UNIVERSIDAD SEÑOR DE SIPÁN

FACULTAD DE INGENIERÍA ARQUITECTURA Y URBANISMO

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA

TESIS

ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN PERU EN EL DEPARTAMENTO DE LAMBAYEQUE UTILIZANDO LA CÁSCARA DE ARROZ COMO COMBUSTIBLE EN UN CICLO DE RANKINE ORGÁNICO

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

Autor (es):

Bach. Chafloque Velásquez Danny Manuel
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-9924-8959
Bach. Incio Chapoñan Miguel Angel
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-0719-1714

Asesor:

Mg. Carlos Alexis Alvarado Silva
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-3588-8869

Línea de Investigación:

Ingeniería, Tecnología y Medio Ambiente

Pimentel – Perú

2022

ANALISIS DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN PERÚ EN EL DEPARTAMENTO DE LAMBAYEQUE UTILIZANDO LA CASCARA DE ARROZ COMO COMBUSTIBLE EN UN CICLO DE RANKINE ORGÁNICO

Aprobación del Jurado

Dra. Silvia Yvone Gastiaburú Morales

Presidente del Jurado

MSc. Angel Marcelo Rojas Coronel

Secretario del Jurado de tesis

Mg. Carlos Alexis Alvarado Silva

Vocal del Jurado de tesis

DEDICATORIA

A mi familia por su comprensión y ayuda en momentos malos y buenos, porque también me enseñaron a encarar siempre las adversidades sin perder nunca los principios que me inculcaron y el apoyo incondicional que me han brindado durante el transcurso de mi etapa universitaria, inculcándome valores y ser una mejor persona cada día.

Chafloque Velásquez Danny Manuel

A mis padres por haberme encaminado en mi carrera universitaria… Por su amor, trabajo y sacrificios en todos estos años… Gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí. Me formaron con principios y valores que me ayudaran en mi vida personal y profesional.

Incio Chapoñan Miguel Angel

DEDICATORIA

A mi familia por su comprensión y ayuda en momentos malos y buenos, porque también me enseñaron a encarar siempre las adversidades sin perder nunca los principios que me inculcaron y el apoyo incondicional que me han brindado durante el transcurso de mi etapa universitaria, inculcándome valores y ser una mejor persona cada día.

Chafloque Velásquez Danny Manuel

A mis padres por haberme encaminado en mi carrera universitaria… Por su amor, trabajo y sacrificios en todos estos años… Gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí. Me formaron con principios y valores que me ayudaran en mi vida personal y profesional.

Incio Chapoñan Miguel Angel

RESUMEN

El presente trabajo trata sobre el potencial de generación de energía eléctrica utilizando cáscara de arroz en un ciclo orgánico de Rankine (ORC) en Perú especialmente en Lambayeque. Perú es un país con extensas áreas de cultivo de biomasa, sin embargo, no todos los residuos de estos cultivos se reutilizan para la generación eléctrica, por lo que este estudio analiza el potencial de generación eléctrica de los residuos del arroz.

Se abordan las características y limitaciones del biocombustible estudiado con el fin de evitar los efectos no deseados que genera la ceniza durante su combustión en la caldera. Se realiza la adaptación del ciclo de Rankine y su estudio termodinámico para el análisis del potencial de generación eléctrica en función del ciclo estudiado. Los resultados muestran el potencial de generación de electricidad en Perú y en el Norte, en algunas regiones específicas que son los mayores productores de arroz.

Palabras claves: Cáscara de Arroz, Ciclo Rankine orgánico, Potencial energético.

ABSTRACT

This study evaluates the potential for electric power generation in Brazil using the rice husk, as fuel in an Organic Rankine Cycle (ORC) in Perú especially in Lambayeque has one of the largest agriculture areas in the World. However, Perú has not yet explored the potential use of agricultural residues for electricity generation. Hence, this study analyses the potential electric power generation from the combustion of rice hulks.

Some characteristics and limitations due to the biofuel combustion such as the ashes combustion will be studied, an approach on the modifications of the Conventional Rankine Cycle in order to work with the limitations of the biofuel and its ashes are going is performed. Findings show the potential of electric power generation in Perú, focusing on the most productive areas of rice such as the Norte region of Perú.

Keywords: Rice husk, energy potential, organic Rankine cycle.

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN 11

1.1. Realidad Problemática 11

1.1.1. Escenario y perspectivas de la demanda energética en el CAN 11

1.1.2. Escenario del uso de cascarilla de arroz en Perú 12

1.2. Antecedentes de Estudio 13

1.3. Teorías Relacionadas al tema: 14

1.3.1. Biomasa 14

1.3.2. Cáscara de arroz 18

1.3.3. Producción de arroz en Lambayeque 19

1.3.4. Análisis químico de combustible 19

1.3.5. Producción de arroz 20

1.3.6. Ciclo de Rankine orgánico 21

1.3.7. Componentes del ciclo de Rankine orgánico 23

1.3.8. Máquina de expansión 24

1.3.9. Termocambiador 25

1.3.10. Bombas 26

1.3.11. Fluido de Trabajo 27

1.3.12. Selección de un fluido de trabajo. 28

1.3.13. Lista de posibles fluidos de trabajo para un CRO 29

1.3.14. Comparación entre un ciclo Rankine orgánico y un ciclo Rankine de vapor 31

1.3.16. Estados termodinámicos del fluido de trabajo 34

1.3.17. Definición de los estados termodinámicos del CRO 35

1.4. Formulación del Problema: 39

1.5. Justificación e importancia de estudio: 39

1.5.1 Justificación tecnológica 39

1.5.2. Justificación Económica 39

1.5.3. Justificación Ambiental 40

1.6. Objetivos de Investigación 40

1.6.1. Objetivo General 40

1.6.2. Objetivos Específicos 40

2. MARCO METODOLÓGICO 40

2.1. Tipo y diseño de la investigación 40

2.2. Población y Muestra 40

2.3. Variables y Operacionalización 41
2.4. Técnicas e instrumentos de colección de datos, validez y confiabilidad 41
2.4.1. Procedimiento para el análisis de datos 42
2.4.2. Técnicas de Recolección de Datos 43
2.4.3. Instrumentos de Recolección de Datos 43
2.5. Principios de Rigor Científico 43
3. Resultados 45
3.1. Estudio del Potencial Eléctrico en el territorio peruano usando cáscara de arroz como combustible 45
3.2. Regiones potenciales para la instalación del CRO 48
3.3. Regiones potenciales para la instalación del CRO 51
3.4. Definicion numérica de todos los puntos del ciclo de potencia 52
3.5. Estudio de circuito de generación de calor primario 54
3.6. Consideraciones sobre los componentes del circuito primario 54
3.7. Balance energético del CRO 56
3.7.1. Eficiencia de la primera ley 56
3.8. Balance energético del ciclo primario 60
3.8.1. Transferencia de calor a CRO 60
3.9. Calor producido en la caldera 61
3.10. Potencia en función de la cantidad de combustible 61
4. Conclusiones 64
5. Bibliografía 66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Composición química de la cáscara de arroz, su ceniza y otros biocombustibles (BASU, 2006) 16
Tabla 2: Efectos de la combustión por elementos presentes en las cenizas de biomasa (BASU, 2006) 17
Tabla 3: Composición química de algunos combustibles de biomasa (JENKINS, BAXTER, et al., 1998) 20
Tabla 4: Resume de las ventajas y desventajas de CRO en comparación al ciclo de vapor Rankine 33
Tabla 5: Descripción del equipo CRO 35
Tabla 6: Regiones de mayor produccion en el 2016 en Perú 45
Tabla 7: Relacion entre la masa de cascara de arroz y la masa de arroz 46
Tabla 8: Potencial de generacion electrica por region según datos de cosecha anual de arroz . 58
Tabla 9: Departamentos con mayor potencial de generacion electrica 58
Tabla 10: Definicion de regiones en el norte del peru 49
Tabla 11: Ptencial de generacion de electricidad por region considerada 50
Tabla 12: Estimacion de la demanda electrica en 4 departamentos considerada en funcion del numero de habitaciones durante el año 2020 50
Tabla 13: Lista de propiedades del proyecto 51
Tabla 14: Lista de datos extraidos por MINIREFPROP 53
Tabla 15: Parametros de diseño del circuito primario 56
Tabla 16: Propiedades termodinamicas en los puntos 1 y 2 del CRO 58
Tabla 17: Propiedades termodinamicas en los puntos 4 y 5 del CRO 58
Tabla 18: Propiedades termodinamicas en los puntos 1 y 6 del CRO 59
Tabla 19: Datos extraidos del analisis cuantitativo del CRO 60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Comportamiento Anual de la producción nacional de arroz pilado en el Perú 12
Figura 2: Principales regiones del Perú productoras de arroz en cáscara 13
Figura 3: Ecuación genérica de combustión de un biocombustible (JENKINS, BAXTER, et al., 1998) 19
Figura 4: Esquema típico de un ciclo Rankine de vapor..... 22
Figura 5: Rango de potencia de varios ciclos y sus eficiencias de primera ley (MASCARENHAS, 2014) 22
Figura 6: Componentes de un ciclo de Rankine orgánico (MASCARENHAS, 2015)..... 24
Figura 7: BWR en función de la temperatura de evaporación para diferentes fluidos (QUOLIN, VAN DEN BROECK, et al., 2013)..... 27
Figura 8: Diferentes tipos de fluidos de trabajo (AOUN, 2008) 29
Figura 9: Diagrama T-S de algunos fluidos secos y agua (MASCARENHAS, 2014) 31
Figura 10: Esquema típico de un ciclo de Rankine orgánico con regeneración 34
Figura 11: Descripción del equipo CRO 39
Figura 12: Producción y Precio en chacra del arroz en cáscara (2016-2017)..... 47
Figura 13: Distribución del potencial energético de la cáscara de arroz por puntos cardinales en el Perú 47
Figura 14: Mapa de los departamentos de más producción de cáscara de arroz en el norte del Perú consideradas para el análisis de generación de electricidad 49
Figura 15: Diagrama T-S del ciclo estudiado y sus puntos..... 53
Figura 16: Ciclo primario y CRO interconectados por el intercambiador de calor..... 54
Figura 17: Diagrama simplificado de una maquina termica 57
Figura 18: Esquema completo del sistema que contiene el circuito integrado primario al CRO ... 62

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad Problemática

1.1.1. Escenario y perspectivas de la demanda energética en el CAN

Según (Andina, 2015) expertos internacionales coincidieron hoy en destacar el potencial energético de los países andinos y sus posibilidades de desarrollo y de integración, durante la mesa redonda efectuada en la sede de la Secretaría General de la CAN.

La Secretaría General de la CAN informó sobre los avances en el proceso de interconexión eléctrica en la subregión, luego de la firma del Acuerdo respectivo por los ministros de Energía y Minas de Colombia, Ecuador y Perú en setiembre del 2001. Existe, además, según refirió, una Propuesta de Decisión que será presentada en reunión ampliada de los ministros de Comercio con Energía y Minas. "El objetivo es promover la interconexión de los países de la CAN y el comercio intracomunitario de energía eléctrica, con miras a establecer un mercado integrado en ese campo".

Una de las situaciones complejas para alcanzar la integración energética entre los países de la CAN es la evidente heterogeneidad encontrada a lo largo del análisis de la cadena energética (generación, transmisión, distribución y comercialización), A través de normas comunitarias, la CAN con la Decisión N° 536 de 2002 aprobó el marco general para la interconexión subregional de sistemas eléctricos e intercambio intracomunitario de electricidad, mediante el cual trató de impulsar el desarrollo de intercambios de electricidad entre los países miembros.

Si se lograra interconectar el potencial hidroeléctrico de Perú, Colombia y Ecuador, ello sería suficiente para generar y vender electricidad al resto de Suramérica y Centroamérica, convirtiendo a la Región en un bloque importante en materia de energía eléctrica

El consumo de electricidad producida por fuentes alternativas correspondió al 36,8% del total de energía consumida en estos países en 2009 (EIA, 2016). si se toma en cuenta el potencial energético y las técnicas conocidas para convertir fuentes de energía alternativas en la electricidad, existe el potencial de generar 61% en 2030. (EIA, 2016)

Finalmente, podemos decir que la integración en la Comunidad Andina todavía tiene un largo camino por recorrer, pues según lo analizado en la presente investigación, podemos ver que el avance real ha sido en materia de comercio, pero se está todavía lejos de llegar a

la integración productiva, a la dinamización de inversiones intrarregionales y más aún de llegar a una integración en energía eléctrica.

1.1.2. Escenario del uso de cascarilla de arroz en Perú

Entre los diferentes tipos de biomasa, la cáscara de arroz es una que puede ser utilizado para generar electricidad.

El cultivo de arroz ha sido uno de los más dinámicos de la agricultura peruana y por ello uno de importancia nacional. En el Perú, el arroz se cultiva tanto en la costa como en la selva, los departamentos con mayor área de este cultivo son: Lambayeque y Piura; ambos ubicados en la costa peruana, y en la selva destaca el departamento de San Martín.

El arroz el cual se ha constituido en uno de los pilares de la seguridad alimentaria nacional, y uno de los productos más importantes de la cocina peruana. Su producción ha crecido a una tasa promedio anual de 2,8% durante los últimos 20 años (2000-2019), siendo en el 2019 de 1,9 millones de toneladas como arroz pilado y su equivalente de 3,2 millones como arroz cáscara.

En la siguiente figura se puede observar el comportamiento anual de la producción nacional de arroz pilado, el cual muestra una ligera estabilidad de su producción, con una tasa de crecimiento promedio anual de 2,5%, en comparación con el arroz importado que se ha incrementado a una tasa promedio anual de 4,5%.

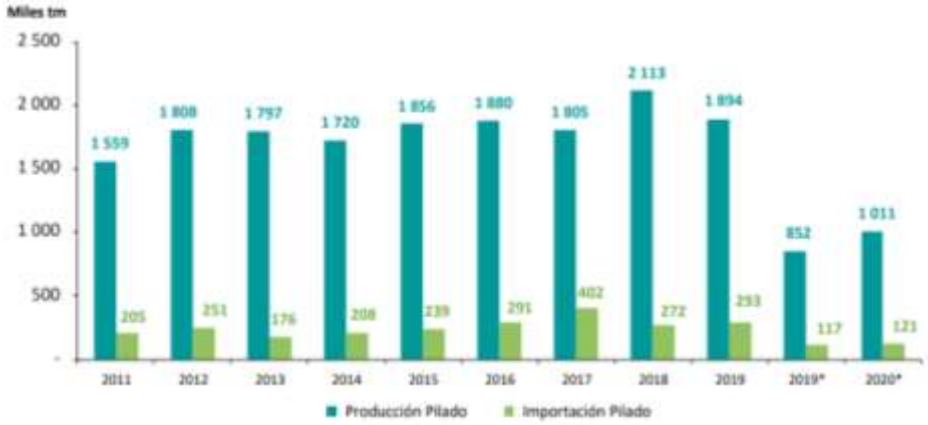


Figura 1: Comportamiento Anual de la producción nacional de arroz pilado en el Perú.

Los tres más grandes productores de arroz en cáscara son: La principal región productora de arroz cáscara en el 2016 fue San Martín con 22%, en segundo lugar, se encuentra Piura con 19% y finalmente Lambayeque con 13%.

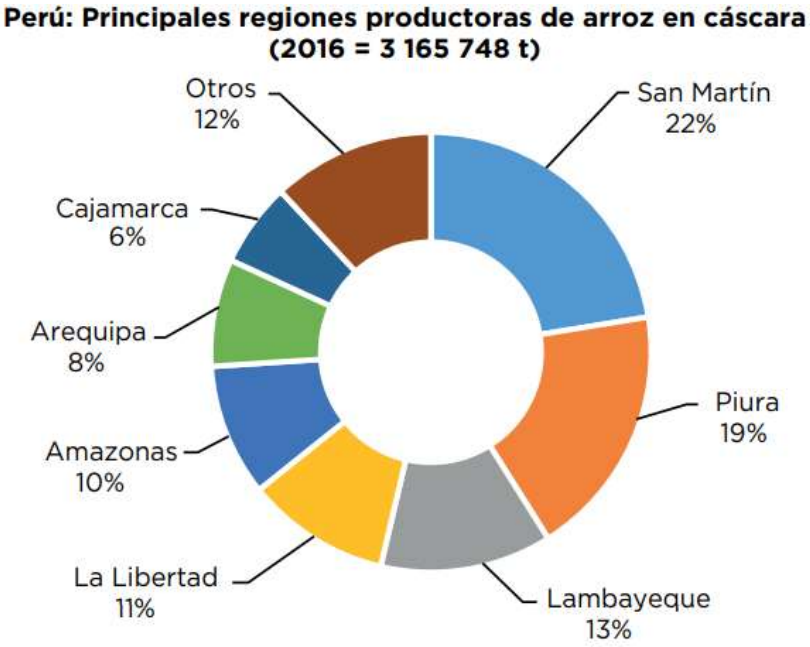


Figura 2: Principales regiones del Perú productoras de arroz en cáscara

Perú tiene posibilidades de instalar centrales eléctricas convencionales de biomasa con una capacidad de 177 MW y centrales de biogás con una capacidad de 51 MW, también que el potencial de generación eléctrica mediante la biomasa, recurso renovable no convencional, es de 450 MW y la potencia utilizada es de 27 MW.

1.2. Antecedentes de Estudio

Según (Rojas, 2018) en su Tesis: Generación de Biogás a partir de la cascarilla de arroz para reducir costos energéticos en la Piladora La merced S.R.L., aprovecha la generación de cascarilla de arroz del molino empleando biodigestores de cúpula fija, a través del proceso de descomposición y utilizando el método de Guerchet, así como también el software de AutoCAD, como variables se empleara 1 105 707 kg de cascarilla de arroz en concentración de 1:5 de agua, para generar 323 827 kWh de energía para el funcionamiento de los motores del área de producción y el periodo para la recuperación de la inversión es de máximo 3 años y 24 días, reduciendo así el 100% de los costos energéticos.

Según (Fernández, 2019) en su Tesis: Generación de energía eléctrica mediante gasificación de la cascarilla de arroz para un molino en Lambayeque, el autor propone un sistema de gasificación de lecho móvil en corrientes paralelas (down draft), que utilizara la cantidad de biomasa de 6307,2 Tn/año obteniendo una potencia a la salida del generador de 607 kW, a través de un gasificador de potencia de 0,28 kg/s y con un 10% de humedad se puede generar

500 a 750 kW, con esto se quiere ofrecer energía eléctrica a precio competitivo, reduciendo el impacto ambiental y aprovechar todo el potencial de la cascarilla de arroz.

Según (Quintana & Salazar, 2017) en su tesis: Diseño de una minicentral termoeléctrica de 5KW, utilizando la cascarilla de arroz como combustible en el caserío Miraflores-Monsefú del departamento de Lambayeque, se realizó un análisis en los molinos de la zona para obtener un 19% de residuo agrícola de arroz y una densidad aparente de 110 kg/m^3 , también se hizo un análisis fisicoquímico de la cascarilla de arroz del caserío para poder encontrar el valor del poder calorífico de 2770 kcal/kg.

Según (Galindo, y otros, 2017) en su artículo de revista: Generación distribuida con plantas de gasificación de cascarilla de arroz para el suministro de electricidad a distrito Bajo Biavo (San Martín, Perú), se realizó un análisis técnica y económica de un sistema de generación distribuida (SGD) que trabajan con motores de combustión interna para abastecer a un gasificador de cascarilla de arroz, en tiempo de mayor producción de cascarilla de arroz en el distrito puede generar aproximadamente 1,8 MW.

1.3. Teorías Relacionadas al tema:

1.3.1. Biomasa

La biomasa se ha convertido en un combustible atractivo para la generación eléctrica debido a su potencial para reducir las emisiones de CO2 y por ser conveniente en producción de energía de mediana y pequeña escala (JENKINS, BAXTER, et al., 1998).

Actualmente hay dos formas principales de generar electricidad a través de Biomasa: gasificación / digestión asociada a ciclos con turbinas o motores de gas y combustión directa asociada a ciclos de turbinas de vapor. gasificación asociada al ciclo combinado (Brayton y Rankine) tiene mayor eficiencia energética, pero requiere una mayor inversión (URIS, LINARES y ARENAS, 2015).

Sin embargo, la generación de electricidad mediante combustión directa en un horno o un lecho fluidizado como fuente de calor es una opción madura para aprovechando este biocombustible, siendo el Ciclo de Rankine Orgánico un ciclo termodinámico que se puede utilizar para convertir la energía térmica en energía eléctrica.

La biomasa se compone básicamente de C, H y O, formando un hidrocarburo, así como combustibles fósiles. Sin embargo, la principal diferencia es la presencia del Oxígeno en la formación de biomasa. La presencia de este átomo hace que la biomasa requiere menos

oxígeno del aire. Sin embargo, la cantidad de energía que se liberará es reducido, disminuyendo así el Poder Calorífico Superior. (VIEIRA, 2012)

Combustibles compuestos por elementos que constituyen la biomasa generalmente son más reactivos que los combustibles fósiles como el carbón. (SILVA, ARDENGHI, et al., 2015) Debido a esta característica, la combustión no es un problema en comparación con otros problemas asociados con la quema de biomasa, tales como sinterización de lecho, formación de escoria, incrustación de conductos y corrosión. Problemas que tendrán sus soluciones tratadas en este presente trabajo.

Los tres primeros problemas mencionados anteriormente provienen de las cenizas de la combustión de biomasa son altamente alcalinos, mientras que la corrosión se debe a la presencia de cloro en ellos.

A través de la Tabla 1 se puede verificar la composición de tres tipos de biomasa: Cáscara de arroz, desperdicios de madera y serrín.

Tabla 1

Composición química de la cáscara de arroz, su ceniza y otros biocombustibles (BASU, 2006)

		Combustible		
	Unidades	Cascara de Arroz	Residuos de madera	Serrín
PCS (Poder Calorífico Superior - Base Seca)	MJ/kg	16,2	20,14	20
Mezcla	Wt%	9,7	14,2	53,9
Volátiles	-	66	79,1	39,19
C	Wt% (Base de despojos)	40,2	49	50,6
H	-	5	5,9	6
O	-	36,3	40,7	42,78
N	-	0,3	2,5	0,2
S	-	0,05	0,05	0,01
Cl	-	0,1	0,03	0,01
Despojos mortales	-	18,2	1,9	0,41
Composición de los despojos		-		
SiO_2	% de despojos	89	32	4,9
Al_2O_3	-	0,41	6,2	0,93
TiO_2	-	0	14	0,2
Fe_2O_3	-	0,25	2,8	1,3
CaO	-	0,75	17	32
MgO	-	0,43	17	32
Na_2O	-	0,06	2,8	2,4
K2O	-	2,2	4,7	8,7
P_2O_5	-	0	6,3	0
SO_3	-	0,49	0	19

De la tabla 1, también podemos ver que la cantidad actual del oxígeno en este combustible es alta. Este hecho implica que la necesidad de alta concentración de oxígeno del aire en el horno donde se quema el combustible es baja, lo que también resulta en una menor cantidad de nitrógeno presente en la quema debido a que el nitrógeno es un gas inerte, no participa en el proceso de combustión, por lo que parte de la energía generada por la combustión se gasta en calefacción de nitrógeno, reduciendo así la eficiencia del proceso. (BORGNAKKE y SONNTAG, 2009) La Tabla 2 a continuación enumera algunos de los problemas que puede enfrentar la cama fluidizada (LF) debido a la constitución química de la biomasa. Deposición

de partículas en el fondo del lecho, la obstrucción del tubo y la corrosión son algunos de los problemas.

Tabla 2

Efectos de la combustión por elementos presentes en las cenizas de biomasa

Elementos en combustible	Efectos
Alcalinos como sodio y potasio	Aglomeración en la lectura Obstrucción de tuberías y corrosión cálida
Cloro	Emisión de HCl Formación de dioxinas
Metales pesados	Emisión de contaminantes
Azufre	Corrosión de la caldera Emisión corrosión fría
Nitrógeno	Corrosión en caliente (relación S/Cl) Emisión de NOx

A continuación, se detallan los tres problemas principales encontrados en la quema de Combustibles de biomasa:

- **Multitud**

El mayor inconveniente encontrado al quemar estos combustibles en la cama Fluidizado es la aglomeración de materiales en el lecho. La mayoría de la biomasa contiene sales alcalinas que reaccionan preferentemente con la sílice en la parte inferior del lecho para formar una mezcla eutéctica con un punto de fusión bajo:

< Silicio > + < alcalino > = <Fusión de silicato >

$$2SiO_2 + Na_2CO_3 = 2Na_2O.2SiO_2 + CO_2$$

Es importante tener en cuenta que a pesar de que la temperatura de fusión de la sílice 1450 ° C, la mezcla eutéctica, silicato, puede fundirse a 754 ° C. (BASU, 2006) Este hecho discutido anteriormente es el motivador del interés del presente trabajo en si utiliza un ciclo de Rankine orgánico (ORC) para trabajar con la quema con temperaturas más suaves.

Además, como se muestra en la Tabla 1, las cáscaras de arroz tienen un 89% de sílice en sus cenizas, lo que lo hace arriesgado desde el punto de vista económico y operativo el proyecto que no tiene en cuenta el punto de fusión de silicato.

- **Atasco**

La obstrucción es la deposición de cenizas de biomasa en las tuberías fuga en lecho fluidizado. Se produce una pérdida de transferencia de calor, reducción de la temperatura de flujo másico y aumento de la temperatura del metal de los conductos, lo que puede acelerar su corrosión.

- **Corrosión**

El cloro contribuye a aumentar el potencial de corrosión en caliente, que ocurre en lechos que operan a altas temperaturas y presiones. Comienza la corrosión convertirse en un problema real, especialmente en los sobre calentadores que trabajar a temperaturas superiores a 460 O C, y presiones superiores a 55 bar.

El cloro reacciona con metales alcalinos formando cloro alcalino bajo punto de fusión, provocando el mismo efecto que la obstrucción y la aglomeración, sin embargo, debido a la presencia de cloro, se agrega el efecto de corrosión.

Si el cloro presente en el combustible supera el 0,1% (BASU, 2006), Se deben tomar medidas con respecto a la corrosión generada por el cloro, Las medidas son las mismas que las anteriores, siempre enfocándose en trabajar en temperaturas por debajo de la temperatura de fusión de tales constituyentes.

Como podemos ver en la Tabla 1, la concentración y el choro en la cáscara de arroz es de aproximadamente 0,1% que no supera el límite de peligro de corrosión. (Basu, 2006)

1.3.2. Cáscara de arroz

La generación de electricidad mediante la quema de cáscaras de arroz es una alternativa factible desde el punto de vista tecnológico, ya que la tecnología detiene la conversión está disponible, la materia prima es abundante en el territorio peruano y todo el CO2 producido en la quema vuelve al ciclo del carbono en la biosfera de la Tierra.

1.3.3. Producción de arroz en Lambayeque

El arroz es uno de los cereales más producidos y consumidos del mundo, caracterizándose como el principal alimento de más de la mitad de la población mundial. Solo en Asia, el 60-70% del consumo de calorías de más de 2000 millones de personas es del arroz y sus derivados. (SILVA, ARDENGHI, et al., 2015)

A nivel Nacional, a partir del 2011 hasta el 2016 hubo un ligero incremento de cantidad de molinos de arroz para la producción, los departamentos donde se encuentran con la gran mayoría de molinos en el 2016 son en primer lugar a Piura con 108 y en segundo lugar Lambayeque con 98.

El volumen producido de arroz en la región de Lambayeque ha venido incrementándose ligeramente en el periodo del 2000 al 2015, de 429.6 a 441.4 toneladas, con una tasa de crecimiento promedio anual de 0.18%. En el año 2000, la producción de la región representó al nacional en 22.28% y 14.13% para el año 2015.

1.3.4. Análisis químico de combustible

La cáscara de arroz corresponde al 30% de la masa de granos de arroz. completo (CENBIO, 2012). La cáscara de arroz tiene muchos elementos químicos. En general, podemos caracterizar los combustibles de biomasa como sigue: (JENKINS, BAXTER, et al., 1998).

$$\begin{aligned} &C_{x1}H_{x2}O_{x3}N_{x4}S_{x5}Cl_{x6}Si_{x7}K_{x8}Ca_{x9}Mg_{x10}Na_{x11}P_{x12}Fe_{x13}Al_{x14}Ti_{x15} + n_1H_2O \\ &+ n_2(1+e)(O_2 + 3.76N_2) = n_3CO_2 + n_4H_2O + n_5O_2 + n_6N_2 + n_7CO \\ &+ n_8CH_4 + n_9NO + n_{10}NO_2 + n_{11}SO_2 \\ &+ n_{12}HCl + n_{13}KCl + n_{14}K_2SO_4 + n_{15}C + \ldots \end{aligned}$$

Figura 3: Ecuación genérica de combustión de un biocombustible (JENKINS, BAXTER, et al., 1998)

Donde la primera parte de la ecuación anterior constituye la biomasa en una forma genérico.

En la Tabla 3 podemos identificar el porcentaje de masa de cada elemento la sustancia química de la Figura 3 anterior y determinar la composición del arroz.

Tabla 3

Composición química de algunos combustibles de biomasa (JENKINS, BAXTER, et al., 1998)

		Álamo híbrido	Paja de arroz	Arroz/Aspen
C	X1	4.1916	3.2072	0.77
H	X2	6.0322	5.1973	0.86
O	X3	2.5828	2.81448	1.09
N	X4	0.043	0.0625	1.45
S	X5	0.0006	0.0057	9.5
Cl	X6	0.0003	0.0165	55
Si	X7	0.0057	0.5	87.72
K	X8	0.0067	0.0592	8.84
Ca	X9	0.0337	0.0141	0.42
Mg	X10	0.0205	0.0135	0.66
Na	X11	0.0002	0.0079	39.5
P	X12	0.0012	0.0086	7.17
Fe	X13	0.0007	0.0029	4.14
Al	X14	0.0008	0.0073	9.13
Ti	X15	0.0002	0.0004	2

Es importante destacar, con base en el análisis de la tabla 3, la gran tendencia en formación de silicatos, que se aglomeran en los conductos y en el interior del lecho fluidizado, si se alcanza la temperatura de fusión del silicato.

1.3.5. Producción de arroz

Uno de los propósitos del uso de cáscara de arroz para la generación de electricidad puede ser suministrar energía a las fábricas productoras de arroz, lo que puede ser una interesante alternativa para el uso de biocombustible que, debido a su baja densidad energía, demanda grandes volúmenes de transporte, hecho que se traduce en un aumento de costos en el proceso.

Además de la posibilidad antes mencionada, obviamente la cáscara de arroz podría ser utilizado para la generación de electricidad externa en el entorno de fabricación, que puede alimentar enérgicamente pequeños pueblos y aldeas.

De una forma u otra, siempre hay que tener en cuenta el problema logístico de transporte y ubicación de la planta de energía, ya que el costo del transporte debido a la baja densidad energética de las cáscaras de arroz puede hacerlo inviable económicamente el proyecto.

Según la siembra y época del año, el arroz proviene del cultivo con un 25-30% de humedad, y es necesario reducirla al 12-15% mediante el uso de secado (DARABAS, ARMINDA, et al.).

En forma de uso de energía para uso en fábrica, también existe la opción de Realizar la etapa de secado del arroz utilizando el calor proporcionado por la combustión directo de la corteza.

Sin embargo, esta posibilidad no se abordará en este trabajo debido a la la falta de información sobre la cantidad de energía demandada en esta etapa del proceso.

El presente trabajo abordará el caso en el que se utiliza cáscara de arroz exclusivamente para la generación de calor del ciclo orgánico Rankine (CRO).

1.3.6. Ciclo de Rankine orgánico

El ciclo de Rankine orgánico (CRO) se basa en el ciclo de Rankine convencional que se utiliza en plantas de generación de energía convencionales por ser una tecnología consolidada en el mercado. (TANCZUK y ULBRICH, 2013)

La principal diferencia entre los dos ciclos radica en la diferencia en el fluido de trabajo utilizado, que requiere o permite cambios en el equipo utilizado entre los ciclos, con el fin de beneficiar la economía, técnica y también Operacional.

El fluido utilizado por el ciclo Rankine convencional es vapor de agua, mientras que en CRO el fluido utilizado es orgánico, que puede ser un hidrocarburo o una gama de diferentes fluidos refrigerantes, y puede elegir cuál se adapta mejor a su demanda del ciclo proyectado.

Las funciones del fluido orgánico corresponden a las mismas que las del vapor de agua, pero Permiten operaciones a diferentes variaciones de presión (fluidos orgánicos condensar a presión atmosférica, por ejemplo). (TANCZUK y ULBRICH, 2013)

Los fluidos corporales en CRO tienen su punto de ebullición por encima del punto de agua hirviendo y bajo calor de vaporización, aproximadamente el 10% del calor necesario para vaporizar el agua. Esto permite el uso de fuentes con bajos temperaturas, sin embargo, la eficiencia térmica del ciclo disminuye debido a una menor variación de temperatura en el ciclo. (TANCZUK y ULBRICH, 2013)

En las plantas típicas de Ciclo de Rankine Orgánico, dos ciclos térmicos son de uso común: ciclo de aceite térmico y ciclo de fluido orgánico. El calor de gases de escape de la

combustión de combustible en el ciclo primario se transfiere al aceite térmico que a través de un intercambiador de calor transfiere el calor al CRO, para que el fluido orgánico tenga la configuración de vapor saturado a una presión dada, generando así energía en el turbo-expansor. En términos generales, el ciclo orgánico de Rankine tiene los mismos elementos mecánica que un ciclo Rankine de vapor.

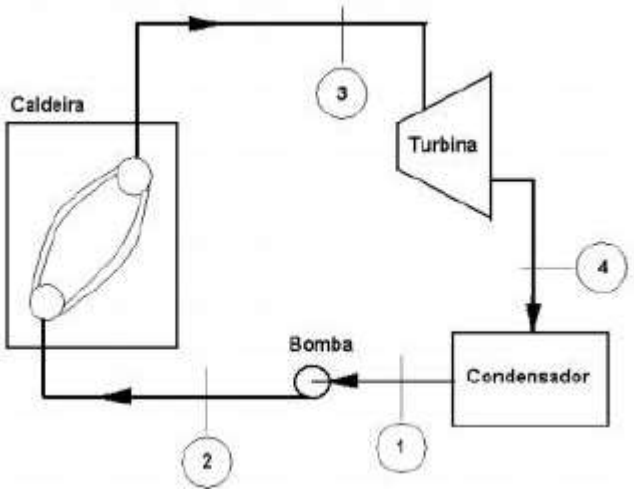


Figura 4: Esquema típico de un ciclo Rankine de vapor

El ciclo de Rankine orgánico opera entre 60 y 200 ° C para operaciones con fuentes de baja temperatura, alcanzando los 350 ° C. (MASCARENHAS, 2014)

La Figura 5 muestra los rangos de generación de potencia y eficiencia de la primera ley de los ciclos de generación de potencia conocidos y más comúnmente utilizados.

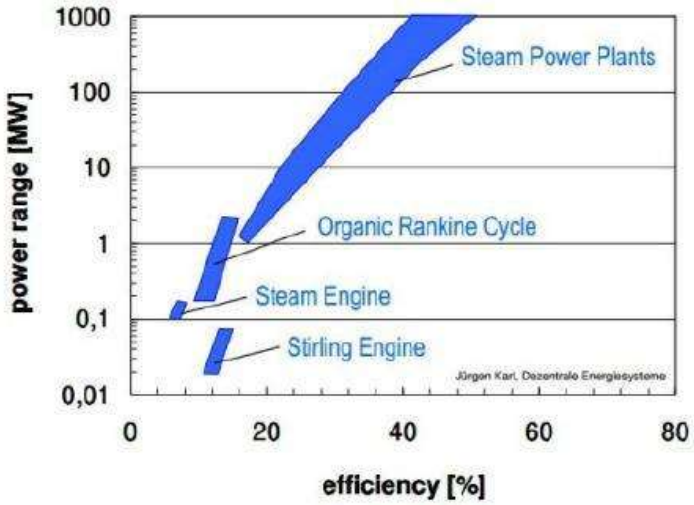


Figura 5: Rango de potencia de varios ciclos y sus eficiencias de primera ley (MASCARENHAS, 2014)

Con la Figura 5 se puede concluir que el ciclo orgánico de Rankine tiene menor eficiencia térmica que los ciclos Rankine de vapor convencionales, además de este último tienen un mayor potencial para generar energía mecánica y eléctrica.

Sin embargo, el alcance y la aplicación de estas dos tecnologías es diferente, ya que veremos en este capítulo lo que puede justificar el uso de un ciclo de Rankine orgánico para muchas situaciones como las siguientes a continuación (MASCARENHAS, 2014): Plantas donde hay relaves térmicos: En vista de la operación de CRO de baja altitud, este ciclo se puede utilizar reutilizando el calor rechazado de otras plantas que realizan Cogeneración o Trigeneración (generación de energía mecánica y térmica para proporcionar calor y frío).

Fuentes de temperatura baja / media: quema de biomasa, explotación energía solar y otras fuentes de energía alternativa.

Lugares con difíciles condiciones de funcionamiento: Debido a su configuración y a las propiedades de trabajo, las plantas CRO requieren menos mantenimiento correctivo al comparar plantas usando el ciclo de Rankine convencional.

1.3.7. Componentes del ciclo de Rankine orgánico

El ciclo orgánico de Rankine, como el ciclo de Steam Rankine, es una máquina térmica que utiliza energía en tránsito en forma de calor para transformarse en energía mecánica a través de un turbo expansor.

En la mayoría de las aplicaciones industriales, la turbina de ciclo está conectada a un convertidor para la conversión de energía mecánica proporcionada al girar el eje de la turbina en energía eléctrica a través de un generador de electricidad.

Como el CRO es una máquina térmica, el principio de funcionamiento es el mismo de los otros ciclos de potencia, donde hay una fuente a alta temperatura, un elemento convertidor de energía térmica a energía mecánica y una fuente de baja temperatura, de modo que se rechace el calor no utilizado durante la conversión.

Esta sección detalla el equipo utilizado en un ciclo CRO:

El ciclo orgánico simple de Rankine se compone de cuatro elementos: evaporador, turbina, condensador y bomba. En el ciclo ideal, la bomba y la turbina tienen procesos isentrópicos, mientras que el evaporador y el condensador no muestran pérdidas de carga.

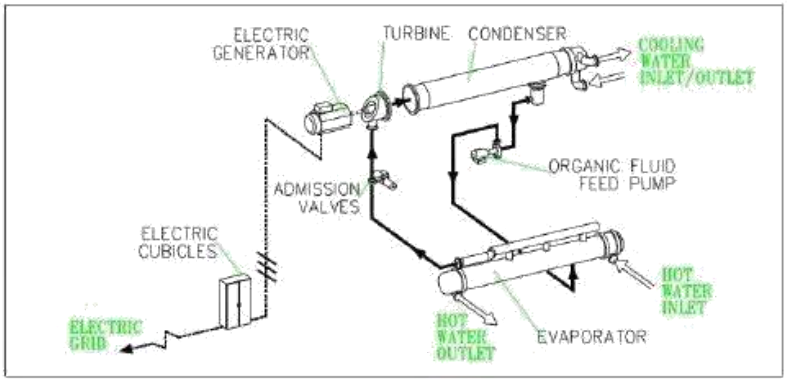


Figura 6: Componentes de un ciclo de Rankine orgánico (MASCARENHAS, 2015)

Un detalle importante que puede notarse en la Figura 6 es la ausencia de un reductor de velocidad acoplado a la salida del eje de la turbina. Este hecho lo da el CRO tienen un giro menor que no hace necesario unir un elemento reductor en la salida de la turbina.

1.3.8. Máquina de expansión

Las máquinas de expansión son los elementos mecánicos responsables de convertir la energía térmica en energía mecánica, su eficiencia es crucial para el rendimiento termodinámico de primera ley del ciclo.

Estas máquinas se pueden clasificar en dos categorías: máquinas turbo expansión, en la que su operación de expansión y caída de presión se basa en el movimiento de palas acopladas a un eje de rotor y máquinas de desplazamiento positivo, cuyo funcionamiento se basa en pistones como los de los motores de combustión interna.

Las máquinas de desplazamiento positivo son las más adecuadas para las unidades CRO actuando a pequeña escala, ya que se caracterizan por un bajo caudal, alta relación de expansión y menor velocidad de rotación que las utilizadas en turbomáquinas. (MASCARENHAS, 2014)

Por otro lado, las turbomáquinas se dividen en dos grupos según la forma de trabajo, la turbina axial y radial.

La turbina de flujo radial puede funcionar de manera más eficiente en sistemas que tienen un flujo másico bajo (COHEN, ROGERS y SARAVANAMUTTOO, 1996), como es el caso de los sistemas CRO, mientras que, para el resto de aplicaciones, las turbinas de flujo axial son las máquinas más utilizadas.

Debido a la menor caída entálpica entre la entrada y la salida de la turbina en el ciclo CRO, Es común no usar más de una etapa de expansión durante el proceso de generación de energía. Esto se debe a que la estructura metálica de la turbina resiste las tensiones térmicas y mecánicas que realizan una expansión de una sola etapa.

1.3.9. Termocambiador

Los intercambiadores de calor son dispositivos para transferir calor entre dos o más fluidos a diferentes temperaturas. Como se mencionó en la introducción al capítulo sobre el ciclo orgánico de Rankine, El ciclo cuenta con al menos dos intercambiadores de calor, el evaporador, responsable de la fuente ciclo, y el condensador, responsable del calor residual, fuente de frío.

Además de aumentar la eficiencia térmica, puede utilizar el regenerador antes del evaporador, aprovechando así parte del calor rechazado por el ciclo para precalentar el fluido antes de que entre al evaporador. Así el fluido orgánico requiere menos energía durante el paso por el evaporador, aumentando de ahí la primera ley de eficiencia del ciclo.

Otros elementos para el intercambio de calor por el ciclo de energía pueden ser utilizado, pero en configuraciones CRO elementales sólo los tres anteriores son mayoritariamente utilizado. Los intercambiadores de calor se pueden clasificar de varias formas (OZISIK, 1985). Los intercambiadores de calor se pueden clasificar en dos tipos de contacto, directo e indirecto.

- Directo: dos fluidos inmiscibles entran en contacto directo, por lo tanto, puede haber convección natural y forzada.
- Indirecto: en este caso los fluidos que intercambian calor no se mezclan.

En la clasificación entre el tipo constructivo, hay dos tipos que son más utilizado (OZISIK, 1985): Intercambiador de tubo de carcasa: Puede acomodar una amplia gama de operaciones a diferentes temperaturas y presiones. La facilidad de fabricación y la El costo relativamente bajo es la principal razón para su uso en ingeniería.

Intercambiadores de calor de placas: Las placas pueden ser lisas o tener aspereza. Debido a su geometría, no soportan altas presiones (<3 MPa) o altas diferencias de temperatura como el tubo del casco. Sin embargo, se muestran más compacto, lo que es ideal para aplicaciones donde el peso o el tamaño son un factor limitante en el proyecto, además el costo de mantenimiento es menor.

En el ciclo de Rankine orgánico, el evaporador es el intercambiador de calor más crítico porque necesita soportar las temperaturas de ciclo más altas (~ 350 ° C), altas presiones (~4.5 MPa), que somete los materiales a tensiones térmicas y corrosión (MASCARENHAS, 2014).

El condensador debe operar a caudales altos y presiones bajas, ya que este elemento opera a temperaturas cercanas a la temperatura ambiente.

El regenerador está diseñado para transferir calor de manera eficiente entre un fluido en fase gaseosa, salida de la turbina, para un fluido en fase líquida, después de la salida de la bomba.

1.3.10. Bombas

Las bombas son componentes importantes durante el diseño de un ciclo CRO y se debe prestar especial atención durante la selección y el dimensionamiento de los elementos. Estos elementos cumplen la función de controlar el caudal, la eficiencia y el NPSH del ciclo (QUOLIN, VAN DEN BROECK, et al., 2013).

A continuación, se muestran los factores del proyecto que se deben considerar en el ciclo de Rankine Orgánico:

- Control de flujo: en la mayoría de los ciclos orgánicos, la bomba se utiliza para controlar el caudal másico del ciclo. El motor eléctrico está conectado a un inversor que permite la variación de su velocidad de rotación. En las bombas de desplazamiento positivo, el caudal másico es proporcional a la velocidad de rotación, mientras que, en las bombas centrífugas, el caudal también depende de la presión y el cabezal de la bomba.
- Eficiencia: en los ciclos Rankine convencionales, el consumo de energía de la bomba es muy bajo en comparación con la cantidad de energía generada por la turbina. Sin embargo, en CRO las irreversibilidades que ocurren en las bombas pueden reducir sustancialmente la eficiencia del ciclo. La relación de consumo eléctrico de la bomba y la energía generada por la turbina se llama BWR (Back Work Ratio):

$$BWR = W_B / W_t \quad (1)$$

De la ecuación 1, podemos extraer dos consideraciones:

Cuanto mayor sea el $T_{crítica}$ del fluido de trabajo, menor es el BWR, sin embargo, BWR crece cuando el trabajo de la turbina es mínimo.

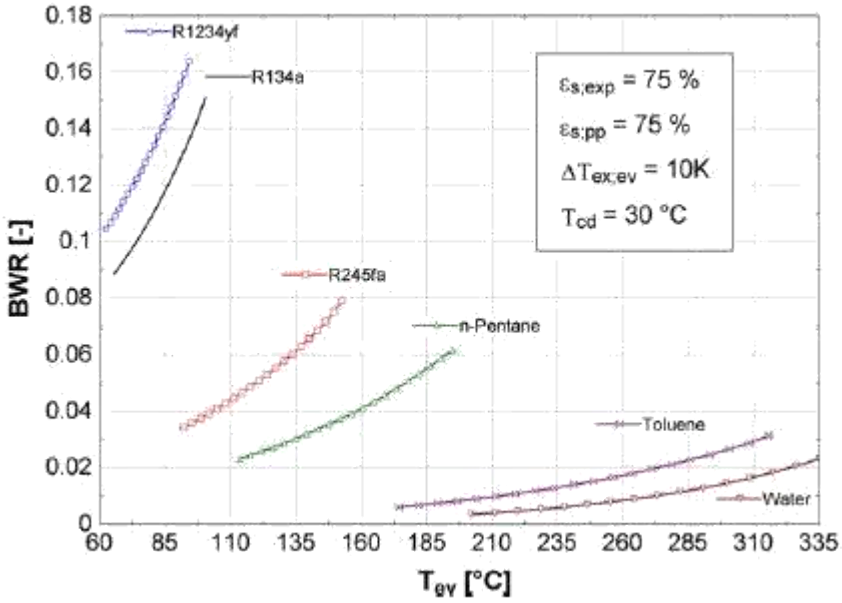


Figura 7: BWR en función de la temperatura de evaporación para diferentes fluidos (QUOLIN, VAN DEN BROECK, et al., 2013)

- Impermeabilidad: Los fluidos orgánicos son costosos, inflamables y tóxicos. Debido a estos factores, la impermeabilidad no solo de la bomba, sino del ciclo, todo es de suma importancia. Cuando se utilizan bombas centrífugas en el ciclo, La impermeabilidad está garantizada por el sello del eje.
- Cabezal de succión de presión neta baja (NPSH): estrategias para evitar la cavitación, que puede provocar daños en las bombas, la reducción del flujo de fluido de trabajo y se debe tener en cuenta una parada brusca del ciclo. el NPSH es el factor que hay que tener en cuenta para que no pase nada de los problemas mencionados anteriormente.

1.3.11. Fluido de Trabajo

La eficiencia de un ciclo CRO depende de dos factores principales: las condiciones de trabajo del ciclo y las propiedades termodinámicas del fluido. (AOUN, 2008)

Dado que el fluido de trabajo es lo que caracteriza principalmente la diferencia entre un ciclo de Rankine orgánico y un ciclo de Rankine de vapor, el fluido de trabajo se tratará ampliamente en este trabajo.

1.3.12. Selección de un fluido de trabajo.

Al seleccionar el fluido de trabajo de un CRO, ciertos criterios deben seguir para tomar una decisión correcta.

Propiedades termofísicas: (AOUN, 2008)

- La temperatura crítica del fluido de trabajo debe ser mayor que la más alta temperatura de funcionamiento del ciclo para minimizar la irreversibilidad generada durante la transferencia de calor a una diferencia de temperatura finita en el ciclo.
- La presión de condensación del fluido de trabajo debe ser mayor que la presión atmosférica para que no haya penetración de aire en el sistema.
- El punto triple del fluido debe ser menor que la temperatura ambiente mínima para asegurar de que los fluidos de trabajo no se solidifiquen bajo ninguna condición de operación o durante el apagado del ciclo.
- En el diagrama T-s, la curva de vapor saturado del fluido debe estar cerca de la vertical para evitar un sobrecalentamiento excesivo en la salida de la turbina, lo que configura una gran pérdida exergética.
- La variación de entalpía en la turbina debe ser lo suficientemente grande para aumentar la eficiencia termodinámica del ciclo y minimizar el flujo másico del fluido desde trabajo.
- La densidad del fluido de trabajo en la entrada de la turbina debe ser alta para que la turbina cumpla con las pequeñas dimensiones y con el fin de compensar el reducido salto entálpico turbo-expansor.
- El parámetro del coeficiente de transferencia de calor por convección debe ser alta debido a los intercambios de calor por convección que se producen en los intercambiadores de calor del ciclo; el coeficiente es mayor a medida que aumenta la conductividad térmica y se reduce la viscosidad del fluido.

La viscosidad en forma líquida y en forma de vapor de los fluidos de trabajo debe baja para minimizar las caídas de presión y maximizar la transferencia de calor de convección.

- Compatibilidad de materiales y estabilidad del límite de fluidos (AOUN, 2008) Los fluidos orgánicos no deben ser corrosivos para la mayoría de los materiales utilizado para los diferentes componentes del ciclo CRO, como tuberías, turbinas,

intercambiadores de calor y juntas. Además, el fluido orgánico debe ser térmico y químicamente estable cuando se opera a todas las temperaturas y presiones del ciclo.

- Características de seguridad de fluidos (AOUN, 2008) El fluido debe ser atóxico y preferiblemente inflamable.

1.3.13. Lista de posibles fluidos de trabajo para un CRO

Hasta la fecha, ningún fluido corporal conocido cumple todos los criterios. antes mencionado. (AOUN, 2008) Uso de la base de datos REFPROP, enumerado posibles candidatos para la elección considerando solo las propiedades termo físicas en consideración.

Los fluidos se pueden clasificar en tres categorías diferentes, dependiendo de la derivada de su curva de saturación de vapor en el diagrama TS. esta curva de saturación de vapor es la característica de fluido más importante en CRO ya que afecta directamente la eficiencia y diseño de los componentes del ciclo.

La derivada $\frac{dT}{dx}$ es una función del calor específico del vapor y, como consecuencia, es directamente relacionado con la estructura molecular del fluido. Cuanto mayor es la complejidad molecular del fluido, mayor es su derivada. Una molécula de baja complejidad posee esta derivada negativa, donde el fluido es clasificado como fluido húmedo, mientras que moléculas más complejas con baja capacidad calorífica, poseen la derivada positiva, denominando el fluido, como fluido seco. La Figura 8 muestra la curva de saturación de los diferentes tipos de fluidos de trabajo.

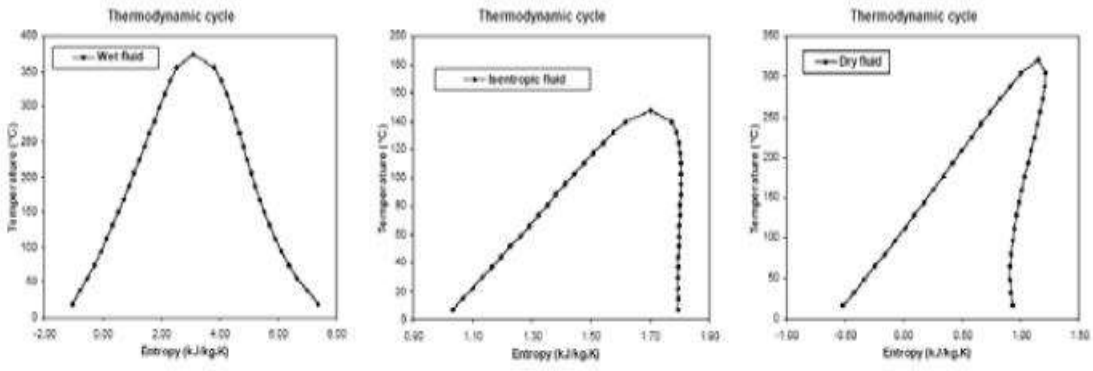


Figura 8: Diferentes tipos de fluidos de trabajo (AOUN, 2008)

- Fluido seco: Tiene la derivada de T con respecto a S positivo. El vapor saturado del fluido seco se sobrecalienta a medida que se expande isentrópicamente. Este tipo de fluido es conveniente para la turbina, ya que no exista riesgo de erosión en las palas por sobrecalentamiento lo que proporciona la ausencia de fluido en estado líquido.
- Fluido húmedo: Tiene la derivada $\frac{dT}{ds}$ negativa y de bajo peso molecular (por ejemplo, agua y amoniaco); la expansión se produce en la sección donde las dos fases del fluido coexisten.
- Líquido isentrópico: Es un fluido cuya expansión es isentrópica, llevando a que la derivada de la temperatura en relación a la entropía sea cero, es decir, una curva vertical.

La Figura 9 compara varios fluidos de trabajo que son candidatos potenciales para CRO con fluidos convencionales, que tienen un derivado en fase vapor negativo.

Se observa la expansión típicamente isentrópica de los refrigerantes, que tienen la curva de vapor saturado verticalmente. Este hecho es deseable debido a la necesidad de compresión isentrópica en ciclos de refrigeración. Se observa el carácter de la derivada positiva de los fluidos orgánicos, en la que se caracteriza la expansión seca del fluido en el turbo-expansor.

También se puede observar además que el carácter más polar de los fluidos aumenta la Tcrítica. En este caso, el tolueno, que es el fluido orgánico con la temperatura más crítica alta tiene el mayor carácter polar entre los fluidos mostrados, mientras que el agua debido a su configuración molecular tiene la mayor polaridad entre los fluidos y luego mayor temperatura crítica.

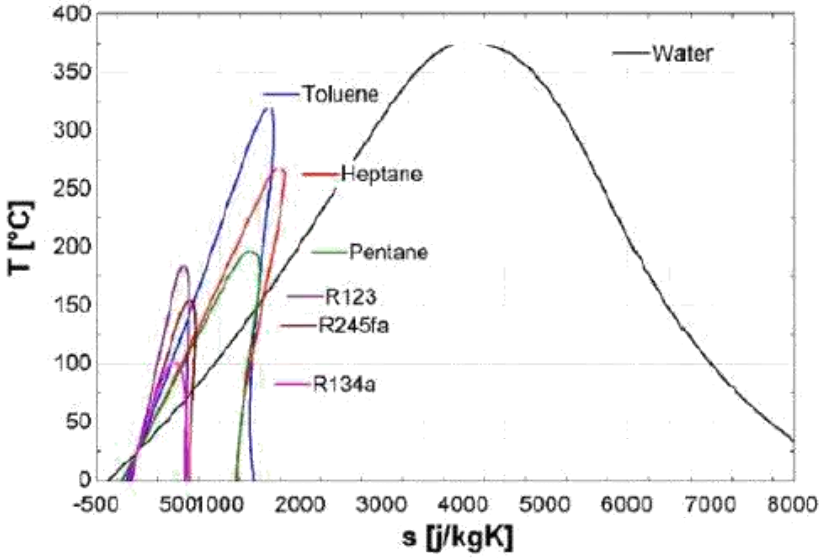


Figura 9: Diagrama T-S de algunos fluidos secos y agua (MASCARENHAS, 2014)

1.3.14. Comparación entre un ciclo Rankine orgánico y un ciclo Rankine de vapor

Como se puede inferir de la Figura 9, y como se mencionó anteriormente, el fluido de trabajo orgánico tiene su curva de vapor saturado casi verticalmente, incluso puede presentar la derivada de la curva positiva, a diferencia del agua que tiene el derivado de vapor saturado negativo, un hecho que implica la necesidad de sobrecalentar el agua en el ciclo Rankine para evitar efectos no deseados en las palas de turbina debido a la presencia de agua en la fase líquida.

A continuación, se muestran las principales diferencias entre el CRO y el ciclo de Rankine convencional:

Calentamiento excesivo: Como se mencionó anteriormente, los fluidos corporales permanecen sobrecalentados a medida que la turbina se expande, por lo tanto, no se requiere sobrecalentamiento del fluido, al contrario de lo que ocurre en el ciclo Rankine convencional. La ausencia de fluido en la fase de mezcla saturada también reduce corrosión eficaz en los álabes de la turbina, lo que aumenta la vida útil de estos álabes durante 30 años, en lugar de 15-20 años como en las turbinas convencionales. (QUOLÍN, 2011)

Temperatura de entrada de la turbina: Debido al hecho de que el CRO opera las temperaturas más bajas que el ciclo convencional, la temperatura de entrada de la turbina es más pequeña que la del ciclo convencional. Este hecho reduce las tensiones térmicas en

las palas de turbina, simplificando así su diseño, esta es una ventaja para las aplicaciones en áreas remotas de Perú.

Proyecto de turbina: Turbinas que operan en un ciclo Rankine convencional, trabajan con una mayor caída entálpica del fluido de trabajo, lo que generalmente conduce a la necesidad de más de una etapa de expansión en la turbina. Esto aumenta su complejidad, tiempo de mantenimiento y tamaño. Cómo opera el CRO con las caídas entálpicas más pequeñas, es factible utilizar sólo una etapa que opera las rotaciones más bajas. Este hecho, además de reducir las tensiones de fatiga del material, permite acoplarse directamente al generador, haciendo un reductor de velocidades.

Caldera: Cómo funciona CRO a temperaturas más bajas que el ciclo tradicionalmente, la caldera está sujeta a menos estrés térmico. Por tanto, la caldera puede tener dimensiones más pequeñas en comparación con el ciclo tradicional.

Temperatura de evaporación: Debido al fluido de trabajo del CRO que tiene temperatura de ebullición más baja, se favorece el uso de una gama más amplia de fuentes calientes de calor a temperaturas más bajas.

Consumo de bomba: Como el ciclo orgánico opera con menores caídas entálpicas, este hecho es compensado por un mayor caudal másico del fluido, lo que lleva a un mayor consumo energético de la bomba.

Eficiencia: La eficiencia de la primera ley de un ciclo de Rankine orgánico no supera el 24% mientras que en el ciclo Rankine convencional esta eficiencia supera el 30%. (QUOLIN, 2011)

Características del fluido: Cómo funciona el ciclo Rankine convencional con el agua como fluido de trabajo, no se enfrenta a los problemas típicos asociados con los fluidos orgánico, como:

- Alto costo y baja disponibilidad
- Debe ser no tóxico
- No debe ser inflamable
- Debe ser químicamente estable
- Debe tener baja viscosidad

Tabla 4

Resumen de las ventajas y desventajas de CRO en comparación al ciclo de vapor Rankine

Ventajas de CRO	Ventajas del ciclo de Vapor Rankine
Menos mantenimiento	Mayor eficiencia de primera ley
Sin necesidad de sobrecalentamiento	Menor consumo de electricidad en bomba
Baja caída entálpica en la turbina	Más fácil de manipular el fluido
Mejor relación entre tamaño y peso	
Baja temperatura y presión en caldera	
Trabajo con fuentes más pequeñas de la temperatura	

1.3.15. Balance energético del sistema de generación de energía

Para mapear el potencial de generación eléctrica en Perú utilizando la cáscara de arroz como combustible, este estudio considera un sistema propuesto que tiene sus características termodinámicas detalladas en este capítulo.

Los resultados de los departamentos peruanos se presentarán en el próximo capítulo, así como los hallazgos del estudio.

El principal objetivo de resolver el ciclo de potencia es obtener la potencia específica del ciclo, es decir, la potencia generada por la masa de combustible, introducido en la caldera de ciclo primario.

La Figura 10 presenta el esquema básico a considerar y estudiar para el Ciclo orgánico de Rankine propuesto aquí.

Aunque básico, este esquema es interesante porque funciona con la expansión seca, en la que el fluido entra en la turbina saturada con la entalpía más alta y sale de la turbina en la condición de vapor sobrecalentado a una entalpía más baja.

En este caso, el regenerador puede aprovechar la energía del propio ciclo para transformar el fluido de la condición de vapor sobrecalentado a la condición de vapor saturado, antes de pasar por el condensador del circuito secundario; simultáneamente, precalienta el agua y deja la bomba al circuito intercambiador de calor / evaporador primario.

Se presentará la descripción punto por punto del diagrama de flujo que se muestra a continuación en la sección 1.3.16.

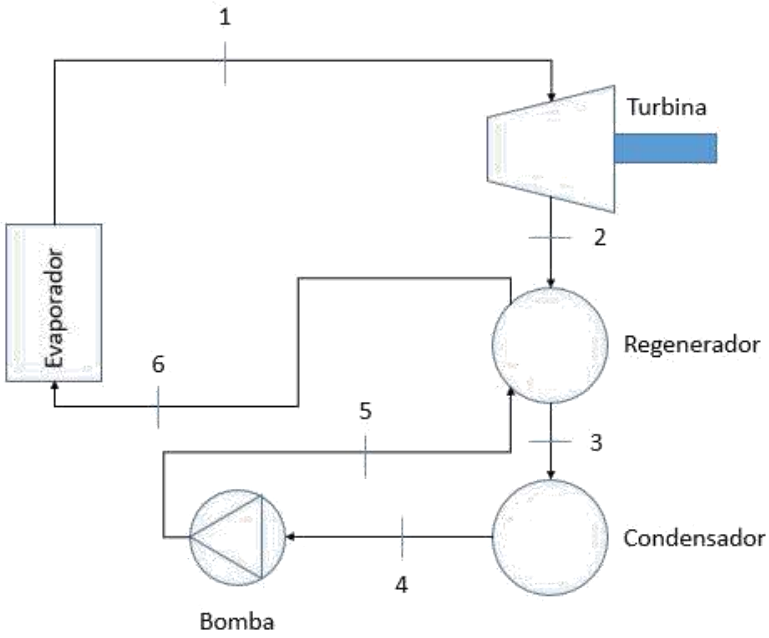


Figura 10: Esquema típico de un ciclo de Rankine orgánico con regeneración

1.3.16. Estados termodinámicos del fluido de trabajo

De la figura 10 representa una máquina térmica donde el fluido de trabajo sufre varias transformaciones a medida que avanza por cada elemento del ciclo.

6 → 1 : El aceite térmico calentado en la caldera se utiliza para vaporizar el fluido en el evaporador, y puede estar en la condición de vapor saturado. O Se supone que el proceso de intercambio de calor es isobárico.

1 → 2 : El fluido orgánico en estado de vapor da energía a la turbina donde sufre expansión. El estado 2 está determinado por la eficiencia isentrópica de la turbina en cuestión.

2 → 3 : Porque el fluido en el estado 2 tiene energía que se puede utilizar a través del ciclo en lugar de ser rechazado en el condensador, el fluido pasa a través del regenerador en el estado 2 al estado 3 donde transfiere energía a través del calor para precalentar el fluido antes del evaporador. Este proceso también se considera isobárico, si no se considera la caída de presión debida al paso del fluido a través de los tubos del intercambiador de calor.

3 → 4 : El fluido intercambia calor con agua helada que absorbe energía del fluido para condensarlo al estado de líquido saturado, antes de que ingrese a la bomba, a través de un proceso isobárico. En este proceso, el calor rechazado por el ciclo puede ser aprovechado aún para calentar residencias, en cocinas industriales u otros fines donde se requiere calor.

4 → 5 : La compresión del fluido ocurre por la misma razón que la expansión en la turbina, o mayor si se consideran las pérdidas de carga. El proceso puede ser considerado isentrópico, pero en procesos reales la eficiencia del fluido isentrópico debe tenerse en cuenta para conocer exactamente las propiedades del fluido después del pasaje en la bomba.

5 → 6 : El fluido pasa al regenerador para ganar energía a través del calor, a través del intercambio de calor con el fluido después de que pasa a través de la turbina, el proceso también se considera isobárico.

La Tabla 5 contiene un resumen de las transformaciones ocurridas por el fluido durante el ciclo de energía mostrado.

Tabla 5

Descripción del equipo CRO

Lugares	Equipo	Objetivo	Proceso
1_2	Turbina	Generar trabajo	Isentrópico
2_3	Regenerador	Incremento de la eficiencia del ciclo	Isobárico
3_4	Condensador	Rechazar el calor del ciclo	Isobárico
4_5	Bomba	Comprimir el fluido a la misma presión al entrar a la turbina	Isentrópico
5_6	Regenerador	Aumentar la eficiencia de la primera ley del ciclo	Isobárico

1.3.17. Definición de los estados termodinámicos del CRO

Para obtener la potencia específica del ciclo, se deben definir algunos parámetros del ciclo a estudiar.

En este apartado se analizará el ciclo de forma genérica, utilizando parámetros previamente conocido, para poder determinar el estado del fluido de trabajo en cada punto del ciclo.

Los parámetros preestablecidos para el análisis de ciclos son:

T_1 ≡ Temperatura de entrada a la Turbina

P_1 ≡ Presión de entrada a la Turbina

r_T ≡ Razón de expansión del fluido de trabajo en la turbina

$n_{T,s}$ ≡ Eficiencia Isentrópica de la Turbina

r_B ≡ Razón de compresión del fluido de trabajo en la Bomba

$n_{B,s}$ ≡ Eficiencia Isentrópica de la Bomba

n_R ≡ Eficiencia de transferencia de calor en el regenerador

- Punto 1: (Entrada de la turbina)

Las propiedades del proyecto están predefinidas y son conocidas: T1, P1; a partir de estas propiedades, las otras propiedades intensivas del fluido se pueden obtener: $h1$, S1

- Punto 2: (Salida de la turbina)

Conociendo la relación de expansión de la Turbina, la presión de salida de la turbina de fluido.

Ecuación 1: Relación de expansión de la turbina

$$r_T = P_1/P_2 \rightarrow P_2 = P_1/r_T$$

Si la turbina realiza una expansión isentrópica, entonces la entropía se puede definir del estado 2.

Ecuación 2: Relación de entropías en los puntos 1 y 2

$$S1 = S2$$

Para establecer el estado real en 2, se utiliza la eficiencia isentrópica de la turbina predeterminada como factor de diseño.

Ecuación 3: Eficiencia de la Turbina

$$n_T = S_{2r}/S_2 \rightarrow S_{2r} = S_2 * n_{T,s}$$

- Punto 3 - Salida del Regenerador:

Considerando que las pérdidas de carga son insignificantes, entonces tiene que ser:

Ecuación 4: Relación de presiones en los puntos 3 y 4

$$P3 = P4$$

Para la definición completa del punto 3, se necesita otra propiedad intensiva del fluido; Entonces, se supone que el regenerador intercambia el calor del fluido entre los estados de

salida de la turbina (más cálido) y entrada del evaporador (más frío) hasta el fluido en estado sobrecalentado alcanza un estado de vapor saturado. Luego el estado 3 del fluido está completamente definido. Como ejemplo, puede definir la entropía del fluido en 3 como:

Ecuación 5: Entropía en el punto 3

$$S3 = S_{\text{vapor saturado}} @ P = P3 \quad (5)$$

Para comprobar que el regenerador no viola ninguna ley de termodinámica, se debe, sin embargo, verifique si la temperatura de salida en el punto 6 del ciclo del regenerador es menor que la temperatura de salida en la turbina, temperatura en el segundo ciclo.

- Punto 4 - Salida del condensador:

Considerando el proceso de intercambio de calor sin caída de presión durante el paso del fluido de trabajo por el mismo, la transformación del fluido se considera como isobárico. Por tanto, la siguiente lista es válida:

Ecuación 6: Relación de presiones en los puntos 3 y 4

$$P3 = P4 \quad (6)$$

También se considera que el fluido de trabajo orgánico intercambia calor con agua en el condensador al estado de líquido saturado. Después de la transformación de fase, pasa a la bomba sin dañar el equipo de compresión. Entonces las propiedades de la termodinámica en el punto 4 se define a la presión del líquido saturado del fluido orgánico. Tomamos la entropía en el punto 4 como ejemplo nuevamente para demostrar la propiedad del fluido en este punto:

Ecuación 7: Entropía en el punto 4

$$S4 = S_{\text{líquido saturado}} @ P = P4 \quad (7)$$

- Punto 5 - Potencia de la bomba:

Como el proceso de transformación entre la entrada y la salida de la bomba de compresión es isentrópica, y conociendo la eficiencia isentrópica de la bomba, uno puede encontrar la entropía real del sistema en el punto 5:

Ecuación 8: Relación de Entropías en los puntos 5 y 4

$$S5 = S4$$

Ecuación 9: Entropía real en el punto 5

$$S5, real = S5*nB,s$$

Sabiendo la razón de caída de presión del fluido ejercida por el paso del mismo por la turbina, consideramos entonces la misma razón de compresión ejercida por la bomba.

Ecuación 10: Relación de compresión en la bomba

$$r_B = P_5/P_4 \rightarrow P_5 = P_4 * r_{B,s}$$

- Punto 6 - Salida del Regenerador:

Sabiendo que la temperatura de salida del regenerador debe ser menor que la temperatura de la turbina por definición, tenemos que $T_2 > T_6$, Además, se suponía que el regenerador agotaría el fluido de la parte caliente al vapor saturado, por lo tanto, conocemos el punto 3.

Sabiendo que el proceso por parte del regenerador es isobárico cuando ignoramos la pérdida de carga en el fluido, por lo tanto:

Ecuación 11: Relación de presiones en los puntos 6 y 5

$$P6 = P5 \qquad (11)$$

También podemos establecer la entalpía en el punto 6 para conocer completamente el estado termodinámico del ciclo en el punto 6. Considerando la eficiencia del intercambiador de calor del regenerador, y realizar el balance de energía entre las dos etapas del fluido del ciclo definimos la entalpía en el punto 6:

Ecuación 12: Relación de estados considerando la eficiencia del intercambiador de calor

$$\frac{E2-3}{E5-6} = nR \qquad (12)$$

$$\int_{T2}^{T3} CpdT = \int_{T5}^{T6} CpdT\ nR \ \rightarrow \Delta\, h2 - 3 = \ \Delta h5 - 6\, nR \ \rightarrow h2 - h3 = (h6 - h5)nR,$$

Ecuación 13: Entalpia en el punto 6

$$h6 = \frac{(h2-h3)}{nR} + h5 \qquad (13)$$

Figura 11: Descripción del equipo CRO

1.4. Formulación del Problema:

¿Cuáles son los factores para el análisis del potencial de generación de energía eléctrica en Lambayeque utilizando como combustible la cáscara de arroz en un ciclo de Rankine orgánico?

1.5. Justificación e importancia de estudio:

En vista del escenario de cambio descrito anteriormente, donde una continuación del aumento del consumo energético mundial, la necesidad de sustitución de la matriz energética principal actual y pleno aprovechamiento de residuos industriales, este trabajo tiene como objetivo analizar el potencial de generación de electricidad en el Perú utilizando cáscara de arroz como combustible.

Este estudio tiene como objetivo analizar un ciclo de Rankine orgánico operando bajo las condiciones necesarias para que no ocurran efectos no deseados durante el proceso de este biocombustible.

1.5.1 Justificación tecnológica

Desde el punto de vista tecnológico los sistemas de biomasa van a permitir la generación de potencial de energía eléctrica utilizando la cáscara de arroz como combustible en un ciclo Rankine Orgánico.

1.5.2. Justificación Económica

Con el análisis económico en sistemas de biomasa utilizando como combustible cáscara de arroz se puede optimizar la materia prima en los molinos de arroz para mejorar los procesos industriales.

1.5.3. Justificación Ambiental

La forma de generación de energía eléctrica a través de CRO en Lambayeque aprovecha como combustible la cascara de arroz, sin la utilización de hidrocarburos que generan gases tóxicos como comúnmente se utiliza en centrales de generación de energía eléctrica.

1.6. Objetivos de Investigación

1.6.1. Objetivo General

Estudiar las adaptaciones de un CRO, el Rendimiento energético del ciclo a estudiar, el potencial de generación para un estudio de caso y extrapolación al territorio peruano especialmente en Lambayeque.

1.6.2. Objetivos Específicos

a. Determinar la aplicación y producción de la cascarilla de arroz en el Perú y sobre todo Lambayeque.
b. Determinar el ciclo termodinámico como ciclo Rankine orgánico.
c. Analizar del procedimiento de un CRO para obtener un rendimiento energético.

2. MARCO METODOLÓGICO

2.1. Tipo y diseño de la investigación

- Tipo: Es Cuantitativo porque según (Sarduy, 2017) recoge, procesa y analiza datos numéricos sobre las variables de investigación.
- Diseño: Es Exploratorio, porque las variables de estudio no se manipulan en ninguna fase, solo se investiga la relación entre ellas.

2.2. Población y Muestra

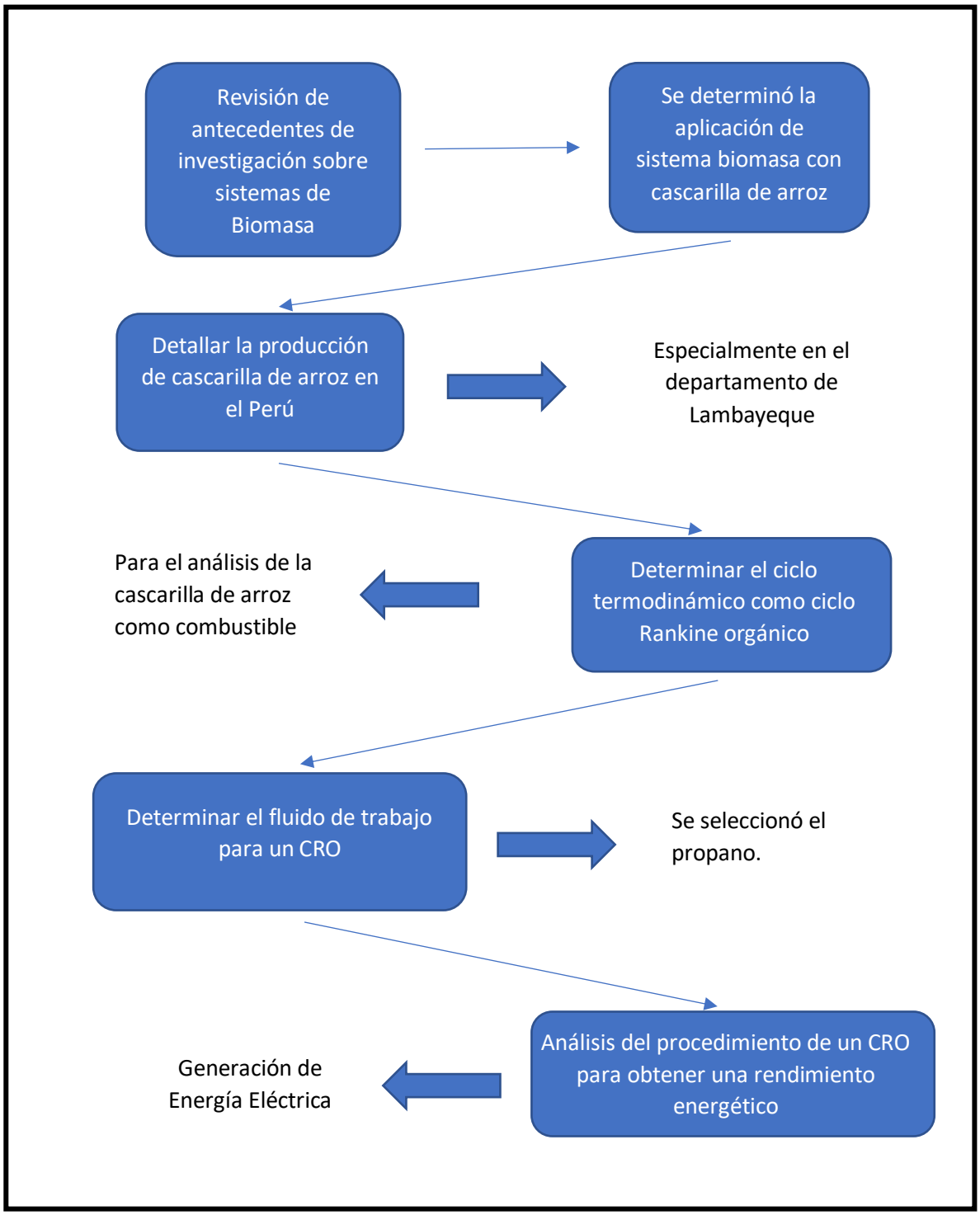
- Población: Se hizo un muestreo de los departamentos de mayor producción de cascara de arroz en el Perú.
- Muestra: Se seleccionó el departamento de Lambayeque por ser el tercer mayor productor de arroz y el segundo mayor departamento con más molinos de arroz para la obtención de cascara de arroz.

2.3. Variables y Operacionalización

Variables		Dimensión	Indicador	Índice	Técnicas de Recolección	Instrumentos de Recolección
Independiente	Ciclo Rankine Orgánico	Análisis y cálculo de estudio mediante estadísticas	Rendimiento Térmico	kJ/kg	Observación y análisis de documentos	Registro electrónico y guía de observación
	Cantidad de Cascara de Arroz	Análisis de estudio	Producción de arroz en el Lambayeque	Toneladas	Observación y análisis de documentos	Guía de Observación y ficha de análisis de documentos
Dependiente	Energía Eléctrica	Análisis y cálculo de estudio	Demanda de energía eléctrica	kW/h	Observación y análisis de documentos	Guía de observación

2.4. Técnicas e instrumentos de colección de datos, validez y confiabilidad

2.4.1. Procedimiento para el análisis de datos



2.4.2. Técnicas de Recolección de Datos

2.4.2.1. Observación Directa

Es la técnica más utilizada del investigador, Según (Ramos, 2018) como procedimiento se puede utilizar en distintos momentos de la investigación, se usa en el diagnóstico del problema y es de gran utilidad en el diseño de la investigación, es uno de los primeros métodos utilizados en la historia y estimula la curiosidad, y que de aquí parte todo el proceso.

2.4.2.2. Análisis de Documentos

Es la recopilación detallada de estudios previos que se relacionan con el tema de investigación para un mejor desarrollo del tema.

2.4.3. Instrumentos de Recolección de Datos

2.4.3.1. Guía de Observación

Es un procedimiento que requiere de la técnica de observación directa para realizar un análisis eficiente de lo que uno quiere investigar para proyectos, trabajos, tesis, informes, etc. Todo de forma sistemática y organizada.

2.4.3.2. Ficha de Análisis de Documentos

También como el anterior instrumento, requiere de la técnica de análisis de documentos para luego distribuir en la ficha toda la información recopilada relacionada con tema de investigación.

2.5. Principios de Rigor Científico

Existen tres características fundamentales que marcan a una investigación para un propósito seguro y de uso:

- ***Credibilidad***

Principio donde la finalidad es conseguir la confianza de variable relevante dentro de la investigación, quiere decir que dentro de un contexto en la realidad no puede ser alterada por ninguna causa externa.

- ***Fiabilidad***

Es un valor donde cada investigador demuestra la transparencia en sus investigaciones por medio de buena calidad de datos aportados en los trabajos hechos.

- ***Replicabilidad***

Es un objetivo para reanudar la investigación de acuerdo a cada investigador que necesite de tus investigaciones y que quieran seguir ahondando más en el tema propuesto.

3. Resultados

3.1. Estudio del Potencial Eléctrico en el territorio peruano usando cáscara de arroz como combustible

4.

Hasta este capítulo la potencia específica del ciclo en función de la velocidad de combustión de masa de arroz se definió en función de los parámetros de diseño. Para definir el poder específico por región del Perú, es necesario tener el cultivo regional de arroz. Según el Ministerio de Agricultura y Riego, en su Boletín de Informe de Arroz en el 2017, para obtener datos de regiones con mayor producción en el 2016 de arroz. La Tabla 6 resume las propiedades y los parámetros del proyecto.

Tabla 6

Regiones de Mayor Producción en el 2016 en Perú

Región	Sup. Cosechada (ha)	Producción (t)	Rendimiento (t/ha)	Precio en chacra (S/x kg)
San Martín	101 255	710 287	7,01	1,03
Piura	67 373	589 687	8,75	1,24
Lambayeque	49 831	399 038	8,01	1,28
La Libertad	32 857	334 920	10,19	1,29
Amazonas	41 567	307 947	7,41	1,03
Arequipa	19 939	250 051	12,54	1,22
Cajamarca	24 886	195 641	7,86	1,13
Nacional	419 563	3 165 749	7,55	1,15

Además, la proporción de cáscara de arroz presente en una cierta cantidad de arroz de la cosecha. Para definir esta cantidad, se realizó una media aritmética entre varios valores consultados en bibliografías.

Tabla 7

Relación entre la masa de cáscara de arroz y la masa de arroz

Fuente	variable
CENBIO 2012	0,30
Oliveira 2011	0,19
Koopmans & Koppejan 1997	0,27
Bhattacharya et al. 1993	0,27
Ryan et al. 1991	0,30
ESMAP 2005	0,28
Maithel 2009	0,36
OECD 2004	0,16
Promedio	**0,26**

Por lo tanto, el promedio que se utilizará para la fracción de masa de cáscara de arroz presente en el arroz equivale a 0,26.

La base de datos mensual de la cosecha de arroz en los departamentos peruanos se utilizó para realizar análisis de capacidad de producción de electricidad, cuando use cáscaras de arroz como combustible.

También se asumió que la cáscara de arroz mantiene sus propiedades. termoquímicos durante al menos un mes después del procesamiento (especialmente su PCI).

Para realizar dicho análisis se consideró la tasa de combustión constante durante el mes de cosecha y el funcionamiento de la planta eléctrica sin paradas para mantenimiento, funcionando a su máxima capacidad.

Las unidades en la base de datos de producción anual de arroz durante el año 2016 en Perú son [710287 toneladas / año], esta medida se ha convertido a [kg / s] para definir la capacidad de producción de electricidad en un mes determinado.

Después de realizar los cálculos para algunos departamentos y todos los meses del año, a través de una hoja de cálculo utilizando el software Microsoft Excel, fueron extraídos varios resultados. La Figura 12 indica el potencial de generación de electricidad de la cascarilla de arroz por región durante el año 2016 (año base del estudio, según la base datos obtenidos del Ministerio de Agricultura y Riego).

Se pueden inferir dos hechos analizando los siguientes datos:

- La región con mayor potencial eléctrico que utiliza dicho combustible es la región Norte de Perú´.

- Los meses más favorables para utilizar esta biomasa como combustible son los meses de abril, mayo, junio y julio; debido a la mayor producción.

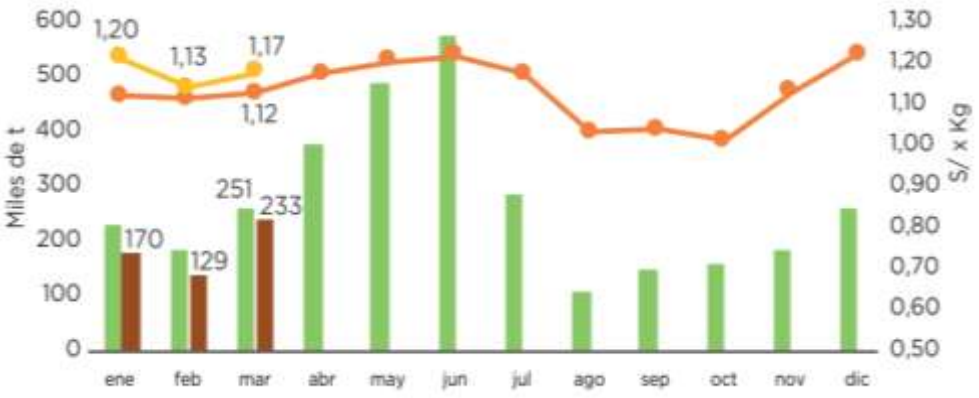


Figura 12: Producción y Precio en chacra del arroz en cáscara (2016-2017)

La figura 13 muestra la distribución de este potencial energético entre las regiones presente en el estudio, de acuerdo a la tabla 13 de regiones de mayor producción.

Figura 13: Distribución del potencial energético de la cáscara de arroz por puntos cardinales en el Perú

Por lo tanto, como se mencionó anteriormente, el Norte es el mayor responsable de potencial de generación de electricidad mediante el uso de cáscaras de arroz en Perú, con el 48% del potencial técnico de Perú.

La Tabla 8 muestra los valores del potencial de generación de energía eléctrica con base al ciclo estudiado en este estudio.

Tabla 8

Potencial de generación eléctrica por región según datos de cosecha anual de arroz

Región	Potencial de generación de electricidad (kW)
Norte	2 586 708
Noreste	1 230 354,96
Noroeste	580 146, 45
Sur	433 136,87
Total	4 830 346,29

Como se mencionó en la figura 13, actualmente la generación de electricidad mediante el uso de cáscara de arroz como combustible, representa el 48% la parte norte del Perú de generación eléctrica, con una potencia promedio de 32 MW.

Utilizando el resultado del potencial estimado aquí, se verifica que el potencial de generación de electricidad a partir de la cáscara de arroz correspondería a 2.25% de la matriz energética nacional, con una potencia promedio de 4 830 MW, utilizando el ciclo orgánico Rankine.

3.2. Regiones potenciales para la instalación del CRO

Hasta ahora, el potencial de generación de electricidad a partir de la corteza del arroz fue analizado de forma macro, es decir, para todo el territorio nacional, hecho que demostró que la región Norte de Perú tiene el mayor potencial para la generación de energía utilizando el residuo de arroz (la cáscara de arroz). En esta sección el potencial en forma micro, con énfasis en los principales Departamentos productores de arroz de Perú.

La Tabla 9 muestra los 7 departamentos con mayor potencial de energía eléctrica.

Tabla 9

Departamentos con mayor potencial de generación eléctrica

Departamentos	Puntos cardinales	Porcentaje
San Martín	Noreste	22%
Piura	Norte	19%
Lambayeque	Norte	13%
La Libertad	Noroeste	11%
Amazonas	Norte	10%
Arequipa	Sur	8%
Cajamarca	Norte	6%
Otros	…..	12%

Los 7 departamentos mostrados anteriormente tienen un potencial de generación de 4830 MW que corresponde al 88% de todo el potencial de generación eléctrica utilizando cáscaras de arroz como combustible. Además, se puede observar que, de los 7 departamentos mostrados anteriormente, 4 corresponden a departamentos ubicados en la región norte de Perú.

Utilizando el software Google Earth, se identificó la ubicación de estos departamentos (Figura 14). A partir de esta ubicación, fue posible asignar los departamentos en regiones productoras, como áreas potenciales de implantación de una planta utilizando el CRO estudiado.

En la Figura 14, se pueden identificar las regiones resaltadas.

Figura 14: Mapa de los departamentos de más producción de cáscara de arroz en el norte del Perú consideradas para el análisis de generación de electricidad.

Para ayudar a identificar las regiones, los departamentos seleccionados se encuentran de acuerdo con la Tabla 10.

Tabla 10

Definición de regiones en el norte del Perú

Norte del Perú	Región Potencial
Piura	1
Lambayeque	2
Amazonas	3
Cajamarca	4

La Tabla 11 muestra las propiedades de cada área potencial que genera electricidad.

Tabla 11

Potencial de generación de electricidad por región considerada

Región Potencial	Área de la Región (km2)	Potencial de generación (kW)
1	35892	1 021 452.4
2	14231	691 211.28
3	39249	533 423.98
4	33318	340 620.38

La población estimada en el 2020 en los 4 departamentos de la región norte es igual a 5 239 256 habitantes (INEI, 2020) y el consumo eléctrico residencial en la región norte equivale a 20.355 GWh (MINISTERIO DE MINAS E ENERGIA, 2016).

Con los dos datos presentados anteriormente, se puede obtener el consumo promedio anual de electricidad por habitante en la región norte de Perú, lo que equivale a un consumo de 0,69 MWh/habitante. Este número es superior al consumo medio anual nacional, igual a 0,64 MWh/habitante. (Ministerio de Minas y energía, 2016)

Basado en el consumo eléctrico anual promedio por habitante de la Región Norte, asumiendo que se aplica a las regiones de interés identificadas en la Figura 14, A continuación, puede calcular la demanda anual de electricidad.

Tabla 12

Estimación de la demanda eléctrica en 4 departamentos considerada en función del número de habitantes durante el año 2020

Región Potencial	Número de habitantes	Demanda de energía eléctrica en el año 2020 (MWh)
1	2 047 954	OSINERGMIN
2	1 310 785	OSINERGMIN
3	426 806	OSINERGMIN
4	1 453 711	OSINERGMIN

3.3. Regiones potenciales para la instalación del CRO

Habiendo definido todos los puntos del Ciclo de Rankine Orgánico propuesto para el estudio, entonces es posible definir numéricamente los puntos del CRO, considerando propano como fluido de trabajo. Según (Sanguinetti, 2020) es un fluido natural que no daña la capa de ozono (ODP=0) y produce despreciable efecto de calentamiento global, también es más barato en comparación a otros refrigerantes, respecto a la relación de porciones de refrigerantes, se necesita menor cantidad (en peso) como carga en los sistemas, es compatible con todos los aceites lubricantes comerciales, tiene comparativamente menores presiones y temperaturas de trabajo, disminuye el consumo energético así como es costo de mantenimiento en los sistemas, es muy estable siendo compatible con metales y otros elementos que se emplean en los circuitos frigoríficos y aumenta la vida útil de los sistemas.

La Tabla 13 resume las propiedades y los parámetros del proyecto.

Tabla 13

Lista de propiedades del proyecto CRO

Proyecto CRO	
Fluido de Trabajo	Propano
Temperatura de entrada de la turbina (°C)	210
Presión de entrada de la turbina (Mpa)	1,9
Relación de presión de la turbina	9
Eficiencia isentrópica de la turbina	85%
Relación de la presión de la bomba	9
Eficiencia isentrópica de la bomba	85%
Eficiencia de transferencia de calor	100%

Como se explica en la tabla 13, el fluido que mejor se adapta al ciclo termodinámico propuesto es el propano, a pesar de trabajar en una condición supercrítica.

La temperatura de entrada de la turbina se ajustó de modo que la caldera en la que se produce la combustión de la cáscara de arroz ocurre sin exceder las temperaturas críticas de fusión de las cenizas, que es dañina para el sistema de generación de calor primario del ciclo, como se mencionó anteriormente. Entonces, el valor de 210 ° C se definió como la temperatura de trabajo del ciclo.

La temperatura de salida de la caldera de aceite térmico es de 350 ° C y el mismo, después al pasar por el evaporador presentaría una temperatura de 250 ° C (URIS, LINARES y ARENAS, 2014). Por tanto, la temperatura del fluido de trabajo orgánico en la entrada de la turbina, o después de la salida del evaporador a 210 ° C es compatible con temperaturas de trabajo predeterminadas del aceite térmico.

La presión del fluido de trabajo en la entrada de la turbina se ha establecido en un valor de 1,9 MPa con el fin de evitar equipos más robustos, lo que incrementaría el coste y logística de la operación. Además, es un valor que está por debajo de 3 MPa, que es considerado el valor límite para las plantas de generación a pequeña escala. (MASCARENHAS, 2014)

Se estipuló que la caída de presión estaría por encima de la presión atmosférica de modo que no haya penetración de aire atmosférico en las líneas de transporte de fluidos. De esta forma, habiendo definido los parámetros de diseño del CRO, puede definir todos los demás puntos en función del flujo másico del fluido de trabajo.

3.4. Definicion numérica de todos los puntos del ciclo de potencia

Una vez definidos los procesos del ciclo termodinámico y los parámetros de diseño, A continuación, puede obtener el estado del fluido en todos los puntos del ciclo. Como el fluido de trabajo es el propano, debemos obtener las propiedades termodinámicas de este fluido en todos los puntos.

Para obtener los puntos comentados en apartados anteriores, el Base de datos REFPROP, software desarrollado por NIST (Instituto Nacional de Estándares y Tecnología), organismo estadounidense de investigación y estándares, combinado con un Hoja de cálculo de Excel donde se cargaron estas propiedades.

Sobre la base de las relaciones y los parámetros de entrada mencionados anteriormente, se creó una hoja de cálculo que contiene las propiedades intensivas del fluido en cada punto para realizar el balance energético del ciclo y obtener: el rendimiento global, el trabajo específico, el calor rechazado y otros datos relevantes para el análisis del potencial de generación de energía eléctrica mediante la quema de cascarilla de arroz en Perú.

Un ejemplo de propiedades extraídas en base a los datos reportados se encuentra en la Tabla 7, donde se puede verificar completamente el estado del fluido mapeado a través de la base de datos REFPROP.

Tabla 14

Lista de datos extraídos por MINIREFPROP

Punto 2	Salida de la Turbina
T (k)	398,49
P (Mpa)	0,21
h (kJ/kg)	819,57
S (kJ/kg-k)	3,253
hreal (kJ/kg)	846,06

En la tabla 14, la presión y la entropía son valores de entrada para el ciclo, obtenido mediante relaciones termodinámicas en apartados anteriores, y las demás variables de la tabla 13 son valores obtenidos de la base de datos NIST.

Se muestra a continuación en la figura 15 una referencia de diagrama T-S que trabaja como fluido de trabajo al pentano, ya que el fluido de trabajo que se utilizara es del propano.

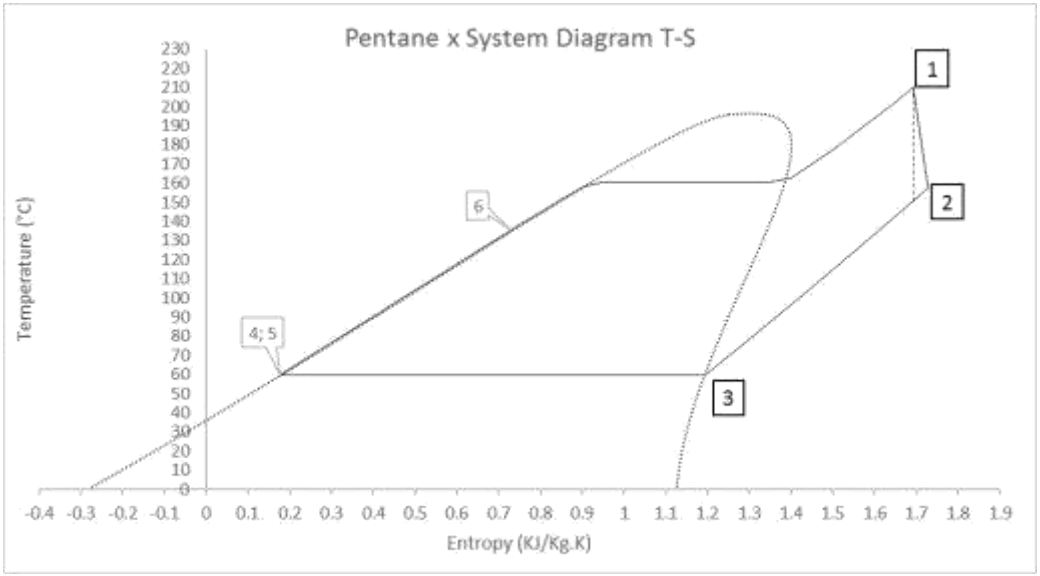


Figura 15: Diagrama T-S del ciclo estudiado y sus puntos

A partir del análisis del ciclo, se puede verificar con más claridad los puntos predefinidos de proyectos. Debido a la irreversibilidad de la turbina, la temperatura de salida es mayor que en el caso de una turbina ideal, lo que resulta en una menor generación de trabajo específico. A su vez, el regenerador agotó el fluido sobrecalentado para vapor saturado según lo determinado en el diseño.

3.5. Estudio de circuito de generación de calor primario

Hasta el momento, se ha definido la energía específica generada por el ciclo y la cantidad de calor requerida por el ciclo para generar trabajo. La fuente de calor del ciclo proviene de una fuente caliente.

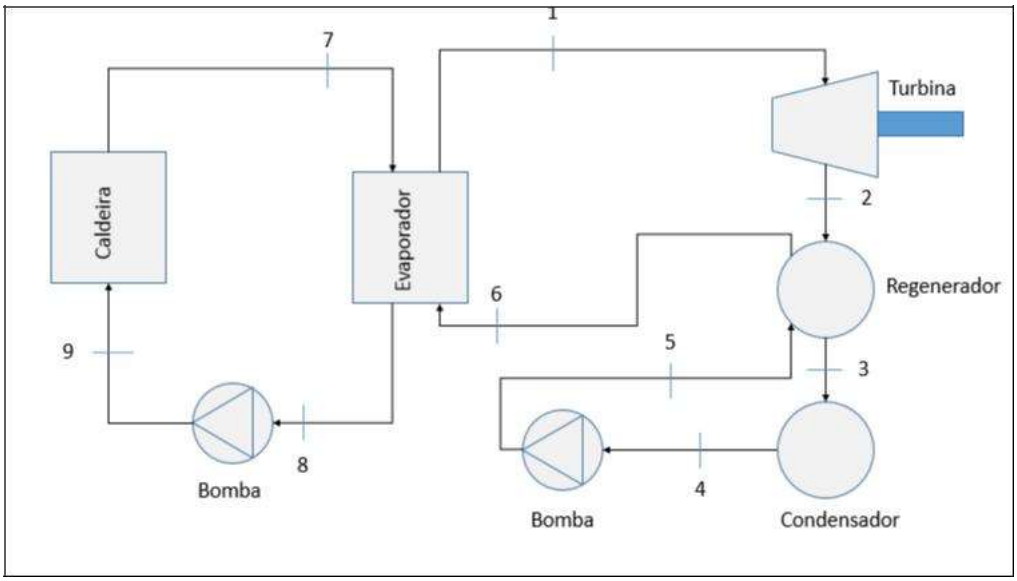


Figura 16: Ciclo primario y CRO interconectados por el intercambiador de calor

3.6. Consideraciones sobre los componentes del circuito primario

Para realizar el balance energético del circuito primario es necesario primeramente definir su diseño conceptual.

- Evaporador:

La temperatura del aceite térmico para un ciclo de Rankine orgánico se sugiere entre 350°C después de la salida de la caldera y 250°C después de la salida del evaporador. (URIS, LINARS y ARENAS, 2014)

El proceso termodinámico se considera isobárico. La presión del trabajo fue definida como la presión del líquido saturado a la temperatura de entrada del evaporador.

- Bomba:

La bomba en este ciclo se usa debido a caídas de presión en el circuito primario, que en el presente trabajo se consideraron despreciables.

- Caldera:

La caldera considerada genera calor a través de la combustión de biomasa, a partir de manera de transformar el fluido del estado del punto 9 al estado del punto 7, después de pasar por la caldera. El poder calorífico de la biomasa, el flujo másico del combustible y la eficiencia de la caldera definen su producción de calor. El proceso de la combustión se considera isobárica.

Además, la eficiencia de la caldera se definió con base en artículos de literatura, igual al 85%. (URIS, LINARES y ARENAS, 2014)

- Aceite térmico:

Las propiedades del aceite térmico en el ciclo primario deben ser:

  - Alta temperatura de ebullición
  - Alta capacidad térmica
  - Ser no corrosivo
  - Trabajar a bajas presiones

Según el catálogo del fabricante de aceite térmico, Eastman Chemical Company, el fluido indicado para su uso en el CRO, que trabaja a bajas presiones y temperaturas moderado (~ 300 ° C) es Therminol 66. Este fluido también tiene una alta estabilidad presión térmica y de vapor baja.

A continuación, se muestra un resumen de los parámetros del proyecto definidos para el ciclo de generación de calor.

- Combustible:

El combustible del ciclo primario es la motivación de este estudio. La biomasa, La cáscara de arroz se definió como la fuente de energía térmica para el sistema de generación de electricidad.

Entre las características ya mencionadas, el principal motivo para elegir este combustible es el uso de residuos orgánicos de procesos industriales.

Sin embargo, debido a su composición química, la cáscara de arroz debe tener su combustión a temperaturas no altas debido a problemas como la baja temperatura de fusión de cenizas, hecho previamente mencionado en la caracterización del combustible. El poder calorífico

inferior de la cáscara de arroz seca es igual a 12,36 Mj/kg (CENTRO DE INVESTIGACIÓN ENERGÉTICA DE LOS PAÍSES BAJOS, 2017)

Tabla 15

Parámetros de diseño del circuito primario

Datos		
Aceite Térmico	Therminol 66	-
Evaporador	250/350	°C
Eficiencia de la Caldera	85	%
Poder calorífico inferior de la Cáscara de arroz	12,36	MJ/kg

3.7. Balance energético del CRO

3.7.1. Eficiencia de la primera ley

Después de haber analizado numéricamente el ciclo estudiado, todos los valores para realizar el análisis energético del ciclo de forma específica; esto es, dependiendo del caudal másico del ciclo.

Para obtener la eficiencia energética del ciclo, hay que encontrar el trabajo específico y el calor requerido por el ciclo.

Ecuación 14: Eficiencia energética del ciclo

$$nth = \frac{Wliq}{qin}$$

Donde Wliq = Wt – WB, Wt es el trabajo específico generado por la turbina y Wb el trabajo específico requerido por la bomba durante la compresión del fluido.

El trabajo de la turbina se define por la diferencia de energía entre la entrada y la salida del fluido en la turbina, ya que se consideró la ausencia de generación de calor en la turbina.

Ecuación 15: Trabajo de la Turbina

$$WT = h1 - h2$$

Asimismo, el trabajo que requiere la bomba es:

Ecuación 16: Trabajo de la Bomba

$$WB = h4 - h5$$

Para obtener el calor demandado por el ciclo, el mismo análisis del trabajo específico de la turbina y la bomba.

Ecuación 17: Calor por el ciclo

$$qin = h1 - h6$$

De lo contrario, se puede representar el balance energético de la eficiencia de primera ley del ciclo de la siguiente manera:

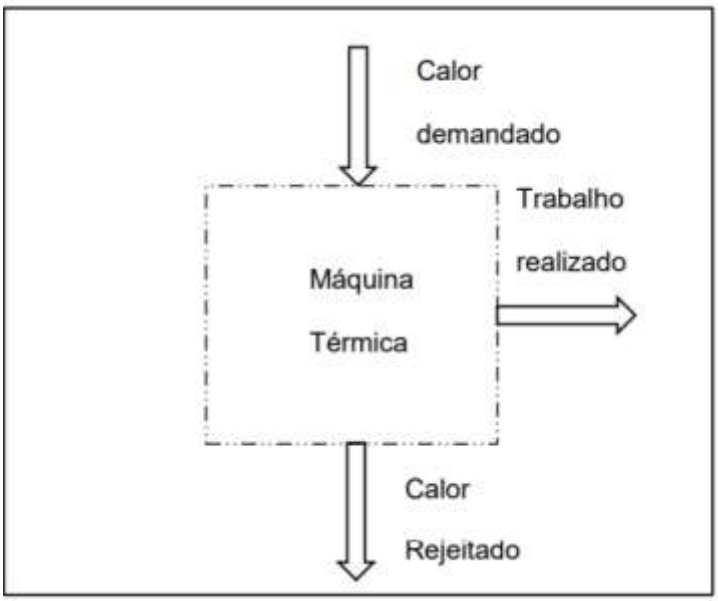


Figura 17: Diagrama simplificado de una máquina térmica

Donde dice máquina térmica en la ilustración anterior, puede considerar el ciclo en estudiar en el presente trabajo. Luego, utilizando las propiedades obtenidas a través de la hoja de cálculo generada, es posible obtener la eficiencia energética del ciclo.

Tabla 16

Propiedades termodinámicas en los puntos 1 y 2 del CRO

Punto 1	Entrada de la Turbina
T (k)	483
P (Mpa)	1,9
h (kJ/kg)	996,17
S (kJ/kg-k)	3,253
Punto 2	Salida de la Turbina
T (k)	398,49
P (Mpa)	0,21
h (kJ/kg)	819,57
S (kJ/kg-k)	3,253
hreal (kJ/kg)	846,06

Usando los datos anteriores sobre el estado del fluido en la entrada y salida de la turbina, A continuación, se define el trabajo específico de la turbina:

Ecuación 18: Valor del trabajo de la Turbina

$$Wt = 996{,}17\ kJ/kg - 846{,}06\ kJ/kg = 150{,}11$$

Del mismo modo, para la bomba tenemos las siguientes propiedades:

Tabla 17

Propiedades termodinámicas en los puntos 4 y 5 del CRO

Punto 4	Entrada de la Bomba
T (k)	247,69
P (Mpa)	0,21
h (kJ/kg)	138,54
S (kJ/kg-k)	0,76
Punto 5	Salida de la Bomba
T (k)	248,39
P (Mpa)	1,9
h (kJ/kg)	141,55
S (kJ/kg-k)	0,76
hreal (kJ/kg)	141,09

Por tanto, la energía demandada por la bomba es:

Ecuación 19: Valor del trabajo de la Bomba

WB = 138.54 kJ/kg – 141.09 kJ/kg = -2,55 kJ/kg

A partir de los resultados obtenidos podemos encontrar el trabajo específico neto generado.

Ecuación 20: Valor del Trabajo específico

Wliq = WT – WB = 150,11 kJ/kg – (-2,55) kJ/kg = 152,66 kJ/kg

Luego, repitiendo el mismo proceso para encontrar el calor absorbido por el ciclo Rankine orgánico.

Tabla 18

Propiedades termodinámicas en los puntos 1 y 6 del CRO

Punto 6	Salida del Regenerador
T (k)	408
P (Mpa)	1,9
h (kJ/kg)	812,64
S (kJ/kg-k)	2,84
Punto 1	Entrada de la turbina
T (k)	483
P (Mpa)	1,9
h (kJ/kg)	996,17
S (kJ/kg-k)	3,25

A partir de los datos mencionados anteriormente, encontramos el calor absorbido por el evaporador.

Ecuación 21: Valor del calor en el ciclo

qin = 996,17 kJ/kg – 812,64 kJ/kg = 183,53 kJ/kg

Podemos encontrar el rendimiento del ciclo:

Ecuación 22: Valor de la eficiencia energética del ciclo

n_{th} = Wliq/qin = 152,56 kJ/kg / 183,53 kJ/kg = 83%

La Tabla 19 resume los tres resultados principales que se utilizarán:

Tabla 19

Datos extraídos del análisis cuantitativo del CRO

Análisis cuantitativo del CRO		
Trabajo específico del líquido	Wliq (kJ/kg)	152,56
Calor de entrada específico	qin (kJ/kg)	183,53
Eficiencia del ciclo	nth (%)	83,12

3.8. Balance energético del ciclo primario

3.8.1. Transferencia de calor a CRO

Para definir la potencia calorífica del ciclo primario, se debe definir la diferencia entálpico entre los puntos 7 y 8 del ciclo.

Al tratarse de un proceso isobárico, se da la diferencia entálpica entre estos puntos por la siguiente lista:

Ecuación 23: Diferencia Entálpico en los puntos 7 y 8

$$\Delta h7 - 8 = \int_{T7}^{T8} Cp\ (T) dT$$

Por parte del fabricante del aceite térmico, la relación entre el calor específico y la temperatura es: (EASTMAN CHEMICAL COMPANY, 2016)

Ecuación 24: Calor específico

$$Cp\ (T) = 0{,}003313 * T + 0{,}0000008970785 * T^2 + 1{,}496005$$

Integrar esta relación llega a este procedimiento

Ecuación 25: Variación de la Entalpía

$$\Delta h = \frac{0{,}003313\ (T_{i+1}^2 - T_i^2)}{2} + \frac{0{,}0000008970785\ (T_{i+1}^3 - T_i^3)}{3} + 1{,}496005\ \Delta T + C$$

De esta manera, entonces tenemos la energía a través del calor transferido por la masa de aceite térmica, ya que, por la primera ley de la termodinámica:

Ecuación 26: Derivada de la Energía

$$dE = dq - dW \rightarrow dh = dq \rightarrow q = \int dh = \Delta h$$

Dado que tenemos temperaturas en 7-8, podemos encontrar el calor específico suministrado por el aceite térmico al fluido orgánico. Una vez que T7 = 350 °C y T8 = 250 ° C, tenemos:

Ecuación 27: Calor específico en los puntos 7 y 8

q7-8 = -257,14 kJ/kg

El signo menos indica que el calor está saliendo del ciclo.

3.9. Calor producido en la caldera

De la misma forma que la temperatura en el evaporador está entre 350 ° C y 250 ° C, la temperatura en la entrada y salida de la caldera es la misma diferencia, ya que No se tienen en cuenta las pérdidas de energía en las líneas de transporte de petróleo.

Así, el calor generado en la caldera es:

Ecuación 28: Calor producido en la caldera

$q_{caldera}$ = -q7-8 = 257,14 kJ/kg

3.10. Potencia en función de la cantidad de combustible

A través de los dos últimos capítulos se realizó la investigación de los estados termodinámica de los dos ciclos, así como el balance energético del ciclo primario y el CRO. Conociendo el poder calorífico y la eficiencia de la caldera, es posible determinar la relación entre el flujo másico de combustible y la energía eléctrica generada; en otras palabras, la capacidad de generación de electricidad por segundo por kilogramo de cáscara de arroz utilizada como combustible, dadas las condiciones determinadas en el ciclo. Para tal análisis, los ciclos están interconectados a través del estudio de la energía térmica y potencia mecánica. Para realizar este análisis se debe tener en cuenta el flujo de los ciclos estudiados.

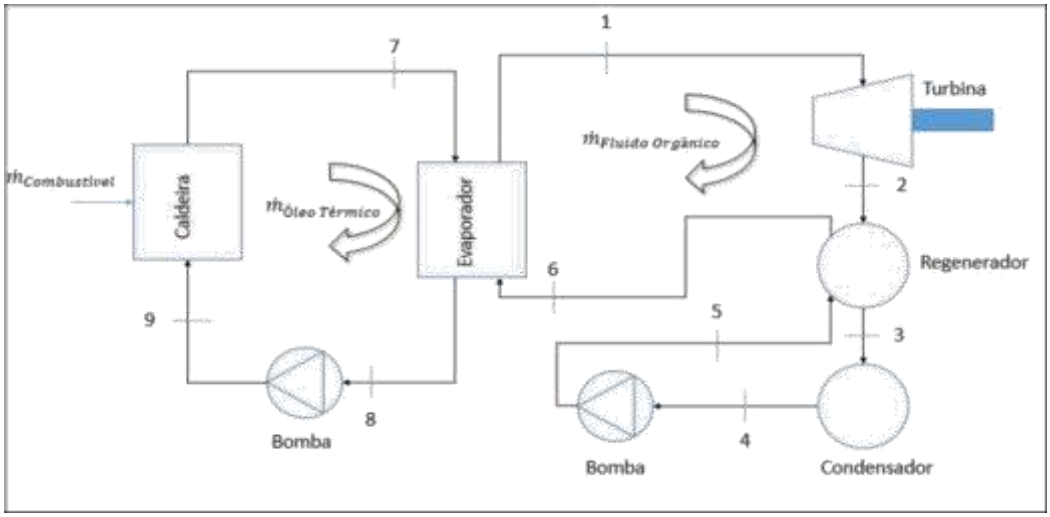


Figura 18: Esquema completo del sistema que contiene el circuito integrado primario al CRO

Por lo tanto, como se ilustra arriba, tenemos las siguientes relaciones para ciclo.

Ecuación 29: Calor en los puntos 9 y 7

$$Qcombustible\ ncaldera = Q9 - 7$$

$$\rightarrow PCIcascara\ de\ arroz * m\ cáscara\ de\ arroz * \ n\ caldera$$

$$= q9 - 7 * m\ aceite\ térmico\ \ \rightarrow m\ aceite\ térmico$$

$$= \frac{PCIcascara\ de\ arroz * mcascara\ de\ arroz * ncaldera}{q9 - 7}$$

Ecuación 30: Calor en los puntos 6 y 1

$$Q7 - 8\ nevaporador = Q6 - 1$$

$$q7 - 8 * m\ aceite\ térmico = qin * m\ aceite\ térmico$$

$$\rightarrow m\ aceite\ térmico = \frac{q7 - 8 * maceite\ térmico * nevaporador}{qin}$$

Reemplazo del flujo másico de aceite térmico en la relación de flujo másico del fluido orgánico, tenemos:

Ecuación 31: Flujo másico orgánico

$$m\ fluido\ orgánico$$
$$= \frac{q7 - 8 * PCIcáscara\ de\ arroz * m\ cáscara\ de\ arroz * n\ evaporador * n\ caldera}{qin * q9 - 7}$$

Como el módulo de $q_{7\text{-}8} = q_{9\text{-}7}$, para que podamos simplificar la relación anterior:

Ecuación 32: Flujo másico orgánico simplificado

$$m\ fluido\ orgánico = \frac{PCIcáscara\ de\ arroz * m\ cáscara\ de\ arroz * n\ evaporador * n\ caldera}{qin}$$

Cómo este estudio desarrolla su análisis para el ciclo operando en régimen permanente, la potencia del líquido del CRO en función de la intensidad del flujo de fluido orgánico es:

Ecuación 33: Potencia Líquida del CRO

$$POTlíquida\ CRO = POTturbina - POTbomba$$

$$= mfluido\ orgánico * Wt - mfliido\ orgánico * WB$$

$$= mfluido\ orgánico * (WT - WB)$$

Por lo tanto, reemplazando la relación de flujo de fluido orgánico en función de la cantidad de combustible quemado por segundo, tenemos la siguiente relación de la Potencia de la Turbina en función de la masa de combustible.

Ecuación 34: Potencia Líquida del CRO simplificado

$$POTlíquida\ CRO = \frac{PCIcáscara\ de\ arroz * m\ cáscara\ de\ arroz * n\ evaporador * n\ caldera}{qin} * (WT - WB)$$

Se conocen todas las propiedades anteriores, lo que nos lleva finalmente a la siguiente relación entre la potencia mecánica generada por la turbina y la velocidad de combustión de cáscaras de arroz.

Ecuación 35: Potencia Líquida del CRO desarrollada

$$POTlíquida\ CRO = m\ cáscara\ de\ arroz * 6{,}2354\ (\frac{MJ}{kg})$$

Dato: 1MJ = 0,2778 kWh

4. Conclusiones

La región norte del Perú es la región con mayor potencial para generación, correspondiente al 48% del potencial total de este combustible, el norte también es la región del Perú que tiene la mayor proporción de energía generada por hectárea plantada, basado en técnicas de plantación peruanas.

En el caso del estudio realizado en los 4 departamentos peruanos con mayor potencial de generación, se encontró que plantas de generación eléctrica similares a la estudiada sería viable desde el punto de vista energético durante el primer semestre del año. Ellos pueden ser viable también desde el punto de vista energético anualmente, pero los estudios sobre pérdida de propiedades termoquímicas de la cáscara de arroz durante el almacenamiento deberían ser llevado a cabo.

Además, si la cáscara de arroz se utiliza por completo en el primer semestre del año, otros cultivos de biomasa en la región sur podrían usarse para la generación en el sistema propuesto, durante el segundo semestre del año, como el maíz.

Por tanto, el presente estudio tuvo como objetivo estudiar la posibilidad técnica de generar de electricidad mediante el aprovechamiento de los residuos generados en el procesamiento del arroz en todo el territorio peruano, referenciando siempre el departamento de Lambayeque. Con los resultados obtenidos se puede concluir que la cáscara de arroz si tiene la capacidad de generar energía eléctrica ya que implementando esta biomasa en un sistema CRO puede abastecer de energía suficiente en la región. Una posibilidad de usar este combustible, estaría en regiones alejadas de la red de distribución eléctrica, debido a que el CRO requiere un menor costo operativo, puede ser interesante utilizar este equipo en regiones alejadas de los centros urbanos, donde la red de distribución eléctrico demuestra ser más precario. Otra opción sería utilizar una miniplanta. generación para abastecer la propia planta de procesamiento de arroz, eliminando luego los costos de suministro de energía de estos lugares.

En el presente estudio se realizó un análisis general del potencial técnico de generación de electricidad utilizando biomasa, cascarilla de arroz, como combustible que alimenta el ciclo de Rankine Orgánico propuesto.

Se estudiaron todas las consideraciones del proyecto en el ciclo, tomando siempre en cuenta las limitaciones fisicoquímicas de la ceniza de cáscara de arroz, que lleva la temperatura de combustión a ser un limitante de la planta CRO analizada.

Después de haber realizado la descripción del sistema propuesto, las propiedades termodinámicas del fluido de trabajo y aceite térmico del ciclo en base a supuestos utilizados, de modo que para extraer la potencia específica en función del flujo másico del combustible. En posesión de la potencia específica y la base de datos de cosecha de arroz por área sembrada en departamentos peruanos, se realizaron varios análisis basados en información obtenida durante el trabajo.

Para completar este análisis, se pueden realizar varios trabajos futuros, entre ellos se encuentran: el estudio de la logística operativa para la distribución de cascarilla de arroz por fábricas de procesamiento y posibles plantas que utilizan el CRO; el análisis de la viabilidad económica y financiera de la inversión en esta tecnología; el análisis de factibilidad operativa del sistema de generación y destino de las cenizas generadas por la combustión de cáscaras de arroz ricas en silicio, análisis del ciclo de exergía estudiado, así como el uso de otras fuentes de biocombustibles para viabilizar la instalación de las plantas.

El potencial técnico de la generación de electricidad a partir de cáscara de arroz en el Perú, utilizando un ciclo de rendimiento del 83,12% y trabajando a temperaturas compatibles con las propiedades del combustible, es de 4 830 MW.

Utilizando todo este potencial, la cáscara de arroz sería responsable del 2,25% de toda la electricidad en el Perú, que es un valor notable si se suma este número el potencial de generación de otros biocombustibles producidos en territorio nacional

5. Bibliografía

Andina, S. G. (2015). Expertos destacan potencial de la Integración enérgética Andina. *Comunidad Andina*.

AOUN, B. Microcombustión de calor y energía que funcionan con energía renovable para uso residencial. edificio. 2008. 187 f. Tesis de Doctorado - École Nationale Supérieure des Mines de Paris, París, Francia, 2008;

BASU, P. Combustión y gasificación en lechos fluidizados. Primera ed. Halifax, nuevo Escocia: Taylor & Francis Group, LLC, 2006. v. Único

BINI, ROBERTO et al. Ciclo de Rankine orgánico (ORC) en plantas de biomasa: una descripción general de diferentes aplicaciones. Turboden srl

BORGNAKKE, CLAUS; SONNTAG, RICHARD E.Fundamentos de Termodinámica. Séptima ed. São Paulo, SP, Brasil: Blucher, 2009. v. Único. (Van Wylen);

CENBIO. Atlas de Bioenergía en Brasil. Relato técnico. São Paulo, SP, Brasil. 2012;

CENTRO DE INVESTIGACIÓN ENERGÉTICA DE LOS PAÍSES BAJOS. Tabla de propiedades de Cáscara de arroz - ECN - Cáscara de arroz (# 2876). Relato técnico. Disponible: <https://www.ecn.nl/phyllis2/Biomass/View/2876>. Consultado el: 20 de julio 2016;

COHEN, H; ROGERS, GFC; SARAVANAMUTTOO, HIH.Teoría de la turbina de gas. Cuatro ed. Harlow ssex, Inglaterra: Longman Group Limited, 1996. v. Único

DA SILVA, OTAVIO HENRIQUE et al. Potencial energético de la biomasa de la corteza de Arroz en el Brasil. biomassworld,2015. Disponible en: http://biomassaworld.com.br/artigos-tecnicos/potencial-energetico-da-biomassa-da- Cáscara de arroz en Brasil /. Consultado en: 15 de diciembre. 2016

DARABAS, A. et al. Proceso de producción de arroz en COOPERJA EMPRESA QUÍMICA EASTMAN. Therminol - Productos sugeridos por aplicación, 2016;

EMPRESA QUÍMICA EASTMAN. Therminol 66: Fluido de transferencia de calor de Solutia. Relato técnico. Disponible en: <twt.mpei.ac.ru/TTHB/HEDH/HTF 66.pdf>. Acceso el: 28 dic. 2016;

EIA. Perspectiva Energética Internacional 2016. Washington DC - Estados Unidos, 2016

Fernández, E. (2019). *Generación de energía eléctrica mediante Gasificación de la cascarilla de arroz para un molino en Lambayeque.* Lambayeque: Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Galindo, M., Huaccachi, W., Torres, F., Inga, A., Grandy, E., Ramos, J., & Quesnel, S. (2017). Generación distribuida con plantas de gasificación de cascarilla de arroz para el suministro de electricidad al Distrito Bajo Biavo (San Martín, Perú). *Universidad Nacional de Ingeniería* , 1-4.

GONÇALVES, JOÃO REIS. Análisis del uso de residuos térmicos en un FPSO a través del ciclo de Rankine orgánico. 2015. Proyecto de Graduación – Universidad Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2015;

HEBERT, GM JOSELIN; KRISHNAN, UNNI. Cuantificar el desempeño ambiental de energía de biomasa. Revisiones de energías renovables y sostenibles, por. 292–308, 2016;

INEI. (2020). *Perú: Estimaciones y proyecciones de población por Departamento, Provincia y Distrito, 2018 - 2020.* Obtenido de INEI: https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1715/libro.pdf

INSTITUTO BRASILEÑO DE GEOGRAFÍA Y ESTADÍSTICA, 2016. población de Estados brasileños. Disponible: http://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/ Consultado el 31 de enero. 2017.

JENKINS, BM et al. Propiedades de combustión de la biomasa. Tecnología de procesamiento de combustible 54, por. 17 a 46, 1998

MASCARENHAS, MAÍRAM. Análisis de la viabilidad técnica y económica de la implementación de sistemas de cogeneración que operan con un Ciclo de Rankine Orgánico. 2014. Proyecto de Graduación - Universidad Federal de Río de Janeiro, Río de Janeiro, RJ, Brasil, 2014;

MINISTERIO DA AGRICULTURA. Cultura del Arroz. Disponible en: http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/arroz. Consultado en: 20 de diciembre. 2016;

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Proyección de la demanda energética para elpróximos 10 años (2015-2024). Compañía de Investigación Energética, 2015;

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Balance Energético Nacional - Año Base 2015.

Quintana, S., & Salazar, J. (2017). *Diseño de una Minicentral Termoeléctrica de 5KW, utilizando la cascarilla de arroz como combustible en el caserío Miraflores-Monsefú del departamento de Lambayeque.* Pimentel: Universidad Señor de Sipán.

Ramos, E. (2018). Métodos y técnicas de investigación. *Gestiopolis*.

Rojas, C. (2018). *Generación de Biogás a partir de la cascarilla de arroz para reducir costos energéticos en la Piladora La Merced S.R.L.* Chiclayo: Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo.

Sanguinetti, E. (3 de Abril de 2020). *El Propano como Refrigerante.* Obtenido de acrlatinoamerica: https://www.acrlatinoamerica.com/201904038655/articulos/refrigeracion-comercial-e-industrial/el-propano-como-refrigerante.html

ANEXOS

Anexo 1 : Parámetro de la selección de la Caldera

Parámetros	Descripción
Capacidad biomasa [kg/h]	262
Temperatura salida [ºC]	<154
Presión [kPa]	<2.815
Biomasa	Cascarilla de arroz
Fluido que aporta energía al fluido de trabajo	Aceite térmico

Anexo 2 : Datos técnicos de caldera biomasa Sitong Boiler

Parámetros	Descripción
Capacidad [kg/h]	500-4.000
Temperatura salida [ºC]	150
Temperatura entrada [ºC]	40
Presión [kPa]	700-3.800
Combustible	Cascarilla de arroz
Potencia [kWt]	700

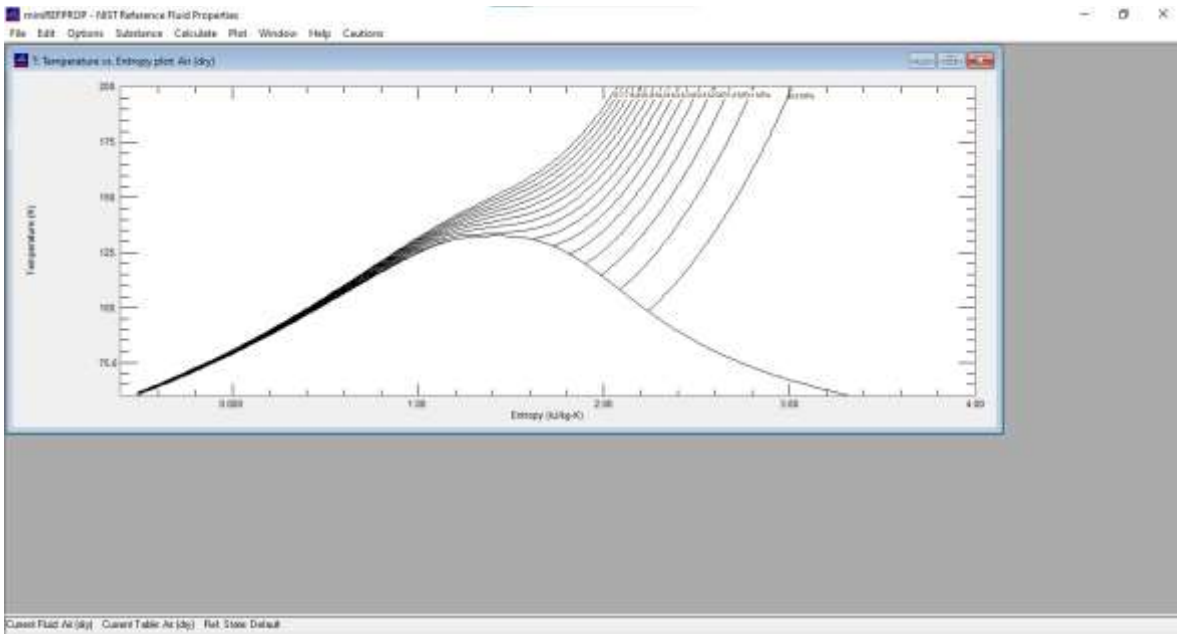
Anexo 3 : Tecnología de caldera Alessandro

Parámetros	Descripción
Capacidad [kg/h]	395,9
Temperatura salida [ºC]	90
Temperatura entrada [ºC]	40
Presión [kPa]	3.000
Combustible	Cascarilla de arroz
Líquido de trabajo	Aceite térmico

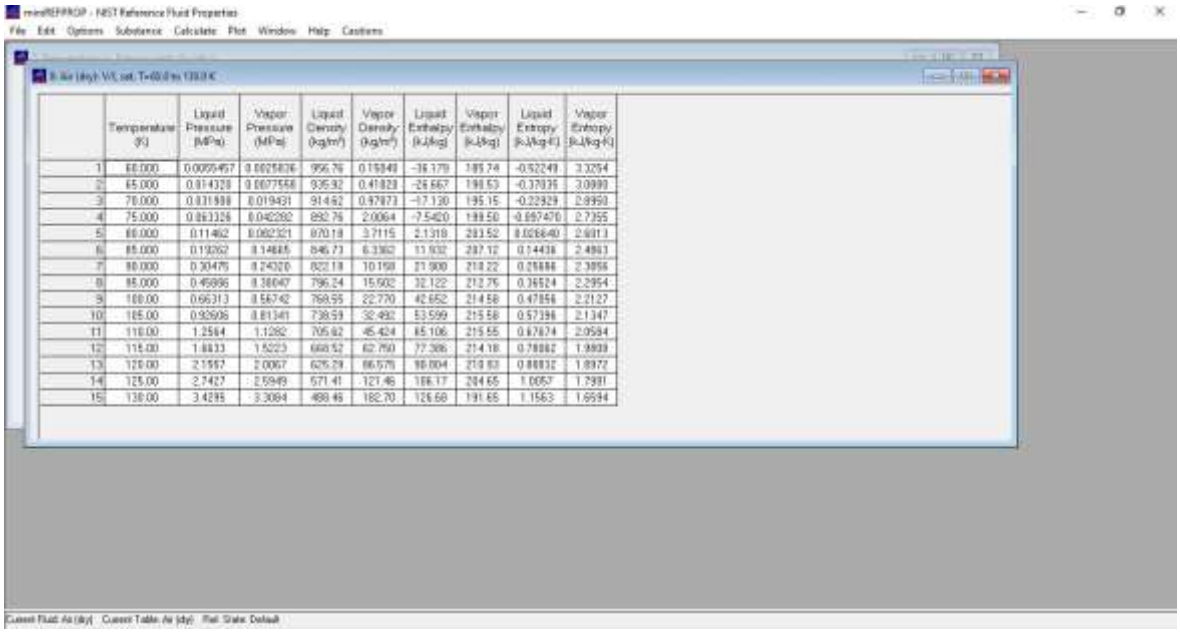
Anexo 4 : Tecnología Zhengzhou boiler

Parámetros	Descripción
Capacidad [kg/h]	250
Temperatura salida [ºC]	200
Temperatura entrada [ºC]	25
Presión [kPa]	600
Combustible	Cascarilla de arroz
Líquido de trabajo	Aceite térmico

Anexo 5: Programa miniRefrop gráficas



Anexo 6: Programa miniRefrop tablas termodinámicas



	Temperature (K)	Liquid Pressure (MPa)	Vapor Pressure (MPa)	Liquid Density (kg/m³)	Vapor Density (kg/m³)	Liquid Enthalpy (kJ/kg)	Vapor Enthalpy (kJ/kg)	Liquid Entropy (kJ/kg-K)	Vapor Entropy (kJ/kg-K)
1	60.000	0.0095457	0.0025836	956.76	0.15848	-36.179	185.74	-0.52249	3.3254
2	65.000	0.014328	0.0077558	935.92	0.41828	-26.667	190.53	-0.37035	3.0890
3	70.000	0.031988	0.019431	914.62	0.97873	-17.130	195.15	-0.22929	2.8950
4	75.000	0.063126	0.042282	892.76	2.0064	-7.5420	199.58	-0.097470	2.7355
5	80.000	0.11462	0.082321	870.18	3.7115	2.1318	203.52	0.026640	2.6013
6	85.000	0.19262	0.14885	846.73	6.3362	11.932	207.12	0.14436	2.4863
7	90.000	0.30476	0.24020	822.18	10.159	21.900	210.22	0.25888	2.3856
8	95.000	0.45896	0.36047	796.24	15.502	32.122	212.75	0.36524	2.2954
9	100.00	0.66313	0.56742	768.55	22.770	42.652	214.58	0.47856	2.2127
10	105.00	0.92606	0.81341	738.59	32.492	53.599	215.56	0.57398	2.1347
11	110.00	1.2564	1.1282	705.62	45.424	65.106	215.55	0.67674	2.0584
12	115.00	1.6833	1.5223	668.52	62.750	77.386	214.18	0.78882	1.9809
13	120.00	2.1557	2.0067	625.29	86.575	90.004	210.83	0.88832	1.8972
14	125.00	2.7427	2.5949	571.41	121.46	106.17	204.65	1.0057	1.7991
15	130.00	3.4295	3.3084	488.46	182.70	126.68	191.65	1.1563	1.6594

Anexo 7: Selección del evaporador

Modelo	Sup. m²	Ventiladores doble velocidad N.º	Ø	A Total	m³/h	Tiro m	Desc. W ED	Rto. (Watios) [1] Tº evap: −5ºC ΔT=6 TC=+1 ºC	ΔT=7 TC=+2 ºC	ΔT=8 TC=+3 ºC	ΔT=10 TC=+5 ºC	Rto. (Watios) [1] Tº evap: −25ºC ΔT=5 TC=−20 ºC	ΔT=6 TC=−19 ºC	ΔT=7 TC=−18 ºC
ICE-41 B06	49,90	1	450	1,1	5460	19	5040	8690	10480	12360	16430	6330	7640	8950
ICE-42 A06	75,00	2	450	2,2	11420	23	10200	14510	17500	20640	27430	10570	12740	14940
ICE-42 B06	99,90	2	450	2,2	10930	21	10200	16600	20030	23620	31390	12090	14580	17090
ICE-43 A06	112,40	3	450	3,3	17130	25	15000	21880	26400	31140	41370	15930	19230	22530
ICE-43 B06	149,90	3	450	3,3	16390	23	15000	25680	30980	36540	48550	18700	22560	26440
ICE-44 B06	199,80	4	450	4,4	21850	25	19800	34150	41190	48580	64550	24860	29990	35150
ICE-51 A06	60,90	1	560	2,2	10270	31	6750	13960	16850	19870	26400	10170	12270	14380
ICE-51 B06	81,30	1	560	2,2	9830	30	6750	15520	18720	22080	29340	11300	13630	15980
ICE-52 A06	121,60	2	560	4,4	20540	35	16050	26690	32200	37970	50470	19440	23450	27480
ICE-52 B06	161,60	2	560	4,4	19670	34	16050	31280	37720	44490	59120	22770	27470	32190
ICE-52 D06	242,50	2	560	4,4	17910	30	19260	39800	48010	56640	75250	28990	34970	40980
ICE-53 A06	182,90	3	560	6,6	30810	37	24000	38640	46620	54980	73060	28140	33950	39780
ICE-53 B06	242,50	3	560	6,6	29500	36	24000	45160	54480	64250	85380	32880	39670	46490
ICE-53 D06	363,70	3	560	6,6	26870	32	28800	59980	72350	85340	113400	43670	52690	61750
ICE-54 A06	243,20	4	560	8,8	41090	39	32250	53630	64680	76290	101370	39040	47090	55200
ICE-54 B06	323,20	4	560	8,8	39330	38	32250	62940	75910	89540	118970	45820	55270	64780
ICE-54 D06	484,90	4	560	8,8	35820	35	38700	79930	96410	113710	151100	58190	70210	82270

TC= Temperatura interior de la cámara, ΔT=TC −Tº evaporación.
Rendimientos indicados con R-404A, para R-134a; Rto. (−5ºC)×0,89.
[1] Para Tº de cámara inferior a −20 ºC aconsejamos modelos relacionados con mayor separación 8/10 mm. En especial si existe congelación.
Sobre demanda, opción suministro con ventiladores electrónicos.
Zona marcada: Aplicaciones más usuales, válidas para la mayoría de usos a las temperaturas de cámaras (TC) indicadas.

Descripción	Código	€
Embocadura de impulsión ∅ 450 mm	301202	**173,00**
Embocadura de impulsión ∅ 560 mm	301390	**243,00**

Anexo 8: Selección de la bomba

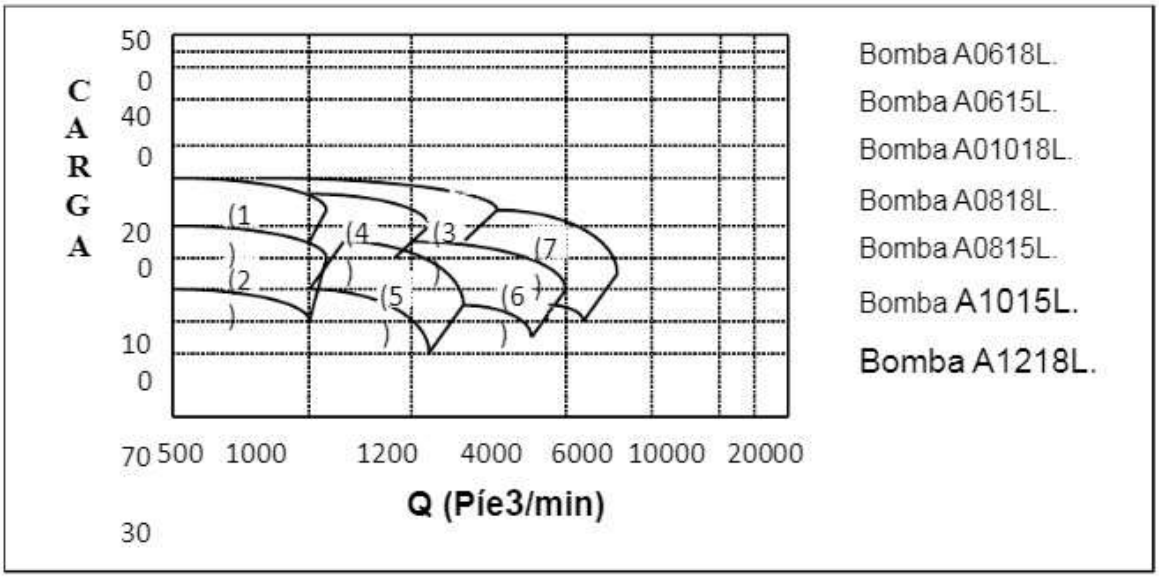


Gráfico: Rango de Trabajo, Bombas Tipo L.