

**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD CON MENCIÓN EN ENERGÍAS RENOVABLES
Y EFICIENCIA ENERGÉTICA**

TEMA:

**Cogeneración a partir de la cascarilla del arroz en la industria arrocera Gloria Matilde
S.A del cantón Daule, provincia del Guayas.**

AUTOR:

García González José Javier

Trabajo de Titulación previo a la obtención del Grado Académico de

**MAGÍSTER EN ELECTRICIDAD CON MENCIÓN EN ENERGÍAS RENOVABLES Y
EFICIENCIA ENERGÉTICA**

TUTOR:

Ing. Bohórquez Escobar Celso Bayardo, Ph.D.

Guayaquil, 31 de julio de 2025



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD CON MENCIÓN EN ENERGÍAS RENOVABLES
Y EFICIENCIA ENERGÉTICA**

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por **José Javier García González**, como requerimiento parcial para la obtención del Grado Académico de **MAGÍSTER EN ELECTRICIDAD CON MENCIÓN EN ENERGÍAS RENOVABLES Y EFICIENCIA ENERGÉTICA**.

TUTOR

**Ing. Bayardo Bohórquez Escobar, Ph.D.
DIRECTOR DEL PROGRAMA**

Ing. Bayardo Bohórquez Escobar, Ph.D.

Guayaquil, 31 de julio de 2025



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO

**MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD CON MENCIÓN EN ENERGÍAS RENOVABLES
Y EFICIENCIA ENERGÉTICA**

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, José Javier García González

DECLARO QUE:

El trabajo de titulación “**Cogeneración a partir de la cascarilla del arroz en la industria arrocera Gloria Matilde S.A del cantón Daule, provincia del Guayas**”, previa a la obtención del grado Académico de Magíster, ha sido desarrollado en base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del trabajo de titulación del Grado Académico en mención.

Guayaquil, 31 de julio de 2025

EL AUTOR

José Javier García González



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD CON MENCIÓN EN ENERGÍAS RENOVABLES
Y EFICIENCIA ENERGÉTICA**

AUTORIZACIÓN

Yo, José Javier García González

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del trabajo de titulación de Maestría titulado: “Cogeneración a partir de la cascarilla del arroz en la industria arrocera Gloria Matilde S.A del cantón Daule, provincia del Guayas”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, 31 de julio de 2025.

EL AUTOR

José Javier García González

CEDULA: 0922885025

INFORME COMPILATIO

 INFORME DE ANÁLISIS
magister

2025-05-26 Proyecto de Titulación -
Máster en Electricidad-
JoséJavierGarcíaGonzález Rev.22-06-2025



Nombre del documento: 2025-05-26 Proyecto de Titulación - Máster en Electricidad-JoséJavierGarcíaGonzález Rev.22-06-2025.pdf ID del documento: 74a4a74a1f1e37d4bcd0ab5fa9a34754ecd42ef1 Tamaño del documento original: 3,7 MB	Depositante: Ricardo Xavier Ubilla Gonzalez Fecha de depósito: 25/6/2025 Tipo de carga: interface fecha de fin de análisis: 25/6/2025	Número de palabras: 24.651 Número de caracteres: 173.696
---	--	---

Ubicación de las similitudes en el documento:



Fuentes de similitudes

Fuentes principales detectadas

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	 localhost Estudio de factibilidad para la implementación de un sistema de gesti... http://localhost:8080/xmlui/bitstream/3317/5415/3/IT-UCSG-PRE-ECO-GES-258.pdf.txt 25 fuentes similares	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (236 palabras)
2	 Nathaly Freire, Juan Vega, P73.docx Nathaly Freire, Juan Vega, P73 #156993 El documento proviene de mi grupo 22 fuentes similares	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (192 palabras)
3	 Evaluación del potencial técnico y económico de plantas de generación eléctrica ... http://ar/dspace/bitstream/15000/19464/3/CD-8859.pdf.txt	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (187 palabras)
4	 repositorio.ucsg.edu.ec La producción de arroz y su incidencia en el desarrollo ... http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/17805/1/IT-UCSG-PRE-ECO-ADM-621.pdf 3 fuentes similares	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (158 palabras)

Certifico que después de revisar el documento final del trabajo de titulación “**Cogeneración a partir de la cascarilla del arroz en la industria arrocera Gloria Matilde S.A del cantón Daule, provincia del Guayas**”, presentado por el estudiante Ing. José Javier García González, fue enviado al Sistema Anti-plagio COMPILATIO, presentando un porcentaje de similitud correspondiente al 2%, por lo que se aprueba el trabajo para que continúe con el proceso de titulación.

f. _____

Ing. Bohórquez Escobar Celso Bayardo, Ph.

DEDICATORIA

El presente trabajo investigativo lo dedico principalmente a nuestro Dios Jehová, por ser el inspirador y darme las fuerzas necesarias para continuar en este proceso, de obtener uno de los anhelos más deseados.

A mi señora madre Miriam González Chóez, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ella he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy profesionalmente. Ha sido el orgullo más grande y es un gran privilegio que tengo de ser su hijo, es la mejor madre del mundo.

A mis tiernos 4 hijos: Saray Valentina, María José, Jared Javier y Bruno Ezequiel, son el motivo por el cual cada día decido seguir preparándome; sin olvidar que son bendiciones de parte de Dios que me da una razón para vivir y de nunca rendirme a pesar de las circunstancias que se puedan presentar. A pesar de que hoy me encuentro muy lejos de ellos, los amo con toda mi vida.

A todas las personas, docentes y compañeros de trabajo que me han ayudado y han hecho que el trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que me abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos cuando lo necesité.

AGRADECIMIENTO

Agradezco primero a Jehová y también a mi familia, por haber sido mi guía para culminar con este anhelado sueño, que hoy ya es una realidad.

A mis amigos, por formar parte del inicio y la culminación de una etapa más de mi vida, llena de gratos recuerdos y experiencias que jamás se repetirán; en especial a mi gran amigo y compañero de pupitre, el Ingeniero Ricardo Echeverría una persona loable y digna de admirar, gracias por toda su ayuda y consejos.

A la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, por brindarme la oportunidad de ser un ciudadano profesional de este país, gracias a su educación global.

Al Ingeniero Celso Bayardo Bohórquez, director del programa de la Maestría de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, por brindar su apoyo y comprensión en todo momento.

Y en especial a todas esas personas que siempre estuvieron allí de forma indirecta, aconsejándome y dándome las fuerzas para no bajar los brazos y rendirme en el primer resbalón.



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO

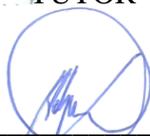
**MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD CON MENCIÓN EN ENERGÍAS RENOVABLES
Y EFICIENCIA ENERGÉTICA**

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. 

Ing. Bayardo Bohórquez Escobar, Ph.D.

TUTOR

f. 

Ing. Daniel Bohórquez Heras, Mgs

REVISOR

f. 

Ing. Ricardo Ubilla González, Mgs

REVISOR

f. 

Ing. Bayardo Bohórquez Escobar, Ph.D.

DIRECTOR DEL PROGRAMA

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	XIII
ÍNDICE DE TABLAS	XV
GLOSARIO	XVII
RESUMEN	XVIII
ABSTRACT.....	XX
Capítulo 1. Aspectos Generales	4
1.1 Antecedentes de Estudios	4
1.2 Planteamiento del Problema	6
1.3 Justificación del problema	7
1.4 Formulación de las variables de investigación	9
1.4.1 Variable Independiente	9
1.4.2 Variable Dependiente	9
1.5 Objetivos	9
1.5.1 Objetivo general.....	9
1.5.2 Objetivos específicos	9
1.6 Hipótesis	10
1.7 Metodología de la Investigación.....	10
1.7.1 Investigación Descriptiva.....	10
1.7.2 Investigación Explicativa.....	10
1.7.3 Investigación Documental	11
Capítulo 2: Fundamentación Teórica.....	12
2.1 Antecedentes	12
<i>La Cogeneración.....</i>	12
<i>Situación a nivel internacional</i>	12
<i>Situación a nivel nacional.....</i>	15
2.2 Emplazamiento	19

2.3 Datos Obtenidos de la Planta	22
2.4 Proceso industrial del arroz.....	23
2.5 Fundamentos de la cogeneración	33
2.6 Biomasa y sistemas de cogeneración en industrias arroceras.....	34
2.7 Potencial de la Cascarilla del Arroz como Materia Prima.....	35
2.7.1 Potencial Bioenergético Bruto	35
2.7.2 Potencial Bioenergético Sustentable.....	36
2.7.3 Estacionalidad.....	36
2.7.4 Potencial Bioenergético Técnico.	37
2.7.4.1 Generación de Electricidad con Turbina a Vapor y Calderas de Agua/Vapor.	38
2.7.4.2 Generación de Electricidad con Turbina a Vapor de un Fluido Orgánico Usando Tecnología ORC.	40
2.7.4.3 Ciclo Termodinámico de Rankine.	40
2.7.4.4 Generación de Electricidad con el Uso de Biogás.	41
2.8 Potencial Bioenergético Económico.....	43
Capítulo 3: Conversión de Energía	44
3.1 Análisis Energético del Sistema de Cogeneración con la Tecnología Seleccionada.	44
3.2 Estudio del Potencial Bioenergético Teórico.....	44
3.3 Cálculo del Potencial Bioenergético teórico.....	45
3.4 Evaluación Energética Contendida en la Cascarilla del Arroz.	46
3.5 Propiedades de la Cascarilla del Arroz.....	47
3.5.1 Evaluación de la Potencia Térmica Bruta de la Cascarilla de Arroz.	47
3.6 Estudio del Potencial Geográfico Sustentable.	49
3.7 Estudio del Potencial Bioenergético Técnico.	50
3.7.1 Fluido de Trabajo.....	50
3.7.2 Análisis y Cálculo del Ciclo Termodinámico de Rankine.....	51
3.7.3 Bomba Impulsora del Fluido.	54

3.7.4 Caldera.....	56
3.7.5 Turbina de Alta Presión.....	57
3.7.6 Turbina de Alta Presión.....	58
3.7.7 Turbina de Baja Presión.....	58
3.7.8 Condensador.....	60
3.7.9 Diagrama Temperatura – Entropía (T-S).....	84
3.7.10 Eficiencia de la Caldera.....	85
3.7.11 Eficiencia de la Planta.....	86
3.7.12 Potencia Entregada por la Planta.....	86
3.7.13 Alimentación de Cascarilla de Arroz a la Caldera.....	87
3.7.14 Cascarilla de Arroz que se Requiere para el Funcionamiento del Sistema.....	87
3.7.15 Proceso de Secado del Arroz.....	88
3.7.16 Cantidad de Cascarilla Necesaria al Año para el Secado del Arroz Húmedo.....	89
3.7.17 Matriz DAFO Generada para este Proyecto.....	90
Capítulo 4: Análisis de Costo del Proyecto.....	92
4.1 Análisis del Potencial Bioenergético Económico.....	92
4.2 Costo del Proyecto.....	92
4.2.1 Inversión.....	92
4.2.1.1 Costo en la Adquisición de Equipos y Montaje.....	93
4.2.1.2 Financiamiento.....	94
4.2.2 Ingresos.....	96
4.2.2.1 Tarifas Vigentes por la Generación de Energía Renovables en el Ecuador.....	96
4.2.2.2 Total de Ingresos por Venta de Energía.....	97
4.2.2.3 Vigencia de los Precios de Venta.....	98
4.2.2.4 Reducción de las Emisiones de CO ₂	98
4.2.2.5 Ingreso por Energía que se Dejará de Comprar al SNI.....	99
4.2.3 Egresos.....	100

4.2.3.1 Costo de Operación y Mantenimiento.	100
4.2.4 Rentabilidad Económica.	102
4.2.5 Valor Actual Neto (VAN).	104
4.2.6 Tasa Interna de Retorno (TIR).	106
4.2.7 Tiempo de Recuperación de la Inversión.	107
Conclusiones y Recomendaciones.	108
Conclusiones.	108
Recomendaciones.	110
Referencias Bibliográficas.	111

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Transformación de la energía.	3
Ilustración 2. Cascarilla de arroz	5
Ilustración 3. Demanda de energía por sector (%).....	8
Ilustración 4. Proceso de la Cogeneración.....	12
Ilustración 5. Evolución anual de la generación de energía eléctrica.....	15
Ilustración 6. Demanda de energía por fuente (%).	16
Ilustración 7. Distribución de la energía eléctrica generada, por tipo de energía (%).	17
Ilustración 8: Fuente:(INEC, 2022, p. 19)	17
Ilustración 9. Resumen de la capacidad de cogeneración instalada en el Ecuador.....	18
Ilustración 10 Participación (%) #Empresas dedicadas a la Molienda o pilado de arroz por provincia 2019.	19
Ilustración 11. Mapa cantonal de cultivo de Arroz.....	20
Ilustración 12. Mapa de cobertura por cultivo.	20
Ilustración 13. Fotografía satelital de la Piladora de Arroz Gloria Matilde.....	21
Ilustración 14. Diagrama de proceso de la cogeneración propuesta	22
Ilustración 15. Estructura de un grano de arroz.	24
Ilustración 16. Diagrama de bloques del proceso productivo del arroz en la industria Gloria Matilde.	24
Ilustración 17. Recepción del grano de arroz.....	25
Ilustración 18. Zaranda doble de limpieza con aspirador de polvo	26
Ilustración 19. Decantador de polvo.	26
Ilustración 20. Secadora columnaria de flujo continuo.	27
Ilustración 21. Secadoras Columnarias (Horno de secado)	27

Ilustración 22. Diagrama de bloque del proceso de producción de la planta, con la cogeneración propuesta.....	28
Ilustración 23. Silos de reposo.....	29
Ilustración 24. Tolva de ingreso.....	29
Ilustración 25. Pre-limpia.....	30
Ilustración 26. Descascaradora.....	30
Ilustración 27. Máquina descascaradora de arroz.....	31
Ilustración 28. Pulidor del grano.....	31
Ilustración 29. Máquina clasificadora de granos.....	32
Ilustración 30. Tolva de ensacado.....	32
Ilustración 31. Área de almacenamiento temporal.....	33
Ilustración 32. Participación provincial en la superficie total de sembríos de arroz en Ecuador 2017.....	35
Ilustración 33. Ciclo de Rankine convencional, en una central térmica.....	39
Ilustración 34. Ciclo Rankine ideal simple.....	41
Ilustración 35: Diagrama de cómo funciona una planta de biogás.....	43
Ilustración 36. Diagrama de un ciclo Rankine con recalentamiento de 2 etapas.....	52
Ilustración 37. Potencia obtenida a la salida de un generador.....	54
Ilustración 38. Ilustración de un condensador y recorrido del agua de enfriamiento.....	61
Ilustración 39. Esquema del ciclo Rankine planteado para este proyecto.....	83
Ilustración 40. Gráfico T-s de un ciclo Rankine con recalentamiento.....	84
Ilustración 41. Secadora columnaria, modelo 815.....	88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Producción total de arroz en el Ecuador.	5
Tabla 2. Área total de arroz cosechados en el Ecuador.	6
Tabla 3. Balance nacional de energía eléctrica.....	17
Tabla 4. Datos del proceso de arroz en la industria arrocera Gloria Matilde.	23
Tabla 5. Producción de arroz para los años 2015, 2016 y 2017	36
Tabla 6. Meses de cosechas de algunos cultivos en el Ecuador.	37
Tabla 7. Descripción general de las cantidades de biomasa necesarias en tamaño de plantas.	38
Tabla 8. Poder calórico inferior (PCI) de ciertos residuos biomásicos en el Ecuador.....	46
Tabla 9. Algunas propiedades de la cascarilla del arroz.....	47
Tabla 10. Cantidad de residuos de campo, obtenidos durante el año 2020.	49
Tabla 11. Propiedades del agua como fluido de trabajo en un ciclo.....	50
Tabla 12. Especificaciones de la secadora columnaria modelo 815.....	89
Tabla 13. Análisis DAFO del proyecto propuesto.....	90
Tabla 14. Inversión en la construcción de la planta de generación de electricidad y vapor en la industria Gloria Matilde S.A.	93
Tabla 15. Cálculo de la amortización de la deuda.	95
Tabla 16. Precios en centavos de dólar por kWh, generado con energía renovable.....	96
Tabla 17. Historial de consumo de energía eléctrica de la planta Gloria Matilde S.A.....	99
Tabla 18. Opex de mantenimiento de la planta propuesta.	101
Tabla 19. Proyección de la tasa de inflación anual.	102
Tabla 20. Tasa de descuento.	103
Tabla 21. Características del VAN y significado del valor numérico obtenido del proyecto.	105

Tabla 22. Interpretación de la TIR..... 106

GLOSARIO

FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la alimentación.
CO₂	Dióxido de Carbono.
CRC	Ciclo de Rankine Convencional.
ORC	Ciclo de Rankine Orgánico.
EJ	Exajulios.
PCI	Poder calorífico inferior.
PCS	Poder calorífico superior.
ESPAC	Encuestas sectoriales de producción agropecuaria continua.
MEER	Ministerio de Electricidad y Energías Renovables.
MAGAP	Ministerio de Agricultura.
MWt	Megavatio térmico.
SNI	Sistema Nacional Interconectado.
SBU	Salario básico unificado.
W_{bomba}	Trabajo de la bomba [kJ/kg].
EES	Engineering Equation Solver.
q_{in}	Calor suministrado en el evaporador [kJ/kg].
q_{out}	Calor rechazado en el condensador [kJ/kg].
EF_{grid}	Factor de emisiones contaminantes en Ecuador [tCO ₂ /MWh].
T_{CO_2eq}	Toneladas de CO ₂ evitados [tCO ₂].
TMAR	Tasa mínima atractiva de retorno [%].
TIR	Tasa interna de retorno [%].
VAN	Valor actual neto [%].
GEI	Gases de Efecto invernadero.
tCO₂/año	Tonelada de CO ₂ al año.

RESUMEN

La ejecución de este proyecto es demostrar que la utilización de la cascarilla del arroz, un residuo del proceso alimentario; como combustible es viable y provechoso, tanto para la industria como para el medio ambiente y con la intención de averiguar si es posible tanto a nivel técnico como económico, la instalación de un sistema de cogeneración por medio de un ciclo termodinámico vapor-agua en la industria arrocera Gloria Matilde en el cantón Daule, en el Ecuador. Esto con el fin de conseguir abastecer el proceso interno de la industria, tanto de energía eléctrica como de energía térmica, obtenida a lo largo del proceso de la combustión de la cascarilla del arroz (Biomasa) y los excedentes de energía ofertarlos al SNI. Se calcula el ciclo de vapor-agua, en base a la potencia de diseño que se tiene de datos obtenidos de la planta. Una vez calculados los parámetros de funcionamiento de cada elemento que conforma el ciclo Rankine, calculamos la demanda de combustible necesaria de acuerdo con la potencia de la turbina y las horas que esta estará en funcionamiento. Con la generación de vapor para la generación de electricidad y uso de este en el secado del arroz de manera eficiente, siendo estos puntos las componentes de innovación del proyecto; ya que actualmente esta industria quema los residuos para secar el arroz, de una manera ineficiente (horno artesanal) y no aprovechando la combustión de esta que podrían servir para la utilización en otros procesos. En este estudio se realizó el análisis para comprobar la viabilidad económica del proyecto, calculando el VAN y la TIR donde queda demostrado que es viable técnicamente la futura implementación de este sistema, porque la biomasa cascarilla de arroz que dispone la planta es de 7.500 t/año, cuya energía calculada es 5.189,97 MWh/año, para todo este proceso se requiere 7.240,66 t/año de combustible (cascarilla de arroz), la potencia a generar por la turbina es de 1.11 MW. El costo estimado de la implementación de este proyecto es de 2.905.650,00 [USD] y desde el año 7,5 de funcionamiento la instalación quedaría amortizada y empezaría a generar beneficios.

PALABRAS CLAVES

Cascarilla de arroz, biomasa, poder calorífico, ciclo vapor-agua.

ABSTRACT

The purpose of this project is to demonstrate that the use of rice husks, a food processing waste, as fuel is viable and beneficial for both the industry and the environment. It also aims to determine whether it is technically and economically feasible to install a cogeneration system using a steam-water thermodynamic cycle at the Gloria Matilde rice industry in the Daule canton of Ecuador. This is to supply the industry's internal process with both electrical and thermal energy, obtained through the combustion of rice husks (biomass), and to offer surplus energy to the National System of Energy (SNI). The steam-water cycle is calculated based on the design power obtained from data obtained from the plant. Once the operating parameters of each element of the Rankine cycle have been calculated, we calculate the necessary fuel demand based on the turbine power and the number of hours it will be in operation. With the generation of steam for the generation of electricity and its use in the efficient drying of rice, these points are the innovative components of the project; currently this industry burns waste to dry rice, in an inefficient manner (artisanal oven) and does not take advantage of the combustion of this that could be used in other processes. In this study, the analysis was carried out to verify the economic viability of the project, calculating the NPV and IRR, which demonstrated the technical viability of the future implementation of this system. Because the rice husk biomass available at the plant is 7,500 t/year, whose calculated energy is 5,189.97 MWh/year. This entire process requires 7,240.66 t/year of fuel (rice husk), and the power to be generated by the turbine is 1.11 MW. The estimated cost of implementing this project is 2,905,650.00 [USD] and from year 7.5 of operation the facility would be amortized and would begin to generate benefits.

KEYWORDS

Rice husk, biomass, calorific value, steam-water cycle.

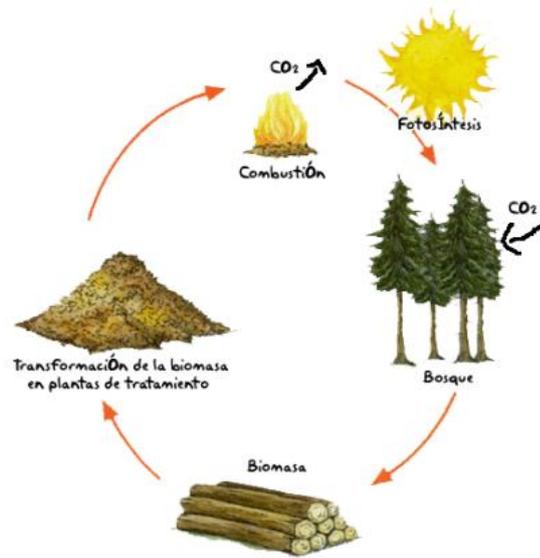
Introducción

A lo largo del tiempo, numerosos estudios se han enfocado en la protección del medio ambiente y en el desarrollo de soluciones energéticas más sostenibles. En este contexto, las energías renovables han adquirido un papel protagónico debido a su potencial contribución al bienestar ambiental, económico e industrial tanto a nivel nacional como global.

Entre las fuentes renovables, la biomasa ha mostrado un crecimiento sostenido como alternativa energética para la generación de calor y electricidad. Según datos de REN21 (2017), aproximadamente el 64,6% de la biomasa utilizada a nivel mundial proviene de la llamada biomasa tradicional, compuesta principalmente por leña, residuos agrícolas y estiércol animal. Estos materiales suelen emplearse mediante combustión en sistemas poco eficientes, como estufas y chimeneas rústicas, utilizadas comúnmente para cocinar, calentar espacios o generar iluminación básica. El porcentaje restante corresponde al uso de biomasa en sistemas más avanzados, denominados bioenergía moderna (Robles & Rodríguez, 2018, p. 2).

Una característica relevante de la biomasa es su balance neutro en emisiones de dióxido de carbono (CO₂). Esto se debe a que el CO₂ liberado durante su combustión equivale al que fue absorbido por la planta a lo largo de su crecimiento, mediante el proceso de fotosíntesis, en el cual se transforma la energía solar en oxígeno. Desde esta perspectiva, la fotosíntesis puede considerarse el sistema de conversión energética natural más eficiente y esencial del planeta (García, 2018, p. 11).

Ilustración 1. Transformación de la energía.



Fuente renovable de la biomasa. Fuente:(García, 2018)

El uso de la biomasa en sistemas de cogeneración, desde una perspectiva energética, la posiciona como una fuente renovable con gran relevancia en el escenario energético global. Su versatilidad en cuanto a recursos disponibles, amplia distribución geográfica, viabilidad técnica y su reconocida condición de energía con emisiones netas de carbono cercanas a cero, la consolidan como una alternativa estratégica frente a los desafíos del cambio climático y la progresiva reducción del consumo de combustibles fósiles (Manrique et al., 2021, p. 14).

Actualmente, la biomasa aporta más del 10% de la energía primaria consumida a nivel mundial, lo que la convierte en la cuarta mayor fuente de energía almacenada, únicamente por detrás del petróleo, el carbón y el gas natural. Se estima que la demanda energética global de biomasa asciende a 53 Exajulios (EJ). De ese total, aproximadamente el 86% se destina a la producción de calor, cocción de alimentos y procesos industriales, mientras que el 14% restante se emplea en la generación de electricidad y la producción de biocombustibles (Manrique et al., 2021, p. 100)

Capítulo 1. Aspectos Generales

1.1 Antecedentes de Estudios

El arroz es un cereal fundamental en la alimentación humana, reconocido por su aporte nutricional dentro de una dieta equilibrada. En el contexto ecuatoriano, es considerado el segundo producto alimenticio más consumido, después del trigo. A nivel global, ocupa el primer lugar en Asia y es un alimento básico en la mayoría de las culturas culinarias. Según datos de la FAO, la producción mundial de arroz supera los 491 millones de toneladas anuales, y de ese total, **cerca del 25% corresponde a cascarilla, lo que representa aproximadamente 123 millones de toneladas** (Arteaga, 2020, p. 17).

La cascarilla, subproducto del procesamiento del arroz, constituye uno de los residuos agroindustriales más abundantes en Ecuador. No obstante, este residuo posee potencial energético, ya que puede utilizarse como biocombustible. De acuerdo con información del Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP), cerca del 35% de la cascarilla generada se aprovecha en sectores como la floricultura o como material de cama en criaderos de animales. El resto del volumen se distribuye en diversos usos o permanece sin un aprovechamiento definido (SIPA (Sistema de Información Pública Agropecuaria), s. f.).

48% es quemada dentro de las mismas piladoras.

17% es tirada a los bordes de las carreteras.

15% es quemada en terrenos aislados.

10% se quema en los bordes de las carreteras.

5% es tirada en ríos.

5% se pierde a causa del viento.

Ilustración 2. Cascarilla de arroz



Típica eliminación de residuos en piladoras a nivel país. Fuente: (Arteaga, 2020)

En el año 2020 el arroz alcanzó en 1'336.502 de toneladas métricas producidas en una superficie sembrada en el país de 312.876 ha, concentrándose el 86,0% de la producción en la provincia del Guayas de acuerdo a la información publicada por la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura, 2022).

En la Tabla 1 y 2. se presenta la producción total de arroz y las áreas totales cosechadas en el Ecuador en el año 2020.

Tabla 1. Producción total de arroz en el Ecuador.

Año 2020			Unidad	Valor	Descripción del Símbolo
Ecuador [58]	Producción [5510]	Arroz, cáscara (arroz elaborado equivalente) [30]	Toneladas	891.447	Datos calculados
Ecuador [58]	Producción [5510]	Arroz, cáscara [27]	Toneladas	1'336.502	Datos oficiales

Fuente: Elaboración propia con datos de la (Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura, s. f.)

Tabla 2. Área total de arroz cosechados en el Ecuador.

Año 2020			Unidad	Valor	Descripción del Símbolo
Ecuador [58]	área cosechada [5312]	Arroz, cáscara (arroz elaborado equivalente) [30]	-	-	-
Ecuador [58]	área cosechada [5312]	Arroz, cáscara [27]	ha	312.876	Datos oficiales

Elaboración propia con datos de la (Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura, s. f.)

Con estos datos y en conclusión se puede definir que: mientras haya mayor producción de arroz habrá mayor cantidad generada de residuos (cascarilla de arroz). Por ende, generará mayores problemas ambientales a nivel País, ya que hasta el día de hoy en la mayoría de piladoras los residuos siguen quemando por no tener conocimiento y la tecnología para darle una mejor disposición final.

1.2 Planteamiento del Problema

Dado que la cascarilla de arroz es un residuo agrícola de origen rural con un alto contenido energético, representa una oportunidad significativa para el desarrollo de soluciones sostenibles, especialmente en el ámbito de la generación de energías limpias. Actualmente, este subproducto no recibe un tratamiento final adecuado, lo que representa una oportunidad para su valorización bajo principios de economía circular. En este contexto, se plantea la implementación de un sistema de cogeneración eficiente, capaz de producir simultáneamente vapor y electricidad, dentro del entorno industrial arrocero objeto de estudio.

El uso intensivo de combustibles fósiles para la generación eléctrica ya sea mediante energía adquirida de la red o para alimentar procesos internos dentro de la planta genera impactos ambientales adversos que agravan el riesgo climático a escala global. Esta realidad impone la necesidad de transitar hacia fuentes renovables de energía, entre las cuales la

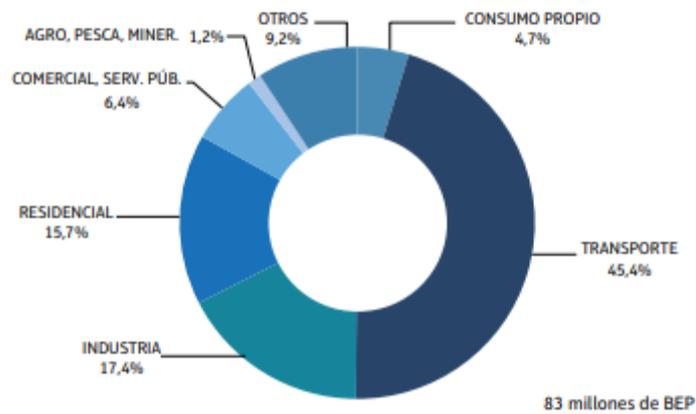
biomasa residual, como la cascarilla de arroz, destaca por su bajo impacto neto de emisiones de carbono. De hecho, si se gestiona adecuadamente, su huella puede ser nula o incluso negativa, convirtiéndola en una opción energética estratégica.

1.3 Justificación del problema

Esta investigación tiene como propósito aportar significativamente al desarrollo sostenible de una industria arrocera en Ecuador, demostrando que el uso de la cascarilla de arroz como biocombustible, a través de procesos de combustión controlada, permite reducir la dependencia de fuentes convencionales de energía primaria y avanzar hacia una producción más respetuosa con el entorno.

Este enfoque cobra especial relevancia considerando los datos proporcionados por organismos oficiales, los cuales evidencian que los combustibles fósiles han dominado la matriz energética nacional, representando en promedio el 81% del consumo total entre los años 2010 y 2020. Entre estos, el diésel y la gasolina han sido las fuentes más utilizadas, con incrementos del 11,7% y 13,7% respectivamente en dicho período. A su vez, el consumo de energía eléctrica experimentó un aumento del 55,1%, y el gas licuado de petróleo (GLP), principal insumo energético para la cocción de alimentos creció un 28,8%, cifras en las que también se incluye la demanda energética del sector arrocero nacional (Balance Energético, 2020, p. 27).

Ilustración 3. Demanda de energía por sector (%)



Fuente: (Balance Energético, 2020, p. 27)

Resulta fundamental que la sociedad en general incluyendo a los ciudadanos, el Estado y el sector empresarial comprenda las potencialidades energéticas que ofrece la biomasa, y en particular, el alcance que puede tener su aplicación en un sistema de cogeneración como el propuesto. Este conocimiento es clave para generar conciencia sobre los efectos negativos que genera la dependencia de los combustibles fósiles, especialmente en lo que respecta a la emisión de gases de efecto invernadero y su impacto ambiental.

El desarrollo de este análisis permitirá presentar estimaciones cuantificables en cuanto a la generación de energía útil y calor, así como el nivel de emisiones contaminantes evitadas. En el contexto actual, el planeta enfrenta una fuerte presión ambiental derivada del uso ineficiente de combustibles fósiles, lo que conlleva altos costes económicos para la industria y serias consecuencias ecológicas. Esta problemática suele estar asociada al desconocimiento técnico y a la falta de conciencia ambiental. En este escenario, la cascarilla de arroz se posiciona como una alternativa viable para optimizar el modelo energético tanto en el sector industrial como a nivel nacional, representando además una oportunidad rentable para los inversionistas interesados en tecnologías limpias.

1.4 Formulación de las variables de investigación

1.4.1 Variable Independiente

Uso de la cascarilla de arroz para uso como combustible, para implantar una cogeneración en una industria arrocera del cantón Daule, en el Ecuador.

1.4.2 Variable Dependiente

Combustible térmico de cual se puede obtener vapor, que puede reemplazar en parte a los combustibles fósiles y también reducir el consumo eléctrico interno a la planta.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Realizar un estudio de factibilidad técnica y económica mediante el análisis del uso de la cascarilla de arroz como combustible térmico, con el fin de implementar un sistema de cogeneración que permita simultáneamente la generación de electricidad y el secado del arroz.

1.5.2 Objetivos específicos

- Transformar la cascarilla del arroz en una combustión térmica, para el uso de esta como una fuente de energía primaria, en una industria arrocera.
- Estimar el costo de implementación de un sistema de Cogeneración, a partir de esta biomasa.
- Estudiar el potencial bioenergético técnico de la cascarilla del arroz, propuesto para un sistema de generación de electricidad por medio de un ciclo de Rankine convencional con recalentamiento.
- Analizar la posibilidad de generar algún excedente de energía que pueda ser inyectado y vendido a la red eléctrica nacional.
- Reducir las emisiones de CO₂ al medio ambiente mediante el aprovechamiento controlado y eficiente de la cascarilla de arroz, cuya quema o disposición final actualmente no

se realiza adecuadamente. Con esta propuesta, se busca alinear el proyecto con el Objetivo de Desarrollo Sostenible 13 (Acción por el clima).

1.6 Hipótesis

La cascarilla de arroz y el uso de esta como biomasa residual es un combustible térmico que puede generar una combustión uniforme para generar una cogeneración y así obtener diferentes tipos de energías.

1.7 Metodología de la Investigación

Es el proceso que describe con buenos detalles la forma en que se ha realizado la investigación. Esta nos permitirá explicar las propiedades de los métodos utilizados y la validez de los resultados, incluyendo la información pertinente para entender y demostrar la capacidad de replicación de los resultados de la investigación (Abreu, 2019, p. 5). El tipo de investigación que se utilizará para la ejecución de este trabajo es la descriptiva, explicativa y documental.

1.7.1 Investigación Descriptiva

La investigación descriptiva se adapta con facilidad a los enfoques cuantitativo y cualitativo, e incluso puede integrarse en un mismo estudio. Este tipo de investigación se orienta hacia la formulación de preguntas que permiten analizar, estructurar y observar datos relevantes en relación con el tema tratado. La estadística descriptiva, por su parte, se centra en responder a interrogantes como quién, qué, cuándo, dónde y cómo.

Este enfoque puede adoptar características tanto cuantitativas como cualitativas, permitiendo representar datos numéricos de forma sistemática. Por ejemplo, puede utilizarse para tabular resultados de pruebas, o para contabilizar la frecuencia con la que un individuo utiliza una función específica en un programa informático (Abreu, 2019, p. 6).

1.7.2 Investigación Explicativa

La investigación explicativa se orienta a dar respuesta a la pregunta ¿por qué ocurre un determinado fenómeno? Este tipo de estudio va más allá de los enfoques exploratorios y

descriptivos, ya que busca identificar las causas reales o fundamentales de un problema específico (Abreu, 2019, p. 8)

1.7.3 Investigación Documental

La investigación documental puede definirse como un conjunto de procedimientos metodológicos orientados a la localización, recopilación y análisis de información contenida en diversas fuentes documentales. En una primera etapa, implica la búsqueda sistemática de datos relevantes, y en una segunda, la elaboración estructurada y argumentada de un texto científico que exponga dicha información de manera coherente. Por tanto, este tipo de investigación no debe reducirse a la simple revisión de textos, sino que implica una labor analítica y crítica en torno a los documentos relacionados con el objeto de estudio (Tancara, 2023, p. 4).

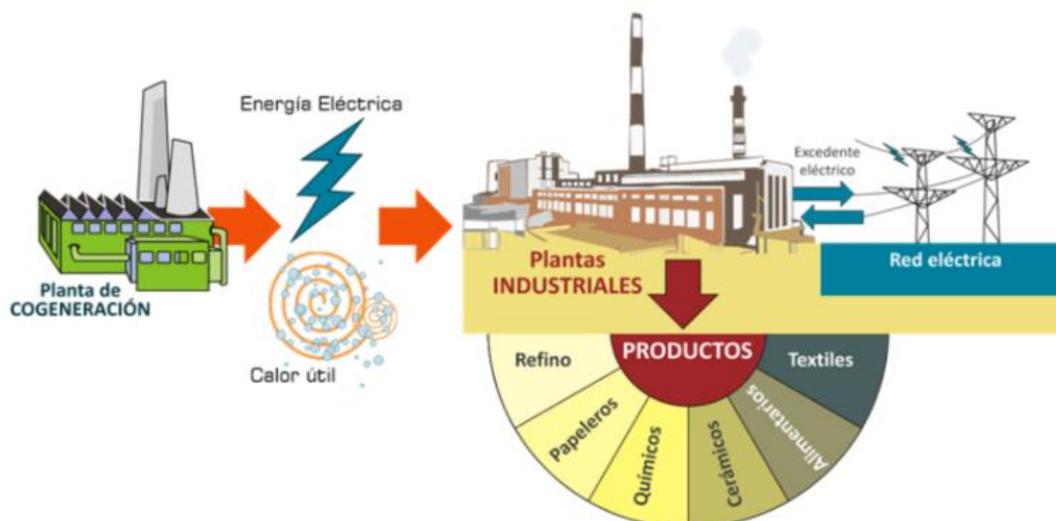
Capítulo 2: Fundamentación Teórica

2.1 Antecedentes

La Cogeneración

La cogeneración es una tecnología que permite producir electricidad y calor al mismo tiempo en el lugar donde se consume, como fábricas. Esto hace que sea más eficiente que generar ambos por separado, ahorrando hasta un 30% de energía y reduciendo emisiones de CO₂. Funciona con gas natural, pero también con biomasa, biogás y otros combustibles renovables, incluso hidrógeno. Además, puede operar todo el día, sin depender del sol o el viento, ofreciendo un suministro seguro y continuo. Es ideal para industrias que necesitan mucho calor y ayuda a lograr una energía más limpia y local (Asociación Española Cogeneración, 2025).

Ilustración 4. Proceso de la Cogeneración



Fuente: (Asociación Española Cogeneración, 2025)

Situación a nivel internacional

Thipwimon Chungsangunsit, Shabbir H. Gheewala, and Suthum Patumsawad. En su trabajo de investigación titulado: *Evaluación de las emisiones de la combustión de la cáscara*

de arroz para la producción de energía (Artículo de revista científica), llegaron a las siguientes conclusiones:

Las emisiones de dióxido de carbono generadas en una central eléctrica que utiliza cascarilla de arroz como combustible son, en gran medida, reabsorbidas por la biomasa dentro del ciclo natural del carbono, lo que minimiza su impacto neto. En consecuencia, el potencial de calentamiento global asociado a este proceso proviene principalmente del uso de combustibles fósiles empleados en el transporte de la biomasa y de la liberación de CO₂ no completamente oxidado durante la combustión. Se estima que tan solo el 1,38 % del carbono total ingresado en el sistema contribuye efectivamente al calentamiento global.

Las pérdidas energéticas del proceso se relacionan directamente con la eficiencia de conversión y con el rendimiento de los equipos utilizados. Un aspecto crítico es la pérdida de calor en el condensador, que representa alrededor del 61 % del total de energía ingresada. Para mejorar la eficiencia global y disminuir el desperdicio energético, se propone reutilizar ese calor residual en el secado previo de la cascarilla antes de su combustión.

Tanto la eficiencia de la caldera como la de la turbina se encuentran dentro de los rangos aceptables según estándares de referencia. Sin embargo, si se considera el sistema de forma integral incluyendo la generación eléctrica y el transporte del biocombustible, se observa que el transporte incide de forma notable tanto en el impacto ambiental como en los costes operativos. No obstante, si se limita el análisis únicamente a la generación de electricidad y se comparan las categorías de impacto con las de combustibles convencionales, la cascarilla de arroz se presenta como una alternativa energética ambientalmente favorable (Chungsangunsit et al., 2019, p. 6).

Obaidullah Mohiuddin, Abdullah Mohiuddin, Madina Obaidullah, Humayun Ahmed & Samuel Asumadu-Sarkodie. En su trabajo de investigación titulado: *Potencial de producción*

de electricidad y beneficios sociales de cáscara de arroz, un estudio de caso en Pakistán (Artículo de revista científica), llegaron a las siguientes conclusiones:

Pakistán ha enfrentado durante varios años una crisis energética persistente, originada principalmente por su dependencia casi total de los combustibles fósiles. La reducción progresiva de las reservas de estos recursos ha provocado un incremento en sus precios, lo que ha repercutido directamente en el aumento del costo de la electricidad. A pesar de este aumento, las tarifas eléctricas no han variado significativamente, lo que ha generado una acumulación de deuda circular y ha dejado al país con un déficit energético diario de entre 12 y 14 horas.

Dado que Pakistán es una nación con una economía agrícola predominante, produce y exporta grandes volúmenes de cultivos secundarios. Sin embargo, estos procesos generan una cantidad considerable de residuos agrícolas, que en su mayoría no se aprovechan. Estos residuos, entre ellos la cascarilla de arroz, representan una oportunidad clave para cubrir parte de la demanda energética nacional, al mismo tiempo que contribuyen a mitigar el cambio climático, debido a que su combustión puede considerarse neutra en carbono.

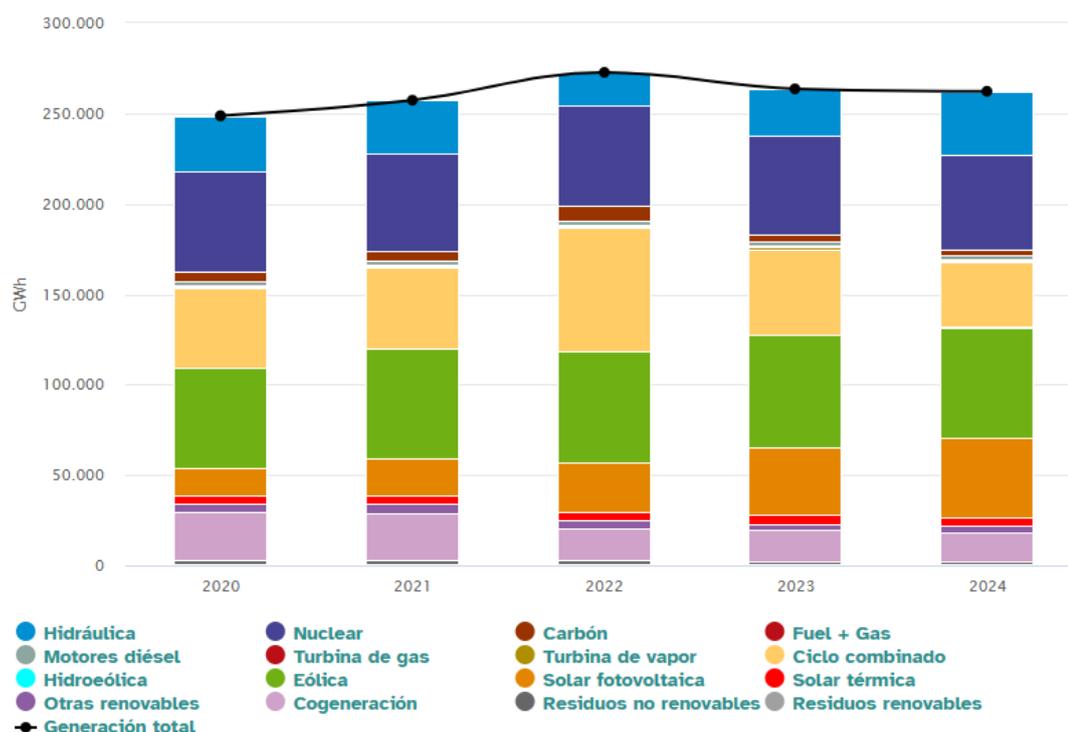
Los avances tecnológicos actuales permiten la conversión eficiente de estos residuos en energía térmica, promoviendo una reducción de la dependencia de fuentes fósiles y mejorando la seguridad energética del país. El estudio realizado por Mohiuddin et al. (2016) explora el potencial energético y el impacto social del aprovechamiento de la cascarilla de arroz en Pakistán. Sus estimaciones indican que, si se llegase a utilizar el 70% de estos residuos, se podrían generar anualmente alrededor de 1.328 GWh de electricidad, lo cual contribuiría significativamente al cierre de la brecha entre oferta y demanda energética (Mohiuddin et al., 2019, p. 13).

La cogeneración en España es una tecnología clave en el panorama energético nacional, especialmente en sectores industriales que requieren simultáneamente calor y electricidad. Esta tecnología permite generar energía eléctrica y térmica de manera eficiente a partir de una única

fuente de combustible, optimizando el uso de recursos y reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero (Asociación Española Cogeneración, 2025, p. 2).

Entre 2019 y 2023, la generación eléctrica por cogeneración en España experimentó una disminución significativa. En 2019 se alcanzaron 33.662 GWh, mientras que en 2022 la producción fue de 16.324 GWh. Para 2023, se redujo aún más a 14.500 GWh, lo que supuso una caída del 11% respecto al año anterior, reflejando una tendencia descendente en el uso de esta tecnología (Red Eléctrica de España, 2025, p. 1).

Ilustración 5. Evolución anual de la generación de energía eléctrica



Comportamiento del sistema eléctrico Nacional Español. Fuente: (Red Eléctrica de España, 2025, p. 3)

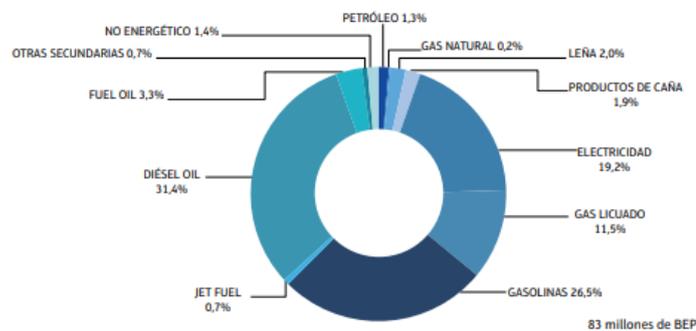
Situación a nivel nacional

En el estudio titulado *Caracterización energética de la cascarilla de arroz para su aplicación en la generación de energía termoeléctrica*, desarrollado por Echeverría y López como tesis de pregrado en la Escuela Politécnica Nacional (Guayas, Ecuador, 2010), se concluye que el país cuenta con amplias zonas arroceras, principalmente en la provincia del Guayas, lo cual garantiza una abundante disponibilidad de cascarilla de arroz, apta para ser

utilizada como biocombustible. El trabajo incluye un análisis técnico del residuo, evaluando parámetros como el contenido de humedad y el poder calorífico inferior (PCI) (Echeverría, 2020, p. 144).

Por otro lado, el Balance Energético Nacional (2020) señala que, históricamente, Ecuador ha sido un país altamente dependiente del petróleo, con una producción anual promedio de 190 millones de barriles de crudo, alcanzando un pico de 203 millones en 2014. Durante el mismo período, el consumo energético nacional se ha sustentado en combustibles fósiles, destacando el diésel con un 31,4% del total, seguido por las gasolinas (26,5%) y el fueloil o bunker (3,3%), lo que evidencia la necesidad de alternativas sostenibles en el sector energético (Balance Energético, 2020, p. 24).

Ilustración 6. Demanda de energía por fuente (%).



Fuente: (Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables, 2021, p. 6)

Durante el año 2019, las empresas en Ecuador generaron un total de 10.207,71 GWh/año, lo que representa una reducción del 23,31% en comparación con el año 2018. No obstante, esta cantidad fue 56,94% superior al volumen de energía eléctrica consumida desde la red pública, que alcanzó los 6.503,85 GWh/año. La mayor proporción de esta generación provino de grandes plantas termoeléctricas, las cuales contribuyeron con el 60,65% del total generado. Además, se registró un incremento del 1,83% en la participación termoeléctrica con respecto al año anterior (INEC, 2022, p. 19).

Ilustración 7. Distribución de la energía eléctrica generada, por tipo de energía (%).

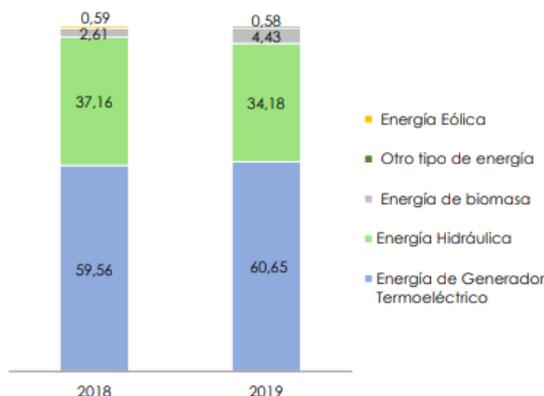


Ilustración 8: Fuente:(INEC, 2022, p. 19)

En el año 2022, Ecuador registró una generación eléctrica bruta total de 33.056 gigavatios hora (GWh), de los cuales aproximadamente el 76% provino de fuentes renovables, principalmente hidroeléctricas. Para el año 2023, la generación bruta aumentó a 35.362,03 GWh, lo que representa un incremento del 11,25% respecto al año anterior (ARCERNNR, 2023, p. 16).

Tabla 3. Balance nacional de energía eléctrica

Energía Eléctrica	Potencia Instalada en Generación				Producción e Importaciones				Entregada a Servicio Público	
	Potencia Nominal		Potencia Efectiva		Total		Solo SNI		Público	
	MW	%	MW	%	GWh	%	GWh	%	GWh	%
Nacional (Renovable + No Renovable)	8.899,58	100,00%	8.254,45	100,00%	36.682,97	100,00%	32.529,53	100,00%	30.498,10	100,00%
Renovable	5.445,10	61,18%	5.395,21	65,36%	25.954,22	70,75%	25.936,01	79,73%	24.172,83	79,26%
Hidráulica	5.192,30	58,34%	5.152,31	62,42%	25.348,71	69,10%	25.338,84	77,89%	23.744,07	77,85%
Eólica	71,13	0,80%	71,13	0,86%	208,58	0,57%	205,99	0,63%	206,33	0,68%
Fotovoltaica	29,06	0,33%	28,17	0,34%	40,57	0,11%	34,83	0,11%	39,27	0,13%
Biomasa	144,30	1,62%	136,40	1,65%	318,02	0,87%	318,02	0,98%	145,36	0,48%
Biogás	8,32	0,09%	7,20	0,09%	38,33	0,10%	38,33	0,12%	37,80	0,12%
No Renovable	3.454,47	38,82%	2.859,24	34,64%	9.407,81	25,65%	5.272,58	16,21%	5.004,33	16,41%
MCI	2.048,00	23,01%	1.636,39	19,82%	6.301,47	17,18%	2.470,00	7,59%	2.302,04	7,55%
Turbogás	944,85	10,62%	791,35	9,59%	1.533,74	4,18%	1.246,10	3,83%	1.244,51	4,08%
Turbovapor	461,63	5,19%	431,50	5,23%	1.572,60	4,29%	1.556,48	4,78%	1.457,78	4,78%
Importación	650,00	100,00%	635,00	100,00%	1.320,94	3,60%	1.320,94	4,06%	1.320,94	4,33%
Colombia	540,00	83,08%	525,00	82,68%	1.296,58	3,53%	1.296,58	3,99%	1.296,58	4,25%
Perú	110,00	16,92%	110,00	17,32%	24,37	0,07%	24,37	0,07%	24,37	0,08%

Fuente (ARCERNNR, 2023, p. 20)

En Ecuador, la implementación de sistemas de cogeneración ha sido aún reducida y limitada. Son contadas las empresas de los sectores alimentario, agroindustrial y forestal que aplican esta tecnología en sus procesos productivos. El único sector que ha logrado un

desarrollo más significativo en cogeneración es el azucarero, donde, hasta julio de 2017, se reportaba una capacidad instalada total de aproximadamente 140 MW, utilizando como biocombustible principal el bagazo de caña (Samaniego & Espinoza, 2017, p. 10).

Adicionalmente, existen casos particulares en otras industrias, como la empresa Procesadora Nacional de Alimentos (PRONACA), que aprovecha la cascarilla de arroz para generar vapor, el cual es empleado posteriormente en la elaboración de productos de otras líneas de producción (Comentario propio).

Ilustración 9. Resumen de la capacidad de cogeneración instalada en el Ecuador

TIPO DE INDUSTRIA/PROCESO	UBICACIÓN	TECNOLOGÍA / PROCESO	POTENCIA (MW)	GENERACIÓN (GWh/AÑO)
Industria Azucarera	Guayas, Cañar	Ciclo Rankine	136,6	408,3
Industria Alimentos	Manabí	Motor Diésel	1	N/D
Industria Palma Aceitera	Esmeraldas y Sucumbíos	Ciclo Rankine con 1,0 y 1,2 MW	2,2	N/D
Industria Maderera	Pichincha	Ciclo Rankine	1	N/D
Generación termoeléctrica (CELEC-Termogas Machala)	El Oro	Ciclo Combinado (en montaje)	319*	1200
Refinería Esmeraldas	Esmeraldas	Ciclo Rankine	30,75	N/D
Producción de etanol	Cañar	Ciclo Rankine	0,3	-
	TOTAL		490,85**	

N/D – Dato no disponible.

* En fase de implementación

** Incluye Termogas Machala, en fase de implementación

Fuente:(Samaniego & Espinoza, 2017, p. 11)

Actualmente, el arroz se posiciona como uno de los alimentos de mayor consumo en Ecuador. Dentro del ámbito agrícola, este cultivo representa aproximadamente el 15% del total de la producción nacional, constituyéndose en uno de los principales rubros del sector. Cabe destacar que la provincia del Guayas concentra alrededor del 86% de las empresas dedicadas a la producción arrocera, lo que la convierte en la región con mayor participación en esta actividad agrícola (Herrera, 2022, p. 2).

Ilustración 10 Participación (%) #Empresas dedicadas a la Molienda o pilado de arroz por provincia 2019.



Fuente: (INEC, 2020, p. 5)

Ecuador cuenta con un alto potencial para la generación de energía a partir de biomasa, gracias a la relevancia de los sectores agrícola, forestal y pecuario. Los residuos generados por estas actividades representan una fuente viable para la producción energética, aunque su aprovechamiento eficiente dependerá de factores como la disponibilidad de información sobre su localización, volumen disponible y la tecnología seleccionada para su transformación (INEC, 2022).

En este contexto, el país dispone de un Atlas Bioenergético, que recopila datos sobre el potencial energético de los residuos agrícolas, forestales y pecuarios. Sin embargo, este documento fue elaborado a partir del Censo Agropecuario del año 2000 y actualizado por última vez en 2014, lo que limita su vigencia. A pesar de ello, sigue siendo una referencia útil para estudios energéticos, ya que identifica las zonas con mayor capacidad bioenergética mediante el uso de sistemas de información georreferenciada (GIS) (Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables, 2021).

En relación con el cantón Daule, área de enfoque del presente estudio, se destaca por estar ampliamente cubierto por cultivos de arroz, que ocupan alrededor del 70% de su superficie total. Según datos del GAD Daule (2016), la producción anual asciende a 137.794 toneladas métricas, con una productividad promedio de 4,64 t/ha (Herrera, 2022, p. 2).

2.2 Emplazamiento

La propuesta planteada se desarrollará en la zona 5 de planificación nacional, específicamente en el cantón Daule, reconocido no solo por ser el mayor productor de arroz a

nivel nacional, sino también por su ubicación estratégica en el corazón del sector arrocero de la provincia del Guayas, y su proximidad a la ciudad de Guayaquil, principal mercado del país, situada a menos de una hora de distancia.

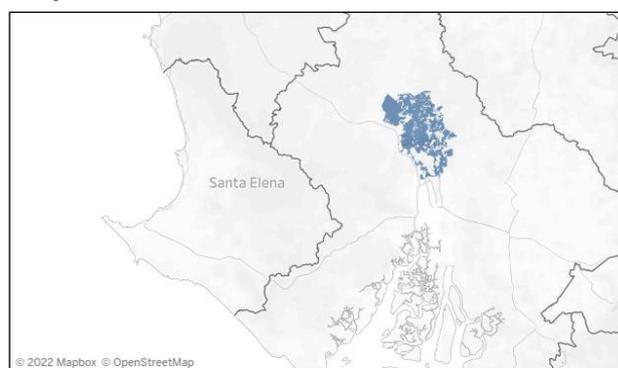
Ilustración 11. Mapa cantonal de cultivo de Arroz.



Fuente: Geo portal del Agro Ecuatoriano.

Dentro de los 23 cantones dedicados al cultivo de arroz en la provincia del Guayas, Daule destaca como el principal en extensión cultivada y volumen de producción, con un promedio anual de 25.000 a 50.000 hectáreas sembradas. Esta zona se caracteriza por realizar hasta dos cosechas y media por año, logrando una productividad promedio de 60 quintales por hectárea. Estos datos son relevantes, ya que la planta objeto de estudio se encuentra ubicada dentro de esta área productiva, lo que respalda su representatividad en el análisis realizado.

Ilustración 12. Mapa de cobertura por cultivo.



Fuente: Geo portal del Agro Ecuatoriano.

El presente proyecto se desarrollará en una de las plantas arroceras más representativas del cantón Daule, denominada “Agrícola Gloria Matilde”, de propiedad del señor Raúl Villegas, la cual está situada en el kilómetro 43 de la vía Daule – Santa Lucía.

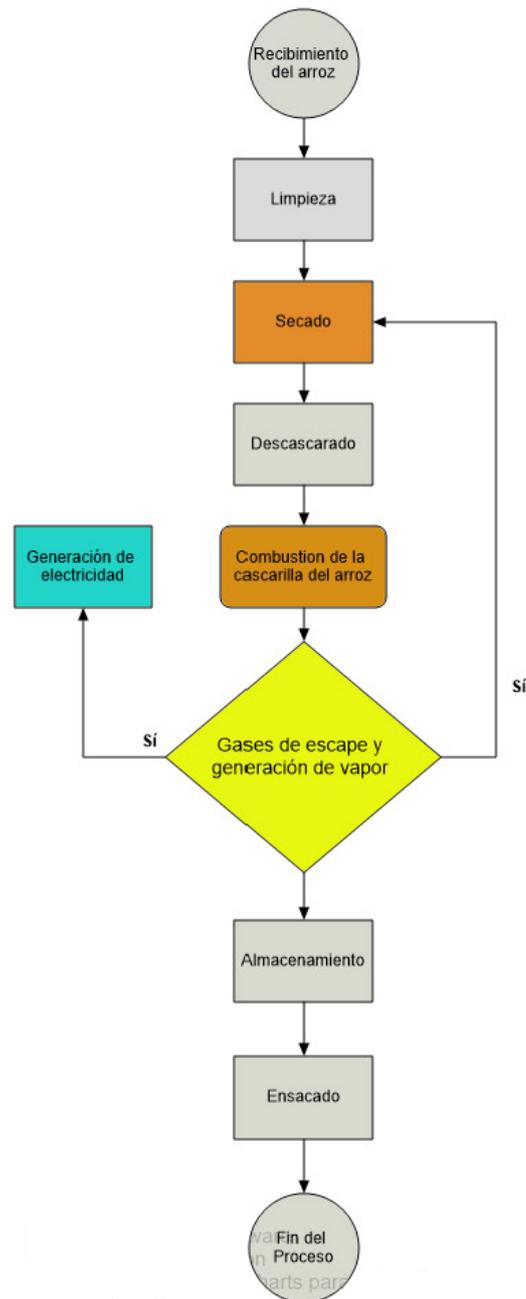
Ilustración 13. Fotografía satelital de la Piladora de Arroz Gloria Matilde.



Fuente: Google Earth Pro

La Ilustración 14 presenta el diagrama de proceso correspondiente al sistema con cogeneración, en el cual los gases generados durante la combustión son reutilizados mediante intercambiadores de calor para elevar la temperatura del arroz húmedo hasta alcanzar las condiciones óptimas de secado. Simultáneamente, en la caldera se genera vapor que acciona una turbina, la cual a su vez impulsa un generador eléctrico, permitiendo así la producción de energía eléctrica.

Ilustración 14. Diagrama de proceso de la cogeneración propuesta



Fuente: Elaboración propia

2.3 Datos Obtenidos de la Planta

La tabla que se presenta a continuación recopila una serie de datos proporcionados por el personal de la planta, los cuales serán utilizados como base para el análisis técnico desarrollado en este estudio.

Tabla 4. Datos del proceso de arroz en la industria arrocera Gloria Matilde.

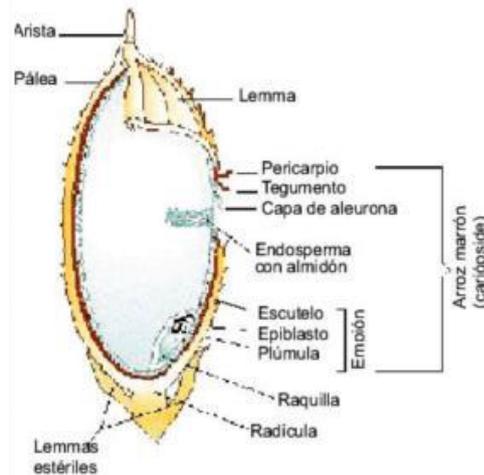
Datos de partida del proceso de la planta		
Cantidad total de Arroz que llega a la planta	44.000 T/año	
Impurezas	3%	
Humedad de entrada	25%	
Humedad de salida después del secado	12%	
Cantidad de agua que se extrae en el secado	7.000 T (H ₂ O) /año	19,20 T (H ₂ O) /día
Producción Total de Arroz seco con Cascarilla	35.000 T/año	95 T/día
Porcentaje de cascarilla resultante del proceso	21.5%	
Cantidad de cascarilla generada al año	7.500 T/año	
Hectáreas de la planta	3 hectáreas	
Hectáreas de sembríos propios	8 hectáreas	
Consumo eléctrico promedia anual	150 MWh	

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de la planta.

2.4 Proceso industrial del arroz

El proceso de pilado del arroz consiste en remover las glumas del grano previamente cosechado y secado, comúnmente conocidas como cascarilla o tamo de arroz. Durante este procedimiento, el embrión del grano se transforma en polvillo, permitiendo así la obtención del arroz blanco limpio y libre de impurezas.

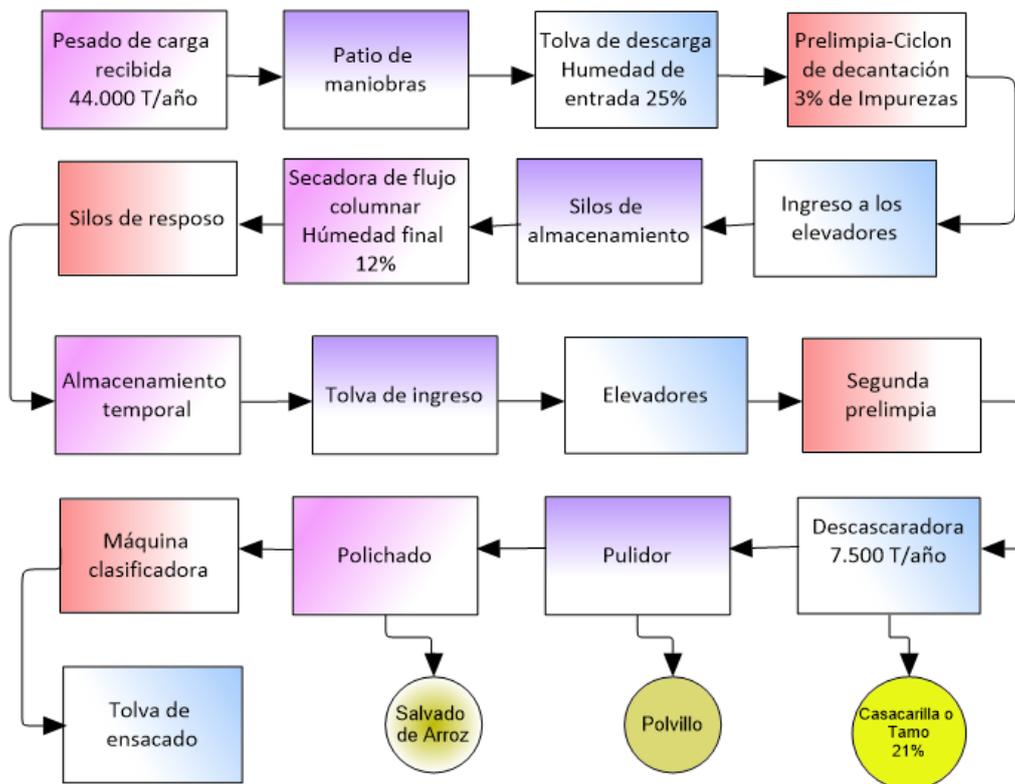
Ilustración 15. Estructura de un grano de arroz.



Fuente: (Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura, 2022)

A continuación, se presenta un diagrama de bloques que resume de manera esquemática el flujo del proceso productivo del arroz llevado a cabo en la empresa Gloria Matilde S.A.

Ilustración 16. Diagrama de bloques del proceso productivo del arroz en la industria Gloria Matilde.



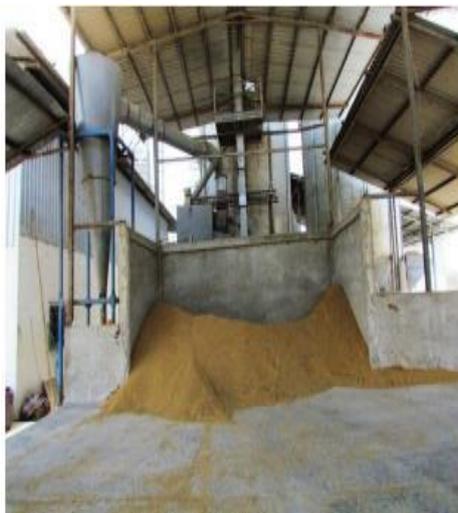
Fuente: Industria Gloria Matilde S.A

El procesamiento del arroz implica una serie de etapas destinadas a obtener el grano limpio y apto para el consumo humano, dentro de las cuales se realiza una limpieza integral del producto. Como resultado de esta fase se genera la cascarilla del arroz, residuo que será

empleado como materia prima principal en el presente proyecto. A continuación, se describe de forma general y sintética el proceso operativo desarrollado por la industria Gloria Matilde S.A.:

1. En primer lugar, el arroz es transportado desde las zonas de cultivo hacia la piladora, una vez que ha alcanzado su madurez fisiológica. Este traslado se realiza en vehículos de carga, los cuales son pesados en la balanza instalada para dicho fin. La materia prima puede provenir de producción propia o ser adquirida a agricultores de los alrededores.
2. Una vez recibida la carga, el arroz es descargado en el área de recepción y distribuido para su posterior incorporación al proceso de transformación industrial.

Ilustración 17. Recepción del grano de arroz.



Fuente: Industria Gloria Matilde S.A

3. A continuación, el arroz es conducido hacia una tolva, donde inicia su proceso de transformación. Desde el suelo es elevado mediante un sistema de cangilones, que lo transporta hasta una etapa de pre-limpieza, la cual se lleva a cabo a través de una zaranda doble equipada con un sistema de aspiración de polvo, permitiendo así la eliminación de impurezas iniciales.

Ilustración 18. Zaranda doble de limpieza con aspirador de polvo



Fuente: Industria Gloria Matilde S.A

4. Posteriormente, la materia prima es transportada nuevamente mediante elevadores de cangilones hacia un ciclón, donde comienza el proceso de pre-limpieza, destinado a separar partículas no deseadas mediante un sistema de separación por aire.

Ilustración 19. Decantador de polvo.



Fuente: Industria Gloria Matilde S. A

5. Seguidamente, el arroz es trasladado por medio de elevadores de cangilones a los silos de almacenamiento transitorio, también denominados silos de reposo, en los cuales permanece entre 12 y 24 horas con el fin de estabilizar sus condiciones antes de proseguir con el tratamiento industrial.

6. Más adelante, el grano es dirigido a través de otro conjunto de elevadores hacia una unidad de secado de tipo columnar y flujo continuo, donde se disminuye su contenido de humedad, preparándolo adecuadamente para las fases posteriores del proceso.

Ilustración 20. Secadora columnaria de flujo continuo.



Fuente: Industria Gloria Matilde S. A

7. Las secadoras de tipo columnar y flujo continuo operan utilizando un sistema de horno alimentado con cascarilla de arroz como combustible, y cuentan con una capacidad de procesamiento de hasta 25 toneladas.

Ilustración 21. Secadoras Columnarias (Horno de secado)

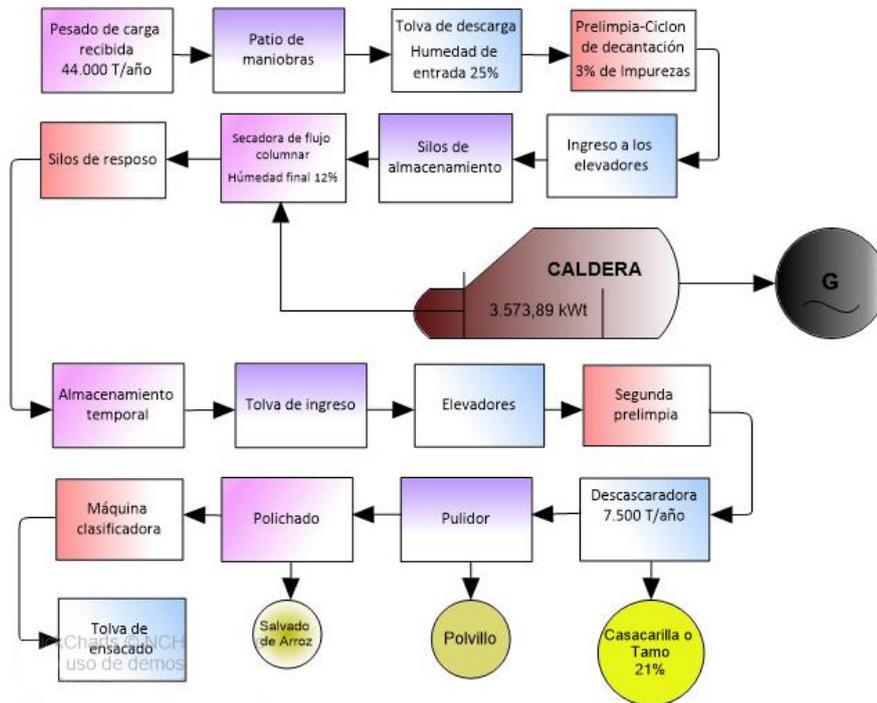


Fuente: Industria Gloria Matilde S. A

Es en esta etapa del proceso donde se plantea la incorporación del sistema de cogeneración, aprovechando que la combustión de la cascarilla de arroz no solo se empleará

para el secado, sino también para la generación de energía eléctrica. A partir de esta propuesta, el diagrama de bloques se modifica para reflejar dicha integración.

Ilustración 22. Diagrama de bloque del proceso de producción de la planta, con la cogeneración propuesta.



Fuente: Elaboración propia con datos de la industria Gloria Matilde S.A.

8. El arroz permanece en las secadoras de tipo columnar por un período aproximado de 2 a 3 horas, dependiendo de su contenido inicial de humedad y de la cantidad de agua que deba ser eliminada durante esta etapa.
9. Una vez finalizado el proceso de secado, el arroz es transportado nuevamente mediante elevadores de cangilones hacia los silos de reposo, donde es almacenado temporalmente antes de ser sometido a las fases posteriores del procesamiento, que se describen a continuación.

Ilustración 23. Silos de reposo.



Fuente: Industria Gloria Matilde S.A

10. A continuación, el arroz es trasladado mediante una banda transportadora hasta el área destinada para el almacenamiento temporal.

11. Luego, la materia prima es introducida en la tolva de entrada del proceso, alcanzando en esta etapa una temperatura promedio cercana a los 12 °C.

Ilustración 24. Tolva de ingreso.



Fuente: Industria Gloria Matilde S. A

12. El arroz ingresa al sistema de pilado a través de elevadores hacia una segunda Pre-limpia.

Ilustración 25. Pre-limpia



Fuente: Industria Gloria Matilde S.A

13. Después la materia prima ingresa a la descascaradora, donde será separada la cascarilla.

Ilustración 26. Descascaradora.



Fuente: Industria Gloria Matilde S. A

14. Luego se coloca el arroz en una mesa separadora que separa el grano descascarado del grano de arroz que aún ha quedado con cáscara y a su vez el grano con cáscara es devuelto nuevamente al proceso de descascarado.

Ilustración 27. Máquina descascaradora de arroz



Fuente: Industria Gloria Matilde S.A

15. Luego del proceso del descascarado el grano ingresa a la pulidora, donde se produce el blanqueamiento o pulido.

Ilustración 28. Pulidor del grano.



Fuente: Industria Gloria Matilde S. A

16. Posteriormente el arroz ingresa a la maquina clasificadora compuesta por varios cilindros clasificadores, para separar por calidad de arroz y los diferentes tipos.

Ilustración 29. Máquina clasificadora de granos.



Fuente: Industria Gloria Matilde S.A

17. Luego que el arroz es clasificado ingresa a la selectora de colores, para su selección por calidad.
18. El arroz ingresa a la tolva de ensacado, para su empacado final.

Ilustración 30. Tolva de ensacado.



Fuente: Industria Gloria Matilde S.A

Y por último el arroz ensacado, es colocado en el área de estibado o almacenamiento temporal para su posterior distribución.

Ilustración 31. Área de almacenamiento temporal.



Fuente: Industria Gloria Matilde S.A.

2.5 Fundamentos de la cogeneración

Este capítulo se inicia con una breve introducción al concepto de cogeneración, entendida como la producción simultánea de energía eléctrica y/o mecánica junto con energía térmica útil, a partir de una única fuente de energía primaria. Actualmente, la cogeneración se considera una de las opciones más eficaces en términos de eficiencia energética para la industria, alineándose con las políticas actuales de globalización económica y promoviendo un modelo de desarrollo sostenible y economía circular (Cisneros, 2023, p. 9).

El uso de la cogeneración se remonta a principios del siglo XX en Estados Unidos y Europa, lo que ha permitido su maduración tecnológica hasta llegar a los sistemas de alta eficiencia que se aplican en la actualidad. Las tecnologías de cogeneración más comunes en la industria moderna incluyen motores de combustión interna, turbinas de gas y turbinas de vapor. No obstante, gracias a los avances tecnológicos recientes, también se han desarrollado sistemas basados en microturbinas de gas y celdas de combustible. La elección de la tecnología más adecuada dependerá de las necesidades específicas de energía eléctrica y térmica del proceso industrial. En instalaciones con demandas eléctricas bajas, se opta generalmente por motores de combustión interna, o, si el presupuesto lo permite, por microturbinas o celdas de combustible. En cambio, para procesos con altas exigencias de potencia eléctrica, se emplean

con mayor frecuencia ciclos combinados mediante turbinas de gas o vapor (Henaó et al., 2018, p. 127).

2.6 Biomasa y sistemas de cogeneración en industrias arroceras.

La cascarilla de arroz es un residuo agrícola ampliamente disponible, especialmente en países del sudeste asiático como Indonesia, China y Tailandia, reconocidos como principales productores mundiales de arroz. En estas regiones, se utiliza comúnmente como fuente de energía eléctrica a través de procesos de gasificación, alcanzando una producción estimada de 800 kWh por cada tonelada de cascarilla. Este tipo de plantas gasificadoras suelen ubicarse en zonas rurales, próximas a los molinos de arroz, optimizando así la logística de suministro del residuo (Pode, 2020).

Además del aprovechamiento energético, la ceniza resultante de la incineración de la cascarilla también tiene valor añadido, siendo empleada en sectores como la industria de la construcción, la energía solar, el sector automotriz y el desarrollo de nuevos materiales (Prasara-A & Gheewala, 2017). Por otro lado, en diversas comunidades agrícolas de África occidental, se utiliza la cascarilla como alternativa a la leña en estufas a gas, lo cual contribuye a reducir el uso de recursos forestales (Kwofie et al., 2016).

En el caso específico de Ghana, se llevó a cabo un estudio de prefactibilidad sobre la implementación de un sistema de cogeneración mediante ciclo orgánico de Rankine (ORC), con una capacidad estimada de 1.000 kWh utilizando cascarilla de arroz como biocombustible. Sin embargo, el proyecto fue considerado inviable debido a los altos costos de inversión inicial y a la falta de incentivos gubernamentales adecuados (Arranz-Piera et al., 2018).

Tabla 5. Producción de arroz para los años 2015, 2016 y 2017

CULTIVOS PERMANENTES	Año	SUPERFICIE (Has.)		PRODUCCIÓN (Tm.)	VENTAS Sin Cáscara (Tm.)
		Plantada	Cosechada		
ARROZ (EN CÁSCARA)	2017	370.406	358.100	1'066.614	1'017.087
	2016	385.039	366.194	1'534.537	1'432.318
	2015	399.535	375.117	1'652.793	1'534.476

Fuente: (INEC, 2021)

2.7.2 Potencial Bioenergético Sustentable.

La cuota de residuos de la biomasa es la porción de desechos que se obtienen por cualquier tipo de actividad que realicen los seres humanos, como en granjas de animales, o como en su vida cotidiana de sus hogares (aguas residuales, RSU, etc.) por lo que, para el estudio del uso de la biomasa como fuente de energía, se considera básicamente utilizar solo los subproductos (residuos) provenientes de la agricultura relacionadas para este caso de estudio. Durante la cosecha de los sembríos de arroz, se obtienen residuos de campo (hojas y tallos de las plantas), los cuales deben quedar en el suelo por ser elementos indispensables para precautelar el equilibrio ecológico y favorecer la biodiversidad del terreno. Esto teniendo en cuenta que el suelo necesita de la presencia de materia orgánica, para que pueda ser fértil y así evitar la degradación de este, por lo que no se debe aprovechar de forma total los residuos generados. (Lucas Herguedas, 2022, pp. 105-108). Para la elaboración de este trabajo no se considera utilizar los residuos que quedan en los campos después de la cosecha, solo se utilizará los residuos generados en la industria piladora (cascarilla de arroz), que se obtiene durante la producción del arroz.

2.7.3 Estacionalidad.

El ciclo de vida de los cultivos está influenciado por diversos factores, tales como el ciclo biológico del cultivo, las condiciones geográficas y el clima de la región (*Instituto Nacional de Preinversión - 2019 - Atlas Bioenergético del Ecuador.pdf*, s. f.). A partir de esta información es posible identificar el tipo de cultivo predominante en una determinada zona y establecer en

qué meses se dispone de biomasa. Esta biomasa puede originarse tanto de los residuos generados durante la cosecha, como de los desechos resultantes de los procesos agroindustriales posteriores.

Tabla 6. Meses de cosechas de algunos cultivos en el Ecuador.

Cultivo	Mes											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
Arroz												
Banano												
Cacao												
Café												
Caña de azúcar												
Maíz												
Palma												
Plátano												

Fuente: Elaboración propia con datos del (Instituto Nacional de Preinversión, 2019)

Para efecto de estudio y para futuras investigaciones en la tabla 6 se resume los periodos de cosechas a lo largo de todo el año y algunos cultivos de interés. Este dato se lo menciona ya que es de vital importancia, ya que dependiendo de las necesidades de un proyecto se debe tener claro el cultivo elegido y los meses que funcionará la planta de generación; así se podrá cuantificar si es necesario mantener un stock de almacenamiento. En este caso se está trabajando con la cascarilla del arroz, la cual es un subproducto del proceso agroindustrial en la planta Gloria Matilde S.A y en sus instalaciones dispone de un área exclusiva para el almacenamiento de estos residuos el cual fue descrito en párrafos anteriores.

2.7.4 Potencial Bioenergético Técnico.

En el mundo existen varias tecnologías probadas que, a través de diferentes procedimientos, permite convertir la biomasa en energía. Al tratar del potencial bioenergético técnico uno de los aspectos primordiales que se debe considerar es que este es una pequeña fracción del potencial bioenergético teórico y sustentable. En términos generales se podría indicar que la fracción en mención se obtiene del producto del potencial sustentable por la eficiencia de la conversión energética con una tecnología específica. Por lo tanto, el valor del potencial técnico dependerá de la tecnología que se emplee, la capacidad que posee la planta,

el tipo y la cantidad de biomasa que se disponga para el proceso (*International Finance Corporation - 2017 - Converting Biomass to Energy.pdf*, s. f., pp. xiii-xiv).

Para el caso de este estudio se analizará inicialmente tres tipos de tecnologías ya probadas, y que existen para la producción de electricidad a partir de biomasa, considerando las características que tiene el Ecuador:

- Generación de electricidad con turbina a vapor de agua, usando calderas de agua/vapor (Ciclo Rankine).
- Generación de electricidad con turbina a vapor de un fluido orgánico usando tecnología ORC (Ciclo Rankine Orgánico).
- Generación de electricidad con aprovechamiento de biogás.

Tabla 7. Descripción general de las cantidades de biomasa necesarias en tamaño de plantas.

Tecnología/rango	1-5 MWe	5-10 MWe	10-40 MWe
Generación de electricidad con turbina a vapor de agua, usando calderas de agua/vapor.	20-100 toneladas/día.	100-200 toneladas/día.	200-900 toneladas/día.
Generación de electricidad con turbina a vapor de un fluido orgánico usando tecnología ORC.	50-200 toneladas/día.	200-500 toneladas/día.	No Aplica.
Generación de electricidad con el aprovechamiento del biogás.	40-200 toneladas/día.	No Aplica.	No Aplica.

Fuente: (*International Finance Corporation - 2017 - Converting Biomass to Energy.pdf*, s. f., p. xiv)

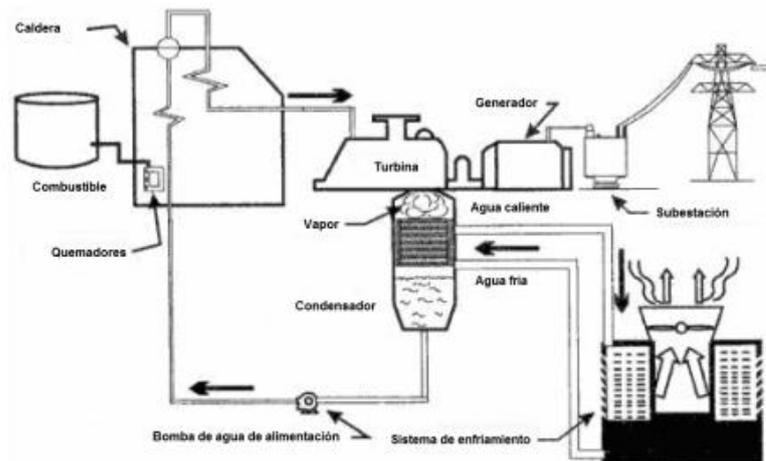
2.7.4.1 Generación de Electricidad con Turbina a Vapor y Calderas de Agua/Vapor.

Las centrales termoeléctricas que operan mediante combustión con calderas de vapor tienen como objetivo convertir la energía química de los combustibles en energía eléctrica. Esta energía química, presente en distintas sustancias sin importar su estado físico, se libera en

forma de calor durante la combustión que se realiza dentro de la caldera. El calor producido se transfiere a un fluido de trabajo en este caso, agua lo que provoca un aumento considerable en su temperatura y presión hasta transformarse en vapor. Este vapor se expande en una turbina, generando energía mecánica que posteriormente se convierte en energía eléctrica mediante un generador, como se puede visualizar en la ilustración 33.

En las plantas que emplean el ciclo termodinámico Rankine convencional, el agua se utiliza como fluido de trabajo y, generalmente, permite una potencia de salida entre 1 y 40 megavatios eléctricos (MWe), tal como lo muestra la Tabla 4. No obstante, hoy en día existen aplicaciones que superan los 40 MWe, alcanzando temperaturas de operación de entre 500 y 600 °C (*International Finance Corporation - 2017 - Converting Biomass to Energy.pdf*, s. f., p. 46).

Ilustración 33. Ciclo de Rankine convencional, en una central térmica.



Fuente:(Muñoz, 2018, p. 61)

En este tipo de centrales la caldera, o también conocida como generador de vapor, cuyo elemento es donde se inicia la primera parte del proceso y que, por la conversión energética del combustible, donde del producto de la combustión de este, se transfiere al agua toda la energía térmica para convertirla en vapor, el cual circula por la caldera, con el objetivo de alcanzar una correcta entalpía del vapor y así sea plenamente aprovechada por la turbina de sistema.

En conclusión, se entenderá que las calderas de vapor convencionales son aquellas que se emplean esencialmente en la generación de electricidad, claro ejemplo de las centrales termoeléctricas convencionales. (Muñoz, 2018, p. 61).

2.7.4.2 Generación de Electricidad con Turbina a Vapor de un Fluido Orgánico Usando Tecnología ORC.

Comenzamos este párrafo señalando que el Ciclo Rankine Orgánico (ORC) es una variante del Ciclo Rankine Convencional (CRC), ampliamente utilizado en plantas térmicas tradicionales, donde se transforma en energía eléctrica el calor generado a partir de combustibles artificiales (en estado sólido, líquido o gaseoso) como la biomasa o el gas, así como de fuentes naturales como la geotermia. Actualmente, la tecnología ORC tiene una capacidad operativa en el mercado que oscila entre los 10 [kWe] y los 10 [MWe], y puede funcionar con temperaturas comprendidas entre 80 y 300 °C (Landelle et al., 2017).

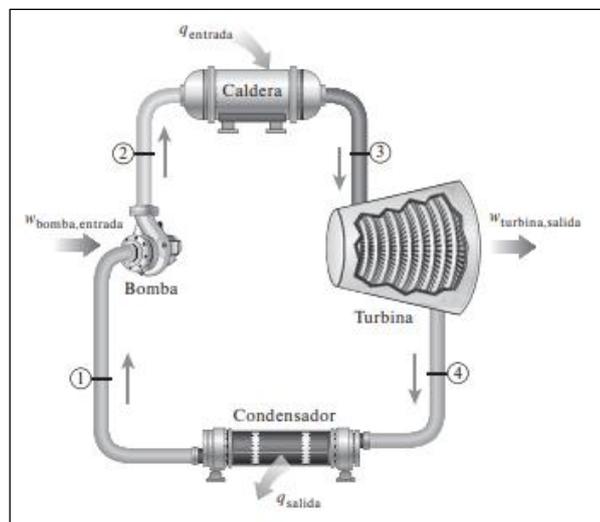
El ciclo ORC se asemeja al ciclo Rankine de vapor, ya que se basa en la vaporización de un fluido orgánico a alta presión, que luego se expande hasta una presión más baja para generar trabajo mecánico. Posteriormente, el vapor se condensa a baja presión y se vuelve a comprimir a alta presión. Por ello, un sistema ORC incluye componentes similares a los de una planta de vapor tradicional, como un intercambiador de calor, generador de vapor, condensador, bomba y un generador eléctrico con su respectiva turbina, como se muestra en la Ilustración 28. En este caso, el fluido utilizado es una sustancia orgánica de elevado peso molecular, como hidrocarburos o solventes, que tienen un punto de ebullición inferior al del agua. Esta característica permite generar electricidad aprovechando fuentes de calor de baja temperatura (Quoilin et al., 2018, p. 169).

2.7.4.3 Ciclo Termodinámico de Rankine.

El ciclo termodinámico de Rankine se compone de cuatro etapas fundamentales, como se muestra en la Ilustración 29. El proceso inicia con la entrada del fluido de trabajo a la bomba

en estado líquido saturado (punto 1 a 2), donde es presurizado hasta alcanzar la presión de operación del generador de vapor. Una vez dentro del generador, el fluido comprimido recibe calor procedente de una fuente caliente (producto de la combustión en la cámara del generador de vapor), transformándose en vapor sobrecalentado (punto 2 a 3). Este vapor entra luego a la turbina, donde se expande y genera trabajo mecánico (punto 3 a 4), lo cual provoca una reducción en su temperatura y presión. Finalmente, el vapor llega al condensador, donde se enfría a presión constante hasta convertirse nuevamente en líquido saturado (punto 4 a 1), listo para ser bombeado y reiniciar el ciclo (Cengel et al. - 2019 - Termodinámica.pdf, s. f., pp. 545-546).

Ilustración 34. Ciclo Rankine ideal simple.



Fuente:(Cengel et al., 2019, p. 545)

2.7.4.4 Generación de Electricidad con el Uso de Biogás.

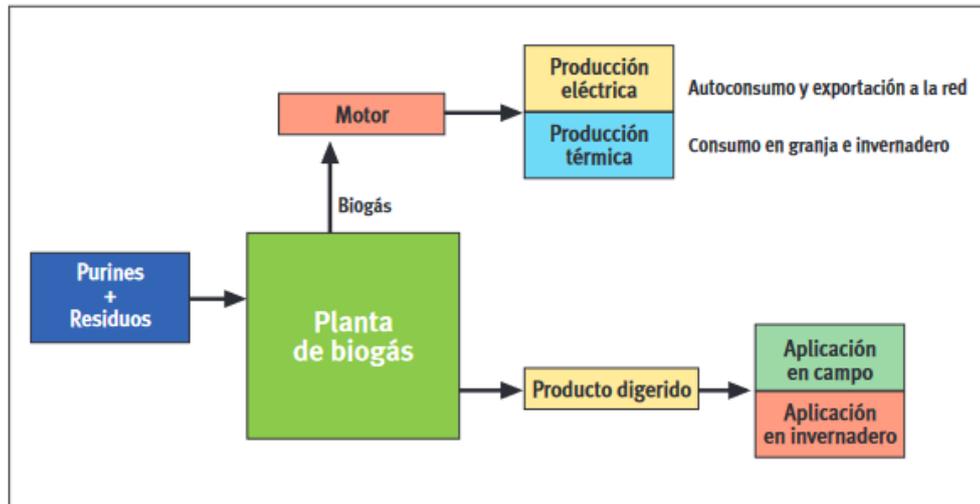
Por lo general el funcionamiento de una planta de biogás, radica en un proceso de reacciones químicas de la materia orgánica, por medio de descomposición anaeróbica, donde intervienen grupos de bacterias que convierten las materias sólidas (las cuales contienen sustratos volátiles), es decir que al juntar la materia orgánica con agua y otros agentes, estas la transforman a un producto en estado gaseoso o biogás.

Como resultado de los compuestos orgánicos y de la digestión anaerobia, se obtiene un producto gaseoso (biogás), del cual su composición dependerá del sustrato y del modelo de

tecnología empleada. Las características promedio por la que está conformado el biogás es: de un 50-70% de metano (CH₄), de un 30-40% de anhídrido carbónico (CO₂) y de un más menos 5% de hidrogeno (H₂), ácido sulfhídrico (H₂S) y otros gases (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2017, p. 7).

En la producción de electricidad, con este tipo de tecnología se pueden usar distintos tipos de materias orgánicas entre las que se pueden mencionar: Residuos forestales, animales, humanos y agroindustriales. La planta de biogás debe aportar de unas adecuadas condiciones para que el proceso pueda darse, es decir que las condiciones anaerobias y de unas temperaturas adecuadas que oscilan entre 15 – 60 °C (que también dependerán del tipo de bacterias, con la que se esté trabajando), con lo que se estaría obteniendo distintos tiempos en la fermentación, que varía de 100 – 15 días, respectivamente, todo este proceso se dan al interior del biodigestor y son las condiciones existente en él, por lo que se considera como el corazón de la planta a este elemento (MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF, 2011, pp. 28 & 108-109). Para el aprovechamiento del biogás, en la generación de energía eléctrica, en la actualidad existen diferentes tecnologías como son los motores de combustión interna, y las turbinas a gas, a los cuales se les debe acoplar el respectivo generador eléctrico, que variará de acuerdo con el tamaño de la planta y la cantidad de energía que se desee producir, estos están en el orden de 1 – 5 [MWe], como se observa en la tabla 7. En la ilustración 36 se puede observar el funcionamiento de una planta de biogás, para producir energía térmica y/o eléctrica.

Ilustración 35: Diagrama de cómo funciona una planta de biogás.



Fuente: (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2017)

2.8 Potencial Bioenergético Económico.

Este punto es de vital importancia para el desarrollo de un proyecto, donde se busca explotar el potencial energético de una biomasa residual. Este análisis nos permitirá comparar las distintas soluciones que se tienen hoy en día, desde un punto de vista económico y técnico tomando en cuenta el tiempo de vida del proyecto. Para el inversor del proyecto desde su perspectiva, es muy importante el análisis económico y el análisis financiero, así mismo el análisis desde la perspectiva del regulador, en este caso la sociedad (International Finance Corporation, 2017, p. 135). En la proyección económica, es muy importante para el esquema del sector público, ya que además de los índices financieros también se evalúa propiamente los impactos que tendrá en la economía en temas de rentas y generación de empleos. Para objeto de este estudio se considerará solamente los criterios financieros, ya que el potencial energético económico se encuentra ligado directamente al análisis que se había especificado previamente, y que este dependerá de los costes de implementación de la tecnología que sea escogida (ORC, CRC, planta de biodigestión), accesibilidad, ubicación de la planta, entre otros más.

Capítulo 3: Conversión de Energía

3.1 Análisis Energético del Sistema de Cogeneración con la Tecnología Seleccionada.

Como se ha estudiado en párrafos anteriores se puede generar energía eléctrica de diferentes formas, pero para objeto de esta investigación nos centraremos en profundizar y llevar la propuesta del proyecto a un ciclo Rankine convencional (CRC), ya que es un ciclo de potencia que usa el agua como fluido de trabajo, esto debido a su bajo coste, bajos niveles de contaminación y versatilidad de la misma. Se contemplará el estudio de un ciclo de Rankine convencional con recalentamiento, para así alcanzar la máxima eficiencia de la planta; esto debido a que en este tipo de proceso es casi constante debido a la gran inercia térmica que tiene el mismo.

En este capítulo analizaremos a breves rasgos las cualidades que tiene el agua, en este tipo de procesos y el potencial bioenergético que tiene la cascarilla del arroz, que será utilizado como combustible y la tecnología que utilizaremos para el estudio de este proyecto.

3.2 Estudio del Potencial Bioenergético Teórico.

Para la determinación de este potencial teóricos o bruto de los residuos de biomasa en el Ecuador, acudiremos a los datos que nos proporciona el Atlas bioenergético del Ecuador del año 2014, así como la información que se dispone de la industria arrocera en estudio. Esta revisión de los datos, se la hace con el fin de averiguar cuál es el potencial que disponemos alrededor de esta industria y ver la posibilidad de utilizar otra biomasa de otras industrias o de algún otro cultivo, en caso fuese necesario. Toda esta información se basará de fuentes oficiales que se dedican a la generación de informes del sector agrícola y energético. Entre estas entidades están el ESPAC, el MEER y el MAGAP. Cabe indicar que en este documento solo se ha contemplado los lugares donde se ha establecido un valor que supere los mínimos

significativos, para poderlos usar como fuente energética; en el escrito se ha considerado el valor de 14,5 [TJ/año] (Instituto Nacional de Preinversión, 2019, p. 87).

3.3 Cálculo del Potencial Bioenergético teórico.

Los residuos del arroz (cascarilla) es el subproducto final que se obtiene durante el proceso de la limpieza del arroz una vez que son extraído del campo, según los estudios realizados este puede ser usado energéticamente debido al alto Poder Calórico Inferior que contiene (PCI) (Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables, 2021).

El PCI y el PCS, hace referencia de la fase en la que se encuentra el agua durante el proceso de transformación durante la combustión. Si el agua se encuentra en fase líquida se denomina PCS. Por otro lado, si el agua está en estado de vapor se denominará PCI. El PCI simboliza la cantidad de calor que se libera, por una determinada unidad de masa durante el proceso de combustión.(Cañón & Alba, 2017, p. 37). Este potencial se lo calcula utilizando la ecuación (3.1).

$$\text{Energía} = \text{Producción anual residuos} * \text{PCI} \quad (3.1)$$

En el Anexo 4 se muestra el mapa de la producción total del cultivo de arroz a nivel provincial (incluyendo la cascarilla de arroz), estos datos están recopilados en el Atlas Bioenergético del Ecuador del año 2014, el cual nos da una información que tiene mucha relevancia para el tema de estudio.

En la Tabla 7, se presenta el PCI de algunas fuentes de energía, entre los que figuran la cascarilla del arroz. Para efecto de este estudio tomaremos en cuenta al residuo como seco, para posteriormente analizar el efecto de la humedad.

Tabla 8. Poder calórico inferior (PCI) de ciertos residuos biomásicos en el Ecuador.

FUENTE DE BIOMASA	PCI [MJ/kg]
Arroz - residuo de campo	13,35
Banano - Residuo de campo	12,62
Banano - Residuo de proceso	4,18
Cacao - Residuo de proceso	12,00
Café - Residuo de campo	6,46
Cascarilla de arroz	14,95
Palma africana - residuo de campo	12,47

Fuente:(Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables, 2021)

3.4 Evaluación Energética Contendida en la Cascarilla del Arroz.

Para el caso de la industria arrocera Gloria Matilde S.A del residuo de la cascarilla que genera durante el proceso de pilado y limpieza del grano, se obtiene el siguiente potencial bioenergético teórico de la ecuación 1.

$$\text{Energía} = 14,95 \left[\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right] * 7.500 \frac{[\text{t}]}{\text{año}} * \frac{1.000 [\text{kg}]}{1 [\text{t}]}$$

$$\text{Energía} = 112,12 \left[\frac{\text{TJ}}{\text{año}} \right]$$

Según el Atlas bioenergético del Ecuador, en Daule existe un alto potencial de generación de estos residuos, por lo que también se hará el cálculo energético a nivel del cantón, para así analizar una posible compra de residuos a otras industrias arroceras y disponer de materia prima (Instituto Nacional de Preinversión, 2019, p. 87).

$$\text{Energía} = 14,95 \left[\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right] * 255.115 \left[\frac{\text{t}}{\text{año}} \right] * \frac{1.000 [\text{kg}]}{1 [\text{t}]}$$

$$\text{Energía} = 3.813,96 \left[\frac{TJ}{\text{año}} \right]$$

Este dato lo hemos calculado, ya que más adelante será de mucha utilidad para el análisis del caso en nuestro proyecto.

3.5 Propiedades de la Cascarilla del Arroz.

En la tabla 9, se puede observar algunas propiedades de la cascarilla del arroz y que nos servirá para el cálculo de algunas variables que necesitaremos para el estudio de este proyecto.

Tabla 9. Algunas propiedades de la cascarilla del arroz

Propiedades de la cascarilla del arroz	
Poder Calorífico	3.281,6 kcal/kg
Peso específico	125 kg/m ³

Fuente: (Prada & Cortés, 2022)

3.5.1 Evaluación de la Potencia Térmica Bruta de la Cascarilla de Arroz.

Según el estudio realizado por (Ríos, 2018, p. 51) y con la ecuación 3.2, podremos obtener la potencia térmica bruta que se obtiene de la cascarilla de arroz obtenida del proceso de la arrocera Gloria Matilde S.A. Para este cálculo asumiremos que este desecho tiene un poder calorífico interno (PCI) en base cuando está seca de aproximadamente 3.281 kcal/kg (Prada & Cortés, 2022, p. 2).

Entonces:

$$ECA = Q * \left[\frac{\%C}{100} \right] * PCIU \quad (\text{Gcal/año}) \quad (3.2)$$

Donde:

Q = Cantidad de cascarilla producida. (7.500 T).

$\%C$ = Porcentaje de desechos (cascarilla 21%).

$PCIU$ = Poder calorífico inferior en base a la humedad.

$$PCIU = PCIS \left(1 - \frac{\%H_2O}{100}\right) - (\%H_2O) * \Delta H_{vap-H_2O}$$

Donde:

$PCIS$ = Poder calorífico tomando como referencia en una base seca de la cascarilla, que es aproximadamente. (3.281 Kcal/kg).

$\%H_2O$ = Porcentaje de agua (12%).

ΔH_{vap-H_2O} = Entalpía de vaporización del agua (539 Kcal/kg).

De esta ecuación se obtiene:

$$PCIU = 3.281 \left[\frac{kcal}{kg}\right] \left(1 - \frac{12\%}{100}\right) - (10\%) * 539 \left[\frac{kcal}{kg}\right]$$

$$PCIU = 3.281 \left[\frac{kcal}{kg}\right] (1 - 0,12) - (10\%) * 539 \left[\frac{kcal}{kg}\right]$$

$$PCIU = 2.887,28 \left[\frac{kcal}{kg}\right] - 53,9 \left[\frac{kcal}{kg}\right]$$

$$PCIU = 2.833,38 \left[\frac{kcal}{kg}\right]$$

De este valor con la ecuación (2) calculamos la energía térmica para este caso.

$$ECA = Q * \left[\frac{\%C}{100}\right] * PCIU$$

$$ECA = 7.500 T * \left[\frac{21\%}{100}\right] * 2.833,38 \left[\frac{kcal}{kg}\right]$$

$$ECA = 7.500 T * \frac{1000 kg}{1 T} * \left[\frac{21\%}{100}\right] * 2.833,38 \left[\frac{kcal}{kg}\right]$$

$$ECA = 7.500 T * \frac{1000 kg}{1 T} * [0,21] * 2.833,38 \left[\frac{kcal}{kg}\right]$$

$$ECA = 4.462'573.500 Kcal$$

Procedemos a transformar medidas y a encontrar la potencia en kW que tendríamos al año.

$$ECA = 4.462'573.500 \frac{kcal}{año} * \frac{4,1868 kJ}{1 kcal} * \frac{1 kWh}{3.600 kJ}$$

De donde obtenemos:

$$ECA = 4.462'573.500 \frac{kcal}{año} * \frac{4,1868 kJ}{1 kcal} * \frac{1 kWh}{3.600 kJ}$$

$$ECA = 5'189.972,98 \frac{kWh}{año} ; ECA = 5.189,97 \frac{MWh}{año}$$

Entonces realizando este análisis rápido, se puede concluir que con el potencial energético que posee esta cascarilla se puede producir la energía eléctrica que necesita esta planta y vender cierta cantidad de energía al SIN, ya que sería la energía que se podría generar anualmente.

En los siguientes párrafos se calcularán los equipos que se implementaran para el diseño del ciclo Rankine Convencional que se propondrá.

3.6 Estudio del Potencial Geográfico Sustentable.

Se debe tomar en cuenta los fines que se puede dar a cada residuo, ya que en caso particular la cascarilla de arroz es utilizada para autoconsumo e inclusive se la comercializa para otros fines. En este contexto podemos considerar que el potencial bioenergético es la cantidad de los desechos biomásicos que se pueden utilizar, considerando los aspectos de impacto sociales y ambientales respectivamente (Angelis-Dimakis et al., 2011, pp. 24-26).

Durante el cultivo y la cosecha del arroz, se tiene un peso total bruto; el cual está constituido por el grano con cáscara y los residuos que quedan en el campo que son propios de este producto (hojas y tallos). Durante el año 2020, el 42,7% representa a la producción bruta y el 57,3% son los residuos de campo que se dejan en el suelo, para evitar la erupción del mismo, manteniendo así el ecosistema y el equilibrio ecológico (Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables, 2021).

Tabla 10. Cantidad de residuos de campo, obtenidos durante el año 2020.

Producción bruta	Residuos de Campo	Total de Producción	Total cascarilla de arroz
1'336.502 [Tn/año]	1'907.188 [Tn/año]	3'243.690 [Tn/año]	334.125 [Tn/año]

42,7 [%]	57,3 [%]	100 [%]	25,0 [%] Pb
----------	----------	---------	-------------

Fuente: Elaboración propia con datos (Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables, 2021) y (Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura, 2022)

En la Tabla 10, se muestra los residuos que se generaron durante la cosecha de arroz del año 2020. Los residuos de las plantas se dejan en el suelo para evitar la alteración del ecosistema. Así que, de la producción bruta los residuos generados se pueden emplear con fines energéticos sin ningún problema y restricción ambiental.

3.7 Estudio del Potencial Bioenergético Técnico.

Una vez analizado el potencial teórico y térmico de la cascarilla del arroz, procederemos a analizar el potencial técnico; el cual está directamente relacionado con la tecnología que se empleará, para el correcto aprovechamiento energético de la biomasa estudiada. La tecnología que emplearemos es un Ciclo Rankine Convencional, para generar electricidad y con los gases de la combustión que se dan en la caldera, usarlo para el secado del arroz. Para la correcta implementación de la tecnología escogida se debe tener en consideración el análisis termodinámico (Lee et al., 1988).

3.7.1 Fluido de Trabajo.

El ciclo Rankine convencional usa el agua como fluido de trabajo durante el proceso, debido a sus propiedades esta cambia de estado de una forma alternada, ósea de un estado líquido a gaseoso (Vapor). El agua es considerada una sustancia pura, por lo que sus propiedades serán constantes a una presión y temperatura específica. Algunas de las propiedades químicas del agua, las podemos visualizar en la tabla 11 (Hernández, 2017, p. 32).

Tabla 11. Propiedades del agua como fluido de trabajo en un ciclo.

Propiedad	Valor
Peso molecular	18 kg/mol

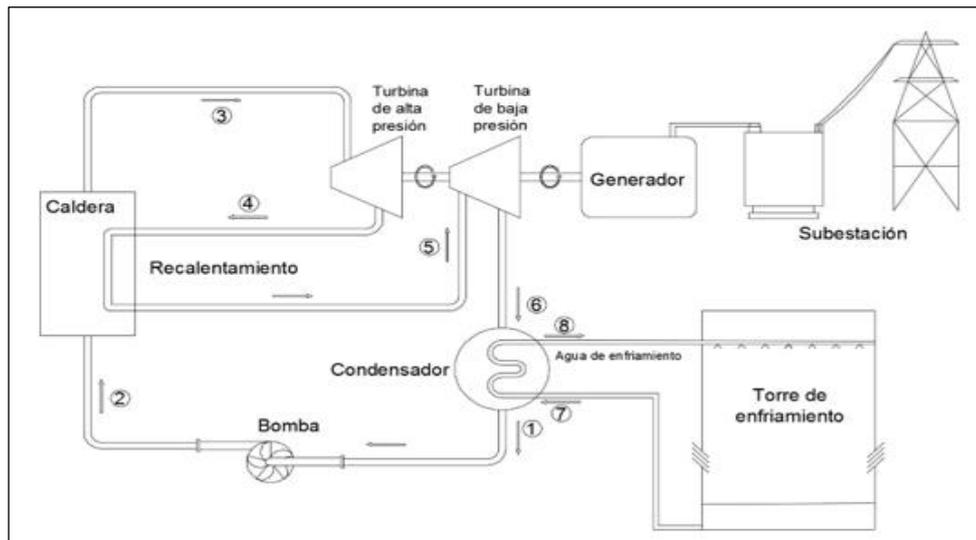
Punto de ebullición	373,15 K-101.325 kPa
Punto de fusión	273,15 K-101.325 kPa
Punto triple	273,16 K-0,611 kPa
Punto crítico	647 K-22,06 MPa
Calor latente	2.256,6 KJ/Kg-101.325 kPa -539 kcal/kg
Calor específico	4,18 J/kg

Fuente:(Hernández, 2017)

3.7.2 Análisis y Cálculo del Ciclo Termodinámico de Rankine.

El CRC (de vapor de agua) de recalentamiento convencional, que se empleará en este proyecto usualmente es implementado en las centrales térmicas de hoy en día, logrando alcanzar una eficiencia del ciclo entre 4% - 5% y evitando la generación de humedades excesivas en las turbinas (Cengel et al., 2019, p. 556). Durante la operación de este ciclo, se realiza la expansión del fluido de trabajo en 2 etapas (Turbina de baja y alta presión) como se puede visualizar en la figura 31, que hace referencia al proceso y a los todos los estados termodinámicos que están presente a lo largo del ciclo. Durante el análisis de la sección 3.5.2, se hará referencia a todos los puntos presentados en esta gráfica.

Ilustración 36. Diagrama de un ciclo Rankine con recalentamiento de 2 etapas.



Fuente:(Cengel et al., 2019)

Durante este proceso el ciclo de la primera expansión del líquido se efectúa en la turbina de alta presión, hasta alcanzar una presión intermedia para nuevamente regresar a la caldera (3-4), donde se realiza un recalentamiento a una temperatura que sea cercana o igual a la de entrada de la primera turbina (4-5), entre tanto el líquido sigue efectuando su recorrido hacia la turbina de baja presión y luego este se expande hasta la presión del condensador (5-6) (Cengel et al., 2019, p. 556).

Para el análisis del ciclo termodinámico a profundidad se utilizó el programa (EES) Engineering Equation Solver, para la ejecución de problemas termodinámicos y establecieron 3 condiciones principales, que se describirán en los tres párrafos siguientes.

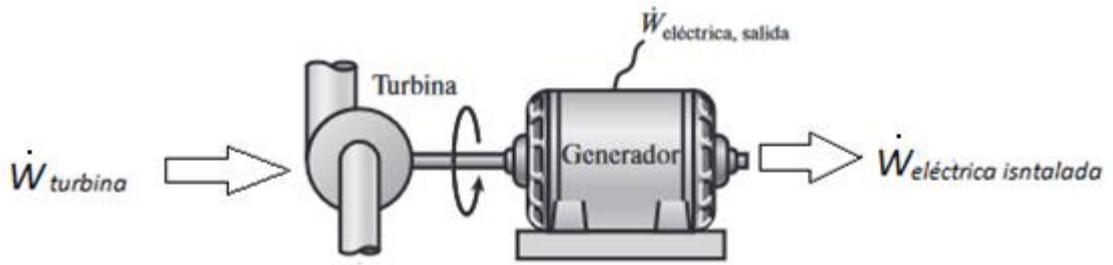
Según las especificaciones de calderas de biomasa que existen en el mercado, estiman que las presiones de trabajo varían de 10 – 20 bares, esto con el propósito de obtener un autoconsumo, y en caso de que se pueda generar excedentes de energía que puedan ser inyectados al sistema eléctrico local. También existen calderas que van en el orden de los 40, 50, 60 bar y de allí en adelante, que básicamente son utilizadas para realizar una generación de autoconsumo propio y de generar excedentes que luego sean destinados a la venta, que es donde basaremos este análisis. Según sus años de fabricación se podría decir que las calderas de 40

bares, pertenecen a la edad media; mientras que las de 50 bares en adelante son de más nueva tecnología y que se emplean actualmente en muchos proyectos de generación de electricidad a partir de biomasa (Bouille et al., 2018, p. 27). El parámetro que utilizaremos para efecto de este estudio es una presión de 50 bar, presiones de diseños con las que trabajan las calderas modernas, para el fin que intentamos alcanzar.

La temperatura del vapor de agua que entra al condensador, debe ser lo convenientemente alta con respecto al agua de enfriamiento y así poder garantizar de que se dé un delta diferencial de temperatura idónea para el proceso, el cual nos permita obtener una transferencia de calor y así disminuir el flujo de agua de enfriamiento que trasladaría la energía absorbida en el proceso del cambio de fase de vapor a fluido saturado (6-1) que va desde el condensador a la torre de enfriamiento que está propuesta y asociada en el sistema (7-8) (Cengel et al., 2019, p. 556). Para este estudio se estable que la temperatura del vapor que entra al condensador es de 60°C.

Para la determinación de la potencia instalada, se menciona que es aquella potencia eléctrica que se obtiene a la salida del generador, ya restando todas las pérdidas, eficiencia en la turbina, etc, que se ha dado como producto de la transformación de la energía mecánica en energía eléctrica. Asumiendo una eficiencia del 97% en el generador (Cengel et al., 2019, p. 81), como se observa en la figura 32. Entonces esta potencia estará determinada por la potencia neta que deseamos generar y la que se pueda aportar a la red eléctrica, para este caso serán 1 MWe y la potencia de autoconsumo que se tendrá en la planta, que será el consumo de todos sus equipos de producción y de uso generales. En varios documentos analizados se determina que la potencia destinada para un autoconsumo de una planta está alrededor del 6 al 8% sobre la potencia eléctrica bruta (Ruíz, 2023, p. 157), (Instituto Nacional de Preinversión, 2019, p. 14) . Para efecto de estudio tomaremos como referencia un 8%.

Ilustración 37. Potencia obtenida a la salida de un generador.



Fuente: (Cengel et al., 2019)

$$\dot{W}_{el\acute{e}ctrica\ instalada} = \dot{W}_{el\acute{e}ctrica\ neta\ inyectada\ a\ la\ red} + \dot{W}_{autoconsumo} \quad (3.3)$$

$$\dot{W}_{autoconsumo} = 0,08 * W_{instalada} \quad (3.4)$$

Teniendo estas 2 ecuaciones y realizando el reemplazo de la ecuación (3.4) en la ecuación (3.3), se obtendría la potencia instalada de la planta de generación eléctrica.

$$\dot{W}_{el\acute{e}ctrica\ instalada} = \frac{\dot{W}_{el\acute{e}ctrica\ neta\ inyectada\ a\ la\ red}}{(1-0,08)}$$

$$\dot{W}_{el\acute{e}ctrica\ instalada} = \frac{1 [MWe]}{(1-0,08)}$$

$$\dot{W}_{el\acute{e}ctrica\ instalada} = 1,08 [MWe]$$

A partir de esto y por medio de la ecuación (3.5), se puede determinar la potencia que debe alcanzar la turbina, con el ciclo Rankine para la planta de generación.

$$\eta_{generador} = \frac{\dot{W}_{el\acute{e}ctrica\ instalada}}{W_{turbina}} \quad (3.5)$$

$$\dot{W}_{turbina} = \frac{1,08 [MWe]}{0,97} = 1,11 [MW]$$

3.7.3 Bomba Impulsora del Fluido.

Este elemento es el encargado de realizar el trabajo que se necesite para llegar el fluido de trabajo del ciclo desde el estado (1) hasta el estado (2) y se determina mediante la siguiente ecuación.

$$W_{bomba} = h [2] - h [1] \quad (3.6)$$

El estado (1) que se representa en la ilustración 31, donde se visualiza la salida del fluido saturado, en este caso agua a la temperatura de cambio de fase desde el condensador, que tal como se mencionó en el párrafo anterior, es de aproximadamente 60°C.

$$T [1] = 60,00 [^{\circ}C] ; x [1] = 0$$

Entonces utilizando el software (EES), y teniendo los datos de la temperatura y de calidad; asumiendo el valor inicial 0 para este último parámetro, se puede calcular los valores de la entalpía, entropía y presión.

$$h [1] = 251,2 \left[\frac{kJ}{kg} \right] ; s [1] = 0,83 \left[\frac{kJ}{kg-k} \right] ; P [1] = 19,95 [kPa]$$

El estado (2) representa el recorrido del líquido saturado llevado hasta la caldera, a la presión de trabajo de esta; entonces asumiendo que la eficiencia isentrópica de la bomba es del 100%, se consideraría que los valores de la entropía en los puntos (1) y (2) son idénticos.

$$P [2] = 5.000 [kPa] ; s [2s] = s [1]$$

Con los datos obtenidos anteriormente, de la presión y la entropía específica se haya el valor de la entalpía específica, con el dato de una eficiencia del 100%.

$$h [2s] = 256,2 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

Entonces con la ecuación (3.7) determinaremos el valor de la entalpía en el punto (2), que va a depender de la eficiencia isentrópica que en bombas como en turbinas, con un buen diseño se encuentran entre un 80 y 90% (Cengel et al., 2019, p. 81). Para este trabajo se considerará un valor de eficiencia real en la bomba del 85%.

$$\eta_{bomba} = \frac{h[2s]-h[1]}{h[2]-h[1]} \quad (3.7)$$

$$h[2] = h[1] + \frac{h[2s] - h[1]}{\eta_{bomba}}$$

$$h[2] = 251,2 \left[\frac{kJ}{kg} \right] + \frac{(256,2 - 251,2) \left[\frac{kJ}{kg} \right]}{0,85}$$

$$h[2] = 257,08 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

Entonces a partir de esto, el trabajo específico de la bomba se haya con la ecuación (6).

$$W_{bomba} = (256,2 - 251,2) \left[\frac{kJ}{kg} \right] = 5,00 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

3.7.4 Caldera.

Esta se la determina por la suma de energía térmica a una presión constante que se realiza al agua dentro de la caldera para llegar al estado (3) como vapor sobrecalentado y se puede calcular por medio de la ecuación (3.8).

$$q_{in.caldera} = h [3] - h [2] \quad (3.8)$$

El estado (3), estará definido por la presión de trabajo dentro de la caldera y la temperatura máxima que puede alcanzar el ciclo. Esta temperatura se la definirá mediante el análisis de los parámetros en el software EES y que se presentan en el Anexo XX, analizando este parámetro en el ciclo termodinámico, buscaremos un valor que nos permita trabajar con una eficiencia del 25% de planta, siendo este un valor que se define en valores frecuentes cuando se traba con biomasa, y usadas para la generación de energía eléctrica con calderas de vapor (Lorenzo, 2018, p. 5), (Wolf & Dong, 2023, pp. 4-5).

Entonces, decimos que:

$$P[3] = P[2] ; T[3] = 375,5 [^{\circ}C]$$

Entonces con estos datos de presión y temperatura, ya podemos encontrar la entalpía y la entropía específica en el estado (3).

$$h[3] = 3.135 \left[\frac{kJ}{kg} \right] ; s[3] = 6,556 \left[\frac{kJ}{kg-k} \right]$$

Entonces ya con estos valores calculamos la suma de energía térmica específica, partiendo de la ecuación (8).

$$q_{in.caldera} = (3.135 - 256,2) \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

$$q_{in.caldera} = 2.878,8 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

3.7.5 Turbina de Alta Presión.

En este ciclo se realiza la expansión del vapor sobrecalentado que proviene del estado (3) al interior de la turbina de alta presión. Este elemento genera energía mecánica, debido al contacto que ejerce el vapor en expansión con los respectivos álabes de la turbina, para calcular esta energía se utiliza la ecuación (3.9).

$$W_{t1ap} = h [3] - h [4] \quad (3.9)$$

En el proceso descrito el estado (4) es el vapor sobrecalentado expandido hasta una presión muy cercana o igual a la cuarta parte de la presión máxima del ciclo (Cengel et al., 2019, pp. 552-554), para así esta pueda regresar a la caldera. Entonces para este análisis asumiendo que la eficiencia isentrópica de la turbina es del 100%, se consideraría que los valores de la entropía en los puntos (3) y (4) son idénticos.

$$P [4] = 1.250 [kPa] ; s [4s] = s [3]$$

Entonces hallamos el valor de la entalpía específica, con una eficiencia del 100%; ya sabiendo los datos de la presión y la entropía específica.

$$h [4s] = 2.808 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

A partir de esto con la ecuación (3.10) y con un valor real de eficiencia de la turbina se puede calcular el valor de la entalpía real en el punto (4). Como se enunció en párrafos anteriores se había considerado un valor de 85% de eficiencia para la turbina.

$$\eta_{turbina} = \frac{h[3]-h[4]}{h[3]-h[4s]} \quad (3.10)$$

$$h[3] - (h[3] - h[4s]) * \eta_{bomba} = h [4]$$

$$h [4] = 3.135 \left[\frac{kJ}{kg} \right] - 0,85(3135 - 2808) \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

$$h[4] = 2.857,05 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

Después de esto se calcula el trabajo específico que realiza la turbina de alta presión con la ecuación (9).

$$W_{t1ap} = (3.135 - 2.808) \left[\frac{kJ}{kg} \right] = 327 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

3.7.6 Turbina de Alta Presión.

Este proceso se da una vez que el vapor sobrecalentado del estado (4) entra nuevamente a la caldera, dónde se le inyecta calor a una presión constante, normalmente hasta la temperatura de entrada de la turbina en la primera etapa. En este caso es necesario conocer el incremento de energía térmica que se da en este proceso, para luego determinar la cantidad total de energía térmica específica a la entrada del ciclo termodinámico.

$$q_{in.recalentamiento} = h [5] - h [4] \quad (3.11)$$

$$q_{in.ciclo} = q_{in.caldera} + q_{in.recalentamiento} \quad (3.12)$$

Entonces, tanto la temperatura como la presión del estado (5) se determinarán de los estados anteriores.

$$P[5] = P[4] ; T[5] = T[3]$$

Los valores de la entalpía y entropía específica para este estado serán los siguientes:

$$h[5] = 3.208 \left[\frac{kJ}{kg} \right] ; s[5] = 7,28 \left[\frac{kJ}{kg-k} \right]$$

Con la ecuación (3.11) se calcula la energía térmica específica del ciclo de recalentamiento, y con la ecuación (3.12) la energía térmica específica total de entrada.

$$q_{in.recalentamiento} = (3.208 - 2808) \left[\frac{kJ}{kg} \right] = 400 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

$$q_{in.ciclo} = (2.878,8 + 400) \left[\frac{kJ}{kg} \right] = 3.278,8 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

3.7.7 Turbina de Baja Presión.

En esta segunda fase de expansión al igual que el primer proceso que genera energía mecánica, ahora se da en la turbina de baja presión y se puede valorar por la unidad de masa con la siguiente ecuación (3.13). En esta parte ya se puede medir de igual manera el

trabajo total que realizan las turbinas y el trabajo neto del ciclo termodinámico, por unidad de masa.

$$W_{t1bp} = h [5] - h [6] \quad (3.13)$$

$$W_{turbinas} = W_{t1ap} + W_{t1bp} \quad (3.14)$$

$$W_{neto} = W_{t1ap} + W_{t1bp} - W_{bomba} \quad (3.15)$$

El estado (6) que se puede visualizar en la ilustración 31, es el producto de la expansión del vapor de agua que ingresó a la turbina de baja presión (5), hasta la presión de condensación. Si asumimos que la eficiencia isentrópica de la turbina es 100%, se asume entonces que los valores de la entropía en los puntos (5) y (6) son idénticos.

$$P [6] = P [1] ; s [6s] = s [5]$$

Con estos datos de la entropía específica y la presión, se procede a encontrar la entalpía específica con una eficiencia de la turbina del 100%.

$$h[6s] = 2.400 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

De la ecuación (3.16) y con la eficiencia real de la turbina, podemos determinar el valor de la entalpía real en el punto (6). Para el análisis se considera una eficiencia de un valor del 85%.

$$\eta_{turbina} = \frac{h[5]-h[6]}{h[5]-h[6s]} \quad (3.16)$$

$$h[5] - (h[5] - h[6s]) * \eta_{bomba} = h [6]$$

$$h [6s] = 3.208 \left[\frac{kJ}{kg} \right] - 0,85(3.208 - 2.400) \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

$$h[6] = 2.521,20 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

Entonces hallaremos por medio de la ecuación (3.13), el trabajo que realiza la turbina de baja de presión, por unidad de masa. Así mismo por la misma unidad, hallaremos el trabajo de las turbinas y el valor neto del ciclo, con las ecuaciones (3.14) y (3.15) respectivamente.

$$W_{t1bp} = (3208 - 2.521,20) \left[\frac{kJ}{kg} \right] = 686,80 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

$$W_{turbinas} = (327 + 686,80) \left[\frac{kJ}{kg} \right] = 1.013,80 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

$$W_{neto} = (327 + 686,80 - 5,00) \left[\frac{kJ}{kg} \right] = 1.008,80 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

Conociendo ya el valor de la potencia necesaria en las turbinas, y el trabajo total específico de estas, se puede calcular y hallar el flujo másico del vapor de agua en el ciclo, esto queda expresado por la ecuación (3.17).

$$\dot{m}_{ac} = \frac{\dot{W}_{turbinas}}{W_{turbinas}} \quad (3.17)$$

$$\dot{m}_{ac} = \frac{1.110 \left[\frac{kJ}{s} \right]}{1.013,80 \left[\frac{kJ}{kg} \right]}$$

$$\dot{m}_{ac} = 1,09 \left[\frac{kg}{s} \right]$$

3.7.8 Condensador.

En esta etapa del ciclo, el vapor sobrecalentado del estado (6) como se muestra en la ilustración 31, se condensa a una presión constante para cambiar de fase a un líquido saturado en el estado (1), transportando calor fuera del ciclo termodinámico de potencia, y siendo así como se completa el ciclo de Rankine. Todo este último proceso se realiza en el condensador, que es fundamentalmente un intercambiador de calor que le transfiere calor al agua del circuito secundario, la cual circula por la torre de enfriamiento asociada a este proceso. Esta energía térmica de salida se la calcula por la ecuación (3.18).

$$q_{out} = h [6] - h [1] \quad (3.18)$$

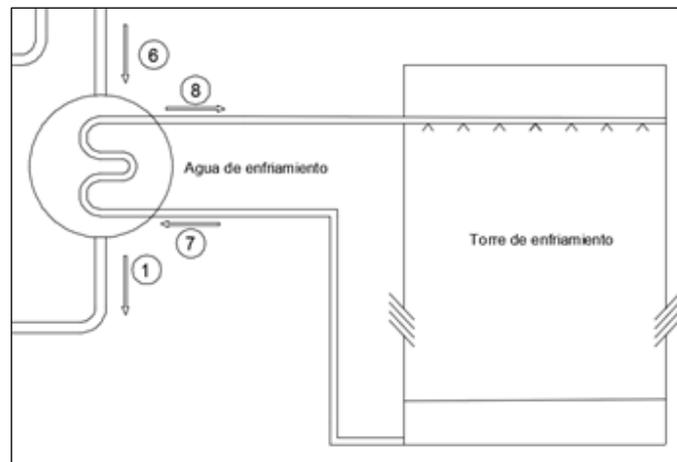
$$q_{out} = (2.521,20 - 251,2) \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

$$q_{out} = 2.270 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

Los estados (7) y (8) comprenden las temperaturas de entrada y salida del agua de enfriamiento del condensador, como se puede observar en la Ilustración 33. Para este proceso

se considera que el agua será enfriada en la torre de enfriamiento que se puede ver en el sistema, la cual intercambiará el calor con el aire que se encuentra a temperatura ambiente. Antes de calcular el flujo másico y la cantidad de agua de reposición, que caracterizan a estos sistemas, se dejará establecido algunos valores.

Ilustración 38. Ilustración de un condensador y recorrido del agua de enfriamiento.



Fuente: (Cengel et al., 2019)

En los datos recogidos por el (INAMHI) Instituto Nacional de Meteorología e hidrología, en el año 2021 la temperatura máxima que registró el país fue de 35,3°C (temperatura ambiente o de bulbo seco) (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, 2021). Entonces podemos deducir que la temperatura a la que se puede reducir el agua en una torre de enfriamiento es la de temperatura de bulbo húmedo, entonces tomando un supuesto caso de una humedad relativa del 100%, se puede concluir que la temperatura del bulbo húmedo sería la misma que la temperatura de bulbo seco.

$$T[7]_{teórico} = 35,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

A la desigualdad de la temperatura del agua, entre la salida de la torre de enfriamiento y la temperatura de bulbo húmedo, se lo define como “aproximación”, este es un parámetro que es una función intrínseca de las torres de enfriamiento, y que comúnmente tiene un valor que varía alrededor de los 7°C y 3°C llegando a este último como mínimo (Minguito, 2019, p. 5). En este trabajo tomaremos el valor de la aproximación de 5°C.

$$T[7] = 40,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Como mencionamos al comienzo de este análisis la temperatura del agua a la entrada del condensador y de cambio de fase es de 60°C, entonces se considera que la temperatura del agua de enfriamiento a la salida del condensador es de 55°C. Esto nos garantiza que exista un diferencial de temperatura que beneficie a la transferencia de calor ente el agua del enfriamiento y el vapor del proceso.

$$T[8] = 55 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Entonces bajo la presunción de que el intercambiador de calor trabaja de manera estable, es decir, el flujo másico de cada corriente que al fluir por este permanece constante en el tiempo, se establece que en los puntos (6) y (1) como en los puntos (7) y (8) el flujo másico es igual entre sí y que corresponde en sí al agua de ciclo y al agua de enfriamiento respectivamente.

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_1 = \dot{m}_{ac} \quad (3.19)$$

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_8 = \dot{m}_{ae} \quad (3.20)$$

Se realiza el balance de energía del sistema asumiendo que la pérdida de energía térmica hacía el ambiente, la energía cinética y la potencial son insignificantes. Entonces como resultado de esto se obtiene la ecuación (3.21) donde se puede ver que le energía térmica de entrada y la salida del volumen analizado son iguales.

$$\dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_6 h_6 = \dot{m}_8 h_8 + \dot{m}_1 h_1 \quad (3.21)$$

Entonces en el software EES, procedemos a calcular las entalpias específicas restantes, para los estados (7) y (8).

$$h[7] = h_{fa40,3^\circ\text{C}} = 169,9 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

$$h[8] = h_{fa55^\circ\text{C}} = 231,3 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

A partir de esto podemos hallar el flujo másico del agua que circula por la torre de enfriamiento, reemplazado las ecuaciones (19) y (20) en la ecuación (21).

$$\begin{aligned}\dot{m}_{ae}(h[7] - h[8]) &= \dot{m}_{ac}(h[1] - [6]) \\ \dot{m}_{ae}(169,9 - 231,3) &= 1,09 \left[\frac{kg}{s} \right] (251,2 - 2521) \left[\frac{kJ}{kg} \right] \\ \dot{m}_{ae} &= \frac{1,09 * (251,2 - 2521,0)}{(169,9 - 231,3)} \left[\frac{kJ}{kg} \right] \\ \dot{m}_{ae} &= 40,29 \left[\frac{kJ}{kg} \right]\end{aligned}$$

Durante el funcionamiento del sistema, se produce pérdidas de agua por el cambio de estado de la misma, por lo que debe existir una reposición de la misma, se estima de acuerdo a lo que comunica (ATECYR, 2022, p. 11) que la tasa de evaporación es del 1% del caudal de recirculación por cada 6°C de diferencia, entre las temperaturas de entrada y de la salida de la torre de enfriamiento. Entonces con las ecuaciones (3.22) y (3.23) respectivamente, determinamos el porcentaje de agua que se pierde por medio de la evaporación de esta y el flujo másico de reposición de agua en la torre de enfriamiento.

$$\text{Porcentaje de evaporación} = 0,01 * \frac{T[8]-T[7]}{6} * 100 \quad (3.22)$$

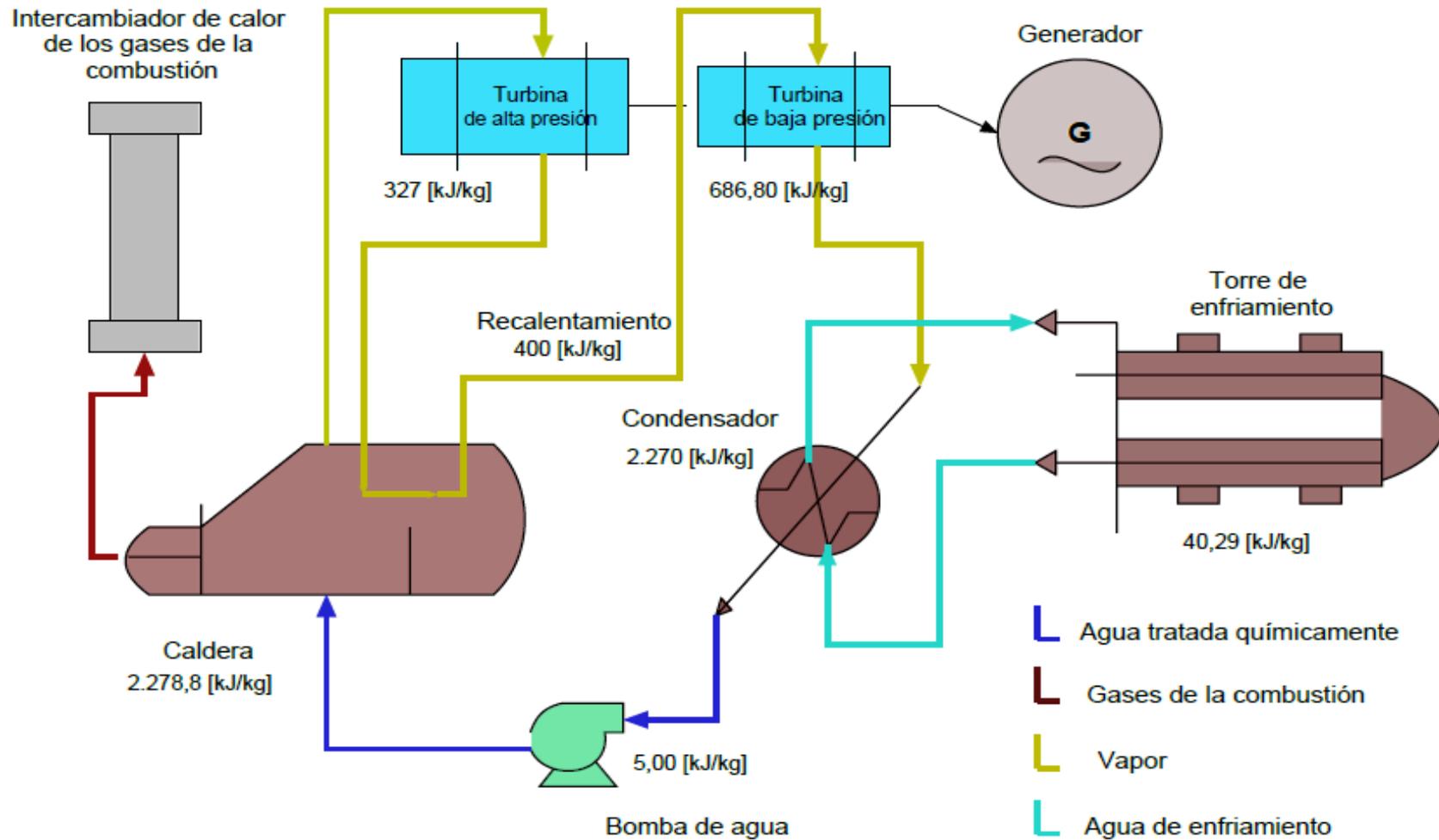
$$\dot{m}_{reposición} = \dot{m}_{ae} * \text{Porcentaje de evaporación} \quad (3.23)$$

$$\text{Porcentaje de evaporación} = 0,01 * \frac{(55-40,3)}{6} * 100 = 2,45\%$$

$$\dot{m}_{reposición} = 40,29 \left[\frac{kJ}{kg} \right] * 0,0245 = 0,98 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

Ilustración 39. Esquema del ciclo Rankine planteado para este proyecto.

Propuesta de planta de generación de energía (ciclo rankine) con recalentamiento

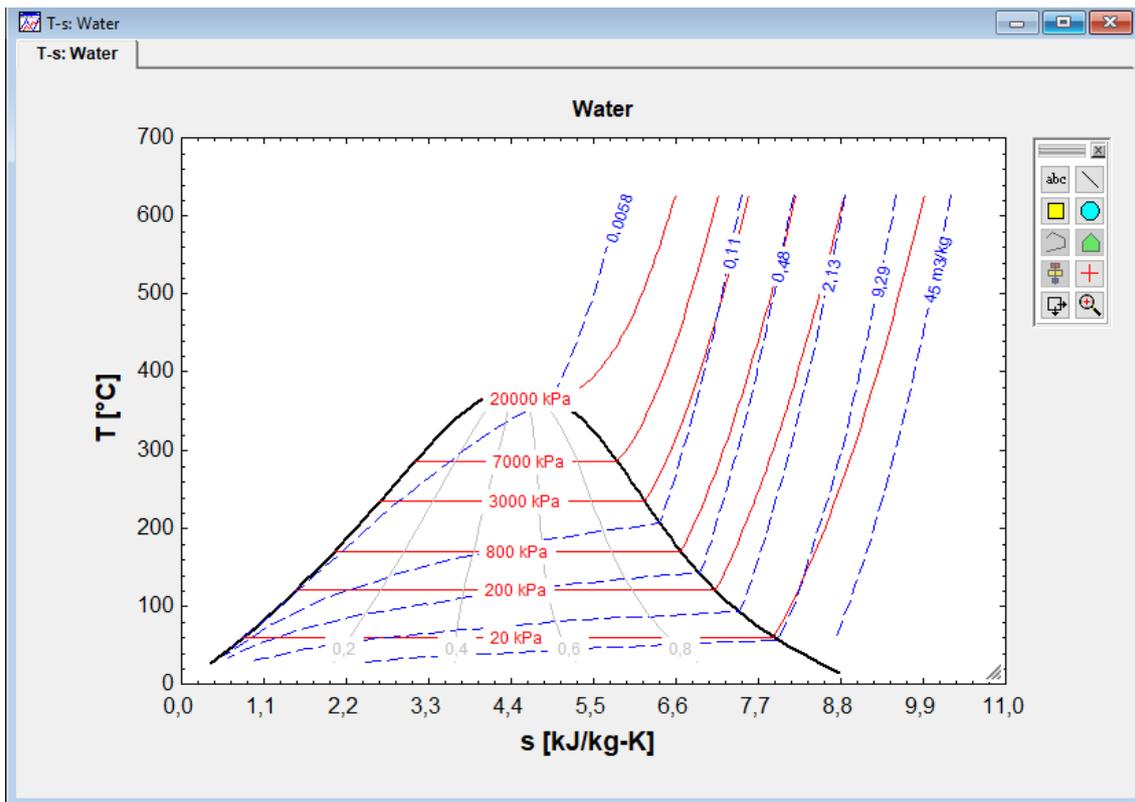


Fuente: Elaborado propia con datos de (Cengel et al. - 2019 - Termodinámica.pdf, s. f., p. 556)

3.7.9 Diagrama Temperatura – Entropía (T-S).

Valiéndonos del programa EES, obtenemos el diagrama de temperatura – entropía del proceso, donde salen ubicados cada uno de los estados del ciclo termodinámico de Rankine con recalentamiento, en la campana de saturación del agua, como se observa la Ilustración 34. Esto nos permite visualizar los cambios de temperatura y la entropía específica del agua, como fluido de trabajo.

Ilustración 40. Gráfico T-s de un ciclo Rankine con recalentamiento.



Fuente: Elaboración propia usando el software EES.

Con los datos calculados en el ciclo Rankine, ya se puede determinar la eficiencia del ciclo termodinámico mediante la ecuación (3.24).

$$\eta_{\text{ciclo termodinámico}} = 1 - \frac{W_{\text{neto}}}{q_{\text{in,ciclo}}} \quad (3.24)$$

$$\eta_{\text{ciclo termodinámico}} = \frac{1008,80 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]}{3278,80 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]} * 100 = 30,76\%$$

3.7.10 Eficiencia de la Caldera.

Se entiende por eficiencia de la caldera la obtención del mejor valor en cuanto a la calidad del proceso y de todos los equipos elegidos para transferir el calor de la combustión al liquido del ciclo termodinámico, por lo general las calderas de biomasa se encuentran en un aproximado del 85% de eficiencia según (Vakkilainen, 2017, pp. 71-73). Este valor lo definiremos con la ecuación (3.25) que es la relación que existe entre la potencia térmica total transferida al fluido y la potencia térmica al ingreso de a la caldera y que es facilitada por la biomasa al momento de la combustión de esta.

$$\eta_{caldera} = \frac{Q_{in,ciclo}}{Q_{in,biomasa\ a\ la\ caldera}} \quad (3.25)$$

Cuando ya se haya establecido el flujo másico, se puede determinar mediante la ecuación (3.26), la potencia total térmica que se transfiere desde la caldera al agua.

$$Q_{in,ciclo} = \dot{m}_{ac} * q_{in,ciclo} \quad (3.26)$$

$$Q_{in,ciclo} = 1,09 \left[\frac{kJ}{s} \right] * 3.278,80 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

$$Q_{in,ciclo} = 3.573,89 [kW_t]$$

Con todos estos datos y para efecto de cálculos es necesario conocer la potencia térmica de ingreso a la caldera, ya que precisa la energía que se necesita y que está contenida en la biomasa y que se liberará durante todo el proceso de la combustión. Esta se calculará con la ecuación (3.25) arriba antes descrita.

$$Q_{in,biomasa\ a\ la\ caldera} = \frac{Q_{in,ciclo}}{\eta_{caldera}}$$

$$Q_{in,biomasa\ a\ la\ caldera} = \frac{3.573,89 [kW_t]}{0,85}$$

$$Q_{in,biomasa\ a\ la\ caldera} = 4.204,57 [kW_t]$$

3.7.11 Eficiencia de la Planta.

Se entiende por eficiencia a la conversión energética desde la energía química que contiene la biomasa hasta la generación final de electricidad de la planta. En esta se debe considerar la eficiencia del ciclo termodinámico y todas las pérdidas asociadas al sistema (Por ejemplo: Pérdidas de la caldera, del generador, etc), todos estos valores que hemos obtenido y que se han asumido de acuerdo a la realidad, se tornan en un marco de trabajo muy parecido a las condiciones reales de funcionamiento de plantas de generación de electricidad a partir de una biomasa.

$$\eta_{planta} = \eta_{ciclo} * \eta_{caldera} * \eta_{generador} \quad (3.27)$$

$$\eta_{planta} = 0,3076 * 0,85 * 0,97 * 100 = 25,36\%$$

3.7.12 Potencia Entregada por la Planta.

La potencia de la planta de ciclo Rankine, viene expresada en MWe y la calcularemos mediante la ecuación (3.28), que se usa para generación eléctrica usando biomasa como combustible, donde el factor de planta viene determinado por las horas de funcionamiento del sistema (International Finance Corporation, 2017).

$$P = \frac{0,278 * Prod_{biomasa} * PCI_{biomasa} * \eta_{planta}}{W_{turbinas}} \quad (3.28)$$

$$P = \frac{0,278 * 7.500 \left[\frac{t}{año} \right] * 14,95 \left[\frac{MJ}{kg} \right] * 0,25}{7.200}$$

$$P = 1,08 [MWe]$$

Entonces la energía eléctrica generada al año será:

$$E_{generada} = P * f_{dr} \quad (3.29)$$

$$E_{generada} = 1,08 [MW] * 8.760 \left[\frac{h}{año} \right] * \left(\frac{7.200}{8.760} \right) = 7.776 MWh$$

3.7.13 Alimentación de Cascarilla de Arroz a la Caldera.

Para la cuantificación del flujo másico de cascarilla de arroz que se debe quemar dentro de la caldera, para elevar la temperatura del agua a su parámetro de trabajo, se debe tener en cuenta el PCI de la cascarilla, como lo hemos mencionado en la tabla 6, el valor utilizado es de 14,95 [MJ/kg] (Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables, 2021), esto lo calcularemos por medio de la ecuación (3.28).

$$Q_{in,biomasa\ a\ la\ caldera} = PCI * m_{biomasa} \quad (3.30)$$

$$m_{biomasa} = \frac{Q_{in,biomasa\ a\ la\ caldera}}{PCI}$$

$$m_{biomasa} = \frac{4.204,57 [kWt]}{14.950 [\frac{kJ}{kg}]} * \frac{1 kJ}{kW*s} = 0,28 [\frac{kg}{s}]$$

3.7.14 Cascarilla de Arroz que se Requiere para el Funcionamiento del Sistema.

Para definir este parámetro tendremos que definir las horas de funcionamiento que estará operativo el sistema y así operar el ciclo de Rankine, esto estará determinado mediante el factor de disponibilidad se la calcula por medio de la ecuación (3.29). Este valor nos expresa el número de horas que estará en operación la planta a lo largo del año, para este tipo de sistema que trabajan en la generación de energía a partir de la biomasa, el valor de referencia es de 0,82 que es un indicador que está dentro del rango para este tipo de aplicaciones. En este valor se contemplan paradas por algún motivo, sea por mantenimiento programados o no programados, o por solicitud del planificador del despacho del sistema eléctrico.

$$f_{dr} = \frac{\text{horas de funcionamiento}}{\text{horas totales del año}} \quad (3.31)$$

$$f_{dr} = \frac{7.200 h}{8.760 h} = 0,82$$

Con el flujo másico de la cantidad de biomasa y el factor de disponibilidad del recurso, ya podemos calcular el consumo de residuo de la cascarilla de arroz, mediante la ecuación (3.30).

$$\text{Consumo de residuo} = m_{biomasa} * f_{dr} * \text{horas al año} \quad (3.32)$$

$$\text{Consumo de residuo} = 0,28 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] * 0,82 * 8.760 \text{ [h]} * \frac{1 \text{ [T]}}{1.000 \text{ [kg]}} * \frac{3.600 \text{ [s]}}{1 \text{ [h]}}$$

$$\text{Consumo de residuo} = 7.240,66 \left[\frac{\text{T}}{\text{año}} \right]$$

Habiendo encontrado este dato, del estudio técnico podemos determinar que la cantidad de desechos generados en el proceso de esta planta abastece para alimentar en un 100% el tiempo propuesto para el funcionamiento de la caldera del ciclo Rankine.

3.7.15 Proceso de Secado del Arroz.

El proceso del secado del arroz, actualmente la industria Gloria Matilde S.A lo realiza por medio de la combustión de la cascarilla del arroz, en un horno artesanal; donde se aprovechan los gases de la combustión generados y que circulan por medio de una ventilación forzada para el secado del arroz. En este proceso la temperatura es muy controlada, ya que para obtener un arroz “seco” con el porcentaje de humedad correspondiente alrededor del 12%, la temperatura debe oscilar entre 38 y 42°C, con esto se obtendría los valores ideales para el correspondiente proceso de pilado del arroz (Información de encuesta realizada en la planta).

Ilustración 41. Secadora columnaria, modelo 815.



Fuente: Catálogo de equipo instalado en planta.

La secadora columnaria que se muestra en la Ilustración 41 y que trabaja actualmente en esta industria, al ser un equipo que ya se encuentra instalado, no ahondaremos en el funcionamiento de este. Pero si como dato a tener en cuenta es de saber que el arroz permanece

en un promedio de 3 a 4 horas en el secador, para disminuir su humedad de un 25% al 12 o 10% que es lo óptimo.

Tabla 12. Especificaciones de la secadora columnaria modelo 815

Modelo	Fuerza		Potencia	Potencia
	Capacidad/Hora	necesaria P/	Elevador de	del
	Arroz	La Base	Jarros	Ventilador
	Sacos	HP		HP
815	100	1	7" * 5"	10
				5

Fuente: Elaboración propia con información del manual del equipo.

3.7.16 Cantidad de Cascarilla Necesaria al Año para el Secado del Arroz Húmedo.

Según la información que detalla el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, indica que se necesita de 1 kg de cascarilla de arroz para secar 10 kg de arroz húmedo, este dato es un valor teórico muy importante y de mucha relevancia a tener en cuenta en la ejecución de este proyecto (Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables, 2021). Entonces con esta información se determina la siguiente ecuación (3.33).

$$CaS_{anual\ necesaria} = \frac{1kg\ cascarilla}{10\ kg\ arroz\ húmedo} * Producción\ total \quad (3.33)$$

$$CaS_{anual\ necesaria} = \frac{1kg\ cascarilla}{10\ kg\ arroz\ húmedo} * 35.000\ t$$

$$CaS_{anual\ necesaria} = 3.500\ t$$

Con este dato, podemos comprobar que la cantidad de residuos que genera esta planta de procesado del arroz, alcanza para secar su producción producida anualmente. Pero no basándonos en este valor teórico procederemos a realizar el cálculo de la realidad de la planta, Con los datos de las tablas 3 y 8, deducimos que la planta necesita 140 kg/h, de cascarilla para poder generar 459.424 kcal/h lo que equivaldría a 532,31 kWt, para secar la

producción de 95 T cada día a la cual se le extraería 800 kg (H₂O) /día. Entonces la cantidad de cascarilla real, que se necesitaría sería:

$$CaS_{real} = \frac{140 \text{ kg}}{h} * \frac{1 T}{1.000 \text{ kg}} * \frac{8.760 h}{año} = 1.226,4 t$$

Con esto podemos determinar que la planta tiene una sobreproducción de cascarilla y que podría ser utilizada la misma para generar energía.

3.7.17 Matriz DAFO Generada para este Proyecto.

Se estable el siguiente análisis DAFO, para el estudio del caso propuesto.

Tabla 13. Análisis DAFO del proyecto propuesto.

DEBILIDADES	AMENAZAS
<ul style="list-style-type: none"> • Costo de inversión elevado. • En la Implementación, para de personal adecuado para la operación del ciclo. • No existen garantía de otros proyectos implementados y que estén trabajando, con cascarilla de arroz en el Ecuador. 	<ul style="list-style-type: none"> • Que cambie la regulación con respecto a proyectos de este tipo. • Es un mercado que aún no ha sido muy profundizado. • Desconocimiento social por parte de los sectores aledaños. • Competencia con otras aplicaciones donde se utilice la cascarilla del arroz con otros fines. • Que varíen los precios de compra de energía. • En tema ambientales, que exista algún tipo de impedimento en la aprobación de este tipo de proyecto. • Que por cambio climáticos o alteraciones en los tiempos de estacionalidad; no se obtenga la cantidad necesaria de cascarilla del arroz, para poder operar el ciclo.

FORTALEZAS	OPORTUNIDADES
<ul style="list-style-type: none"> • Que la biomasa a partir de la cascarilla del arroz es un recurso renovable y muy competitivo. • Obtención de energía limpia y reducción de GEI. • Puede ser una fuente de creación de empleo de forma directa e indirecta. • Se aprovechan los residuos, que en casos terminan siendo contaminantes, por medio de una economía circular. • El tema propuesto es un nuevo sistema de generar energía. • Podrá abastecer de energía a comunidades cercanas, evitando pérdidas por el transporte de energía. 	<ul style="list-style-type: none"> • Necesidad de la energía, y que mejor que sea renovable y con el desecho de su producción. • Desarrollo y reconocimiento de la planta. • En el ámbito de la energía es un sector en crecimiento y con buenas expectativas a futuro. • Leyes actuales a favor de la implementación de la generación por medio de las energías renovables.

Fuente: Elaboración propia con datos de (Robles & Rodríguez, 2018, p. 7)

Capítulo 4: Análisis de Costo del Proyecto

4.1 Análisis del Potencial Bioenergético Económico.

El análisis económico es una parte complementaria de cualquier proyecto técnico, el principal objetivo de este último apartado es analizar si el proyecto es viable económicamente con el fin de verificar si el proyecto se puede implementar o no. Para el análisis de este proyecto utilizaremos los ingresos, egresos y la viabilidad económica del proyecto.

Para este análisis consideraremos el costo de capital (CAPEX), estos cálculos encierran los costos de todos los activos como la planta, las maquinarias, la subestación y todo lo que se necesite para poner en marcha el proyecto. En el documento (International Finance Corporation, 2017, pp. 129-131) existe información con respecto a estos proyectos con valores referenciales en base a la ubicación dónde se vaya a instalar, base de la tecnología a usar y otros factores entre sí. De donde se puede obtener un valor referencial de Usd/kWe, valor que se establece para plantas de a vapor, de generación eléctrica en los rangos de capacidad media entre (1MWe – 5 MWe), claro está que esta información será comparada con precios reales que se puedan obtener con respecto a la tecnología propuesta a implantar.

Otro valor que se tendrá en consideración dentro de la inversión final es el despliegue de las líneas eléctricas al punto de conexión, que para este caso se hará en un punto de conexión cercano con una línea de 13.8 kV.

4.2 Costo del Proyecto.

4.2.1 Inversión.

Para determinar los costos por construcción y la adquisición de equipos para la implementación de un ciclo Rankine para generar calor y electricidad en la planta de procesamiento de arroz Gloria Matilde, se considera como parte del análisis técnico – económico el siguiente presupuesto.

4.2.1.1 Costo en la Adquisición de Equipos y Montaje.

Dentro de este análisis se incluirá la ingeniería del proyecto y la construcción del proyecto, ya que estos sin duda estos dos son valores representativos del proyecto.

Tabla 14. Inversión en la construcción de la planta de generación de electricidad y vapor en la industria Gloria Matilde S.A.

Ítems	Descripción	Inversión [USD]	% Sobre el total	Total de márgenes [USD]
1	Ingeniería	80.000,00	3,03%	88.000,00
2	Obras para captación de agua / Planta de tratamiento de agua	32.000,00	1,21%	35.200,00
3	Obra de vertido de energía a la red (Subestación, celdas y líneas)	980.000,00	37,10%	1.078.000,00
4	Gestión de permisos (Permisos, Gastos aduaneros, estudios de impacto ambiental, etc.)	55.000,00	2,08%	60.500,00
5	Licencias Municipales	3.500,00	0,13%	3.850,00
6	Obras civiles (Cimentaciones, edificios, movimiento de tierras, etc.)	450.000,00	17,04%	495.000,00
7	Caldera / Sistema producción de vapor	180.000,00	6,81%	198.000,00
8	Ciclo vapor-agua	170.000,00	6,44%	187.000,00

9	Turbinas de vapor - generador	280.000,00	10,60%	308.000,00
10	Sistema de refrigeración	85.000,00	3,22%	93.500,00
11	Sistema eléctrico interno (Tableros, sistemas de puesta a tierra, etc.)	150.000,00	5,68%	165.000,00
12	Puesta en marcha	25.000,00	0,95%	27.500,00
13	Sistema de seguridad, contra incendios	28.000,00	1,06%	30.800,00
14	Chimenea emisión de gases	36.000,00	1,36%	39.600,00
15	Planta y sistema de aire comprimido	42.000,00	1,59%	46.200,00
16	Sistema de inyección química	15.000,00	0,57%	16.500,00
17	Gastos indirectos de la construcción	30.000,00	1,14%	33.000,00
TOTAL		2.641.500,00	100,00%	2.905.650,00

Fuente: Elaboración propia con datos referenciales de proyectos ejecutados de este tipo.

Con estos valores podemos deducir que los mismos no están tan alejados de la realidad, ya que según el marco Normativo vigente del Plan de Energías renovables 2011-2020 (IDAE), nos indica que la inversión necesaria para una planta de biomasa, en la generación de cada kW de potencia eléctrica la inversión aproximada es de USD 2.215,00 (IDAE, 2021, p. 453).

4.2.1.2 Financiamiento.

Una vez que se han calculado los costos de implementación del proyecto, el propietario de este decide buscar un financiamiento para cubrir este valor en el menor tiempo posible y así

obtener los beneficios económicos esperados y recuperar la inversión inicial a corto plazo. Este no dispone de esta cantidad de capital propio, por lo que decide realizar un préstamo a una entidad financiera. Pare efecto de estudio se considerará un financiamiento donde los pagos se realizaran durante 5 años, a una tasa de interés del 9,76% para proyectos que requieren montos superiores de USD 500.000,00 (CFN Corporación financiera Nacional, 2022), tasa actualmente vigente en el Ecuador. Se considera que el 65% de la inversión será cubierto por una entidad financiera y el 35% restantes será mediante capital propio. En la tabla 13 se muestra la amortización del préstamo que realizará el dueño del proyecto, considerando que el 65% de la inversión total representada por (2'905.650,00) en un lapso de 5 años la deuda en dicho tiempo será cancelada en su totalidad.

Tabla 15. Cálculo de la amortización de la deuda.

Año	Dividendo [USD]	Capital [USD]	Interés [USD]	Saldo [USD]
0			95.186,53	1.950.543,75
1	511.397,55	321.024,48	190.373,07	1.629.519,27
2	511.397,55	352.356,47	159.041,08	1.277.162,80
3	511.397,55	386.746,46	124.651,09	890.416,34
4	511.397,55	424.492,92	86.904,63	465.923,42
5	511.397,55	465.923,42	45.474,13	0,00

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2 Ingresos.

4.2.2.1 Tarifas Vigentes por la Generación de Energía Renovables en el Ecuador.

Para conocer el ingreso que se obtendrá por la venta de energía, se debe revisar la ley vigente en el Ecuador la cual es la Regulación N° Conelec – 009/06 de la tabla 16, que hace referencia a las tarifas y los precios referenciales que tiene la generación y venta de energía por cada tipo de renovable (Precios de la energía producida con recursos energéticos renovables no convencionales, 2006, p. 5).

Tabla 16. Precios en centavos de dólar por kWh, generado con energía renovable.

CENTRALES	PRECIO	PRECIO
	(cUSD/kWh)	(cUSD/kWh)
	Territorio	Territorio Insular
	Continental	de Galápagos
Eólicas	9.39	12.21
Fotovoltaicas	52.04	57.24
Biomasa y Biogás	9.67	10.64
Geotérmicas	9,28	10.21

Pequeñas centrales hidroeléctricas hasta 5 MW	5.80	6.38
Pequeñas centrales hidroeléctricas mayores a 5 MW hasta 100 MW	5.00	5.50

Fuente: (Precios de la energía producida con recursos energéticos renovables no convencionales, 2006)

4.2.2.2 Total de Ingresos por Venta de Energía.

Por lo general el principal ingreso que tiene una planta de generación eléctrica es la venta de energía al Sistema Nacional Interconectado y/o al autoconsumo propio interno de la planta. Este último en este estudio, representa un ingreso económico para esta planta, ya que no deberá incurrir al pago de electricidad, ya que esta misma la genera. En el párrafo siguiente analizaremos con más profundidad este punto y con valores más reales.

Como se analizó en el inciso anterior, para centrales eléctricas menores de 5 MW, el valor de venta de la energía es de 0,096 Usd/kWh, entonces de la ecuación (4.34) podemos calcular los ingresos que se generan por la venta de energía. Para efecto de cálculos propondremos una venta de 800 kW, ya que 200 kW serán utilizados para el uso interno de la planta, y dejando un margen de 40 kW para un futuro crecimiento.

$$I_{energía} = E_{venta} * C_{venta} \quad (4.34)$$

$$I_{energía} = \left(800kWe * \frac{8.760 h}{año} * \frac{7.200 h}{8.760 h} \right) * 0,096 \left[\frac{Usd}{kWh} \right]$$

$$I_{energía} = 626.400 \frac{Usd}{año}$$

4.2.2.3 Vigencia de los Precios de Venta.

Según la regulación No. CONELEC – 001/13 “*La duración de este periodo es de 15 años y se contabilizará a partir de la suscripción del Título Habilitante o Registro, para todas aquellas empresas que hubieren suscrito.*”

4.2.2.4 Reducción de las Emisiones de CO₂.

Para determinar este valor de la reducción de las emisiones de CO₂ recurriremos a la ecuación (4.35).

Esta ecuación nos expresa la reducción de emisiones anuales a consecuencia de la generación de energía eléctrica del mix energético que tiene el Ecuador, y que es en función del factor de emisión y la cantidad de energía que se exportará a la red y que se dispondrá para el autoconsumo (MWh), que se expresó en la ecuación (29) de capítulos anteriores. Según el informe del (Operador Nacional de Electricidad CENACE, 2020, p. 29) el factor de emisión del Ecuador para el año 2020 es 0,383 tCO₂ por cada MWh de energía eléctrica que se genera.

$$T_{CO_2eq} = EF_{grid} * E_{generada} \quad (4.35)$$

$$T_{CO_2eq} = 0,383 * \frac{[tCO_2]}{MWh} * 7.776 \frac{MWh}{año}$$

$$T_{CO_2eq} = 2.978,20 \frac{[tCO_2]}{año}$$

Entonces con estos datos para determinar el ingreso que se puede generar por la venta de certificados de emisiones de CO₂ se tomará en cuenta que el precio de los CERs para el año 2021 tienen un valor de 0.14 Usd/tCO₂ (SENDECO₂, 2021).

$$I_{CO_2} = T_{CO_2eq} * CERs \quad (4.36)$$

$$I_{CO_2} = 2.978,20[tCO_2eq] * 0,15 \frac{[USD]}{tCO_2}$$

$$I_{CO_2} = 446,73 \frac{USD}{año}$$

En el País, el mercado de la venta de carbono está presente desde al año 2.003; dónde ya se desarrollan proyectos de mecanismos que tengan un desarrollo limpio (MDL) y el cual ha estado en constante crecimiento hasta la actualidad. Ya que el estado por medio de esta actividad aspira recibir alrededor de 4,6 millones de dólares anuales, durante los diez próximos años por el desarrollo de la misma (Gallegos, 2022).

4.2.2.5 Ingreso por Energía que se Dejará de Comprar al SNI.

Este es un dato de mucha relevancia, ya que los gastos por compra de energía eléctrica a esta planta le suponen el 35% de sus gastos mensualmente (Información de balance anual dotada por la industria). En la tabla 15 se puede ver reflejado el historial de consumo de energía de los últimos 24 meses, donde la media anual de consumo es de USD 130.000,00.

Tabla 17. Historial de consumo de energía eléctrica de la planta Gloria Matilde S.A

INFORMACION DE FACTURACION					
Año-Mes Emisión	Lectura Actual	Lectura Anterior	Factor Multiplicador	Consumo kWh	Monto [USD]
mar-25	6942	6817	700	126700,00	12.741,89
feb-25	6817	6732	700	75600,00	9.112,17
ene-25	6732	6579	700	151200,00	15.460,58
dic-24	6579	6432	700	165200,00	15.973,45
nov-24	6432	6292	700	163800,00	15.808,86
oct-24	6292	6129	700	167300,00	16.730,65
sep-24	6129	5944	700	205800,00	19.673,88
ago-24	5944	5747	700	232400,00	21.422,92
jul-24	5747	5552	700	196000,00	19.345,83

jun-24	5552	5405	700	151200,00	15.247,76
may-24	5405	5247	700	133000,00	14.195,95
abr-24	5247	5070	700	150500,00	15.751,26
mar-24	5070	4950	700	100100,00	11.059,99
feb-24	4950	4804	700	143500,00	10.402,80
ene-24	4804	4665	700	161700,00	15.416,02
dic-23	4665	4552	700	158200,00	14.337,20
nov-23	4552	4442	700	163800,00	14.266,64
oct-23	4442	4325	700	171500,00	14.945,78
sep-23	4325	4209	700	170100,00	16.006,55
ago-23	4209	4090	700	151900,00	13.652,73
jul-23	4090	3977	700	133700,00	13.313,57
jun-23	3977	3881	700	130900,00	12.418,06
may-23	3881	3813	700	68600,00	2.318,58
abr-23	3813	6942	700	142800,00	14.183,58

Fuente: Elaboración propia con datos otorgados de la CNEL E.P

4.2.3 Egresos.

4.2.3.1 Costo de Operación y Mantenimiento.

Como en todo proyecto de implementación hay que considerar los costos de la operación, conservación y el mantenimiento que conlleva durante su funcionamiento (OPEX); esto básicamente corresponde a la responsabilidad social y económica con el personal que

estará a cargo de operar, controlar y mantener el sistema operando sin ningún inconveniente, considerando seguridad de los trabajadores, sueldos, repuestos y mantenimiento en este caso. Se establece la siguiente tabla, teniendo el SBU que tiene Ecuador y de acuerdo con las competencias y habilidades que debe tener una persona, para operar este tipo de centrales.

Tabla 18. Opex de mantenimiento de la planta propuesta.

Ítems	Descripción	Cantidad	Salario [USD]	Total [USD]
1	Jefe de operación y Mantenimiento	1	30.000,00	30.000,00
2	Personal de mantenimiento	4	9.600,00	38.400,00
3	Horas Extras	480	3,80	1.824,00
4	Gastos de Oficina	12	250,00	3.000,00
5	Herramientas	1	3.500,00	3.500,00
6	Repuestos	1	6.000,00	6.000,00
7	Previsión - Pagas extras seguros médicos, seguridad social, etc.	12	1.500,00	18.000,00
8	EPP's	12	200,00	2.400,00
COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO				103.124,00

Fuente: Elaboración propia con datos del mercado Ecuatoriano.

4.2.4 Rentabilidad Económica.

Una vez analizados los ingresos y egresos que conlleva la ejecución de este proyecto, este nos permite conocer la viabilidad financiera del mismo, que son medidos a través de varios indicadores financieros.

Tasa Mínima Atractiva de Retorno (TMAR)

Es una tasa que su resultado nos define si el proyecto analizado generará ganancias. La TMAR se expresa mediante la ecuación (4.37).

$$TMAR_{capital} = \dot{x} + pr \quad (4.37)$$

Tasa de Inflación.

Como parte del capital que se utilizará para la ejecución de este proyecto es financiado por una entidad bancaria, se deberá calcular el valor de TMAR correspondiente al proyecto planteado, y este valor deberá ser mayor a la tasa de inflación calculada.

Para este estudio se trabaja con valores que se tomaron desde el año 2017 al 2022 (INEC, 2022), donde en la Tabla 19 se muestran los valores de la tasa de inflación de los años antes citados.

Tabla 19. Proyección de la tasa de inflación anual.

Año	Tasa de inflación anual [%]
2018	1,09
2019	-0,78
2020	0,19
2021	1,01
2022	-1,47

Fuente: Elaboración propia con datos de (INEC, 2022)

$$\dot{x} = \sqrt[5]{x_1 * x_2 * x_3 * x_4 * x_5} \quad (4.38)$$

Para efecto de este cálculo tomaremos en cuenta datos de inflación de los últimos 5 años, entonces con esto calcularemos la media geométrica con la tasa de inflación correspondiente y por medio de la ecuación (38), dónde los datos de los años anteriores son x_1 , x_2 , x_3 , x_4 , x_5 respectivamente.

$$\dot{x} = \sqrt[5]{(1,09) * (-0,78) * (0,19) * (1,01) * (-1,47)}$$

$$\dot{x} = 0,75\%$$

Prima por Riesgo o Premio de Mercado.

Este es un valor del crecimiento real del valor del dinero y lo llaman así, porque los inversionistas invierten su dinero en algún tipo de proyecto o negocio y este siempre cuenta con algún tipo de riesgo. En esta acción los inversionistas buscan obtener algún tipo de ganancia adicional por encima de la tasa de inflación, el valor fluctuará entre el 10 al 15%, esto va depender del sector comercial/industrial dónde se vaya a implementar el proyecto.

$$TMAR_{capital} = 0,75\% + 9,76\%$$

$$TMAR_{capital} = 10,51\%$$

En la Tabla 20 se puede visualizar el valor del TMAR para el costo total del proyecto (capital propio de inversión más el préstamo que se realizará a una entidad bancaria), cuyo valor es 10,01%. Este valor es el rendimiento mínimo que deberá ganar la planta para poder pagar el crédito a la tasa de interés del 9,76%

Tabla 20. Tasa de descuento.

Origen de los recursos	TMAR [%]	FP (Factor de ponderación [%])	Costo ponderado [%]
Capital propio	10,51	35	3,67

Deuda	9,76	65	6,34
-------	------	----	------

Fuente: Elaboración propia

$$TMAR_{Proyecto} = (TMAR_{capital} * FP_{capital}) * (TMAR_{deuda} * FP_{deuda}) \quad (4.39)$$

$$TMAR_{Proyecto} = (10,51\% * 35\%) + (9,76\% * 65\%)$$

$$TMAR_{Proyecto} = 10,01\%$$

Tasa de Descuento.

Para estos cálculos la tasa de descuento debe ser mayor, a la tasa mínima atractiva de retorno para que así el proyecto sea viable, por tal motivo asumimos una tasa de descuento del 10,5%.

Para determinar la rentabilidad económica de este proyecto vamos a calcular los indicadores financieros, la tasa interna de retorno (TIR), valor actual neto (VAN), pay-back (plazo en que se recupera la inversión inicial) y la relación costo beneficio.

4.2.5 Valor Actual Neto (VAN).

Este método se lo emplea para determinar si al desarrollar el proyecto el mismo es viable o no. El procedimiento básicamente consiste en actualizar al presente los flujos de caja que se van a obtener durante la vida útil que tenga el proyecto. Básicamente a cada flujo de caja que se tenga a futuro se le aplica un descuento mediante la tasa de descuento y al valor resultante en año cero se le resta el valor de la inversión inicial obteniendo así el VAN. Este valor se lo haya por medio de la ecuación (4.40) y (4.41).

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{Ft}{(1+k)^t} \quad (4.40)$$

La ecuación (40) expresa el valor actual neto del proyecto como función del costo que se hará como inversión inicial (Usd), del flujo de caja que se obtiene en cada periodo (Usd), el de la tasa de descuento (10,5%) y del tiempo que esté funcionando la planta, expresado este dato en años.

En la ecuación (4.41) se muestra el flujo de caja que corresponderá a cada año, teniendo en cuenta otros valores como los gastos, pago de impuestos, el pago de amortización al banco, etc.

$$F_t = (I_t - g_t - I_m - A_m) \quad (4.41)$$

$$F_t = (756.846,73 - 123.748,80 - 321.024,48 - 190.373,07)$$

$$F_t = 121.700,38 \text{ [USD]}$$

$$VAN = -2'905.650,00 + \frac{121.700,38}{(1 + 0,105)^1} + \dots + \frac{851.301,42}{(1 + 0,105)^{20}}$$

$$VAN = 2'032.239,56 \text{ [USD]}$$

En la tabla 21, se muestra el significado del valor numérico del VAN obtenido del proyecto.

Tabla 21. Características del VAN y significado del valor numérico obtenido del proyecto.

Valor	Significado	Decisión
VAN > 0	La inversión ofrece beneficios por encima de la rentabilidad exigida.	El proyecto se lo puede aceptar
VAN < 0	La inversión ofrece pérdidas por debajo de la rentabilidad exigida.	El proyecto deberá ser rechazado.
VAN = 0	La inversión no producirá beneficios ni pérdidas	El proyecto no denota ningún resultado económico. La decisión debe tomarse en función de otros parámetros o criterios.

Fuente:(Figueroa, 2019, p. 76)

4.2.6 Tasa Interna de Retorno (TIR).

Este valor es la tasa de interés que nos puede proporcionar un proyecto con un valor neto nulo, esto quiere decir que si la tasa de interés por la cual los costos de la inversión conducen a unos beneficios. Se establece una tasa de descuento y si esta es superada por la TIR se puede aceptar la inversión, caso contrario se debe rechazar la inversión.

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+TIR)^t} = 0 \quad (4.42)$$

En la ecuación (41), se expresa la tasa interna de retorno del proyecto en el cual el valor del VAN es cero. Esta expresión es en función del flujo de la caja correspondiente a cada periodo analizado F_t (USD), del costo de la inversión I_0 (USD) y del tiempo t de servicio que estará la planta expresada en años.

$$VAN = \frac{121.700,38}{(1 + TIR)^1} + \dots + \frac{851.301,42}{(1 + TIR)^{20}} - 2'905.650,00 = 0$$

$$TIR = 28,56\%$$

En la tabla 22, se muestra el significado del valor número de la TIR que se obtuvo en el proyecto y es de gran importancia ya que es un parámetro financiero muy crítico en la toma de decisiones del proyecto.

Tabla 22. Interpretación de la TIR.

Valor	Significado	Decisión
TIR > k	La inversión producirá una rentabilidad mayor que el coste de oportunidad del capital (k), que es la rentabilidad mínima exigida.	El proyecto se lo puede aceptar
TIR < k	La inversión producirá una rentabilidad menor que el coste de oportunidad del capital (k), que es la rentabilidad mínima exigida.	El proyecto debería no ser aceptado

TIR = k	La inversión no producirá rentabilidad	Es indiferente
----------------	--	----------------

Fuente: (Figueroa, 2019, p. 77)

4.2.7 Tiempo de Recuperación de la Inversión.

Se define como el tiempo en que se tarde en recuperar la inversión inicial del proyecto a través de los flujos de caja generados en los tiempos estipulados. Se considera que la inversión ha sido recuperada en el año en que los flujos de cajas acumuladas en valor presente, superan al valor de la inversión inicial (Figueroa, 2019, p. 77). Analizando los datos del flujo de caja del Anexo 13, podemos determinar que con los beneficios que se obtienen después de haber restado todos los egresos por gastos, el tiempo de retorno de la inversión es:

$$t_r = 7.5 \text{ años}$$

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones.

Una vez habiendo concluido este trabajo de investigación se puede decidir que:

Gracias a la información dotada por la planta, en cuanto a consumos de energía, producción, horas de trabajo, etc; se pudo determinar de una manera más real los criterios técnicos para un correcto estudio.

Así mismos durante el desarrollo de la investigación que tiene como objetivo este TFM, se ha logrado conseguir satisfactoriamente los objetivos que fueron planteados inicialmente, y que obedecen a:

En la industria arrocera Gloria Matilde S.A, la energía de la biomasa (Cascarilla del arroz) es de 7.500 t/año, que se obtienen del 21,5% de las 35.000 t/año que procesa la planta, donde se determina que con esta cantidad de biomasa se obtiene 4.462.573.500 Kcal que transformado a energía eléctrica con el funcionamiento del ciclo Rankine propuesto significan 7.776MWh. La planta tiene un consumo promedio anual de 1.800 MW/año, lo que significaría que se dispondría de 5.976 MW/año que pueden ser vendidos al Sistema Nacional Interconectado. Con este párrafo queda demostrado que se cumplieron los objetivos específicos 1 y 4 que se enlistaron al inicio de este proyecto. El consumo promedio anual que tiene la planta le implica un gasto de 130.000,00 USD lo cuales le implicaría un ahorro al implementarse el proyecto propuesto.

Se estima que el costo de implementación del Ciclo Rankine con recalentamiento, sus accesorios, una subestación elevadora de voltaje, el punto de conexión es de 2.905.650,00 USD y según el análisis financiero realizado para este proyecto, se obtiene un retorno de la inversión en un periodo de 7.5 años.

Al realizar el estudio del potencial bioenergético técnico de la cascarilla del arroz, en el ciclo Rankine con recalentamiento propuesto, se obtuvieron los siguientes resultados:

Mediante este ciclo se generará electricidad, para que el sistema logre generar los 1,2 MW el fluido de trabajo que ingresa a la turbina debe hacerlo a una temperatura de 375,5° energía térmica que se genera en la caldera 2.878,8 kJ/kg, trabajo realizado por la turbina 1.013,80 kJ/kg y con una eficiencia del ciclo del 30,76%, valor que está situado dentro del promedio de eficiencia de otros proyectos con este ciclo de trabajo.

Para que el ciclo de este proyecto esté operativo todo el tiempo propuesto, se necesita de disponer de 7.240,66 t/año, y la planta tiene disponible 7.500 t/año siendo la disponibilidad más alta que la demanda, con esto se puede concluir y garantizar que el ciclo estará operativo aún en épocas de invierno, cuando exista alguna probabilidad de desabastecimiento.

Al implementar este sistema de cogeneración se estaría dejando de emitir 2.978,20 tCO₂/año, que sería 7.776 MW/año de energía a partir de la biomasa de la cascarilla del arroz, esto le representa un ingreso anual a la planta de 446,73 USD/año. Esto debido a que parte de la energía que consume la planta, es generada en centrales termoeléctricas a partir de combustibles fósiles. Actualmente esta energía, aproximadamente los 1.800 MW/año que tiene la planta de consumo; equivale a 689,4 tCO₂/año; siendo un buen indicador para el efecto del calentamiento Global.

Al utilizar de mejor manera esta biomasa es decir de una manera más eficiente estaría esta empresa contribuyendo al concepto de una economía circular que al final hace más rentable el proceso, reutilizando la biomasa para los 2 procesos descritos a lo largo de este estudio.

Y por último, el proyecto planteado resulta aplicable para la industria Gloria Matilde S.A.

Recomendaciones.

Aunque se ha realizado el estudio con la biomasa que dispone esta planta, también se podría hacer la adquisición de más cascarilla de arroz de otras industrias de este tipo y poder así aumentar la potencia de generación y la energía a inyectar a la red. Esto debido a que en parte de este estudio se pudo comprobar que existe el potencial bioenergético en el sector y sus alrededores (otras provincias). En caso de decidir por este punto, se deberá realizar estudios de factibilidad del transporte de la nueva cascarilla y toda la logística que esto conlleva.

El agua que se utilizará en el ciclo de Rankine propuesto, deber ser un agua tratada. Por lo que se debe realizar un estudio previo de la calidad de la misma y de su uso antes de ingresar a la caldera; esto con el objetivo de que no vaya a afectar la eficiencia de la planta debido a la corrosión que se pueda generar al interior de la caldera.

De la combustión de la cascarilla del arroz, se generan cenizas, que no fue objeto de estudio en el presente proyecto; pero se lo debe tener en cuenta ya que la misma podría ser utilizada para otros procesos: como por ejemplo, la fabricación de filtros de carbón activado, también como aditivo para uso de las mezclas de morteros, entre otros. Se deja esta propuesta abierta, para futuros trabajos de investigación de esta índole.

Referencias Bibliográficas

- Abreu, J. (2019). *Hipótesis, Método & Diseño de Investigación*. 11.
- Angelis-Dimakis, A., Biberacher, M., Dominguez, J., Fiorese, G., Gadocha, S., Gnansounou, E., Guariso, G., Kartalidis, A., Panichelli, L., Pinedo, I., & Robba, M. (2011). Methods and tools to evaluate the availability of renewable energy sources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(2), 1182-1200. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.049>
- ARCERNNR. (2023). *Estadística anual y multianual del sector eléctrico ecuatoriano 2023*. https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2024/04/EstadisticaAnual2023-WEB-2.pdf?utm_source
- Arranz-Piera, P., Kemausuor, F., Darkwah, L., Edjekumhene, I., Cortés, J., & Velo, E. (2018). Mini-grid electricity service based on local agricultural residues: Feasibility study in rural Ghana. *Energy*, 153, 443-454. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.058>
- Arteaga, J. (2020). *Como requisito para la obtención del título de: MÁSTER EN ECOEFICIENCIA INDUSTRIAL MENCIÓN EN GESTIÓN DE LA*. 69.
- Asociación Española Cogeneración. (2025). *La Cogeneración en España*. <https://www.acogen.es/la-cogeneracion-en-espana/>
- ATECYR. (2022). *Torres de refrigeración, guía técnica*. Ministerio de Ciencia y Tecnología, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). <https://www.idae.es/publicaciones/guia-tecnica-torres-de-refrigeracion>
- Balance Energético. (2020). *Balance Energético Nacional 2020. Energía, Sociedad y ambiente*. (p. 30). Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables. <https://www.recursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2021/09/01-CAPI%CC%81TULO-01BEN-2020-Web-17-46.pdf>

- Bouille, D., Carpio, C., Di Sbroiavacca, N., Dubrovsky, H., Nadal, G., Lallana, F., Landaveri, R., Pistonesi, H., Plauchú, J., Recalde, M., & Soria, R. (2018). *Identificación de medidas de eficiencia energética para la Hoja de Ruta* (p. 37). <https://fddocuments.es/document/identificacin-de-medidas-de-eficiencia-energtica-para-la-potencial-de-eficiencia.html>
- Cañón, M., & Alba, O. (2017). *EVALUACIÓN DEL POTENCIAL COMO BIOCOMBUSTIBLE DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS ALIMENTARIOS SECOS OBTENIDOS EN EL SECADOR SOLAR DE LA UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS - FACULTAD TECNOLÓGICA*. <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/13409/Ca%c3%b1%c3%b3nAcostaManuelAlexander2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Cengel et al. - 2019—Termodinámica.pdf*. (s. f.).
- Cengel, Y. A., Boles, M. A., Kanoglu, M., & Navarro Salas, R., Rojas Tapia, Alejandro, Martínez Bautista, Abraham Laurencio, Soto Urbina, Rodolfo, Evangelista Benites, Guillermo, Del Valle Granados, Ignacio, Astorga Cordero, Eligio. (2019). *Termodinámica*. <http://www.ebooks7-24.com/?il=19192>
- CFN Corporación financiera Nacional. (2022). *Matriz de tasas de intereses*. <https://www.cfn.fin.ec/wp-content/uploads/downloads/tasaDEinteres/tasa-de-interes-actual.pdf>
- Chungsangunsit, T., Gheewala, S., & Patumsawad, S. (2019). *Emission Assessment of Rice Husk Combustion for Power Production*. 6.
- Cisneros, D. (2023). *Integración de la Cogeneración en el Mercado Eléctrico* [Universidad Pontificia Comillas]. <https://www.iit.comillas.edu/docs/TM-03-004.pdf#:~:text=Integraci%C3%B3n%20de%20la%20Cogeneraci%C3%B3n%20en>

%20el%20Mercado%20El%C3%A9ctrico5,vez%20la%20rentabilidad%20de%20las
%20instalaciones%20de%20Cogeneraci%C3%B3n.

Echeverría, M. (2020). *Caracterización energética de la cascarilla de arroz para su aplicación en la generación de energía termoeléctrica.*
<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/2058/1/CD-2863.pdf>

Figuroa, E. (2019). *ESTUDIO TÉCNICO-ECONÓMICO PARA LA IMPLANTACIÓN DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE BIOMASA EN ANDALUCÍA.*
<https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/26821/Trabajo%20fin%20de%20M%c3%a1ster%20Enrique%20Figuroa%20Luque.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Gallegos, M. (2022). *Análisis mercado de carbono en el Ecuador.*
<https://www.eumed.net/cursecon/ecolat/ec/2012/magg.html#:~:text=En%20Ecuador%2C%20el%20mercado%20de%20carbono%20est%C3%A1%20presente,aprovechar%20%C3%ADntegramente%20en%20este%20mercado%20con%20proyectos%20hidroel%C3%A9ctricos.>

García, D. (2018). *ESTUDIO Y DISEÑO DE LAS INSTALACIONES DE UNA PLANTA DE BIOMASA.*
https://tauja.ujaen.es/jspui/bitstream/10953.1/8951/1/TFG_RECURSOS_ENERGETICOS__DAVID_GARCIA_GAITAN.pdf?msckid=673699aad11211ecb3a7f167822e7458

Henao, J., Palacios, L., Bedoya, A., Ramírez, J., & Navarrete, M. (2018). Importancia de las plantas de cogeneración. *Polo del Conocimiento*, 2(12), 124.
<https://doi.org/10.23857/pc.v2i12.416>

Hernández, E. (2017). *Análisis de factibilidad de un ciclo Rankine para un digestor y un gasificador.*

- <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/12551/Tesis.pdf?sequence=1>
- Herrera, C. (2022). *LA PRODUCCIÓN DEL ARROZ Y SU INCIDENCIA EN EL DESARROLLO ECONÓMICO DEL CANTÓN DAULE, PROVINCIA DEL GUAYAS*.
<http://201.159.223.180/bitstream/3317/17805/1/T-UCSG-PRE-ECO-ADM-621.pdf>
- IDAE. (2021). *PLAN DE ENERGÍAS RENOVABLES 2011-2020* (p. 824).
https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/documentos_11227_per_2011-2020_def_93c624ab.pdf
- INEC. (2020). *Estadísticas Agropecuarias*. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/estadisticas-agropecuarias-2/>
- INEC. (2021). *Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua-2015-2016-2017*.
<https://www.ecuadorencifras.gob.ec/encuesta-de-superficie-y-produccion-agropecuaria-continua-2015-2016-2017-2/>
- INEC, I. N. de E. y C. (2022). *IPC – Información de años anteriores*.
<https://www.ecuadorencifras.gob.ec/ipc-informacion-de-anos-antiores/>
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2021). *Datos Meteorológicos e Hidrológicos*. <http://www.inamhi.gob.ec/#search>
- Instituto Nacional de Preinversión. (2019). *Atlas Bioenergético del Ecuador*.
<http://bioenergiaecuador.geoenergia.gob.ec/biomasa/download/atlas-bioenergetico-del-ecuador/>
- Instituto Nacional de Preinversión—2019—Atlas Bioenergético del Ecuador.pdf*. (s. f.).
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2017). *Biomasa: Digestores anaerobios*. IDAE.
http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_Digestores_Anaerobios_A2007_0d62926d.pdf

- International Finance Corporation. (2017). *Converting Biomass to Energy* (p. 216).
<https://documents1.worldbank.org/curated/en/451461502956339912/pdf/118738-WP-BioMass-report-06-2017-PUBLIC.pdf>
- International Finance Corporation—2017—Converting Biomass to Energy.pdf.* (s. f.).
- Kwofie, E. M., Ngadi, M., & Mainoo, A. (2016). Local rice parboiling and its energy dynamics in Ghana. *Energy for Sustainable Development*, 34, 10-19.
<https://doi.org/10.1016/j.esd.2016.06.007>
- Landelle, A., Tauveron, N., Haberschill, P., Revellin, R., & Colasson, S. (2017). Organic Rankine cycle design and performance comparison based on experimental database. *Applied Energy*, 204, 1172-1187. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.04.012>
- Lee, K. M., Kuo, S. F., Chien, M. L., & Shih, Y. S. (1988). Parameters analysis on organic rankine cycle energy recovery system. *Energy Conversion and Management*, 28(2), 129-136. [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(88\)90038-6](https://doi.org/10.1016/0196-8904(88)90038-6)
- Lorenzo, V. (2018). *Centrales Termoeléctricas de Biomasa Máster en Energías Renovables en Sistemas Eléctricos*. 6.
- Lucas Herguedas, A. I. de. (2022). *Biomasa, combustibles y sostenibilidad*. ITAGRA.
- MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF. (2011). *MANUAL DE BIOGÁS*.
<https://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>
- Minguito, A. (2019). *CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMIENTO DE TORRES DE REFRIGERACIÓN HÍBRIDAS*. <https://core.ac.uk/download/pdf/79176893.pdf>
- Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables. (2021). *Sistema Nacional de Información (SNI)*. <https://www.recursoyenergia.gob.ec/la-institucion/>
- Mohiuddin, O., Mohiuddin, A., Obaidullah, M., Ahmed, H., & Asumadu-Sarkodie, S. (2019). Electricity production potential and social benefits from rice husk, a case study in

- Pakistan. *Cogent Engineering*, 3(1), 1177156.
<https://doi.org/10.1080/23311916.2016.1177156>
- Muñoz, J. (2018). *SISTEMAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA MEDIANTE CALDERAS DE VAPOR ENERGIZADAS POR RADIACIÓN SOLAR CONCENTRADA*.
https://oa.upm.es/1654/1/JAVIER_MUNOZ_ANTON.pdf
- Operador Nacional de Electricidad CENACE. (2020). *FACTOR DE EMISIÓN DE CO2 DEL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO DE ECUADOR* (p. 40).
https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/11/emision_de_co2_del_sistema_nacional_interconectado_de_ecuador_informe_2020.pdf
- Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura. (2022). *FAOSTAT*.
<https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>
- Pode, R. (2020). Potential applications of rice husk ash waste from rice husk biomass power plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1468-1485.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.051>
- Prada, A., & Cortés, C. (2022). *La descomposición térmica de la cascarilla del arroz: Una alternativa de aprovechamiento integral*. 16.
- Prasara-A, J., & Gheewala, S. H. (2017). Sustainable utilization of rice husk ash from power plants: A review. *Journal of Cleaner Production*, 167, 1020-1028.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.042>
- Precios de la energía producida con recursos energéticos renovables no convencionales, REGULACIÓN No. CONELEC – 009/06 (2006).
<https://regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/12/CONELEC-PreciosRenovables4.pdf>

- Quoilin, S., Broek, M. V. D., Declaye, S., Dewallef, P., & Lemort, V. (2018). Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 168-186. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.028>
- Red Eléctrica de España. (2025). *Generación total 2024*. <https://www.sistemaelectrico-ree.es/informe-del-sistema-electrico/generacion/generacion-de-energia-electrica/generacion-total-de-energia-electrica?>
- Ríos, F. (2018). "Diseño de un sistema de generación termoeléctrica a partir de la cascarilla de arroz, para satisfacer la demanda energética de la empresa agroindustrias Mhil SAC". <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/27115>
- Robles, C., & Rodríguez, O. (2018). *Un panorama de las energías renovables en el Mundo, Latinoamérica y Colombia*. 16.
- Ruíz, J. (2023). *Análisis de la problemática e investigación de aspectos avanzados de la generación eléctrica con biomasa*. <https://investigacion.ubu.es/documentos/5c13b163c8914b6ed3776718?lang=en>
- Samaniego, J., & Espinoza, L. (2017). *ESTUDIO DEL POTENCIAL DE COGENERACIÓN Y TRIGENERACIÓN EN EL ECUADOR* (p. 21). https://www.researchgate.net/publication/323700758_Study_of_the_potential_of_cogeneration_and_trigeneration_in_Ecuador
- SENDECO₂. (2021). *Sistema europeo de negociación de CO₂*. <https://www.sendeco2.com/es/precios-co2>
- SIPA (Sistema de Información Pública Agropecuaria). (s. f.). *Ministerio de Agricultura y Ganadería*. <http://sipa.agricultura.gob.ec/index.php/sipa-estadisticas/estadisticas-social>
- Tancara, C. (2023). *LA INVESTIGACION DOCUMENTAL*. 16.

Vakkilainen, E. K. (2017). *Steam generation from biomass: Construction and design of large boilers*. Butterworth-Heinemann, an imprint of Elsevier.

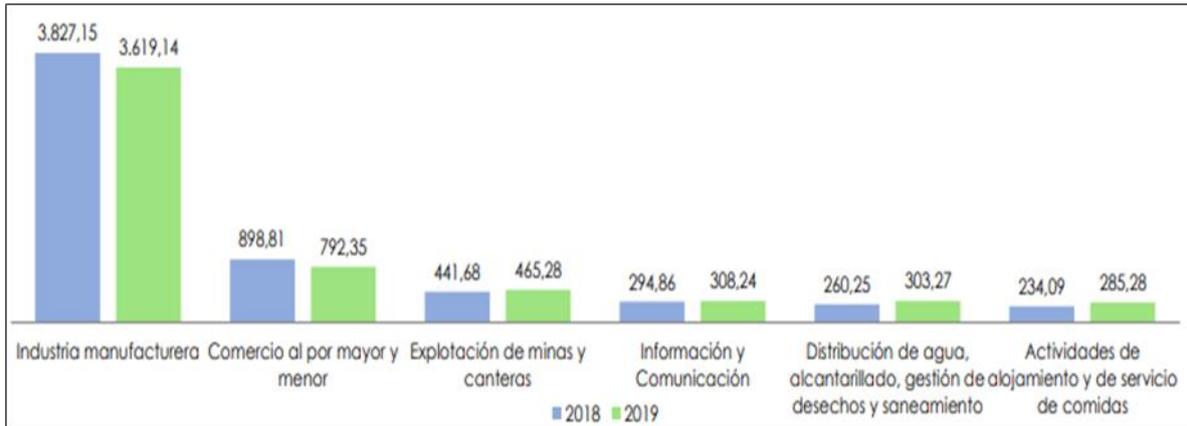
<https://www.sciencedirect.com/book/9780128043899/steam-generation-from-biomass#book-description>

Wolf, J. P. & Dong. (2023). Biomass combustion for power generation: An introduction. En *Biomass Combustion Science, Technology and Engineering* (pp. 3-8). Elsevier.

<https://doi.org/10.1533/9780857097439.1.3>

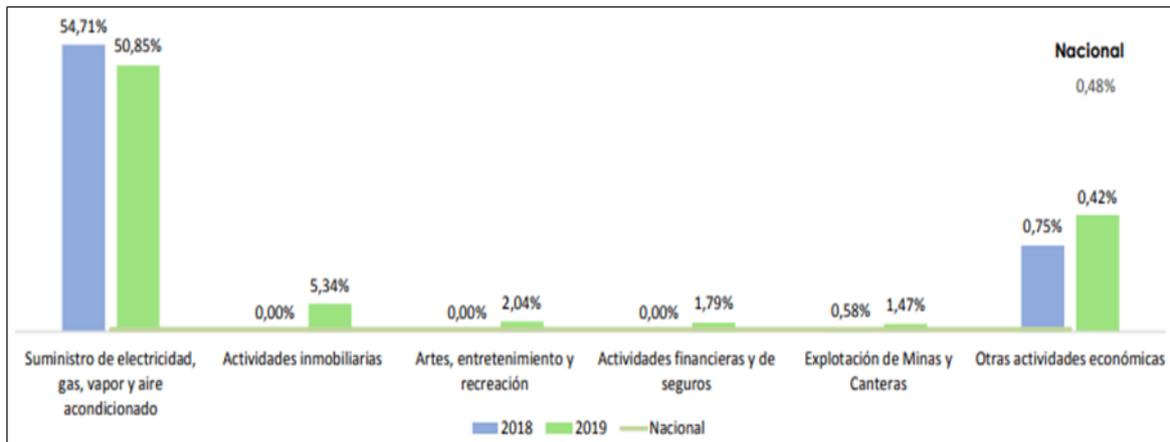
ANEXOS

Anexo 1. Energía eléctrica de red pública (GWh/año), por actividad productiva en el Ecuador



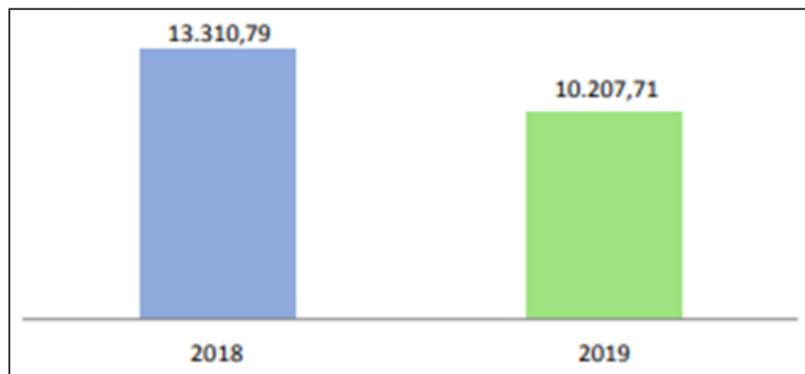
Fuente: (INEC, 2022, p. 18)

Anexo 2. Proporción de empresas que producen energía renovable.

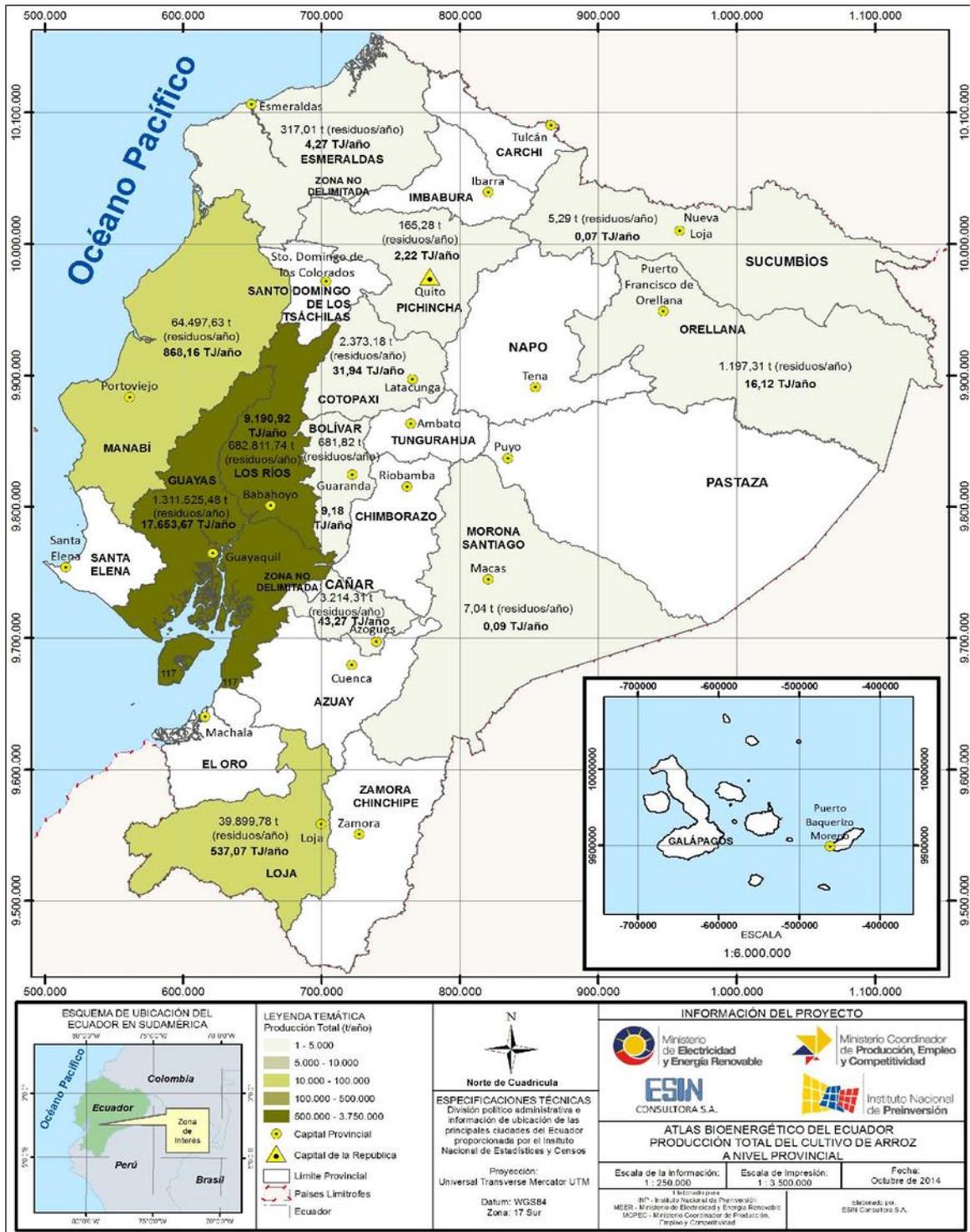


Fuente: (INEC, 2022, p. 33)

Anexo 3. Energía eléctrica generada en GWh/año.



Anexo 4. Mapa con detalles de la producción total de cultivos de arroz a nivel de cada provincia.



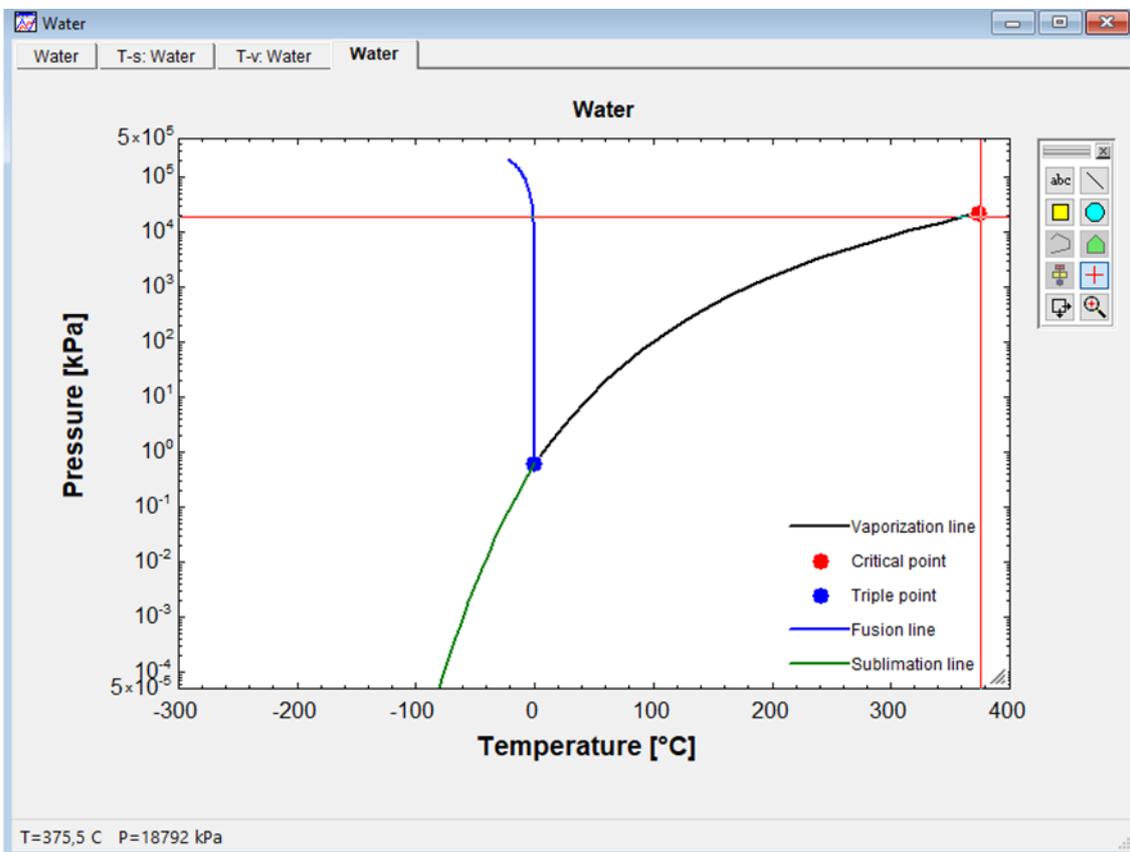
Fuente: (Instituto Nacional de Preinversión, 2019, p. 22)

Anexo 5. Resumen de cultivo de arroz en el Ecuador.

PROVINCIA	CÓDIGO DE CANTÓN	CANTÓN	SUPERFICIE (km ²)	PRODUCCIÓN ABSOLUTA (t/año)	DENSIDAD DE PRODUCCIÓN (t/km ² /año)	RESIDUOS (t/año)	DENSIDAD DE RESIDUOS (t/km ² /año)	ENERGÍA BRUTA (TJ/año)
GUAYAS	118	ALFREDO BAQUERIZO MORENO	218,62	41.977,35	192,01	56.407,07	258,01	759,26
	120	BALZAR	1.187,47	38.454,73	32,38	51.673,54	43,52	695,55
	121	COLIMES	758,37	51.565,26	67,99	69.290,82	91,37	932,68
	137	CRNEL. MARCELINO MARIDUEÑA	254,41	3.675,34	14,45	4.938,74	19,41	66,48
	122	DAULE	466,07	189.853,74	407,35	255.115,96	547,38	3.433,96
	123	DURÁN	300,45	20.316,54	67,62	27.300,36	90,86	367,47
	125	EL TRIUNFO	395,42	9.270,07	23,44	12.456,66	31,50	167,67
	124	EMPALME	715,93	9.724,17	13,58	13.066,86	18,25	175,89
	117	GUAYAQUIL	4.111,67	13.705,62	3,33	18.416,93	4,48	247,90
	141	ISIDRO AYORA	487,47	4.759,52	9,76	6.395,61	13,12	86,09
	138	LOMAS DE SARGENTILLO	66,85	5.108,42	76,42	6.864,43	102,69	92,40
	126	MILAGRO	405,49	4.837,20	11,93	6.499,99	16,03	87,49
	127	NARANJAL	1.732,07	72.553,91	41,89	97.494,32	56,29	1.312,31
	128	NARANJITO	224,83	1.765,46	7,85	2.372,34	10,55	31,93
	139	NOBOL	136,74	25.965,61	189,89	34.891,28	255,16	469,65
	129	PALESTINA	193,53	28.316,74	146,31	38.050,61	196,61	512,18
	130	PEDRO CARBO	934,87	6.967,05	7,45	9.361,97	10,01	126,02
	133	SALITRE	393,43	107.680,65	273,70	144.695,88	367,78	1.947,67
	131	SAMBORONDÓN	358,94	134.402,28	374,44	180.603,06	503,16	2.430,99
	134	SAN JACINTO DE YAGUACHI	509,45	90.001,14	176,66	120.939,04	237,39	1.627,89
132	SANTA LUCÍA	357,68	97.793,68	273,41	131.410,26	367,40	1.768,84	
136	SIMÓN BOLÍVAR	291,60	16.472,57	56,49	22.135,02	75,91	297,95	
		SUBTOTAL	14.501,38	975.167,07	2.468,38	1.310.380,75	3.316,88	17.638,26

Fuente:(Instituto Nacional de Preinversión, 2019, p. 87)

Anexo 6. Obtenida con datos del cálculo y con el software EES.



Fuente: Obtenida con datos del cálculo y con el software EES.

Anexo 7. Obtención de Entalpías, entropías, temperaturas y presiones.

The screenshot shows the EES software interface. The 'Equations Window' contains the following equations:

```

T1=60[C]
x1=0
h1=enthalpy(Water,T=T1,x=x1)
s1=entropy(Water,T=T1,x=x1)
P1=pressure(Water,T=T1,x=x1)
P2=5000 [kPa]
s2=s1
h2s=enthalpy(Water,P=P2,s=s1)
T3=375,5[C]
h3=enthalpy(Water,P=P2,T=T3)
s3=entropy(Water,P=P2,h=h3)
P4=P2/4
s4=s3
h4s=enthalpy(Water,P=P4,s=s3)
h5=enthalpy(Water,P=P4,T=T3)
s5=entropy(Water,P=P4,h=h5)
s6=s5
h6s=enthalpy(Water,P=P1,s=s5)
h6=2521,20[kJ/kg]
T7=40,3[C]
T8=55,0[C]
h7=enthalpy(Water,T=T7,P=P4)
h8=enthalpy(Water,T=T8,P=P4)
    
```

The 'Solution' window shows the following results:

h1 = 251,2 [kJ/kg]	h2s = 256,2 [kJ/kg]	h3 = 3135 [kJ/kg]	h4s = 2808 [kJ/kg]	h5 = 3208 [kJ/kg]	h6 = 2521 [kJ/kg]	h6s = 2400 [kJ/kg]	h7 = 169,9 [kJ/kg]
h8 = 231,3 [kJ/kg]	P1 = 19,95 [kPa]	P2 = 5000 [kPa]	P4 = 1250 [kPa]	s1 = 0,8313 [kJ/kg-K]	s2s = 0,8313 [kJ/kg-K]	s3 = 6,556 [kJ/kg-K]	s4s = 6,556 [kJ/kg-K]
s5 = 7,28 [kJ/kg-K]	s6s = 7,28 [kJ/kg-K]	T1 = 60 [C]	T3 = 375,5 [C]	T7 = 40,3 [C]	T8 = 55 [C]	x1 = 0	

Fuente: Elaboración propia, con cálculos en software EES.

Anexo 8. Ecuaciones analizadas para el cálculo del ciclo termodinámico de Rankine.

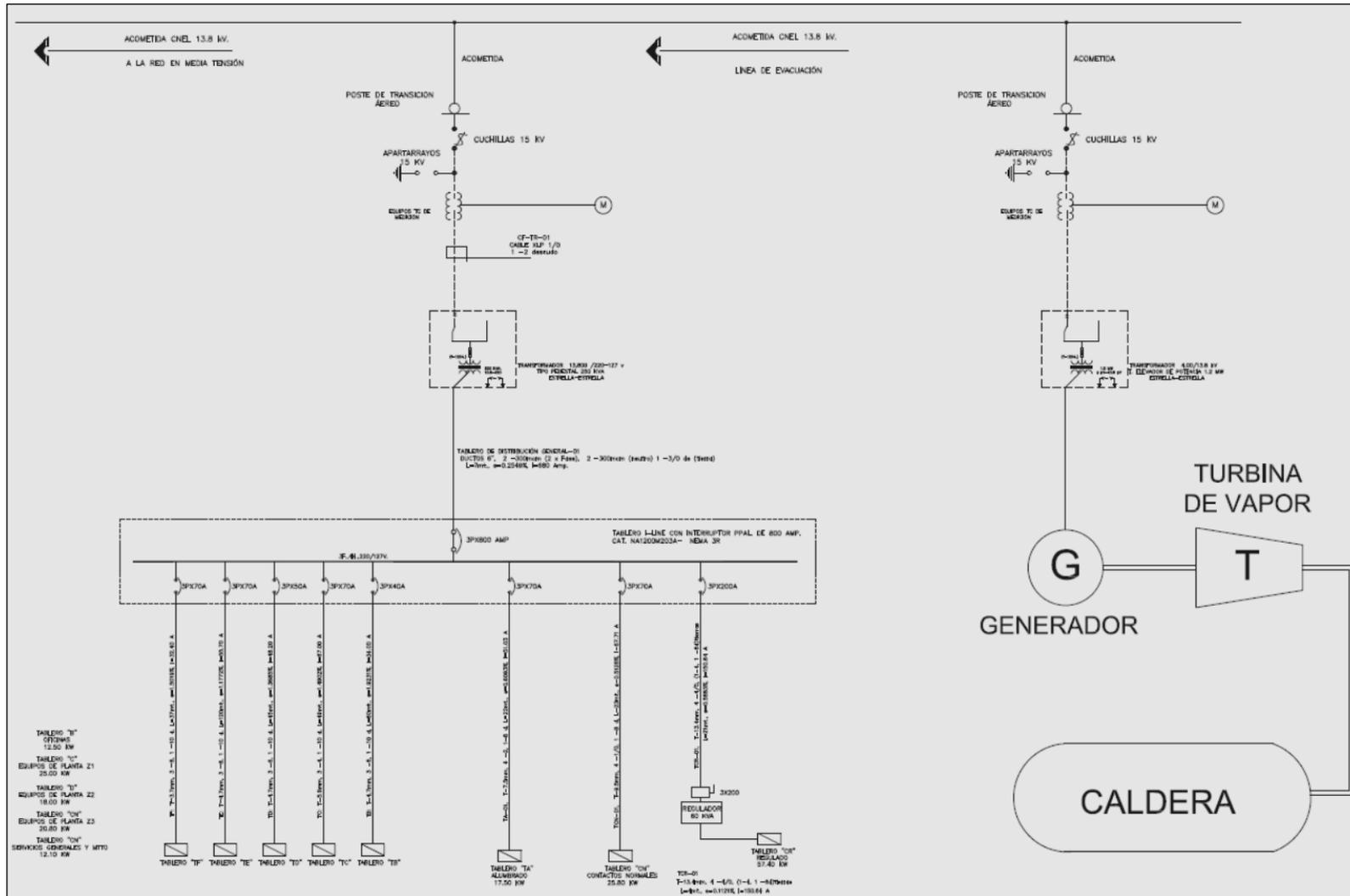
The screenshot shows the 'Equations Window' with the following equations:

```

T1=60[C]
x1=0
h1=enthalpy(Water,T=T1,x=x1)
s1=entropy(Water,T=T1,x=x1)
P1=pressure(Water,T=T1,x=x1)
P2=5000 [kPa]
s2s=s1
h2s=enthalpy(Water,P=P2,s=s1)
T3=375,5[C]
h3=enthalpy(Water,P=P2,T=T3)
s3=entropy(Water,P=P2,h=h3)
P4=P2/4
s4s=s3
h4s=enthalpy(Water,P=P4,s=s3)
h5=enthalpy(Water,P=P4,T=T3)
s5=entropy(Water,P=P4,h=h5)
s6s=s5
h6s=enthalpy(Water,P=P1,s=s5)
h6=2521,20[kJ/kg]
T7=40,3[C]
T8=55,0[C]
h7=enthalpy(Water,T=T7,P=P4)
h8=enthalpy(Water,T=T8,P=P4)
    
```

Fuente: Elaboración propia con simulación en el software EES

Anexo 10. Propuesta de implementación del sistema de generación eléctrica en la planta de arroz Gloria Matilde S.A.



Fuente: Elaboración propia con datos facilitados por la planta.

Anexo 11. Cálculo de pago de la deuda.

	CÁLCULO DE PAGO DE DEUDA	AÑOS																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	Deuda senior																				
1,5	Pago de principal [USD]	0,00	321.024,48	352.356,47	386.746,46	424.492,92	465.923,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9,76%	Pago de intereses [USD]	95.186,53	190.373,07	159.041,08	124.651,09	86.904,63	45.474,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Saldo vivo de la deuda	1.950.543,75	1.629.519,27	1.277.162,80	890.416,34	465.923,42	0,00														

Fuente: Elaboración propia

Anexo 12. Análisis financiero del proyecto de cogeneración. Incluye flujo de caja y beneficios.

	FLUJO DE CAJA	AÑOS																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	Inversión [USD]	2.905.650,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Régimen de inversión	1,00																			
	Gastos financieros y construcción [USD]	95.186,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Total inversión a financiar [USD]	3.000.836,53	0,00																		
	Financiación de la inversión																				
65,00%	Deuda senior [USD]	1.950.543,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
35,00%	Recurso propio [USD]	1.050.292,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Total flujo de caja de la financiación [USD]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Cobro de ingresos [USD]	0,00	756.846,73	770.091,55	783.568,15	797.280,59	811.233,00	825.429,58	839.874,60	854.572,40	869.527,42	884.744,15	900.227,17	915.981,15	932.010,82	948.321,01	964.916,63	981.802,67	998.984,21	1.016.466,44	1.034.254,60
	Pago de gastos [USD]	0,00	123.748,80	125.914,40	128.117,91	130.359,97	132.641,27	134.962,49	137.324,33	139.727,51	142.172,74	144.660,76	147.192,33	149.768,19	152.389,14	155.055,95	157.769,43	160.530,39	163.339,67	166.198,12	169.106,58
	Pago de impuestos sociales [USD]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	12.165,48	12.433,66	12.706,53	12.984,17	13.266,67	13.554,12	13.846,59
	Flujo de caja para el servicio de la deuda	0,00	633.097,93	644.177,14	655.450,24	666.920,62	678.591,73	690.467,09	702.550,26	714.844,89	727.354,68	740.083,39	753.034,84	766.212,95	767.456,20	780.831,40	794.440,67	808.288,11	822.377,87	836.714,20	851.301,42
	Pago de principal [USD]	0,00	321.024,48	352.356,47	386.746,46	424.492,92	465.923,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Pago de intereses [USD]	0,00	190.373,07	159.041,08	124.651,09	86.904,63	45.474,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Flujo de caja generado por el proyecto [USD]	0,00	121.700,38	132.779,59	144.052,69	155.523,07	167.194,18	690.467,09	702.550,26	714.844,89	727.354,68	740.083,39	753.034,84	766.212,95	767.456,20	780.831,40	794.440,67	808.288,11	822.377,87	836.714,20	851.301,42
	TIR del accionista del proyecto [USD]	-1.050.292,79	121.700,38	132.779,59	144.052,69	155.523,07	167.194,18	690.467,09	702.550,26	714.844,89	727.354,68	740.083,39	753.034,84	766.212,95	767.456,20	780.831,40	794.440,67	808.288,11	822.377,87	836.714,20	851.301,42
	28,57%																				
	VAN del accionista del proyecto [USD]	2.032.239,56																			
	CUENTA DE RESULTADOS																				
	Ingresos de operación [USD]	0,00	756.846,73	770.091,55	783.568,15	797.280,59	811.233,00	825.429,58	839.874,60	854.572,40	869.527,42	884.744,15	900.227,17	915.981,15	932.010,82	948.321,01	964.916,63	981.802,67	998.984,21	1.016.466,44	1.034.254,60
	Gastos de operación [USD]	0,00	123.748,80	125.914,40	128.117,91	130.359,97	132.641,27	134.962,49	137.324,33	139.727,51	142.172,74	144.660,76	147.192,33	149.768,19	152.389,14	155.055,95	157.769,43	160.530,39	163.339,67	166.198,12	169.106,58
	Amortización de la inversión [USD]	0,00	157.938,76	157.938,76	157.938,76	157.938,76	157.938,76	157.938,76	157.938,76	157.938,76	157.938,76	157.938,76	157.938,76	157.938,76	157.938,76	157.938,76	157.938,76	157.938,76	157.938,76	157.938,76	157.938,76
	Gastos financieros [USD]	0,00	190.373,07	159.041,08	124.651,09	86.904,63	45.474,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Beneficio antes de impuestos [USD]	0,00	284.786,10	327.197,30	372.360,39	422.077,22	475.178,34	532.528,32	544.611,50	556.906,13	569.415,91	582.144,62	595.096,08	608.274,19	621.692,92	635.326,30	649.208,43	663.333,51	677.705,73	692.329,55	707.209,25
2%	Impuesto de la Renta [USD]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	12.165,48	12.433,66	12.706,53	12.984,17	13.266,67	13.554,12	13.846,59	14.144,19
	Beneficio después de impuestos [USD]	0,00	284.786,10	327.197,30	372.360,39	422.077,22	475.178,34	532.528,32	544.611,50	556.906,13	569.415,91	582.144,62	595.096,08	596.108,71	609.249,26	622.619,77	636.224,27	650.066,84	664.151,66	678.482,96	693.065,07

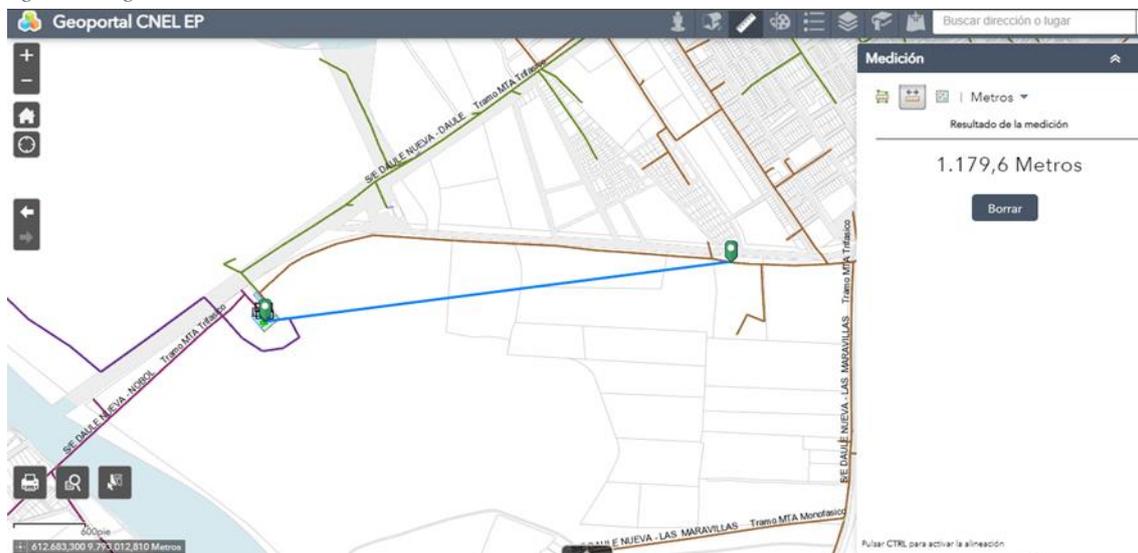
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 13. Datos principales para el análisis del cálculo financiero

HIPÓTESIS		RESULTADOS	
Inversión en construcción	2.905.650,00	ECONÓMICOS	
Factor de sensibilidad	1,00	TIR	28,57%
Escenarios	1,00		
		Plazo del proyecto [años]	20
Deuda senior	65,00%		
Capital social	35,00%		
Tpo de interés	9,76%		
Ingresos	756.846,73		
Factor de sensibilidad	1,00		
Factor de escenario	1,00		
Gastos	103.124,00		
Factor de sensibilidad	1,20		
Factor de escenario	1,00		

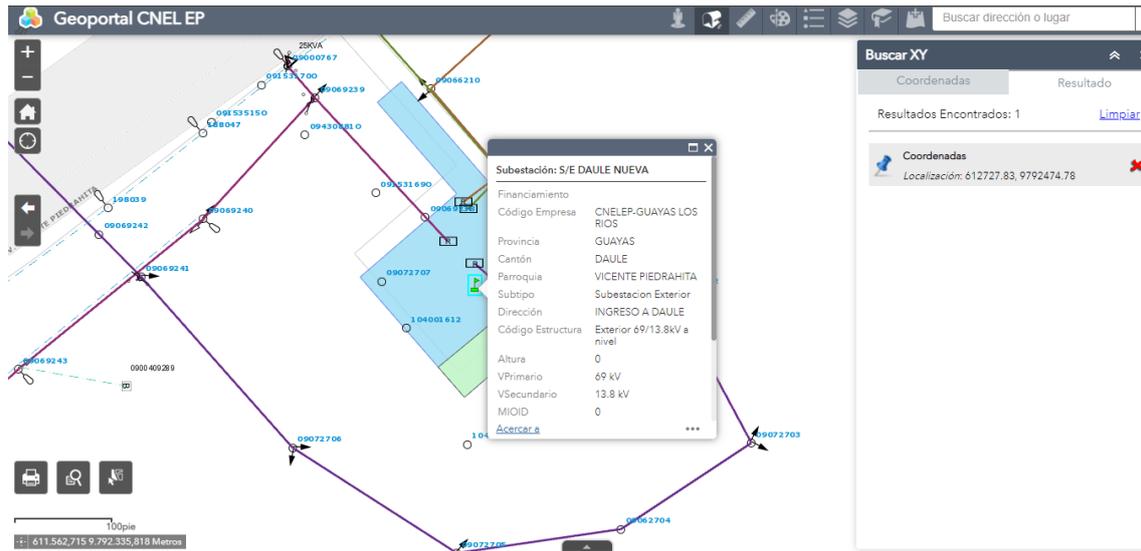
Fuente: Elaboración propia

Anexo 14. Distancia de la subestación de alimentación, línea 13,8 kV a la planta Gloria Matilde S.A. Punto de conexión de entrega de energía.



Fuente: (CNELEP, 2020)

Anexo 15. Niveles de voltaje de trabajo de la Subestación de alimentación de la planta.



Fuente: (CNELEP, 2020)

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **García González José Javier** con C.C: 0922885025 autor del trabajo de titulación: **“Cogeneración a partir de la cascarilla del arroz en la industria arrocera Gloria Matilde S.A del cantón Daule, provincia del Guayas”**, previo a la obtención del título de **Magíster en Electricidad con Mención Energías Renovables y Eficiencia Energética** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 31 de julio de 2025



f. _____

Nombre: **García González José Javier**

C.C: **0922885025**

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TEMA Y SUBTEMA:	Cogeneración a partir de la cascarilla del arroz en la industria arrocera Gloria Matilde S.A del cantón Daule, provincia del Guayas.		
AUTOR	García González José Javier.		
REVISOR/TUTOR	Ing. Bayardo Bohórquez; Ing. Ricardo Ubilla; Ing. Daniel Bohorquez		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Sistema de Posgrado		
CARRERA:	Maestría en Electricidad		
TITULO OBTENIDO:	Magister en Electricidad con Mención Energías Renovables y Eficiencia Energética.		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	31 de julio de 2025	No. DE PÁGINAS:	127
ÁREAS TEMÁTICAS:	Ingeniería térmica, Generación de energía.		
PALABRAS CLAVES / KEYWORDS:	Cascarilla de arroz, biomasa, poder calorífico, ciclo vapor-agua.		

RESUMEN/ABSTRACT: La ejecución de este proyecto es demostrar que la utilización de la cascarilla del arroz, que es un residuo del proceso de tratamiento del arroz para uso alimentarios; como combustible es viable y provechoso, tanto para la industria como para el medio ambiente y con la intención de averiguar si es posible tanto a nivel técnico como económico, la instalación de un sistema de cogeneración por medio de un ciclo termodinámico vapor-agua en la industria arrocera Gloria Matilde en el cantón Daule, en el Ecuador. Esto con el fin de conseguir abastecer el proceso interno de la industria, tanto de energía eléctrica como de energía térmica, obtenida a lo largo del proceso de la combustión de la cascarilla del arroz (Biomasa) y los excedentes de energía ofertarlos al SNI. Se calcula el ciclo de vapor-agua, en base a la potencia de diseño que se tiene de datos obtenidos de la planta.

Una vez calculados los parámetros de funcionamiento de cada elemento que conforma el ciclo Rankine, calculamos la demanda de combustible necesaria de acuerdo con la potencia de la turbina y las horas que esta estará en funcionamiento. Con la generación de vapor para la generación de electricidad y uso de este en el secado del arroz de manera eficiente, siendo estos puntos las componentes de innovación del proyecto; ya que actualmente esta industria quema los residuos para secar el arroz, de una manera ineficiente (horno artesanal) y no aprovechando la combustión de esta que podrían servir para la utilización en otros procesos. En este estudio se realizó el análisis para comprobar la viabilidad económica del proyecto, calculando el VAN y la TIR donde queda demostrado que es viable técnicamente la futura implementación de este sistema, porque la biomasa cascarilla de arroz que dispone la planta es de 7.500 t/año, cuya energía calculada es 5.189,97 MWh/año, para todo este proceso se requiere 7.240,66 t/año de combustible (cascarilla de arroz), la potencia a generar por la turbina es de 1.11 MW. El costo estimado de la implementación de este proyecto es de 2.905.650,00 [USD] y desde el año 7,5 de funcionamiento la instalación quedaría amortizada y empezaría a generar beneficios.

ADJUNTO PDF:	SI <input type="checkbox"/>	NO
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +34691842759	E-mail: jose.garcia03@cu.ucsg.edu.ec
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE)::	Nombre: Ing. Bohórquez Escobar, Celso Bayardo	
	Teléfono: 0995147293	
	E-mail: celso.bohorquez@cu.ucsg.edu.ec	

SECCION PARA USO DE BIBLIOTECA

Nº. DE REGISTRO (en base a datos):	
Nº. DE CLASIFICACION:	
DIRECCION URL (tesis en la web):	