunta de cómo hacer para generar energía eléctrica, a partir del aprovechamiento de la gasificación de la cascarilla de arroz en la planta arrocera La Gloria. Con esto, se podrá lograr una diversificación en la matriz energética de la planta y, por ende, una disminución en el costo que se paga por la energía utilizada y perdida en forma de reactiva. Adicionalmente, también se plantea la pregunta de si es posible generar el calor requerido para el secado del grano, con el mismo equipo, y de esta forma, sustituir el horno existente.

El presente estudio se desarrolla con el propósito de resolver estas dudas y teniendo en cuenta la necesidad y búsqueda de alternativas para la disminución del consumo de energía convencional y el máximo aprovechamiento de la cascarilla de arroz como fuente principal de autogeneración de energía eléctrica y, eventualmente, calor en la planta.

Pensando en una solución integral, se abordó la opción de reemplazar el horno existente por un equipo que pueda realizar ambas funciones, es decir, generar energía y también calor, a través de ciclos de Rankine convencionales. No obstante, después de una revisión del alcance, que incluyó componentes técnicos, logísticos y económicos, se llegó a la conclusión de que, aunque hay equipos que, en efecto, pueden hacer ambas funciones, no resultaría viable debido al bajo consumo de la planta y los equipos de combustión de biomasa con ciclos de Rankine están pensados para proyectos por encima de megavatios de producción. De este modo se decidió enfocar el proyecto a conseguir la independencia energética de la planta, a través de un proceso de gasificación de la cascarilla del arroz.

El sistema de gasificación permitirá una rentabilidad favorable para la empresa, reduciendo los costos energéticos operativos, e integrando y maximizando el uso de la biomasa como combustible al proceso de producción de arroz.

En Colombia, la empresa productora de arroz, Arroz Diana, inauguró a inicios del año 2025 una planta de autogeneración de energía renovable a base de biomasa de cascarilla de arroz, en su planta productora de arroz, ubicada en el municipio de Yopal, Casanare. [2]

También se desarrolló un proyecto similar en el molino de arroz Pacandé, ubicado en la ciudad de Villavicencio, Meta, en el año 2019. [3]

De acuerdo a las cifras de la Federación Nacional de Arroceros, en conjunto con el Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas – DANE, la producción de arroz en la zona de la Costa Norte, conformada por los departamentos de Atlántico, Cesar, La Guajira, lugar de ejecución del proyecto, Magdalena y el municipio de Yondó en Antioquia, se muestra en la siguiente gráfica, lo cual evidencia el potencial que esta tecnología tiene, tanto a nivel regional, como nacional. [4]

AÑO	BAJO CAUCA	CENTRO	COSTA NORTE	LLANOS	SANTANDERES	TOTAL NACIONAL
2020	95.038	153.610	26.832	280.234	40.700	596.415
2021	81.167	127.573	20.419	279.576	35.901	544.635
2022	63.691	128.101	20.469	283.885	38.769	534.915
2023	65.787	144.059	23.199	316.064	40.744	589.853
2024	76.264	143.852	24.911	344.281	41.763	631.071

Tabla 1 Área sembrada de arroz según zona arroceras en Colombia. [4]

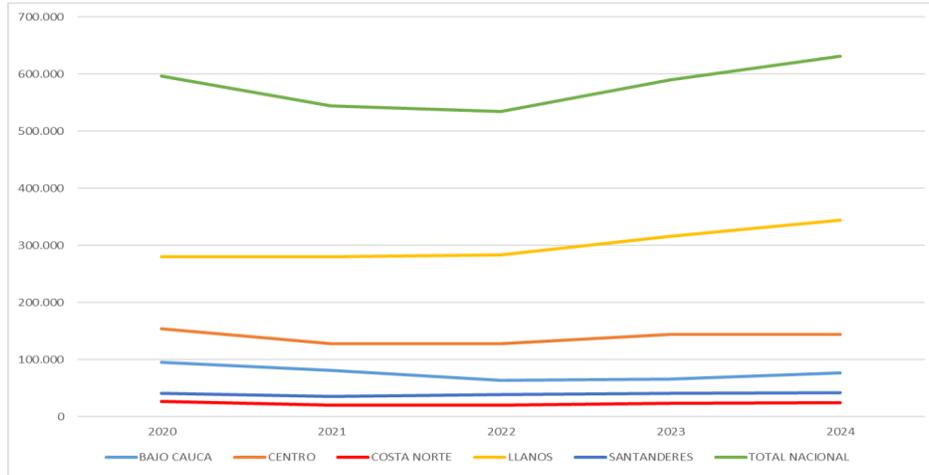


Imagen 8 Área sembrada de arroz según zona arroceras en Colombia. [4]

La tecnología propuesta se adapta muy bien a las bajas potencias requeridas por la instalación, en contraposición con los sistemas tradicionales de Rankine inicialmente considerados.

Asimismo, con el objetivo de independizar los consumos de la línea productiva y de la zona administrativa y de gestión, se decidió la implementación de paneles fotovoltaicos, debido a las buenas condiciones de radiación solar de la zona. Esto se justifica en el sentido en que, en momentos de poca o nula producción de arroz y por ende, cascarilla y no pueda generar singas, la parte administrativa de la planta no detenga, sus actividades económicas, de ventas, de talento humano y podrán seguir funcionando sin ningún problema. Estimamos además una instalación fotovoltaica de 30 KW para abastecer la demanda actual y proyectar al crecimiento administrativo que muestra la planta, sus zonas comunes se ampliarán en un comedor, un parqueadero para empleados, una cocina y zonas de recreación que con la potencia proyectada a instalar estaría cubierta.

Hasta que este eminente crecimiento de la planta administrativa se materialice, lo cual se espera que sea para finales del año 2025, con la instalación propuesta se pretende exportar los excedentes de energía fotovoltaica a la red con un acuerdo de compra a la comercializadora en venta o en compensación.

7. MARCO TEÓRICO

7.1. Definición de biomasa

El Parlamento Europeo y del Consejo en su directiva 2018/2001 definen a la biomasa como la fracción que puede ser biodegradada de toda aquella materia residual de origen biológico, animal o vegetal proveniente de actividades de campo, agroindustriales o sectores afines, incluyendo a el sector urbano o comercial que le de manejo a materias orgánicas. En esta investigación el proceso de gasificación se llevará a cabo gracias a la cascarilla de arroz.

7.1.1. Composición química de la cascarilla de arroz

La cascarilla de arroz se compone de los siguientes elementos principalmente: 16,22% Carbono fijo (cantidad de carbono elemental sin tener en cuenta humedad y cenizas), 38,83% Carbono, 4,75% Hidrógeno, 35,47% Oxígeno, y otros que se presentan en menor cantidad como el Nitrógeno 0,52%, el Cloro en 0,12% y Azufre en 0,05%

7.1.2. Contenido de humedad cascarilla de arroz

El porcentaje de humedad es la cantidad de agua, expresada porcentualmente que se encuentra en la biomasa, este es un indicativo fundamental para poder determinar si el material es apto para el proceso de gasificación, dado que su contenido de humedad impacta directamente en el poder calorífico que puede exhibir

En este proyecto el arroz recibido llega con una humedad del 24% y luego del secado alcanza una humedad del 13%

7.2. Definición de gasificación

La gasificación es un proceso mediante el cual una materia orgánica se transforma en un gas combustible. A diferencia de la incineración, que trabaja en exceso de oxígeno, en la gasificación se emplea tan solo el 25 - 30% del oxígeno necesario para la combustión completa de la materia orgánica, lo cual conlleva una serie de ventajas medioambientales.

En la gasificación, la energía química contenida en la materia orgánica se convierte en energía química contenida en un gas. Este gas se puede utilizar como combustible para la obtención de energía en motores, turbinas de gas o calderas.

Las cenizas pueden considerarse un residuo o bien valorizarlas, usándolas como material de construcción, fertilizante, en la fabricación de vidrio, etc. Si la materia orgánica es un residuo con bajo contenido en cenizas y éstas no son aprovechables se habrá conseguido minimizar considerablemente el volumen de residuo al tiempo que se inertiza y se aprovecha su contenido energético.

El proceso se realiza bajo una serie de pasos en el gasificador, conocidos como subprocesos: secado, pirolisis, combustión y reducción, los cuales ocurren en un rango de calor de 700 a 900°C. Este proceso genera o absorbe una cantidad de energía cuando se produce el fenómeno, conocido como entalpía de reacción (calor necesario de intercambio para que se produzca la reacción). En el proceso se utiliza un catalizador para la gasificación, que es añadido con el fin de actuar como agente oxidante en las reacciones y mejorar la fracción de hidrógeno que es producido. Este agente oxidante puede ser aire, oxígeno o vapor y su elección dependerá de la aplicación, del presupuesto y de los productos a los que se desean llegar, debido a que algunos pueden resultar muy costosos, pero con una eficiencia de conversión mucho mayor a los otros, como es el caso del oxígeno de gasificación.

Así pues, la gasificación es una técnica eficaz para reducir el volumen de residuos sólidos y recuperar su energía, convirtiéndose en la vía más adecuada para la obtención de energía eléctrica y térmica en el marco del desarrollo sostenible. Son susceptibles de ser gasificados aquellos materiales con un alto contenido en carbono (cualquier tipo de carbón, biomasa, residuos orgánicos y residuos carbonosos).

El gas resultante del proceso contiene monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrógeno (H₂), metano (CH₄), pequeñas cantidades de otros hidrocarburos más pesados, agua (H₂O), nitrógeno (N₂) cuando se usa aire como agente gasificante y diversos contaminantes como pequeñas partículas carbonosas, cenizas, alquitranes y aceites.

Los gases CO, H₂ y CH₄ contenidos en el gas resultante confieren poder calorífico al gas, ya que pueden reaccionar con oxígeno en un motor de combustión, una caldera o una turbina de gas.

El siguiente esquema muestra el proceso de gasificación y generación de electricidad a partir de la quema de cascarilla de arroz.

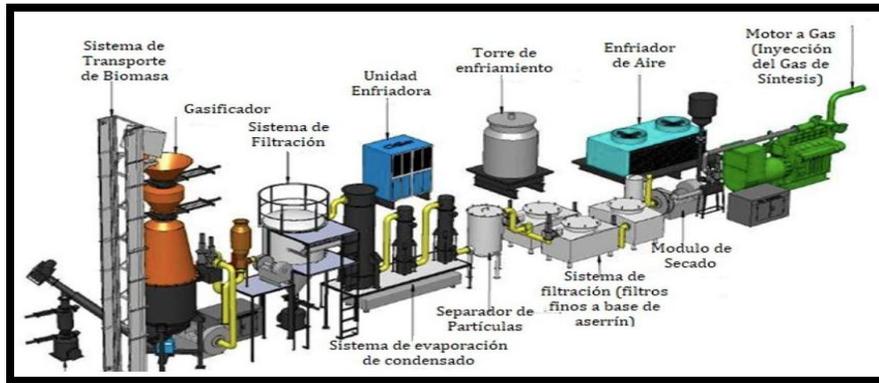


Imagen 9 proceso de gasificación y generación de energía eléctrica. [6]

7.3. Definición Gas de síntesis

En el proceso de conversión de la biomasa por gasificación, el objetivo es obtener el “syngas”, un gas formado principalmente por hidrógeno (H_2), metano (CH_4), monóxido de carbono (CO), nitrógeno (N_2) y dióxido de carbono (CO_2), pero también este gas puede contener otros tipos de componentes en menor proporción.

7.4. Contenido de cenizas

Se refiere a la fracción de material en la biomasa que es inorgánico por tanto inerte durante la combustión (no genera energía útil para el proceso) puede generar obstrucción en el proceso y forma parte del deber de limpieza y mantenimiento mantener sus niveles bajos, para así evitar fallos en el proceso

7.5. Tipos de Gasificadores

Los gasificadores se pueden clasificar atendiendo a la necesidad o no de una fuente externa de energía que proporcione el calor necesario para el proceso.

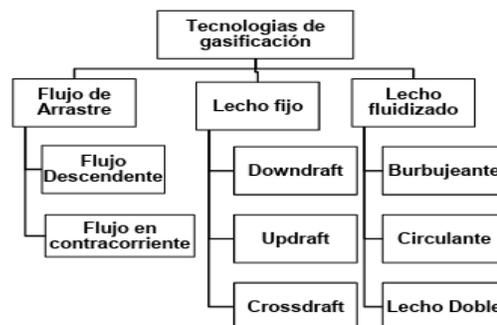


Imagen 10 Tipos de gasificadores según fuente externa de energía. [5]

7.5.1. Downdraft y Updraft

En un gasificador de lecho fijo la materia prima descansa sobre una rejilla en el fondo del reactor. Dicha materia se introduce desde la parte superior y llega por gravedad al lecho de la misma velocidad que se consume. El tiempo de permanencia del material es largo y la velocidad del gas, es baja. Es necesario que el producto tenga un tamaño homogéneo para permitir que el gas se distribuya de manera uniforme dentro del reactor. De lo contrario, la reacción puede ser insuficiente en algunas de las zonas o producirse sobrecalentamiento en otras. Los dos principales tipos de gasificador de lecho fijo downdraft, o flujo descendente y updraft, o flujo contracorriente, son difíciles de escalar pues presentan riesgo de una distribución irregular del gas y de la formación de corrientes dentro del lecho.

En un gasificador downdraft el gas pobre abandona el reactor por el fondo. Su principal ventaja es la relativa baja producción de alquitranes. Mientras el gas se está generando es obligado a atravesar la zona caliente donde tiene lugar el craqueo de los alquitranes. En cualquier caso, a carga parcial la temperatura en el gasificador es menor y la cantidad de alquitranes en el gas pobre aumenta. A carga total se forman pocos alquitranes, pero aumenta la cantidad de cenizas arrastradas por el gas debido a la mayor velocidad del gas. El gas pobre que se obtiene tiene una temperatura relativamente alta, por lo que la eficiencia es baja.

En un gasificador updraft o de contracorriente el aire entra por el fondo y el gas pobre sale por la parte superior. Una de las ventajas es que admite materiales con mayor humedad puesto que el gas pobre seca en su trayecto hacia arriba, logrando, por lo general una eficiencia elevada. Como contrapartida, el contenido en alquitranes es muy elevado.

7.5.2. De flujo arrastrado

En un reactor de flujo de arrastre se pueden gasificar partículas sólidas y combustibles líquidos atomizados o emulsionados. Las reacciones tienen lugar en un denso ambiente de finas partículas o gotitas. Una elevada temperatura y presión permite una carga elevada en el reactor. Se formarán escorias o no dependiendo de la temperatura de trabajo, sí es mayor o menor que la fusión de las cenizas de la materia prima introducida. Con temperaturas elevadas las cenizas se transformarán en escoria fundida. La biomasa es muy reactiva, lo que facilita su gasificación a relativamente baja temperatura, pero su elevada porosidad y

capacidad de retener la humedad hacen imposible introducirla en un estado de emulsión.

7.5.3. Lecho fluido burbujeante

En un gasificador de lecho fluido la materia prima y el lecho se fluidizan introduciendo un agente oxidante como aire, oxígeno, vapor o una combinación de ellos, desde abajo, de manera que el lecho se expande desde arriba. La velocidad del agente empleado determina si se trata de un lecho fluido burbujeante (BFB) o de un lecho fluido circulante (CFB). En los CFB la velocidad del agente oxidante es tan elevada que las partículas de materia prima y del lecho son arrastradas por el gas pobre afuera del reactor. Estas partículas son separadas por el ciclón y vuelven al reactor. El lecho permite una distribución uniforme de la temperatura y una mayor estabilidad en la reacción. Los lechos fluidos suelen ser bastante indiferentes al contenido en cenizas y otras especificaciones del combustible. Existe un gran número de variedades de estos gasificadores: inyección de oxígeno, de aire, a presión atmosférica o presurizada. Admiten bien el escalado de los reactores.

7.6. Agentes gasificantes

A su vez, estos gasificadores requieren un agente gasificante para su operación. Dependiendo del agente utilizado, así mismo será su eficiencia operativa. Los principales agentes gasificantes son los siguientes:

- Aire: El aire se introduce como aporte de calor mediante la combustión de una fracción de la biomasa procesada, que suele estar entre el 20% y el 25% en masa de la biomasa de alimentación. Se obtiene un gas de bajo poder calorífico (<6MJ/Nm³) ya que tiene una gran concentración, entre el 40% y el 60%, en nitrógeno. Puede usarse para la generación de energía térmica y eléctrica.
- Oxígeno: Se produce un gas de contenido energético medio (10,20 MJ/Nm³), cuyas aplicaciones son similares al obtenido con aire, pero de mayor calidad, al no estar diluido con nitrógeno.
- Vapor de agua y/u oxígeno: El gas obtenido está enriquecido en H₂ y CO y se puede utilizar como gas de síntesis en los procesos de síntesis de metanol.
- Hidrógeno: Se produce un gas de alto contenido energético (>30 MJ/Nm³) que por tener altos porcentajes de metano puede utilizarse como sustituto del gas natural.

7.6.1. Diagrama de flujo del proceso

En este diagrama se describe las partes del proceso de gasificación planeadas para el proyecto

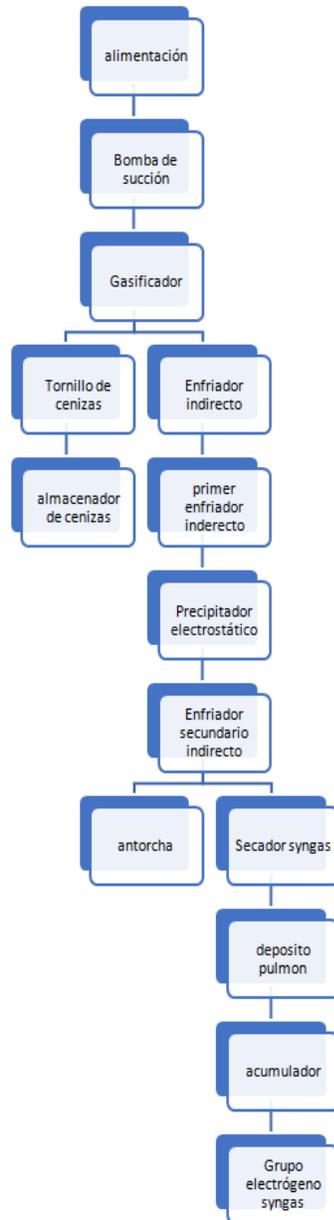


Imagen 11 Diagrama de flujo del proceso de gasificación

- Alimentación: se refiere a la entrada de biomasa al proceso dando inicio a las reacciones termodinámicas del proceso consta de una superficie de entrada amplia que conecta a la tubería de la bomba de succión.
- Bomba de succión: es un dispositivo que permite la entrada de la biomasa al gasificador posee un colector de polvo para evitar la entrada de partículas no

deseadas al proceso y reduciendo la productividad, un tubo de succión que permite el transporte de la biomasa y un ventilador de tiro inducido que remueve el aire para generar un vacío jalando la biomasa al sistema.

- Gasificador: luego de que la bomba de succión entrega la carga llega a un depósito conocido como pulmón que almacena la biomasa del gasificador y permite el control regulado de la cantidad de materia ingresada mientras la materia es procesada para por procesos de zona.

Zona 1: zona de secado temperaturas de 20 a 200 grados centígrados que hacen que la biomasa pierda su humedad.

Zona 2: zona de pirolisis temperaturas de 200 a 800 grados centígrados logrando la descomposición de la biomasa para producir syngas combustible y biochar.

Zona 3: zona de oxidación temperaturas de 800 a 1000 grados centígrados logrando las reacciones de gasificación uniendo el carbono con el oxígeno.

Zona 4: zona de reducción temperaturas de 600 a 800 grados centígrados esta parte logra la estabilización de los gases y el removimiento del tar del proceso logrando separar los componentes de syngas y biochar.

- Tornillo de cenizas: consta de un dispositivo que remueve la parte solida del proceso el biochar para ser almacenado.
- Almacenador de cenizas: consta de una salida mediante una bomba de succión y un colector de polvo para luego almacenar el biochar en un depósito para su uso posterior.
- Enfriador indirecto: consta de un sistema de tuberías que permite el enfriado del syngas gracias a la temperatura ambiente y también aprovecha a recoger el polvo que haya quedado de procesos anteriores.
- Primer enfriador indirecto: permite el enfriado del syngas en tuberías gracias a el flujo de agua que actúa como refrigerante en un tanque especializado por el cual las tuberías pasan.
- Precipitador electrostático: permite la separación de cualquier partícula remanente del proceso en el syngas mediante un campo eléctrico de corriente continua de alta intensidad.
- Enfriador secundario indirecto: sirve de función de enfriamiento luego del proceso electrostático permitiendo la manipulación más sencilla del syngas.
- Antorcha: es un dispositivo que existe para eliminar el exceso de syngas en el sistema quemándolo, la reacción ocurre gracias a una chispa eléctrica que produce la ignición del gas de ahí su nombre.
- Secador syngas: permite la eliminación de la humedad del syngas luego de eliminar todas las partículas.
- Deposito pulmón: actúa como un depósito de syngas listo para ser convertido en energía y actuando como una válvula de salida controlada.

- Acumulador: actúa como un generador de corriente eléctrica usando el syngas como combustible luego de ponerlo en marcha actúa como un motor de combustión generando energía eléctrica para alimentar la demanda de energía.
- Grupo electrógeno syngas: es el medio que permite el control de la energía generada para controlar y regular la energía generada para su distribución a la planta o a la red.

7.7. Sistemas generadores fotovoltaicos

Un sistema solar fotovoltaico (SFV) es un sistema que convierte la luz solar directamente en electricidad mediante el efecto fotoeléctrico. Utiliza paneles solares que contienen células fotovoltaicas, generalmente de silicio, para generar electricidad. Estos sistemas pueden ser autónomos o conectados a la red, y pueden utilizar baterías para almacenar el exceso de energía.

La radiación solar que alcanza la Tierra puede aprovecharse por medio del calor que produce, como también a través de la absorción de la radiación; por ejemplo, en dispositivos ópticos o de otro tipo.

La potencia de la radiación varía según el momento del día, las condiciones atmosféricas que la amortiguan y la latitud. Se puede asumir que en buenas condiciones de irradiación el valor es de aproximadamente 1000 W/m² en la superficie terrestre. A esta potencia se la conoce como irradiancia.

La radiación es aprovechable en sus componentes directa y difusa, o en la suma de ambas. La radiación directa es la que llega directamente del foco solar. Sin reflexiones o refracciones intermedias. La difusa es la emitida por la bóveda celeste diurna gracias a los múltiples fenómenos de reflexión y refracción solar en la atmósfera, en las nubes y el resto de elementos atmosféricos y terrestres. La radiación directa puede reflejarse y concentrarse para su utilización, mientras que no es posible concentrar la luz difusa que proviene de todas las direcciones. La irradiancia directa normal (o perpendicular a los rayos solares) fuera de la atmósfera, recibe el nombre de constante solar y tiene un valor medio de 1354 W/m² (que corresponde a un valor máximo en el perihelio de 1395 W/m² y un valor mínimo en el afelio de 1308 W/m²). [8]

Dentro de los elementos que componen un sistema solar fotovoltaico están los siguientes:

- Paneles solares: son los componentes principales que absorben la luz solar y la convierten en electricidad. Contienen las células fotovoltaicas, que son las unidades individuales dentro de los paneles que generan electricidad cuando se exponen a la luz.
- Inversor: Este dispositivo convierte la corriente continua (CC) generada por los paneles solares en corriente alterna (CA), que es el tipo de corriente que se usa en las casas y negocios.
- Baterías: Se usan en sistemas autónomos para almacenar la electricidad generada por los paneles solares y ser utilizada durante la noche o cuando no hay luz solar.
- Sistema de monitoreo: Permite supervisar el rendimiento del sistema y la producción de energía.
- Puesta a tierra: La puesta a tierra de la instalación es muy importante ya que delimita la tensión que pueda presentarse en un momento dado en las masas metálicas de los componentes, asegurando la actuación de las protecciones y eliminando el riesgo que supone el mal funcionamiento o avería de alguno de los equipos. Las tomas a tierra se establecen principalmente a fin de limitar la tensión que puedan presentar en un momento dado las masas metálicas, asegurar la actuación de las protecciones y eliminar o disminuir el riesgo que supone una avería en los materiales eléctricos utilizados.
- Estructura de soporte de paneles solares: El bastidor es el encargado de sujetar el panel solar. Se diseña de acuerdo a la normativa existente, teniendo en cuenta la fuerza del viento, entre otras cosas. La estructura deberá soportar como mínimo una velocidad del viento de 150 Km/h. Esta estructura es la que fijará la inclinación de los paneles solares. Hay varios tipos de estructuras; desde un simple poste que soporta 4 paneles solares, hasta grandes estructuras de vigas aptas para aguantar varias decenas de ellos.
- Cableado de interconexión: Es el encargado de conectar los distintos paneles solares con las cajas de interconexión y con otra instrumentación o equipos. El cableado debe contemplarse tanto para corriente alterna (AC), como para corriente continua o directa (DC). [8]

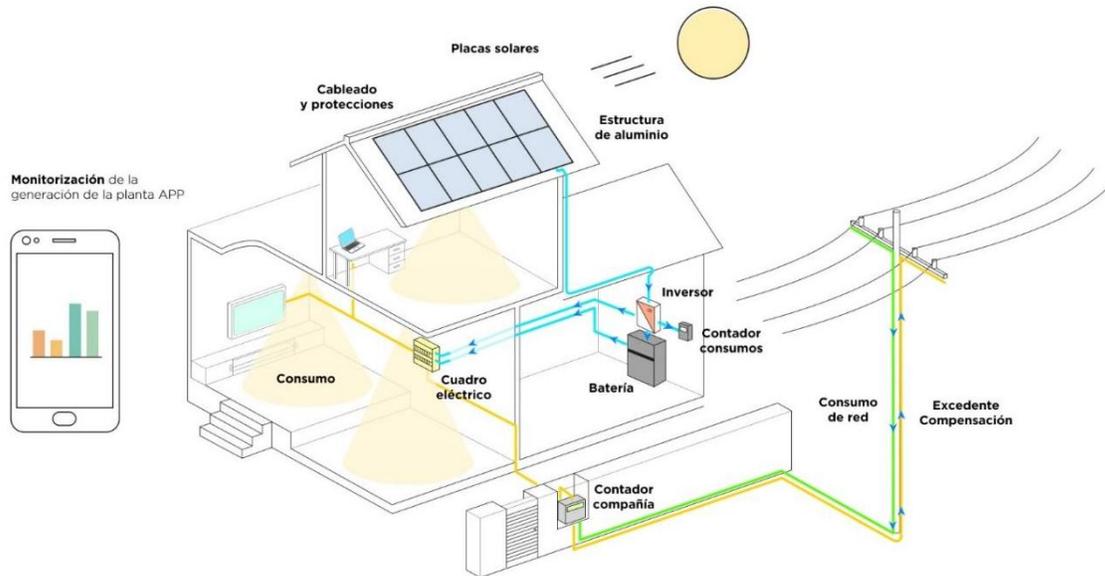


Imagen 12 esquema de un sistema fotovoltaico [8]

Hay, básicamente, 3 tipos de sistemas fotovoltaicos. Los sistemas conectados a la red, los cuales se conectan a la red eléctrica convencional y pueden inyectar el exceso de energía generada en la red; los sistemas autónomos, que funcionan de forma independiente, sin estar conectados a la red, y utilizan baterías para almacenar la energía y los sistemas híbridos, que combinan características de ambos tipos, conectando la red y utilizando baterías.

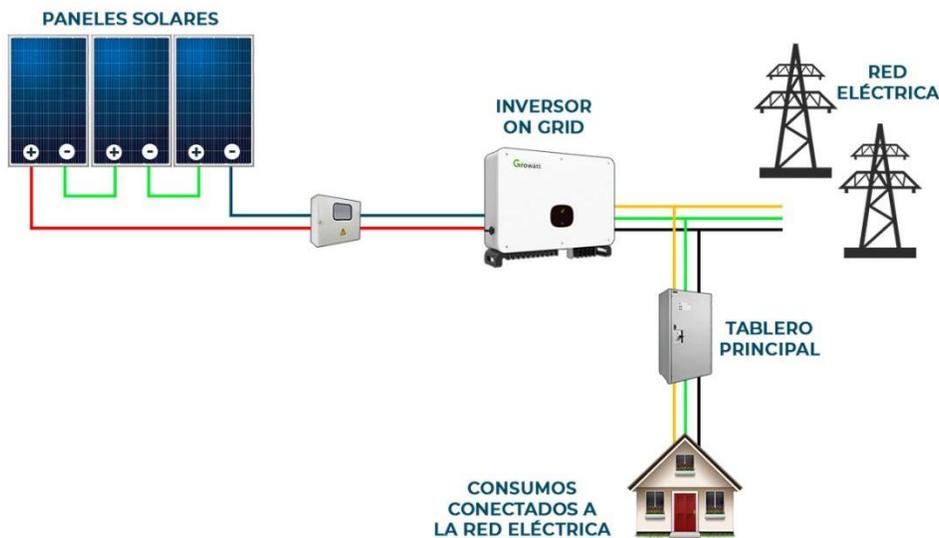


Imagen 13 esquema de un sistema fotovoltaico conectado a red [8]

Dentro de las instalaciones conectadas a la red eléctrica, podemos diferenciar entre instalaciones de venta a mercado (*utility scale*) o instalaciones de autoconsumo. La primera, presenta la ventaja de la reducción de costos que generan las economías de escala características de este tipo de proyectos, mientras que en las instalaciones de autoconsumo se produce energía a pequeña escala de electricidad para el propio consumo. El autoconsumo se puede complementar con el balance neto, que permite compensar el consumo en momentos de baja generación mediante la energía generada y vertida a la red en momentos en que la generación es mayor que el consumo.

El autoconsumo fotovoltaico permite generar energía de forma distribuida, de modo que:

- Se reduce la necesidad de invertir en nuevas redes.
- Se reducen las pérdidas de energía por el transporte de la electricidad a través de la red.
- Se reduce los problemas para abastecer toda la demanda en hora punta.
- Se minimiza el impacto visual de las instalaciones eléctricas. [9]

8. METODOLOGÍA

En el marco de los objetivos del proyecto, se procede a desarrollar la metodología empleada para el dimensionado de los equipos necesarios, tanto en el gasificador, como en la planta fotovoltaica.

8.1. Gasificación de la biomasa

La tecnología de gasificación para la biomasa de cascarilla de arroz seleccionada para este proyecto, es la de gasificación por lecho fijo tipo *downdraft*. Las ventajas de este proceso son la tolerancia a partículas más grandes, lo que hace que no sean necesarios procesos de reducción de las partículas de la biomasa. La cascarilla de arroz puede ser ingresada al proceso de gasificación luego de su descascarillado y secado sin necesidad de pasos posteriores que aumentarían el coste del proyecto. Adicionalmente en la bibliografía consultada para el desarrollo del proyecto, se indica que este tipo de gasificador es el más idóneo para la producción de potencia eléctrica a pequeña escala, es decir, entre 1 kW a 1 MW.

Para poder dimensionar el gasificador, se requieren los siguientes datos de entrada:

- Cantidad de biomasa disponible diaria para generación de energía.
- Consumo eléctrico actual.
- Cantidad de energía que se quiere generar con la planta gasificadora.

Los datos iniciales de partida se muestran a continuación:

- Radiación solar promedio anual: 1859,85 kWh/m².
- Consumo eléctrico:
 - Promedio mensual: 31.500 kWh.
 - Promedio anual: 378 MWh.
- Producción de arroz:
 - Arroz de campo (*paddy verde*): 1.020.000 kg/mes.
 - Arroz blanco: 612.000 kg/mes (equivalente al 60% del arroz de campo).
 - Cascarilla de arroz: 224.400 kg/mes (equivalente al 22% del arroz de campo).
- Poder calorífico inferior (PCI) de la cascarilla de arroz: 14.5 MJ/kg.
- Energía térmica potencial de la cascarilla:
 - 3.253.800 MJ/mes.
 - 911,06 MWh/mes.

- 10.932,77 MWh/año.

Más adelante, en el desarrollo del documento, se explica en detalle todo el dimensionamiento de la propuesta tecnológica para la implementación del gasificador.

8.2. Sistema fotovoltaico

En cuanto al sistema fotovoltaico complementario, dedicado a suplir las necesidades energéticas de las oficinas, el cálculo de carga para las instalaciones de la oficina nos arroja inicialmente la necesidad de 7,85 kW.

TIPOLOGIA	POT. INSTALADA (kW)	COEF. SIMULTANEIDAD (%)	(kW) TOTALES
Aires acondicionados (3)	10,20	70,0%	7,14
ILUMINACION	0,20	85,0%	0,17
ILUMINACION EXTERIOR	0,60	90,0%	0,54
POTENCIA TOTAL	11,00		7,85

Tabla 2 Cuadro de cargas actuales en oficinas

Una vez realizada una reunión con el gerente de la planta arrocera nos indica que tendrán un crecimiento administrativo en esta planta dado que el personal administrativo, de recursos humanos y comercial de otras tres plantas que tiene en el sector se concentraran en esta sede. Con lo cual el cuadro de cargas cambia significativamente.

TIPOLOGIA	POT. INSTALADA (kW)	COEF. SIMULTANEIDAD (%)	(kW) TOTALES
Aires acondicionados (9)	30,60	70,0%	21,42
ILUMINACION	1,20	85,0%	1,02
ILUMINACION EXTERIOR	1,50	85,0%	1,28
COCINA Y COMEDOR	8,6	60,0%	5,2
ZONA DE RECREACION	2,00	45,0%	0,90
POTENCIA TOTAL	33,30		29,78

Tabla 3 Cuadro de cargas proyectadas en oficinas.

Con esta potencia proyectada se diseñará entonces un sistema fotovoltaico de 30 kW, instalado y aprovechando el espacio de las cubiertas de uno de los edificios. La energía que será producida en excedentes, dado que la carga es proyectada y en la actualidad es de 7,85 KW, se propone exportarla a la red por medio de la tipología

de venta o excedentes en compensación, para que sea compensada en los momentos en que no haya generación fotovoltaica por ausencia de sol.

Los paneles se instalarán sobre el techo del área de molinaje de la planta, cuyas coordenadas son 10,89263001370958; 72,83201496388243, de acuerdo a como se muestra en la siguiente imagen de referencia.

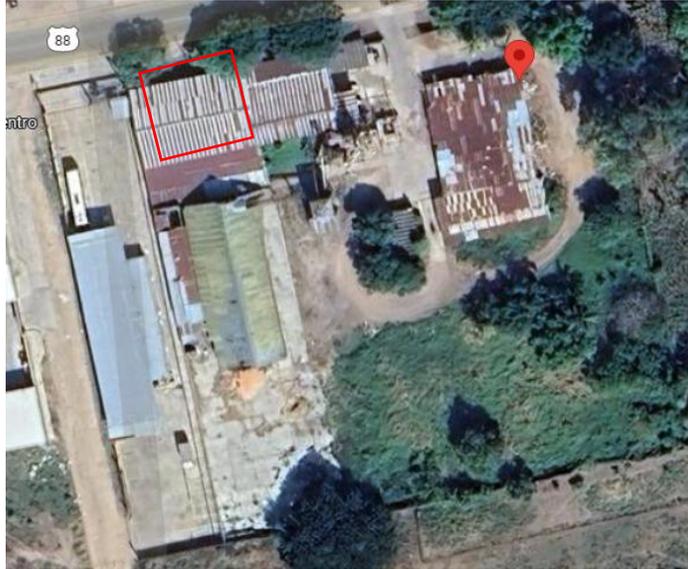


Imagen 14 ubicación de los paneles solares en la planta arrocera La Gloria.

9. ANÁLISIS TÉCNICO DE LA SOLUCIÓN ADOPTADA

9.1. Balance de Masa

El balance de masa se enfoca en cómo la biomasa, que para nuestro ejercicio corresponde a la cascarilla de arroz, entra en el proceso y posteriormente se convertirá en syngas, a través del proceso de gasificación, y en otros subproductos, tales como cenizas y biochar.

9.1.1. Entrada de Biomasa

Cascarilla de arroz correspondiente a 224,400 kg/mes siendo al 22% de la producción de arroz de campo, esta biomasa presenta un porcentaje de humedad del 13%.

Teniendo en cuenta el porcentaje de humedad, se procede a calcular la biomasa seca disponible. Se debe tener en cuenta este concepto, ya que es un factor importante porque el agua no aporta energía en los procesos de conversión; entonces:

$$\begin{aligned} \text{Biomasa seca} &= \text{Cantidad de biomasa} - \% \text{ porcentaje humedad} \\ \text{Biomasa seca} &= 224.400 \text{ Kg} - 13\% = 195.228 \text{ Kg} \end{aligned}$$

9.1.2. Entrada de aire

Como agente gasificante en nuestro proceso se seleccionó el aire. Por ende, para saber la cantidad de aire necesaria que requiere el gasificador, se parte del principio de que, para convertir 23,86 kg/h de biomasa (cascarilla de arroz), se requieren 20,42 kg/h de aire aproximadamente. [10] Con base de esta información procederemos a calcular el aire requerido:

$$\begin{aligned} \text{Factor aire / biomasa} &= \text{Cantidad aire} / \text{Cantidad de masa} \\ \text{Factor aire / biomasa} &= 20.42 / 23.86 = 0.856 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Aire Requerido} &= \text{Cantidad de biomasa} \times \text{factor aire/ biomasa} \\ \text{Aire Requerido} &= 440 \text{ kg/h} \times 0.856 = 376.64 \text{ Kg / h} \end{aligned}$$

9.1.3. Salida de Biomasa

- El Syngas es el producto principal de la gasificación y se usa para generar electricidad. Se estima que el 65% de la biomasa se convierte en syngas o gas de síntesis.

$$\begin{aligned} \text{Syngas} &= \text{Biomasa seca} \times 65\% \\ \text{Syngas} &= 195.228 \text{ Kg/mes} \times 0.65 = 126.898,2 \text{ Kg/mes} \end{aligned}$$

- Cenizas: El 12% de la biomasa se convierte en cenizas. [11]. Las cenizas generadas en el proceso de gasificación de biomasa son el residuo sólido inorgánico y no combustible que queda después de que la biomasa se somete a un proceso de conversión termoquímica en un ambiente con una cantidad controlada de agente gasificante (aire, oxígeno, vapor de agua o una mezcla de ellos. [12]

$$\begin{aligned} \text{Cenizas} &= \text{Biomasa seca} \times 12\% \\ \text{Cenizas} &= 195.228 \text{ kg} \times 12\% = 23.427,36 \text{ Kg/mes} \end{aligned}$$

- Biochar: Aproximadamente el 18 % se convierte en biochar. Es un producto valioso que se produce durante la pirolisis rápida de la cascarilla de arroz y su rendimiento disminuye al aumentar la temperatura. Sin embargo, el carbón producido a bajas temperaturas tiene un alto contenido en carbono. A medida que la temperatura aumenta, los diferentes componentes de la cascarilla comienzan a descomponerse, y el rendimiento del carbón vegetal disminuye. El carbón con bajo contenido en carbono se ve favorecido a temperaturas superiores a 500 °C. [11]

$$\begin{aligned} \text{Biochar} &= \text{Biomasa seca} \times 18\% \\ \text{Biochar} &= 195.228 \text{ kg/mes} \times 18\% = 35.141,04 \text{ Kg/mes} \end{aligned}$$

9.2. Balance de Energía

En un sistema de gasificación, la energía de la cascarilla de arroz se convierte en energía térmica, que luego se usa para producir electricidad y calor. A continuación, se calcula cómo se distribuye esta energía y cómo se utiliza para generar electricidad y calor.

9.2.1. Entrada de Energía

Teniendo en cuenta Poder Calorífico Inferior (PCI) de la Cascarilla de Arroz: 14.5 MJ/kg. [13]

- Energía de la Cascarilla de Arroz: La energía térmica disponible en la cascarilla de arroz se calcula multiplicando el PCI por la cantidad de biomasa seca disponible y tomando como referencia [1], donde se estipula el poder Calorífico Inferior (PCI) de la Cascarilla de Arroz: 14.5 MJ/kg.

$$\begin{aligned} \text{Energía contenida} &= \text{Biomasa seca} \times \text{PCI} \\ \text{Energía contenida} &= 195.228\text{kg} \times 14,5\text{MJ/kg} = 2.830.806 \text{ MJ/mes} = 786.335 \text{ KW/h} \\ &\text{mes [4]} \end{aligned}$$

Esta es la energía térmica disponible por mes de la cascarilla de arroz. Esta energía se utiliza en la gasificación para producir el Syngas.

9.2.2. Salida de energía

- Energía del syngas. En el proceso de gasificación de la cascarilla de arroz se estima un rendimiento aproximado del 65% en la producción de syngas, por lo cual se procede a calcular la energía total generada así:

$$\begin{aligned} \text{Energía del syngas} &= \text{Energía contenida biomasa} \times \text{Factor } 65\% \\ \text{Energía del syngas} &= 2.830.806 \times 65\% = 1.840.023,9 \text{ MJ/ mes} \end{aligned}$$

La energía térmica de la cascarilla de arroz se convierte en syngas el cual, posteriormente se usa para generar electricidad. La conversión de energía térmica a eléctrica en un gasificador típico tiene una eficiencia del 30%. Entonces la energía eléctrica generada será así:

$$\begin{aligned} \text{Energía eléctrica generada} &= \text{Energía del syngas} \times \text{Factor de rendimiento } 30\% \\ \text{Energía eléctrica generada} &= 1.840.023,9 \text{ MJ/ mes} \times 30\% = 552.007,17 \text{ MJ/mes} \end{aligned}$$

Se procede a realizar la conversión a kW teniendo en cuenta el siguiente factor, teniendo en cuenta que 1 kWh = 3,6 MJ [4]

$$\begin{aligned} \text{Energía eléctrica generada} &= (552.007,17 \text{ MJ/mes}) / (3,6\text{MJ}) = 153.335,32 \\ &\text{kWh/mes} \end{aligned}$$

- Energía contenida en el Biochar: El biochar es un material de carbono que contiene energía. En un proceso de gasificación, el biochar puede retener hasta un 18% de la energía contenida en la biomasa.

<p>Energía biochar = Energía biomasa seca x % aproximado de generación biochar</p> <p>Energía biochar = $2.830.806 \times 18\% = 566.161,2 \text{ MJ/mes} = 157.266,9 \text{ KW/h mes}$</p>
--

9.3. Resumen de balance masa y energía

A continuación, se muestra la tabla donde se detallan los datos obtenidos referente a la gasificación de la cascarilla del arroz.

BALANCE DE MASA Y ENERGIA		
BALANCE DE MASA	ENTRADA	SALIDA
CASCARILLA ARROZ	195.228 kg/mes (biomasa seca)	
AIRE	376.64 Kg/h	
SYNGAS		126.898,2 kg / mes
CENIZAS		23.427,36 kg / mes
BIOCHAR		35.147 kg / mes
BALANCE DE ENERGIA	ENTRADA	SALIDA
CASCARILLA ARROZ	786.335 KW/h mes	
SYNGAS		153.335,32 KW/h mes
BIOCHAR		157.266,9 KW/h mes

Tabla 4 Resumen de balance de masa y energía.

De acuerdo a lo contemplado en la tabla No. 2, el sistema de gasificación basado en cascarilla de arroz genera 153.335,32 kWh/mes de electricidad, lo que cubre con creces el consumo eléctrico mensual de la planta, el cual es de 31.500 kWh/mes aproximadamente, y deja un excedente de energía que podría ser utilizado para otros fines o vendido a la red.

9.4. Potencia requerida para satisfacer la demanda energética

Teniendo en consideración que la planta labora 10 horas al día durante los 30 días del mes y esto nos generó un consumo energético aproximadamente 31540 KW/h mes, procedemos a calcular la potencia promedio requerida

<p>Potencia (KW) = Consumo promedio / horas trabajadas</p> <p>Potencia (KW) = $31.540 \text{ KW/h} / 300 \text{ h} = 105.13 \text{ KW}$</p>
--

9.5. Potencia térmica necesaria

Conociendo la potencia eléctrica promedio, procederemos a calcular la potencia térmica necesaria que nuestro gasificador requiere a la entrada.

Para ello se tiene a consideración un rendimiento del gasificador del 65% y un rendimiento del grupo electrógeno del 30%. [10]

$$\begin{aligned} \text{Rendimiento total del sistema} &= \text{Rendimiento gasificador} \times \text{Rendimiento Motor} \\ \text{Rendimiento total del sistema} &= 0,65 \times 0,30 = 0,195 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Potencia Térmica necesaria} &= \text{Potencia eléctrica promedio} / \text{Rendimiento total} \\ \text{Potencia Térmica necesaria} &= 105,13 \text{ kW} / 0,195 = 539,128 \text{ kW} \end{aligned}$$

Esto quiere decir que para una potencia eléctrica de 105,13 kW se requerirá una potencia térmica de 539,128 kW.

9.6. Biomasa requerida por hora

Para saber la biomasa necesaria que el sistema va a requerir en un tiempo determinado lo podemos hacer de distintas maneras, las cuales son:

Teóricamente en la referencia [5] estipula que para la generación de 1 kW de potencia se requieren 1.6 a 1.8 kg de biomasa. Para nuestro ejercicio se seleccionó 1.8 kg de biomasa con el objetivo de garantizar y optimizar la materia prima del proceso, entonces

Para generar 1 kW de potencia, se requieren 1,8 kg de biomasa. Entonces, para generar 105,13 kW, la cantidad de biomasa requerida por hora sería:

$$\begin{aligned} \text{Biomasa requerida} &= \text{Potencia requerida} \times \text{factor} / / \% \text{ humedad} \\ \text{Biomasa requerida} &= (105,13 \text{ kW} \times 1,8 \text{ kg}) / (1 - 0,13) = 217,510 \text{ kW} / \text{Kg} \end{aligned}$$

Otra forma de obtener el cálculo de la biomasa requerida en el gasificador, es a partir de la relación entre la PCI de la cascarilla de arroz y la Potencia Térmica calculada previamente, así:

Convertimos a la misma unidad: $14,5 \text{ MJ} / 3,6 = 4,027 \text{ kW/h} / \text{Kg}$

$$\begin{aligned} \text{Biomasa requerida} &= \text{Potencia Térmica} / \text{PCI} \\ \text{Biomasa requerida} &= 539.128 \text{ kW} / 4.027 \text{ KW/h} / \text{Kg} = 133,9 \text{ Kg/h} \end{aligned}$$

Se puede observar una diferencia en los cálculos, la cual se debe a que el factor de 1,6 a 1,8 kg por 1 kW, es un valor generalizado en este tipo de proyectos. Por consiguiente, se realizó la consulta a la empresa *ANKUR SCIENTIFIC*, empresa hindú, especializada en biomasa con la cual nos hemos venido asesorando para el desarrollo de este proyecto, quienes nos confirmaron que para este tipo de potencia se necesitan 200 +/- 10 Kg/h de acuerdo a las características de la biomasa.

Debido a esto, se toma como referencia para el proyecto, el valor de 1,8 kg / kW, el cual corresponde a un consumo de biomasa de 217.510 Kg/h., teniendo en cuenta el valor de humedad del 13%.

9.7. Biomasa mensual requerida para suplir demanda energética

Esta es la cantidad de biomasa requerida para satisfacer la demanda energética, lo cual es viable, ya que actualmente se dispone de una biomasa seca de 195.228 kg / mes.

$$\begin{aligned} \text{Biomasa mensual} &= \text{biomasa requerida hora} \times \text{tiempo trabajado} \\ \text{Biomasa mensual} &= 217.510 \text{ Kg} / \text{h} \times 300 \text{ h} = 65.253 \text{ Kg} / \text{mes} \end{aligned}$$

9.8. Biomasa disponible en la instalación para suplir demanda energética

$$\begin{aligned} \text{Biomasa disponible para otros usos} &= \text{Biomasa disponible} - \text{Biomasa mensual} \\ &\quad \text{requerida} \\ \text{Biomasa disponible para otros usos} &= 195.228 \text{ kg/mes} - 65.253,1 \text{ kg/mes} = \\ &\quad 129.974,9 \text{ kg/mes} \end{aligned}$$

9.9. Excedentes de energía

Considerando el crecimiento de la instalación y la creciente demanda de arroz en la región, existe la posibilidad de aumentar la generación de energía eléctrica. Esto se debe a que aún se disponen de 14 horas adicionales para operar el grupo electrógeno, el cual actualmente funciona solo 10 horas al día durante 30 días al mes. Además, se dispone de una cantidad sobrante de biomasa de 129.974,9 kg/mes, tal como se indicó previamente.

9.10. Condiciones de máxima eficiencia

En el apartado anterior se realizaron los cálculos para suplir la demanda energética de la instalación. Para obtener la mayor eficiencia de la planta, se va a considerar la energía total que se puede obtener de la biomasa seca disponible en la instalación, la cual, de acuerdo al balance de energía, corresponde a 153.335,45 kWh/mes. Se procede entonces a calcular el excedente de energía:

$$\begin{aligned} \text{Energía excedente} &= \text{Total Energía eléctrica disponible} - \text{Consumo energético} \\ &\hspace{10em} \text{mensual} \\ \text{Energía excedente} &= 153.335,45 \text{ kWh/mes} - 31.540 \text{ kWh/mes} = 121.795,45 \\ &\hspace{10em} \text{kWh/mes} \end{aligned}$$

De acuerdo a los resultados obtenidos, se tiene un excedente de energía eléctrica de 121.795,45 kWh/mes, el cual estará disponible para inyectar a la red eléctrica.

Con base a esta energía disponible, se busca en el mercado, específicamente con la empresa *ANKUR SCIENTIFIC*, un modelo de un equipo que pueda satisfacer este sobrante de energía eléctrica. El equipo propuesto es el de referencia WBG-400, con una potencia bruta de 250 kW_e, que contempla un 12% de pérdidas por autoconsumo debido a los equipos auxiliares. Por consiguiente, la potencia neta del equipo electrógeno es la siguiente:

$$\begin{aligned} \text{Potencia neta} &= \text{Potencia Bruta} - \text{Autoconsumo} \\ \text{Potencia neta} &= 250 \text{ kW} - 12\% = 220 \text{ kW} \end{aligned}$$

Esta es la potencia neta que se podría obtener del grupo electrógeno. Ahora se procede a calcular la potencia máxima que el grupo electrógeno podría generar, de acuerdo a los resultados de la energía disponible con la cascarilla de arroz.

$$\begin{aligned} \text{Potencia Grupo electrógeno} &= \text{energía máxima generada biomasa} / \text{mes} / \text{máximo} \\ &\hspace{10em} \text{tiempo de trabajo} \\ \text{Potencia Grupo electrógeno} &= 153335.45 \text{ kWh} / \text{mes} / 720 \text{ h} / \text{mes} = 213 \text{ KW} \end{aligned}$$

Como la potencia requerida del grupo electrógeno cambio, se debe recalculer la nueva potencia térmica que el sistema va a requerir, entonces:

$$\begin{aligned} \text{Potencia Térmica necesaria} &= \text{Potencia eléctrica promedio} / \text{Rendimiento total} \\ \text{Potencia Térmica necesaria} &= 213 \text{ KW} / 0.195 = 1.092,3 \text{ KW} \end{aligned}$$

Esta es la nueva potencia térmica que requerirá el nuevo grupo electrógeno para obtener la máxima eficiencia de energía eléctrica.

9.11. Cantidad de biomasa requerida por hora

$$\begin{aligned} \text{Biomasa requerida} &= (\text{Potencia requerida} \times \text{factor}) / \% \text{ humedad} \\ \text{Biomasa requerida} &= (213 \text{ KW} \times 1.8 \text{ Kg}) / 1-0.13 = 440 \text{ kg / h} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Biomasa mensual} &= \text{Biomasa requerida hora} / \text{tiempo máximo de trabajo} \\ \text{Biomasa mensual} &= 440\text{kg} \times 720 = 316800 \text{ kg/mes} \end{aligned}$$

De acuerdo a estos datos no es viable que el grupo trabaje las 24 horas durante los 30 días del mes, ya que no se dispone de la cantidad de biomasa seca requerida; por lo cual se procederá a calcular el tiempo óptimo de trabajo y los excedentes generados a la red.

9.12. Tiempo Operación máxima instalación

$$\text{Tiempo de trabajo requerido mes} = (\text{biomasa seca total disponible} \times \text{tiempo operación máximo}) / \text{máxima biomasa requerida}$$

$$\text{Tiempo de trabajo requerido mes} = (195.228 \text{ Kg} \times 720\text{h}) / 316.800 \text{ Kg} = 443,7 \text{ h/mes}$$

$$\begin{aligned} \text{Tiempo de trabajo requerido día} &= \text{Tiempo de trabajo requerido mes} / 30 \text{ días} \\ \text{Tiempo de trabajo requerido día} &= 443,7 / 30 = 14,8 \text{ horas} \end{aligned}$$

Este es el tiempo máximo de operación de nuestro grupo electrógeno de acuerdo a las condiciones de la instalación.

9.13. Excedentes a la red

$$\begin{aligned} \text{Energía máxima generada} &= \text{Potencia máxima día} \times \text{tiempo máximo trabajado} \\ \text{Energía máxima generada} &= 213 \text{ kW} \times 443,7 \text{ h} = 94.508,1 \text{ kW / mes} \end{aligned}$$

$$\text{Energía excedente} = \text{Energía máxima generada} - \text{Consumo energético instalación}$$
$$\text{Energía excedente} = 94.508,1 \text{ kW} - 31.540 \text{ kW} = 62.968,1 \text{ kW / mes}$$

Resumen de la instalación fotovoltaica propuesta

9.14. Resumen de la instalación fotovoltaica propuesta

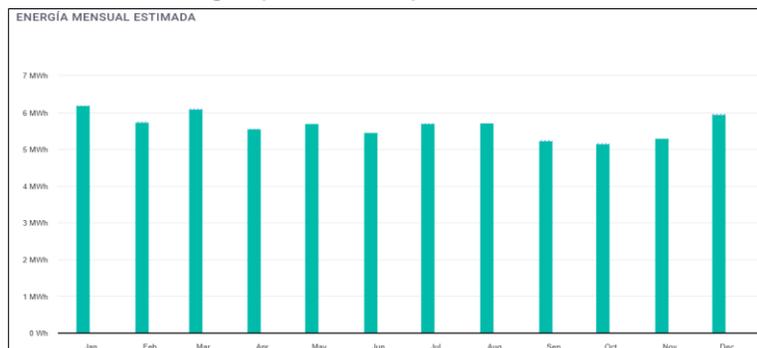
La instalación proyectada contará con los siguientes elementos:

- 70 unidades de módulo monocristalino de 550 Wp, marca JA Solar, modelo JAM72S30-550/MR.
- 3 unidades de inverso trifásico de 10 kW, modelo SE10000H-US marca Home Wave.
- Estructura sobre cubierta.
- Protecciones DC, AC y cableado a utilizar según normativa vigente.



9.14.1. Energía generada

La energía que se prevé que generará la instalación fotovoltaica es de 67,76 MWh al año, con una potencia fotovoltaica pico de 38,50 kWp y una potencia nominal en inversores de 30 kW, que sería lo que se tendría disponible para autoabastecer a la planta, o exportar a la red. Estos 67,76 MWh son el 18% de la energía anual que necesita la planta arrocera para su funcionamiento que se estima en 378,48 MWh y se centrará en la alimentación de las instalaciones administrativas y zonas comunes. Con base al cuadro de carga eléctrica actual de las oficinas y con un promedio de trabajo diario de 10 horas se puede estimar que las oficinas actualmente consumen 28,65 MWh año de energía que se estima de acuerdo a proyecciones que este así por 6 años, dejando energía para exportación de este sistema de alrededor 39,10 MWh año con un total de 234,64 MWh en los seis años. Una vez cumplidos los seis años se estima que la ampliación de las oficinas y zonas comunes absorberán la energía producida por el sistema solar.



Mes	Generación (kWh)	Al hogar (kWh)	A la red (kWh)	Energía Recortada (kWh)	Consumo (kWh)	De energía FV (kWh)	De la red (kWh)
Ene	6181	-	6181	28	-	-	-
Feb	5730	-	5730	29	-	-	-
Mar	6094	-	6094	32	-	-	-
Abr	5559	-	5559	10	-	-	-
May	5695	-	5695	3	-	-	-
Jun	5459	-	5459	-	-	-	-
Jul	5707	-	5707	4	-	-	-
Ago	5709	-	5709	3	-	-	-
Sep	5233	-	5233	23	-	-	-
Oct	5142	-	5142	46	-	-	-
Nov	5302	-	5302	4	-	-	-
Dic	5952	-	5952	28	-	-	-



Imagen 15 dimensionamiento del sistema fotovoltaico.

La figura anterior refleja una aproximación de la instalación de paneles en la cubierta. Los materiales situados en intemperie se protegerán contra los agentes ambientales, en particular contra el efecto de la radiación solar y la humedad. Se incluirán todos los elementos necesarios de seguridad y protecciones propias de las personas y de la instalación fotovoltaica, asegurando la protección frente a contactos directos e indirectos, c.c., sobrecargas, así como otros elementos y protecciones que resulten de aplicación en la legislación vigente. En el circuito de generación hasta el equipo de medida no podrá intercalarse ningún elemento de generación distinto al fotovoltaico.

9.14.0. Cálculos eléctricos

Se diferencia dos partes de la instalación según la tipología de corriente existente. Corriente continua, DC y Corriente alterna, AC.

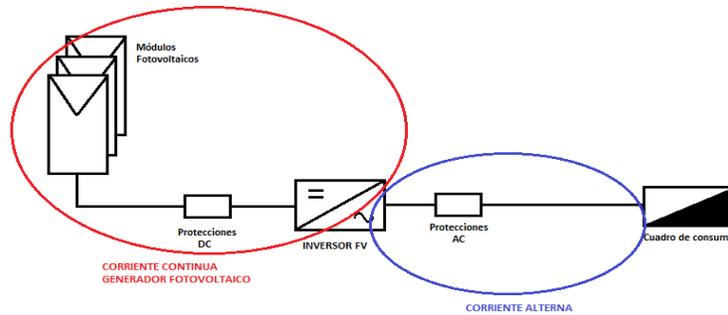


Imagen 16 tipología de la instalación AC y DC.

9.14.1. Corriente continua. Fórmulas utilizadas

Cálculo de la sección por intensidad máxima admisible o calentamiento. Determinaremos la sección mínima que deberán tener los conductores basándonos en lo descrito en la norma RETIE, y a partir de la tabla buscaremos la sección que se necesitara en función de la intensidad y del tipo de canalización.

Para calcular la intensidad usaremos la siguiente fórmula:

$$I = \frac{P}{V}$$

Los cables de conexión deberán estar dimensionados para una intensidad no inferior al 125% de la máxima intensidad.

Cálculo de la sección por la máxima caída de tensión admisible. Una vez calculadas las secciones, se revisará la caída de tensión total y si es superior al 1,5% se ajustarán de nuevo las caídas de tensión para las secciones más grandes, con el fin de intentar reducirlas.

$$s = \frac{2 \times P \times L}{\sigma \times V \times \Delta V}$$

Dónde:

P es la potencia del campo fotovoltaico

L es la longitud [m]

σ es la conductividad [56 para Cu]

V es la tensión de trabajo

ΔV es la caída de tensión

Cálculo de protecciones. Las protecciones a utilizar serán fusibles, entonces tendremos:

$$I_b \leq I_n \leq I_z$$

$$1,6 \cdot I_n \leq 1,45 \cdot I_z$$

Dónde:

I_b: intensidad utilizada en el circuito.

I_z: intensidad admisible de la canalización según la norma UNE 20-460/5-523.

I_n: intensidad nominal del dispositivo de protección. Para los dispositivos de protección regulables, I_n es la intensidad de regulación escogida.

9.14.1.1 Cálculo secciones

Se tienen 4 circuitos: string 1 al string 4, ambos conectados al inversor a cada MPPT disponible en este. Se presentan a continuación los valores para cada string, así como la sección a instalar.

9.14.1.2 Canalización

Los conductores de corriente continua se conducirán sobre rejiband, el cual permitirá alojar el número máximo de conductores que en este caso serán 12 conductores (positivo y negativo de cada string).

Diámetro exterior del cable: ZZ-F 4 mm² = 5,6 mm

Sección a ocupar: 4 strins de 4mm²
 $S_c: 4 \times 2 \times 5.6 = 44,8 \text{ mm}^2$

Dimensiones del rejiband (alto x ancho)60x60 mm de acero galvanizado en caliente con una sección útil de 2.327 mm².

9.14.1.3 Protecciones

Para el cálculo de los fusibles de corriente continua se tendrán en cuenta las condiciones presentadas en el apartado de fórmulas utilizadas. Como se ha tenido en cuenta el cálculo por caída de tensión, la intensidad máxima admisible por los conductores seleccionados es muy superior a la intensidad que circulara por ellos.

$$\text{Strings 1, 2, 3, 4, } 17,59 \leq 25 \leq 44$$

Tomamos como I_n de fusible 25 A.

$$\text{Sección 4 mm}^2 \quad 1,6 \cdot 25 \leq 1,45 \cdot 44 \quad \rightarrow \quad 40 \leq 63,8 \quad \checkmark$$

El fusible de 25 A cumple con ambas condiciones.

En conclusión, como solución se eligen:

Fusible gG, In = 25 A, 1000 VDC

Se recomienda la instalación de un fusible por polo, aunque en el polo negativo no es obligatoria su instalación.

9.14.1.4 Resumen

Se presenta tabla resumen:

Denominación	PCálculo (W)	Dist.Cálc (m)	Sección (mm ²)	I.Cálculo (A)	I.Adm. (A)	C.T.Parc. (%)	Protección (tipo, A)	Dimensiones (mm) Tubo, Canal, Band.
String 1	9.900	30	2x(1x4) Cu	17,59	38	0,34	gG, 25A	Tubo 25
String 2	9.900	33	2x(1x4) Cu	17,59	38	0,41	gG, 25A	Tubo 26
String 3	9.350	33	2x(1x4) Cu	17,59	38	0,38	gG, 25A	Tubo 27
String 4	9.350	33	2x(1x4) Cu	17,59	38	0,38	gG, 25A	Tubo 28

Tabla 5 resumen de los cálculos realizados

En la tabla anterior de resumen y de acuerdo a los cálculos realizados. Se puede concluir que se utilizará para la distribución de los strings en CC cable de 4 mm²; que en los cuatro strings cumplirán a cabalidad la caída de tensión de ser menor del 1.5 % de la tensión nominal y soportar la corriente máxima en este caso de 17,59 A.

Además, se instalará una toma de tierra que unirá todas las partes metálicas de la parte DC, en caso de no disponer de toma de tierra la estructura metálica de la nave.

9.14.2 Corriente alterna

Potencia

- Potencia total instalada:
- Inversor 30.000 W
-

9.14.2.1 Cálculo de líneas eléctricas

Línea Individual del Inversor al cuadro de protecciones de AC y de este al Contador de generación neta.

- Tensión de servicio: 220 V.
- Canalización: B1-Unip.Canal. Superf.o Emp.Obra
- Longitud: 20 m;
- Cos ϕ : 0.90;
- Xu(ϕ /Km): 0,1;
- Potencia a instalar: 30.000 W.
- Potencia de cálculo: 30.000 W. (Coef. de Simult.: 1)

$$I = \frac{Pc}{\sqrt{3} \times U \times \cos \phi} = Amp (A)$$

$$I = \frac{30.000}{\sqrt{3} \times 220 \times 0,90} = 48,16 A$$

Se eligen conductores Unipolares 4x16mm+TTx16mm²Cu

- Nivel Aislamiento, Aislamiento: 0.6/1 kV, XLPE +Pol, RF – No propagador incendio y emisión humos y opacidad reducida, resistente al fuego.
- Desig. UNE: RZ1-K(AS)
- I.ad. a 40°C (Fc=1) 159 A, según RETIE

Fórmulas Tubería.

$$D \geq \sqrt{f \cdot \sum_{i=1}^n (n_i \cdot d_i^2)}$$

Diámetro del cable 16 mm² = 5,2 mm

$D \geq \sqrt{2,5(4 * 16,4^2) + (1 * 11,1^2)} = 54.75$ mm sería el área que ocuparíamos con el cable, pero la normativa exige que sea para este calibre un mínimo de 63 mm de acuerdo a la siguiente tabla que presentamos.

Sección nominal de los conductores unipolares (mm ²)	Diámetro exterior de los tubos (mm)				
	Número de conductores				
	1	2	3	4	5
1,5	12	12	16	16	16
2,5	12	12	16	16	20
4	12	16	20	20	20
6	12	16	20	20	25
10	16	20	25	32	32
16	16	25	32	32	32
25	20	32	32	40	40
35	25	32	40	40	50
50	25	40	50	50	50
70	32	40	50	63	63
95	32	50	63	63	75
120	40	50	63	75	75
150	40	63	75	75	--
185	50	63	75	--	--
240	50	75	--	--	--

Tabla 6 Tabla de sección de tubos vs conductores.

- Diámetro exterior tubo: 32 mm.

Caída de tensión:

Temperatura cable (°C): 90 XLPE

$$e = \frac{(L \times Pc)}{(k \times U \times n \times S \times R)} + \frac{(L \times Pc \times Xu \times \text{Sen } \alpha)}{(1000 \times U \times n \times R \times \text{Cos } \alpha)} = \text{voltios (V)}$$

$$e = \frac{20 \times 30000}{45,89 \times 220 \times 1 \times 16 \times 1} + \frac{20 \times 30000 \times 0,1 \times 0,59}{1000 \times 220 \times 1 \times 1 \times 0,90} = 3,71 + 0,13 = 3,84 \text{ V}$$

3,84 V representa el 1,74 % de los 220 V de tensión nominal, lo que lo hace aprobado dado que es el 5 % admisibles por norma.

Prot. Térmica:

I. Aut./Tet. In.: 63 A. Térmico

Protección diferencial:

Relé y Transformador. Diferencial Sens.: 300 mA. Clase A.

9.14.2.2 Resumen

Los resultados obtenidos se reflejan en las siguientes tablas:

Denominación	P.Cálculo (W)	Dist.Cálc (m)	Sección (mm ²)	I.Cálculo (A)	I.Adms. (A)	C.T.Parc. (%)	C.T.Total (%)	Dimensiones (mm) Tubo, Canal, Bando.
LIG	30.000	20	4x16+TTx16Cu	48,16	63	1,74	1,74	32

Tabla 7 Cuadro General de Mando y Protección

Denominación	Longitud (m)	Sección (mm ²)	I _{pccI} (kA)	P de C (kA)	I _{pccF} (A)	t _{mcc} (sg)	t _{fic} (sg)	L _{máx} (m)	Curvas válidas
LIG	20	4x16+TTx16Cu	12	15	4.353,46	5,29	N/A	N/A	160;B,C,D

Tabla 8 Resumen calculo AC

9.14.2.3 Cálculo de la puesta a tierra

La resistividad del terreno es 300 ohmios x m.

- El electrodo en la puesta a tierra, se constituye con los siguientes elementos:

M. conductor de Cu desnudo	35 mm ²	30 m.
M. conductor de Acero galvanizado	95 mm ²	
Picas verticales de Cobre	14 mm	
de Acero recubierto Cu	14 mm	1 pica de 2m.
de Acero galvanizado	25 mm	

Con lo que se obtendrá una Resistencia de tierra de 17,65 ohmios.

Los conductores de protección, se calcularon adecuadamente y según RETIE, en el apartado del cálculo de circuitos.

Así mismo, cabe señalar que la línea principal de tierra no será inferior a 16 mm² en Cu, y la línea de enlace con tierra, no será inferior a 25 mm² en Cu.

9.14.3 Cálculo estructural

- GENERALIDADES:

Se denomina capacidad portante a la aptitud de un edificio para asegurar, con la fiabilidad requerida, la estabilidad del conjunto y la resistencia necesaria, durante un tiempo determinado, denominado periodo de servicio. La aptitud se asegura el funcionamiento de la obra, el confort de los usuarios y el mantenimiento al aspecto visual, se denomina aptitud de servicios.

- Valores de sobrecarga**

Por lo general, los efectos de la sobrecarga de uso pueden simularse por la aplicación de una carga distribuida uniformemente. De acuerdo con el uso que sea fundamental en cada zona del mismo, como valores característicos se adoptarán los de la Tabla 3.1. Dichos valores incluyen tanto los efectos derivados del uso

normal, personas, mobiliario, enseres, mercancías habituales, contenido de los conductos, maquinaria y en su caso vehículos, así como las derivadas de la utilización poco habitual, como acumulación de personas, o de mobiliario con ocasión de un traslado.

Tabla 3.1. Valores característicos de las sobrecargas de uso					
Categoría de uso		Subcategorías de uso		Carga uniforme [kN/m ²]	Carga concentrada [kN]
A	Zonas residenciales	A1	Viviendas y zonas de habitaciones en, hospitales y hoteles	2	2
		A2	Trasteros	3	2
B	Zonas administrativas			2	2
C	Zonas de acceso al público (con la excepción de las superficies pertenecientes a las categorías A, B, y D)	C1	Zonas con mesas y sillas	3	4
		C2	Zonas con asientos fijos	4	4
		C3	Zonas sin obstáculos que impidan el libre movimiento de las personas como vestíbulos de edificios públicos, administrativos, hoteles; salas de exposición en museos; etc.	5	4
		C4	Zonas destinadas a gimnasio u actividades físicas	5	7
		C5	Zonas de aglomeración (salas de conciertos, estadios, etc)	5	4
D	Zonas comerciales	D1	Locales comerciales	5	4
		D2	Supermercados, hipermercados o grandes superficies	5	7
E	Zonas de tráfico y de aparcamiento para vehículos ligeros (peso total < 30 kN)			2	20 ⁽¹⁾
F	Cubiertas transitables accesibles sólo privadamente ⁽²⁾			1	2
G	Cubiertas accesibles únicamente para conservación ⁽³⁾	G1 ⁽⁷⁾	Cubiertas con inclinación inferior a 20°	1 ^{(4),(6)}	2
			Cubiertas ligeras sobre correas (sin forjado) ⁽⁶⁾	0,4 ⁽⁴⁾	1
		G2	Cubiertas con inclinación superior a 40°	0	2

Tabla 9 Tabla 3.1 del documento básico de Seguridad Estructural [14]

Las placas solares se colocarán atornilladas sobre una estructura metálica realizada con perfilaría omega, todo de acero galvanizado en caliente de 70 micras de grosor. La tortillería será de Inox. A-2 y los paneles de fijaran al perfil omega mediante grapas de aluminio.

La estructura metálica de la instalación fotovoltaica se fijará a la cubierta, tal y como se indica en la documentación gráfica.

La sobrecarga en la cubierta debido a toda la instalación fotovoltaica será la suma del peso del módulo fotovoltaico 23,5 kg/unidad (11,06 kg/ m²) y la estructura soporte 1,87 kg/ml (4,31 kg/modulo, es decir, 2,03 kg/m²), todo el conjunto tendrá una sobrecarga de 13,09 kg/m² = 0,131 kN/m², muy inferior a 1 kN/m² que indica el CTE DB-SE_AE punto 3.1. [14].

10. ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PROYECTO

10.1. Análisis del Presupuesto por Fases y Tecnologías

Con el objetivo de estructurar de manera clara y coherente el presupuesto total del proyecto de generación eléctrica mediante gasificación de cascarilla de arroz y un sistema fotovoltaico para zonas comunes y oficinas, se ha elaborado un desglose detallado por fases y tecnologías.

El presupuesto, que asciende a \$550.705 USD, se presenta en una tabla única donde cada ítem se clasifica según:

- Fuente tecnológica: si corresponde al sistema Fotovoltaico o al sistema de Biomasa/Gasificación.
- Fase del proyecto: agrupando cada partida dentro de una de las cinco fases fundamentales del ciclo de ejecución:
 - F1 - Ingeniería: estudios técnicos y diseño detallado.
 - F2 - Equipos principales: adquisición de componentes críticos como paneles, inversores y el gasificador.
 - F3 - Obra y montaje: construcción de infraestructura y montaje electromecánico.
 - F4 - Puesta en marcha: pruebas, capacitación y comisionamiento.
 - F5 - Transporte y otros: empaque, importación, protecciones y cableado auxiliar.

Cada ítem dentro del presupuesto incluye su cantidad, valor unitario y subtotal, expresados en dólares estadounidenses (USD) a una TRM de 4.250 COP/USD, con el fin de facilitar comparaciones internacionales y consistencia financiera. Este enfoque permite:

- Identificar los rubros más representativos en términos económicos.
- Visualizar claramente el peso relativo de cada tecnología dentro del presupuesto global.
- Facilitar la planificación financiera y la justificación técnica en la propuesta del proyecto.

A continuación, se observa el presupuesto desglosado.

Fuente	Fase	Descripción	Cantidad	Valor unitario (USD)	Subtotal (USD)
Biomasa	F1 - Ingeniería	Ingeniería de detalle	1	\$ 6.700,20	\$ 6.700,20
Biomasa	F2 - Equipos principales	Generador gasificado 250 kW	1	\$ 128.399,17	\$ 128.399,17
Biomasa	F2 - Equipos principales	Condensate Evaporation System	1	\$ 7.842,66	\$ 7.842,66
Biomasa	F2 - Equipos principales	Cooling Tower	1	\$ 4.862,18	\$ 4.862,18
Biomasa	F2 - Equipos principales	Gasificador Ankur WBG-400 + limpieza seca + flare system	1	\$ 141.967,57	\$ 141.967,57
Biomasa	F2 - Equipos principales	Skip Charger	1	\$ 8.054,35	\$ 8.054,35
Biomasa	F2 - Equipos principales	Chiller 9 TR	1	\$ 11.548,94	\$ 11.548,94
Biomasa	F3 - Obra y montaje	Infraestructura eléctrica de interconexión	1	\$ 16.800,90	\$ 16.800,90
Biomasa	F3 - Obra y montaje	Obra civil (fundaciones, pisos, techos, canalizaciones)	1	\$ 100.805,38	\$ 100.805,38
Biomasa	F3 - Obra y montaje	Montaje mecánico y eléctrico local	1	\$ 26.881,43	\$ 26.881,43
Biomasa	F4 - Puesta en marcha	Supervisión instalación y comisionamiento (120 días)	1	\$ 25.661,69	\$ 25.661,69
Biomasa	F4 - Puesta en marcha	Pruebas, puesta en marcha, permisos	1	\$ 13.440,72	\$ 13.440,72
Biomasa	F5 - Transporte y otros	Empaque	1	\$ 8.716,30	\$ 8.716,30
Biomasa	F5 - Transporte y otros	FOB Mumbai	1	\$ 6.112,17	\$ 6.112,17
Biomasa	F5 - Transporte y otros	Transporte internacional e importación	1	\$ 20.161,08	\$ 20.161,08
Fotovoltaico	F2 - Equipos principales	Panel Solar de 550 wp	70	\$ 169,06	\$ 11.834,50
Fotovoltaico	F2 - Equipos principales	Estructura coplanar para paneles	1	\$ 823,53	\$ 823,53
Fotovoltaico	F2 - Equipos principales	Inversor solar de 10 KW	3	\$ 1.638,69	\$ 4.916,06
Fotovoltaico	F4 - Puesta en marcha	Mano de obra instalación	1	\$ 3.176,47	\$ 3.176,47
Fotovoltaico	F5 - Transporte y otros	Tablero de protecciones AC	1	\$ 470,59	\$ 470,59
Fotovoltaico	F5 - Transporte y otros	Tablero de protecciones DC	1	\$ 470,59	\$ 470,59
Fotovoltaico	F5 - Transporte y otros	Cableado DC y AC	1	\$ 1.058,82	\$ 1.058,82
TOTAL					\$ 550.705,28

Tabla 10 presupuesto del proyecto

10.1.1. Viabilidad financiera

Con el fin de evaluar la viabilidad económica del proyecto híbrido de generación eléctrica compuesto por un sistema de gasificación de biomasa y una planta solar fotovoltaica, se desarrolló un análisis financiero detallado que contempla indicadores clave como el *Payback*, *Payback* Compuesto, Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Valor Actual Neto (VAN).

Este análisis parte de las siguientes premisas:

- La tarifa promedio de energía eléctrica evitada es de 0.182 USD/kWh.
- El proyecto será parcialmente financiado a través de un crédito.
- Se adopta una tasa de descuento del 10% como costo de oportunidad del capital.
- Se considera que el proyecto será viable si alcanza una TIR superior al 15%.
- Se realizará un análisis de sensibilidad tomando como variable principal la tarifa de energía eléctrica, debido a su impacto directo en los ingresos proyectados.
- Se tiene como precio global del proyecto 550.705,28 USD.
- Se financiará un 40% (220.282,11 USD).
- Cuota fija de 37.394.34 USD durante 7 años al 10%.
- La inversión propia será de 330.423,11 USD.
- Se analiza durante un periodo de tiempo de 15 años.

- Inflación del 5%.
- O&M del 4.5% anual.
- Los excedentes de energía son pagados a un 20% del valor de la tarifa de energía.

Nota: Todos los valores están expresados en dólares.

A continuación, en la tabla se muestran los resultados para el análisis de la situación inicial.

Año	Autoconsumo biomasa	Ingresos por excedentes biomasa	Autoconsumo fotovoltaico	Ingresos por excedentes fotovoltaicos	O&M	Cuota banco	Flujo neto	Flujo neto acumulado	Tasa de descuento	Factor de descuento	Flujo de caja descontado	Flujo neto descontado acumulado	VAN acumulado
0	\$ -				\$ -	\$ -	\$ 330.423,17		12%	1,00	-\$ 330.423,17		-\$ 330.423,17
1	\$ 67.835,29	\$ 27.557,76	\$ 5.224,41	\$ 1.426,00	\$ 24.781,74	\$ 37.394,34	\$ 39.867,38	\$ 39.867,38	12%	0,89	\$ 35.595,88	\$ 35.595,88	-\$ 294.827,29
2	\$ 71.227,06	\$ 28.935,65	\$ 5.485,63	\$ 1.497,30	\$ 26.020,82	\$ 37.394,34	\$ 43.730,47	\$ 83.597,85	12%	0,80	\$ 34.861,66	\$ 70.457,54	-\$ 259.965,62
3	\$ 74.788,41	\$ 30.382,43	\$ 5.759,91	\$ 1.572,17	\$ 27.321,87	\$ 37.394,34	\$ 47.786,71	\$ 131.384,57	12%	0,71	\$ 34.013,64	\$ 104.471,18	-\$ 225.951,99
4	\$ 78.527,83	\$ 31.901,55	\$ 6.047,91	\$ 1.650,77	\$ 28.687,96	\$ 37.394,34	\$ 52.045,76	\$ 183.430,33	12%	0,64	\$ 33.076,02	\$ 137.547,20	-\$ 192.875,96
5	\$ 82.454,22	\$ 33.496,63	\$ 6.350,31	\$ 1.733,31	\$ 30.122,36	\$ 37.394,34	\$ 56.517,77	\$ 239.948,10	12%	0,57	\$ 32.069,70	\$ 169.616,90	-\$ 160.806,26
6	\$ 86.576,94	\$ 35.171,46	\$ 6.667,82	\$ 1.819,98	\$ 31.628,47	\$ 37.394,34	\$ 61.213,37	\$ 301.161,47	12%	0,51	\$ 31.012,60	\$ 200.629,50	-\$ 129.793,66
7	\$ 90.905,78	\$ 36.930,03	\$ 12.972,13		\$ 33.209,90	\$ 37.394,34	\$ 70.203,71	\$ 371.365,18	12%	0,45	\$ 31.756,59	\$ 232.386,09	-\$ 98.037,07
8	\$ 95.451,07	\$ 38.776,54	\$ 13.620,74		\$ 34.870,39	\$ -	\$ 112.977,95	\$ 484.343,13	12%	0,40	\$ 45.629,90	\$ 278.015,99	-\$ 52.407,17
9	\$ 100.223,62	\$ 40.715,36	\$ 14.301,78		\$ 36.613,91	\$ -	\$ 118.626,85	\$ 602.969,98	12%	0,36	\$ 42.778,03	\$ 320.794,03	-\$ 9.629,14
10	\$ 105.234,81	\$ 42.751,13	\$ 15.016,86		\$ 38.444,61	\$ -	\$ 124.558,19	\$ 727.528,17	12%	0,32	\$ 40.104,40	\$ 360.898,43	\$ 30.475,26
11	\$ 110.496,55	\$ 44.888,69	\$ 15.767,71		\$ 40.366,84	\$ -	\$ 130.786,10	\$ 858.314,28	12%	0,29	\$ 37.597,88	\$ 398.496,31	\$ 68.073,14
12	\$ 116.021,37	\$ 47.133,12	\$ 16.556,09		\$ 42.385,18	\$ -	\$ 137.325,41	\$ 995.639,68	12%	0,26	\$ 35.248,01	\$ 433.744,32	\$ 103.321,16
13	\$ 121.822,44	\$ 49.489,78	\$ 17.383,90		\$ 44.504,44	\$ -	\$ 144.191,68	\$ 1.139.831,36	12%	0,23	\$ 33.045,01	\$ 466.789,33	\$ 136.366,17
14	\$ 127.913,56	\$ 51.964,27	\$ 18.253,09		\$ 46.729,66	\$ -	\$ 151.401,26	\$ 1.291.232,62	12%	0,20	\$ 30.979,70	\$ 497.769,03	\$ 167.345,86
15	\$ 134.309,24	\$ 54.562,48	\$ 19.165,75		\$ 49.066,15	\$ -	\$ 158.971,32	\$ 1.450.203,95	12%	0,18	\$ 29.043,47	\$ 526.812,50	\$ 196.389,33

Año	Autoconsumo biomasa	Ingresos por excedentes biomasa	Autoconsumo fotovoltaico	Ingresos por excedentes fotovoltaicos	O&M	Cuota banco	Flujo neto	Flujo neto acumulado	Tasa de descuento	Factor de descuento	Flujo de caja descontado	Flujo neto descontado acumulado	VAN acumulado
0	\$ -				\$ -	\$ -	\$ 330.423,17		12%	1,00	-\$ 330.423,17		-\$ 330.423,17
1	\$ 67.835,29	\$ 27.557,76	\$ 5.224,41	\$ 1.426,00	\$ 24.781,74	\$ 37.394,34	\$ 39.867,38	\$ 39.867,38	12%	0,89	\$ 35.595,88	\$ 35.595,88	-\$ 294.827,29
2	\$ 71.227,06	\$ 28.935,65	\$ 5.485,63	\$ 1.497,30	\$ 26.020,82	\$ 37.394,34	\$ 43.730,47	\$ 83.597,85	12%	0,80	\$ 34.861,66	\$ 70.457,54	-\$ 259.965,62
3	\$ 74.788,41	\$ 30.382,43	\$ 5.759,91	\$ 1.572,17	\$ 27.321,87	\$ 37.394,34	\$ 47.786,71	\$ 131.384,57	12%	0,71	\$ 34.013,64	\$ 104.471,18	-\$ 225.951,99
4	\$ 78.527,83	\$ 31.901,55	\$ 6.047,91	\$ 1.650,77	\$ 28.687,96	\$ 37.394,34	\$ 52.045,76	\$ 183.430,33	12%	0,64	\$ 33.076,02	\$ 137.547,20	-\$ 192.875,96
5	\$ 82.454,22	\$ 33.496,63	\$ 6.350,31	\$ 1.733,31	\$ 30.122,36	\$ 37.394,34	\$ 56.517,77	\$ 239.948,10	12%	0,57	\$ 32.069,70	\$ 169.616,90	-\$ 160.806,26
6	\$ 86.576,94	\$ 35.171,46	\$ 6.667,82	\$ 1.819,98	\$ 31.628,47	\$ 37.394,34	\$ 61.213,37	\$ 301.161,47	12%	0,51	\$ 31.012,60	\$ 200.629,50	-\$ 129.793,66
7	\$ 90.905,78	\$ 36.930,03	\$ 12.972,13		\$ 33.209,90	\$ 37.394,34	\$ 70.203,71	\$ 371.365,18	12%	0,45	\$ 31.756,59	\$ 232.386,09	-\$ 98.037,07
8	\$ 95.451,07	\$ 38.776,54	\$ 13.620,74		\$ 34.870,39	\$ -	\$ 112.977,95	\$ 484.343,13	12%	0,40	\$ 45.629,90	\$ 278.015,99	-\$ 52.407,17
9	\$ 100.223,62	\$ 40.715,36	\$ 14.301,78		\$ 36.613,91	\$ -	\$ 118.626,85	\$ 602.969,98	12%	0,36	\$ 42.778,03	\$ 320.794,03	-\$ 9.629,14
10	\$ 105.234,81	\$ 42.751,13	\$ 15.016,86		\$ 38.444,61	\$ -	\$ 124.558,19	\$ 727.528,17	12%	0,32	\$ 40.104,40	\$ 360.898,43	\$ 30.475,26
11	\$ 110.496,55	\$ 44.888,69	\$ 15.767,71		\$ 40.366,84	\$ -	\$ 130.786,10	\$ 858.314,28	12%	0,29	\$ 37.597,88	\$ 398.496,31	\$ 68.073,14
12	\$ 116.021,37	\$ 47.133,12	\$ 16.556,09		\$ 42.385,18	\$ -	\$ 137.325,41	\$ 995.639,68	12%	0,26	\$ 35.248,01	\$ 433.744,32	\$ 103.321,16
13	\$ 121.822,44	\$ 49.489,78	\$ 17.383,90		\$ 44.504,44	\$ -	\$ 144.191,68	\$ 1.139.831,36	12%	0,23	\$ 33.045,01	\$ 466.789,33	\$ 136.366,17
14	\$ 127.913,56	\$ 51.964,27	\$ 18.253,09		\$ 46.729,66	\$ -	\$ 151.401,26	\$ 1.291.232,62	12%	0,20	\$ 30.979,70	\$ 497.769,03	\$ 167.345,86
15	\$ 134.309,24	\$ 54.562,48	\$ 19.165,75		\$ 49.066,15	\$ -	\$ 158.971,32	\$ 1.450.203,95	12%	0,18	\$ 29.043,47	\$ 526.812,50	\$ 196.389,33

Tabla 11 Flujo de caja del proyecto.

10.2. Resultados del análisis base

Con las premisas planteadas, el proyecto presenta los siguientes resultados financieros:

<p>VAN (Valor Actual Neto): 196.389,33 USD TIR (Tasa Interna de Retorno): 19% PAYBACK: 6.48 Años PAYBACK DESCONTADO 9.23 AÑOS</p>
--

De acuerdo con los resultados obtenidos del análisis financiero, el proyecto presenta un Valor Actual Neto (VAN) positivo de 196.389,33 USD, lo que indica que, descontando todos los flujos futuros, la inversión genera una rentabilidad superior al costo de oportunidad del capital. La Tasa Interna de Retorno (TIR) alcanza un 19%, superando el umbral mínimo del 15% definido como criterio de viabilidad, lo cual confirma la rentabilidad económica del proyecto. Por su parte, el período de recuperación simple (Payback) es de 6,48 años, mientras que el Payback descontado, que considera el valor temporal del dinero, asciende a 9,23 años. Aunque el período de recuperación ajustado es más largo, ambos indicadores se mantienen dentro de márgenes aceptables para proyectos de infraestructura energética, particularmente en entornos donde la generación renovable ofrece beneficios sostenibles a largo plazo. En conjunto, estos resultados permiten concluir que el proyecto es financieramente viable.

10.2.1. Justificación del análisis de sensibilidad

A pesar de los resultados favorables, es fundamental considerar posibles cambios en variables externas que puedan afectar la rentabilidad del proyecto. Por ello, se realiza un análisis de sensibilidad, centrado especialmente en el precio de la energía eléctrica. Esta tarifa influye directamente en los ingresos evitados por el uso de autogeneración y, por lo tanto, en la recuperación de la inversión. Para llevar a cabo lo anterior se decide tomar un escenario optimista (Tarifa de energía con incremento del 25%, 0,22 USD/kWh) y un escenario conservador con una tarifa un 25% por debajo de la correspondiente al estudio base (0,13 USD/kWh).

A continuación, en las tablas se muestran los resultados obtenidos

Año	Autoconsumo biomasa	Ingresos por excedentes biomasa	Autoconsumo fotovoltaico	Ingresos por excedentes fotovoltaicos	O&M	Cuota banco	Flujo neto	Flujo neto acumulado	Tasa de descuento	Factor de descuento	Flujo de caja descontado	Flujo neto descontado acumulado	VAN acumulado
0	\$ -				\$ -	\$ -	\$ 330.423,17		12%	1,00	\$ 330.423,17		-\$ 330.423,17
1	\$ 84.794,12	\$ 51.670,80	\$ 5.224,41	\$ 2.673,75	\$ 24.781,74	\$ 37.394,34	\$ 82.187,00	\$ 82.187,00	12%	0,89	\$ 73.381,25	\$ 73.381,25	-\$ 257.041,92
2	\$ 89.033,82	\$ 54.254,34	\$ 5.485,63	\$ 2.807,44	\$ 26.020,82	\$ 37.394,34	\$ 88.166,06	\$ 170.353,06	12%	0,80	\$ 70.285,45	\$ 143.666,69	-\$ 186.756,47
3	\$ 93.485,51	\$ 56.967,06	\$ 5.759,91	\$ 2.947,81	\$ 27.321,87	\$ 37.394,34	\$ 94.444,08	\$ 264.797,15	12%	0,71	\$ 67.223,43	\$ 210.890,13	-\$ 119.533,04
4	\$ 98.159,79	\$ 59.815,41	\$ 6.047,91	\$ 3.095,20	\$ 28.687,96	\$ 37.394,34	\$ 101.036,01	\$ 365.833,15	12%	0,64	\$ 64.210,21	\$ 275.100,34	-\$ 55.322,83
5	\$ 103.067,78	\$ 62.806,18	\$ 6.350,31	\$ 3.249,96	\$ 30.122,36	\$ 37.394,34	\$ 107.957,52	\$ 473.790,68	12%	0,57	\$ 61.258,00	\$ 336.358,34	\$ 5.935,17
6	\$ 108.221,17	\$ 65.946,49	\$ 6.667,82	\$ 3.412,46	\$ 31.628,47	\$ 37.394,34	\$ 115.225,12	\$ 589.015,79	12%	0,51	\$ 58.376,63	\$ 394.734,97	\$ 64.311,80
7	\$ 113.632,23	\$ 69.243,81	\$ 12.972,13		\$ 33.209,90	\$ 37.394,34	\$ 125.243,93	\$ 714.259,73	12%	0,45	\$ 56.653,99	\$ 451.388,96	\$ 120.965,79
8	\$ 119.313,84	\$ 72.706,00	\$ 13.620,74		\$ 34.870,39	\$ -	\$ 170.770,19	\$ 885.029,91	12%	0,40	\$ 68.971,22	\$ 520.360,18	\$ 189.937,01
9	\$ 125.279,53	\$ 76.341,30	\$ 14.301,78		\$ 36.613,91	\$ -	\$ 179.308,70	\$ 1.064.338,61	12%	0,36	\$ 64.660,51	\$ 585.020,69	\$ 254.597,52
10	\$ 131.543,51	\$ 80.158,37	\$ 15.016,86		\$ 38.444,61	\$ -	\$ 188.274,13	\$ 1.252.612,75	12%	0,32	\$ 60.619,23	\$ 645.639,92	\$ 315.216,76
11	\$ 138.120,68	\$ 84.166,29	\$ 15.767,71		\$ 40.366,84	\$ -	\$ 197.687,84	\$ 1.450.300,59	12%	0,29	\$ 56.830,53	\$ 702.470,45	\$ 372.047,29
12	\$ 145.026,72	\$ 88.374,60	\$ 16.556,09		\$ 42.385,18	\$ -	\$ 207.572,23	\$ 1.657.872,82	12%	0,26	\$ 53.278,62	\$ 755.749,07	\$ 425.325,91
13	\$ 152.278,05	\$ 92.793,33	\$ 17.383,90		\$ 44.504,44	\$ -	\$ 217.950,84	\$ 1.875.823,66	12%	0,23	\$ 49.948,71	\$ 805.697,78	\$ 475.274,62
14	\$ 159.891,96	\$ 97.433,00	\$ 18.253,09		\$ 46.729,66	\$ -	\$ 228.848,39	\$ 2.104.672,05	12%	0,20	\$ 46.826,91	\$ 852.524,70	\$ 522.101,53
15	\$ 167.886,55	\$ 102.304,65	\$ 19.165,75		\$ 49.066,15	\$ -	\$ 240.290,81	\$ 2.344.962,85	12%	0,18	\$ 43.900,23	\$ 896.424,93	\$ 566.001,76

Tabla 12 Flujo de caja del proyecto - Escenario favorable.

- Para tarifa de 0,22 USD / kWh

Año	Autoconsumo biomasa	Ingresos por excedentes biomasa	Autoconsumo fotovoltaico	Ingresos por excedentes fotovoltaicos	O&M	Cuota banco	Flujo neto	Flujo neto acumulado	Tasa de descuento	Factor de descuento	Flujo de caja descontado	Flujo neto descontado acumulado	VAN acumulado
0	\$ -				\$ -	\$ -	\$ 330.423,17		12%	1,00	\$ -330.423,17		-\$ 330.423,17
1	\$ 84.794,12	\$ 51.670,80	\$ 5.224,41	\$ 2.673,75	\$ 24.781,74	\$ 37.394,34	\$ 82.187,00	\$ 82.187,00	12%	0,89	\$ 73.381,25	\$ 73.381,25	-\$ 257.041,92
2	\$ 89.033,82	\$ 54.254,34	\$ 5.485,63	\$ 2.807,44	\$ 26.020,82	\$ 37.394,34	\$ 88.166,06	\$ 170.353,06	12%	0,80	\$ 70.285,45	\$ 143.666,69	-\$ 186.756,47
3	\$ 93.485,51	\$ 56.967,06	\$ 5.759,91	\$ 2.947,81	\$ 27.321,87	\$ 37.394,34	\$ 94.444,08	\$ 264.797,15	12%	0,71	\$ 67.223,43	\$ 210.890,13	-\$ 119.533,04
4	\$ 98.159,79	\$ 59.815,41	\$ 6.047,91	\$ 3.095,20	\$ 28.687,96	\$ 37.394,34	\$ 101.036,01	\$ 365.833,15	12%	0,64	\$ 64.210,21	\$ 275.100,34	-\$ 55.322,83
5	\$ 103.067,78	\$ 62.806,18	\$ 6.350,31	\$ 3.249,96	\$ 30.122,36	\$ 37.394,34	\$ 107.957,52	\$ 473.790,68	12%	0,57	\$ 61.258,00	\$ 336.358,34	\$ 5.935,17
6	\$ 108.221,17	\$ 65.946,49	\$ 6.667,82	\$ 3.412,46	\$ 31.628,47	\$ 37.394,34	\$ 115.225,12	\$ 589.015,79	12%	0,51	\$ 58.376,63	\$ 394.734,97	\$ 64.311,80
7	\$ 113.632,23	\$ 69.243,81	\$ 12.972,13		\$ 33.209,90	\$ 37.394,34	\$ 125.243,93	\$ 714.259,73	12%	0,45	\$ 56.653,99	\$ 451.388,96	\$ 120.965,79
8	\$ 119.313,84	\$ 72.706,00	\$ 13.620,74		\$ 34.870,39	\$ -	\$ 170.770,19	\$ 885.029,91	12%	0,40	\$ 68.971,22	\$ 520.360,18	\$ 189.937,01
9	\$ 125.279,53	\$ 76.341,30	\$ 14.301,78		\$ 36.613,91	\$ -	\$ 179.308,70	\$ 1.064.338,61	12%	0,36	\$ 64.660,51	\$ 585.020,69	\$ 254.597,52
10	\$ 131.543,51	\$ 80.158,37	\$ 15.016,86		\$ 38.444,61	\$ -	\$ 188.274,13	\$ 1.252.612,75	12%	0,32	\$ 60.619,23	\$ 645.639,92	\$ 315.216,76
11	\$ 138.120,68	\$ 84.166,29	\$ 15.767,71		\$ 40.366,84	\$ -	\$ 197.687,84	\$ 1.450.300,59	12%	0,29	\$ 56.830,53	\$ 702.470,45	\$ 372.047,29
12	\$ 145.026,72	\$ 88.374,60	\$ 16.556,09		\$ 42.385,18	\$ -	\$ 207.572,23	\$ 1.657.872,82	12%	0,26	\$ 53.278,62	\$ 755.749,07	\$ 425.325,91
13	\$ 152.278,05	\$ 92.793,33	\$ 17.383,90		\$ 44.504,44	\$ -	\$ 217.950,84	\$ 1.875.823,66	12%	0,23	\$ 49.948,71	\$ 805.697,78	\$ 475.274,62
14	\$ 159.891,96	\$ 97.433,00	\$ 18.253,09		\$ 46.729,66	\$ -	\$ 228.948,39	\$ 2.104.672,05	12%	0,20	\$ 46.826,91	\$ 852.524,70	\$ 522.101,53
15	\$ 167.886,55	\$ 102.304,65	\$ 19.165,75		\$ 49.066,15	\$ -	\$ 240.290,81	\$ 2.344.962,85	12%	0,18	\$ 43.900,23	\$ 896.424,93	\$ 566.001,76

Tabla 13 Flujo de caja del proyecto - Escenario favorable.

10.2.2. Resultados del análisis

Con los supuestos planteados, el proyecto presenta los siguientes resultados financieros:

VAN (Valor Actual Neto): 566.001,76 USD
 TIR (Tasa Interna de Retorno): 32 %
 PAYBACK: 3.76 Años

PAYBACK DESCONTADO 5,06 AÑOS

En un contexto favorable con un costo de energía de 0,20 USD/kWh, el proyecto evidencia un alto rendimiento económico y una rápida recuperación de la inversión. El Valor Actual Neto (VAN) alcanza los 566.001,76 USD, reflejando un beneficio neto considerable. La Tasa Interna de Retorno (TIR) llega a un destacado 32%, superando ampliamente el mínimo requerido del 15%, lo que demuestra una alta eficiencia en la generación de valor sobre el capital empleado. Asimismo, el período de recuperación simple es de solo 3,76 años, y el descontado se sitúa en 5,06 años, consolidando al proyecto como una opción financieramente atractiva.

- Para tarifa de 0.13 USD / kWh

Año	Autoconsumo biomasa	Ingresos por excedentes biomasa	Autoconsumo fotovoltaico	Ingresos por excedentes fotovoltaicos	O&M	Cuota banco	Flujo neto	Flujo neto acumulado	Tasa de descuento	Factor de descuento	Flujo de caja descontado	Flujo neto descontado acumulado	VAN acumulado
0	\$ -				\$ -	\$ -	\$ 330.423,17		12%	1,00	\$ -330.423,17		-\$ 330.423,17
1	\$ 50.876,47	\$ 31.002,48	\$ 5.224,41	\$ 1.604,25	\$ 24.781,74	\$ 37.394,34	\$ 26.531,53	\$ 26.531,53	12%	0,89	\$ 23.688,87	\$ 23.688,87	-\$ 306.734,30
2	\$ 53.420,29	\$ 32.552,60	\$ 5.485,63	\$ 1.684,46	\$ 26.020,82	\$ 37.394,34	\$ 29.727,82	\$ 56.259,35	12%	0,80	\$ 23.698,84	\$ 47.387,71	-\$ 283.035,46
3	\$ 56.091,31	\$ 34.180,23	\$ 5.759,91	\$ 1.768,69	\$ 27.321,87	\$ 37.394,34	\$ 33.083,93	\$ 89.343,29	12%	0,71	\$ 23.548,49	\$ 70.936,20	-\$ 259.486,97
4	\$ 58.895,87	\$ 35.889,25	\$ 6.047,91	\$ 1.857,12	\$ 28.687,96	\$ 37.394,34	\$ 36.607,85	\$ 125.951,13	12%	0,64	\$ 23.264,95	\$ 94.201,14	-\$ 236.222,02
5	\$ 61.840,67	\$ 37.683,71	\$ 6.350,31	\$ 1.949,98	\$ 30.122,36	\$ 37.394,34	\$ 40.307,96	\$ 166.259,09	12%	0,57	\$ 22.871,82	\$ 117.072,96	-\$ 213.350,21
6	\$ 64.932,70	\$ 39.567,89	\$ 6.667,82	\$ 2.047,47	\$ 31.628,47	\$ 37.394,34	\$ 44.193,07	\$ 210.452,16	12%	0,51	\$ 22.389,59	\$ 139.462,55	-\$ 190.960,62
7	\$ 68.179,34	\$ 41.546,29	\$ 12.972,13		\$ 33.209,90	\$ 37.394,34	\$ 52.093,51	\$ 262.545,67	12%	0,45	\$ 23.564,46	\$ 163.027,01	-\$ 167.396,16
8	\$ 71.588,30	\$ 43.623,60	\$ 13.620,74		\$ 34.870,39	\$ -	\$ 93.962,25	\$ 356.507,93	12%	0,40	\$ 37.949,78	\$ 200.976,78	-\$ 129.446,38
9	\$ 75.167,72	\$ 45.804,78	\$ 14.301,78		\$ 36.613,91	\$ -	\$ 98.660,36	\$ 455.168,29	12%	0,36	\$ 35.577,92	\$ 236.554,70	-\$ 93.868,47
10	\$ 78.926,10	\$ 48.095,02	\$ 15.016,86		\$ 38.444,61	\$ -	\$ 103.593,38	\$ 558.761,67	12%	0,32	\$ 33.354,30	\$ 269.909,00	-\$ 60.514,17
11	\$ 82.872,41	\$ 50.499,77	\$ 15.767,71		\$ 40.366,84	\$ -	\$ 108.773,05	\$ 667.534,72	12%	0,29	\$ 31.269,65	\$ 301.178,65	-\$ 29.244,52
12	\$ 87.016,03	\$ 53.024,76	\$ 16.556,09		\$ 42.385,18	\$ -	\$ 114.211,70	\$ 781.746,43	12%	0,26	\$ 29.315,30	\$ 330.493,95	\$ 70,78
13	\$ 91.366,83	\$ 55.676,00	\$ 17.383,90		\$ 44.504,44	\$ -	\$ 119.922,29	\$ 901.668,72	12%	0,23	\$ 27.483,09	\$ 357.977,04	\$ 27.553,88
14	\$ 95.935,17	\$ 58.459,80	\$ 18.253,09		\$ 46.729,66	\$ -	\$ 125.918,40	\$ 1.027.587,12	12%	0,20	\$ 25.765,40	\$ 383.742,44	\$ 53.319,28
15	\$ 100.731,93	\$ 61.382,79	\$ 19.165,75		\$ 49.066,15	\$ -	\$ 132.214,32	\$ 1.159.801,45	12%	0,18	\$ 24.155,06	\$ 407.897,51	\$ 77.474,34

Tabla 14 Flujo de caja del proyecto - Escenario conservador

10.2.3. Resultados del análisis

Con los supuestos planteados, el proyecto presenta los siguientes resultados financieros:

VAN (Valor Actual Neto): 77.474,34 USD
TIR (Tasa Interna de Retorno): 15 %
PAYBACK: 8.71 Años
PAYBACK DESCONTADO 11,64 AÑOS

10.2.4. Análisis de resultados

Como parte del análisis de sensibilidad, se examinó el efecto de una disminución en la tarifa energética, considerando un escenario conservador de 0,13 USD/kWh. Los indicadores financieros revelan que, pese a la caída en los ingresos por venta de excedentes, el proyecto conserva su viabilidad financiera. En este contexto, el Valor Actual Neto (VAN) es de 77.474,34 USD, lo que confirma un retorno neto positivo. La Tasa Interna de Retorno (TIR) alcanza justamente el 15%, igualando el límite mínimo aceptable para validar la inversión. Sin embargo, los plazos de recuperación se alargan: el Payback simple aumenta a 8,71 años y el Payback descontado a 11,64 años, mostrando una mayor lentitud en la recuperación del capital, aunque dentro de márgenes tolerables para iniciativas energéticas con visión a largo plazo. Cabe destacar que, si la tarifa energética cae por debajo de 0,13 USD/kWh, el proyecto pierde su rentabilidad y deja de ser viable económicamente.

10.3. Situación actual vs sistema de generación

10.3.1. Situación actual

Actualmente, la planta arrocera obtiene ingresos adicionales mediante la venta de cascarilla de arroz, un subproducto del proceso, utilizado como material en galpones cercanos. Este residuo se comercializa en dos modalidades:

- Al por mayor: \$ 3.058 por cada paca de 45 kg
- Al detal: \$ 4.7 por cada paca de 45 kg

Para efectos del análisis económico, se considera el precio mayorista, ya que corresponde al canal de venta habitual.

Se ha estimado que para cubrir un consumo mensual de 31.540 kWh de energía eléctrica, se requiere aproximadamente 40.170 kg de cascarilla de arroz. Aplicando una regla de tres simple:

$$\begin{aligned} 45 \text{ kg} &\rightarrow \$ 3.058 \\ 65.243 \text{ kg} &\rightarrow x \end{aligned}$$

Despejando se obtiene que,

$$x = \frac{\$3.058 * 65.243 \text{ kg}}{45 \text{ kg}} = \$ 4434.82$$

Por tanto, la planta podría obtener \$ 4434.82 mensuales si decide vender la cascarilla de arroz en lugar de utilizarla para generación energética.

10.3.2. Situación con el proyecto de generación eléctrica

En el escenario del proyecto de gasificación, se emplea la misma cantidad de cascarilla de arroz (65.243 kg) para producir 31.540 kWh mensuales, energía suficiente para cubrir completamente la demanda de la planta.

Actualmente, ese consumo eléctrico representa un costo mensual de \$ 5751,4 en la factura energética. Por lo tanto, sustituir la compra de electricidad por generación propia implica un ahorro económico superior al ingreso que se obtendría por la venta de la cascarilla para uso en galpones.

11. CONCLUSIONES

- El balance de masa y energía demuestra la viabilidad técnica de utilizar la cascarilla de arroz como materia prima para la producción de syngas y la posterior generación de electricidad. La cantidad de biomasa disponible 224,400 kg/mes (humeda), es suficiente para cubrir la demanda energética de la planta (31,500 kWh/mes) operando nuestro grupo electrógeno 10 horas al día por los 30 días suministrando una energía de 105.13 kW/h.
- La energía disponible de la cascarilla de arroz asciende a 153.335,45 kWh / mes por lo cual nos genera unos excedentes de energía de 121.795,45 kWh / mes, que pueden ser inyectados a la red o utilizarlos en caso de requerir la instalación. Para el aprovechamiento eficaz de esta energía sobrante se contempla el cambio todo nuestro sistema de gasificación y generación eléctrica que cumpla con criterios como, potencia eléctrica 213 KW y una potencia térmica de nuestro gasificador alrededor de 1.092,3 Kw
- La eficiencia del grupo electrógeno alimentado con syngas es un factor crítico que impacta directamente en la cantidad de energía eléctrica generada. La diferencia entre una eficiencia del 80% típica de combustibles convencionales y el rango del 20-35% para syngas de biomasa resalta la necesidad de seleccionar cuidadosamente la tecnología del motor y optimizar la calidad del syngas para maximizar la producción eléctrica.
- La hibridación de los sistemas de generación en el tipo de emplazamiento en estudio Planta arrocera, permite independizar el consumo de energía en unidades de negocio y de esta manera que en un momento dado no se paren las operaciones de ninguno de estos.
- El análisis económico desarrollado evidencia que el proyecto híbrido de generación eléctrica que integra gasificación de cascarilla de arroz y energía solar fotovoltaica presenta viabilidad financiera, destacándose por su capacidad para reemplazar el consumo de energía de la red y disminuir costos operativos en plantas arroceras. Aunque la cascarilla podría comercializarse para uso en galpones, con ingresos estimados en USD 4.434,82 mensuales, su empleo en autogeneración energética mediante gasificación genera un ahorro mensual de USD 5.751,40 al evitar el pago de la factura eléctrica. Esto demuestra que utilizar este subproducto para la producción de energía no solo fortalece la autonomía energética, sino que también optimiza su rentabilidad, priorizando beneficios internos sobre su venta en mercados secundarios.
- En cuanto a la estabilidad financiera, el análisis de sensibilidad en función de la tarifa energética revela resiliencia ante variaciones. En el escenario base (tarifa de USD 0,18/kWh), el proyecto registra un VAN de USD 196.389 y una TIR del

19%, superando el umbral mínimo de viabilidad (15%). Bajo el escenario conservador (USD 0,13/kWh), mantiene rentabilidad con una TIR del 15% y un VAN positivo de USD 77.474, aunque con un plazo de recuperación descontado prolongado (11,64 años). En contraste, el escenario favorable (USD 0,20/kWh) refleja un VAN elevado (USD 566.001), una TIR del 32% y un retorno descontado acelerado (5,06 años). Estos resultados subrayan que, incluso en contextos adversos, la iniciativa se mantiene dentro de parámetros financieros atractivos para inversiones en infraestructura energética descentralizada, consolidándose como una alternativa estratégica en la transición hacia modelos sostenibles en el sector agroindustrial.

11.1 CONCLUSIONS

- The mass and energy balance demonstrates the technical feasibility of using rice husks as a raw material for syngas production and subsequent electricity generation. The amount of available biomass, 224,400 kg/month (wet), is sufficient to cover the plant's energy demand (31,500 kWh/month), operating our generator 10 hours a day for 30 days, supplying 105.13 kWh of energy.
- The available energy from rice husks amounts to 153,335.45 kWh/month, generating surplus energy of 121,795.45 kWh/month, which can be injected into the grid or used if the installation is required. To effectively utilize this excess energy, we are considering replacing our entire gasification and power generation system to meet criteria such as 213 kW of electrical power and a thermal power of approximately 1,092.3 kW for our gasifier.
- The efficiency of the syngas-powered generator set is a critical factor that directly impacts the amount of electricity generated. The difference between the 80% efficiency typical of conventional fuels and the 20-35% efficiency range for biomass syngas highlights the need to carefully select engine technology and optimize syngas quality to maximize electricity production.
- The hybridization of the generation systems at the rice farm site under study allows for independent energy consumption across business units, ensuring that operations at none of them are shut down at any given time.
- The economic analysis confirms that the hybrid power generation project integrating rice husk gasification and solar photovoltaic energy is financially sustainable, demonstrating its potential to replace conventional grid electricity and reduce operational costs in rice processing facilities. While the rice husk could be sold for use in poultry farms, generating estimated monthly revenues of USD 4,434.82, its utilization for self-generated energy through gasification results in a monthly savings of USD 5,751.40 by eliminating external electricity expenses. This finding underscores that repurposing the byproduct for energy production not only ensures operational autonomy but also

maximizes its economic value, privileging internal use over commercialization in secondary markets.

- Regarding financial resilience, the sensitivity analysis based on energy tariff fluctuations reveals robust outcomes. Under the base scenario (USD 0.18/kWh), the project achieves an NPV of USD 196,389 and an IRR of 19%, exceeding the minimum profitability threshold (15%). In the conservative scenario (USD 0.13/kWh), the project remains viable, with an IRR of 15% and a positive NPV of USD 77,474, albeit with an extended discounted payback period (11.64 years). Conversely, under the favorable scenario (USD 0.20/kWh), the project attains a high NPV of USD 566,001, an IRR of 32%, and a discounted capital recovery in just 5.06 years. These results emphasize that, even under adverse conditions, the initiative remains within competitive financial margins for investments in distributed energy infrastructure, positioning it as a strategic solution in the transition toward sustainable models for the agro-industrial sector.

11.3 RECOMENDACIONES FUTURAS

- Averiguar empresas del sector industrial dedicadas a transformar los residuos de la gasificación como las cenizas y el biochar en subproductos que generen rentabilidad para la empresa.
- También busca aportar al fortalecimiento del conocimiento existente sobre la utilización de la tecnología para generar energía mediante el proceso de gasificación utilizando la cascarilla de arroz, particularmente en el municipio de Fonseca, departamento de La Guajira, un lugar con una alta producción de arroz, de acuerdo a las cifras que maneja el Fondo Nacional del Arroz, entidad colombiana que agrupa a los productores de arroz a nivel nacional. En este lugar, históricamente, los residuos orgánicos derivados de la siembra se desperdician y no se aprovechan como debiera ser, para generar un entorno sostenible, reducir el impacto negativo ambiental y promover una economía circular alrededor de la siembra del arroz. En base a los resultados obtenidos, se considera que la planta de la Gloria puede convertirse en una experiencia piloto para mejorar el aprovechamiento de la cascarilla de arroz en la región. De acuerdo con el Fondo Nacional del arroz (...), en esta zona la cascarilla se desperdicia, y si los resultados de la aplicación práctica del proyecto se confirman, puede extenderse la tecnología de gasificación para mejorar la productividad del sector en la región.
- Con la implementación de este tipo de proyectos y su viabilidad técnica y económica en el sector arrocero, permite que este tipo de equipos de gasificación utilizados para la tecnología de generación de gas sea más comercial en la República de Colombia.

12. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Diario La República. <https://www.larepublica.co/economia/precios-de-electricidad-subieron-19-51-anual-y-la-costa-caribe-es-donde-mas-crece-3566130>
- [2] Periódico Portafolio. <https://www.portafolio.co/energia/en-colombia-se-instalo-la-primer-termoelectrica-a-base-de-cascarilla-de-arroz-624357>
- [3] 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 Pacandé de la ciudad de Villavicencio, Meta. Tesis de grado. Maestría en Ingeniería con énfasis en energías alternativas. Universidad Libre. 2019.
- [4] Federación Nacional de Arroceros de Colombia. <https://fedearroz.com.co/es/fondo-nacional-del-arroz/investigaciones-economicas/estadisticas-arroceras/area-produccion-y-rendimiento/>
- [5] Nam Hong and Ha-Doung Minh. "Rice husk gasification for electricity generation in Cambodia in December 2014". *Field trip report*. Université de Sciences et Technologies de Hanoi. 2013.
- [6] https://grupoindustronic.com.co/productos-categoria/reguladores-automaticos-de-voltaje/?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=21152836030&utm_content=695315671563&utm_term=g&gad_source=1&gclid=Cj0KCQjw2N2_BhCAARIsAK4pEkUFNbGoCb-Mq-f7BvqNQ22m_1OrDMPtWu4Ey1ahUpRpvAxyXpNmQFQaAjENEALw_wcB
- [7] Fuente Universidad Carlos III de Madrid, 2010.
- [8] Introducción a la energía fotovoltaica. Daniel Barberá Santos. Universidad de Sevilla, España.
- [9] Módulo de Energía Fotovoltaica. Máster en Energías Renovables. Universidad Europea.
- [10] Módulo de Biomasa. Máster en Energías Renovables. Universidad Europea.
- [11] Castells, X. E., & García, E. V. (2012). *La gasificación: Tratamiento y valorización energética de residuos* (p. 90). Ediciones Díaz de Santos. Recuperado a partir de <https://books.google.com/books?id=UGNJ28JbNjQC&pgis=1>
- [12] "Cenizas procedentes de la incineración de biomasa", Catálogo de residuos utilizables en construcción, CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas)
- [13] Daniel, J., Ángel, M., Gisette, T., Vásquez, P., López Zapata, J. P., & Vélez, M. B. (2010). EXPERIMENTOS DE COMBUSTIÓN CON CASCARILLA DE

ARROZ EN LECHO FLUIDIZADO PARA LA PRODUCCIÓN DE CENIZA RICA EN SÍLICE. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, 51, 97–104.

- [14] <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/SE/DBSE-AE.pdf>