

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTA DE INGENIERÍA DE MECÁNICA

EVALUACIÓN TECNO-ECONÓMICA PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE RESIDUOS DE PALMA AFRICANA CON CICLO ORGÁNICO RANKINE (ORC). CASO DE ESTUDIO PLANTA SAN DANIEL DE LA PROVINCIA DE SANTO DOMINGO DE LOS TSÁCHILAS

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA MECÁNICA

SOFÍA ISABEL GALLEGOS BOSMEDIANO

sofia.gallegos@epn.edu.ec

DIRECTOR: JOSÉ LUIS PALACIOS ENCALADA

jose.palacios@epn.edu.ec

DMQ, agosto 2023

CERTIFICACIONES

Yo, SOFÍA ISABEL GALLEGOS BOSMEDIANO declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

SOFÍA ISABEL GALLEGOS BOSMEDIANO

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por SOFÍA ISABEL GALLEGOS BOSMEDIANO, bajo mi supervisión.

JOSÉ LUIS PALACIOS ENCALADA
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

SOFÍA ISABEL GALLEGOS BOSMEDIANO

JOSÉ LUIS PALACIOS ENCALADA

DEDICATORIA

A mis padres que con su amor incondicional me han enseñado el significado del compromiso y la resiliencia y con su perseverancia me han mostrado cuán valioso es el la dedicación y el esfuerzo para alcanzar mis metas.

A mi hermana que siempre ha sido mi puerto seguro y mi mayor motivación.

A todas las personas que de una u otra manera han aportado para que este trabajo sea posible.

AGRADECIMIENTO

A Dios por guiarme y bendecir cada una de mis decisiones a lo largo de mi vida y mi formación académica.

A mis queridos padres por darme la vida, por abrazarme con su amor cada día y apoyarme incondicionalmente y por enseñarme la importancia de la constancia y la dedicación. Son mi ejemplo y mi motivación. Los amo mucho.

A mi hermana Sara por existir, no alcanzan las palabras para expresar lo agradecida que estoy al tenerla en mi vida. Te amo mucho! Eres y siempre serás mi puerto seguro.

A mi director de TIC, José Luis Palacios, por su orientación, retroalimentación y apoyo, ya que sin él este proyecto no habría sido posible.

A los amigos que la vida me ha permitido encontrar a lo largo del camino y que me han brindado su amistad y compañía en las buenas y malas circunstancias.

A todas aquellas personas que han aportado su granito de arena en mi formación académica y me han inspirado a ser la persona que soy.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	1
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	2
DEDICATORIA.....	3
AGRADECIMIENTO.....	4
RESUMEN	6
ABSTRACT	7
1 DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO	8
1.1 Objetivo general	9
1.2 Objetivos específicos	9
1.3 Alcance	10
1.4 Marco teórico	10
1.4.1 Ubicación geográfica del caso de estudio	10
1.4.2 Potencial del recurso: Palma africana	13
1.4.3 Introducción a Ciclo Orgánico Rankine (ORC).....	16
1.4.4 Revisión de tecnologías disponibles	19
2 METODOLOGÍA	21
2.1 Recopilación y análisis de información.....	23
2.2 Evaluación del potencial energético del caso de estudio	23
2.3 Planteamiento, evaluación y selección del componente con mayor potencial energético.....	24
2.4 Planteamiento, evaluación y selección de equipos y fluido de trabajo	25
2.4.1 Planteamiento, evaluación y selección de equipos	25
2.4.2 Selección de fluido de trabajo	27
2.5 Estudio de factibilidad económica y ambiental de la propuesta seleccionada	27
2.5.1 Estudio de factibilidad económica	28
2.5.2 Estudio de factibilidad ambiental	30
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	31
3.1 Resultados	31
3.2 Conclusiones.....	34
3.3 Recomendaciones.....	35
4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36
5 ANEXOS.....	38

RESUMEN

El presente proyecto se enfoca en evaluar la factibilidad técnica y económica de la propuesta energética sobre la implementación de un sistema ORC en la Planta Extractora de Palma Africana “San Daniel” para recuperar la energía residual producida a lo largo del proceso y a su vez mejorar la producción de energía eléctrica. Para estos fines, se realiza un estudio bibliográfico del caso de estudio, así como del sistema ORC a implementar y de las tecnologías disponibles en el mercado. Posteriormente, se evalúa el consumo de energía y recursos de la planta, así como la generación de energía eléctrica y se determina que el componente con mayores pérdidas a lo largo del proceso de producción es la caldera, la cual genera energía residual a través de los gases de escape. Una vez hecho esto se plantean 3 posibles alternativas de equipos ORC a implementar y en base a un análisis de criterios se determina la opción más viable económica, tecnológica y ambientalmente. Finalmente se determina la factibilidad económica y ambiental de la propuesta y de esa manera se concluye que la opción seleccionada es adecuada para optimizar y maximizar la eficiencia de la planta.

PALABRAS CLAVE: Sistema ORC, palma africana, factibilidad, eficiencia.

ABSTRACT

This project evaluates the technical and economic feasibility of the energy proposal on the implementation of an ORC system in the African Palm Extraction Plant "San Daniel" to recover the residual energy produced throughout the process and improve the production of electricity. For these purposes, a bibliographic study of the case study is carried out, as well as the ORC system to be implemented and the technologies available in the market. Subsequently, the energy and resource consumption of the plant is evaluated, as well as the generation of electrical energy, and it is determined that the component with the greatest losses throughout the production process is the boiler, which generates residual energy through the exhaust gases. Once this is done, three possible alternatives of ORC equipment to be implemented are proposed and based on an analysis of criteria, the most economically, technologically and environmentally viable option is determined. Finally, the economic and environmental feasibility of the proposal is determined and it is concluded that the selected option is adequate to optimize and maximize the plant's efficiency.

KEY WORDS: ORC system, African palm, feasibility, efficiency.

1 DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO

En la actualidad, la energía eléctrica producida mundialmente se genera a partir de fuentes de energía alternativa (radiación solar, viento) como convencionales (combustibles fósiles, gas natural, carbón) [1]. Sin embargo, según datos del 2019 de la Agencia Internacional de Energía (IEA), la contribución de las fuentes no renovables para la producción de electricidad es del 82,69% mientras que las fuentes renovables aportan únicamente con un 17,31% [2], siendo evidente la brecha que aún existe entre el uso de ambas fuentes energéticas. Ahora bien, según cifras del Balance Energético Nacional de Ecuador, en el 2020 la producción de energía eléctrica se compuso de: producción hidráulica (76,68%), turbo vapor (3,69%), turbo gas (3,58%), motores de combustión interna (14,23%), eólica (0,26%), fotovoltaica (0,11%) y electricidad importada (0,02%) [3]. Si bien estos datos reflejan un mayor uso de fuentes renovables en el país, aún no son suficientes al considerar el gran impacto social, económico y ambiental que genera el uso de fuentes no renovables.

La utilización de ambas fuentes, sobre todo las no renovables, conllevan ciertos impactos ambientales, tales como: el consumo de recursos naturales, erosión, generación de residuos, así como contaminación acústica [4]. Es por ello que surge la iniciativa de utilizar otro tipo de recurso renovable cuyo impacto ambiental sea menor, la biomasa y el uso de una tecnología más limpia y económica, el Ciclo Orgánico Rankine (ORC).

Ahora bien, la biomasa básicamente es la materia orgánica utilizada como fuente energética, y dado que Ecuador dispone de una gran cantidad de recursos agrícolas, forestales y pecuarios, el uso de este tipo de energía no convencional representa una gran ventaja para el país. Según cifras del Atlas Bioenergético del Ecuador, la palma africana es uno de los residuos orgánicos con mayor producción en el país, con un valor aproximado de 2 649 051 T/año. Este recurso es utilizado en procesos de combustión y cogeneración y puede alcanzar una producción de energía eléctrica de 706,80 kWh/T (base seca) [5].

Por otro lado, el ORC es un ciclo termodinámico mejorado del Ciclo Rankine tradicional, la diferencia entre ambos procesos radica en el fluido de trabajo. Un sistema ORC por lo general usa un fluido de trabajo orgánico permitiéndole trabajar con rangos de temperatura incluso más bajos que en un ciclo tradicional [6]. Generalmente los fluidos orgánicos utilizados suelen tener un valor de potencial de calentamiento global (GWP) muy bajo y su potencial de agotamiento de ozono (ODP) es prácticamente nulo. Estas propiedades lo convierten en una excelente alternativa energética amigable con el ambiente [6].

El deseo de descubrir nuevas tecnologías verdes ha conllevado a la realización de varias investigaciones que permitan determinar el impacto y la sostenibilidad de estas tecnologías en el país. En ese sentido, se puede mencionar el estudio de factibilidad en la planta San Daniel, en la cual el principal objetivo es generar un ahorro energético a través de la optimización de la energía residual a lo largo del proceso de extracción de aceite de palma africana. Toda la información recopilada, así como los resultados obtenidos del estudio mencionado serán presentados en el desarrollo del presente documento [7].

Con estos antecedentes se considera pertinente realizar una evaluación del potencial técnico y económico del sistema ORC en la planta San Daniel para optimización de recursos y producción de energía eléctrica a partir de residuos de palma africana. De esta manera se espera analizar y estudiar este tipo de tecnología y su factibilidad en el país.

1.1 Objetivo general

Realizar un análisis tecno - económico para la optimización de la producción de energía eléctrica a partir de residuos de palma africana con Ciclo Orgánico Rankine (ORC) en la planta San Daniel de la Provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas.

1.2 Objetivos específicos

1. Realizar un análisis bibliográfico del estado del arte acerca de ORC
2. Evaluar el potencial bioenergético de los residuos generados por la palma africana en el Ecuador
3. Determinar el consumo de palma africana y la generación de energía en la planta San Daniel por medio de estudios previos que permitan valorar su funcionamiento y desempeño energético.
4. Estimar pérdidas de energía producidas a lo largo del proceso de extracción en la planta San Daniel
5. Seleccionar tecnologías adecuadas que permitan aprovechar la energía residual de la planta y optimizar la producción de energía eléctrica
6. Estimar los beneficios económicos, energéticos del uso de las tecnologías seleccionadas.

1.3 Alcance

El presente Trabajo de Integración Curricular inicia con la recopilación y análisis bibliográfico sobre el Ciclo Orgánico Rankine y el potencial bioenergético de los residuos generados por la palma africana en Ecuador. Esta información es recopilada del Atlas Bioenergético del Ecuador y fuentes adicionales.

Posteriormente se determina el consumo de palma africana y la producción energética en la planta San Daniel. Se procede a estimar las pérdidas energéticas y residuales de dicha planta por medio de un estudio bibliográfico del trabajo publicado: “Optimización del proceso de extracción de aceite de palma africana de la planta San Daniel mediante el aprovechamiento de energía residual para generar un ahorro energético” [7] y a partir de este se plantea tecnologías que permitan optimizar el proceso de obtención de energía eléctrica.

Una vez recopilados datos e información, se realiza el análisis tecno-económico de las tecnologías planteadas estimando los beneficios económicos y energéticos de cada una de ellas para finalmente determinar y seleccionar la alternativa con mayor beneficios y sostenibilidad.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Ubicación geográfica del caso de estudio

El estudio de caso del presente trabajo se realiza en la Planta Extractora de Palma Africana “San Daniel”, ubicada en el km 3 de la vía “Villegas – Monterrey”, cantón La Concordia de la Provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas, la cual se puede evidenciar en Figura 1.1.



Figura 1.1. Planta Extractora de Palma Africana “San Daniel” [1]

Esta planta extrae el aceite rojo de palma africana, el cual es considerado como uno de los cultivos con mayor potencial bioenergético y abundancia en el país. De acuerdo a datos obtenidos en estudios previos, la planta San Daniel está diseñada para procesar teóricamente 25 T/h, sin embargo, únicamente procesa 19,55 T/h aproximadamente [1]. Todo el proceso de extracción por etapas se puede observar en el diagrama de la Figura 1.2.

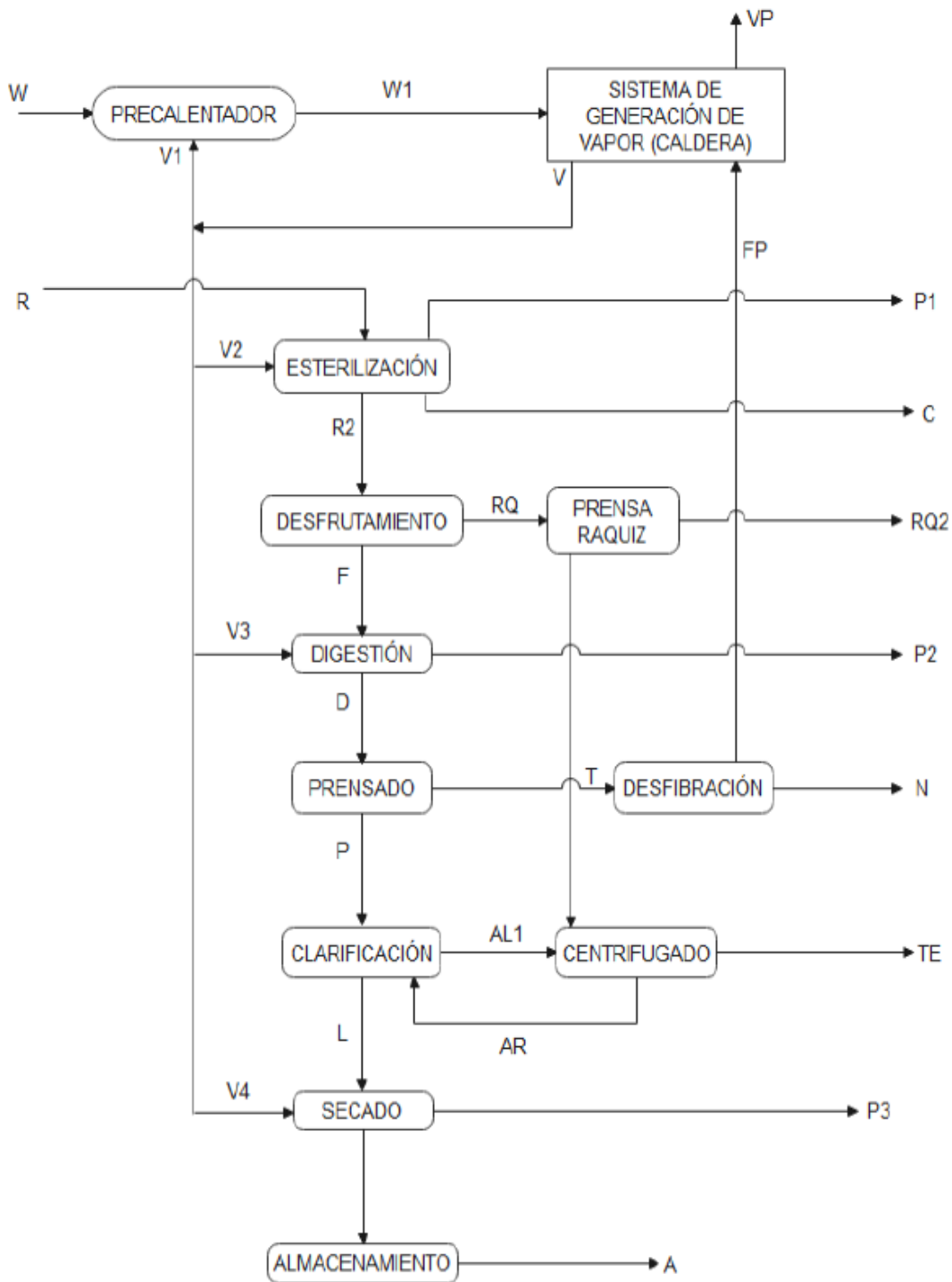


Figura 1.2. Diagrama de flujo de la Planta San Daniel [1]

Donde:

W = Agua

W1 = Agua precalentada

V = Vapor (proceso)

VP = Vapor de purga

FP = Fibra

V1 = Vapor de alimentación (tanque de precalentamiento)

R = Racimos de fruta de palma

V2 = Vapor de alimentación (Esterilización)

P1 = Purga esterilización

C = Condesados de esterilización

R2 = Racimos de fruta de palma esterilizada

RQ = Raquis

RQ2 = Raquis (remanentes de la prensa)

F = Frutos sueltos

V3 = Vapor de alimentación (Digestión)

P2 = Purga digestión

D = Frutos digeridos

T = torta

N = nueces

P = Aceite bruto

AL1 = Aceite lodoso

AR = Aceite recuperado

TE = Efluentes

L = Aceite húmedo

V4 = Vapor de alimentación (Secado)

P3= Purga Secado

A = Aceite terminado

El sistema de Generación de Vapor de la planta se lleva a cabo en la Caldera en donde se combina agua y combustible (fibra remanente del proceso de extracción) para producir vapor y gases de escape.

Para conocer los requerimientos másicos, energéticos y la energía residual durante los diferentes procesos de la planta, se realiza un balance energético considerando que los sistemas son abiertos y trabajan bajo un estado estacionario, y que tanto la temperatura como las presiones a lo largo del proceso son constantes.

Los valores de dicho estudio se reflejan en Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Requerimientos básicos, energéticos y energía residual

Variable	Valor
Uso de agua	6 T/h
Consumo de palma africana	19,55 T/h
Generación de energía	150 kW
Energía residual en todo el proceso	1543 kW

Cabe recalcar que según [1], la energía residual es aquel subproducto energético que se produce durante un proceso industrial, que no es usado y es expulsado hacia el ambiente sin ningún aprovechamiento. Dado que el proceso de extracción que se realiza en la planta se da bajo condiciones de alta temperatura (alrededor de 100 °C), se pierde gran cantidad de energía, sobre todo en forma de calor, la cual se planea optimizar durante el desarrollo de este trabajo.

1.4.2 Potencial del recurso: Palma africana

Biomasa en Ecuador y contexto nacional

Debido al fuerte impacto generado por el uso de energías convencionales (combustibles fósiles, carbón y gas natural) en el ambiente, surge la importancia de reemplazar estas fuentes energéticas por unas renovables y más limpias con el ambiente, tal es el caso de la biomasa. Según [2], la biomasa es un tipo de energía renovable que proviene de los residuos de materia orgánica. Esta puede ser producida en actividades forestales, agropecuarias y de residuos urbanos.

Una de las principales ventajas de usar biomasa como fuente energética es la eliminación de desechos orgánicos y la disminución del impacto ambiental, ya que este tipo de combustible genera muy poco dióxido de carbono al ambiente [3]. Sin embargo, de acuerdo a la información obtenida en [4], la biomasa en Ecuador es una fuente de energía abundante pero poco explotada y en muchos casos desperdiciada. Se registra que la generación eléctrica entre 2010-2020 por biomasa es del 1,4%, siendo un aporte ínfimo en comparación con otras fuentes renovables y no renovables. Esta información se puede visualizar en Figura 1.3.

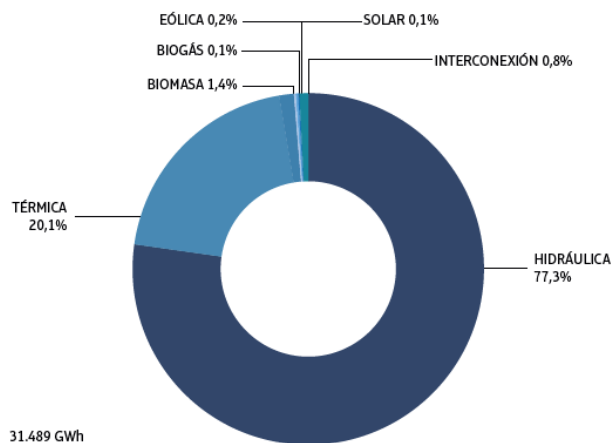


Figura 1.3. Generación eléctrica por fuente en Ecuador [5]

Por ello surge la necesidad de ampliar el conocimiento en esta línea de investigación, así como aplicar e implementar políticas estratégicas que permitan ampliar el uso de energías renovables y sostenibles en el país.

Procesos que permiten la transformación de biomasa

Dependiendo de la cantidad de humedad que tengan los desechos vegetales los procesos de transformación se pueden clasificar en dos categorías, cada una de ellas descrita en Figura 1.4. con su respectivo producto.

A PARTIR DE BIOMASA SECA	
Procesos Termoquímicos	
COMBUSTIÓN	Calor Electricidad
GASIFICACIÓN	Gas pobre Gas de síntesis Metanol
PIRÓLISIS	Carbón vegetal Aceite de pirólisis Brea Vegetal Gases no condensables
A PARTIR DE BIOMASA HÚMEDA O SECA	
Procesos Químicos y Biológicos	
FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA	Bioetanol
TRANSESTERIFICACIÓN Y ESTERIFICACIÓN	Metil ester (Biodiesel)
DIGESTIÓN ANAEROBIA (FERMENTACIÓN METÁNICA)	Biogás (Metano)

Figura 1.4. Procesos de transformación de la biomasa [2]

El presente trabajo se enfocará en el proceso termoquímico de combustión, el cual permite obtener calor y electricidad a partir de la quema de biomasa sólida y seca. De acuerdo a estudios realizados, los costos relacionados con la inversión inicial, mantenimiento, operación, entre otros, son bajos y su factibilidad es alta con una eficiencia aproximada de 37% en la producción eléctrica [6]. Debido a su gran versatilidad y múltiples aplicaciones, se han desarrollado diversas tecnologías de generación eléctrica a partir de la combustión, las cuales serán tema de discusión durante este trabajo.

Palma africana en Ecuador y en la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas

En Ecuador, los cultivos agrícolas que generan mayor producción de desechos orgánicos y que a su vez poseen un poder calorífico inferior considerable y aplicable en la industria energética son: caña de azúcar, café, cacao, cáscara de arroz y palma africana [2]. Este último será el foco de interés en el presente trabajo.

En términos generales, Ecuador produce 2.649.051 toneladas de palma africana al año, con una superficie sembrada total de 240.333 hectáreas. Las provincias con mayor producción de este cultivo son Los Ríos, Esmeraldas, Sucumbíos y por supuesto, Santo Domingo de los Tsáchilas. La producción de residuos de palma africana en todo el país se registra con un valor de $6.872.469,27 \frac{T}{año}$, lo cual generaría alrededor de $87.835,47 \frac{TJ}{año}$.

Los residuos de palma se obtienen de dos maneras: del campo y del procesamiento. Los principales residuos de campo son las hojas y los troncos con un poder calorífico inferior (PCI) de $12,471 \frac{TJ}{kg}$, mientras que los principales residuos de procesamiento son la cascarilla de nuez, raquis y fibras de mesocarpio con un PCI de $16,404 \frac{TJ}{kg}$ [2]. Cabe mencionar que el PCI es la cantidad de calor que se desprende de un material al someterse a un proceso de combustión completa [7].

Por otro lado, según datos de [2], la provincia de Santo Domingo tiene una producción absoluta de palma africana de alrededor de $151.846,71 \frac{T}{año}$, generando una cantidad de residuos aproximada de $389.076,83 \frac{T}{año}$. La estimación energética asociada a estos residuos es de $4.972,70 \frac{TJ}{año}$.

Los datos mencionados anteriormente se pueden visualizar en Tabla 1.2.

Tabla 1.2. Producción de Palma africana

		Ecuador	Santo Domingo de los Tsáchilas
Producción de palma africana	$\frac{T}{\text{año}}$	2649051	151846,71
Producción de residuos de palma africana	$\frac{T}{\text{año}}$	6872469,27	389076,83
Estimación energética asociada a residuos	$\frac{T}{\text{año}}$	87835,47	4972,7

Al comparar valores, se obtiene que la provincia de Santo Domingo representa alrededor del 5% de la producción nacional de palma africana, así como de la producción de residuos y la estimación energética asociada a dichos residuos.

Considerando la alta producción de palma africana en la provincia de Santo Domingo, así como el amplio uso de esta en aplicaciones energéticas; se elige como estudio de caso a la Planta Extractora de Palma Africana “San Daniel” ubicada en dicha provincia. Cabe recalcar que esta planta cuenta con análisis energéticos previos que servirán de fuente bibliográfica para el desarrollo del presente trabajo.

1.4.3 Introducción a Ciclo Orgánico Rankine (ORC)

Para comprender con claridad la definición del ciclo Orgánico Rankine es necesario definir previamente qué es el Ciclo Rankine convencional.

Ciclo Rankine Convencional

El ciclo Rankine es un proceso que consiste en elevar la temperatura del agua en una caldera hasta evaporarla y aumentar la presión del vapor, posteriormente el vapor se traslada a unos transformadores llamados “turbinas” en donde se genera energía cinética y se pierde presión. Finalmente, el vapor a baja presión es condensado y bombeado para aumentar su presión y enviarlo nuevamente hacia la caldera. El principal objetivo del ciclo Rankine es convertir el calor en trabajo [8][9]. En figura 1.5. se puede observar un esquema de dicho ciclo.

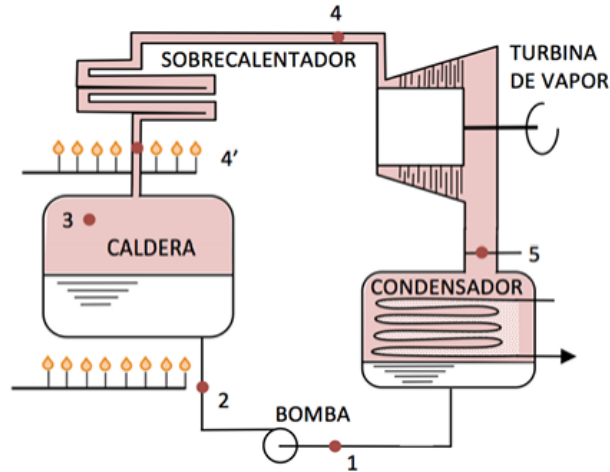


Figura 1.5. Componentes del Ciclo Rankine [10]

Ciclo Orgánico Rankine (ORC)

El Ciclo orgánico Rankine (ORC) es una variación del ciclo Rankine convencional cuya principal diferencia radica en el fluido de trabajo usado, ya que en lugar de usar agua como lo hace el ciclo convencional este utiliza compuestos orgánicos de elevado peso molecular, volátiles, y cuyo punto de ebullición sea menor a 100 °C, permitiendo así mejorar la eficiencia de aquellos procesos de baja temperatura [1] [11] [12].

El ORC generalmente se emplea para producir energía eléctrica por medio de fuentes de energía de media/baja temperatura [12]. El rango de temperatura de operación de este ciclo es bastante amplio y va de 70 a 300 °C. Esta característica le permite trabajar con una gran variedad de fuentes de calor y aprovechar aquellas fuentes de baja temperatura para posteriormente generar electricidad [13].

El Ciclo Orgánico Rankine (ORC) consta de cuatro procesos, tal como se detalla a continuación:

1 a 2: Compresión: Se comprime el fluido orgánico de trabajo en la bomba.

2 a 3: Calentamiento: Se calienta al fluido a presión constante en el evaporador

3 a 4: Expansión: Se expande al fluido

4 a 1: Enfriamiento: Usando el condensador se enfría al fluido de trabajo [14]. Este proceso se puede evidenciar en Figura 1.6.

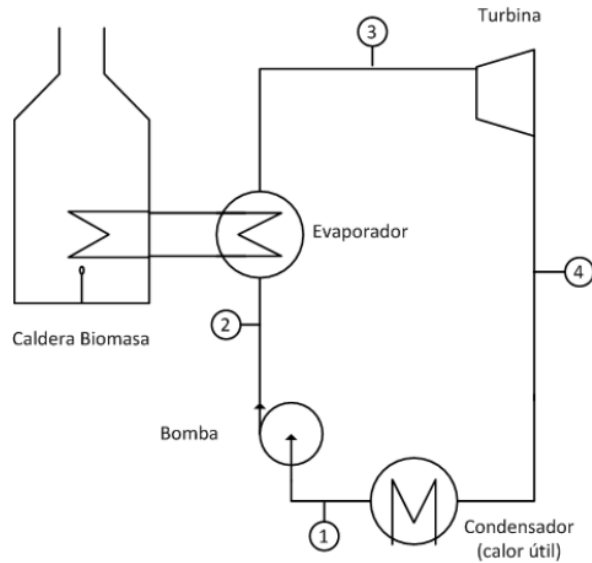


Figura 1.6. Ciclo Orgánico Rankine básico [14]

Ventajas del Ciclo Orgánico Rankine

De acuerdo con [15] y [16], las principales ventajas del uso del Ciclo Orgánico Rankine son:

- Bajos costos de inversión y mantenimiento
- Sistemas compactos que producen poco ruido
- No genera emisiones
- Adaptabilidad a diversas fuentes de calor, sobre todo aquellas con baja temperatura
- Buena disponibilidad de mercado con proveedores reconocidos.
- Rendimiento entre un 95-98%

Desventajas del Ciclo Orgánico Rankine

Por otro lado, una de las principales desventajas que presenta este ciclo es la especificidad, ya que necesariamente se debe diseñar un ciclo para cada aplicación, ya que de lo contrario no se podría obtener la eficiencia máxima.

Fluidos de trabajo en ORC

Por lo general, el fluido orgánico de trabajo suele estar compuesto por cadenas de hidrocarburos, sin embargo, existen otros varios que no cumple con esta característica. La selección del fluido de trabajo dependerá de las características de la aplicación y puede variar según varios factores, es así que es uno de los factores más determinantes en la eficiencia y rendimiento del ciclo [14][13].

La selección del fluido de trabajo debe ser cuidadosa y tomando en cuenta los siguientes criterios que permitan asegurar la seguridad y viabilidad técnica del proceso:

- Costos
- Disponibilidad
- Inflamabilidad
- Toxicidad
- Impacto ambiental
- Rendimiento térmico
- Compatibilidad con los materiales [14]

1.4.4 Revisión de tecnologías disponibles

A partir de la revisión bibliográfica se selecciona tres tecnologías de ORC usadas a nivel mundial:

- Turboden
- Ornat
- Maxxtec

Cada una de ellas será explicada en detalle a continuación:

1.4.4.1 Turboden

Características principales

Turboden, empresa italiana pionera en el diseño, fabricación y mantenimiento de sistemas de Ciclo Rankine Orgánico (ORC). Suelen usar múltiples fuentes renovables como no renovables para diversas aplicaciones [17].

Ventajas

- Para el proceso de condensación del fluido orgánico se puede usar aire o agua
- Generalmente usa fluidos de trabajo no inflamables, como: R245, R134, Solkatherm, etc.
- Costos de mantenimiento son bajos
- Trabajan con fluidos calientes (agua o aceite térmico) para el aporte de calor al sistema [18]

Desventajas

- No es eficiente en sistemas con temperaturas de trabajo muy bajas

Equipo recomendado para bajas temperaturas

- Purecycle power systems

- Turboden ORC diseñados (casos específicos)

1.4.4.2 Ormat

Características principales

Empresa estadounidense enfocada en el aprovechamiento de la energía renovable. Su tecnología se basa en ORMAT® Energy Converter (OEC), la cual es una herramienta que convierte el calor en energía eléctrica. [19]

Ventajas

- Gran experiencia en el área energética
- Para el proceso de condensación del fluido orgánico se puede usar aire o agua
- Diversidad en el uso de fluidos orgánicos
- No necesita mantenimiento

Desventajas

- Equipos con aplicaciones muy específicas y no tan generales

Aplicaciones en la actualidad

- Equipo E4V

1.4.4.3 Maxxtec

Características principales

Empresa alemana, enfocada en el diseño, estudio y construcción de tecnología relacionada con recuperación de calor.

Ventajas

- Productos innovadores
- Versatilidad en el uso de fluidos orgánicos
- Gran experiencia en el uso de fuentes renovables

Aplicaciones en la actualidad

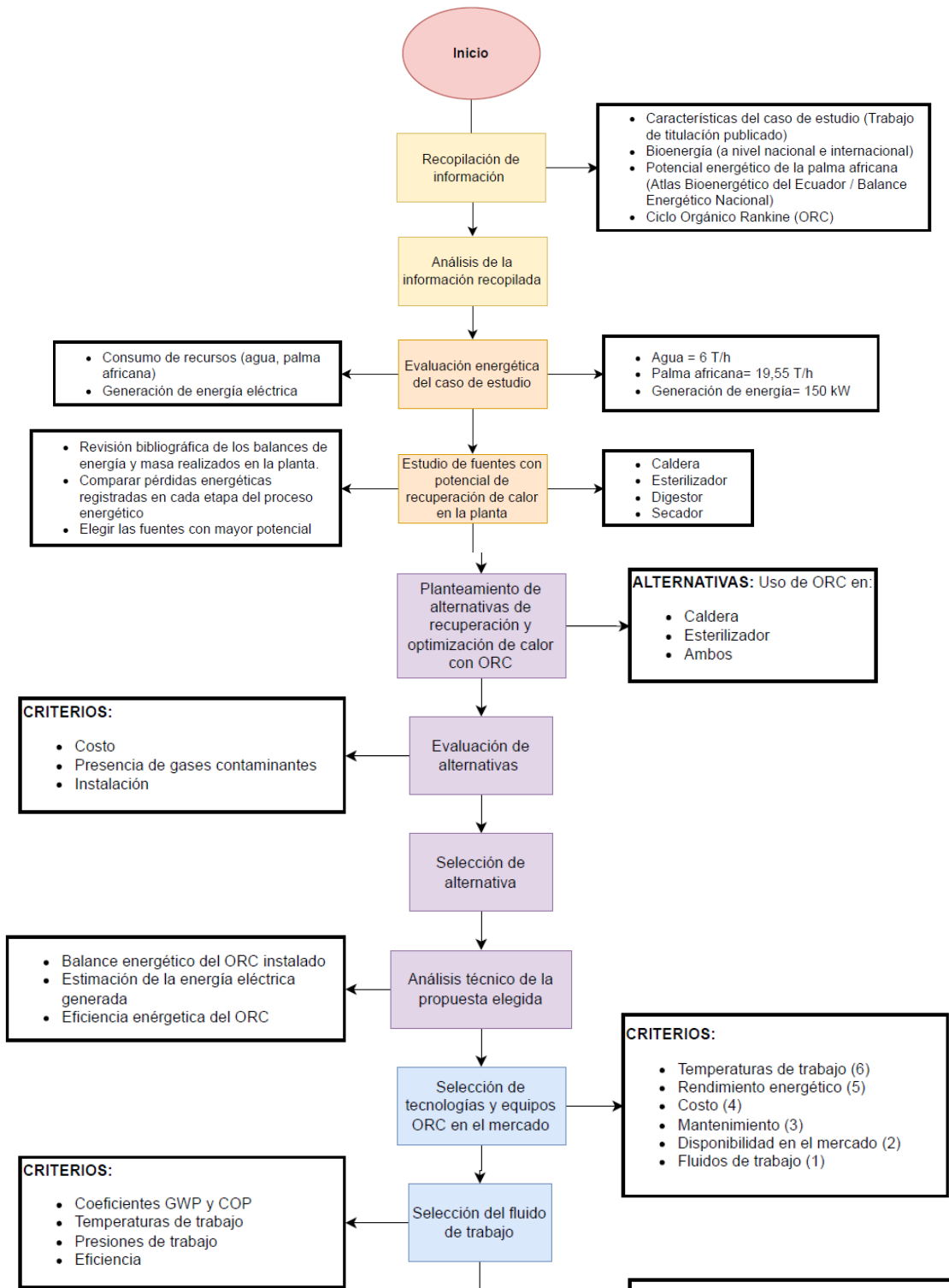
- Prensas pelletizadoras

2 METODOLOGÍA

La metodología usada se divide en 5 partes fundamentales: recopilación y análisis de información; evaluación del potencial energético del caso de estudio; planteamiento, evaluación y selección del componente con mayor potencial energético; planteamiento, evaluación y selección de equipos y fluidos de trabajo y por último el estudio de factibilidad económica y ambiental de la propuesta seleccionada.

Como primer punto se tiene la recopilación y análisis de información. Durante este primer punto se realiza una búsqueda bibliográfica a través de diversas fuentes, tales como: Atlas Bioenergético del Ecuador, Balance Energético Nacional, el documento publicado [7], entre otros. Este último es el documento más relevante de la investigación ya que presenta información y datos puntuales que serán usados para la selección de alternativa, equipo y fluido de trabajo. Posteriormente, se tiene la evaluación del potencial energético del caso de estudio. En este punto se describe tanto los datos energéticos como másicos del caso de estudio, los recursos consumidos y la energía producida. Una vez hecho esto y como tercer paso, se realiza el planteamiento, evaluación y selección del componente con mayor potencial energético. Durante esta etapa, se escoge el componente de la planta que presente mayor emanación energía residual de todos para posteriormente determinar sus condiciones de presión, temperatura y flujo másico. Estos valores serán usados para la selección del sistema ORC junto con su respectivo fluido de trabajo, lo cual se realiza en la cuarta etapa del proyecto. Durante este punto se plantea, analiza y selecciona los equipos, y para ello se usa el método de diseño concurrente, el cual califica y compara las diferentes alternativas a través de diferentes criterios relacionados con la parte técnica, económica y ambiental de la propuesta. La matriz de criterios estará compuesta por varios criterios, tales como: costo, disponibilidad en el mercado, facilidad de instalación, entre otros. Una vez seleccionado los equipos, se selecciona el respectivo fluido de trabajo. Como última etapa se tiene el estudio de factibilidad económica y ambiental de la propuesta seleccionada para así determinar los beneficios de implementar esta alternativa en el caso de estudio. Con esta etapa se culmina el desarrollo del presente proyecto.

Se puede evidenciar las 5 secciones de la metodología en el esquema de la Figura 2.1. y cada una de ellas será descrita en el presente capítulo.



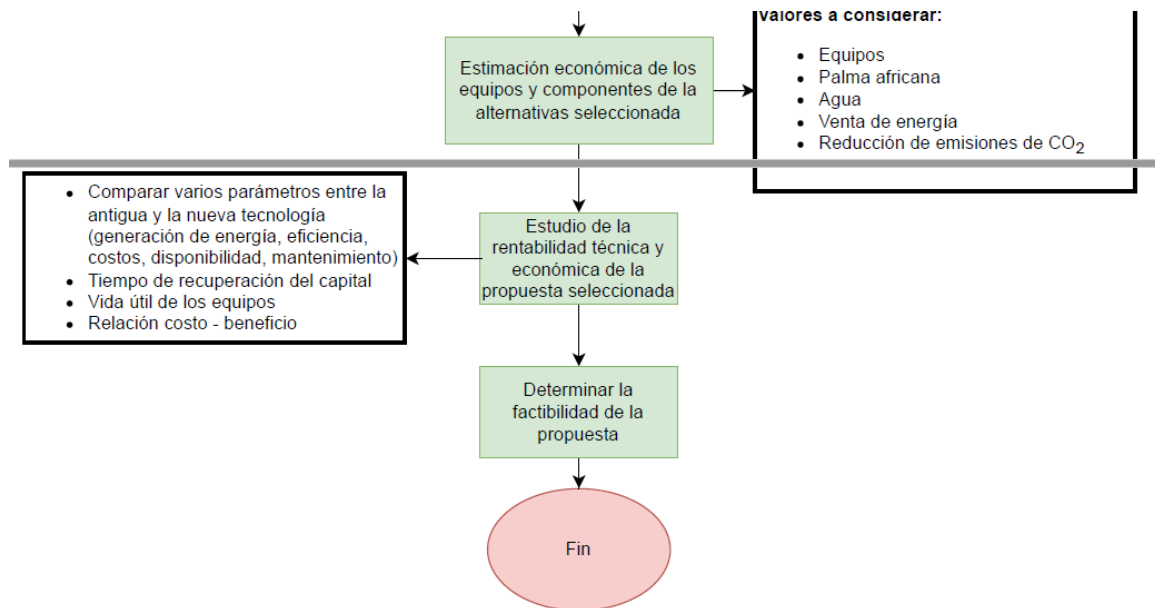


Figure 2.1. Esquema de la metodología (Fuente propia)

2.1 Recopilación y análisis de información

Tal como se mencionó anteriormente, el presente estudio se basa en [7]. Este es un estudio bibliográfico anterior que estima las pérdidas energéticas y residuales, así como el flujo másico y propiedades térmicas de dicha planta. Todas estas cifras serán usadas a lo largo del presente documento para el cálculo de varios criterios y a su vez para la selección de la tecnología apropiada para este caso de estudio.

Por otro lado, el Atlas Bioenergético del Ecuador y las cifras del Balance Energético Nacional son fundamentales para obtener información técnica sobre bioenergía a nivel nacional e internacional. Cabe mencionar que el estudio del Ciclo Orgánico Rankine también juega un papel fundamental en el desarrollo del presente estudio ya que será la principal tecnología usada para la selección de alternativas.

2.2 Evaluación del potencial energético del caso de estudio

Por medio de la información recopilada en [7], se obtiene los datos del consumo de recursos, tales como: agua y palma africana, y a su vez se recopila las cifras correspondientes a la energía eléctrica generada en dicha planta y la energía residual en todo el proceso. Los valores mencionados se pueden evidenciar en Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Consumo de recursos y generación de energía. Modificado de [7]

Variable	Valor
Uso de agua	6 T/h
Consumo de palma africana	19,55 T/h
Generación de energía	150 kW
Temperatura de los gases de escape	200 - 250 °C

Además, por medio de la información obtenida se puede comparar las pérdidas energéticas en toda la planta, así como los valores de flujo másico de las corrientes que interactúan en el proceso energético para posteriormente determinar cuáles son las fuentes de recuperación de energía con mayor potencial y su respectivo componente.

Del análisis realizado se obtiene que los siguientes datos en Tabla 2.4, y Tabla 2.5.

Tabla 2.4. Pérdida energética por componente. Modificado de [7]

Equipo	Pérdida de energía (kJ/s)
Caldera (Gases de escape)	1543
Caldera (purga de caldera)	424,3
Esterilizador	1723
Digestor	35,82
Secador	211,1

Tabla 2.5. Requerimientos másicos por componente. Modificado de [7]

Equipo	Flujos másicos (T/h)
Caldera (Gases de escape)	10,18
Caldera (purga de caldera)	0,592
Esterilizador	1,47
Digestor	0,448
Secador	0,244

2.3 Planteamiento, evaluación y selección del componente con mayor potencial energético

De los datos obtenidos se puede evidenciar que la caldera es el equipo con mayor pérdida energética ya que los valores tanto energéticos como másicos son bastante considerables

en comparación con los demás equipos. Es por ello que se selecciona la caldera como punto de análisis en esta investigación.

La pérdida que se genera en este componente a través de los gases de escape es de 1543 kJ/s, mientras que a través de la purga es de 424,3 kJ/s, teniendo un valor total de 1967,3 kJ/s expulsados al ambiente. Sin embargo, dado que el contenido de impurezas de la purga de la caldera se encuentra entre un 2% a 10% [8], se considera adecuado aprovechar únicamente los gases que provienen del escape para así aumentar la eficiencia del proceso en el presente Proyecto.

Una vez definido el componente, se plantea como alternativa energética el uso de un sistema con ORC implementado a la salida de los gases de escape de la caldera para poder aprovechar la energía residual de esta fuente.

2.4 Planteamiento, evaluación y selección de equipos y fluido de trabajo

2.4.1 Planteamiento, evaluación y selección de equipos

Una vez definido el componente y la tecnología de Ciclo Orgánico Rankine (ORC), se procede a seleccionar los equipos y fluido de trabajo. Para ello, se usa las características técnicas y energéticas a la salida de los gases de escape de la caldera, tales como: temperatura, presión y flujo másico. Estos valores han sido tomados de [7].

Tabla 2.6. Datos de los gases de escape (Caldera) para la selección de equipos.

Modificado de [7]

Caldera (Gases de escape)	
Variable	Valor
Flujo másico	10,18 T/h= 10,18 m ³ /h
Pérdida de energía	1543 kJ/s = 1543 kW
Temperatura de los gases de escape	200 - 250 °C
Presión	8 bar

Por medio del estudio de mercado, se plantean tres posibles alternativas de sistemas ORC que podrían cumplir con los requerimientos de equipos y condiciones térmicas. Las alternativas son las siguientes:

- **Alternativa A:** Turboden Heat Recovery (HR) Units - TURBODEN 6/7 HR DE [9]
- **Alternativa B:** Rank® HTC1 [10]
- **Alternativa C:** ENO-180LT [11]

Estas tres alternativas son evaluadas por medio del método de diseño concurrente, el cual permite comparar las ventajas, beneficios y propiedades de cada una de las alternativas presentadas por medio de una matriz de criterios. Los criterios deben ser seleccionados basándose en la importancia e influencia que representan al desarrollo del proyecto y deben estar relacionados con el desempeño tanto técnico, como económico y ambiental del equipo. Para el presente caso de estudio se presentan los siguientes criterios:

- **Temperaturas de trabajo:** es considerado como uno de los criterios más determinantes para la selección de equipos, ya que se encuentra en un rango específico entre 200°C a 250°C. Este valor corresponde a la temperatura de los gases de escape a la salida de la caldera.
- **Alta eficiencia energética:** se refiere a cuanta energía se puede producir usando los mismos recursos.
- **Bajo costo:** la inversión realizada al proyecto representa una de las principales limitaciones.
- **Alta disponibilidad en el mercado:** tal como su nombre lo indica, este criterio indica la disponibilidad de los equipos seleccionados en el mercado nacional. Cabe recalcar que este criterio involucra no solo al sistema ORC sino también al fluido de trabajo usado.
- **Facilidad de mantenimiento:** este criterio indica la facilidad del equipo para su reparación y mantenimiento.

Una vez que los criterios son definidos, se procede a determinar una calificación ponderada para cada uno de ellos, la cual se describe en Tabla 2.7.

Tabla 2.7. Ponderación de los criterios

	Capacidad de carga > Fricción > Fácil ensamble > Costo > Mantenimiento						
Criterio	Manteni miento	Disponibili dad en el mercado	Costo	Eficiencia energética	Temperatura de trabajo	$\Sigma +1$	Pond.
Mantenimiento		0	0	0	0	1	0,07
Disponibilidad en el mercado	1		0	0	0	2	0,13

Costo	1	1		0	0	3	0,2
Eficiencia energética	1	1	1		0	4	0,27
Temperatura de trabajo	1	1	1	1		5	0,33
					Suma	15	1

Posteriormente, se evalúa cada criterio con las diferentes alternativas planteadas y se coloca una calificación en cada uno de ellos, como se puede observar en Anexo 1. A partir de este análisis, se obtiene valores para cada criterio, los cuales serán usados al momento de hacer la tabla de resultados.

Finalmente, se elige la opción con la puntuación más alta. Esto se puede evidenciar en Tabla 2.8.

Tabla 2.8. Resultados de la selección de alternativas

Resultados	Temperatura de trabajo	Eficiencia energética	Costo	Disponibilidad en el mercado	Mantenimiento	Σ	Prioridad
Alternativa A	$0,5 \cdot 0,33$	$0,5 \cdot 0,27$	$0,25 \cdot 0,2$	$0,5 \cdot 0,13$	$0,5 \cdot 0,07$	0,45	1
Alternativa B	$0,33 \cdot 0,33$	$0,33 \cdot 0,27$	$0,25 \cdot 0,2$	$0,25 \cdot 0,13$	$0,33 \cdot 0,07$	0,30	2
Alternativa C	$0,17 \cdot 0,33$	$0,17 \cdot 0,27$	$0,5 \cdot 0,2$	$0,25 \cdot 0,13$	$0,17 \cdot 0,07$	0,25	3

Así se determina que la alternativa más viable es la alternativa A.

2.4.2 Selección de fluido de trabajo

En los sistemas ORC por lo general se usa al R-245fa, o también llamado 1,1,1,3,3-pentafluoropropano como fluido de trabajo. Su punto de ebullición es bastante bajo, con un valor de 15°C aproximadamente, su temperatura crítica es de 154°C y su temperatura de ignición es de 412 °C [12]. Cabe recalcar que su Potencial de calentamiento global (GWP) es de 820, y su Potencial de destrucción de la capa de ozono (ODP) es de 0 [13].

Este fluido es muy popular en la industria energética de los ORC de baja temperatura y además presenta propiedades termodinámicas favorables para este caso de estudio [14].

2.5 Estudio de factibilidad económica y ambiental de la propuesta seleccionada

Una vez recopilados datos e información, se realiza el análisis tecno-económico de la tecnología planteada estimando los beneficios económicos y energéticos para finalmente determinar si es la alternativa con mayor beneficios y sostenibilidad.

2.5.1 Estudio de factibilidad económica

Se toma en cuenta la eficiencia y potencia neta proporcionada por el equipo para evaluar la factibilidad económica de la propuesta seleccionada. Esto se puede evidenciar en Tabla 2.9.

Tabla 2.9. Información técnica del equipo seleccionado [9]

Turboden Heat Recovery (HR) Units - TURBODEN 6/7 HR DE	
Variable	Valor
Eficiencia	17% – 20%
Potencia eléctrica neta	480 – 760 kW

De esta información, se toma como valor promedio de potencia eléctrica del equipo 500 kW.

Cabe recalcar que la extractora San Daniel funciona las 24 horas del día durante todo el año, por lo que las horas de operación serían aproximadamente 8 760 h/año [7]. Además, el costo de la energía eléctrica en Ecuador actualmente es de $\frac{\$ 0,096}{1 kWh}$ [15].

Con esta información se puede obtener la ganancia generada al vender la energía eléctrica que se produce en la planta una vez que la propuesta ha sido implementada:

$$500 \text{ kW} * 8760 \frac{\text{h}}{\text{año}} * \frac{\$ 0,096}{1 kWh} = \frac{\$ 395 076}{1 \text{ año}}$$

Se conoce que el consumo energético de la planta San Daniel es de $172 546 \frac{kW}{mes}$, es decir, $2 070 552 \frac{kW}{año}$ lo que genera un gasto energético de \$ 186 763,8 al año.

Con la propuesta seleccionada se produce aproximadamente el doble de esta cantidad, por lo que su factibilidad económica es de alrededor el 2,11%.

- Relación beneficio - costo:

Para analizar la relación de beneficio costo, se toma en cuenta el ahorro económico

generado y la inversión inicial realizada para comprar el equipo más gastos de instalación y mantenimiento. Ahora bien, el ahorro económico es la diferencia entre el gasto energético y las ganancias que se obtienen de la venta de la energía eléctrica que se ha producido en la planta.

Por otro lado, dentro de la inversión inicial se considera que $950 \frac{\$}{kWe}$ es el costo del equipo. A este valor se suma el costo de instalación, obras civiles, flete y ensamble de la planta, el cual se encuentra alrededor de \$6 000 y finalmente se añade un valor de mantenimiento anual de \$500 aproximadamente [16]. Finalmente, se obtiene:

$$\frac{\text{Beneficio}}{\text{Costo}} = \frac{\$ 395\,076 - \$ 186\,763,8}{\$ 475\,000 + \$ 6\,000 + \$ 500} = 0,43\%$$

- Tiempo de recuperación de la inversión

Para ello se considera la inversión inicial, los gastos de mantenimiento y producción, así como las ganancias generadas al vender la energía producida. Toda esta información se hace en función de años. La Figura 2.5.1 analiza e indica la variación en el tiempo de las ganancias y gastos generados en la planta.

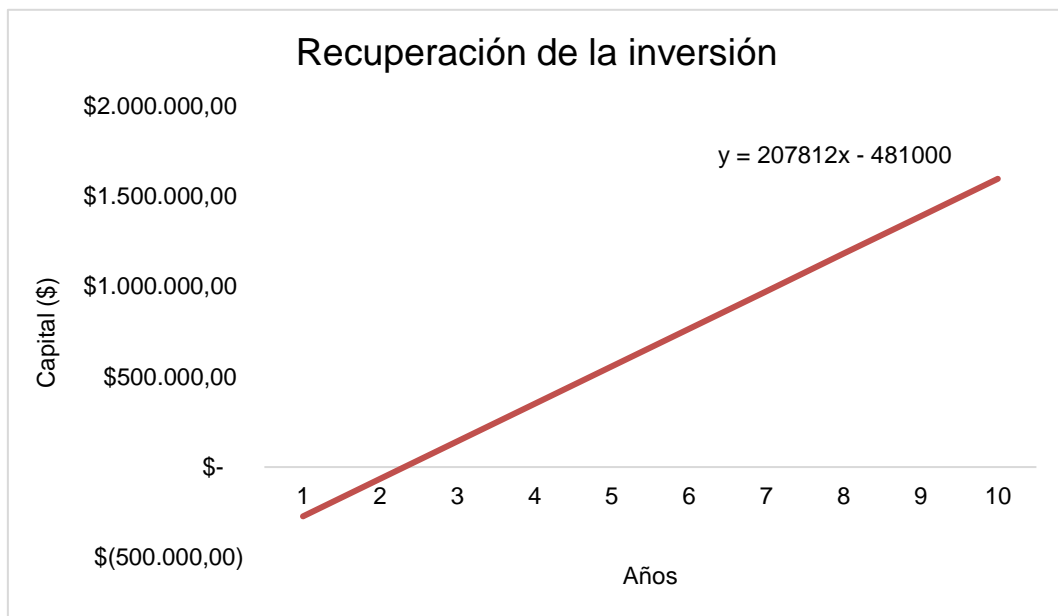


Figure 2.5.1. Recuperación de la inversión. Fuente propia.

Tal como se observa en el gráfico, la inversión será recuperada luego de 2 años y 4 meses de haber implementado el nuevo sistema en la planta.

2.5.2 Estudio de factibilidad ambiental

Para ello, se considera que el combustible usado son los restos de fibra que se obtienen durante el proceso de extracción del aceite de palma africana. Este material está compuesto en su mayoría por celulosa [7], y es considerado un biocombustible ya que proviene de la biomasa. En base a eso, se considera que este caso de estudio presenta un balance neutro de CO₂, es decir, que el carbono liberado a la atmósfera en el proceso de combustión es el mismo las plantas han absorbido y liberado a lo largo de todo su crecimiento. Algo significativo de esta condición es que este tipo de emisiones neutras no contribuyen al aumento del efecto invernadero [17].

Por otro lado, el fluido de trabajo R-245fa es amigable con el ambiente, ya que presenta características favorables y no contaminantes. Su potencial de calentamiento global (GWP) es de 820, mientras que su Potencial de destrucción de la capa de ozono (ODP) es de 0 [13].

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Resultados

El estudio bibliográfico realizado permite evidenciar los beneficios tecnológicos, económicos y medioambientales que tienen los sistemas ORC dentro del área energética. Esta alternativa permite aprovechar el calor o energía residual de una fuente de baja temperatura para producir electricidad con el menor impacto ambiental posible y con buenos resultados económicos y tecnológicos. Por ello es considerada una alternativa adecuada para el sistema de la Planta Extractora de Palma Africana “San Daniel”.

Para determinar la viabilidad de esta alternativa se evalúa el potencial energético de varios equipos con tecnología ORC, así como a los posibles fluidos orgánicos de trabajo para finalmente seleccionar el más conveniente tecnológica, económica y ambientalmente y de esa manera optimizar y maximizar la eficiencia de la planta.

Los sistemas ORC tienen un rendimiento de 95% a 98% y presenta gran adaptabilidad a diversas fuentes de calor, en especial aquellas de baja temperatura, a su vez, estos sistemas usan fluidos orgánicos a lo largo del proceso, por lo que las emisiones generadas al ambiente son mínimas.

La planta San Daniel usa palma africana en toda la operación, incluyendo el combustible, razón por la cual es considerado como un sistema de balance neutro de CO₂. Esta condición implica que la planta use tecnologías amigables con el ambiente y que sean compatibles con ella, tal como los sistemas ORC.

La planta San Daniel consume alrededor de 19,55 T/h de palma africana, generando alrededor de 150 kW. Sin embargo, la misma planta registra pérdidas a lo largo de sus componentes, tales como: caldera, esterilizador, digestor y secador.

La pérdida energética más relevante se registra en los gases de escape a la salida de la caldera, la cual tiene un valor aproximado de 1543 kJ/s y un flujo másico de 10,18 T/h. Analizando estas cifras, se considera apropiado implementar el sistema ORC en esta fuente de calor para así aprovechar la energía residual proveniente de este componente.

Se procede a seleccionar un equipo con tecnología ORC que cuente con las características apropiadas para el uso en la planta San Daniel, para ello se propone 3 alternativas, las cuales son:

- **Alternativa A:** Turboden Heat Recovery (HR) Units - TURBODEN 6/7 HR DE [9]

- **Alternativa B:** Rank® HTC1 [10]
- **Alternativa C:** ENO-180LT [11]

Una vez planteadas las alternativas se procede a seleccionar la más adecuada, y para ello se plantea un sistema de calificación basado en criterios técnicos, ambientales y económicos que permitan determinar las ventajas y beneficios de las propuestas planteadas. Del análisis realizado se obtienen los siguientes resultados, los cuales se reflejan en Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Resultados de la selección de alternativas

Resultados	Temperatura de trabajo	Eficiencia energética	Costo	Disponibilidad en el mercado	Mantenimiento	Σ	Prioridad
Alternativa A	0,5*0,33	0,5*0,27	0,25*0,2	0,5*0,13	0,5*0,07	0,45	1
Alternativa B	0,33*0,33	0,33*0,27	0,25*0,2	0,25*0,13	0,33*0,07	0,30	2
Alternativa C	0,17*0,33	0,17*0,27	0,5*0,2	0,25*0,13	0,17*0,07	0,25	3

Así se determina que la alternativa más viable es la alternativa A.

Una vez seleccionada la tecnología, se procede a analizar y seleccionar al fluido de trabajo que será usado en el sistema. Para este caso de estudio se selecciona al R-245fa, el cual es muy recomendado dentro de la industria energética debido a sus excelentes propiedades térmicas y ambientales. Cabe recalcar que su Potencial de calentamiento global (GWP) es de 820, mientras que su Potencial de destrucción de la capa de ozono (ODP) es de 0 [13], lo que representa valores adecuados dentro del margen medioambiental.

Este fluido es muy popular en la industria energética de los ORC de baja temperatura y además presenta propiedades termodinámicas favorables para este caso de estudio [14].

Hecho esto, se procede con el estudio de factibilidad económica y ambiental de la propuesta y el fluido de trabajo seleccionados.

Dentro del estudio de factibilidad económica se determina los valores de Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Resultados de estudio de factibilidad económica

Estudio de Factibilidad Económica	
Variable	Valor
Consumo energético de la planta	2 070 552 $\frac{kW}{año}$
Gasto energético de la planta	$\frac{\$ 186 763,8}{1 año}$
Ganancia generada con la alternativa implementada	$\frac{\$ 395 076}{1 año}$
Factibilidad	2,11 %
Relación beneficio/costo	0,43 %
Tiempo de recuperación de la inversión	2 años y 4 meses

Por otro lado, dentro del estudio de factibilidad ambiental se determina los valores de Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Resultados de estudio de factibilidad ambiental

Estudio de Factibilidad Económica	
Variable	Valor
Emisiones	Carbono neutro
Potencial de calentamiento global (GWP) del fluido (R-245fa)	820
Potencial de destrucción de la capa de ozono (ODP) del fluido (R-245fa)	0

Una vez determinada la factibilidad económica y ambiental del equipo y el fluido de trabajo se puede considerar que esta tecnología es adecuada para la planta.

3.2 Conclusiones

Los sistemas ORC son una propuesta innovadora y eficiente para la recuperación de calor en fuentes de baja temperatura. Esta tecnología permite aprovechar el calor residual para posteriormente producir electricidad. Estos sistemas son considerados como sencillos y confiables dentro de la industria energética debido a sus características favorables técnica y ambientalmente.

La planta San Daniel actualmente consume alrededor de 19,55 T de palma Africana por hora y genera alrededor de 150 kW. Esta cifra aumenta a 500 kW una vez que la alternativa es implementada en el Sistema.

La caldera es el equipo con mayor pérdida energética ya que los valores tanto energéticos como másicos son bastante considerables en comparación con los demás equipos. Es por ello que se selecciona la caldera como punto de análisis en esta investigación. La pérdida que se genera en este componente a través de los gases de escape es de 1543 kJ/s, mientras que a través de la purga es de 424,3 kJ/s teniendo un valor total de 1967,3 kJ/s expulsados al ambiente. Sin embargo, dado que el contenido de impurezas de la purga de la caldera se encuentra entre un 2% a 10% [8], se considera adecuado aprovechar únicamente los gases que provienen del escape para así aumentar la eficiencia del presente Proyecto.

La tecnología ORC seleccionada para el presente caso de estudio es el sistema Turboden Heat Recovery (HR) Units - TURBODEN 6/7 HR DE [9] el cual presenta características técnicas como medioambientales más compatibles con el sistema de la planta San Daniel. Este sistema presenta un rango de temperaturas de trabajo adecuado, bajo costo, y una mayor eficiencia energética, disponibilidad en el mercado y facilidad de mantenimiento en comparación con las alternativas presentadas.

La alternativa implementada en la planta presenta una factibilidad económica adecuada y se estima que la inversión será recuperada luego de 2 años y 4 meses.

Las emisiones generadas por la planta una vez implementada la alternativa seleccionada son mínimas ya que el equipo no genera emisiones y el fluido de trabajo seleccionado, R-245fa, presenta un potencial de calentamiento global (GWP) de 820, y un potencial de destrucción de la capa de ozono (ODP) es de 0 [13]. Por otro lado, la planta tiene un balance neutro de CO₂ ya que usa la fibra remanente del proceso de extracción del aceite de palma africana como combustible.

3.3 Recomendaciones

- Realizar un estudio energético en cada una de las plantas o industrias ecuatorianas para determinar posibles pérdidas de energía y de esa manera plantear e implementar nuevas alternativas tecnológicas que permitan optimizar recursos y aumentar la eficiencia de los sistemas.
- Realizar un estudio bibliográfico de las tecnologías alternativas, tales como ORC para profundizar en estas y posteriormente usarlas como herramienta para solventar los problemas de energía residual que tienen muchas industrias ecuatorianas.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1 «Endesa Energía, Endesa S.A.,» 2022. [En línea]. Available:
] <https://www.endesa.com/es/conoce-la-energia/energia-y-mas/como-se-genera-electricidad#:~:text=Generaci%C3%B3n%20de%20energ%C3%ADa%3A%20la%20electricidad,natural%2C%20el%20petr%C3%B3leo...> [Último acceso: 27 marzo 2022].
- [2 «Agencia Internacional de la Energía (IEA),» 2019. [En línea]. Available:
] <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tables?country=WORLD&energy=Balances&year=2019>. [Último acceso: 27 marzo 2022].
- [3 C. Chamba y C. Gómez, «Evaluación del potencial técnico y económico de plantas de generación eléctrica basadas en desechos agrícolas y agroindustriales, reproducibles en distintas localizaciones en Ecuador,» Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2020.
- [4 B. González, «Ecología Verde,» 04 abril 2018. [En línea]. Available:
] <https://www.ecologiaverde.com/como-afecta-la-produccion-electrica-al-medio-ambiente-1745.html>. [Último acceso: 27 marzo 2022].
- [5 ESIN, «Palma Africana,» de *Atlas Bioenergético del Ecuador*, Quito, BID, 2014, pp. 57-61.
]
- [6 «Tecnología Rank,» 21 junio 2019. [En línea]. Available: <https://www.rankorc.com/es/2019/06/21/tecnologia-rank-como-funciona-un-orc/>. [Último acceso: 27 marzo 2022].
- [7 S. Valdez, «Optimización del proceso de extracción de aceite de palma africana de la planta San Saníel mediante el aprovechamiento de energía residual para generar un ahorro energético,» ESPOCH, Riobamba, 2021.
- [8 «EG Conocimiento Aplicado,» [En línea]. Available:
] <https://www.quimicaeg.com.ar/post/purgas-de-caldera-la-importancia-de-un-buen-control#:~:text=Las%20tasas%20de%20purga%20de,agua%20de%20reposici%C3%B3n%20es%20deficiente..> [Último acceso: 14 junio 2023].
- [9 turboden, «ORGANIC RANKINE CYCLE TECHNOLOGY,» *Mitsubishi Heavy industries, LTD.*, vol. 12, nº 7, 2016.
- [1 RANK, «Organic Rankine Cycle (ORC) Equipment,» *Rank ORC, s.l*, vol. Version 2021.11.29, 0] 2021.
- [1 enogia, «ORC ENO-180LT ORC ENO-180LT A SYSTEM COMBINING PERFORMANCE AND RELIABILITY A SYSTEM COMBINING PERFORMANCE AND RELIABILITY - Generate power from your waste heat,» 2022. [En línea]. Available: www.enogia.com. [Último acceso: 28 junio 2023].
- [1 climalife, «R-245fa-Safety Data Sheet (SDS),» 2019. [En línea]. Available:
2] <https://climalife.dehon.com/r-245fa>. [Último acceso: 06 agosto 2023].
- [1 A. Criollo y E. Pinzón, «Evaluación del potencial técnico y económico de plantas de generación eléctrica basadas en caldera a biomasa y Ciclo Orgánico Rankine Orgánico (ORC) para el aprovechamiento de la cascarilla de arroz en Ecuador,» Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2018.
- [1 H. International, «Genetron® 245fa Working Fluid for ORC Systems.,» 2022.
4]
- [1 GlobalPetrolPrices.com, «GlobalPetrolPrices.com,» 2022. [En línea]. Available:
5] https://es.globalpetrolprices.com/Ecuador/electricity_prices/#:~:text=Ecuador%2C%20dicie mbre%202022%3A,es%200.185%20USD%20por%20kWh.. [Último acceso: 22 julio 2023].
- [1 A. Rivera y D. Gutierrez, «Cogeneración de energía eléctrica por planta ORC,» *Institución 6] Universitaria*, vol. 01, nº FED 089, pp. 1-44, 2016.
- [1 COINTRA, «BALANCE NEUTRO DE CARBONO,» 2022. [En línea]. Available:
7] <https://www.cointra.es/blog-balance-neutro->

carbono/#:-:text=Se%20considera%20que%20la%20biomasa,las%20plantas%20para%20su%20crecimiento.. [Último acceso: 12 julio 2023].

- [1 W. Paucar y R. Rubio, «Caracterización físico químico del cuesco y fibra obtenidos del
8] procesamiento de palma africana para un aprovechamiento eficiente de la energía térmica en calderas,» *uniminuto*, vol. 6, nº 21, pp. 110-126, 2021.

5 ANEXOS

Los siguientes Anexos se muestran a continuación:

ANEXO I. Características técnicas de las alternativas técnicas planteadas.

ANEXO II. Evaluación de criterios para la selección de alternativas.

ANEXO I

- **Alternativa A:** Turboden Heat Recovery (HR) Units - TURBODEN 6/7 HR DE [9]

TURBODEN 6/7 HR DE			
		Range of Operation	Reference Case TD 6 HR
INPUT* - Thermal Oil			
Thermal Oil inlet temperature	°C	240-300	270
Thermal Oil outlet temperature	°C	170-120	140
Thermal power input	MW	2.5-4.0	3.0
<i>Thermal Oil inlet temperature</i>	<i>°F</i>	<i>464-572</i>	<i>518</i>
<i>Thermal Oil outlet temperature</i>	<i>°F</i>	<i>338-248</i>	<i>284</i>
<i>Thermal power input</i>	<i>MMBtu/hr</i>	<i>8.53-13.65</i>	<i>10.24</i>
OUTPUT** - Cooling Water			
Typical cooling water temperature (in/out)	°C	25/35	25/35
Thermal power to condenser	MW	2.0-3.5	2.4
<i>Typical cooling water temperature (in/out)</i>	<i>°F</i>	<i>77/95</i>	<i>77/95</i>
<i>Thermal power to condenser</i>	<i>MMBtu/hr</i>	<i>6.82-11.94</i>	<i>8.19</i>
PERFORMANCES			
Gross electric power	kW	500-800	600
Gross electric efficiency***		17%-20%	20%
Captive power consumption	kW	18-36	25
Net active electric power output	kW	480-760	575
Net electric efficiency***		16%-19%	19%
Electric generator****		50Hz, 400V 60Hz, 480V	50Hz, 400V 60Hz, 480V
Cooling systems		closed loop water cooling or wet tower	
Typical delivery time (EXW)	Months	9-11	

Figure 5.1. Información técnica del equipo: Turboden Heat Recovery (HR) Units - TURBODEN 6/7 HR DE [9]

- **Alternativa B:** Rank® HTC1 [10]

Rank® HTC1

Technical Data

	Heat source	Heat transfer fluid *	Thermal Oil	-
		Inlet temperature	180-210	°C
		Outlet temperature	120-150	°C
		Volumetric flow rate	13	m³/h
		Thermal power	300-500	kWt
		Connections diameter	DN80 PN16	-
		Pressure drop	50	kPa
Heat transfer fluid inner volume	45	L		
	Useful heat	Heat transfer fluid	Water	-
		Inlet temperature	45-65	°C
		Outlet temperature	60-80	°C
		Volumetric flow rate	19	m³/h
		Thermal power	200-350	kWt
		Connections diameter	DN80 PN16	-
		Pressure drop	100	kPa
Heat transfer fluid inner volume	60	L		
	Electricity	Gross power	25-45	kWe
		Net power	20-35	kWe
		Voltage	3 x 400	V
		Frequency	50	Hz
		Intensity	82	A
Data Connection			RJ45	-
Container transport (optional)			HC 20'	
			HC (high cube)	

* The heat transfer fluid can be water, steam, or thermal oil

HC (high cube)

Figure 5.2. Información técnica del equipo: Rank® HTC1 [10]

- **Alternativa C: ENO-180LT [11]**

ENO-180LT CHARACTERISTICS		
Electrical ratings	Maximum gross electric power	180 kWe
	Grid connection	400V, 3ph, 50-60 Hz
Heat source	Temperature range	70-120°C
	Thermal power input range	1400-2400 kWth
	Hot source medium	Water, steam, oil
	Hydraulic connections	DN 150, PN 16
Cold source	Temperature range	0-60°C
	Working fluid	Water
	Cooling system	Dry cooler, cooling tower
	Hydraulic connections	DN 200, PN 16
Main components	Working fluid	R1233zd
	Generator	Medium speed, permanent magnet
	Expander	Kinetic turbine
	Heat exchangers	Brazed plate
	Pump	Multi-stage magnetic coupling
	Controls	Industrial PLC
	Monitoring	Remote web support
Main ratings	Weight	7000 kg
	Dimensions L x w x h	2,3m x 2m x 2,6m
	Environmental	IP 20
	Noise level @10m	60 dB
	Design lifetime	20 yrs
	Safety	Non flammable, non toxic, ODP=0
Norm compliance	Machine directive	2006/42/EG
	PED	2014/68/EU
	Electrical norms	2014/35/EG
	Norm compliance	VDE-0126 (G59, VDE-ARN, UL, etc.)

Figure 5.3. Información técnica del equipo: ENO-180LT [11]

ANEXO II

Tabla 2.10. Evaluación del criterio de temperatura de trabajo

Alternativa A = Alternativa B > Alternativa C					
Temperatura de Trabajo	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C	$\Sigma +1$	Ponderación
Alternativa A		1	1	3	0,5
Alternativa B	0		1	2	0,33
Alternativa C	0	0		1	0,17
Suma				6	1

Tabla 2.11. Evaluación del criterio de Eficiencia energética

Alternativa A = Alternativa B > Alternativa C					
Eficiencia energética	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C	$\Sigma +1$	Ponderación
Alternativa A		1	1	3	0,5
Alternativa B	0		1	2	0,33
Alternativa C	0	0		1	0,17
Suma				6	1

Tabla 2.12. Evaluación del criterio de costo

Alternativa A = Alternativa B > Alternativa C					
Costo	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C	$\Sigma +1$	Ponderación
Alternativa A		0,5	0	1,5	0,25
Alternativa B	0,5		0	1,5	0,25
Alternativa C	1	1		3	0,5
Suma				6	1

Tabla 2.13. Evaluación del criterio de disponibilidad en el mercado

Alternativa A = Alternativa B > Alternativa C					
Disponibilidad en el mercado	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C	$\Sigma +1$	Ponderación
Alternativa A		1	1	3	0,5

Alternativa B	0		0,5	1,5	0,25
Alternativa C	0	0,5		1,5	0,25
			Suma	6	1

Tabla 2.14. Evaluación del criterio de Mantenimiento

Alternativa A = Alternativa B > Alternativa C					
Mantenimiento	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C	$\Sigma +1$	Ponderación
Alternativa A		1	1	3	0,5
Alternativa B	0		1	2	0,33
Alternativa C	0	0		1	0,17
			Suma	6	1