

**UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA**



**DISEÑO DE SISTEMA DE AUTOGENERACIÓN CON CICLO
COMBINADO UTILIZANDO LA CASCARILLA DE ARROZ PARA
ENERGIZAR LA MOLINERA SUDAMERICA S.A.C. - LAMBAYEQUE**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO**

AUTOR

ROSA WINDY ILATOMA CADENILLAS

ASESOR

ELMER ROLANDO POLO BRICEÑO

<https://orcid.org/0000-0002-5831-8818>

Chiclayo, 2022

**DISEÑO DE SISTEMA DE AUTOGENERACIÓN CON CICLO
COMBINADO UTILIZANDO LA CASCARILLA DE ARROZ
PARA ENERGIZAR LA MOLINERA SUDAMERICA S.A.C. -
LAMBAYEQUE**

PRESENTADA POR:

ROSA WINDY ILATOMA CADENILLAS

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

INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO

APROBADA POR:

Alejandro Segundo Vera Lazaro
PRESIDENTE

Lucio Antonio Llontop Mendoza
SECRETARIO

Elmer Rolando Polo Briceño
VOCAL

TESIS ILATOMA CADENILLAS ROSA WINDY

INFORME DE ORIGINALIDAD

20%

INDICE DE SIMILITUD

20%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

7%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTE QUE CONTIENE COINCIDENCIAS



hdl.handle.net

Fuente de Internet

5%

5%

★ **hdl.handle.net**

Fuente de Internet

Excluir citas

Apagado

Excluir coincidencias

Apagado

Excluir bibliografía

Apagado

Índice

RESUMEN.....	9
ABSTRACT	10
1. INTRODUCCIÓN	11
2. OBJETIVOS	13
1.1. Objetivo General.....	13
1.2. Objetivos Específicos	13
2. MARCO TEÓRICO.....	14
2.1. Antecedentes.....	14
2.1.1. Mundial	14
2.1.2. Nacional	15
2.1.3. Regional	16
2.2. Producción de Arroz Cáscara en el Perú	18
2.3. Legislación Vigente.....	20
2.4. Aspectos Fundamentales de la Molinera Sudamérica S.A.C.	21
2.4.1. Situación Actual.....	21
2.4.2. Descripción del Arroz Pilado.....	22
2.4.3. Proceso de Producción.....	23
2.4.4. Demanda Energética del Año 2019	28
2.5. Bioenergía.....	31
2.6. Material Biomásico.....	32
2.6.1. Tecnologías para el aprovechamiento energético de la biomasa	33
a) Combustión	33
b) Pirolisis	33
c) Gasificación.....	34
2.6.2. Reducción de Emisiones por Efecto Invernadero (GHG).....	34
2.6.3. Eficiencia de las Tecnologías.....	35
2.7. Sistemas de Generación de Energía.....	36
2.7.1. Sistema de Generación con Turbina de Gas	36
2.7.2. Sistema de Generación con Turbina de Vapor.....	36
2.7.3. Sistema de Generación con Ciclo Combinado.....	36
2.8. Bases Teóricas	37
2.8.1. Conservación de la masa para flujo estacionario	37
2.8.2. Segunda Ley de la Termodinámica.....	37
2.8.3. Combustión.....	38

2.8.4.	Ciclo de Potencia de Gas	38
2.8.5.	Ciclo de Potencia de Vapor.....	39
2.8.6.	Ciclo de Potencia de Ciclo Combinado	40
3.	HIPÓTESIS.....	42
4.	MARCO METODOLÓGICO.....	42
4.1.	Tipo y Diseño de investigación	42
4.2.	Ejes de la investigación	42
4.3.	Población y Muestra	42
4.4.	Método aplicado a la Recolección de Datos.....	43
4.5.	Método aplicado al proceso de generación.....	44
4.6.	Método aplicado a los costos de inversión	45
4.7.	Variables Operacionales	49
4.8.	Matriz de consistencia	50
5.	DESARROLLO Y RESULTADOS	52
	Objetivo 1: Determinar las características de un sistema de autogeneración eléctrica basado en el Ciclo Combinado teniendo en cuenta las condiciones de producción de la Molinera Sudamerica S.A.C.	52
	Combustión de la cascarilla de arroz.....	52
	Disponibilidad del recurso energético mediante el método de Mínimos Cuadrados	59
	Objetivo 2: Calcular los parámetros de diseño para el sistema de autogeneración eléctrica basado en el Ciclo Combinado mediante un balance de energía.	62
	Balance Térmico del Ciclo Brayton	62
	Balance Térmico del Ciclo Vapor.....	68
	Balance Térmico de la Caldera de Recuperación.....	73
	Condiciones de Operación del Condensador.....	77
	Condiciones de Operación de la Torre de Refrigeración	79
	Objetivo 3: Seleccionar los equipos y elementos constructivos para el sistema de autogeneración eléctrica de acuerdo a los parámetros obtenidos.....	87
	Gasificador Ankur FBG-400.....	87
	Turbina de Gas Dresser-Rand KG2.....	88
	Turbina de Vapor SST-050	90
	Caldera de Recuperación HRSG Q11/950-4-2.57400	91
	Objetivo 4: Realizar el estudio económico correspondiente a la implementación de un sistema de autogeneración eléctrica dentro de la Molinera Sudamérica S.A.C.	98
	Análisis de costos de la planta.....	98
6.	CONCLUSIONES	110

7. RECOMENDACIONES.....	111
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	112
9. ANEXOS	115

Lista de tablas

Tabla 1. Información de la Empresa.	29
Tabla 2. Recibo del Molinera Sudamérica S.A.C.	29
Tabla 3. Propiedades de la cascarilla de arroz.	32
Tabla 4. Análisis de los componentes.	32
Tabla 5. Rendimiento de diferentes tecnologías de generación.	35
Tabla 6. Población de la tesis.	42
Tabla 7. Porcentajes de subproductos del arroz en cáscara.....	43
Tabla 8. Variables Operacionales.....	49
Tabla 9. Matriz de consistencia.....	50
Tabla 10. Composición del combustible obtenido de la cascarilla de arroz.	57
Tabla 11. Características químicas del gas síntesis.....	57
Tabla 12. Condiciones para la generación.....	58
Tabla 13. Flujo anual cascarilla de arroz.....	59
Tabla 14. Aplicación del método de mínimos cuadrados.	60
Tabla 15. Proyección de disponibilidad de cascarilla de arroz para el año 2028.....	60
Tabla 16. Condiciones de Diseño para la Caldera de Recuperación.....	74
Tabla 17. Propiedades a la entrada de aire en la torre de refrigeración.	83
Tabla 18. Propiedades a la salida de aire en la torre de refrigeración.....	83
Tabla 19. Propiedades del agua en la torre de refrigeración.	84
Tabla 20. Características de la Turbina de Gas Dresser-Rand KG-2.....	88
Tabla 21. Características de la Turbina de Vapor SST-050.....	90
Tabla 22. Propiedades del Agua para transferencia de Calor.....	95

Lista de figuras

Figura 2. Producción cd arroz en cascara.....	18
Figura 3. Superficie cosechada y rendimiento (2001-2017).	19
Figura 4. Principales regiones productoras de arroz en cascara.....	19
Figura 5. Regiones con mayor producción en el 2017.....	20
Figura 6. Ubicación geográfica con Google Earth.....	21
Figura 7. Sacos de Arroz Rinus de 49 kg.....	22
Figura 8. Diagrama de flujo del proceso.....	23
Figura 9. Prelimpia: Scalper.....	24
Figura 10. Prelimpia: Zaranda.....	24
Figura 11. Máquina descascaradora.....	25
Figura 12. Mesa separadora de Paddy.....	25
Figura 13. Pulidora Oyama.....	26
Figura 14. Zaranda de clasificación.....	26
Figura 15. Tambor de separación.....	27
Figura 16. Seleccionadora por color.....	27
Figura 17. Envasadora.....	28
Figura 18. Histórico de Consumo de la molinera Sudamérica S.A.C.....	30
Figura 19. Líneas de Transmisión en la Región Lambayeque.....	30
Figura 20. Usos principales de biomasa para energía y materia prima.....	31
Figura 21. Energía por medio de pirolisis.....	33
Figura 22. Principales procesos para la obtención de energía de productos mediante la conversión termoquímica de biomasa.....	34
Figura 23. Principio de conservación de la masa para un sistema de flujo estacionario.....	37
Figura 24. Una parte del trabajo se consume internamente para poder operar continuamente.....	37
Figura 25. Una porción del calor dentro de la máquina térmica se convierte en trabajo.....	38
Figura 26. Componentes del Ciclo Brayton.....	39
Figura 27. Componentes del Ciclo Rankine.....	40
Figura 28. Componentes del Ciclo Combinado.....	41
Figura 29. Composición Equilibrada del gas por reacción con el aire.....	56
Figura 30. Disponibilidad del recurso energético.....	61
Figura 31. Ciclo Combinado Gas-Vapor.....	62
Figura 32. Diagrama T-s.....	63
Figura 33. Compresor.....	63
Figura 34. Turbina de Gas.....	65
Figura 35. Diagrama T-s del Ciclo Vapor.....	68
Figura 36. Bomba.....	68
Figura 37. Turbina de Vapor.....	70
Figura 38. Caldera de Recuperación.....	73
Figura 39. Temperatura del gas y del agua al pasar por las etapas de la Caldera de Recuperación.....	76
Figura 40. Modelamiento del condensador como intercambiador de calor con respecto a la torre de refrigeración.....	78
Figura 41. Carta psicométrica aplicada a las condiciones del aire en la torre de refrigeración.....	80

Figura 42. Datos ingresados a Psychrometric Properties Calculator en EES.....	81
Figura 43. Gráfico psicrométrico donde indica la temperatura de bulbo húmedo a la entrada.	81
Figura 44. Diagrama del proceso interno de la torre de refrigeración.	82
Figura 45. Gráfico psicrométrico donde indica la temperatura de bulbo húmedo a la salida. ..	83
Figura 46. Operación de la torre de refrigeración.	84
Figura 47. Diagrama General de Operación de la Torre de Refrigeración.	85
Figura 48. Operación de la Torre de refrigeración a condiciones de la mezcla aire - agua.	86
Figura 49. Gasificador Ankur FBG-400.	87
Figura 50. Turbina de Gas Dresser-Rand KG-2.....	89
Figura 51. Potencia vs Temperatura de Ambiente	89
Figura 52. Turbina de Vapor SST-050.....	90
Figura 53. Tipos de Calderas de Recuperación.....	91
Figura 54. Caldera de Recuperación HRSG Q11/950-4-2.57400.....	91
Figura 55. Tuberías ASTM A192.	93
Figura 56. Distribución de las Tuberías dentro de la HRSG.....	94

RESUMEN

En Lambayeque se producen millones de toneladas de arroz al año, siendo este proceso productivo, uno de los más eficientes, ya que se utiliza todo el potencial de la biomasa. Sin embargo, la arista más débil aparece en los residuos no aprovechados, los que son arrojados como desperdicios sin uso aparente. Se toma como objeto de estudio, la molinera SUDAMERICA S.A.C., para el diseño de un sistema generador de energía termoeléctrica, con el fin de aprovechar en su totalidad la cascarilla de arroz. Sobre todo, el enfoque radica en el abastecimiento total de las cargas generadas por el molino, utilizando como fuente primaria, el material biomásico gasificado, con la innovadora propuesta de ciclo combinado, priorizando el rendimiento de la planta. El método a utilizar consiste en asegurar el abastecimiento de la cascarilla de arroz hasta el final de la vida útil del proyecto, y encontrar los parámetros iniciales para la generación de energía, desembocando en un análisis energético del sistema. Por lo tanto, a partir de los mismos datos, se seleccionan los equipos pertenecientes al ciclo combinado, determinando el análisis económico y financiero, con el que se sustenta el proyecto en una etapa de prefactibilidad. Posteriormente, se determina que la capacidad proyectada de la planta con un flujo necesario de 10,21 t/día, para la potencia instalada en las turbinas KG2 y SST-050, de 2,34 MW con un rendimiento de 51,70% y un costo total invertido de \$ 509 882,24, asumido el 70% del total por una entidad financiera y el resto por la propia empresa. Esta decisión conlleva a analizar el riesgo que existe por el planteamiento, donde, finalmente, la relación costo-beneficio es de 13,93, con un VAN de \$ 9 464 553,37 y un TIR del 25%, garantizando la viabilidad del proyecto.

Palabras claves: generación eléctrica, ciclo combinado, cascarilla de arroz.

ABSTRACT

In Lambayeque millions of rice's tons are produced per year, being the rice production process, one of the most efficient, as the full potential of biomass is used. However, the weakest edge appears in unused waste, which is thrown as waste with no apparent use. The SUDAMERICA S.A.C. mill is taken as the object of study for the design of a thermoelectric power generator system, in order to take full advantage of the rice husk. Above all, the focus resides on the total supply of the loads generated by the mill, using the gasified biomass material as the primary source, with the innovative proposal of combined cycle, prioritizing the performance of the plant. The method to be used consists of ensuring the supply of the rice husk until the end of the project useful life, and finding the initial parameters for the generation of energy, deciding to an energy analysis of the system. Therefore, from the same data, the teams belonging to the combined cycle are selected, determining the economic and financial analysis, with which the project is sustained in a prefeasibility stage. Subsequently, it is determined that the projected capacity of the plant is 10,21 t/day to obtain the installed power, in the KG2 and SST-050 turbines, of 2,34 MW with a efficiency of 51,70% and a total invested cost of \$ 509 882,24, assumed by 70% of the total by a financial entity and the rest by the company itself. This decision entails to analyze the risk that exists due to the approach, where, finally, the cost-benefit ratio is 13,93, with a NPV of \$ 9 464 553,37 and an IRR of 25%, guaranteeing the viability of the project.

Keywords: electricity generation, combined cycle, rice husk

1. INTRODUCCIÓN

Según el Ministerio de Agricultura y Riego, en el año 2018, Perú produjo 3 millones 39 mil toneladas de arroz en cáscara siendo Lambayeque, la segunda región productora con 8 010 kg/ha. [1]

La cascarilla de arroz es el residuo más importante del proceso productivo, constituyendo el 22% del arroz en cáscara, al cual no se le aprovecha de la manera adecuada, ya que muchas veces es desperdiciado o vendido como alimento de animales, se puede tomar como una alternativa de aprovechamiento como tal de la cascarilla de arroz para generación de energía eléctrica, disminuyendo así la utilización de combustibles fósiles, tales como el petróleo, que causan un daño en el ambiente.

La Molinera Sudamerica S.A.C. tiene una capacidad de producción de 1000 sacos cáscara/h, para la obtención de arroz blanco y añejado, como productos principales de venta, y pajilla, polvillo, descarte y Ñelen, como subproductos, siendo una de las piladoras con más demanda de la región. Además, la empresa opera tanto en hora punta como en hora fuera de punta, con un costo total al mes de 34 443,11 nuevos soles, por el consumo de 217 834,27 kWh de energía eléctrica. (*Véase: Anexo 1*)

Este costo puede ser reducido con la incorporación de una alternativa de tecnología que logre abastecer al sistema de energía para cubrir la demanda eléctrica, con la utilización de los subproductos del proceso productivo, aprovechando su Valor de Calentamiento y su efectividad como combustible.

Los sistemas de generación termoeléctrica que existen en las agroindustrias son actualmente de Ciclo Rankine, el cuál utiliza bagazo en las calderas para la producción de vapor sobrecalentado, que acciona posteriormente una turbina, produciendo energía eléctrica. Esta tecnología ofrece una eficiencia de 40 % [2], lo que se puede mejorar con la incorporación de una Turbina de Gas, creando así un Ciclo Combinado que además de ser más eficiente, puede producir mayor potencia, para lograr el abastecimiento parcial o total de la carga a, un menor costo y menor emisión de desechos.

Desde la perspectiva tecnológica, los sistemas de generación están en constante desarrollo debido a la implementación de nuevos elementos constructivos para aumentar la eficiencia. El

desarrollo en el ámbito molinero es muy bajo, es por ello que el estudio dentro de este campo requiere una búsqueda constante de optimización dentro de los sistemas, lo cual es parte de la innovación tecnológica propuesta en esta investigación.

Teniendo en consideración la economía de la empresa, se conoce que, la tarifa eléctrica a la que están sometidos las empresas molineras de la región tiende a tener un costo elevado en hora punta horas punta. Para aminorar costos, se plantea la propuesta de la generación propia, con lo que, la producción de arroz sería abastecida por un residuo propio del proceso productivo, resultando en un ahorro económico por parte de la empresa.

Desde una visión medio ambiental, Lambayeque es la segunda región con producción nacional de arroz en cáscara [1], donde la mayoría de este residuo se suele arrojar a los ríos cercanos [3]. Con la implementación del sistema de generación, las emisiones de CO₂, causada por desecho de este subproducto, se reduciría, ya que el volumen total se utilizará para abastecer de energía la maquinaria dentro del proceso productivo.

Según el Ministerio de Agricultura, Perú alcanza una producción nacional de 3 millones 39 mil toneladas de arroz de las cuales Lambayeque cosecha el 13 % [1]. La justificación social se basa en la producción de miles de puestos de trabajo en la región, es por ello que el aumento de horas laborales debido a la autogeneración, aumentará exponencialmente las oportunidades laborales y un mejoramiento en la preparación profesional de los empleados, produciendo un desarrollo social en la región.

2. OBJETIVOS

1.1. Objetivo General

Diseñar un sistema de autogeneración eléctrica con Ciclo combinado basado en el aprovechamiento energético de la cascarilla de arroz en la Molinera Sudamérica S.A.C.

1.2. Objetivos Específicos

- ✓ Determinar las características de un sistema de autogeneración eléctrica basado en el Ciclo Combinado teniendo en cuenta las condiciones de producción de la Molinera Sudamérica S.A.C.
- ✓ Calcular los parámetros de diseño para el sistema de autogeneración eléctrica basado en el Ciclo Combinado mediante un balance de energía.
- ✓ Seleccionar los equipos y elementos constructivos para el sistema de autogeneración eléctrica de acuerdo con los parámetros obtenidos.
- ✓ Realizar el estudio económico correspondiente a la implementación de un sistema de autogeneración eléctrica dentro de la Molinera Sudamérica S.A.C.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. Mundial

En 2015, Restrepo y Bazzo [4] presentó los resultados del análisis técnico (basado en la cantidad de exergía) y ambiental de una planta termoeléctrica de 50 MW nominales, localizada al sur del estado de Santa Catarina (Brasil), diseñada para operar con carbón pulverizado y adaptada para operar en proceso co-firing carbón-biomasa residual.

En 2010, Echevarría y López [4] determinó las propiedades físicas-químicas de la cascarilla, como biocombustible sólido. Además, estudia el proceso de combustión analizando su comportamiento cuando se quema en grandes pilas abiertas a la atmósfera, lo que permite determinar la cantidad de aire que debe de existir en un hogar mecánico para una adecuada combustión. Finalmente se busca abastecer una demanda de un grupo de vivienda que no dispone de servicio eléctrico. Al analizar las tecnologías de combustión: parrilla y lecho fluidizado, se ha establecido que la tecnología de parrillas es la más conveniente, el motivo principal para su empleo es su rango de potencia mayor que la otra tecnología, debe de tener un ángulo de inclinación para hacer la combustión más eficiente. Para abastecer la demanda de energía del servicio eléctrico en el cantón Samborodón será necesario generar 1 MW de potencia, que consume 1800 kg/h, lo cual producirá 8.3 T/h de vapor [4].

En 2011, Sarmiento [5] obtuvo los datos para el proceso, los cuales son muy beneficiosos, debido principalmente al hecho de que el combustible empleado sea un subproducto de la fábrica de arroz y por lo tanto la materia prima es gratuita para el molino y solo se invierte en la compra de gas como combustible auxiliar. Se puede obtener un mayor beneficio con la venta al completo de la energía obtenida en la planta, pero también se tiene un incremento del beneficio con el empleo de la energía en la propia planta de arroz [5].

En 2017, Silva [6] dividió al proceso en tres partes, de acuerdo a las operaciones unitarias a realizarse: gasificación y combustión de la cascarilla, separación y reducción de tamaño de las partículas sólidas, limpieza del gas y generación de energía eléctrica. La planta producirá un total de 1 696,09 toneladas de dióxido de silicio amorfo al año. El generador de energía eléctrica producirá una potencia de 711 kW, lo que se produce en 5 119 200 kWh al año. Se realizó un estudio de prefactibilidad económica en el que se determinó un valor de inversión inicial de 6 111 067,20 USD. El tipo de especificaciones técnicas son muy detalladas, las cuales deben de contener todos los datos correspondientes a cada elemento. El procesamiento de 36 toneladas de cascarilla de arroz por día, trabajando 345 días al año, 5 111 920,00 kWh de energía [6].

En 2018, Criollo y Pinzon [7] seleccionó el sistema ORC mediante el fluido de trabajo y de la disponibilidad de cascarilla de arroz. También se determinó valores referenciales de presión, temperatura y eficiencia. Con esos valores referenciales se buscó información de los equipos ORC en el mercado internacional con el fin de determinar la potencia eléctrica y el número de plantas ORC que se puede instalar en Ecuador. De este modo se consigue aprovechar 15,125 [MW]. Por tanto, este estudio propone la cooperación de varias plantas piladoras para que sus residuos alimenten un sistema ORC de propiedad compartida [7].

2.1.2. Nacional

En 2013, Huaraz [8] desarrolló el análisis del gasificador Downdraft, ya que por la potencia que se necesita y tipo de combustible es el más utilizado para los procesos de cocción, luego se realiza el diseño de equipo que comprende: la unidad generadora de gas (gasificador), el intercambiador de calor y ciclón, la selección del quemador y un análisis del costo del equipo. Las características del gasificador son las siguientes: 25 kW de potencia, eficiencia del 60%, un diámetro de 0,30 m, temperatura máxima dentro del reactor de 600 °C y temperatura externa de 35 °C, altura de 1,40 m, diámetro de 0,35 m y 0,105 m³ de capacidad de almacenamiento, además utiliza

11,60 kg de cascarilla de arroz para la generación del gas es necesario una relación de aire-combustible de 1,80 kg de aire por cada kg de combustible [8].

En 2018, Ríos [9] demostró que la construcción de una central es viable técnicamente porque la biomasa cascarilla de arroz disponible es de 5400 T / año, cuya energía calculada es 4.419 MWH/año. La potencia a generar por la turbina es de 1.33 MW, para esto requiere 1676.80 T/año de cascarilla de arroz. El diseño de ciclo vapor – agua, es un ciclo RANKINE simple, considerando una eficiencia del turbo generador de 90%, se obtuvo una potencia en la turbina de 1.33 MW. El procedimiento de la tesis consiste en determinar la potencia instalada, evaluar el combustible (cascarilla de arroz) para calcular su poder calorífico interno, posteriormente, se procede al diseño de la central y de sus componentes. Finalmente, se realizó el análisis para comprobar su viabilidad económica [9].

2.1.3. Regional

En 2015, Leyva [10] se enfocó en la generación de energía eléctrica por medio de una caldera que aprovecha la cascarilla de arroz residual del proceso de separación del grano y la cascarilla de arroz que se efectúa en las diferentes molineras de la Región de Lambayeque; la energía eléctrica producida se utilizará para satisfacer la demanda de energía que cada molino consume. La temperatura de operación mínima recomendada para el agua de alimentación a las calderas es 70°C. Además, la temperatura de salida del vapor de agua 400°C con un flujo másico de vapor de agua de 1414,8 kg/h. Con el proceso de recolección de datos se pudo identificar que el consumo de energía en las molineras de arroz cuya capacidad de producción está entre 7 T/día y 27 T/día. Se optó por la selección de la turbina a vapor tipo SST-040 SIEMENS, ya que cubre totalmente a algunas molineras [10].

En 2017, Quintana y Salazar [11] utilizó la cascarilla de arroz como combustible en el diseño de una minicentral termoeléctrica de 5kW, para la generación de energía eléctrica, dicho residuo agrícola es muy abundante en la zona en beneficio de dicho caserío, lo cual se ha realizado un estudio detallado de este tipo de biomasa como alternativa de combustión. Se analizó

la composición energética y fisicoquímica de la cascarilla de arroz para su uso como combustible, conociendo el porcentaje de humedad de 5%, volatilidad de 65%, cenizas de 20%, su densidad de 110 kg/m^3 y cuenta con un poder calorífico 2770 kcal/kg para la propuesta de la minicentral termoeléctrica de 5 kW [11].

En 2018, Rojas [12] propuso la generación de biogás a partir de la cascarilla de arroz para reducir costos energéticos en la empresa, empleando biodigestores de cúpula fija, ya que representa una opción viable a la generación de energía limpia, el cuidado del medioambiente y la disminución del efecto invernadero. Además, se determinó que para el año 2023 se empleará $1\,105\,707 \text{ kg}$ de cascarilla de arroz en concentración de 1:5 de agua, para generar $323\,827 \text{ kWh}$ de energía para el funcionamiento de los motores del área de producción; pretendiéndose reducir así $23\,288 \text{ kg}$ CH_4 equivalente a $489\,053 \text{ kg}$ CO_2 [12].

En 2019, Lucero [13] estableció que el potencial energético de la cascarilla de arroz producido en la provincia de Lambayeque es muy elevado, ello se debe a que se obtiene más de $10\,000$ toneladas mensuales durante el proceso de pilado de arroz, lo que permite producir un gas combustible con gran contenido energético. Por ello, se puede disponer de muchas posibilidades para aprovechar la energía contenida en este gas, lo cual posibilita plantear un proyecto de generación de biogás para la producción de electricidad, logrando un tratamiento responsable de este residuo y reduciendo las emisiones de CO_2 . El análisis financiero mediante los parámetros TIR y VAN de la propuesta, permite garantizar la sostenibilidad el uso de la Cascarilla de arroz con fines energéticos en el Departamento de Lambayeque. Además, la metodología es muy explícita, al referirse al método de investigación empleado [13].

En 2019, Fernández [14] propuso un sistema de gasificación de lecho móvil en corrientes paralelas (Down draft), que utilizará la cantidad de Biomasa $6307,2 \text{ T/año}$ obteniendo una potencia a la salida del generador de 607 kW . El gasificador tiene una capacidad de $0,28 \text{ kg/s}$, de un 10% de humedad para generar 500 a 750 kW de acuerdo a la capacidad del generador según el

estudio propuesto. Con un caudal de biomasa igual a 0,28 kg/s, para generar un valor de calentamiento Inferior (LHV) al 10% humedad a LHV de 12,54 MJ/kg. El gas de síntesis y los humos permitirán una generación de 2,428 MW, obteniendo una potencia a la salida del generador de 607 kW. El modelo del gasificador FBG-850 (Gas-500), del tipo Down Draft o Flujo Concurrente, en el donde el consumo de biomasa calculado es de 1,02 kg/h y la temperatura de gasificación resulta entre 1050-1100 °C [14].

2.2. Producción de Arroz Cáscara en el Perú

Perú llegó a producir 3 millones 39 mil toneladas de arroz en cáscara, este incremento se debe a la producción, dentro del periodo 2001 – 2017, estuvo impulsado por una superficie cosechada mucho mayor con respecto a años anteriores y al incremento del rendimiento [1].

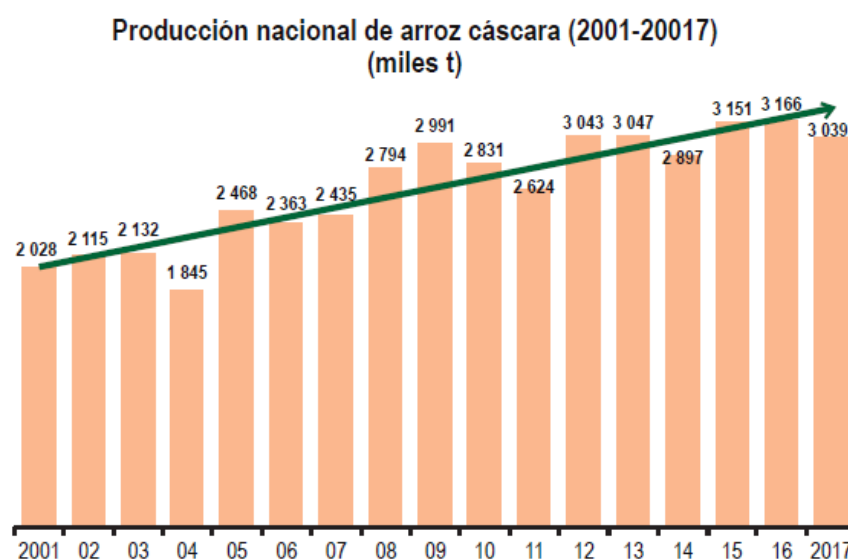


Figura 1. Producción cd arroz en cascara.

Fuente: MINAGRI-DGESEP

En Lambayeque destacan las provincias de Lambayeque y Ferreñafe, las cuales participan del 44,5% y 29,7% respectivamente del área cosechada de la región [1].

Se considera los meses de mayo a julio como la campaña donde se concentra el 44% de la superficie cosechada nacional. En 2017, se obtuvo un rendimiento de 7,19 t/ha [1].

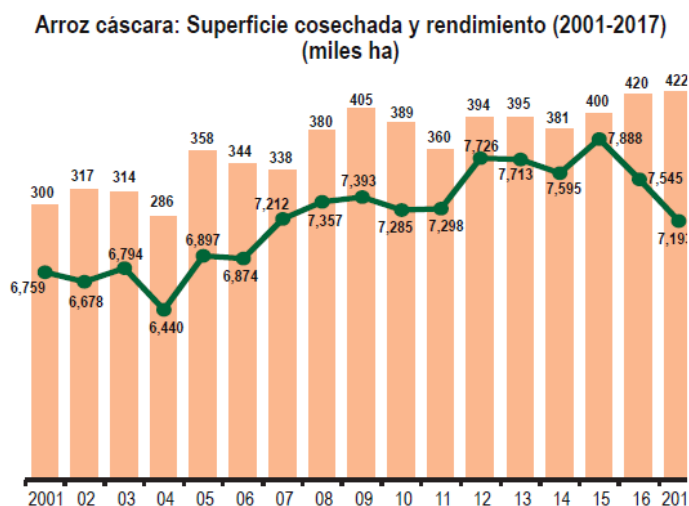


Figura 2. Superficie cosechada y rendimiento (2001-2017).

Fuente: MINAGRI-DGESEP.

El valor de producción de este cereal representa 7,4% del Valor Bruto de la Producción (VBP) agropecuaria y el 12,3% del VBP agrícola. De esta manera, el arroz se convierte en el cultivo más importante de la agricultura nacional. Lambayeque es parte de las principales regiones productoras al tener 13% y un rendimiento de 8,0 t/ha [1].

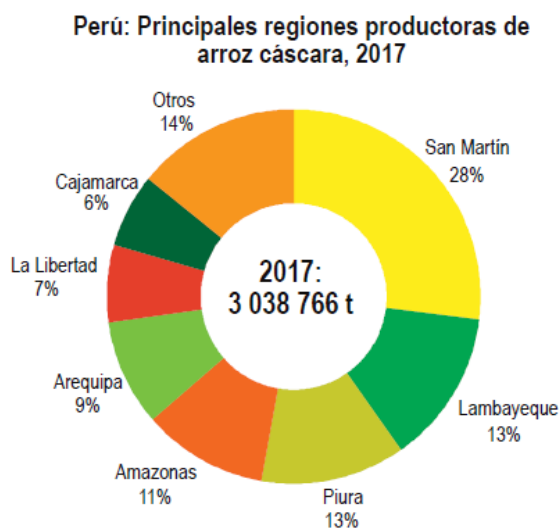


Figura 3. Principales regiones productoras de arroz en cáscara.

Fuente: MINAGRI-DGESEP

Región	Sup. Cosechada (ha)	Producción (t)	Rendimiento (kg/ha)	Precio en chacra (S/ x kg)
San Martín	110 442	822 885	7 451	0,99
Lambayeque	50 012	400 575	8 010	1,30
Piura	51 566	378 864	7 347	1,23
Amazonas	44 474	327 568	7 365	1,08
Arequipa	20 225	281 393	13 913	1,25
La Libertad	31 425	206 995	6 587	1,36
Cajamarca	23 681	186 759	7 886	1,08
Tumbes	14 557	123 537	8 486	1,29
Loreto	34 700	101 205	2 917	0,61
Ucayali	18 092	66 198	3 659	0,84
Ancash	5 432	64 425	11 860	1,30
Huánuco	10 980	63 157	5 752	0,98
Madre de Dios	2 467	5 598	2 270	1,49
Junín	1 248	4 255	3 410	1,11
Pasco	2 055	3 169	1 542	1,20
Cusco	920	1 827	1 986	1,02
Puno	100	183	1 830	1,80
Ayacucho	60	173	2 883	1,51
Otros	23 261	142 788	6 139	1,15
Nacional	422 434	3 038 766	7 365	1,13

Figura 4. Regiones con mayor producción en el 2017.

Fuente: MINAGRI-DGESEP

2.3.Legislación Vigente

Existen diferentes bases legales referentes a la producción de energías renovables, entre los que se pueden tomar en cuenta los siguientes [15]:

- **DECRETO LEGISLATIVO N° 1002:** Decreto Legislativo de promoción de la inversión para la generación de electricidad con el uso de energías renovables, tiene por objeto promover el aprovechamiento de los Recursos Energéticos Renovables (RER) para mejorar la calidad de vida de la población y proteger el medio ambiente, mediante la promoción de la inversión en la producción de electricidad.
- **DECRETO LEGISLATIVO N° 1058:** Decreto Legislativo que promueve la inversión en la actividad de dictar incentivos y otras medidas para promover la inversión en la generación de electricidad con el uso de fuentes de energía renovable, lo cual logra incentivar la investigación científica e innovación tecnológica, además el desarrollo de mecanismos limpios y reducción de emisiones al ambiente.

- DECRETO SUPREMO N° 012 – 2011 – EM: Reglamento de la generación de electricidad con energías renovables, contiene las normas generales sobre incentivos para promover la inversión en generación eléctrica a partir de Recursos Energéticos Renovables.
- DECRETO SUPREMO N° 020 – 2013 – EM: Reglamento para la promoción de la inversión eléctrica en áreas no conectadas a red, comprende los objetivos de la Política Energética Nacional del Perú que comprende el acceso universal al suministro energético, para lo cual el Estado debe facilitar una política estable de precios y tarifas que compensen costos e incentiven la inversión.

2.4.Aspectos Fundamentales de la Molinera Sudamérica S.A.C.

2.4.1. Situación Actual

La molinera SUDAMERICA S.A.C., ubicada en Carretera Panamericana Norte Km. 779 – Lambayeque, es una empresa dedicada al procesado y pilado de arroz, con equipos tecnológicos y humano integrado en busca de la calidad en el rubro de alimentación.

La empresa tiene como misión producir, procesar y comercializar arroz de alta calidad, ofreciendo a sus clientes mejores precios por su producto y otorgar el máximo beneficio a toda la cadena económica del arroz: los agricultores, canales de distribución y los consumidores.



Figura 5. Ubicación geográfica con Google Earth.

Fuente: Google Earth.

2.4.2. Descripción del Arroz Pilado

El arroz pilado o blanco, es el grano de arroz, entero y quebrado al cual se le ha removido la cáscara, los embriones y el pericarpio o cutícula, en un procesamiento normal del arroz en cáscara. El arroz pilado representa aproximadamente del 68 a 71 % del peso original del arroz en cáscara.

- **Aspecto:** Grano seco y fluido, palpable, desprovisto de grumos y con mínima presencia de puntos negros, y materias extrañas.
- **Color:** Blanco uniforme.
- **Olor:** Característico, suave y agradable, fresco, típico, nunca con olor a moho, rancio, o algún olor anormal.
- **Sabor:** Característico, agradable, poco perceptible.
- **Características Microbiológicas:** Los granos de arroz deberán cumplir con los siguientes criterios microbiológicos y límites establecidos en la Norma sobre Criterios Microbiológicos de la Calidad Sanitaria e Inocuidad para los Alimentos y Bebidas (R.M.N°615-2003-SA/DM).
- **Empaque y presentación:** El producto es envasado en sacos de polipropileno para cantidades mayores a 50 kg, son cosidos para segura su contenido.
- **Vida útil:** Es de 7 meses, a partir de la fecha del procesamiento en planta (envasado) y almacenado en lugares cerrados, secos y frescos.



Figura 6. Sacos de Arroz Rinus de 49 kg.

Fuente: Sudamérica S.A.C.

2.4.3. Proceso de Producción

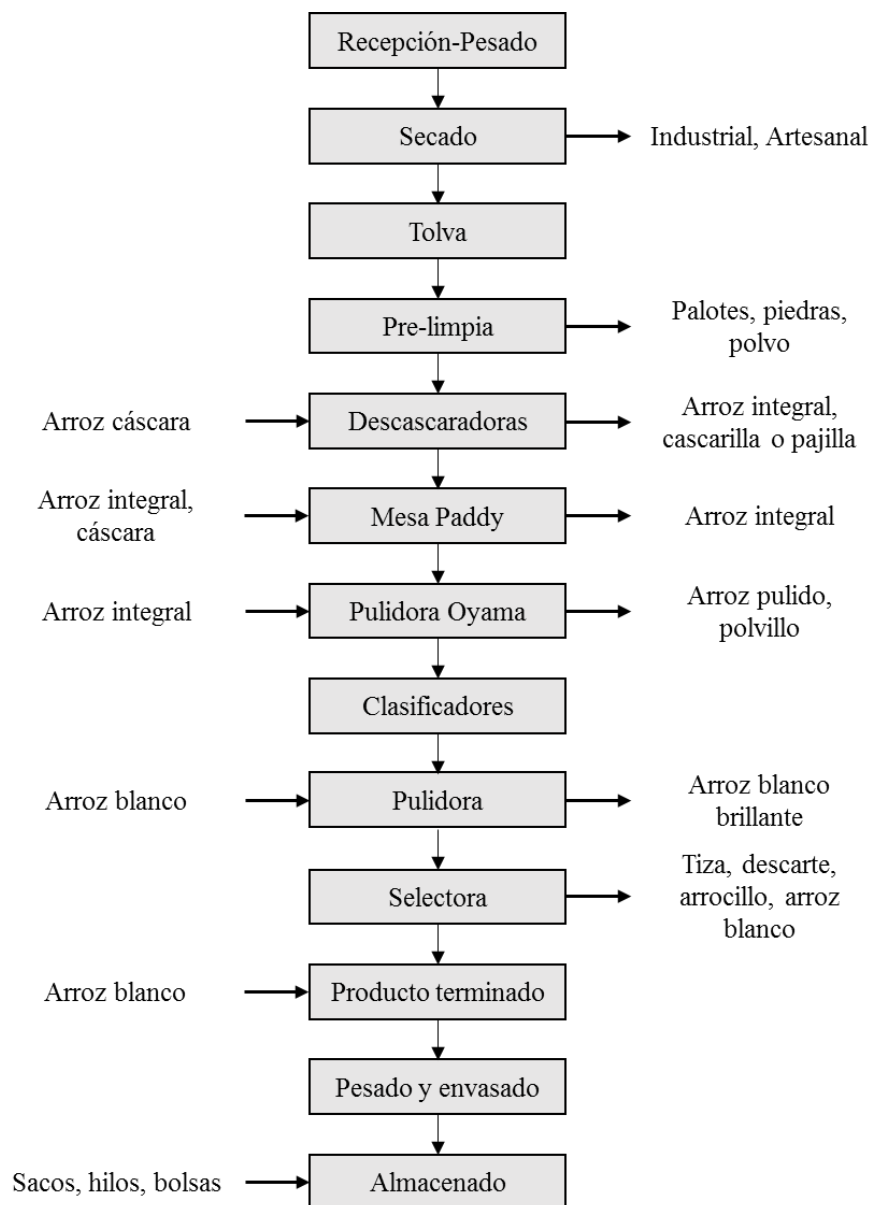


Figura 7. Diagrama de flujo del proceso.

Fuente: Sudamérica S.A.C.

- **Recepción y Pesado:** La materia prima es ingresada a una tolva, perteneciente a la secadora
- **Pre limpia:**
 - a) Scalper: consta de dos elementos, un tambor de gran dimensión y uno de pequeña dimensión, los cuales atrapan las impurezas que contienen el arroz en cáscara como son los palotes y la paja.



Figura 8. Prelimpia: Scalper.

Fuente: Sudamérica S.A.C.

b) Zaranda: saca el polvo, palotes, pajita del vano.



Figura 9. Prelimpia: Zaranda.

Fuente: Sudamérica S.A.C.

- **Almacenamiento:** Se almacena en un silo que contiene ventilación.
- **Secadora:** Contiene un horno que apresura el proceso de secado. Utiliza como combustible la cascarilla de arroz.
- **Descascarado:** La máquina está formada por dos rodillos de goma.



Figura 10. Máquina descascaradora.

Fuente: Sudamérica S.A.C.

- **Mesa separadora de Paddy:** Separa y selecciona el grano por peso y tamaño. La operación de separación consta de tres variables: ángulo de inclinación, revolución de la mesa y curso de la caja.



Figura 11. Mesa separadora de Paddy.

Fuente: Sudamérica S.A.C.

- **Pulido:** Se emplea dos sistemas: el de abrasión (pulidora Oyama) y el de fricción (pulidora de agua). El sistema de abrasión utiliza la piedra esmeril que por fuerza centrífuga presiona al arroz contra la malla. La regulación se realiza con un volante que baja o sube la piedra según el grado de pulido deseado.



Figura 12. Pulidora Oyama.

Fuente: Sudamérica S.A.C.

- **Clasificación**

En zaranda: separa el grano menudo o los residuos quebrados (Ñelen). La separación se realiza en una zaranda con malla perforada.



Figura 13. Zaranda de clasificación.

Fuente: Sudamérica S.A.C.

En tambor: Consta de un tambor rotatorio (trieur). El arroz quebrado llena los alvéolos, que al girar el trieur son elevados y depositados en una bandeja central que descarga por uno de los extremos el arroz quebrado o arrocillo. Adicionalmente, el arroz pasó por una zaranda que separa granos finos, asegurando así un tamaño homogéneo del grano en la producción.



Figura 14. Tambor de separación.

Fuente: Sudamérica S.A.C.

- **Selección por color:** La selección se realiza en una máquina basada en el color del grano blanco translúcido y un fondo de referencia, que al pasar un grano yesado o manchado el paso de luz a través de ellos tendrá una tonalidad diferente, separando el grano malo del grano adecuado.

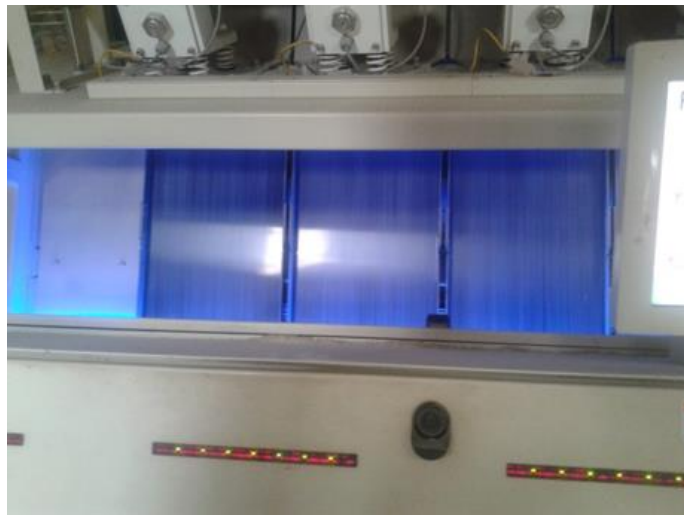


Figura 15. Seleccionadora por color.

Fuente: Sudamérica S.A.C.

- **Envasado:** Es la etapa final del proceso, el arroz es seleccionado y embazado según parámetros de calidad definidos. El arroz es producido: en sacos de 50 kg o 49 kg, con sus respectivas marcas y colores.



Figura 16. Envasadora.

Fuente: Sudamérica S.A.C.

Productividad de maquinaria de producción:

- Descascaradora: 45 a 55 sacos/horas.
- Mesa Paddy: 50 sacos/hora lado derecho y 60 sacos/hora lado izquierdo, total la mesa Paddy hace un promedio de 110 sacos/hora.
- Pulidora Oyama: 90 sacos hora y las dos hace un promedio de 180 sacos/hora.
- Pulidora de agua: 110 sacos/hora.
- Selector por color: 100 a 110 sacos/hora.

2.4.4. Demanda Energética del Año 2019

Existen dentro del año diferentes etapas de consumo de energía, los tres primeros meses del año no hay un ingreso de arroz, los cuatro meses siguientes, pertenecen a la campaña grande, siendo los meses de Mayo y Julio, los de mayor consumo de energía y donde se llega a un exceso, provocando un costo adicional en el Recibo de Electricidad, finalmente, en los meses de Agosto hasta mitad de Octubre, solo se utiliza para pilar, no existe ingreso adicional de arroz en cáscara. Los meses que constituyen la campaña chica son Noviembre y Diciembre, recibiendo arroz cáscara de las provincias de Piura y Tumbes.

Tabla 1. Información de la Empresa.

Cliente	EMPRESA MOLINERA SUDAMÉRICA S.A.C.
R.U.C.	20479907421
Dirección	Carr. PANAMERICANA NORTE N° 779 Cerc. LAMBAYEQUE
Referencia	Frente a Tuberías Nicoll
Ruta	1324-10223-48
Medición	Media Tensión
Tensión	10 kV
SED	E-202875
Tipo Suministro	Trifásica - Aérea (C5-3)

Fuente: Molinera Sudamérica S.A.C.

Tabla 2. Recibo del Molinera Sudamérica S.A.C.

Molinera Sudamérica			Código de Suministro: 26376995		
Mes	Energía Activa Fuera Punta (kWh)	Energía Activa Hora Punta (kWh)	Potencia Fuera Punta (kW)	Potencia Hora Punta (kW)	Importe Total (S/.)
Octubre	154254	25777	474,1813	439,4996	26676
Noviembre	153555	27106	462,3177	437,6359	26563
Diciembre	152731	37341	476,9996	442,545	26861
Enero	171507	42450	465,2723	552,954	33563
Febrero	139281	14534	430,8632	276,0452	16755
Marzo	127624	21647	435,7268	416,9996	25311
Abril	150208	25411	455,1814	407,2289	24717
Mayo	155114	36830	485,9086	484,4086	29402
Junio	176956	40877	550,5504	567,4513	34443
Julio	179160	43306	518,6813	539,7722	32763
Agosto	180621	45647	527,8177	536,0904	32539
Setiembre	133476	20693	461,045	361,8633	21964

Fuente: Atria Energía.

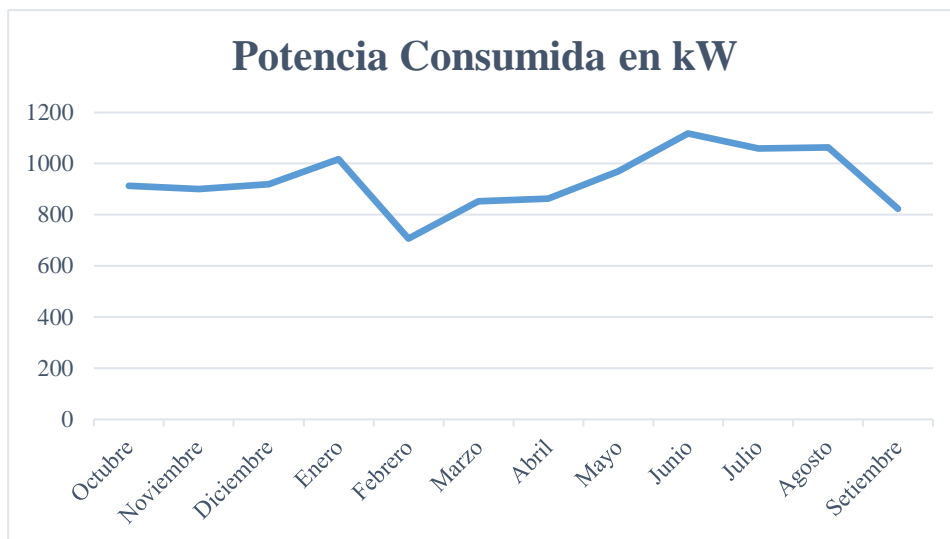


Figura 17. Histórico de Consumo de la molinera Sudamérica S.A.C.

Fuente: Atria Energía.

Según el Estudio de Mercado, publicado por la empresa Electronorte, Lambayeque tendrá un crecimiento de 5,13 % en su Energía Consumida para el año 2029. Este escenario plantea un crecimiento adicional en las empresas dedicadas a la producción de arroz en la zona Norte. No obstante, en los últimos 5 años, la Empresa Sudamérica S.A.C. ha aumentado una línea de producción, contando actualmente con tres líneas de producción. Por lo cual se supone, un crecimiento en la Demanda Energética, por las nuevas maquinarias, de esta compañía en los próximos 10 años.

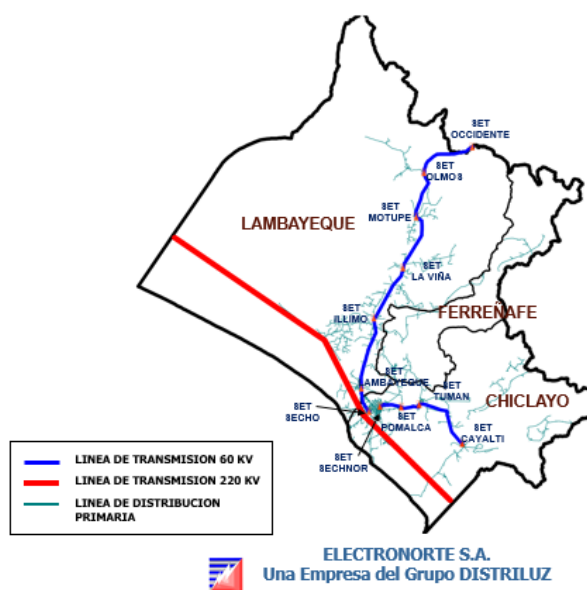


Figura 18. Líneas de Transmisión en la Región Lambayeque.

Fuente: Electronorte.

2.5. Bioenergía

La biomasa puede ser convertida en formas muy convenientes de energía, usando un número de procesos diferentes. Los factores que influyen en la elección del proceso de conversión son: el tipo y cantidad de biomasa como materia prima; la forma deseada de energía; requisitos para los usos finales; estándares medioambientales; condiciones económicas; y factores específicos proyectados. En muchas situaciones, este es la forma en la que la energía es requerida para determinar la ruta del proceso siguiendo los tipos disponibles y cantidad de biomasa. [16]

La biomasa puede ser convertida en tres productos principales: dos respecto a energía – generación de potencia o calor, y transporte de combustible – y uno como material químico. La conversión de biomasa en energía se logra utilizando dos principales tecnologías de procesos: termoquímica y bioquímica. Dentro de la conversión termoquímica podemos encontrar los siguientes procesos: combustión, pirólisis y gasificación [16].

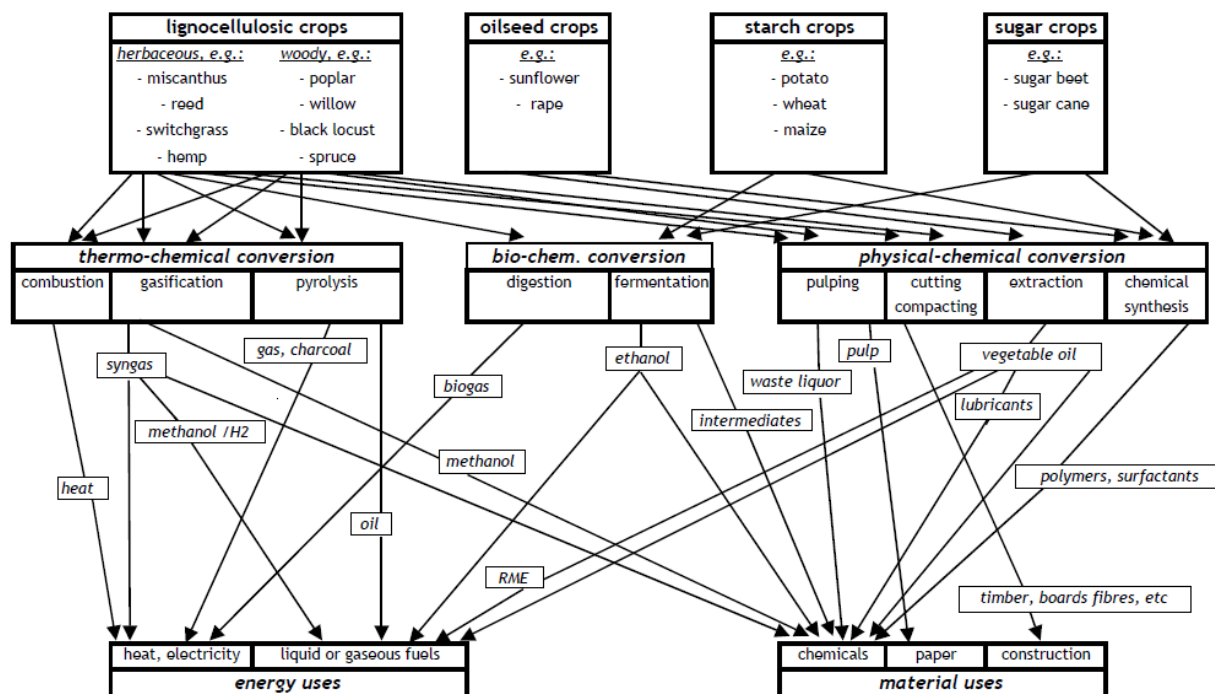


Figura 19. Usos principales de biomasa para energía y materia prima.

Fuente: Gispen, 2004.

2.6. Material Biomásico

La cascarilla de arroz es un tejido vegetal constituido por celulosa y sílice, elementos que ayudan a su buen rendimiento como combustible. Se puede observar la variación del valor de calentamiento de la cascarilla de arroz se ve afectado por el contenido de humedad de la biomasa. A pesar de contar con una gran cantidad de este residuo, su aprovechamiento es reducido, se utiliza en pequeña escala en el sector florícola, para la elaboración de ladrillos, como combustible para el secado de granos. La mayor parte se quema al aire libre o se abandona en el campo. [17]

El material biomásico utilizado como objeto de investigación es la cascarilla de arroz, en la tabla 1 se muestra las propiedades de este residuo. (Véase: Anexo 2)

Tabla 3. Propiedades de la cascarilla de arroz.

Propiedades	
Humedad (%)	14,00
LHV (MJ/kg)	12,218

Además en la tabla 2, se muestra el análisis de los componentes, según la Norma ASTM E870-82 de este residuo.

Tabla 4. Análisis de los componentes.

Análisis de los componentes	
Carbono	39,60
Oxígeno	37,52
Silicio	15,21
Hidrógeno	4,97
Nitrógeno	1,83
Azufre	0,40

2.6.1. Tecnologías para el aprovechamiento energético de la biomasa

a) **Combustión**

El quemado de biomasa en aire, combustión, es usado por encima del rango de salida para convertir la energía química almacenada en la biomasa, en calor, potencia mecánica, o electricidad usando una variedad de factores en el equipamiento del proceso, hornos, calderas, turbinas de vapor, turbogeneradores, etc. La combustión de biomasa produce gases calientes a temperaturas alrededor de 800-1000 °C. Esto es posible para quemar cualquier tipo de biomasa con una humedad menor al 50%, sin que la biomasa este pre-secada. La escala de rangos dentro de las plantas de combustión a muy pequeña escala a mayor escala se encuentran en el rango de 100 – 3000 MW [16].

b) **Pirolisis**

Pirolisis es la conversión de biomasa a fracciones líquidas, sólidas y gaseosas, por el calor de la biomasa en la ausencia de aire, alrededor de 500 °C. Este procedimiento puede ser utilizado para producir bio-aceite si la pirolisis instantánea es usada, permitiendo la conversión de biomasa a bio-crude con una eficiencia mayor a 80%. El bio-aceite puede ser usado en motores y turbinas, asimismo, como materia prima por refinerías [16].

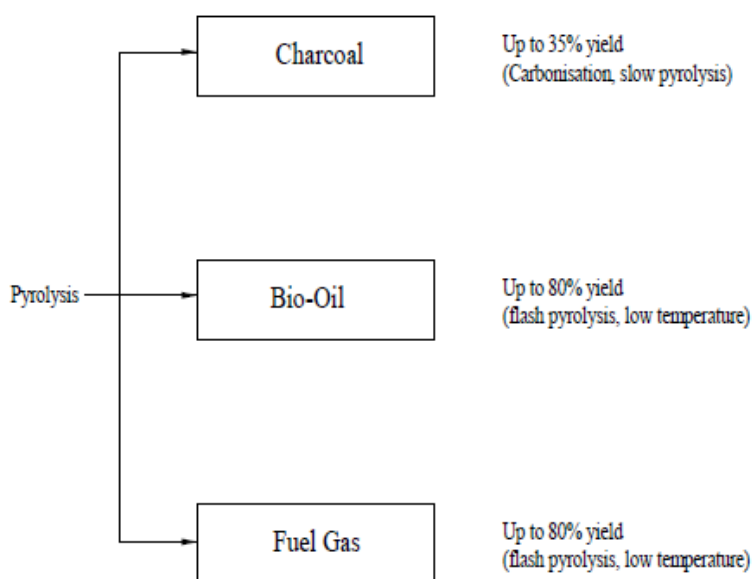


Figura 20. Energía por medio de pirolisis.

Fuente: McKendry, 2002.

c) Gasificación

La gasificación es el tipo de conversión de biomasa dentro un mezcla de gas combustible por la oxidación parcial a altas temperaturas, típica en el rango 800-900 °C. El valor de calentamiento inferior (CV) del gas producido, entre 4-6 MJ/N.m³, puede ser quemado directamente o usado como un combustible para motores a gas y turbinas a gas. Un concepto prometedor es la biomasa integrada con gasificación y ciclo combinado (BIG/CC), donde la turbina de gas convierte el combustible gasificado en electricidad con un alto grado de eficiencia. Una importante ventaja de los sistemas de BIG/CC es que el gas es limpio antes de la combustión en la turbina permitiendo mayor compactación y menor costo de equipos en limpieza de gases. La integración de la gasificación al proceso de combustión, recalentamiento y gasificación, asegura una eficiencia de conversión, produciendo eficiencias netas de 40-50 % para plantas de 30-60 MW de capacidad [16].

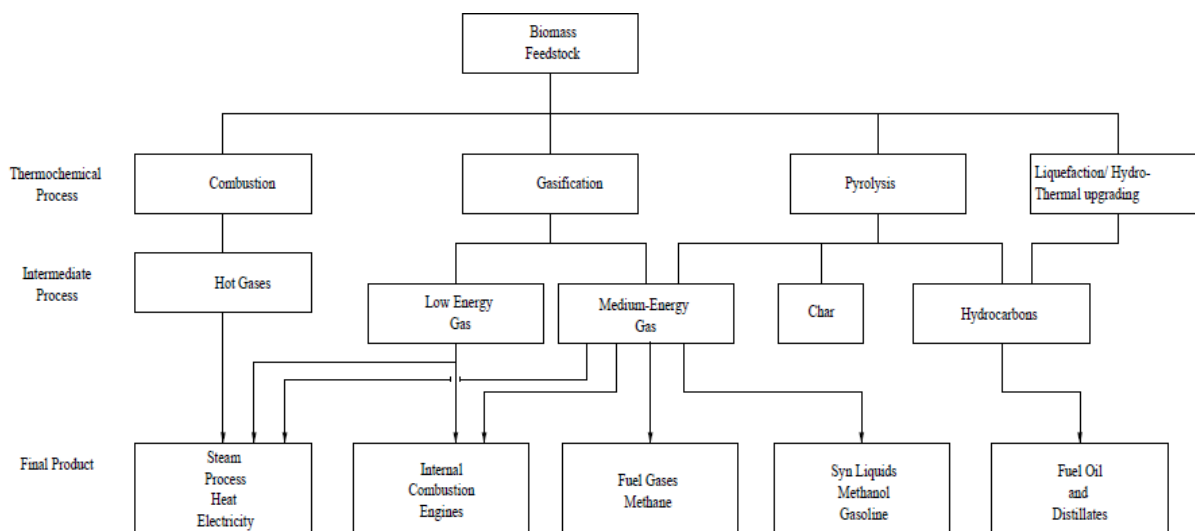


Figura 21. Principales procesos para la obtención de energía de productos mediante la conversión termoquímica de biomasa.

Fuente: McKendry, 2002.

2.6.2. Reducción de Emisiones por Efecto Invernadero (GHG)

Los más importantes gases de efecto invernadero en el contexto de los sistemas de biomasa son: dióxido de carbono (CO₂), Óxido de nitrógeno (N₂O) y metano (CH₄). La bioenergía y materiales compuestos por carbono,

son removidos por la atmósfera durante el crecimiento de la biomasa y después liberado durante el uso de la biomasa. Así, en comparación con la energía producida por los ciclos de carbono, las emisiones de CO₂ son reducidas cuando se usa el combustible fósil en remplazo del recurso biomásico. El óxido de nitrógeno es emitido en los sistemas de producción de biomasa durante la fertilización, dependiendo del esquema de manejo agrícola. Finalmente el metano es expulsado al ambiente por la descomposición anaeróbica durante la cosecha. Por ejemplo, incinerar los residuos del proceso productivo tratados, libera todo el carbono, con lo que existiría una recuperación de energía y, a su vez se reducirían las emisiones de GHG de la energía fósil [18].

2.6.3. Eficiencia de las Tecnologías

Los beneficios potenciales de los sistemas de biomasa han de ser comparados entre sí, teniendo en consideración la energía disponible, la reducción de gases GHG, costos y el grado de eficiencias. Sin embargo, muy pocos estudios explican área del sistema biomásico multifuncional, se recomienda usar en el estudio a la producción de materia prima como parte del proceso para la obtención de energía. En la Tabla 3, se muestra la comparación entre las diferentes tecnologías de generación existentes [18].

Tabla 5. Rendimiento de diferentes tecnologías de generación.

Proceso	Rendimiento global de planta equivalentes η %
Combustión Directa (CD)	19,9
Gasificación y Turbina de Gas (GTG)	25-28
Gasificación y Ciclo Combinado (GCC)	35-40
Pirolisis y Ciclo Combinado	31

Fuente: Serrano, 2017.

2.7. Sistemas de Generación de Energía

2.7.1. Sistema de Generación con Turbina de Gas

El ciclo Brayton tiene una eficiencia de 17,3 % en pequeños sistemas a escala de 1-10 kW. Se consideran tres elementos principales: compresor, cámara de combustión y turbina de gas. En la cámara de combustión, existe una gran temperatura entre la estructura y el gas caliente que se deja fluir en la turbina por lo que se plantea el diseño de un sistema de calor residual, lo que consiste en un proceso de cogeneración [19].

2.7.2. Sistema de Generación con Turbina de Vapor

El Ciclo de Rankine tiene como objetivo utilizar fluidos orgánicos de bajo punto de ebullición en lugar de vapor que se utiliza principalmente en energía de vapor ordinaria ciclos de generación. Los ciclos de vapor de alta temperatura son adecuados para funcionar con gases de escape residuales que emanan de motores diésel, turbinas de gas y quema de biomasa. Las aplicaciones del ciclo orgánico Rankine utilizan fluidos isentrópicos y secos en el sistema, ya que no se requiere un sobrecalentamiento y, por lo tanto, se puede evitar el daño a las turbinas debido a su naturaleza seca [20].

2.7.3. Sistema de Generación con Ciclo Combinado

El Ciclo Combinado consta de una turbina de gas a la cual se le suministra aire y gas natural como combustible. Los productos de la combustión pasan a la sección de expansión de la turbina para producir la potencia necesaria para hacer funcionar tanto al compresor como al generador eléctrico. Los gases exhaustos entran a un recuperador de calor en donde intercambian calor con una corriente de agua líquida la cual convierten en vapor. Adicionalmente, el proceso contiene una turbina de vapor operada con el vapor que se produce en el recuperador de calor. El agua condensada es recibida en el condensador desde donde se envía a la caldera y de esta manera cerrar el ciclo [21].

2.8. Bases Teóricas

2.8.1. Conservación de la masa para flujo estacionario

$$\sum_{\text{entrada}} \dot{m} = \sum_{\text{salida}} \dot{m} \quad (1)$$

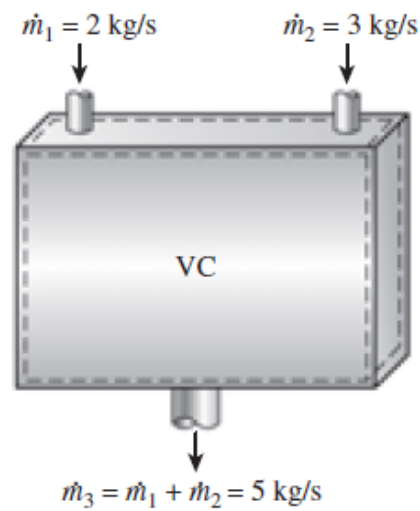


Figura 22. Principio de conservación de la masa para un sistema de flujo estacionario.

Fuente: Cengel, 2012.

2.8.2. Segunda Ley de la Termodinámica

Para hallar el trabajo neto, se restan los trabajos de entrada y salida.

$$W_{\text{neto,salida}} = W_{\text{salida}} - W_{\text{entrada}} \quad (kJ) \quad (2)$$

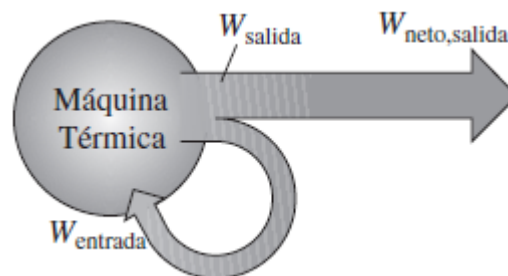


Figura 23. Una parte del trabajo se consume internamente para poder operar continuamente.

Fuente: Cengel, 2012.

Otra forma de encontrar el trabajo neto, es restando los calores de entrada y salida.

$$W_{neto,salida} = Q_{entrada} - Q_{salida} \quad (kJ) \quad (3)$$

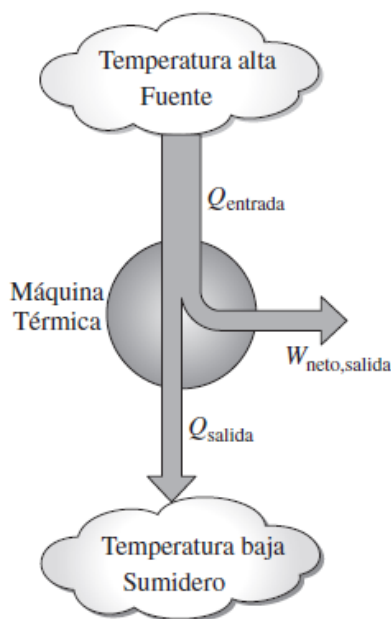


Figura 24. Una porción del calor dentro de la máquina térmica se convierte en trabajo.

Fuente: Cengel, 2012.

2.8.3. Combustión

La relación aire-combustible, se expresa de la siguiente manera:

$$r_{a/c} = \frac{m_{aire}}{m_{combustible}} \quad (4)$$

2.8.4. Ciclo de Potencia de Gas

El trabajo neto a la salida del ciclo queda definido por [19]:

$$\dot{W}_{net} = (\dot{m}_a + \dot{m}_f)(h_3 - h_4) - \dot{m}_a(h_2 - h_3) \quad (5)$$

La eficiencia isentrópica de la turbina se describe como:

$$\eta_T = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{4S}} \quad (6)$$

La eficiencia isentrópica del compresor se describe como:

$$\eta_C = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1} \quad (7)$$

El calor total a la entrada del ciclo es dado por:

$$q_{in} = \frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m}_a C_p T_1} \quad (8)$$

La eficiencia térmica del ciclo turbina de gas es:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{in}} \quad (9)$$

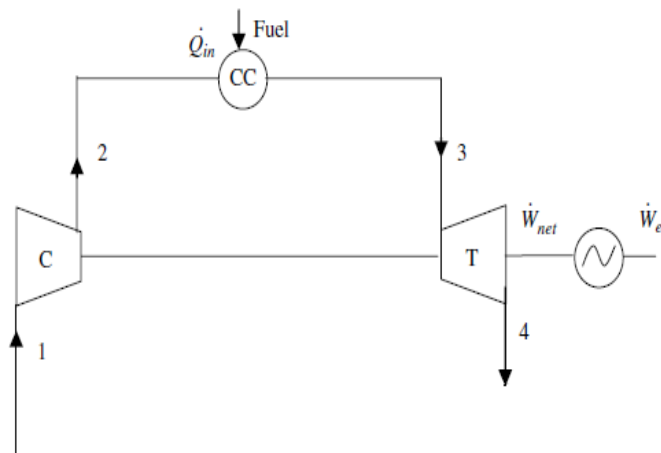


Figura 25. Componentes del Ciclo Brayton.

Fuente: Yazawa, 2017.

2.8.5. Ciclo de Potencia de Vapor

El calor transferido por el trabajo del fluido en el evaporador es determinado por [20]:

$$Q_{evap} = m_{hs}(h_5 - h_6) \quad (10)$$

$$Q_{evap} = m_{wf}(h_1 - h_4)$$

El calor transferido en el condensador es determinado como:

$$Q_{cond} = m_c(h_8 - h_7) \quad (11)$$

$$Q_{cond} = m_{wf}(h_2 - h_3)$$

El trabajo producido por la turbina en el TCTV está dado por:

$$W_t = m_{wf}(h_1 - h_2) \quad (12)$$

$$W_t = m_{wf}(h_1 - h_{2s})\eta_t$$

El trabajo consumido por la bomba en el TCTV está dado por:

$$W_{pp} = m_{wf}(h_4 - h_3) \quad (13)$$

$$W_{pp} = m_{wf}(h_{4s} - h_3)/\eta_{pp}$$

El trabajo neto en la salida de la TCTV está dado por:

$$W_{net} = W_t - W_{pp} \quad (14)$$

La eficiencia térmica del sistema TCTV puede ser definida como:

$$\eta_{th} = \frac{(W_t - W_{pp})}{Q_{evap}} \quad (15)$$

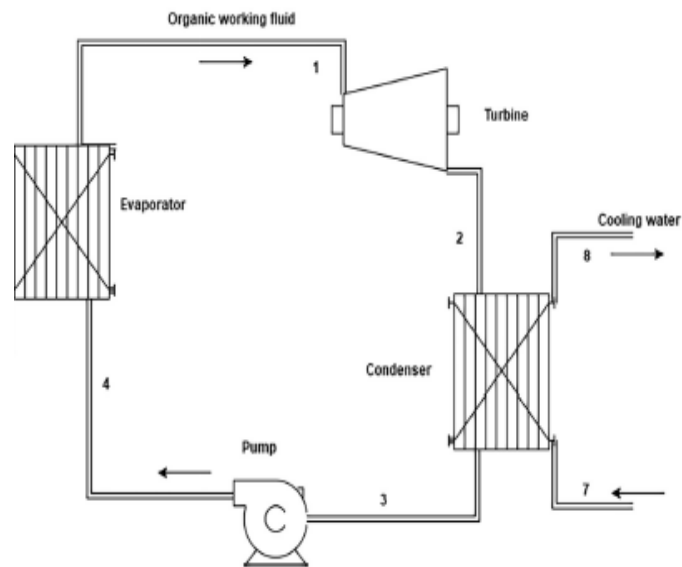


Figura 26. Componentes del Ciclo Rankine.

Fuente: Aziz, 2018.

2.8.6. Ciclo de Potencia de Ciclo Combinado

El trabajo de las turbinas de gas y vapor se calcula, respectivamente, de la siguiente manera [21]:

$$\dot{W}_{TG} = (\dot{m}_a + \dot{m}_f)(h_3 - h_4) \quad (16)$$

$$W_{TV} = m_f(h_7 - h_8) \quad (17)$$

El trabajo del compresor se puede determinar por:

$$W_{comp} = m_f(h_2 - h_1) \quad (18)$$

El calor agregado por la caldera de recuperación es determinado como:

$$Q_{FC} = m_c(h_6 - h_5) = m_f(h_4 - h_7) \quad (19)$$

La eficiencia térmica de ciclo combinado resulta:

$$\eta_{th} = \frac{(W_{TG} - W_{comp}) + W_{TV}}{Q_{FC}} \quad (20)$$

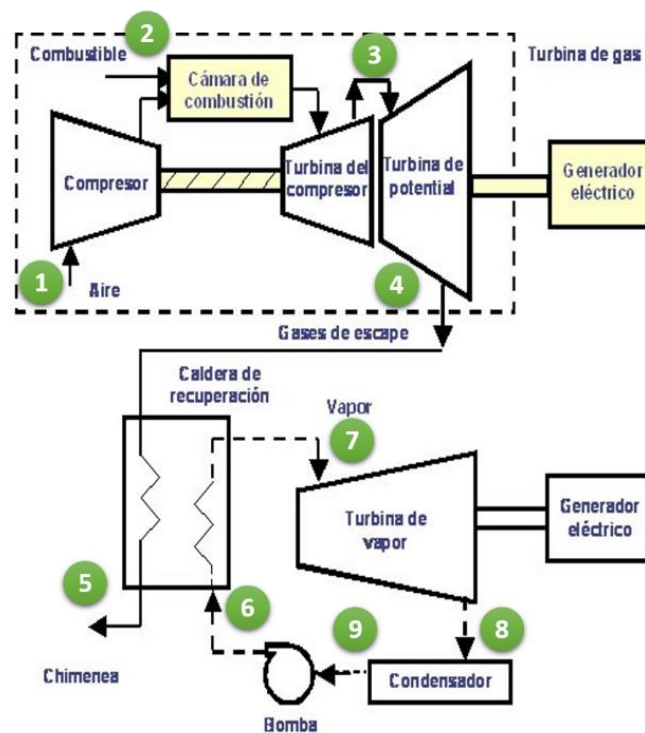


Figura 27. Componentes del Ciclo Combinado.

Fuente: Guerra, 2015.

3. HIPÓTESIS

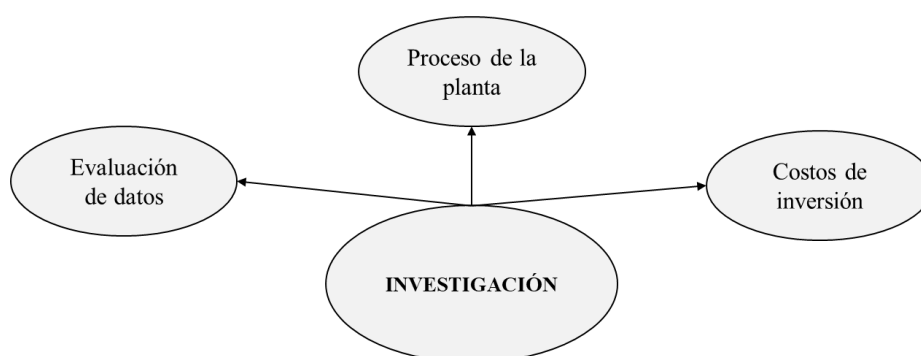
El diseño de un sistema de autogeneración en el molino Sudamérica SAC es una propuesta factible para satisfacer la demanda de energía eléctrica mediante el aprovechamiento energético de un residuo abundante del proceso productivo del arroz.

4. MARCO METODOLÓGICO

4.1. Tipo y Diseño de investigación

El presente trabajo de investigación fue de tipo: descriptivo – experimental, ya que se describió y diseñó un sistema para la generación de energía eléctrica teniendo como materia prima la cascarilla de arroz, con el propósito de aprovechar el potencial energético que contiene este residuo del proceso productivo realizado en la molinera Sudamérica S.A.C. de la provincia de Chiclayo.

4.2. Ejes de la investigación



4.3. Población y Muestra

La población en esta tesis consistió en la determinación de la demanda eléctrica que requiere el proceso productivo del arroz, lo que constituye un conjunto de maquinaria que requiere energía eléctrica para su funcionamiento.

Tabla 6. Población de la tesis.

DESCRIPCIÓN DE POBLACIÓN	MÁXIMA DEMANDA EN HORA PUNTA Y HORA FUERA DE PUNTA
Molino Sudamérica S.A.C.	Potencia activa dependiente del mes en kW.

Fuente: Elaboración Propia

La muestra para el presente proyecto fue la cascarilla de arroz, perteneciente a la Molinera Sudamérica S.A.C., en donde la capacidad es de 1000 sacos cáscara/ hora

de 85 kg por sacos. Los subproductos obtenidos después del proceso productivo, son los siguientes:

Tabla 7. Porcentajes de subproductos del arroz en cáscara.

100 %	Arroz Cáscara	
22 %	Cáscara de arroz	
7 %	Polvillo	
71%	Masa	▪ Arroz
	Directa	▪ Descarte
		▪ Arrocillo
		▪ Ñelen

Fuente: Elaboración Propia.

4.4.Método aplicado a la Recolección de Datos

- **Analítico:** Se realizó el diseño de un sistema de autogeneración de energía eléctrica, gracias al aprovechamiento del potencial energético de la cascarilla de arroz, siendo este el principal medio de abastecimiento de energía, con la finalidad de cubrir la demanda eléctrica del proceso productivo, para ello se propuso el análisis de los datos obtenido de producción y demanda en la empresa Sudamerica S.A.C. hallando así la capacidad de materia prima en los futuros 15 años.
- **Sintético:** La proceso productivo está compuesto de una serie de etapas, para obtención del arroz blanco, del cual procede la materia prima a utilizar. El entendimiento de los procedimientos empleados, sirve como fuente de información para el dimensionamiento de un sistema de autogeneración.
- **Inductivo:** Esta investigación tiene la finalidad de obtener resultados satisfactorios que aseguren la factibilidad de la incorporación de un sistema de autogeneración dentro de la empresa Sudamérica S.A.C.
- **Deductivo:** Mediante el análisis obtenido, se logró formular la hipótesis, variables y soluciones para el desarrollo del proyecto.

4.5.Método aplicado al proceso de generación

- **Recopilación información acerca del flujo de la cascarilla de arroz**

Para realizar la recopilación de datos, se tuvo en cuenta la entrada de arroz en cáscara en época de campaña. La molinera tiene registro de los ingresos a la secadora 1 y 2, donde se detalló la proyección del material biomásico para asegurar el abastecimiento de combustible dentro del proceso.

- **Determinación de las características del sistema**

Para el análisis termodinámico se necesitó tener datos acerca de la combustión y de la relación aire-combustible, además con el contenido de la humedad se pudo hallar el Valor de Calentamiento para determinar el calor agregado al proceso.

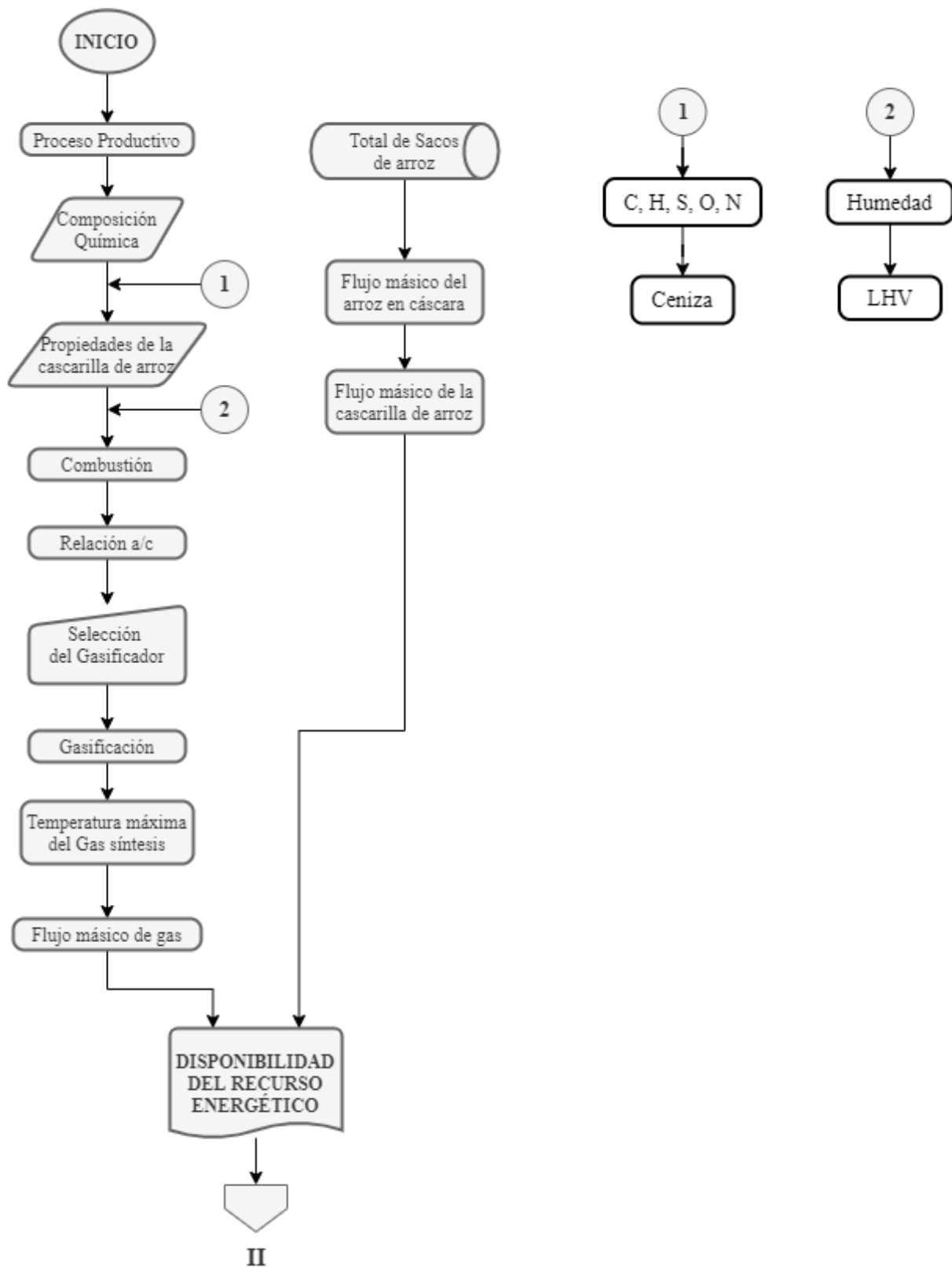
- **Cálculo y selección de los equipos y elementos constructivos**

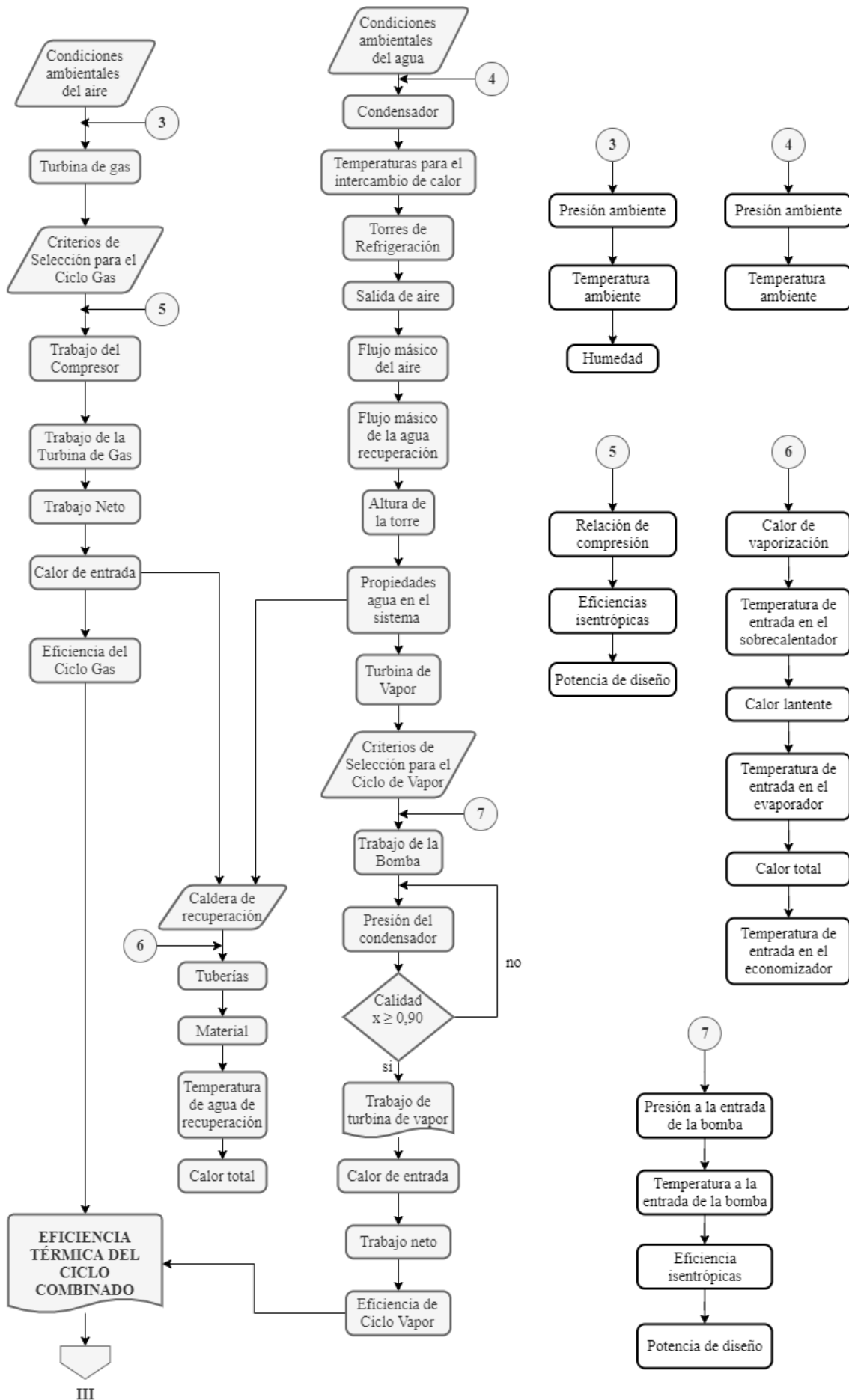
Se calculó la eficiencia del sistema, a su vez, se determinó la energía que se puede suministrar al sistema demostrando que se puede abastecer a la carga dentro de la hora punta y fuera de punta.

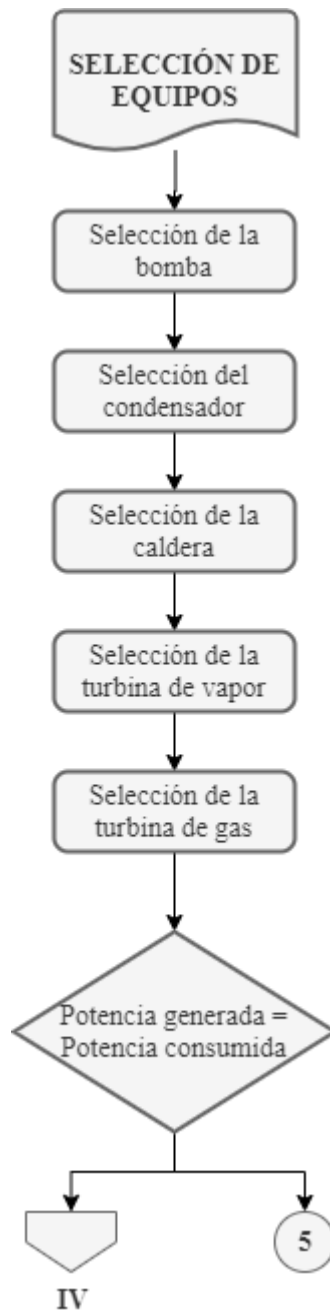
- **Estudio económico de la implementación del sistema**

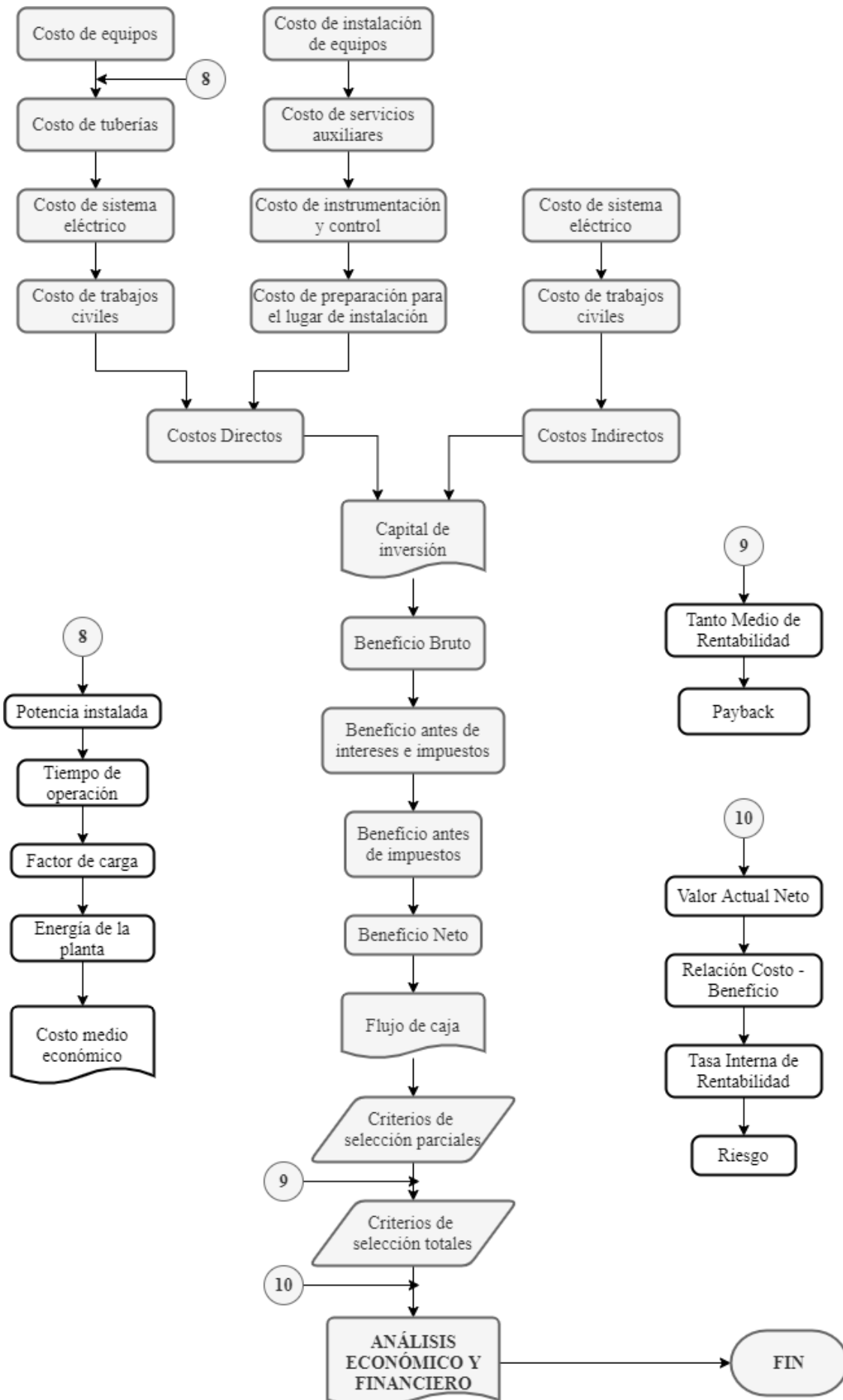
Este resultado muestra la posibilidad de la implementación de un sistema de autogeneración optimizando costos en la energía, para así, convertirse en un sistema autosuficiente, capaz de abastecer de energía de eléctrica al proceso productivo con un desecho del mismo.

4.6. Método aplicado a los costos de inversión









4.7. Variables Operacionales

Tabla 8. Variables Operacionales.

Variable	Dimensiones	Indicadores	Sub indicadores	Índice	Técnica de recolección de datos	Instrumentos de recolección de información
Variable independiente: producción de cáscara de arroz	Flujo másico de cascarilla de arroz	Máxima producción dentro de los meses de campaña	Producción en los meses de pilado	t/d	Registro del ingreso a la secadora	Guía de observación
Variable independiente: Valor de calentamiento de la cascarilla de arroz	Propiedades físicas y químicas	Valor de Calentamiento de la biomasa	-Humedad -Análisis estequiométrico -Calidad de la cascarilla	-% -Relación aire-combustible -%	Análisis Físicoquímico	Certificado de Calidad
Variable dependiente: parámetros de diseño	Proceso termodinámico del Ciclo Combinado	Proceso termodinámico	-Combustión -Flujo másico -Potencia -Eficiencia -Gasificación de la cascarilla de arroz	-CO2 -kg/s -kW -% -°C	Análisis de los cálculos	Guía de observación

Fuente: Elaboración Propia.

4.8. Matriz de consistencia

Tabla 9. Matriz de consistencia.

Título	Formulación del Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Dimensiones	Indicadores	Metodología
Diseño de un Sistema de autogeneración eléctrica con Ciclo Combinado basado en el aprovechamiento energético de la cascarilla de arroz en molinera Sudamérica S.A.C. - Chiclayo	¿Es factible la incorporación de un sistema de autogeneración eléctrica para satisfacer la demanda energética de la producción de arroz mediante el aprovechamiento energético de un residuo propio del proceso en una piladora?	O.G.: Diseñar un sistema de autogeneración eléctrica con Ciclo combinado basado en el aprovechamiento energético de la cascarilla de arroz en la Piladora Sudamérica S.A.C.	La implementación de un sistema de generación en el molino Sudamérica SAC es una propuesta factible para satisfacer la demanda de energía eléctrica mediante el aprovechamiento energético de un residuo abundante del proceso	Variable independiente: producción de cáscara de arroz	Flujo másico de cascarilla de arroz	Máxima producción dentro de los meses de campaña	Descriptiva – experimental
		O.E.1.: Determinar las características de un sistema de autogeneración eléctrica basado en el Ciclo Combinado teniendo en cuenta las condiciones de producción de la Molinera Sudamerica S.A.C.					

		O.E.2.: Calcular los parámetros de diseño para el sistema de autogeneración eléctrica basado en el Ciclo Combinado mediante un balance de energía.	productivo del arroz.	Variable independiente: Valor de calentamiento de la cascarilla de arroz	Propiedades físicas y químicas	Valor de Calentamiento de la biomasa		
		O.E.3.: Seleccionar los equipos y elementos constructivos para el sistema de autogeneración eléctrica de acuerdo a los parámetros obtenidos.						
		O.E.4.: Realizar el estudio económico correspondiente a la implementación de un sistema de autogeneración eléctrica dentro de la Molinera Sudamérica S.A.C.			Variable dependiente: parámetros de diseño	Proceso termodinámico del Ciclo Combinado	Proceso termodinámico	

Fuente: Elaboración Propia.

5. DESARROLLO Y RESULTADOS

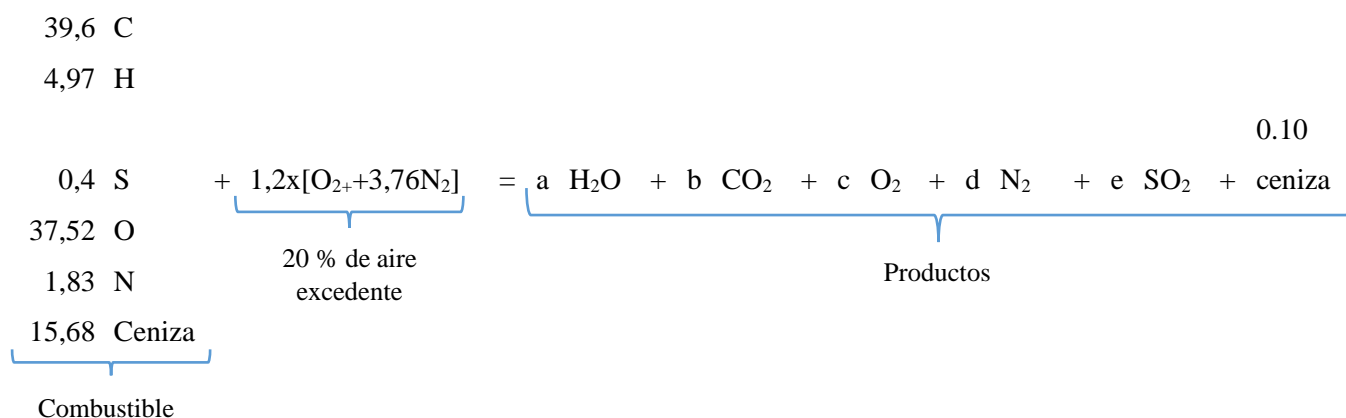
Objetivo 1: Determinar las características de un sistema de autogeneración eléctrica basado en el Ciclo Combinado teniendo en cuenta las condiciones de producción de la Molinera Sudamerica S.A.C.

Combustión de la cascarilla de arroz

Como ya anteriormente fue mencionado, el análisis volumétrico de los componentes del combustible es:

Elemento	Porcentaje
C	39,6 %
H	4,97 %
S	0,4 %
O	37,52 %
N	1,83 %
Ceniza	15,68 %

La ecuación de la combustión para 100 kmol de combustible puede ser escrita como:



La combustión tiene lugar con 20% de aire excedente.

Realizando el balance estequiométrico, se encuentra las variables de los productos.

Balance de H:

$$2a = \frac{4,97}{2} \Rightarrow a = 2,49$$

Balance de C:

$$b = 39,6$$

Balance de S:

$$e = 0,4$$

Se realiza el balance de oxígeno sin exceso de aire.

Balance de O:

$$37,52 + 2x = a + 2b + 2e$$

$$x = \frac{2,49 + 2 * 39,6 + 2 * 0,4}{2}$$

$$x = 22,48$$

Se justifica el 20% de aire en exceso al multiplicar este número por 1.2, para hallar las variables c y d.

Balance O:

$$37.52 + 1,2 * x * 2 = a + 2b + 2c + 2e$$

$$c = \frac{37,52 + 1,2 * 22,48 * 2 - 2,49 - 2 * 39,6 + 2 * 0,4}{2}$$

$$c = 4,50$$

Balance de N:

$$1,83 + 1,2 * x * 3,76 * 2 = 2d$$

$$d = \frac{1,83 + 1,2 * 22,48 * 3,76 * 2}{2}$$

$$d = 102,36$$

El volumen de aire por metro cubico de combustible para quemar es:

$$V_a = (1.2) \frac{22,49 \text{ kmol de } O_2}{100 \text{ kmol de combustible}} \left(\frac{4.76 \text{ kmol de aire}}{\text{kmol de } O_2} \right)$$

$$= 1.28 \frac{\text{kmol de aire}}{\text{kmol de combustible}}$$

Para el análisis seco, se ignora el vapor de agua, formando:

Producto	kmol/100 kmol de combustible	Análisis volumétrico (%)
CO ₂	39,60	26,97
SO ₂	0,40	0,27
O ₂	4,50	3,06
N ₂	102,36	69,70
Total	146,85	100,00

Cálculo de la masa total de productos por 100 kmol de combustible:

Producto	kmol/100 kmol de combustible	Masa molar (kg/kmol)	Masa (kg/100 kmol de combustible)
H ₂ O	2,485	18	44,73
CO ₂	39,60	44	1742,40
SO ₂	0,40	64	25,60
O ₂	4,50	32	143,89
N ₂	102,36	28	2865,97
Total	149,33754		4822,59

Para hallar la masa del combustible, se utiliza:

$$M_{combustible} = \sum_i y_i M_i$$

	y_i	M_i	
C	39,6	12	475,2
H	4,97	1	4,97
S	0,4	32	12,8
O	37,52	16	600,32
N	1,83	14	25,62
			1118,91

$$M_{combustible} = 1118,91 \text{ kmol de combustible}$$

La masa de los productos por kilogramo de combustible es:

$$\frac{m_p}{m_f} = \frac{4822,59 \text{ kg de producto}}{1118,91 \text{ kg de combustible}} = 4,31 \text{ kg de productos/kg de combustible}$$

La masa de los productos de la combustión seca por kilogramo de combustible, resulta:

$$\frac{m_{dp}}{m_f} = \frac{4777,86 \text{ kg de producto seco}}{1118,91 \text{ kg de combustible}}$$

$$\frac{m_{dp}}{m_f} = 4,27 \text{ kg de productos secos/kg de combustible}$$

La masa de aire suministrado por kilogramo de combustible, se calcula:

$$\frac{m_a}{m_f} = \frac{128,42 \text{ kmol de aire}}{100 \text{ kmol de combustible}} \left(\frac{28,97 \text{ kg de aire}}{1 \text{ kmol de aire}} \right) \left(\frac{100 \text{ kmol de combustible}}{1118,91 \text{ kg de combustible}} \right)$$

$$\frac{m_a}{m_f} = 3,32 \text{ kg de aire/kg de combustible}$$

El punto de rocío de los productos, resulta:

$$p_v = y_v p_m = \frac{2,485}{149,34} (101,325) = 1,69 \text{ kPa}$$

Según la IUPAC [22], las condiciones estándares del gas, son la siguiente:

Condiciones de Entrada

$$P = 101,325 \text{ kPa}$$

$$T = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Para hallar el volumen de aire, necesario para la producción de gas síntesis, se toman en consideración los siguientes parámetros:

$$n = 21,41 \text{ kmol aire/100 kg biomasa}$$

$$R = 8,314 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

$$T = 273,15 \text{ K}$$

$$P = 101325 \text{ Pa}$$

Por lo que, el volumen resulta:

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

$$V = \frac{21,41 * 8,314 * 273,15}{101325}$$

$$V = 0,48 \text{ m}^3/100 \text{ kg biomasa}$$

Para obtener una masa real del aire para la reacción, se utiliza una gráfica donde se relaciona cualquier componente de la combustión según su fracción molar. Resultando como Ratio Equivalente ER= 0,3.

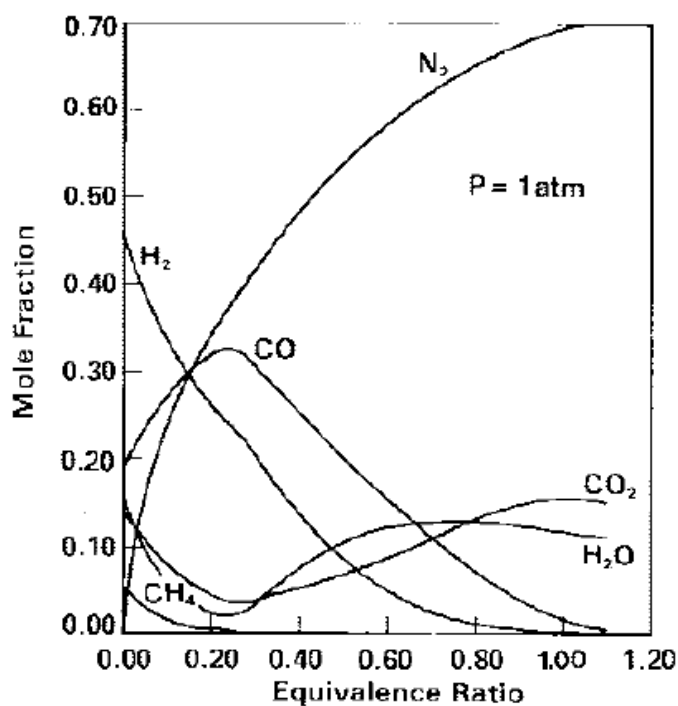


Figura 28. Composición Equilibrada del gas por reacción con el aire.

Fuente: Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems, 1988.

La masa real del aire, se obtiene de la siguiente manera [23]:

$$\text{Masa Real de Aire} = ER * \text{masa de aire}$$

$$m_{real} = 0,3 * 3,325 = 0,997 \text{ kg aire/kg biomasa}$$

Hallando un caudal disponible de:

$$\text{Caudal disponible} = 4,75 \text{ kg aire/s}$$

El caudal estequiométrico del aire, se halla con la relación aire combustible, para lo cual se necesita el caudal disponible total obtenido de la combustión previa.

$$Q_a = \frac{m_a}{m_f} * Q_D = 3,325 * 4,75 = 15,788 \text{ kg aire/s}$$

El caudal de Aire real se halla [23]:

$$Q_{ar} = Q_D * m_{aire \text{ real}}$$

$$Q_{ar} = 4,75 * 0.997 = 4,736 \text{ kg aire real/s}$$

Sánchez [23], afirma en su investigación que la temperatura a la que se somete la composición de cascarilla de arroz es de 700 °C, para obtener el gas síntesis que servirá como combustible del sistema de generación.

Tabla 10. Composición del combustible obtenido de la cascarilla de arroz.

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

Fuente: Sanchez, 2017.

Del cual, se obtienen las características químicas del gas síntesis utilizado en el gasificador del tipo Down Draft.

Tabla 11. Características químicas del gas síntesis.

Compuesto	Masa Molar (g/mol)	Gas húmedo (g/mol)	Gas seco (g/mol)	LHV (kJ/Nm ³)
CO	28	5,31	5,39	2428,26
CO ₂	44	8,34	8,47	0
CH ₄	16	0,25	0,26	574,24
N ₂	28	10,54	10,7	0
H ₂ O	18	0,27	0	0
H ₂	2	0,42	0,43	2323,55
SO ₂	64	0,08	0,08	0
TOTAL		25,21	25,33	5326,05

Fuente: Sanchez, 2017.

Las propiedades necesarias para el cálculo en la turbina de gas, se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 12. Condiciones para la generación.

Número de Moles total	7,64	kmol/ kg biomasa
Volumen molar del gas	22,41	m ³ /kmol
Densidad del gas	1,125	kg/m ³
Temperatura en la cámara de combustión	850	°C

Fuente: Sanchez, 2017.

Se debe de hallar el caudal volumétrico del gas, para poder realizarse el proceso dentro de la cámara de combustión, y si esta satisface la turbina selecciona para la generación de energía eléctrica.

Caudal volumétrico del gas

$$= 22,41 \frac{\text{m}^3}{\text{kmol}} * 7,64 \frac{\text{kmol}}{100 \text{ kg de biomasa}} * 4,75 \frac{\text{kg biomasa}}{\text{s}}$$

$$\text{Caudal volumétrico del gas} = 8,129 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Caudal másico del gas} = \rho_{\text{gas}} * Q_{\text{volumétrico del gas}}$$

$$\text{Caudal másico del gas} = 1,125 * 8,129 = 9,146 \text{ kg/s}$$

Disponibilidad del recurso energético mediante el método de Mínimos Cuadrados

La proyección de la capacidad de producción dentro de la Molinera Sudamérica S.A.C. es un dato de vital importancia para asegurar la disponibilidad futura del recurso energético, planteando el método de mínimos cuadrados, para describir con exactitud el comportamiento de la tendencia de producción. (Véase: Anexo 3)

Se debe de considerar, una utilización del 70% debido a que el porcentaje faltante se divide en la utilización propia del recurso en las calderas para el secado, además de la posibilidad del pedido de algún cliente como parte del contrato, y, las pérdidas propias dentro de la empresa.

Ecuación de mínimos cuadrados [4]:

$$\sum y = na + b \sum x$$

$$\sum xy = a \sum x + b \sum x^2$$

Tabla 13. Flujo anual cascarilla de arroz.

Año	kg de cascarilla de arroz	Toneladas de cascarilla de arroz	70% de la cascarilla para generación
2014	1769749,3	1769,7493	1238,82451
2015	5435266,35	5435,26635	3804,686445
2016	5329257,75	5329,25775	3730,480425
2017	3315546,55	3315,54655	2320,882585
2018	4157042,3	4157,0423	2909,92961

Fuente: Elaboración propia.

Se aplica la fórmula ya mencionada, teniendo como datos, las toneladas de cascarilla de arroz desde el año 2014 hasta 2018.

Tabla 14. Aplicación del método de mínimos cuadrados.

Años	Codificación		Producción de cascara de arroz (TM)	XY	X ²
	X	Y	Y		
2014	1	-5	1238,82451	-6194,12255	25
2015	2	-1	3804,686445	-3804,68645	1
2016	3	0	3730,480425	0	0
2017	4	1	2320,882585	2320,882585	1
2018	5	5	2909,92961	14549,64805	25
suma			14004,80358	6871,72164	52

Fuente: Elaboración Propia.

Los factores a y b, conformar la ecuación de tendencia para la proyección del recurso energético.

$$a = 2800,961$$

$$b = 132,148$$

$$y = 2800,961 + 132,148x$$

La producción de cáscara de arroz, con una proyección de 15 años, se realiza aplicando el método de mínimos cuadrados, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 15. Proyección de disponibilidad de cascarilla de arroz para el año 2028.

Año	Tonelada (t/año)		FM(t/d)	FM (kg/h)	FM (kg/s)
2019	6	3593,85	9,846168968	410,2570403	4,748345374
2020	7	3726,00	10,20821963	425,3424848	4,922945426
2021	8	3858,15	10,5702703	440,4279292	5,097545477
2022	9	3990,30	10,93232097	455,5133736	5,272145528
2023	10	4122,45	11,29437163	470,598818	5,446745579
2024	11	4254,59	11,6564223	485,6842624	5,62134563
2025	12	4386,74	12,01847296	500,7697068	5,795945681
2026	13	4518,89	12,38052363	515,8551513	5,970545732
2027	14	4651,04	12,7425743	530,9405957	6,145145783
2028	15	4783,19	13,10462496	546,0260401	6,319745834

Fuente: Elaboración Propia.

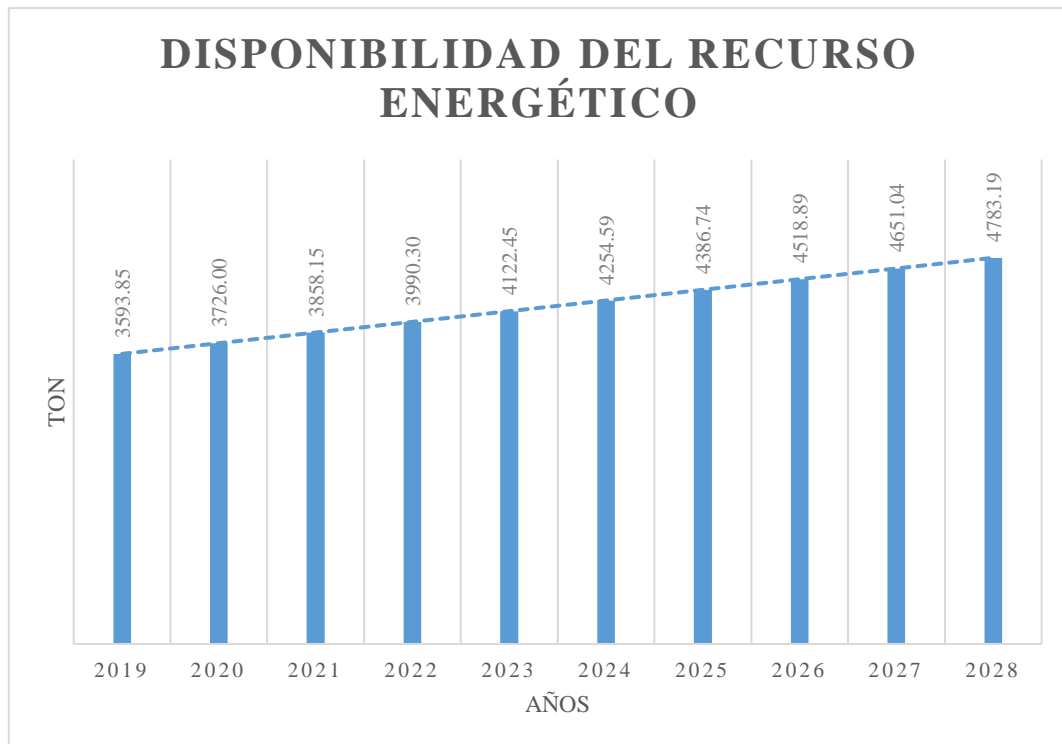


Figura 29. Disponibilidad del recurso energético.

Fuente: Elaboración Propia.

Después de los datos obtenidos, se asegura que para el 2028, el flujo de la cascarilla de arroz, será de 21, 38 t/d.

Actualmente, los molinos lambayecanos tienen una capacidad de 7 – 27 t/día [10].

Objetivo 2: Calcular los parámetros de diseño para el sistema de autogeneración eléctrica basado en el Ciclo Combinado mediante un balance de energía.

El sistema de Ciclo Combinado está compuesto de dos tipos de turbinas, una de gas y una de vapor, para que sea más factible llegar al cálculo de estos dos sistemas, se procede a separarlos en tres secciones: Ciclo de vapor, ciclo de gas y caldera de recuperación.

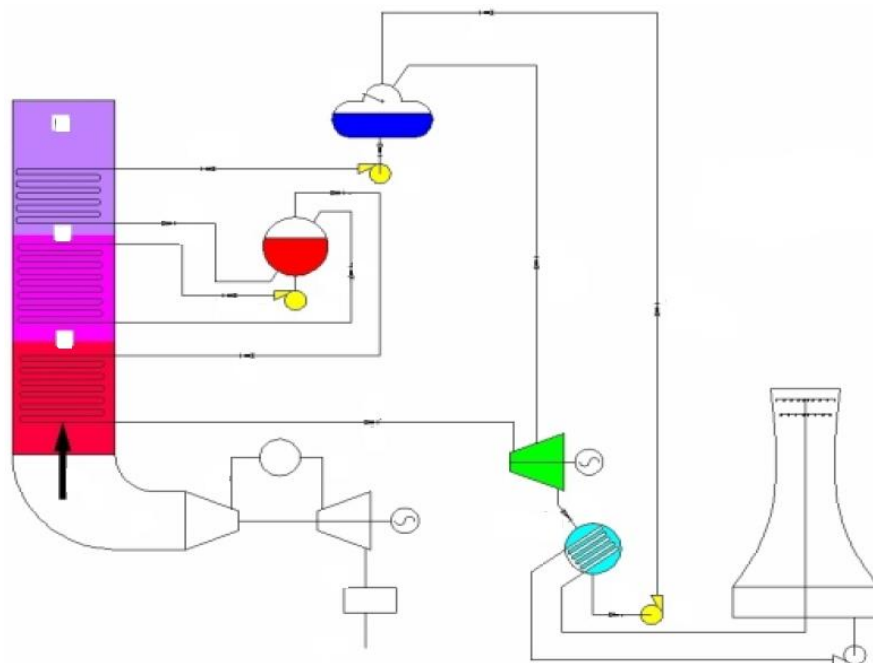


Figura 30. Ciclo Combinado Gas-Vapor.

Fuente: Aguinaga, 2012.

Balance Térmico del Ciclo Brayton

Según los registros de SENAMHI (Véase: Anexo 4), las condiciones normales del aire en la región Lambayeque se describen como:

$$P = 101,325 \text{ kPa}$$

$$T = 21,65 \text{ } ^\circ\text{C}$$

El diagrama T-s, muestra el comportamiento del fluido al pasar por el compresor, la cámara de combustión y la turbina de Gas.

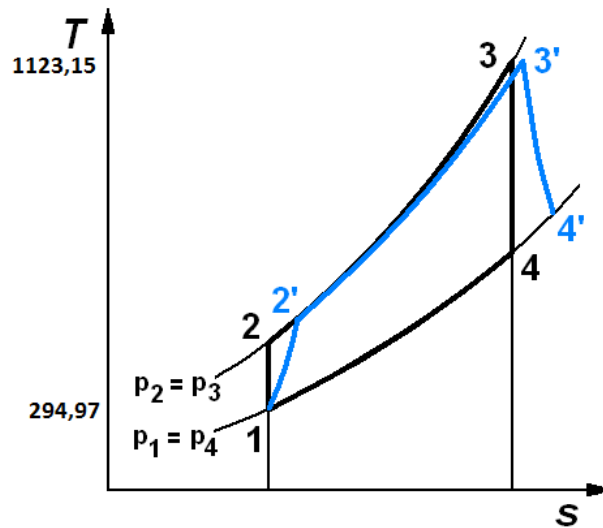


Figura 31. Diagrama T-s.

Fuente: Elaboración propia.

Estado 1'-2': Compresor

Se produce la compresión del aire, para llevarlo del estado 1' al estado 2', se manejarán datos reales de eficiencia para acercarse al comportamiento real del fluido de trabajo.

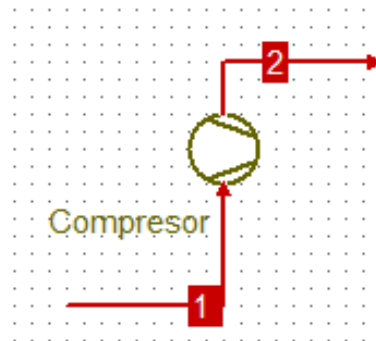


Figura 32. Compresor.

Fuente: Propia.

Se realiza una interpolación entre el parámetro inferior y superior, tomando en cuenta que las temperaturas se encuentran en Kelvin, para lo cual se realiza la conversión de °C a K.

INTERPOLACIÓN 1		
T (K)	h (kJ/kg)	pr
290	290,16	1,2311
294,8	294,9696	1,303772
295	295,17	1,3068

Donde se halla, según la temperatura, los parámetros de entalpía y presión relativa.

$$T_1 = 294,8 \text{ K}$$

$$P_1 = 101,325 \text{ kPa}$$

$$h_1 = 294,97 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$p_{r1} = 1,304$$

Para el Estado 2', teniendo en consideración que la relación de presiones será de 7:1, se considera, bajo este parámetro, empezar a interpolar para hallar los valores necesarios.

INTERPOLACIÓN 2		
T (K)	h (kJ/kg)	pr
510	513,32	9,031
511,46101	514,8263	9,126404
520	523,63	9,684

$$p_{r2} = r_p * p_{r1}$$

$$p_{r2} = 7 * 1,304 = 9,126$$

$$T = 511,461 \text{ K}$$

$$h_2 = 514,826 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Estado 3'- 4': Turbina

La turbina de Gas empleada, relacionara los valores de temperatura para poder hallar la temperatura en el estado 4' y formar las curvas isobaras en el Diagrama T-s, Cabe

resaltar, que se toma como temperatura máxima 850 °C, debido a que esta es la temperatura máxima a la que va llegar el gas de síntesis en el gasificador.

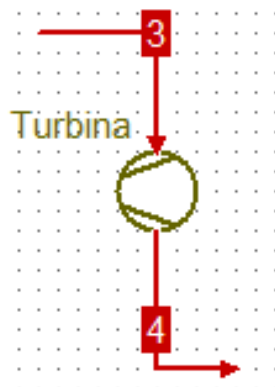


Figura 33. Turbina de Gas.

Fuente: Propia.

Las condiciones del Estado 3', resultan:

$$T_3 = 850 \text{ °C} + 273,15 = 1123,15 \text{ K}$$

$$P_3 = 709,275 \text{ kPa}$$

$$h_3 = 1187,948 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$p_r = 181,811$$

Halladas bajo la interpolación de la entalpía y presión relativa, con respecto a la temperatura en ese estado.

INTERPOLACIÓN 3		
T (K)	h (kJ/kg)	pr
1120	1184,28	179,7
1123,15	1187,9482	181,8105
1140	1207,57	193,1

Para hallar la temperatura en el Estado 4', se debe de realizar una comparación con respecto al resto de temperaturas [2].

$$T_4 = T_3 * \left(\frac{T_1}{T_2} \right)$$

$$T_4 = 1123,15 * \left(\frac{294,8}{511,461} \right) = 647,37 \text{ K}$$

INTERPOLACIÓN 4		
T (K)	h (kJ/kg)	pr
640	649,22	20,64
647,37021	657,04716	21,539165
650	659,84	21,86

Después, de una interpolación se halla las condiciones del Estado 4'.

$$T_4 = 647,370 \text{ K}$$

$$h_4 = 657,047 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$p_r = 21,539$$

Asumiendo un eficiencia del 0,81 para las turbina y 0,81 para el compresor.

$$n_c = 0,81$$

$$n_T = 0,81$$

Se procede a hallar las entalpías reales del sistema.

$$n_c = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1}$$

$$0,81 = \frac{514,826 - 294,969}{h_{2a} - 294,969}$$

$$h_{2a} = 566,398 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$n_T = \frac{h_3 - h_{4a}}{h_3 - h_{4s}}$$

$$0,81 = \frac{1187,948 - h_{4a}}{1187,948 - 657,047}$$

$$h_{4a} = 757,918 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Se halla el trabajo del compresor y de la turbina, lo que resulta en el trabajo neto del sistema. Además, se debe de calcular el calor de entrada proporcionado por la cámara de combustión. Siendo estos parámetros importantes para el desarrollo de la eficiencia del Ciclo de Gas.

$$W_C = h_{2a} - h_1 = 566,398 - 294,969 = 271,428 \frac{kJ}{kg}$$

$$W_T = h_3 - h_{4a} = 1187,948 - 757,918 = 430,030 \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_E = h_3 - h_{2a} = 1187,948 - 566,398 = 621,551 \frac{kJ}{kg}$$

$$W_N = W_T - W_C = 430,030 - 271,428 = 158,602 \frac{kJ}{kg}$$

$$n = \frac{W_N}{Q_E} = \frac{158,602}{621,551} = 0,2551 = 25,5\%$$

Balance Térmico del Ciclo Vapor

Se supone una eficiencia en el generador del 90% [12], para poder hallar la potencia neta en el lado de la Turbina de Vapor.

$$n_G = 90\%$$

$$P_N = \frac{750 \text{ kW}}{90\%} = 833,33 \text{ kW}$$

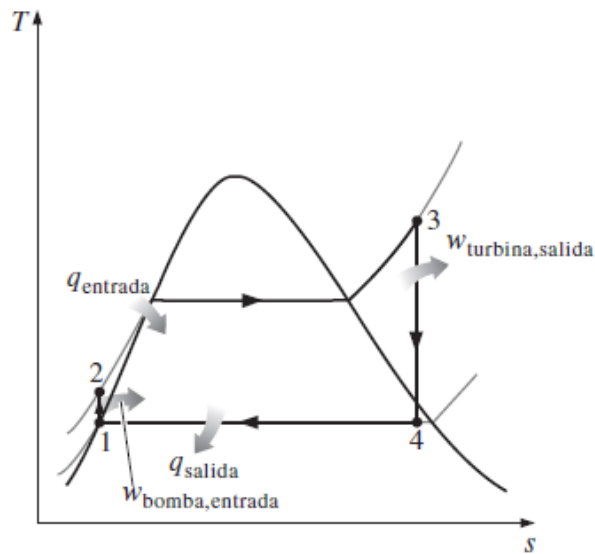


Figura 34. Diagrama T-s del Ciclo Vapor.

Fuente: Cengel, 2015.

Proceso de 1-2: Bomba

Se realiza la compresión isentrópica, a la entrada de la bomba, el estado 1 se encuentra en curva líquido saturado, a una presión de 75 kPa y se comprime hasta el estado 2, donde llega hasta 10 MPa.

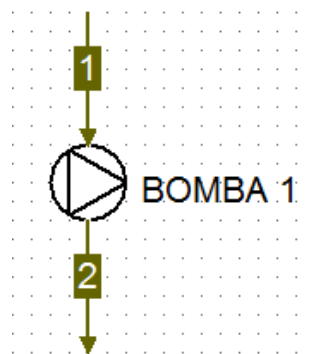


Figura 35. Bomba.

Fuente: Propia.

$$P_1 = 75 \text{ kPa} = 0.075 \text{ MPa}$$

$$P_2 = 10 \text{ MPa}$$

$$v_1 = v_f = 0,001037 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$h_1 = h_f = 384,44 \text{ kJ}/\text{kg}$$

Se halla el trabajo de bomba, que resulta de la resta de las entalpías de los estado 1 y estado 2.

$$W_{bomba} = v_f(P_2 - P_1)$$

$$W_{bomba} = 0,001037 * (10 - 0,075) * 10^3$$

$$W_{bomba} = 10,292 \text{ kJ}/\text{kg}$$

$$h_2 = h_1 + W_{bomba} = 394,732 \text{ kJ}/\text{kg}$$

Teniendo en consideración una operación real de bomba, se opta por utilizar una eficiencia para hallar la entalpía a la que opera.

$$n_{bomba} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1}$$

Asumiendo una eficiencia de 0,8 para la bomba:

$$0.80 = \frac{394,732 - 384,440}{h_{2a} - 384,44}$$

$$h_{2a} = \frac{10,292}{0.8} + 384,440$$

$$h_{2a} = 397,305 \text{ kJ}/\text{kg}$$

Proceso de 3-4: Turbina

Se realiza una expansión isentrópica en los estado de 3 a 4, en los que el vapor sobrecalentado ingresa a la turbina en el estado 3 con la presión de 10 MPa, se tiene en cuenta que la entropía permanece constante hasta el estado 4.

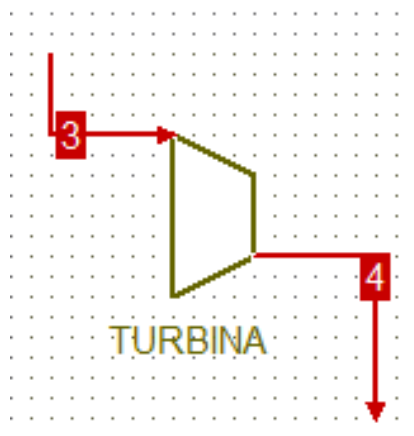


Figura 36. Turbina de Vapor.

Fuente: Elaboración propia.

Se tienen las consideraciones en el Estado 3 y el Estado 4:

$$P_3 = 10 \text{ MPa}$$

$$T_3 = 500 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$h_3 = 3375,1 \text{ kJ/kg}$$

$$s_3 = 6,5995 \text{ kJ/kg.K}$$

$$P_4 = 75 \text{ kPa}$$

$$s_{f4} = 1,2132 \text{ kJ/kg.K}$$

$$s_{fg4} = 6,2426 \text{ kJ/kg.K}$$

Al ser una expansión isentrópica, la entropía de los estados 3 y 4 son iguales, es por ello que se puede calcular la calidad, por medio de la entropía del fluido y su entropía de vaporización.

$$s_3 = s_4$$

$$s_4 = s_{f4} + x * s_{fg4}$$

$$6,5995 = 1,2132 + x * 6,2426$$

$$x = \frac{6,5995 - 1,2132}{6,2426}$$

$$x = 0,863$$

$$h_{f4} = 384,44 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{fg4} = 2278 \text{ kJ/kg}$$

Para hallar la entalpía ideal del sistema, se toman en consideración las entalpías del líquido como la entalpía de vaporización.

$$h_{4s} = h_f + x * h_{fg}$$

$$h_{4s} = 384,44 + 0,863 * 2278$$

$$h_{4s} = 2349,966 \text{ kJ/kg}$$

Para aproximar el trabajo de la turbina una función real, se plantea la aplicación de una eficiencia en el lado de la turbina de vapor.

$$n_T = \frac{h_3 - h_{4a}}{h_3 - h_{4s}}$$

Asumiendo una eficiencia para la turbina de 0,80.

$$0,80 = \frac{3375,1 - h_{4a}}{3375,1 - 2349,966}$$

$$h_{4a} = 3375,1 - 0,80 * (3375,1 - 2349,966)$$

$$h_{4a} = 2554,993 \text{ kJ/kg}$$

Para calcular la eficiencia total del sistema, se procede a hallar los trabajos, tanto de la turbina como del condensador, así como el calor proporcionado por la caldera de recuperación.

$$n_{\text{térmica}} = \frac{W_{\text{neto}}}{Q_{\text{entrada}}} = \frac{W_{\text{turbina}} - W_{\text{bomba}}}{Q_{\text{entrada}}}$$

$$\checkmark W_{\text{turbina}} = h_3 - h_{4a} = 3375,1 - 2554,993 = 820,107 \text{ kJ/kg}$$

$$\checkmark W_{\text{bomba}} = h_{2a} - h_1 = 397,305 - 384,44 = 12,865 \text{ kJ/kg}$$

$$\checkmark W_{\text{neto}} = W_{\text{turbina}} - W_{\text{bomba}} = 820,107 - 12,865 = 807,242 \text{ kJ/kg}$$

$$\checkmark Q_{entrada} = h_3 - h_{2a} = 3375,1 - 397,305 = 2977,795 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{térmica} = \frac{W_{neto}}{Q_{entrada}} = \frac{807,242}{2977,795} = 0,271 = 27,11\%$$

$$\dot{m}_{\text{agua}} = \frac{P_{Turbina}}{W_{turbina}} = \frac{833,33}{820,107} = 1,016 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Balance Térmico de la Caldera de Recuperación

Según Aguinaga [24], las Calderas de Recuperación de los sistemas de Ciclo Combinado del Perú, cumplen con la aplicación de diferentes elementos para poder mantener las temperaturas adecuadas en el equipo. Es así como, la caldera de recuperación cuenta con un Economizador, un evaporador y un Sobrecalentador, para llevar la temperatura a lo requerido por la Turbina de Vapor. El sistema escogido se mantiene a una sola presión.

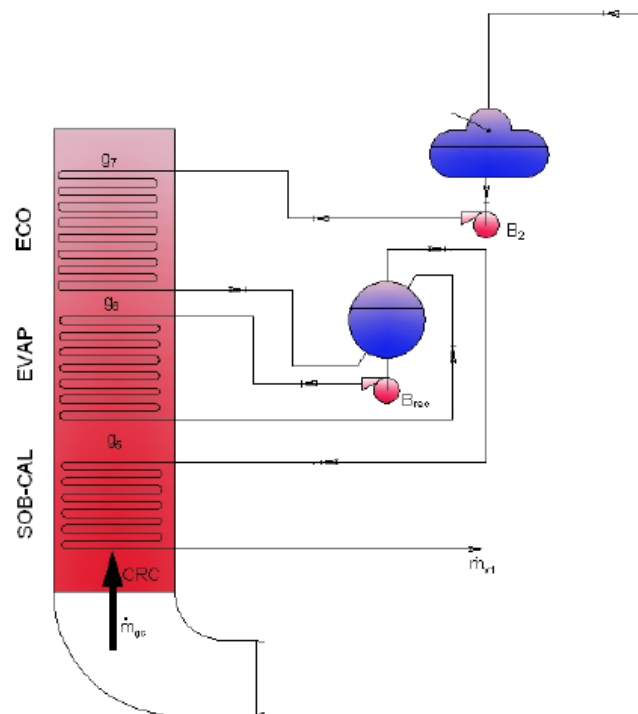


Figura 37. Caldera de Recuperación.

Fuente: Aguinaga, 2012.

El fluido Caliente en este caso, son los gases de escape de la Turbina de Gas, los cuales poseen una temperatura estimada, la que servirá como base de cálculo.

$$\text{Caudal másico} = 9,5 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\text{Temperatura} = 538 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Las condiciones de diseño a la que estará sometida la Caldera de Recuperación deben cumplir con los parámetros adecuados para el sistema, en este caso se obtuvo del balance termodinámico la calidad del vapor, siendo 86,283 %, por lo cual el flujo másico del agua hallado con anterioridad, deberá dividirse sobre la calidad.

Tabla 16. Condiciones de Diseño para la Caldera de Recuperación.

<u>Temperatura a la entrada</u>	242 °C
<u>Flujo másico del agua</u>	1,016 kg vapor /s
<u>Producción de vapor saturado</u>	1,178 kg vapor /s
<u>Presión de diseño</u>	10 MPa
<u>Calidad de Vapor</u>	86,283 %

Fuente: Propia.

En la Tabla A-5 del Libro de Termodinámica Cengel [2], se toman los valores de entalpías a 10 MPa.

<u>Entalpía de Vaporización</u>	hfg	2333 kJ/kg
<u>Temperatura de Saturación</u>	Tsat	311 °C
<u>Calor Específico</u>	cpa	6,1845 kJ/kg °C
<u>Entalpía del Líquido</u>	hf	293,07 kJ/kg

En la Tabla A-9 del Libro de Transferencia de Calor Cengel [25], se toman los valores de Calor Específico a 311 °C.

Temperatura (°C)	Calor específico (J/kg.K)	
	Líquido	Vapor
300	5750	5980
311	6184,5	7036
320	6540	7900

Para hallar la entalpía de Vapor Húmedo, se utilizará los datos hallados en la Tablas Termodinámicas de entalpía del fluido y vaporización.

$$h = h_f + x * h_{fg}$$

$$h = 293,07 + 86,28\% * 2333 = 2306,05 \frac{kJ}{kg}$$

La entalpía de Vaporización con una calidad de 86,3 %, resulta:

$$h_{fg86,3\%} = x * h_{fg}$$

$$h_{fg86,3\%} = 86,28\% * 2333 = 2012,98 \frac{kJ}{kg}$$

$$h = Cp(T)$$

El fluido se convertirá en vapor a la temperatura de 325,488 °C.

Para hallar el Calor sensible, se debe de tomar en cuenta la temperatura de saturación a 10 MPa, además de la temperatura al salir del desairado. [26]

$$Q_s = m_{vapor} \cdot c_{pa} \cdot (T_{saturación} - T_{entrada})$$

$$Q_s = 1,178 * 6,1845 * (311 - 242)$$

$$Q_s = 502,547 kW$$

Se halla el calor de Vaporización con una calidad de 86,3%.

$$Q_l = m_{vapor} \cdot h_{fg86,3\%}$$

$$Q_l = 1,178 * 2012,98 = 2370,625 kW$$

La energía para generar vapor saturado, resulta de la suma del calor latente y el de vaporización, otorgando el calor al inicio del economizador.

$$Q_T = Q_s + Q_l$$

$$Q_T = 502,547 + 2370,625 = 2873,172 kW$$

Según Leyva [10], el calor específico de los gases de escape de la combustión entre el gas síntesis y el aire, resulta:

$$c_{pa} = 0,32 \frac{BTU}{lb \text{ } ^\circ F}$$

Este valor debe someterse a un cambio de unidades, ya que se está trabajando en el Sistema Internacional.

$$c_{pa} = 1,34 \frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C}$$

Para poder visualizar el comportamiento de las temperaturas dentro de las diferentes etapas de la Caldera de Recuperación, como son el Economizador, Evaporizador y Sobrecalentador, se utiliza la siguiente fórmula:

$$T_{salida} = T_{gases\ de\ escape} - \left(\frac{Q}{m_{gases\ de\ escape} \cdot c_{pa}} \right)$$

Para hallar la temperatura de entrada del Economizador, se emplea el valor del Calor total para generar vapor saturado, ya que esta temperatura será la menor por estar pasando por la primera etapa de la Cámara de Combustión.

$$T_{entrada\ del\ economizador} = 538 - \left(\frac{2873,172}{9,5 * 1,34} \right) = 312,258\ ^\circ C$$

Para hallar la temperatura de entrada del Evaporador, se emplea el valor del Calor de Vaporización para generar vapor con 86,3% de calidad, ya que esta temperatura será intermedia por estar pasando por la segunda etapa de la Cámara de Combustión.

$$T_{entrada\ del\ evaporador} = 538 - \left(\frac{2370,625}{9,5 * 1,34} \right) = 351,742\ ^\circ C$$

Para hallar la temperatura de entrada del Sobrecalentador, se emplea el valor del Calor Sensible para generar vapor sobrecalentado, ya que esta temperatura será mayor por estar pasando por la tercera etapa de la Cámara de Combustión.

$$T_{entrada\ del\ sobrecalentador} = 538 - \left(\frac{502,547}{9,5 * 1,34} \right) = 498,515\ ^\circ C$$

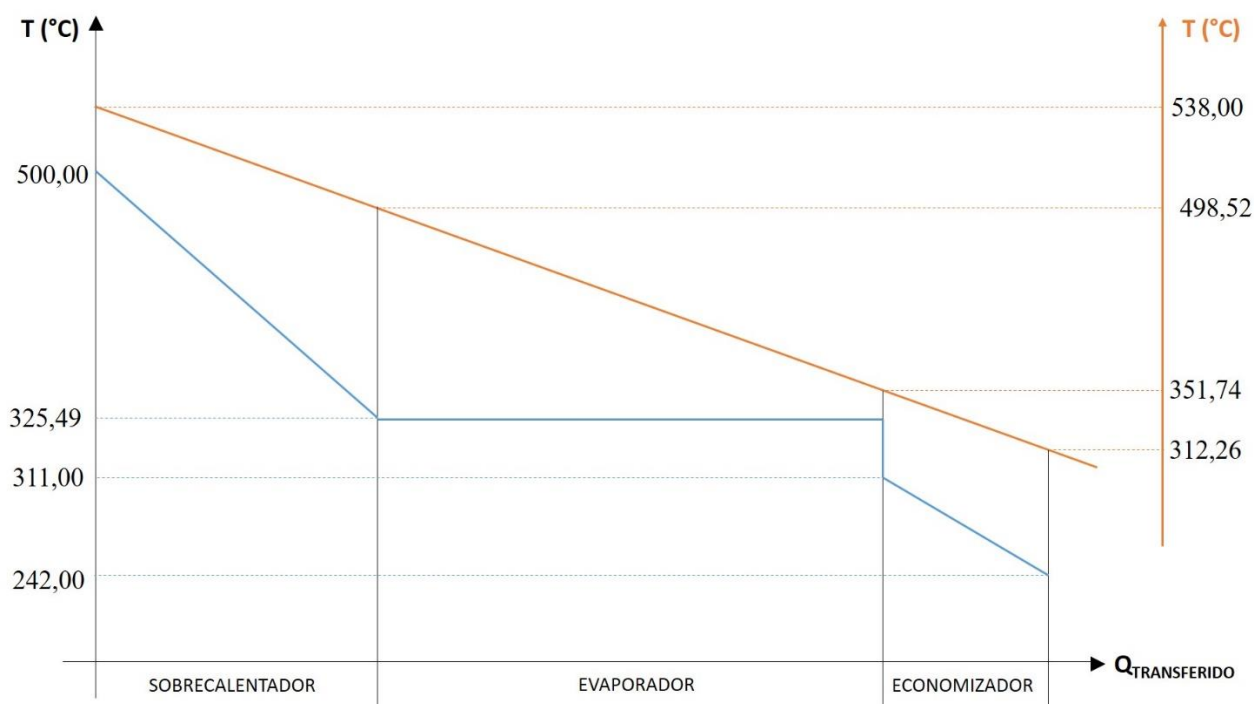


Figura 38. Temperatura del gas y del agua al pasar por las etapas de la Caldera de Recuperación.

Fuente: Propia.

Condiciones de Operación del Condensador

El proceso interno del condensador se realiza entre los estados 4 a 1, donde la mezcla bifásica, con calidad $x = 0,90$, a la salida de la turbina rechaza el calor a la presión $p_1 = 75 \text{ kPa}$, hasta llegar a la temperatura necesaria para el retorno del ciclo a través de la bomba. Teniendo en consideración que el condensador cumple la función de intercambiador de calor entre el fluido caliente, que para este caso es el vapor húmedo proveniente de la turbina, y el fluido frío, agua de la torre de refrigeración.

Se debe de tomar en consideración que T_e representa la temperatura a la entrada, asimismo, T_s , la temperatura a la salida.

Del Ciclo Rankine, se puede precisar los parámetros del vapor húmedo, siendo:

$$T_e = 91.75 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_s = 40 \text{ }^\circ\text{C}$$

Se observa que T_e corresponde a la temperatura de agua como líquido saturado a presión $p_1 = 75 \text{ kPa}$, sin embargo, la temperatura a la que debe entrar a la bomba debe de ser de $40 \text{ }^\circ\text{C}$, debido a que es la máxima permitida en las bombas estandarizadas promedio (catálogo de bomba). Es por ello que se debe de asegurar que se encuentre con esos datos en el Estado 1, para facilitar el seleccionamiento posterior de los equipos principales.

De esta premisa parte la utilización de una torre refrigeración, para que con esta se regularice el ciclo hasta lograr los parámetros adecuados.

Se debe optar por una temperatura menor a $40 \text{ }^\circ\text{C}$ a la entrada de la torre de refrigeración para extraer el calor del agua que continuara su recorrido en el ciclo. La temperatura a escoger será misma que el agua de reposición que tenga la torre, por ello se toma el valor indicado por Senamhi para el agua en la región Lambayeque.

Para el agua fría, se toma para el cálculo el valor a la salida de:

$$T_s = 21 \text{ }^\circ\text{C}$$

Siguiendo este planteamiento, la razón de transferencia de calor del condensador como intercambiador es de:

$$\dot{Q}_{transf} \approx 187 \text{ kW}$$

El sistema funciona con un flujo másico de $\dot{m} = 0.864 \text{ kg/s}$, como se halló en los cálculos del ciclo Rankine, por lo que se llega a la conclusión, de que se necesitará un flujo mayor para poder retribuir la cantidad necesaria de agua al sistema.

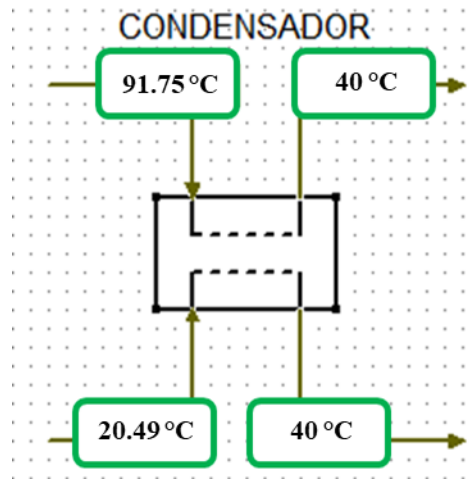


Figura 39. Modelamiento del condensador como intercambiador de calor con respecto a la torre de refrigeración.

Fuente: Propia.

Condiciones de Operación de la Torre de Refrigeración

La torre de refrigeración es el equipo que expulsa el vapor saturado proveniente de la etapa de condensación al ambiente, enfriando el agua hasta la temperatura requerida por el sistema como entrada de la bomba. La transferencia de calor se realiza a contra flujo, donde el aire, a condiciones normales otorgadas por SENAMHI, ingresa por la parte inferior de la torre, y es expulsado al ambiente. El agua caliente del ciclo Rankine, ingresa a través de toberas, donde el agua donde se recircula hasta devolverla al condensador.

Siguiendo el criterio de reducir costos y contando con el espacio necesario, se opta por una pequeña torre de refrigeración de tiro natural para poder realizar el enfriamiento del agua en el ciclo.

La temperatura promedio de la región Lambayeque es 22 °C (véase Anexo D), la que se utiliza como valor de temperatura de bulbo seco para el cálculo. La humedad relativa se extrae del “Estudio de precipitación, temperatura y humedad relativa” donde se indica que el promedio es de 77%. [27]

En consecuencia, los datos iniciales para la entrada de aire son los siguientes:

$$T_{BS} = 22 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\lambda = 77\%$$

Teniendo esta información, se procede a hallar la temperatura de bulbo húmedo. Para ello, existen dos métodos que se pueden utilizar.

- ✓ Por medio de la carta psicrométrica, donde se interseca el valor de T_{BS} con respecto a la curva de humedad relativa correspondiente. En ese punto debe de pasar una recta de temperatura de bulbo húmedo (T_{BH}), siendo este el resultado necesario para aplicar en el cálculo.
- ✓ Por medio del software EES, permite ingresar los datos de T_{BS} y λ en la interfaz Psychrometric Properties Calculation, te brinda el valor de la temperatura de bulbo húmedo (T_{BH}) a esas condiciones.

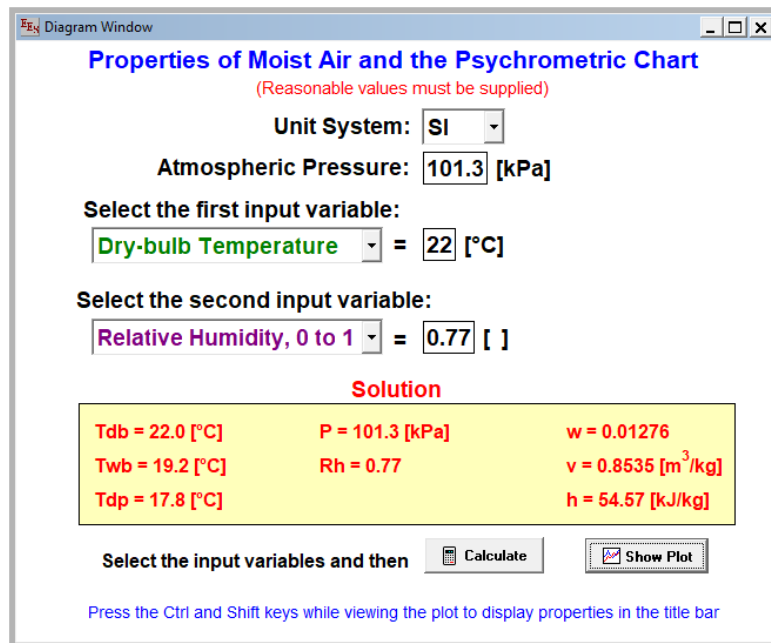


Figura 41. Datos ingresados a Psychrometric Properties Calculator en EES.

Fuente: Elaboración propia.

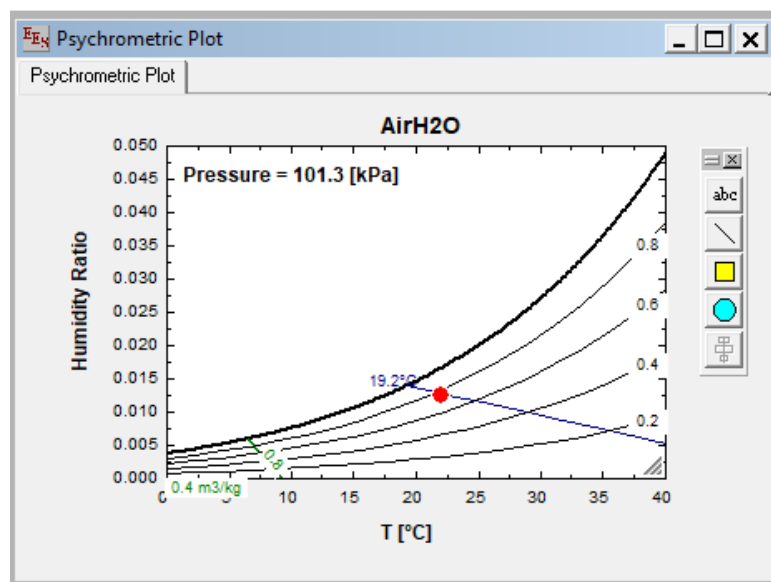


Figura 42. Gráfico psicrométrico donde indica la temperatura de bulbo húmedo a la entrada.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 40, se muestra la carta psicrométrica, pero esta solo te da valores aproximados, ya que es muy difícil predecir los decimales, sin embargo, con la utilización de un software podemos comprobar si la temperatura es la correcta, como se muestra en la Figura 41. La temperatura de bulbo húmedo resulta:

$$T_{BH} = 19.2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

El otro fluido que interviene en la torre de refrigeración, es el agua de condensación, por ello también se deben de definir sus parámetros. La temperatura de entrada será de 40°C indicada por el intercambio de calor en el condensador, a se vez, se define la temperatura de salida como 21 °C, indicada por SENAMHI (véase Anexo E).

Para la salida del aire, se toma como criterio que la temperatura no debe de exceder la más alta a la entrada del agua, es decir debe ser menor que la temperatura de condensación, no obstante, este no es el único criterio a tomar en cuenta, sino también la temperatura debe de ser mayor que la de bulbo seco [28]. De este planteo, se opta por tomar como temperatura de salida:

$$T_s = 38 \text{ } ^\circ\text{C}$$

El diagrama de la torre de refrigeración contiene dos entradas y dos salidas, de dos fluidos diferentes, agua y aire.

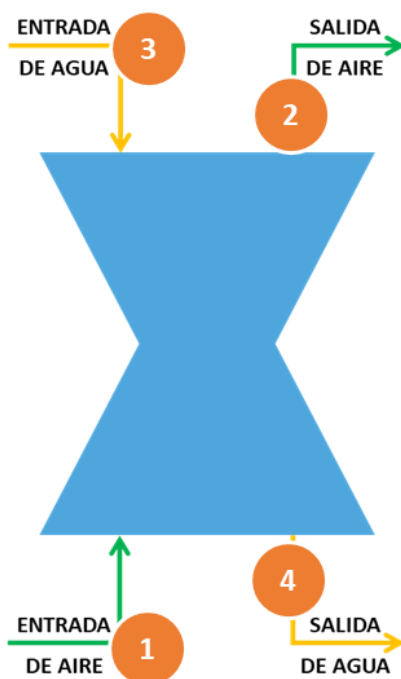


Figura 43. Diagrama del proceso interno de la torre de refrigeración.

Fuente: Elaboración propia.

Los valores obtenidos de la entrada de aire en el programa EES se encuentran en la Tabla 17.

Tabla 17. Propiedades a la entrada de aire en la torre de refrigeración.

Propiedades a la entrada del aire	
Temperatura de bulbo seco (T_{BS})	22 °C
Temperatura de bulbo húmedo (T_{BH})	19,2 °C
Humedad específica (ω_1)	0,01276 kg H_2O / kg aire seco
Volumen específico (v_1)	0,8535 m ³ / kg
Entalpía (h_1)	54,57 kJ / kg

Fuente: Elaboración propia.

Para los datos de la salida de aire, se asume que la humedad será del 100% ya que es expulsado en estado saturado. Se ingresan los valores al programa EES, en la interfaz de Psychrometric Properties Calculation, donde se encuentra las propiedades expresadas en la tabla 18.

Tabla 18. Propiedades a la salida de aire en la torre de refrigeración.

Propiedades a la salida del aire	
Temperatura de bulbo seco (T_{BS})	38 °C
Temperatura de bulbo húmedo (T_{BH})	38 °C
Humedad específica (ω_2)	0,04358 kg H_2O / kg aire seco
Volumen específico (v_2)	0,9434 m ³ / kg
Entalpía (h_2)	150,20 kJ / kg

Fuente: Elaboración propia.

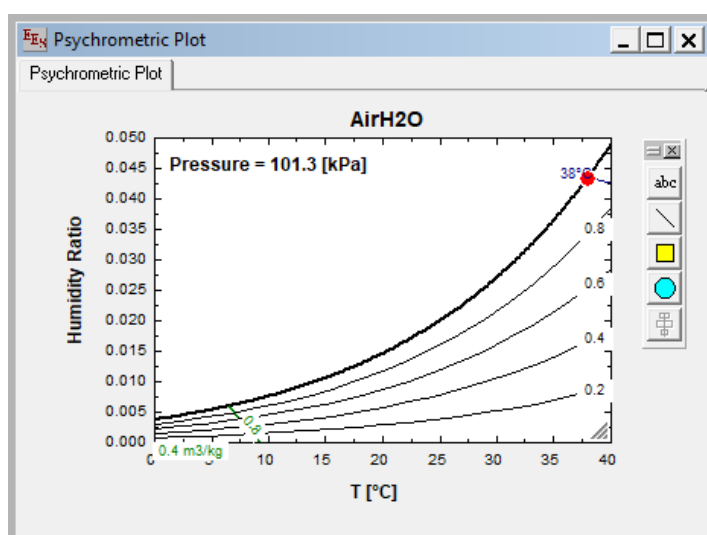


Figura 44. Gráfico psicrométrico donde indica la temperatura de bulbo húmedo a la salida.

Fuente: Elaboración propia.

Las temperaturas a las que estará el agua dentro del sistema, se mencionaron anteriormente, además, para los cálculos consecuentes, se necesita hallar las entalpías, en el estado de agua saturada, expresadas en la Tabla 20.

Tabla 19. Propiedades del agua en la torre de refrigeración.

Propiedades del agua en el sistema	
Temperatura de entrada (T_e)	40 °C
Entalpía de entrada (h_3)	167,5 kJ/kg
Temperatura de salida (T_s)	21 °C
Entalpía de salida (h_4)	88 kJ/kg

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo los datos de la temperatura, se puede hallar los valores de rango y aproximado, utilizando las diferenciales entre dichos valores. Se consideran estos parámetros como los principales para el comienzo del diseño de la torre de refrigeración.

El rango se define como la diferencia entre las temperaturas de entrada y salida del agua.

$$\text{Rango} = \Delta T = T_1 - T_2 = 40 - 21 = 19 \text{ °C}$$

La aproximación se calcula por medio de la diferencia entre la temperatura de salida del agua y la temperatura de bulbo húmedo a la que se expulsa el aire en el ambiente.

$$\text{Aproximación} = T_2 - T_{BH} = 21 - 38 = -17 \text{ °C}$$

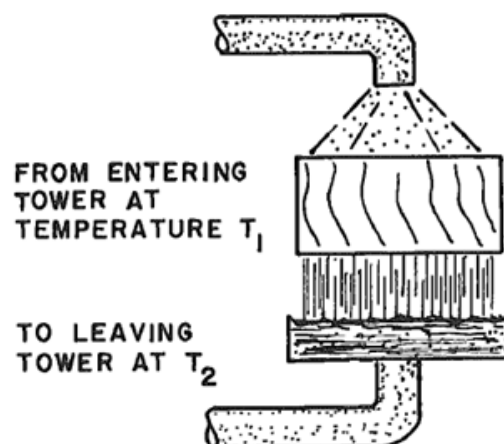


Figura 45. Operación de la torre de refrigeración.

Fuente: Cheremisinoff [28].

La carga de agua no es constante durante la evaporación, lo que produce pérdidas en el proceso. Generalmente, las constantes G y L, utilizadas para expresar el abastecimiento de agua en la torre, son asumidas. Se recomienda estimar la constante L, y con ello, precisar la constante G [28]. Para el cálculo, el flujo de agua escogido es de 34 kg/s .

Por consiguiente, el volumen del fluido es de:

$$\text{Volumen} = \frac{m}{\rho} = \frac{34}{997} = 0,034 \text{ m}^3/\text{s}$$

La construcción de la curva de equilibrio requiere de la temperatura a la que se encuentra el agua con respecto a las entalpías a la que funciona todo el proceso, es decir desde la temperatura mínima de la combinación aire-agua, hasta su máxima. De donde se obtiene, la pendiente de la curva que representa el comportamiento de ambos fluidos dentro de la torre de refrigeración.

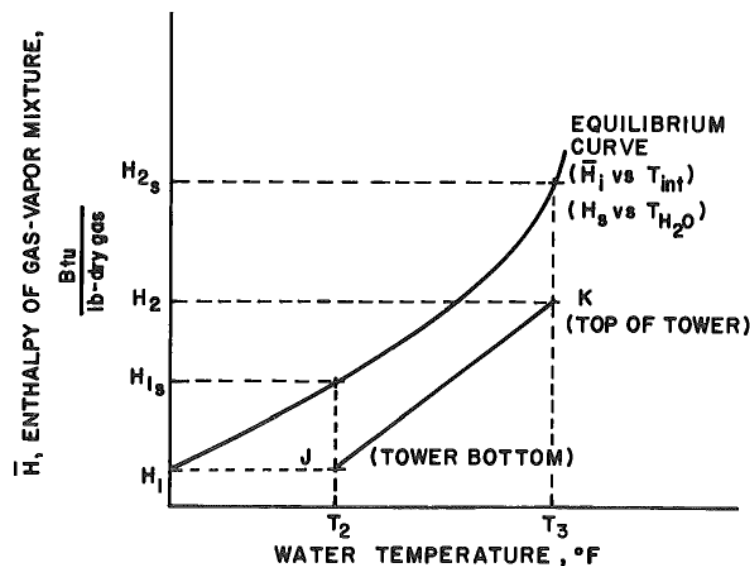


Figura 46. Diagrama General de Operación de la Torre de Refrigeración.

Fuente: Chermisinoff [28].

En la Figura 46, se puede observar cómo se determina la pendiente de la curva, tomando los datos de las temperaturas máxima y mínima de la mezcla agua – aire. La recta JK es paralela a la pendiente de la curva del comportamiento en la torre de refrigeración, por lo que, ambas pendientes son iguales. Partiendo de esta hipótesis, se determina la pendiente de la curva en todas las temperaturas existentes en el sistema (véase Anexo G).

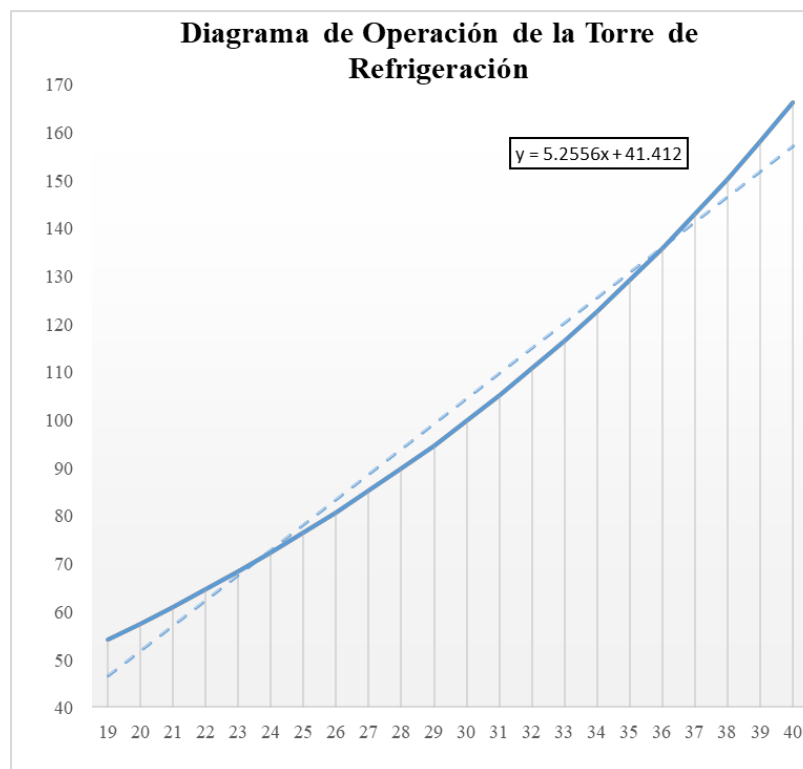


Figura 47. Operación de la Torre de refrigeración a condiciones de la mezcla aire - agua.

Fuente: Elaboración propia.

Según el gráfico mostrado en la Figura 47, se puede determinar el valor de la pendiente.

$$\frac{LC_p}{G} = 5,2556$$

Para el cálculo del G_{\min} , se coloca el $C_p = 1,0$ para el agua, lo que se considera como la relación de la carga del agua con respecto a la del aire [28].

$$G_{\min} = \frac{L}{5,2556} = \frac{34}{5,2556} = 6,4693 \text{ m}^3/\text{s}$$

Al aplicar un balance de masa y energía al sistema, se puede despejar la ecuación reducida del flujo másico del aire como [2]:

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{m}_3(h_3 - h_4)}{(h_2 - h_1) - (\omega_2 - \omega_1)h_4}$$

Objetivo 3: Seleccionar los equipos y elementos constructivos para el sistema de autogeneración eléctrica de acuerdo a los parámetros obtenidos.

Gasificador Ankur FBG-400

El gasificador de biomasa fina puede utilizar diferentes tipos de biomasa fina, gránulos, residuos agrícolas trillados, etc. Se utiliza con una humedad mayor al 10% en general.

Hay amplias clasificaciones disponibles desde 40 kg / h hasta un sistema de 2,000kg/ h [27]. (Véase: Anexo 10)

El gasificador seleccionado es número 44, Gasificador Down Draft FBG-400, de acuerdo al flujo de cascarilla que tenemos, de aproximadamente 400 kg/h.

Biomasa fina

×

No Señor.	Modelo de gasificador	Capacidad de consumo de biomasa (Kilos / hora) #	Generación de energía bruta (kWe / hora) #	Salida térmica bruta (kcal / hora) #
1	FBG-40	43	18 años	90,720
2	FBG-100	108	52	226,800
3	FBG-200	216	100	453,600
4 4	FBG-400	432	216	907,200
5 5	FBG-850	918	459	1,927,800
6 6	FBG-1100	1,188	594	2,494,800
7 7	FBG-1800	1,944	972	4,082,400



Figura 48. Gasificador Ankur FBG-400.

Turbina de Gas Dresser-Rand KG2

Las turbinas de gas Dresser-Rand KG2 son una turbina de gas industrial con un rango de potencia de salida de 1,85 MW. Las turbinas combinan un mantenimiento mínimo en una huella compacta que las hace ideales para la generación continua de energía en tierra y en alta mar, emergencia y energía en espera y plantas combinadas de calor y energía (CHP). Son de diseño simple, bajo mantenimiento, alta confiabilidad y experiencia operativa.

El KG2 3G está disponible con un sistema de combustión Dry Low Emissions (DLE), que proporciona niveles de emisión de NOx extremadamente bajos. Si se requieren emisiones ultra bajas debido a las estrictas regulaciones [28].

La Turbina de Gas Dresser-Rand KG2, se seleccionó debido a la potencia que se necesita en la empresa molinera SUDAMÉRICA S.A.C., teniendo en consideración que se puede aplicar para cualquier tipo de gas residual, además, es una turbina aeroderivada de fácil mantenimiento y bajo costo, lo cual disminuiría los gastos de la empresa.

Tabla 20. Características de la Turbina de Gas Dresser-Rand KG-2.

Potencia de Generación:	1,85 MW
Frecuencia:	60 Hz
Eficiencia Bruta:	25,5 %
Relación de compresión:	7
Flujo de los gases de escape:	9,5 kg/s
Temperatura de los gases de escape:	538 °C

Fuente: SIEMENS.

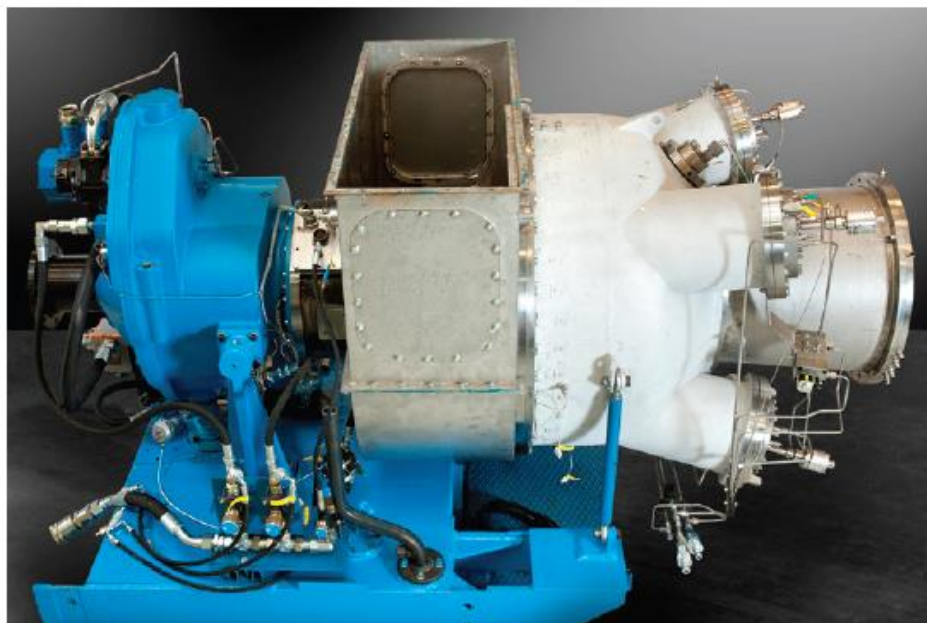


Figura 49. Turbina de Gas Dresser-Rand KG-2.

Fuente: SIEMENS.

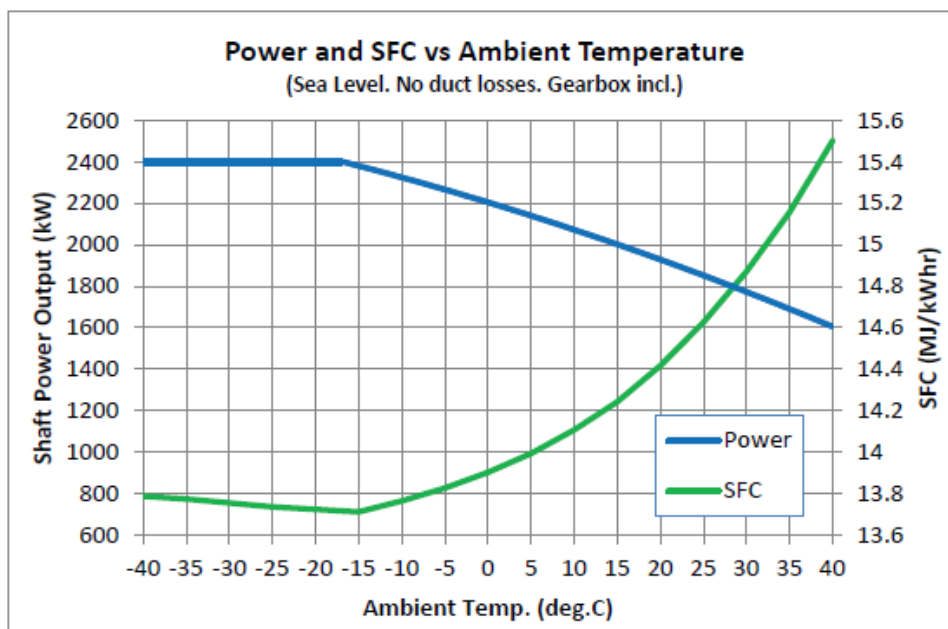


Figura 50. Potencia vs Temperatura de Ambiente

Fuente: SIEMENS.

Turbina de Vapor SST-050

La Turbina de Vapor SST-050 cuenta con una sola etapa, es de bajo mantenimiento debido a su diseño siempre, extremadamente segura y contiene los requerimientos de la norma API 611/612.

Se seleccionó debido a la potencia que se necesita en la empresa molinera SUDAMÉRICA S.A.C., teniendo en consideración que contiene una de las potencias más bajas y posible de manipular, según sea el crecimiento de la demanda energética dentro de la empresa.

Tabla 21. Características de la Turbina de Vapor SST-050.

Potencia de Generación:	750 kW
Frecuencia:	60 Hz
Presión del vapor vivo:	101 bar
Presión de vapor a la salida:	11 bar

Fuente: SIEMENS.

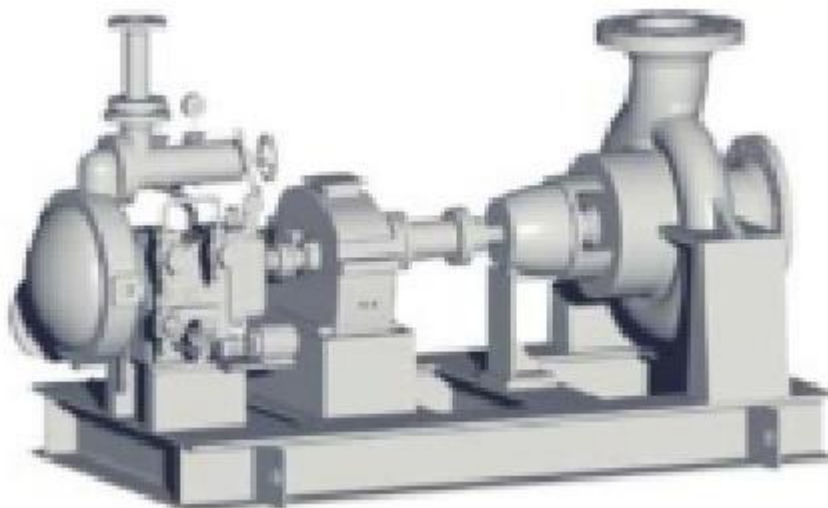


Figura 51. Turbina de Vapor SST-050.

Fuente: SIEMENS.

Para este tipo de turbina se utilizará, la Bomba de Alimentación centrífugas ejecución sobre bancada. (Véase en: Anexo 13)

Caldera de Recuperación HRSG Q11/950-4-2.57400

Tiene una capacidad de 0.27-80t / h, siendo aplicada para la industria química. Produce vapor o agua caliente al utilizar el calor de los gases de escape o el líquido residual durante el proceso de producción. Podría convertir los desechos en riqueza, ahorrar energía, proteger el medio ambiente, crear beneficios económicos para los usuarios. [29]

La HRSG Q11/950-4-2.57400, se selecciona según la cantidad de vapor que requiera el sistema de autogeneración, y las temperaturas a la que estuvo sometida durante el balance termodinámico.

Modelo	Capacidad de evaporación (t / h)	Temperatura nominal de vapor (°C)	Capacidad de entrada de gas (m ³ / h)	Temperatura del gas de entrada (°C)
Q11 / 950-4-2.5 / 400	4.4	400	11000	950
Q15 / 800-5-2.8 / 401	5.5	400	15000	800
Q28.8 / 900-9.8-2.5 / 400	9.8	400	26800	900
Q25.5 / 930-10-2.5 / 400	10	400	26500	930
Q38.2 / 930-15-2.5 / 400	15	400	38200	930
Q50 / 1100-25-2.5 / 400	25	400	50000	1100
Q72 / 880-25-3.82 / 450	25	450	72000	880

Figura 52. Tipos de Calderas de Recuperación.

Fuente: SITONG BOILER.

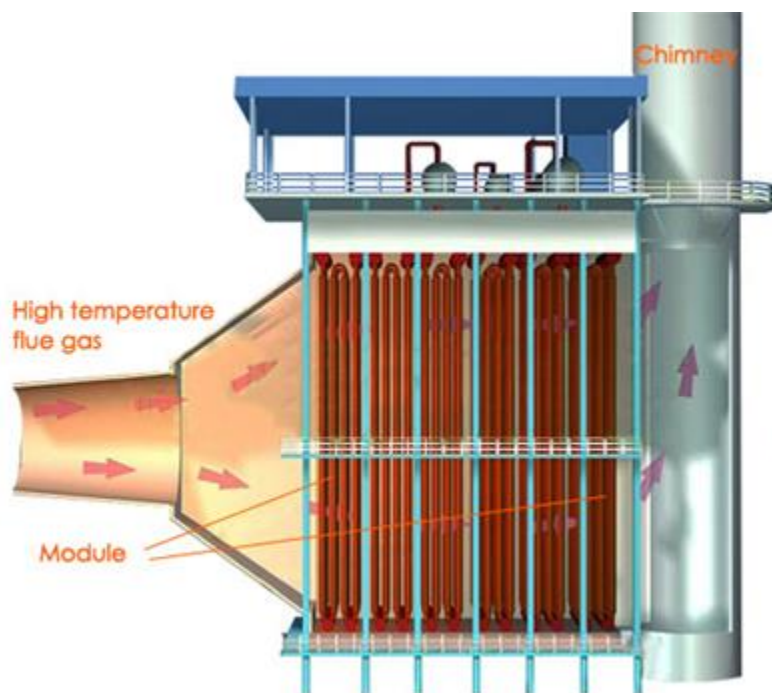


Figura 53. Caldera de Recuperación HRSG Q11/950-4-2.57400.

Fuente: SITONG BOILER.

Para la Selección de las Tuberías de la Caldera de Recuperación

Teniendo en consideración para el cálculo de la potencia de la Caldera de Recuperación, los datos ya hallados.

Cantidad de vapor por hora	4239,606 kg/h
Presión Máxima de operación	10 MPa

Leyva [10], propone una fórmula empírica para hallar la potencia de la Caldera:

$$HP_{caldera} = \frac{\mu_g(h - h_f)}{543,4 * 15,66}$$

Donde;

μ_g = Flujo másico de vapor producido por la caldera (kg/h)

h = Entalpía de vapor en condiciones de salida (kJ/kg)

h_f = Entalpía de vapor en condiciones d entrada (kJ/kg)

$$HP_{caldera} = \frac{4239,606 * 0,239 * (3375,1 - 293,07)}{543,4 * 15,66} = 366,985 \text{ hp de calderas}$$

$$HP_{caldera} = 12961193,24 \frac{kJ}{h}$$

Para la media logarítmica de diferencia de temperatura, se toman en consideración las temperaturas halladas en el balance térmico de la Caldera de Recuperación.

$$MLDT = \frac{\Delta T_{max} - \Delta T_{min}}{\ln \frac{\Delta T_{max}}{\Delta T_{min}}}$$

$\Delta T_{m\acute{a}x}$ = Diferencia de temperatura en el terminal caliente

ΔT_{min} = Diferencia de temperatura en el terminal frío

T_e = Temperatura de entrada de los gases

T_f = Temperatura de los gases de salida

T_i = Temperatura del agua

$$\Delta T_{m\acute{a}x} = 225,742 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{m\acute{i}n} = 258 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$MLDT = \frac{258 - 225,724}{\ln\left(\frac{258}{225,724}\right)} = 241,512 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Coeficiente de transferencia de Calor

$$c_{pa} = 32,177 \frac{\text{kJ}}{\text{h m}^2 \text{ K}}$$

Cálculo de la superficie de Calentamiento

$$A = \frac{Q}{U_D * MLDT}$$

$$A = \frac{12961193,24}{32,177 * (241,512 + 273,15)} = 782,667 \text{ m}^2$$

Para la selección y el arreglo de los tubos, el material elegido a las tuberías ASTM A192, especiales para la utilización en Calderas de Recuperación.

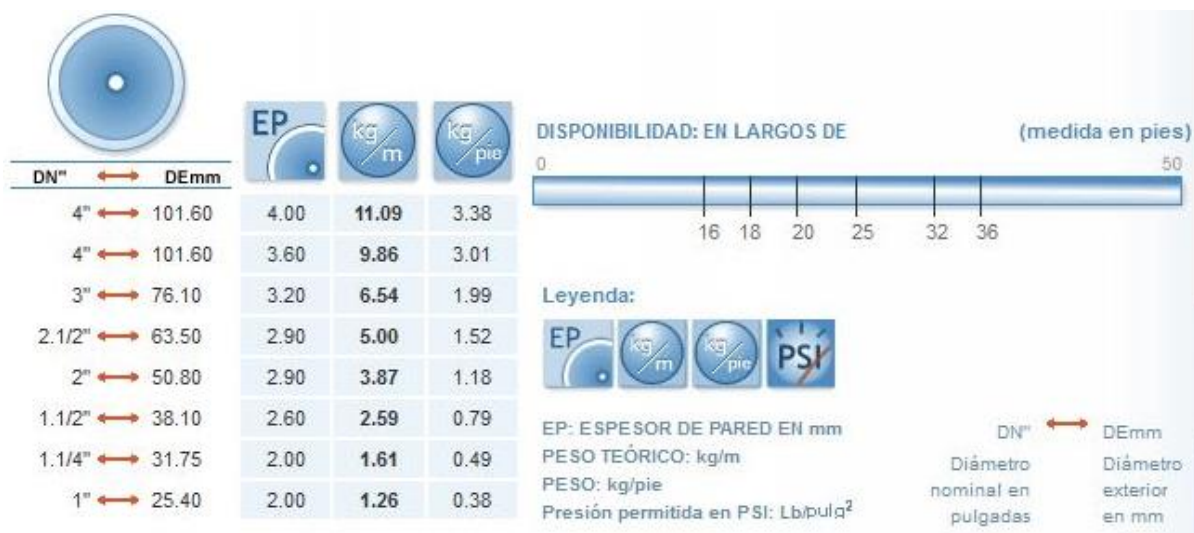


Figura 54. Tuberías ASTM A192.

Fuente: Mtsco.

Para hallar la longitud se toma en consideración, una fórmula empírica:

$$L = 0,048 * 0,3 * \text{Potencia de la caldera}$$

$$L = 0,048 * 0,3 * 0,1016 = 5,285 \text{ m}$$

Tomando en consideración el doblado entre tubería y tubería se puede tomar como opción la tubería de 4 in.

La distribución de los tubos, se realizará tomando en cuenta los siguientes parámetros [26].

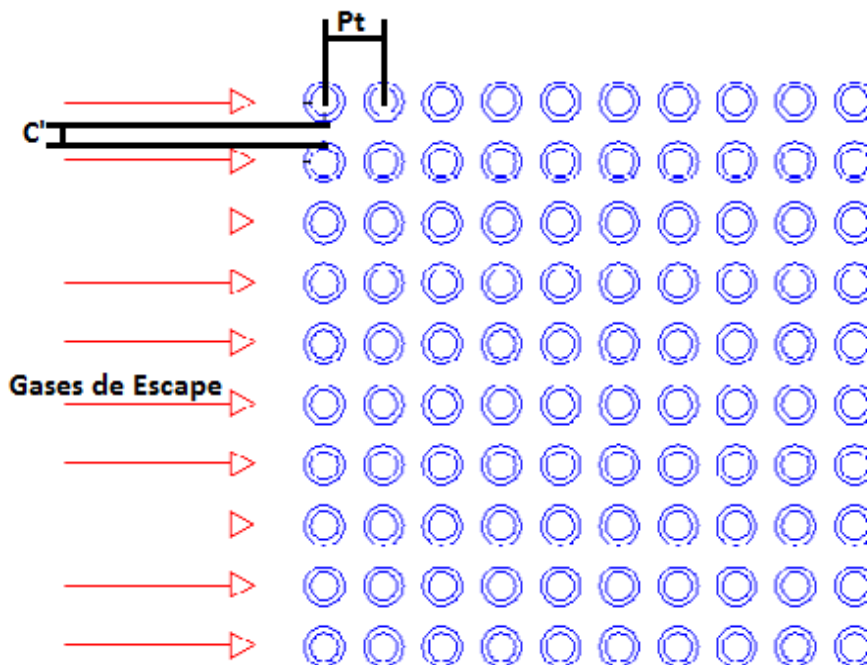


Figura 55. Distribución de las Tuberías dentro de la HRSG.

Fuente: Ruiz, 2012.

$$d_o = 0,1016 \text{ m}$$

$$P_t = 1,25 * 0,1016 = 0,127 \text{ m}$$

$$C' = 0,25 * 0,0254 = 0,0254 \text{ m}$$

Para la corrección de parámetros, se realiza un recalcu, pero con las dimensiones ya seleccionadas.

$$N = \frac{A}{L(DE * \pi)}$$

$$N = \frac{782,667}{5,284 * \pi * 0,1016} = 464,004$$

$$N = 464$$

Se plantea el recalcu de las dimensiones. La nueva área de transferencia sería:

$$A_{\text{corregidos}} = N_{\text{corregidos}} * L * (DE * \pi)$$

$$A_{\text{corregidos}} = 464 * 5,285 * 0,1016 * \pi = 782,66 \text{ m}^2$$

Para hallar el coeficiente total de transferencia de calor corregido, se utiliza la siguiente fórmula:

$$U_{D\text{Corregida}} = \frac{Q}{(A_{\text{corregidos}} * MLDT)}$$

$$U_{D\text{Corregido}} = \frac{12961193,24}{782,66 * 241,512} = 68,570 \frac{\text{kJ}}{\text{h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

Las propiedades del agua, se definen en la Tabla A-9, para la transferencia de calor en los límites del sistema.

Tabla 22. Propiedades del Agua para transferencia de Calor.

Temp. (°C)	Presión (kPa)	Densidad (kg/m ³)	Entalpía de vaporización (kJ/kg)	Calor específico (J/kg. K)	Conductividad ad térmica (W/m. K)	Viscosidad dinámica (kg/m. s)	Número de Prandtl (Pr)
300	8581	46,15	1405	5750	0,0695	0,00001 965	1,69
311	10062,15	56,281	1313,7	6184,5	0,077255	2,03045 E-05	1,844
320	11274	64,57	1239	6540	0,0836	0,00002 084	1,97

Fuente: Cengel, 2010.

Teniendo como diámetro interno 0,0936 m.

La nueva área de Flujo, queda definida como:

$$a_t = \frac{N_{\text{tubos}} * a_{\text{unitaria}}}{N_{\text{pasos}}}$$

$$a_T = \frac{464 * \left(\frac{\pi}{4} * 0,0935^2\right)}{2} = 1,5963 \text{ m}^2$$

Viscosidad cinemática

$$G_t = \frac{\text{Flujo másico}}{\text{area de flujo}}$$

$$G_t = \frac{4239,606}{1,596 * 3600} = 0,738 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}$$

Número de Reynolds

$$Re_t = \frac{DI * G_t}{\mu_t}$$

$$Re_t = \frac{0,0936}{2,0304 * 10^{-5} * 0,738} = 3400,767$$

Número de Prandlt

$$Pr_t = \frac{C_t * \mu_t}{K_t}$$

$$Pr_t = \frac{6184,5 * 2,0304 * 10^{-5}}{0,077255} = 1,6254$$

Número de Nusselt

$$Nu_t = 0,027 Re_t^{0,8} * Pr_t^{1/3}$$

$$Nu_t = 0,027 * 1,6254^{\frac{1}{3}} 3400,767^{0,8} = 21,23$$

Coefficiente de transferencia de calor interior referido a la superficie exterior del tubo

$$h_{io} = h_i \frac{DI}{DE}$$

$$Pr_t = \frac{21123 * 0,07725}{0,0936} = 17,523$$

Por lo tanto, el Calor Total por Convección resulta:

$$Q_{conv} = U_c * A * MLTD$$

$$Q_{conv} = 68,57 * 1,596 * 241,512 = 2643,6 \frac{kJ}{h}$$

Objetivo 4: Realizar el estudio económico correspondiente a la implementación de un sistema de autogeneración eléctrica dentro de la Molinera Sudamérica S.A.C.

Análisis de costos de la planta

La prefactibilidad y factibilidad de un proyecto de energías renovables se plantea de acuerdo a un balance económico, teniendo en cuenta el monto inicial de financiamiento, ya sea propia o externa, los ingresos que se generarían si se realiza la venta de energía sobrante, y finalmente, los egresos propios de la generación de energía.[30]

Se plantean dos escenarios, el primero consiste en la financiación total por parte de la entidad bancaria, el segundo propone la partición del coste inicial en: la financiación del 70% del proyecto por parte del banco y el 30% asumido por la empresa. Para lograr obtener la mejor opción de inversión, se realiza el análisis independiente de cada escenario. Se tuvo en consideración lo siguiente:

Para el escenario 01:

- El costo de inversión será asumido en su totalidad por el banco.
- El ingreso de explotación se observa a partir del año 1 desde su puesta en marcha, teniendo como valor, el último monto de electricidad invertido por año. Se considera un valor de consumo uniforme para efectos de cálculo.
- El egreso propio de la explotación, se define como el gasto anual que tendrá la planta para el mantenimiento y operación, representando el 5% del CAPEX.
- La amortización de la instrumentaria utilizada para la generación se verá reflejado a partir del año 1, de ahí en adelante el costo es constante.
- Debido a que el cálculo de la central excede en la potencia de consumo propio, se plantea la venta de energía sobrante

Año	Ingreso por explotación	Costo M&O	BENEFICIO BRUTO	Amortización de Inmovilizado	Subvenciones	Resultado Extraordinario	BENEFICIOS ANTES DE INTERESES E IMPUESTOS
-3	0	0	0	0	0	0	0
-2	0	0	0	0	0	0	0
-1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
1	103611.5625	25494.112	78117.4505	40790.5792	0	0	37326.8713
2	103611.5625	25494.112	78117.4505	40790.5792	227947.3544	0	265274.2257
3	103611.5625	25494.112	78117.4505	40790.5792	227947.3544	0	265274.2257
4	103611.5625	25494.112	78117.4505	40790.5792	227947.3544	0	265274.2257
5	103611.5625	25494.112	78117.4505	40790.5792	227947.3544	0	265274.2257
6	103611.5625	25494.112	78117.4505	40790.5792	227947.3544	0	265274.2257
7	103611.5625	25494.112	78117.4505	40790.5792	227947.3544	0	265274.2257
8	103611.5625	25494.112	78117.4505	40790.5792	227947.3544	0	265274.2257
9	103611.5625	25494.112	78117.4505	40790.5792	227947.3544	0	265274.2257
10	103611.5625	25494.112	78117.4505	40790.5792	227947.3544	0	265274.2257
11	103611.5625	25494.112	78117.4505	40790.5792	227947.3544	0	265274.2257
12	103611.5625	25494.112	78117.4505	40790.5792	227947.3544	0	265274.2257
13	103611.5625	25494.112	78117.4505	40790.5792	227947.3544	10197.6448	255076.5809
14	103611.5625	25494.112	78117.4505	40790.5792	227947.3544	10197.6448	255076.5809
15	103611.5625	25494.112	78117.4505	40790.5792	227947.3544	10197.6448	255076.5809
16	103611.5625	25494.112	78117.4505	40790.5792	227947.3544	10197.6448	255076.5809
17	103611.5625	25494.112	78117.4505	40790.5792	227947.3544	10197.6448	255076.5809
18	103611.5625	25494.112	78117.4505	40790.5792	227947.3544	10197.6448	255076.5809
19	103611.5625	25494.112	78117.4505	40790.5792	227947.3544	10197.6448	255076.5809
20	103611.5625	25494.112	78117.4505	40790.5792	227947.3544	10197.6448	255076.5809

Fuente: Elaboración Propia.

Resultado financiero	BENEFICIO ANTES DE IMPUESTO	Impuesto sobre el beneficio	BENEFICIO NETO	Amortización de Inmovilizado	Valor Residual	Desembolso de Inversión	CASH FLOW
0	0	0	0	0	0	509882.24	-509882.24
50988.224	-50988.224	29828.11104	-80816.33504	0	0	0	-590698.575
50988.224	-50988.224	29828.11104	-80816.33504	0	0	0	-671514.9101
50988.224	-50988.224	29828.11104	-80816.33504	0	0	0	-752331.2451
50988.224	-13661.3527	29828.11104	-43489.46374	0	0	0	-795820.7089
50988.224	214286.0017	29828.11104	184457.8906	0	210	0	-611152.8182
50988.224	214286.0017	29828.11104	184457.8906	0	210	0	-426484.9276
50988.224	214286.0017	29828.11104	184457.8906	0	210	0	-241817.037
50988.224	214286.0017	29828.11104	184457.8906	0	210	0	-57149.14641
50988.224	214286.0017	29828.11104	184457.8906	0	210	0	127518.7442
50988.224	214286.0017	29828.11104	184457.8906	0	210	0	312186.6348
0	265274.2257	0	265274.2257	40790.5792	210	0	618461.4397
0	265274.2257	0	265274.2257	40790.5792	210	0	924736.2445
0	265274.2257	0	265274.2257	40790.5792	210	0	1231011.049
0	265274.2257	0	265274.2257	40790.5792	210	0	1537285.854
0	265274.2257	0	265274.2257	40790.5792	210	0	1843560.659
0	255076.5809	0	255076.5809	40790.5792	210	0	2139637.819
0	255076.5809	0	255076.5809	40790.5792	210	0	2435714.979
0	255076.5809	0	255076.5809	40790.5792	210	0	2731792.139
0	255076.5809	0	255076.5809	40790.5792	210	0	3027869.299
0	255076.5809	0	255076.5809	40790.5792	210	0	3323946.459
0	255076.5809	0	255076.5809	40790.5792	210	0	3620023.619
0	255076.5809	0	255076.5809	40790.5792	210	0	3916100.779
0	255076.5809	0	255076.5809	40790.5792	210	0	4212177.94

Criterios de Selección Parciales

Los criterios de selección parciales, son el primer descarte para determinar si un proyecto es viable o no. No es un parámetro seguro, sin embargo, sirve para dar una idea inicial acerca de los proyectos. La decisión que se tome tendrá como criterio los valores más óptimos, según los requerimientos del proyecto, lo que establecerá un orden entre los dos escenarios dados.

✓ **Tanto Medio de Rentabilidad (TRM)**

Este parámetro económico se encarga de realizar una aproximación a la rentabilidad del proyecto, sin distinguir en el cambio que existe en la recuperación del monto inicial en el tiempo. Es así, como únicamente se destaca cual proyecto será más rentable. No toma en consideración, la depreciación propia del dinero, ya que le otorga, la misma importancia a la cantidad ganada en el periodo inicial, que a la del periodo final.

$$TMR = \frac{\frac{1}{n} \sum_{s=1}^n R_s}{C_0}$$

Donde:

n : El número de años de duración del proyecto.

R_s : El rendimiento neto de cada uno de los años.

C_0 : El desembolso inicial del proyecto.

Para el escenario 01, el TMR se calcula con una duración del proyecto de 20 años, una sumatoria de rendimientos netos de \$ 29 869 599,02 y una inversión inicial en el año 0 de \$ 752 331,25.

$$TMR = \frac{\frac{1}{20} (29\,869\,599,02)}{752\,331,25} = 1,98 \cong 2\%$$

✓ **Plazo de Recuperación o Pay back (PR)**

Este valor sirve como complemento del TRM, ya que, tiene como fin mostrar el tiempo de recuperación del monto inicial. El criterio que utiliza, no toma en consideración de si la rentabilidad es mayor o menor, en un escenario u otro. Lo que importa, es que se empiecen a notar las ganancias en el menor número de años posibles.

$$PR = \frac{C_0}{R}$$

Donde:

R : Rendimiento Neto.

Para el escenario 01, se calcula el PR cuando el intercambio entre el flujo de caja positivo y negativo, se realiza en el año 5, con un valor de \$ 57 149,15, y en el año 6, con \$ 127 518,74.

$$PR = 5 + \frac{57\,149,15}{127\,518,74} = 5,45 \text{ años}$$

Criterios de Selección Totales

Los criterios de selección totales, son el último descarte para la elección de la mejor propuesta económica. Es así, como se combina la necesidad de una rentabilidad alta, en contraste, con una adecuada tasa de descuento. Se evalúan cada uno de los flujos de caja, ya no como aproximaciones, sino como valores reales para la toma de decisiones.

✓ **Valor Actual Neto (VAN)**

Permite la comparación de las cantidades pagadas en el tiempo que se realizan, lo que produce, que el monto final que tendré del proyecto en el último año, sea mayor que la inversión inicial, obteniendo una ganancia neta del proyecto en sí. La tasa de descuento aplicable en el proyecto será de tres pipos, para poder evaluar los montos en distintas situaciones.

El primer criterio que se toma, es que la tasa de descuento, sea igual al interés actual brindado por la SBS.

$$i = 5,85\%$$

El segundo criterio es que la tasa de descuento sea el porcentaje de amortización de los equipos, para comparar con una situación, más cercana a la realidad,

asumiendo que la depreciación de los equipos es proporcional a la depreciación propia del dinero de inversión.

$$i = 8\%$$

El tercer criterio, se opta por una tasa de descuento considerando una inflación en la economía del país, estando en una situación pesimista, el interés aumenta es por ello que la ganancia al final tendería a ser menor

$$i = 10\%$$

Con distintos intereses, se podrá analizar tres situaciones donde se comprueba la viabilidad económica de la central.

$$VAN = -C_0 + \sum_{i=1}^n \frac{C_n}{(1+i)^n}$$

C_n : El flujo de caja del año n.

i : La tasa de descuento que quiero actualizar.

Para poder hallar el valor de $\sum_{i=1}^n \frac{C_n}{(1+i)^n}$ se utiliza la formula de Excel VNA, posteriormente se le resta la inversión inicial del proyecto en las distintas situaciones.

Situación 1: $i = 5,85\%$

$$\sum_{i=1}^n \frac{C_n}{(1+i)^n} = \$ 11 556 692,46$$

$$VAN = -752 331,25 + 11 556 692,46 = \$ 10 804 361,21$$

Situación 2: $i = 8\%$

$$\sum_{i=1}^n \frac{C_n}{(1+i)^n} = \$ 8 181 211,67$$

$$VAN = -752 331,25 + 8 181 211,67 = \$ 7 428 880,42$$

Situación 3: $i = 10\%$

$$\sum_{i=1}^n \frac{C_n}{(1+i)^n} = \$ 5 913 321,76$$

$$VAN = -752 331,25 + 5 913 321,76 = \$ 5 160 990,51$$

✓ **Relación Beneficio-Coste (RBC)**

Se evalúa como afecta el cambio del interés en el beneficio a futuro, así como, si el valor es mayor, el proyecto será mucho más viable en relación al alguno que tenga una inversión inicial diferente.

$$RBC = \frac{VAN}{C_0}$$

Situación 1: $i = 5,85\%$

$$RBC = \frac{10\,804\,361,22}{752\,331,25} = 14,36$$

Situación 2: $i = 8\%$

$$RBC = \frac{7\,428\,880,42}{752\,331,25} = 9,87$$

Situación 3: $i = 10\%$

$$RBC = \frac{5\,160\,990,51}{752\,331,25} = 6,86$$

✓ Tasa Interna de Rentabilidad (TIR)

Es la rentabilidad máxima a la que se puede presentar el proyecto, sucede cuando el VAN es nulo. Este valor nos da una holgura para saber hasta dónde puede llegar el interés del proyecto sin perjudicarlo o ayudarlo. Es decir, el TIR es una señal de que el proyecto no ha significado una pérdida, pero tampoco una ganancia.

$$VAN = -C_0 + \sum_{i=1}^n \frac{C_n}{(1 + TIR)^n} = 0$$

Situación 1: $i = 5,85\%$

$$10\,804\,361,22 = -752\,331,25 + \sum_{i=1}^n \frac{C_n}{(1 + TIR)^n} = 20\%$$

Situación 2: $i = 8\%$

$$7\,428\,880,42 = -752\,331,25 + \sum_{i=1}^n \frac{C_n}{(1 + TIR)^n} = 20\%$$

Situación 3: $i = 10\%$

$$5\,160\,990,51 = -752\,331,25 + \sum_{i=1}^n \frac{C_n}{(1 + TIR)^n} = 20\%$$

Para hallar el flujo de caja en el Escenario 2, se deben de proponer algunas consideraciones iniciales para el proyecto:

- ✓ En el Escenario 2, el banco cubre el 70 % del costo total del proyecto y el 30% es asumido por la empresa, siendo esta una manera de apalancar los riesgos que pudieran existir dentro del proyecto. Se debe de contar con el suficiente capital para asumir este monto, es por ello, que la inversión de la empresa se realiza en el año -1, un año antes del fin de la construcción, previendo, con 3 años de anticipación, un fondo monetario.
- ✓ El préstamo del banco será por la suma de \$356 917,568, que se repartirá en 10 años, fraccionando el monto con un interés bancario del 5,85%.
- ✓ El monto asumido por la empresa será de \$152 964,67, que será efectivo un año antes del fin del proyecto, con lo que, se priorizaran los costos más altos en la etapa del préstamo, y los costos más bajos, la etapa de financiación propia.
- ✓ El fin del periodo de amortización se dará a partir del año 8, donde se halla cubierto, donde se habrá cubierto en su totalidad el préstamo del banco, registrándose ganancias netas.
- ✓ Ambas planeaciones tienen el mismo tiempo de operación y costos en general, como se indicó en el Escenario 1, para que así no existiese un valor cambiante entre ambos que pueda afectar el análisis comparativo posterior.
- ✓ La diferencia entre el Escenario 1 y 2, se dará en los indicadores económicos parciales y totales, debido a que la deuda con el banco se redujo.
- ✓ Las situaciones que se consideraron para el escenario 1, se replican para el escenario 2, contando con únicamente, la diferencia entre sus valores.
- ✓ Los criterios de evaluación son los mismos, para poder homogeneizar la decisión final.

Año	Ingreso por explotación	Costo M&O	BENEFICIO BRUTO	Amortización de Inmovilizado	Subvenciones	Resultado Extraordinario	BENEFICIOS ANTES DE INTERESES E IMPUESTOS
-3	0	0	0	0	0	0	0
-2	0	0	0	0	0	0	0
-1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
1	103611.5625	25494.112	78117.4505	40790.5792	0	0	37326.8713
2	103611.5625	25494.112	78117.4505	40790.5792	227947.3544	0	265274.2257
3	103611.5625	25494.112	78117.4505	40790.5792	227947.3544	0	265274.2257
4	103611.5625	25494.112	78117.4505	40790.5792	227947.3544	0	265274.2257
5	103611.5625	25494.112	78117.4505	40790.5792	227947.3544	0	265274.2257
6	103611.5625	25494.112	78117.4505	40790.5792	227947.3544	0	265274.2257
7	103611.5625	25494.112	78117.4505	40790.5792	227947.3544	0	265274.2257
8	103611.5625	25494.112	78117.4505	40790.5792	227947.3544	0	265274.2257
9	103611.5625	25494.112	78117.4505	40790.5792	227947.3544	0	265274.2257
10	103611.5625	25494.112	78117.4505	40790.5792	227947.3544	0	265274.2257
11	103611.5625	25494.112	78117.4505	40790.5792	227947.3544	0	265274.2257
12	103611.5625	25494.112	78117.4505	40790.5792	227947.3544	0	265274.2257
13	103611.5625	25494.112	78117.4505	40790.5792	227947.3544	10197.6448	255076.5809
14	103611.5625	25494.112	78117.4505	40790.5792	227947.3544	10197.6448	255076.5809
15	103611.5625	25494.112	78117.4505	40790.5792	227947.3544	10197.6448	255076.5809
16	103611.5625	25494.112	78117.4505	40790.5792	227947.3544	10197.6448	255076.5809
17	103611.5625	25494.112	78117.4505	40790.5792	227947.3544	10197.6448	255076.5809
18	103611.5625	25494.112	78117.4505	40790.5792	227947.3544	10197.6448	255076.5809
19	103611.5625	25494.112	78117.4505	40790.5792	227947.3544	10197.6448	255076.5809
20	103611.5625	25494.112	78117.4505	40790.5792	227947.3544	10197.6448	255076.5809

Fuente: Elaboración Propia.

Resultado financiero	BENEFICIO ANTES DE IMPUESTO	Impuesto sobre el beneficio	BENEFICIO NETO	Amortización de Inmovilizado	Valor Residual	Desembolso de Inversión	CASH FLOW
0	0	0	0	0	0	356917.568	-356917.568
35691.7568	-35691.7568	20879.67773	-56571.43453	0	0	0	-413489.0025
35691.7568	-35691.7568	20879.67773	-56571.43453	0	0	152964.672	-623025.1091
35691.7568	-35691.7568	20879.67773	-56571.43453	0	0	0	-679596.5436
35691.7568	1635.1145	20879.67773	-19244.56323	0	0	0	-698841.1068
35691.7568	229582.4689	20879.67773	208702.7911	0	210	0	-489928.3157
35691.7568	229582.4689	20879.67773	208702.7911	0	210	0	-281015.5246
35691.7568	229582.4689	20879.67773	208702.7911	0	210	0	-72102.73344
35691.7568	229582.4689	20879.67773	208702.7911	0	210	0	136810.0577
35691.7568	229582.4689	20879.67773	208702.7911	0	210	0	345722.8488
35691.7568	229582.4689	20879.67773	208702.7911	0	210	0	554635.6399
0	265274.2257	0	265274.2257	40790.5792	210	0	860910.4448
0	265274.2257	0	265274.2257	40790.5792	210	0	1167185.25
0	265274.2257	0	265274.2257	40790.5792	210	0	1473460.054
0	265274.2257	0	265274.2257	40790.5792	210	0	1779734.859
0	265274.2257	0	265274.2257	40790.5792	210	0	2086009.664
0	255076.5809	0	255076.5809	40790.5792	210	0	2382086.824
0	255076.5809	0	255076.5809	40790.5792	210	0	2678163.984
0	255076.5809	0	255076.5809	40790.5792	210	0	2974241.144
0	255076.5809	0	255076.5809	40790.5792	210	0	3270318.304
0	255076.5809	0	255076.5809	40790.5792	210	0	3566395.464
0	255076.5809	0	255076.5809	40790.5792	210	0	3862472.625
0	255076.5809	0	255076.5809	40790.5792	210	0	4158549.785
0	255076.5809	0	255076.5809	40790.5792	210	0	4454626.945

Criterios de Selección Parciales

✓ **Tanto Medio de Rentabilidad (TRM)**

Para el escenario 02, el TMR se calcula con una duración del proyecto de 20 años, una sumatoria de rendimientos netos de \$ 34 209 436,21 y una inversión inicial en el año 0 de \$ 679 596,54.

$$TMR = \frac{\frac{1}{20}(34\ 209\ 436,21)}{679\ 596,54} = 2,52 \cong 3\%$$

✓ **Plazo de Recuperación o Pay back (PR)**

Para el escenario 02, se calcula el PR cuando el intercambio entre el flujo de caja positivo y negativo, se realiza en el año 4, con un valor de \$ 72 102,73, y en el año 5, con \$ 136 810,06.

$$PR = 4 + \frac{72\ 102,73}{136\ 810,06} = 4,53 \text{ años}$$

Criterios de Selección Totales

✓ **Valor Actual Neto (VAN)**

Situación 1: $i = 5,85\%$

$$\sum_{i=1}^n \frac{C_n}{(1+i)^n} = \$ 13\ 932\ 678,45$$

$$VAN = -679\ 596,54 + 13\ 932\ 678,45 = \$ 13\ 253\ 081,91$$

Situación 2: $i = 8\%$

$$\sum_{i=1}^n \frac{C_n}{(1+i)^n} = \$ 10\ 144\ 259,92$$

$$VAN = -679\ 596,54 + 10\ 144\ 259,92 = \$ 9\ 464\ 663,37$$

Situación 3: $i = 10\%$

$$\sum_{i=1}^n \frac{C_n}{(1+i)^n} = \$ 7\ 578\ 661,41$$

$$VAN = -679\ 596,54 + 7\ 578\ 661,41 = \$ 6\ 899\ 064,86$$

✓ **Relación Beneficio-Coste (RBC)**

Se evalúa como afecta el cambio del interés en el beneficio a futuro, así como, si el valor es mayor, el proyecto será mucho más viable en relación al alguno que tenga una inversión inicial diferente.

$$RBC = \frac{VAN}{C_0}$$

Situación 1: $i = 5,85\%$

$$RBC = \frac{13\,253\,081,91}{679\,596,54} = 19,50$$

Situación 2: $i = 8\%$

$$RBC = \frac{9\,464\,663,37}{679\,596,54} = 13,93$$

Situación 3: $i = 10\%$

$$RBC = \frac{6\,899\,064,86}{679\,596,54} = 10,15$$

✓ **Tasa Interna de Rentabilidad (TIR)**

Situación 1: $i = 5,85\%$

$$13\,253\,081,91 = -679\,596,54 + \sum_{i=1}^n \frac{C_n}{(1 + TIR)^n} = 25\%$$

Situación 2: $i = 8\%$

$$9\,464\,663,37 = -679\,596,54 + \sum_{i=1}^n \frac{C_n}{(1 + TIR)^n} = 25\%$$

Situación 3: $i = 10\%$

$$6\,899\,064,86 = -679\,596,54 + \sum_{i=1}^n \frac{C_n}{(1 + TIR)^n} = 25\%$$

6. CONCLUSIONES

- ✓ Se determinó las características del sistema de autogeneración de ciclo combinado, hallando, principalmente, los parámetros de funcionamiento del gasificador, con un flujo másico de 4,75 kg/s, que asegura, siguiendo el método de mínimos cuadrados, el abastecimiento permanentemente del material biomásico hasta el fin de su vida útil.
- ✓ Se calcularon los parámetros de diseño del ciclo combinado, precisando las temperaturas de entrada del aire y del agua, por SENAMHI, donde finalmente se hallaron, las temperaturas a la que se encuentra el agua en la caldera de recuperación: en la etapa del sobrecalentador, 538 °C, en la etapa del evaporador, 498,52 °C y en la etapa del economizador, 351,74°C. Se comprueba que la relación entre estas temperaturas con respecto a las del aire son mayores, y se grafican en una línea decreciente a lo largo de las diferentes etapas.
- ✓ Se seleccionaron los equipos principales del sistema, como: el gasificador Ankur FBG-400, en la etapa de gasificación, la turbina de Gas Dresser-Rand KG2, para el funcionamiento del ciclo a gas, y finalmente, la turbina de Vapor SST-400, que será el complemento adicional a la turbina de gas, para la posterior venta de energía. Al realizar el seleccionamiento de equipos, se observó una potencia neta del sistema de 2,34 MW, lo que desencadena, la decisión de optar por la venta de energía a futuro.
- ✓ Se analizó el proyecto económica y financieramente, determinado que la mejor opción es el préstamo a alguna entidad bancaria, del 70 % del costo total del proyecto, \$ 356 917,57, y el 30%, \$ 152 964,672, será asumido por la empresa, teniendo una planeación estratégica anterior de 3 años, previo al desembolso propio. Los valores financieros quedan definidos, con un interés nominal del 8%, siendo el VAN, \$ 9 464 663,37, relación costo-beneficio, 13,93, y la TIR, 25%, como interés máximo a lo que puede aspirar el proyecto.

7. RECOMENDACIONES

- ✓ Se plantea hacer más escenarios, para un mejor cálculo del porcentaje destinado por la empresa, para la realización del proyecto, y la financiación bancaria, mas optima a la que se puede aspirar, con el fin, de mejorar la rentabilidad del proyecto final.
- ✓ Teniendo todos los datos, se recomienda migrar a un software de diseño térmico, como es EES, para poder hallar con mayor rapidez, las gráficas de los ciclos, además incluir valores mas reales por medio de mediciones.
- ✓ Una hipótesis adicional, podría ser el cambio a cogeneración, ya que los vapores de desecho que se obtienen en la caldera, se utilizarían en los hornos, sin embargo, este planteamiento, incrementaría en gran medida el presupuesto.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ministerio de Agricultura y Riego, «Informe de coyuntura de arroz 2018,» Lima, 2018.
- [2] Y. A. Cengel y M. A. Boles, Termodinámica, Mc GrawHill, 2015.
- [3] J. Sierra Aguilar, «Alternativas de Aprovechamiento de la cascarilla de arroz en Colombia,» Universidad de Sucre, Sincelejo, Colombia, 2009.
- [4] M. A. Echevarría Cruz y O. A. López Mena, «Caracterización Energética de la cascarilla de arroz para su aplicación en la generación de energía termoeléctrica,» Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2010.
- [5] B. Sarmiento Cámara, «Cálculo y Diseño de Equipos en una planta de Generación de electricidad a partir de cascarilla de arroz,» Universidad de Sevilla, Sevilla, 2011.
- [6] P. E. Silva Guerrero, «Diseño de una planta de procesamiento de cáscarilla de arroz para la producción de óxido de silicio amorfo y de energía eléctrica,» Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2017.
- [7] A. E. Criollo Lema y E. J. Pinzon Camacho, «Evaluación del potencial técnico económico de plantas de generación eléctrica basadas en Calderas a biomasa y Ciclo Rankine Orgánico (ORC) para el aprovechamiento de la cascarilla de arroz en Ecuador,» Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2018.
- [8] C. Y. Huaraz Choi, «Diseño de un gasificador de 25 kW para aplicaciones domésticas usando como combustible cascarilla de arroz,» Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, 2013.
- [9] F. Ríos Isminio, «Diseño de una sistema de generación termoeléctrica a partir de la cascarilla de arroz para satisfacer la demanda energética de la empresa agroindustrial Mhill SAC. Picota - 2018,» Universidad César Vallejo, Tarapoto, 2018.
- [10] J. A. Leyva Sánchez, «Diseño de una sistema de generación de Energía Eléctrica utilizando la cascarilla de arroz producida por las molineras de arroz de la región Lambayeque,» Universidad Santo Toribio de Mogrovejo, Chiclayo, 2015.

- [11] S. J. Quintana Taboada y J. E. Salazar Chafloque, «Diseño de una minicentral termoeléctrica de 5 kW, utilizando la cascarilla de arroz como combustible en el caserío Miraflores, Monsefú del departamento de Lambayeque,» Universidad Señor de Sipán, Pimentel, 2017.
- [12] C. A. Rojas Sanchez, «Generación de biogás a partir de la cascarilla de arroz para reducir costos energéticos en la piladora La Merced S.R.L.,» Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, Chiclayo, 2018.
- [13] Y. A. Lucero De la Cruz, «Proyección de la capacidad de electricidad generada mediante el aprovechamiento energético de la cascarilla de arroz en la provincia de Lambayeque,» Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Lambayeque, 2019.
- [14] E. A. Fernández García, «Generación de energía eléctrica mediante gasificación de la cascarilla de arroz para un molino en Lambayeque,» Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Lambayeque, 2019.
- [15] Gerencia Adjunta de Regulación Tarifaria, «Generación Eléctrica con Recursos Energéticos Renovables No Convencionales en el Perú,» OSINERGMIN, 2014.
- [16] P. McKendry, «Energy production from biomass (parte 2): conversion technologies,» *Bioresource Technology*, n° 83, pp. 47-54, 2002.
- [17] L. Tipanluisa, S. Celi, G. Moreno y J. Molina - Osejos, «Estudio experimental de la combustión de la cascarilla de arroz en una cámara de lecho fijo,» *ResearchGate*, pp. 37-43, 2015.
- [18] W. Gispen, «Multi-Funcional Biomass Systems,» Universidad de Utrecht, Netherlands, 2004.
- [19] K. Yazawa, T. S. Fisher, E. A. Groll y A. Shakouri, «High Exergetic Modified Brayton Cycle with Thermoelectric Energy Conversion,» *ScienceDirect*, vol. 114, n° 9, pp. 1366-1371, 2017.
- [20] F. Aziz, R. Mudasar y M.-H. Kim, «Exergetic and heat load optimization of high temperature organic Rankine cycle,» *Energy Conversion and Management*, vol. 171, pp. 48-58, 2018.

- [21] S. G. Guerra, R. Vázquez-Román y M. A. Rodríguez-Toral, «Simulación de Plantas de Cogeneración de Ciclo Combinado usando ASPEN,» *Información Tecnológica*, vol. 16, nº 1, pp. 42-49, 2015.
- [22] SERIISP-271-3022, Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems, UC Category, 1988.
- [23] A. Sánchez Lario, «Diseño de una planta de gasificación con cogeneración para el aprovechamiento energético de la cascarilla de arroz en un proceso industrial.,» Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2017.
- [24] A. Aguinaga Paz, «Metodología de Análisis Exergético a las Plantas de Ciclos Combinados Gas Vapor - Perú,» Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Lambayeque, 2012.
- [25] Y. A. Cengel y A. J. Ghajar, Transferencia de Calor y Masa. Fundamentos y Aplicaciones., Mc GrawHill, 2011.
- [26] R. J. Ruiz Jara, «Diseño de una Caldera con Recuperación de Calor HRSG en un Ciclo Combinado para la Refinería de EP. PETROECUADOR.,» Escuela Politécnica del Ejército, Sangolquí, 2012.
- [27] ANKURSCIENTIFIC, [En línea]. Available: <https://www.ankurscientific.com/ankur-gasifiers-biomass-fine.html>.
- [28] SIEMENS, [En línea]. Available: <https://new.siemens.com/us/en/products/energy/power-generation/gas-turbines/dresser-rand-kg2.html>.
- [29] SITONG BOILER, [En línea]. Available: <https://www.sitong-boiler.com/product/others-product/waste-heat-recovery-boiler.html#>.
- [30] J. Serrano, W. Mejía, J. Ortiz, A. Sánchez y S. Zalamea, «Determinación del Potencial de Generación Eléctrica a partir de biomasa en el Ecuador,» *Facultad de Ciencias Químicas*, nº 17, 2017.

9. ANEXOS

Anexo A. Recibo Eléctrico de la Molinera Sudamérica S.A.C.



SUMINISTRO N° 26376995

ATRIA ENERGÍA S.A.C.
AV. FELIPE PARDO Y ALIAGA NRO. 675 INT. 301
SAN ISIDRO - LIMA - LIMA

RUC: 20501860329

FACTURA ELECTRÓNICA

Nro. F001-0006352

Cliente:	MOLINERA SUDAMERICA S.A.C.	Moneda:	SOLES	IGV:	%18.00
RUC:	20479907421				
Dirección:	CAR.PANAMERICANA NORTE NRO. 779				
Ciudad:	LAMBAYEQUE - Lambayeque - LAMBAYEQUE				

Fecha de Emisión:	Condición de Pago:	Orden de Compra:	Fecha de Vencimiento:	N° Gufa de Remisión:
10-jul-2019			20-jul-2019	

CODIGO	CANT.	UNID.	DESCRIPCIÓN	V. UNT.	DSCTO.	P. VENTA
	1.00	ZZ	Cargo Fijo Mensual	6.7000	0.00	6.70
	1.00	ZZ	Cargo por Mantenimiento	15.9500	0.00	15.95
	1.00	ZZ	Alumbrado público	1627.6000	0.00	1,627.60
	317.77	kW	Peaje Principal de Transmision	35.0890	0.00	11,150.23
	214218.15	kWh	Peaje Área de Demanda 2	0.0274	0.00	5,859.51
	214218.15	kWh	Peaje Área de Demanda 15	0.0016	0.00	334.18
	583.79	kW	Peaje por Distribución HP	11.6150	0.00	6,780.72
	4.71	kW	Peaje por Distribución HFP	14.6872	0.00	69.18
	211469.06	kWh	Electrificación Rural (Ley 28749)	0.0084	0.00	1,776.34
	217834.28	kWh	Fondo de Inclusión Social Energético (Ley 29852)	0.0100	0.00	2,170.72

OBSERVACIONES

Suministro de Energía de Junio-19

OP. GRAVADAS	S/ 25,844.11
OP. INAFECTA	S/ 0.00
OP. EXONERADA	S/ 3,947.06
TOTAL OP. GRATUITAS	S/ 0.00
DSCTOS TOTALES	S/ 0.00
SUB TOTAL	S/ 29,791.17
ISC	S/ 0.00
IGV	S/ 4,651.94
TOTAL	S/ 34,443.11

SON: TREINTA Y CUATRO MIL CUATROCIENTOS CUARENTA Y TRES CON 11/100 SOLES

Pago Telecredito BCP/OPCIÓN/PAGO SERVICIOS/EMPRESA A PAGAR/ELECTRICA SANTA ROSA/DOLARES/SOLES/CÓDIGO DE IDENTIFICACIÓN/SUMINISTRO. Red oficinas BCP: efectivo o cheques a nombre de ELECTRICA SANTA ROSA



Operador de Servicios Electrónicos
según Resolución N° 034-005-0008776



Representación impresa de la factura electrónica, consulte en www.efact.pe
Autorizado mediante la Resolución de Intendencia N° 0340050004177/SUNAT

Anexo B. Certificado de Calidad de la Molinera Sudamérica S.A.C.

	<p>MOLINERA SUDAMERICA S.A.C Servicio de Pilado y Comercialización de Arroz</p>	<p>Control de Calidad</p>
---	---	---------------------------

CERTIFICADO DE CALIDAD

Por la presente, la Empresa Molinera Sudamérica SAC certifica que el lote que se detalla según líneas abajo ha sido inspeccionado, cumpliendo con las especificaciones del CODEX STAN 198 – 1995 y la Norma Técnica Peruana NTP 205.011 (1979).

PROVEEDOR: MOLINERA SUDAMERICA SAC
DIRECCION: Carretera Panamericana Norte Km 779 – Lambayeque Perú
MATERIA PRIMA:
CANTIDAD: 640 Sacos de 50 kg c/u.
LOTE: 002 –CV
FECHA DE PRODUCCION:
FECHA DE VENCIMIENTO: 12 Meses
VIDA UTIL:
CLIENTE:
DIRECCION:

ANALISIS FISICOQUIMICO:

HUMEDAD: 14%
MATERIAL EXTRAÑO: 0%
GRANOS ROJOS: 0%
PARTIDOS: 7%
DEFECTOS TOTALES: 8%
BLANCURA: 38%
PLAGICIDAS Y/O INCECTICIDAS: Ausente

ANALISIS MICROBIOLÓGICO:

MOHOS Y LEVADURAS: * < 10 UFC/g
 *recuento estimado de mohos.

DETERMINACIONES	METODO DE ENSAYO
Recuento de mohos	ICMSF, 2da Edición Vol. 1 Pag. 166-167 (Reimpresa en el año 2000, Editorial Acriba)

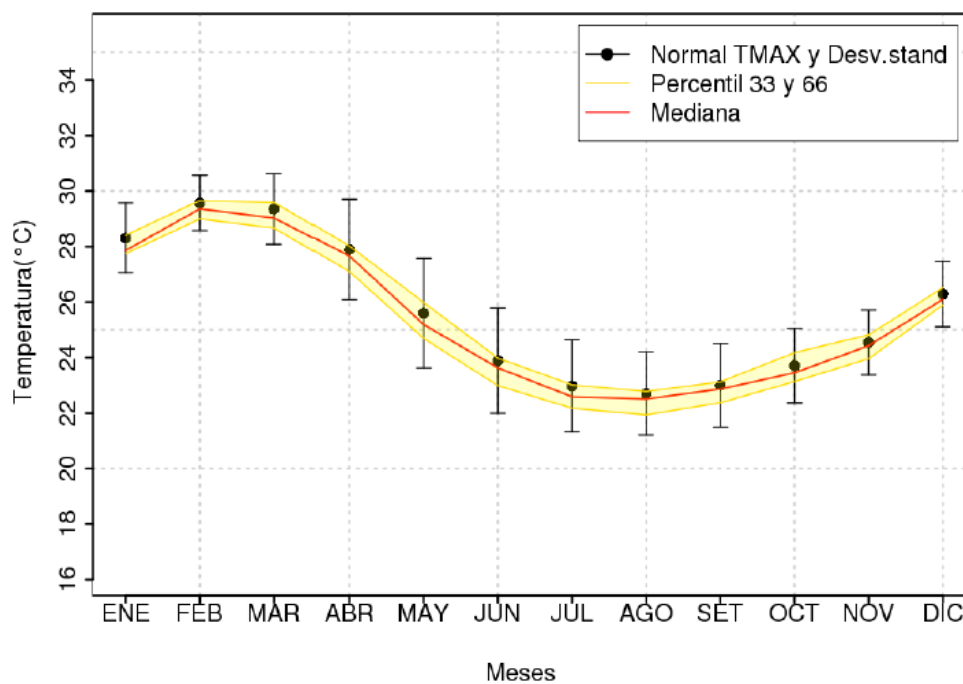
Anexo C. Ingreso de arroz en cáscara a la Secadora 1 y 2 de la Molinera Sudamérica S.A.C.

Mes	Año	Total de sacos	Peso 85 kg por saco de arroz en cáscara	Total de kilos en cascarilla de arroz
Junio	2014	23254	1976590	375552,1
Julio	2014	19937	1694645	321982,55
Agosto	2014	23770	2020450	383885,5
Setiembre	2014	13136	1116560	212146,4
Octubre	2014	3141	266985	50727,15
Noviembre	2014	5863	498355	94687,45
Diciembre	2014	20481	1740885	330768,15
Enero	2015	31545	2681325	509451,75
Febrero	2015	12344	1049240	199355,6
Marzo	2015	13814	1174190	223096,1
Abril	2015	24217	2058445	391104,55
Mayo	2015	23964	2036940	387018,6
Junio	2015	36418	3095530	588150,7
Julio	2015	41416	3520360	668868,4
Agosto	2015	55611	4726935	898117,65
Setiembre	2015	32107	2729095	518528,05
Octubre	2015	13959	1186515	225437,85
Noviembre	2015	20209	1717765	326375,35
Diciembre	2015	30945	2630325	499761,75
Enero	2016	50686	4308310	818578,9
Febrero	2016	25995	2209575	419819,25
Marzo	2016	29259	2487015	472532,85
Abril	2016	26128	2220880	421967,2
Mayo	2016	27086	2302310	437438,9
Junio	2016	45159	3838515	729317,85
Julio	2016	41199	3501915	665363,85
Agosto	2016	23884	2030140	385726,6
Setiembre	2016	12942	1100070	209013,3
Octubre	2016	7836	666060	126551,4
Noviembre	2016	17111	1454435	276342,65
Diciembre	2016	22700	1929500	366605
Enero	2017	24125	2050625	389618,75
Febrero	2017	20713	1760605	334514,95
Marzo	2017	9918	843030	160175,7
Abril	2017	21686	1843310	350228,9
Mayo	2017	6490	551650	104813,5
Junio	2017	31784	2701640	513311,6

Julio	2017	19406	1649510	313406,9
Agosto	2017	41096	3493160	663700,4
Setiembre	2017	4199	356915	67813,85
Octubre	2017	5657	480845	91360,55
Noviembre	2017	4296	365160	69380,4
Diciembre	2017	15927	1353795	257221,05
Enero	2018	34791	2957235	561874,65
Febrero	2018	15281	1298885	246788,15
Marzo	2018	17426	1481210	281429,9
Abril	2018	9315	791775	150437,25
Mayo	2018	18846	1601910	304362,9
Junio	2018	39122	3325370	631820,3
Julio	2018	38810	3298850	626781,5
Agosto	2018	10640	904400	171836
Setiembre	2018	8058	684930	130136,7
Octubre	2018	13959	1186515	225437,85
Noviembre	2018	20209	1717765	326375,35
Diciembre	2018	30945	2630325	499761,75
Enero	2019	50686	4308310	818578,9
Febrero	2019	25995	2209575	419819,25
Marzo	2019	29259	2487015	472532,85
Abril	2019	5644	479740	91150,6
Mayo	2019	20975	1782875	338746,25
Junio	2019	38657	3285845	624310,55
Julio	2019	11114	944690	179491,1
Agosto	2019	3346	284410	54037,9

Anexo D. Datos Meteorológicos de SENAMHI respecto a la Temperatura del Viento en la Estación Lambayeque.

TEMPERATURA MÁXIMA Y MÍNIMA DEL VIENTO			
Fuente:	Senamhi	Año	2010
Estación:	Lambayeque		
Meses	Temperatura Máxima	Temperatura Mínima	Temperatura promedio
1	27,9	19,7	23,8
2	29,4	21,3	25,35
3	29	20,7	24,85
4	27,7	19,4	23,55
5	25,2	17,5	21,35
6	23,6	17,1	20,35
7	22,6	16,2	19,4
8	22,5	15,9	19,2
9	22,9	15,7	19,3
10	23,5	16,3	19,9
11	24,4	16,8	20,6
12	26,1	18,2	22,15
Temperatura promedio del viento			21,65



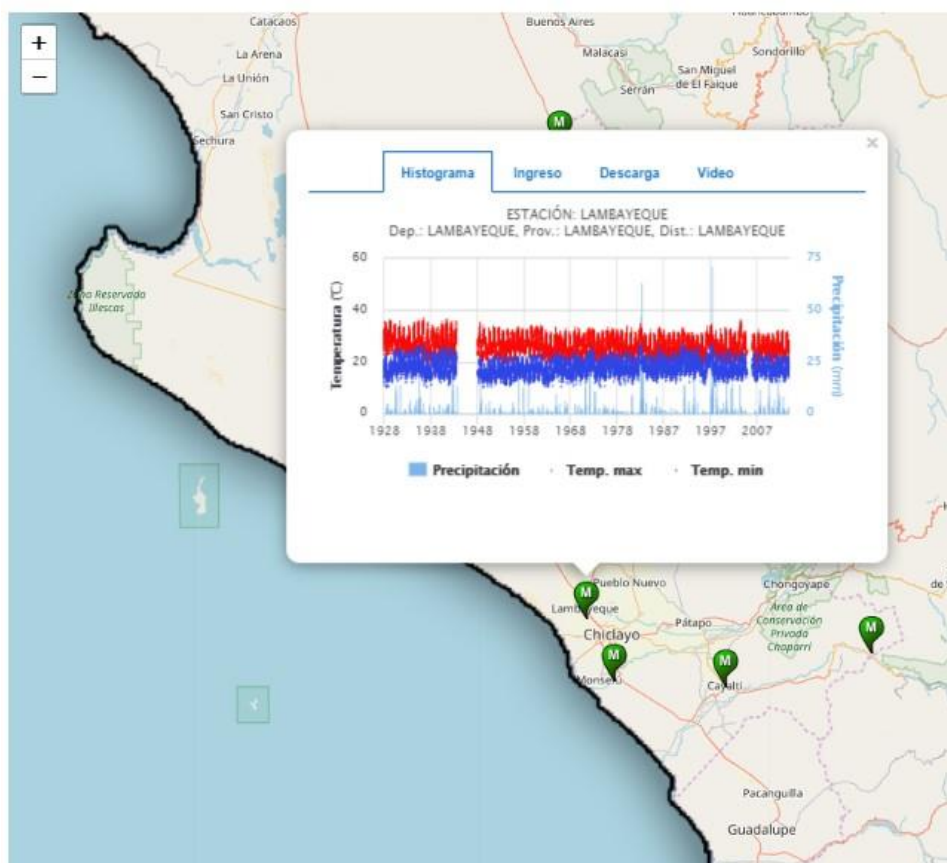
Anexo E. Datos Meteorológicos de SENAMHI respecto a la Temperatura del Agua en la Estación Lambayeque.

DATOS HIDROMETEOROLÓGICOS

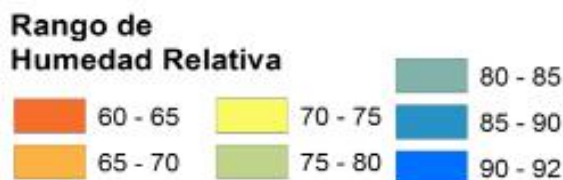
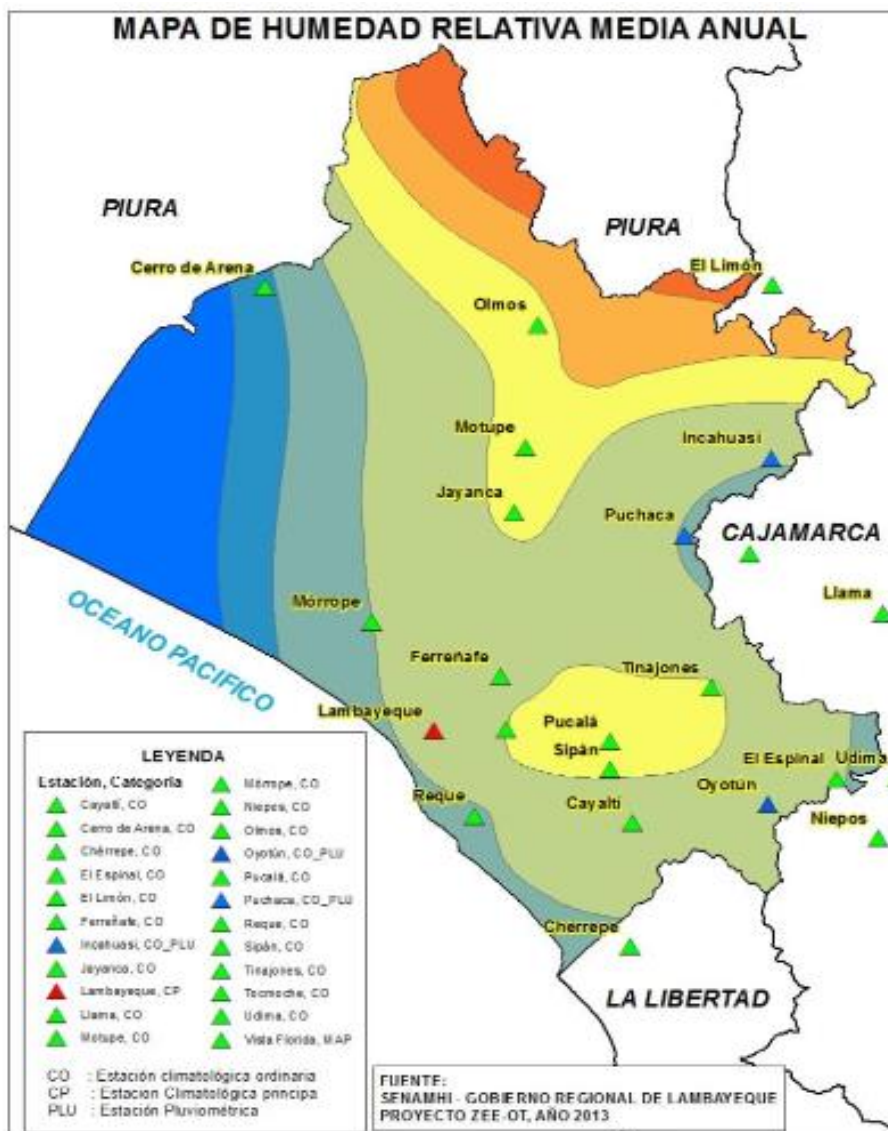
Fuente: Senamhi

Estación: Lambayeque

Año	Mes	Temperatura Máxima	Temperatura Mínima
2013	1	27,1	19,2
2013	2	27,9	20
2013	3	29,1	19,5
2013	4	25,4	16,7
2013	5	25,4	17,1
2013	6	21,8	16,9
2013	7	22,2	15,4
2013	8	22,1	15,6
2013	9	21,5	15,3
2013	10	22,5	15,6
2013	11	23,1	15,9
2013	12	27,4	17,1

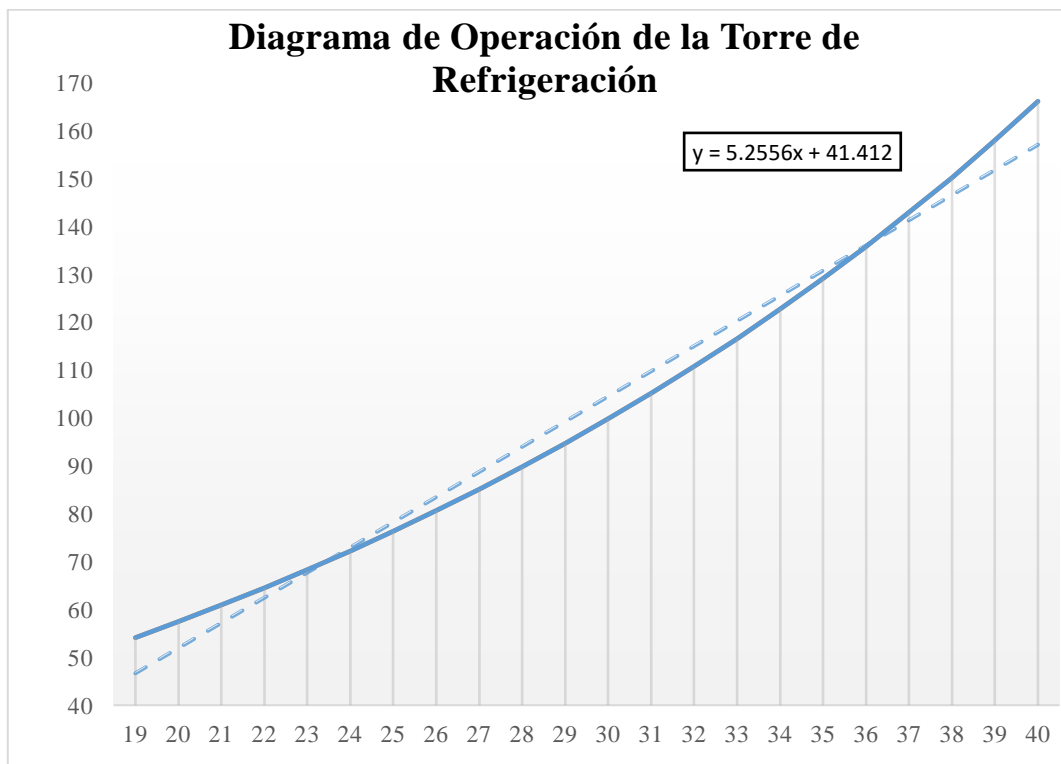


Anexo F. Mapa de humedad relativa anual en Lambayeque.



Anexo G. Condiciones de Operación de la Torre de Refrigeración.

Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)
19	54.1
20	57.43
21	60.9
22	64.52
23	68.29
24	72.22
25	76.33
26	80.61
27	85.08
28	89.76
29	94.64
30	99.75
31	105.1
32	110.7
33	116.5
34	122.7
35	129.1
36	135.8
37	142.9
38	150.2
39	158
40	166.1



Anexo 6. Tabla de Propiedades del Agua Saturada.

TABLA A-5

Agua saturada. Tabla de presiones (conclusión)

Pres., <i>P</i> kPa	Temp. sat., <i>T</i> _{sat} °C	Volumen específico, <i>m</i> ³ /kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, kJ/kg · K		
		Líqu. sat., <i>v</i> _f	Vapor sat., <i>v</i> _g	Líqu. sat., <i>u</i> _f	Evap., <i>u</i> _{fg}	Vapor sat., <i>u</i> _g	Líqu. sat., <i>h</i> _f	Evap., <i>h</i> _{fg}	Vapor sat., <i>h</i> _g	Líqu. sat., <i>s</i> _f	Evap., <i>s</i> _{fg}	Vapor sat., <i>s</i> _g
800	170.41	0.001115	0.24035	719.97	1856.1	2576.0	720.87	2047.5	2768.3	2.0457	4.6160	6.6616
850	172.94	0.001118	0.22690	731.00	1846.9	2577.9	731.95	2038.8	2770.8	2.0705	4.5705	6.6409
900	175.35	0.001121	0.21489	741.55	1838.1	2579.6	742.56	2030.5	2773.0	2.0941	4.5273	6.6213
950	177.66	0.001124	0.20411	751.67	1829.6	2581.3	752.74	2022.4	2775.2	2.1166	4.4862	6.6027
1000	179.88	0.001127	0.19436	761.39	1821.4	2582.8	762.51	2014.6	2777.1	2.1381	4.4470	6.5850
1100	184.06	0.001133	0.17745	779.78	1805.7	2585.5	781.03	1999.6	2780.7	2.1785	4.3735	6.5520
1200	187.96	0.001138	0.16326	796.96	1790.9	2587.8	798.33	1985.4	2783.8	2.2159	4.3058	6.5217
1300	191.60	0.001144	0.15119	813.10	1776.8	2589.9	814.59	1971.9	2786.5	2.2508	4.2428	6.4936
1400	195.04	0.001149	0.14078	828.35	1763.4	2591.8	829.96	1958.9	2788.9	2.2835	4.1840	6.4675
1500	198.29	0.001154	0.13171	842.82	1750.6	2593.4	844.55	1946.4	2791.0	2.3143	4.1287	6.4430
1750	205.72	0.001166	0.11344	876.12	1720.6	2596.7	878.16	1917.1	2795.2	2.3844	4.0033	6.3877
2000	212.38	0.001177	0.099587	906.12	1693.0	2599.1	908.47	1889.8	2798.3	2.4467	3.8923	6.3390
2250	218.41	0.001187	0.088717	933.54	1667.3	2600.9	936.21	1864.3	2800.5	2.5029	3.7926	6.2954
2500	223.95	0.001197	0.079952	958.87	1643.2	2602.1	961.87	1840.1	2801.9	2.5542	3.7016	6.2558
3000	233.85	0.001217	0.066667	1004.6	1598.5	2603.2	1008.3	1794.9	2803.2	2.6454	3.5402	6.1856
3500	242.56	0.001235	0.057061	1045.4	1557.6	2603.0	1049.7	1753.0	2802.7	2.7253	3.3991	6.1244
4000	250.35	0.001252	0.049779	1082.4	1519.3	2601.7	1087.4	1713.5	2800.8	2.7966	3.2731	6.0696
5000	263.94	0.001286	0.039448	1148.1	1448.9	2597.0	1154.5	1639.7	2794.2	2.9207	3.0530	5.9737
6000	275.59	0.001319	0.032449	1205.8	1384.1	2589.9	1213.8	1570.9	2784.6	3.0275	2.8627	5.8902
7000	285.83	0.001352	0.027378	1258.0	1323.0	2581.0	1267.5	1505.2	2772.6	3.1220	2.6927	5.8148
8000	295.01	0.001384	0.023525	1306.0	1264.5	2570.5	1317.1	1441.6	2758.7	3.2077	2.5373	5.7450
9000	303.35	0.001418	0.020489	1350.9	1207.6	2558.5	1363.7	1379.3	2742.9	3.2866	2.3925	5.6791
10,000	311.00	0.001452	0.018028	1393.3	1151.8	2545.2	1407.8	1317.6	2725.5	3.3603	2.2556	5.6159
11,000	318.08	0.001488	0.015988	1433.9	1096.6	2530.4	1450.2	1256.1	2706.3	3.4299	2.1245	5.5544
12,000	324.68	0.001526	0.014264	1473.0	1041.3	2514.3	1491.3	1194.1	2685.4	3.4964	1.9975	5.4939
13,000	330.85	0.001566	0.012781	1511.0	985.5	2496.6	1531.4	1131.3	2662.7	3.5606	1.8730	5.4336
14,000	336.67	0.001610	0.011487	1548.4	928.7	2477.1	1571.0	1067.0	2637.9	3.6232	1.7497	5.3728
15,000	342.16	0.001657	0.010341	1585.5	870.3	2455.7	1610.3	1000.5	2610.8	3.6848	1.6261	5.3108
16,000	347.36	0.001710	0.009312	1622.6	809.4	2432.0	1649.9	931.1	2581.0	3.7461	1.5005	5.2466
17,000	352.29	0.001770	0.008374	1660.2	745.1	2405.4	1690.3	857.4	2547.7	3.8082	1.3709	5.1791

Anexo 7. Tabla de Propiedades del Vapor Sobrecalentado.

TABLA A-6

Vapor de agua sobrecalentado (continuación)

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
P = 4.0 MPa (250.35 °C)				P = 4.5 MPa (257.44 °C)				P = 5.0 MPa (263.94 °C)				
Sat.	0.04978	2601.7	2800.8	6.0696	0.04406	2599.7	2798.0	6.0198	0.03945	2597.0	2794.2	5.9737
275	0.05461	2668.9	2887.3	6.2312	0.04733	2651.4	2864.4	6.1429	0.04144	2632.3	2839.5	6.0571
300	0.05887	2726.2	2961.7	6.3639	0.05138	2713.0	2944.2	6.2854	0.04535	2699.0	2925.7	6.2111
350	0.06647	2827.4	3093.3	6.5843	0.05842	2818.6	3081.5	6.5153	0.05197	2809.5	3069.3	6.4516
400	0.07343	2920.8	3214.5	6.7714	0.06477	2914.2	3205.7	6.7071	0.05784	2907.5	3196.7	6.6483
450	0.08004	3011.0	3331.2	6.9386	0.07076	3005.8	3324.2	6.8770	0.06332	3000.6	3317.2	6.8210
500	0.08644	3100.3	3446.0	7.0922	0.07652	3096.0	3440.4	7.0323	0.06858	3091.8	3434.7	6.9781
600	0.09886	3279.4	3674.9	7.3706	0.08766	3276.4	3670.9	7.3127	0.07870	3273.3	3666.9	7.2605
700	0.11098	3462.4	3906.3	7.6214	0.09850	3460.0	3903.3	7.5647	0.08852	3457.7	3900.3	7.5136
800	0.12292	3650.6	4142.3	7.8523	0.10916	3648.8	4140.0	7.7952	0.09816	3646.9	4137.7	7.7458
900	0.13476	3844.8	4383.9	8.0675	0.11972	3843.3	4382.1	8.0118	0.10769	3841.8	4380.2	7.9619
1000	0.14653	4045.1	4631.2	8.2698	0.13020	4043.9	4629.8	8.2144	0.11715	4042.6	4628.3	8.1648
1100	0.15824	4251.4	4884.4	8.4612	0.14064	4250.4	4883.2	8.4060	0.12655	4249.3	4882.1	8.3566
1200	0.16992	4463.5	5143.2	8.6430	0.15103	4462.6	5142.2	8.5880	0.13592	4461.6	5141.3	8.5388
1300	0.18157	4680.9	5407.2	8.8164	0.16140	4680.1	5405.5	8.7616	0.14527	4679.3	5405.7	8.7124
P = 6.0 MPa (275.59 °C)				P = 7.0 MPa (286.83 °C)				P = 8.0 MPa (295.01 °C)				
Sat.	0.03245	2589.9	2784.6	5.8902	0.027378	2581.0	2772.5	5.8148	0.023525	2570.5	2758.7	5.7450
300	0.03619	2668.4	2885.6	6.0703	0.029492	2633.5	2839.9	5.9337	0.024279	2592.3	2786.5	5.7937
350	0.04225	2790.4	3043.9	6.3357	0.035262	2770.1	3016.9	6.2305	0.029975	2748.3	2988.1	6.1321
400	0.04742	2893.7	3178.3	6.5432	0.039958	2879.5	3159.2	6.4502	0.034344	2864.6	3139.4	6.3658
450	0.05217	2989.9	3302.9	6.7219	0.044187	2979.0	3288.3	6.6353	0.038194	2967.8	3273.3	6.5579
500	0.05667	3083.1	3423.1	6.8826	0.048157	3074.3	3411.4	6.8000	0.041767	3065.4	3399.5	6.7266
550	0.06102	3175.2	3541.3	7.0308	0.051966	3167.9	3531.6	6.9507	0.045172	3160.5	3521.8	6.8800
600	0.06527	3267.2	3658.8	7.1693	0.055665	3261.0	3650.6	7.0910	0.048463	3254.7	3642.4	7.0221
700	0.07355	3453.0	3894.3	7.4247	0.062850	3448.3	3888.3	7.3487	0.054829	3443.6	3882.2	7.2822
800	0.08165	3643.2	4133.1	7.6582	0.069856	3639.5	4128.5	7.5836	0.061011	3635.7	4123.8	7.5185
900	0.08964	3838.8	4376.6	7.8751	0.076750	3835.7	4373.0	7.8014	0.067082	3832.7	4369.3	7.7372
1000	0.09756	4040.1	4625.4	8.0786	0.083571	4037.5	4622.5	8.0055	0.073079	4035.0	4619.6	7.9419
1100	0.10543	4247.1	4879.7	8.2709	0.090341	4245.0	4877.4	8.1982	0.079025	4242.8	4875.0	8.1350
1200	0.11326	4459.8	5139.4	8.4534	0.097075	4457.9	5137.4	8.3810	0.084934	4456.1	5135.5	8.3181
1300	0.12107	4677.7	5404.1	8.6273	0.103781	4676.1	5402.6	8.5551	0.090817	4674.5	5401.0	8.4925
P = 9.0 MPa (303.35 °C)				P = 10.0 MPa (311.00 °C)				P = 12.5 MPa (327.81 °C)				
Sat.	0.020489	2558.5	2742.9	5.6791	0.018028	2545.2	2725.5	5.6159	0.013496	2505.6	2674.3	5.4638
325	0.023284	2647.6	2857.1	5.8738	0.019877	2611.6	2810.3	5.7596	0.016138	2624.9	2826.6	5.7130
350	0.025816	2725.0	2957.3	6.0380	0.022440	2699.6	2924.0	5.9460	0.020030	2789.6	3040.0	6.0433
400	0.029960	2849.2	3118.8	6.2876	0.026436	2833.1	3097.5	6.2141	0.023019	2913.7	3201.5	6.2749
450	0.033524	2956.3	3258.0	6.4872	0.029782	2944.5	3242.4	6.4219	0.025630	3023.2	3343.6	6.4651
500	0.036793	3056.3	3387.4	6.6603	0.032811	3047.0	3375.1	6.5995	0.028033	3126.1	3476.5	6.6317
550	0.039885	3153.0	3512.0	6.8164	0.035655	3145.4	3502.0	6.7585	0.030306	3225.8	3604.6	6.7828
600	0.042861	3248.4	3634.1	6.9605	0.038378	3242.0	3625.8	6.9045	0.032491	3324.1	3730.2	6.9227
650	0.045755	3343.4	3755.2	7.0954	0.041018	3338.0	3748.1	7.0408	0.034612	3422.0	3854.6	7.0540
700	0.048589	3438.8	3876.1	7.2229	0.043597	3434.0	3870.0	7.1693	0.038724	3618.8	4102.8	7.2967
800	0.054132	3632.0	4119.2	7.4606	0.048629	3628.2	4114.5	7.4085	0.042720	3818.9	4352.9	7.5195
900	0.059562	3829.6	4365.7	7.6802	0.053547	3826.5	4362.0	7.6290	0.046641	4023.5	4606.5	7.7269
1000	0.064919	4032.4	4616.7	7.8855	0.058391	4029.9	4613.8	7.8349	0.050510	4233.1	4864.5	7.9220
1100	0.070224	4240.7	4872.7	8.0791	0.063183	4238.5	4870.3	8.0289	0.054342	4447.7	5127.0	8.1065
1200	0.075492	4454.2	5133.6	8.2625	0.067938	4452.4	5131.7	8.2126	0.058147	4667.3	5394.1	8.2819
1300	0.080733	4672.9	5399.5	8.4371	0.072667	4671.3	5398.0	8.3874				

Anexo 8. Tabla de Propiedades del Aire como Gas Ideal.

TABLA A-17

Propiedades de gas ideal del aire (*conclusión*)

T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	v_r	s° kJ/kg · K	T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	v_r	s° kJ/kg · K
1260	1348.55	290.8	986.90	12.435	3.23638	1600	1757.57	791.2	1298.30	5.804	3.52364
1280	1372.24	310.4	1004.76	11.835	3.25510	1620	1782.00	834.1	1316.96	5.574	3.53879
1300	1395.97	330.9	1022.82	11.275	3.27345	1640	1806.46	878.9	1335.72	5.355	3.55381
1320	1419.76	352.5	1040.88	10.747	3.29160	1660	1830.96	925.6	1354.48	5.147	3.56867
1340	1443.60	375.3	1058.94	10.247	3.30959	1680	1855.50	974.2	1373.24	4.949	3.58335
1360	1467.49	399.1	1077.10	9.780	3.32724	1700	1880.1	1025	1392.7	4.761	3.5979
1380	1491.44	424.2	1095.26	9.337	3.34474	1750	1941.6	1161	1439.8	4.328	3.6336
1400	1515.42	450.5	1113.52	8.919	3.36200	1800	2003.3	1310	1487.2	3.994	3.6684
1420	1539.44	478.0	1131.77	8.526	3.37901	1850	2065.3	1475	1534.9	3.601	3.7023
1440	1563.51	506.9	1150.13	8.153	3.39586	1900	2127.4	1655	1582.6	3.295	3.7354
1460	1587.63	537.1	1168.49	7.801	3.41247	1950	2189.7	1852	1630.6	3.022	3.7677
1480	1611.79	568.8	1186.95	7.468	3.42892	2000	2252.1	2068	1678.7	2.776	3.7994
1500	1635.97	601.9	1205.41	7.152	3.44516	2050	2314.6	2303	1726.8	2.555	3.8303
1520	1660.23	636.5	1223.87	6.854	3.46120	2100	2377.7	2559	1775.3	2.356	3.8605
1540	1684.51	672.8	1242.43	6.569	3.47712	2150	2440.3	2837	1823.8	2.175	3.8901
1560	1708.82	710.5	1260.99	6.301	3.49276	2200	2503.2	3138	1872.4	2.012	3.9191
1580	1733.17	750.0	1279.65	6.046	3.50829	2250	2566.4	3464	1921.3	1.864	3.9474

Nota: Las propiedades P_r (presión relativa) y v_r (volumen específico relativo) son cantidades adimensionales utilizadas en el análisis de procesos isentrópicos y no deben confundirse con las propiedades de presión y volumen específico.

**Anexo 9. Tabla de Propiedades de Transferencia de Calor del
Agua Saturada.**

TABLA A-9

Propiedades del agua saturada

Temp., T , °C	Presión de saturación, P_{sat} , kPa	Densidad, ρ , kg/m ³		Entalpia de vaporización, h_{fg} , kJ/kg	Calor específico, c_p , J/kg · K		Conductividad térmica, k , W/m · K		Viscosidad dinámica, μ , kg/m · s		Número de Prandtl, Pr		Coeficiente de expansión volumétrica, β 1/K
		Líquido	Vapor		Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	
0.01	0.6113	999.8	0.0048	2 501	4 217	1 854	0.561	0.0171	1.792×10^{-3}	0.922×10^{-5}	13.5	1.00	-0.068×10^{-3}
5	0.8721	999.9	0.0068	2 490	4 205	1 857	0.571	0.0173	1.519×10^{-3}	0.934×10^{-5}	11.2	1.00	0.015×10^{-3}
10	1.2276	999.7	0.0094	2 478	4 194	1 862	0.580	0.0176	1.307×10^{-3}	0.946×10^{-5}	9.45	1.00	0.733×10^{-3}
15	1.7051	999.1	0.0128	2 466	4 185	1 863	0.589	0.0179	1.138×10^{-3}	0.959×10^{-5}	8.09	1.00	0.138×10^{-3}
20	2.339	998.0	0.0173	2 454	4 182	1 867	0.598	0.0182	1.002×10^{-3}	0.973×10^{-5}	7.01	1.00	0.195×10^{-3}
25	3.169	997.0	0.0231	2 442	4 180	1 870	0.607	0.0186	0.891×10^{-3}	0.987×10^{-5}	6.14	1.00	0.247×10^{-3}
30	4.246	996.0	0.0304	2 431	4 178	1 875	0.615	0.0189	0.798×10^{-3}	1.001×10^{-5}	5.42	1.00	0.294×10^{-3}
35	5.628	994.0	0.0397	2 419	4 178	1 880	0.623	0.0192	0.720×10^{-3}	1.016×10^{-5}	4.83	1.00	0.337×10^{-3}
40	7.384	992.1	0.0512	2 407	4 179	1 885	0.631	0.0196	0.653×10^{-3}	1.031×10^{-5}	4.32	1.00	0.377×10^{-3}
45	9.593	990.1	0.0655	2 395	4 180	1 892	0.637	0.0200	0.596×10^{-3}	1.046×10^{-5}	3.91	1.00	0.415×10^{-3}
50	12.35	988.1	0.0831	2 383	4 181	1 900	0.644	0.0204	0.547×10^{-3}	1.062×10^{-5}	3.55	1.00	0.451×10^{-3}
55	15.76	985.2	0.1045	2 371	4 183	1 908	0.649	0.0208	0.504×10^{-3}	1.077×10^{-5}	3.25	1.00	0.484×10^{-3}
60	19.94	983.3	0.1304	2 359	4 185	1 916	0.654	0.0212	0.467×10^{-3}	1.093×10^{-5}	2.99	1.00	0.517×10^{-3}
65	25.03	980.4	0.1614	2 346	4 187	1 926	0.659	0.0216	0.433×10^{-3}	1.110×10^{-5}	2.75	1.00	0.548×10^{-3}
70	31.19	977.5	0.1983	2 334	4 190	1 936	0.663	0.0221	0.404×10^{-3}	1.126×10^{-5}	2.55	1.00	0.578×10^{-3}
75	38.58	974.7	0.2421	2 321	4 193	1 948	0.667	0.0225	0.378×10^{-3}	1.142×10^{-5}	2.38	1.00	0.607×10^{-3}
80	47.39	971.8	0.2935	2 309	4 197	1 962	0.670	0.0230	0.355×10^{-3}	1.159×10^{-5}	2.22	1.00	0.653×10^{-3}
85	57.83	968.1	0.3536	2 296	4 201	1 977	0.673	0.0235	0.333×10^{-3}	1.176×10^{-5}	2.08	1.00	0.670×10^{-3}
90	70.14	965.3	0.4235	2 283	4 206	1 993	0.675	0.0240	0.315×10^{-3}	1.193×10^{-5}	1.96	1.00	0.702×10^{-3}
95	84.55	961.5	0.5045	2 270	4 212	2 010	0.677	0.0246	0.297×10^{-3}	1.210×10^{-5}	1.85	1.00	0.716×10^{-3}
100	101.33	957.9	0.5978	2 257	4 217	2 029	0.679	0.0251	0.282×10^{-3}	1.227×10^{-5}	1.75	1.00	0.750×10^{-3}
110	143.27	950.6	0.8263	2 230	4 229	2 071	0.682	0.0262	0.255×10^{-3}	1.261×10^{-5}	1.58	1.00	0.798×10^{-3}
120	198.53	943.4	1.121	2 203	4 244	2 120	0.683	0.0275	0.232×10^{-3}	1.296×10^{-5}	1.44	1.00	0.858×10^{-3}
130	270.1	934.6	1.496	2 174	4 263	2 177	0.684	0.0288	0.213×10^{-3}	1.330×10^{-5}	1.33	1.01	0.913×10^{-3}
140	361.3	921.7	1.965	2 145	4 286	2 244	0.683	0.0301	0.197×10^{-3}	1.365×10^{-5}	1.24	1.02	0.970×10^{-3}
150	475.8	916.6	2.546	2 114	4 311	2 314	0.682	0.0316	0.183×10^{-3}	1.399×10^{-5}	1.16	1.02	1.025×10^{-3}
160	617.8	907.4	3.256	2 083	4 340	2 420	0.680	0.0331	0.170×10^{-3}	1.434×10^{-5}	1.09	1.05	1.145×10^{-3}
170	791.7	897.7	4.119	2 050	4 370	2 490	0.677	0.0347	0.160×10^{-3}	1.468×10^{-5}	1.03	1.05	1.178×10^{-3}
180	1 002.1	887.3	5.153	2 015	4 410	2 590	0.673	0.0364	0.150×10^{-3}	1.502×10^{-5}	0.983	1.07	1.210×10^{-3}
190	1 254.4	876.4	6.388	1 979	4 460	2 710	0.669	0.0382	0.142×10^{-3}	1.537×10^{-5}	0.947	1.09	1.280×10^{-3}
200	1 553.8	864.3	7.852	1 941	4 500	2 840	0.663	0.0401	0.134×10^{-3}	1.571×10^{-5}	0.910	1.11	1.350×10^{-3}
220	2 318	840.3	11.60	1 859	4 610	3 110	0.650	0.0442	0.122×10^{-3}	1.641×10^{-5}	0.865	1.15	1.520×10^{-3}
240	3 344	813.7	16.73	1 767	4 760	3 520	0.632	0.0487	0.111×10^{-3}	1.712×10^{-5}	0.836	1.24	1.720×10^{-3}
260	4 688	783.7	23.69	1 663	4 970	4 070	0.609	0.0540	0.102×10^{-3}	1.788×10^{-5}	0.832	1.35	2.000×10^{-3}
280	6 412	750.8	33.15	1 544	5 280	4 835	0.581	0.0605	0.094×10^{-3}	1.870×10^{-5}	0.854	1.49	2.380×10^{-3}
300	8 581	713.8	46.15	1 405	5 750	5 980	0.548	0.0695	0.086×10^{-3}	1.965×10^{-5}	0.902	1.69	2.950×10^{-3}
320	11 274	667.1	64.57	1 239	6 540	7 900	0.509	0.0836	0.078×10^{-3}	2.084×10^{-5}	1.00	1.97	—
340	14 586	610.5	92.62	1 028	8 240	11 870	0.469	0.110	0.070×10^{-3}	2.255×10^{-5}	1.23	2.43	—
360	18 651	528.3	144.0	720	14 690	25 800	0.427	0.178	0.060×10^{-3}	2.571×10^{-5}	2.06	3.73	—
374.14	22 090	317.0	317.0	0	—	—	—	—	0.043×10^{-3}	4.313×10^{-5}	—	—	—

Nota 1: La viscosidad cinemática ν y la difusividad térmica α se pueden calcular a partir de sus definiciones, $\nu = \mu/\rho$ y $\alpha = k/\rho c_p = \nu/Pr$. Las temperaturas de 0.01°C, 100°C y 374.14°C son las temperaturas de los puntos triple, de ebullición y crítico del agua, respectivamente. Las propiedades cuya lista se da arriba (excepto la densidad del vapor) se pueden usar a cualquier presión con error despreciable, excepto a temperaturas cercanas al valor del punto crítico.

Anexo 10. Gasificador Ankur FBG-400

2 X WBG-1500 gasifiers for Drying Application, India

Rice Husk based 250 kWe Power Plant,
India40 kWe Power Plant,
Colombia

Anexo 11. Turbina de Gas Aeroderivada KG2.

DRESSER-RAND
A Siemens Business



ENER-CORE

KG2-3G/PO gas turbine with Ener-Core power oxidizer technology generates up to 1.85 MW of clean power using low-quality gases.

The Dresser-Rand KG2-3G/PO gas turbine with Ener-Core power oxidizer technology is the only clean power generation that runs directly on low-pressure, low-quality gases that otherwise could not be used. The system integrates oxidation technology with the field proven 2 MW KG2-3G gas turbine, to efficiently generate electricity with near-zero emissions.

The KG2-3G/PO gas turbine's wide fuel range enables operation on extremely low-grade or waste fuels, landfill gas, biogas, coal gas, and associated petroleum gas. Its ability to maintain near-zero emissions excels in regulated air quality markets without additional emissions controls.

The Dresser-Rand KG2-3G gas turbine is the preferred solution for clean power requirements from 1 to 12 MW with nearly 1,000 installed units that have accumulated more than 25 million operating hours.

How it Works

A power oxidizer replaces the combustor in the 1.85 MW system and produces the heat to drive the turbine. With low-Btu fuels, fuel is aspirated with air prior to the inlet and oxidation, eliminating external compression and accepting low-pressure gas. Higher quality fuels can be directly injected at a higher pressure upstream of the oxidizer, which results in virtually undetectable emissions. In both the aspirated and direct-inject configurations, low oxidation temperature enables the KG2-3G/PO gas turbine to avoid the thermal formation of NO_x.

Features

- Class-leading fuel efficiency
- Highly effective recuperator
- Wide fuel specification tolerance
- Ultra-low emissions power oxidizer, <1 ppm NO_x
- No catalyst; no chemicals used
- H₂S and siloxane acceptance

Package Arrangement

The KG2-3G/PO gas turbine is a complete packaged solution that includes the KG2-3G turbine, power oxidizer, generator, and skid.

Gas Turbine

- Industrial, single-shaft KG2-3G turbine
- Single-stage compressor and turbine
- Cantilevered rotor configuration (no "hot" bearings)

Generator

- Brushless synchronous generator
- Manufacturer of client's choice

Package

- Steel base frame
- Integrated lube oil system
- PLC control system with monitoring
- Weatherproof acoustic enclosure
- Inlet and exhaust system

Power Oxidizer

- Packed bed power oxidizer (no moving parts)
- ASME pressure vessel
- Multi-fuel gas operation
- Ultra-low emissions



dresser-rand.com

Anexo 12. Turbina de Vapor SST-050.

1/12/2019

Pre-designed steam turbines

The comprehensive Siemens product range up to 10 megawatts



SST-010

(formerly known as EPM – Expansion Power Module)

up to 110 kW

The SST-010 is a compact turbogenerator designed to expand natural gas in pressure regulating stations as a direct driving turbine in pipe installation.

Technical data

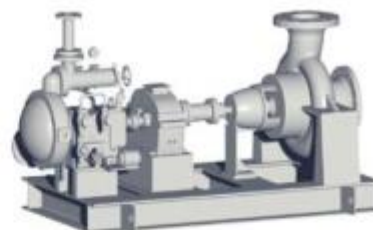
- Power output up to 110 kW
- Gas pressure up to 70 bar(a) / 1015 psi
- Gas flow rates up to 15,000 m³/h / 530,000 ft³/h
- Exhaust gas pressure up to 25 bar(a) / 363 psi
- Turbine wheel diameter 400 mm / 15.75 in.

Typical dimensions

Length 1.2 m / 4 ft
Width 0.8 m / 2.6 ft
Height 0.9 m / 3 ft

Features

- Low-maintenance because of the simple design
- Extremely failure safe
- Quick-start compatible
- Casing flanged directly into the gas pipeline
- ATEX approved



SST-050

(formerly known as AF or BF series)

up to 750 kW

The SST-050 is a single-stage, backpressure steam turbine in which the flow passes axially through the blading. It is mainly used as a power source for pumps or fans and especially as a stand-by unit with quick-start capability.

Technical data

- Power output up to 750 kW
- Inlet pressure up to 101 bar(a) / 1465 psi
- Inlet temperature dry saturated steam up to 500°C / 930°F
- Speed acc. to driven machine
- Exhaust pressure: back pressure up to 11 bar(a) / 160 psi

Typical dimensions

Length 1 m / 3.3 ft*
Width 1 m / 3.3 ft*
Height 1.3 m / 4.3 ft*

*turbine only

Features

- Low-maintenance because of the simple design
- Extremely failure safe
- Quick-start compatible
- Turbine with integral oil supply
- Meet requirements of API 611 / 612*
- ATEX version available

*if overhung design and integral gear is accepted



Anexo 13. Bomba Centrífuga para Caldera.



Serie EJE LIBRE Normalizada

Electrobombas centrífugas ejecución sobre bancada



APLICACIONES / APPLICATIONS / APPLICATIONS

ES Las electrobombas centrífugas de ejecución sobre bancada están especialmente diseñadas para el suministro de agua doméstico, para uso industrial, riego, agua condensada, agua caliente, agua de refrigeración y, en general, cualquier tratamiento de agua.

EN Centrifugal electro-pumps on base plate execution are specially designed for domestic water supply, industry use, irrigation, condensed water, hot water, cooling water and water treatment in general.

FR Les électropompes centrifuges à exécution sur socle sont spécialement dessinées pour l'approvisionnement d'eau domestique, pour un usage industriel, l'irrigation, l'eau condensée, l'eau chaude, l'eau de réfrigération et en général tout traitement de l'eau.

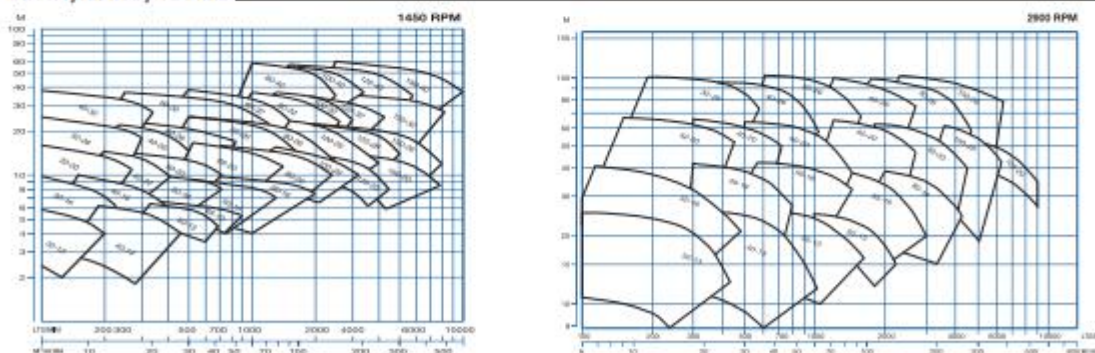
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS / TECHNICAL CHARACTERISTICS / CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

Tipo Type	Norma Standard / Norme	Caudal (m ³ /h) Flow / Débit	Altura manom. (m) Height / Hauteur	IP	Aislamiento Isolation	Refrigeración Cooling / Refroidissement	Temp. max. (°C)	Temp. Amb. max. (°C)
Eje libre - Sobre bancada Bare shaft - On base plate Arbre nu - Sur socle	EN 733 (DIN 24255)	0 - 600	0 - 100	55	F	Ventilación externa External ventilation Ventilation externe	100	40

MATERIALES / MATERIALS / MATÉRIAUX

Cuerpo bomba - Pump body - Corps de pompe	Fundición de hierro GG25 - GG25 Cast iron - Fonte GG25
Cuerpo aspiración - Suction body - Corps d'aspiration	Fundición de hierro GG25 - GG25 Cast iron - Fonte GG25
Turbina - Impeller - Turbine	Fundición de hierro GG25 - GG25 Cast iron - Fonte GG25 (Opc.) Bronce - Bronze
Eje - Shaft - Arbre	Acero inoxidable AISI 420 - AISI 420 Stainless steel - Acier inoxydable AISI 420 (Opc.) Acero inoxidable AISI 316 - AISI 316 Stainless steel - Acier inoxydable AISI 316
Cierre mecánico - Mechanical seal - Fermeture mécanique	Grafito/Cerámica - Graphite/Ceramic - Graphite/Céramique (Opc.) Otros materiales - (Opc.) Other materials - (Opc.) D'autres matériaux

CURVA / CURVE / COURBE



EQUIPOS / EQUIPMENTS / ÉQUIPEMENTS



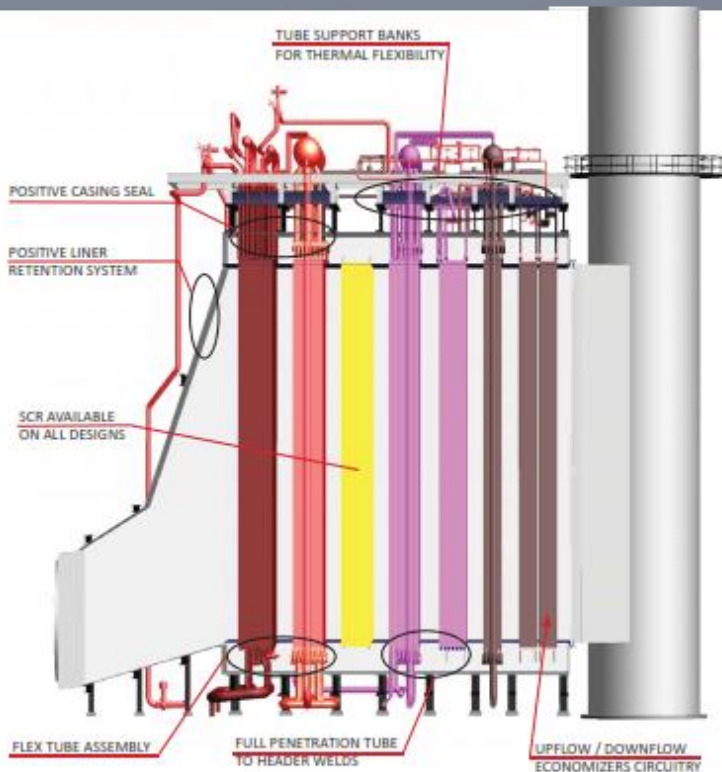
INDUSTRIALES
(Pg. 89-92)



CONTRANCENDIOS
(Pg. 93)

Anexo 14. Caldera de Recuperación HRSG.

FOSTER WHEELER HRSGs ARE DESIGNED FOR



- Horizontal and vertical designs available for both utility and industrial applications
- Steam temperatures up to 600°C (1115°F)
- One, two or three pressure levels to suit any application
- Unfired, co-fired and fresh air fired for guaranteed steam production even without gas turbine operation

Manifa Cogeneration

Location: Manifa, Saudi Arabia
 Customer: Tecnicas Reunidas Power
 Start-Up Year: 2012
 CC Net Capacity: 2 x 183 MWe
 GT Model: Mitsubishi M501F
 Fuel: Natural Gas



Cartagena

Location: Murcia, Spain
 Customer: Repsol Petroleo S.A.
 Start-Up Year: 2011
 CC Net Capacity: 1 x 42 MWe
 GT Model: GE PG6581
 Fuel: Natural Gas



Incheon CCGP

Location: Incheon, South Korea
 Customer: POSCO Engineering & Construction
 Start-Up Year: 2010, 2011
 CC Net Capacity: 4 x 314 MWe
 GT Model: Siemens SGT6-5000F
 Fuel: Natural Gas

