

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL



**TESIS**

**“ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL GRADIENTE TERMICO EN EL  
OCÉANO PACÍFICO PERUANO PARA LA GENERACIÓN DE  
ENERGÍA TERMICA OCEANICA (OTEC)”**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

**INGENIERO AMBIENTAL**

ELABORADO POR:

**JHON BRAYAN CASTRO APARICIO**

ASESOR:

**MG. ING. OMAR BEJARANO GRÁNDEZ**

**2023**

Dedicatoria:

A mi abuela Elsira por encaminar mis pasos desde mi niñez y ser mi amiga en el camino de mi vida, a mis padres por su ejemplo y amor, a mi hermana, a mi persona favorita y, por último, pero no menos importante, a mi persona por lograr la meta trazada.

Agradecimientos:

Agradezco al Mg. Ing. Omar Bejarano Grández por el seguimiento, esfuerzo y paciencia en el desarrollo de la presente investigación, su calidad de amigo y maestro. También al Lic. Pedro Picoy Aylas por su calidad de maestro y amigo durante esta etapa universitaria.

## RESUMEN

En el Perú, la fuente termoeléctrica representa el 54.25% de la matriz energética, por lo que las emisiones de dióxido de carbono representan un problema en el planeta y por lo tanto en el país debido a que el dióxido de carbono representa unos de los principales gases de efecto invernadero que contribuye al calentamiento global, de ahí la necesidad de implementar energías renovables en la matriz energética como una solución. Asimismo, se plantea aumentar en un 10% el uso de energías renovables no comunes en el Perú (OSINERGMIN, 2016).

Por tales motivos, se consideró la gradiente de temperatura que existe en los océanos como una energía renovable no común aprovechable para el Perú.

La energía renovable propuesta se denomina “Energía Térmica Oceánica”, el cual aprovecha el desnivel de temperatura en el océano para la producción de electricidad y desalinizar el agua proveniente del mar.

De la recolección de datos del Instituto del Mar Peruano se realizó simulaciones en la región de Tumbes debido que esta zona tiene la característica de superar los 27°C, con ello evaluar el tiempo de vida de la planta, el consumo de bombas, el potencial energético, la eficiencia de planta y la evaluación económica.

Como resultado general de las simulaciones del potencial energético de la planta de Energía Térmica Oceánica en la región de Tumbes se determinó que el sistema responde a las necesidades hacia un modelo con menor dependencia del combustible fósil y que la simulación 31 es considerada como la óptima ( $z=1000$ ,  $z'=100$  y estación de verano), para lo cual el consumo de bombas es de 1.834 MW, la eficiencia térmica  $\eta= 3.7809\%$ , la función  $\psi = 10.090$  US\$/W y un LCOE = 0.1657 US\$/kWh.

Palabras clave: *generación eléctrica, energías renovables, OTEC, evaluación económica, potencial energético.*

## ABSTRACT

In Peru, the thermoelectric source represents 54.25% of the energy matrix, so carbon dioxide emissions represent a problem on the planet and therefore in the country because carbon dioxide represents one of the main greenhouse gases that contribute to global warming, hence the need to implement renewable energies in the energy matrix as a solution. Likewise, it is proposed to increase by 10% the use of non-common renewable energies in Peru.

For these reasons, the temperature gradient that exists in the oceans was lost as a non-common renewable energy that could be used by Peru.

The proposed renewable energy is called "Ocean Thermal Energy", which takes advantage of the unevenness of temperature in the ocean to produce electrical energy and to desalinate seawater.

From the collection of data from the Peruvian Sea Institute, simulations were carried out in the Tumbes region since this area has the characteristic of exceeding 27°C, thereby evaluating the lifetime of the plant, the consumption of pumps, the energy potential, plant efficiency and economic evaluation.

As a general result of the simulations of the energy potential of the Oceanic Thermal Power plant in the Tumbes region, it was determined that the system proposed in this study responds to the needs of the evolution towards a model with less dependence on fossil generation and that the Simulation 31 is considered the optimal one ( $z=1000$ ,  $z'=100$  and summer season), for which the consumption of pumps is 1,834 MW, the thermal efficiency  $\eta= 3.7809\%$ , the function  $\psi = 10,090$  US\$/ W and an LCOE = 0.1657 US\$/kWh.

*Key words: electricity generation, renewable energy, OTEC, economic evaluation, energy potential*

# INDICE

<b>CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes .....	2
1.2 Planteamiento del problema .....	4
1.2.1 Formulación del problema .....	4
1.3 Justificación y motivación .....	5
1.4 Objetivos .....	7
1.4.1 Objetivo general .....	7
1.4.2 Objetivos específicos .....	7
1.5 Formulación de Hipótesis .....	7
1.6 Alcance .....	7
<b>CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>9</b>
2.1 La Energía Solar Directa .....	9
2.2 Características Físicas del Océano .....	9
2.2.1 Perfiles Físicos del Océano.....	10
2.2.2 Temperatura superficial del océano .....	11
2.2.3 Gradiente Térmico Global .....	13
2.2.4 Termoclina Estacional .....	14
2.3 Tipos de Energía Renovable en el Océano .....	15
2.4 Energía Térmica Oceánica (OTEC).....	16
2.4.1 Identificación del análisis del área mediante análisis PEST y método PROMETHEE .....	16
2.4.2 Bases de datos del Instituto del Mar Peruano (IMARPE).....	16
2.5 Teoría de Funcionamiento OTEC .....	17
2.6 Planta On-Shore.....	17
2.7 Planta fuera de la costa (Off – shore) .....	18

2.8	Componentes de una planta OTEC .....	19
2.8.1	Intercambiadores .....	19
2.8.2	Sistema de bombeo .....	20
2.8.3	Generador eléctrico.....	21
2.8.4	Fluido de trabajo .....	22
2.9	Sistema para el aprovechamiento de la OTEC .....	22
2.9.1	Ciclo Rankine Cerrado .....	23
2.9.2	Ciclo Rankine Abierto.....	24
2.9.3	Ciclo Rankine Híbrido.....	25
2.10	Revisión de proyectos OTEC .....	25
2.10.1	Los primeros dispositivos de la tecnología OTEC .....	25
2.10.2	Proyectos de plantas OTEC en el mundo.....	26
2.11	Evaluación económica.....	28
2.12	Estimación del tiempo de vida de la máquina térmica .....	29
2.13	Comparación de las condiciones económicas de tecnologías energéticas.....	29
2.14	Matriz de Leopold modificada.....	30
2.14.1	Carácter del impacto en evaluación ambiental .....	30
2.14.2	Intensidad del impacto .....	30
2.14.3	Extensión del impacto .....	31
2.14.4	Duración del impacto.....	31
2.14.5	Reversibilidad del impacto.....	31
2.14.6	Riesgo del impacto.....	32
2.14.7	Magnitud e importancia del impacto .....	32
	<b>CAPÍTULO III METODOLOGÍA .....</b>	<b>35</b>
3.1	Tipo y enfoque de la investigación.....	35

3.2	Fuentes y técnicas de recolección de información.....	35
3.3	Variables de la investigación .....	35
3.4	Diseño experimental.....	36
3.5	Recolección de información.....	37
3.5.1	Solicitud de acceso a la información pública y organización de datos .....	37
3.5.2	Selección de la zona óptima para la implementación de la tecnología OTEC .....	38
3.5.3	Evaluación y delimitación de la zona de estudio.....	38
3.6	Estimación de los parámetros físicos – térmicos .....	40
3.6.1	Descripción de la estación tumbes .....	40
3.6.2	Descripción de los parámetros de la zona de estudio.....	41
3.6.3	Determinación de las temperaturas superficiales y las aguas profundas .....	41
3.6.4	Descripción de la salinidad del mar .....	43
3.6.5	Perfil batimétrico .....	43
3.6.6	Diseño del sistema OTEC .....	44
3.7	Metodología planteada para la estimación del Gradiente térmico y el potencial energético .....	45
3.7.1	ORC Turbina .....	45
3.7.2	Potencia de la bomba del refrigerante .....	46
3.7.3	Evaporador .....	46
3.7.4	Condensador.....	47
3.7.5	Ducto de agua fría.....	49
3.7.6	Potencia de la bomba de agua fría .....	51
3.7.7	Potencia de la bomba de agua caliente.....	55
3.7.8	Volumen del evaporador y condensador .....	58



3.7.9	Potencia del Evaporador FLASH.....	58
3.7.10	Evaluación del sistema.....	59
3.7.11	Propiedad de ciclo hibrido .....	59
3.8	Evaluación del potencial energético .....	63
3.8.1	Potencia base del sistema.....	63
3.8.2	Estimar la eficiencia de la planta OTEC .....	63
3.8.3	Parámetros de diseño .....	65
3.8.4	Función Psi .....	66
3.8.5	Sistemas propuestos.....	67
3.9	Aspecto económico y ambiental .....	68
3.9.1	Estimación del costo nivelado eléctrico .....	68
3.9.2	Evaluación del tiempo de vida de la planta OTEC .....	69
3.9.3	Aspecto Ambiental .....	69
	<b>CAPÍTULO IV RESULTADOS .....</b>	<b>71</b>
4.1	Selección de profundidad de captación y retorno para 20 MW .....	71
4.1.1	Flujo de agua fría .....	71
4.1.2	Flujo refrigerante .....	76
4.1.3	Caída de presión en el flujo de agua fría .....	77
4.1.4	Potencia de las bombas .....	79
4.1.5	Eficiencia de la planta OTEC.....	81
4.1.6	Función $\psi$ .....	81
4.2	Estimación del LCOE de la planta OTEC .....	82
4.2.1	Parámetros de diseño para obtener el LCOE óptimo .....	82
4.2.2	Evaluación de la LCOE .....	83
4.3	Aspecto e impacto ambiental significativo .....	83
4.3.1	Actividades generadoras de impactos.....	83

4.3.2 Factores ambientales .....	85
4.3.3 Matriz de la valoración de impactos .....	85
<b>CAPÍTULO V DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS .....</b>	<b>86</b>
5.1 Evaluación de la Función $\Psi$ para la planta óptima OTEC para cada estación del año .....	86
5.2 Discusión del LCOE para planta optima OTEC .....	88
5.2.1 Evaluación del LCOE para la planta óptima OTEC para cada estación del año .....	88
5.2.2 Comparación del LCOE de la planta OTEC propuesta con LCOE de otras alternativas de energía renovable.....	88
5.2.3 Comparación del LCOE de la planta OTEC propuesta con LCOE de antecedentes de plantas OTEC.....	89
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>90</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>92</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>93</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Resumen de proyectos OTEC anteriores.....	26
Tabla 2.	Ecuaciones del costo de los componentes del sistema hibrido .....	28
Tabla 3.	Estado del arte de los estudios de caso sobre economía OTEC.....	29
Tabla 4.	Comparación de los LCOE.....	29
Tabla 5.	Criterio de valorización de impactos ambientales.....	32
Tabla 6.	Escala de valoración de la magnitud e importancia del impacto.....	34
Tabla 7.	Escala de valoración de la severidad del impacto .....	34
Tabla 8.	Salinidad vs profundidad.....	43
Tabla 9.	Parámetros de diseño para los sistemas.....	65
Tabla 10.	Temperatura superficial promedio para cada estación del año .....	67
Tabla 11.	Simulación de la planta OTEC .....	68
Tabla 12.	Diámetro optimo del ducto de agua fría (m) para 20 MW .....	76
Tabla 13.	Flujo masico del refrigerante (kg/s) en el ciclo cerrado Rankine.....	77
Tabla 14.	Parámetros de diseño para el cálculo del LCOE .....	82
Tabla 15.	LCOE para los sistemas propuestas a TSMp.....	83
Tabla 16.	LCOE para los sistemas propuestas a TSMp.....	83
Tabla 17.	Factores Ambientales .....	85

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Perfiles típicos de temperatura, salinidad y densidad en el océano..	11
Figura 2.2	Temperatura superficial del Mar del Perú.....	12
Figura 2.3	Gradiente térmico de los Océanos .....	13
Figura 2.4	Perfil en el océano .....	14
Figura 2.5	Fases de desarrollo de las tecnologías renovables provenientes del océano.....	15
Figura 2.6	Ciclo de Energía OTEC.....	17
Figura 2.7	Esquema conceptual de una planta OTEC On-Shore .....	18
Figura 2.8	Esquema conceptual de una planta OTEC Off-Shore .....	19
Figura 2.9	Diseño de intercambiadores.....	20
Figura 2.10	Bomba centrífuga radial .....	21
Figura 2.11	Generador síncrono .....	21
Figura 2.12	Ciclo Rankine Cerrado .....	23
Figura 2.13	Ciclo Rankine Abierto.....	24
Figura 2.14	Ciclo Rankine Híbrido.....	25
Figura 3.1	Diagrama de variable controlable, no controlables, entrada y salida .....	36
Figura 3.2	Diagrama de flujo.....	37
Figura 3.3	Red de estaciones oceanográficas en el litoral peruano .....	39
Figura 3.4	Series de tiempo mensuales de temperatura superficial en Tumbes.....	39
Figura 3.5	Series de tiempo mensuales de temperatura superficial en Chicama.....	40
Figura 3.6	Ubicación de la Planta OTEC.....	41

Figura 3.7	Temperatura superficial promedio por mes evaluada desde agosto 2020 hasta julio 2021 .....	42
Figura 3.8	Temperatura promedio para aguas profundas .....	42
Figura 3.9	Mapa de la zona disponible para la implementación de la Planta OTEC.....	43
Figura 3.10	Mapa de la Batimetría en tres dimensiones del Litoral Peruano .....	44
Figura 3.11	Diseño termodinámico de la planta OTEC .....	44
Figura 3.12	Dimensiones de las placas del intercambiador .....	53
Figura 3.13	Diagrama del ciclo Rankine cerrado.....	60
Figura 4.1	Flujo de masa agua fría óptimo para la simulación 43.....	71
Figura 4.2	Flujo de masa agua fría óptimo para la simulación 44.....	72
Figura 4.3	Flujo de masa agua fría óptimo para la simulación 45.....	72
Figura 4.4	Flujo de masa agua fría óptimo para la simulación 14.....	73
Figura 4.5	Flujo de masa agua fría óptimo para la simulación 15.....	73
Figura 4.6	Flujo de masa agua fría óptimo para la simulación 16.....	74
Figura 4.7	Flujo de masa agua fría óptimo para la simulación 28.....	74
Figura 4.8	Flujo de masa agua fría óptimo para la simulación 29.....	75
Figura 4.9	Flujo de masa agua fría óptimo para la simulación 30.....	75
Figura 4.10	Flujo masico de agua fría en función de z.....	76
Figura 4.11	Caída de presión $\Delta P$ BF en el flujo de agua fría para z = 600 m y TSMp .....	77
Figura 4.12	Caída de presión $\Delta P$ BF en el flujo de agua fría para z = 800 m y TSMp .....	78
Figura 4.13	Caída de presión $\Delta P$ BF en el flujo de agua fría para z = 1000 m y TSMp .....	78
Figura 4.14	Caída de presión $\Delta P$ BF en el flujo de agua fría para z '= 100 m y TSMp .....	79

Figura 4.15	Consumo energético de las bombas para $z=600$ .....	79
Figura 4.16	Consumo energético de las bombas para $z=800$ .....	80
Figura 4.17	Consumo energético de las bombas para $z=1000$ .....	80
Figura 4.18	Consumo energético de las bombas para $z'=150$ .....	80
Figura 4.19	Eficiencia de la planta $\eta p$ para los sistemas propuestas a TSMp.....	81
Figura 4.20	Función $\psi$ para los sistemas propuestos TSMp .....	82
Figura 5.1	Sistema de captación y descarga óptimo .....	86
Figura 5.2	Función $\psi$ para los sistemas propuestos 31, 34,37 y 40 .....	87
Figura 5.3	Función $\Pi$ para los sistemas propuestos 31, 34,37 y 40 .....	87
Figura 5.4	LCOE para los sistemas propuestos 31, 34,37 y 40.....	88
Figura 5.5	LCOE (\$/MWh) – Energías Renovables y Convencionales 2018 .....	89
Figura 5.6	LCOE de proyectos OTEC en diferentes países .....	89

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

El problema del calentamiento global es derivado por el exceso de gases de efecto invernadero ( $CO_2$ ,  $NO_2$  y  $CH_4$ ), generados por actividades humanas y el excesivo consumismo, se registra un aumento de la temperatura de 1.1 °C en comparación del siglo XIX (Unidas, 2017). Este efecto es producido principalmente durante la combustión de las fuentes de energía fósiles, como el carbón o el petróleo. En ese sentido, los combustibles fósiles suponen en la actualidad un 81% del uso energético a escala mundial. Si bien, en el consumo energético mundial el 35% corresponde al petróleo, el carbón corresponde al 25%, el gas natural a un 21%, la biomasa un 10%, la energía nuclear a un 6% y las energías renovables ocupan un 3%; generando así, las emisiones de gases de efecto invernadero en todo el planeta(Energía, 2015).

Estos gases de efecto invernadero, aparte de generar cambios en la temperatura media, generan un impacto negativo en la calidad del aire, es por ello, que la contaminación del aire por la quema de combustible fósiles genera alrededor de 4.5 millones de muertes anuales en todo el mundo, así como también genera una pérdida económica estimada en 2.9 billones de dólares por año de igual manera (Greenpeace, 2020). Además, la Organización Mundial de la Salud indica que la contaminación del aire ocasionada por la quema de combustibles fósiles en plantas de energía, humos industriales y vehículos automotores son responsables de la muerte de alrededor de medio millón de personas en el mundo y también es la causa de bronquitis crónica en aproximadamente 4 a 5 millones individuos(OMS, 2012).

La situación del Perú según el informe Balance Nacional de Energía del 2018 del Ministerio de Energía y Minas (en adelante, MINEM) (Minas, 2018), indica que en la matriz energética del Perú el gas natural corresponde al 54%, el petróleo crudo a un 9%, los líquidos de gas natural a un 14% y la hidroenergía a un 20%, evidenciando de esta forma, que la mayor parte de producción de energía corresponde al uso de combustible fósil. Entonces, las emisiones de dióxido de carbono, en ese año, provenientes de la transformación de la energía primaria corresponde a 17,7 millones de kilogramos.

Respecto a los consumos finales, las emisiones de dióxido de carbono, en el periodo de 2013-2016, se incrementaron de 33,4 a 37,9 mil millones de kilogramos, generados mayormente por los consumos en los sectores de transporte e industria.

Estas emisiones de  $CO_2$  en el Perú son parte del problema del calentamiento global, impactan negativamente en la calidad de aire del país y afectan la salud de su población. En respuesta a ello el MINEM advierte que para el año 2030 en el Perú el 15% de la matriz energética se generará con energías renovables, dado que para el año 2020, el porcentaje es de aproximadamente del 5%. El desarrollo de la energía térmica oceánica podría ser una alternativa óptima para este propósito de emplear mayores fuentes de energía renovables en nuestra matriz energética y de esta manera no seguir perjudicando la salud de la población.

## **1.1 Antecedentes**

A lo largo de estos últimos cuatro (4) años la OTEC se ha ido desarrollando en cuanto al aumento de su eficiencia, la selección del lugar adecuado de la planta, la evaluación del aspecto económico y ambiental. En así que, se detallan los artículos de investigación seleccionados para la estimación del potencial de la OTEC:

En el artículo de investigación de mayo de 2018 por el autor Zhang, detalla que, debido al desarrollo de la energía térmica oceánica, propone los siguientes tres sistemas: el ciclo cerrado, ciclo abierto y ciclo híbrido. Los sistemas propuestos consideran importante la evaluación económica, potencial energético, eficiencia, evaluación de funciones y evaluación del impacto ambiental, por lo cual el presente trabajo de investigación tomará en cuenta este artículo para la selección del sistema de la máquina térmica (W. Zhang et al., 2018).

En el artículo de investigación desarrollado en el año 2018 por los autores Clark C.K. y Liu detallan que la OTEC es una energía renovable que utiliza la temperatura del océano a profundidades (en adelante, DOW) y la temperatura del océano superficial para producir energía eléctrica con el principio de flujo de calor, asimismo detalla que las propiedades del DOW poseen propiedades ricas en nutrientes para la maricultura marina y libre de bacterias patógenas. Por lo mencionado, el artículo señala que es posible solucionar cuatro de los problemas mundiales más urgente: energía, agua dulce, alimentos



y calentamiento global, para ello en esta investigación se tomará en cuenta los beneficios del ciclo ranking abierto y retirar la DOW rico en nutrientes a la superficie para el desarrollo de la maricultura marina (Liu, 2018).

En el artículo del año 2019 elaborado por el autor Jinying Zhang indica que la selección del sitio es un factor clave para el éxito del proyecto de conversión de la planta OTEC. Se resuelve este problema de toma de decisiones con una metodología de criterios múltiples (en adelante, MCDM). Sin embargo, en este artículo se muestran casos y problemas existentes en los métodos clásicos de MCDM para la toma de decisiones de selección de sitio OTEC, es por ello como solución de la dificultad se propone un método extendido MCDM y establece un nuevo marco de toma de decisiones para seleccionar la ubicación óptima. Primero, un complemento sistema de criterios de evaluación para la selección del sitio de OTEC. En segundo lugar, los sitios alternativos viables para el proyecto, esto se desarrolla mediante el análisis "Político, Económico, Social y tecnológico (en adelante, PEST)". Por último, se usó el método de organización de clasificación de preferencias para la evaluación de enriquecimiento, con ello se propone un ambiente difuso intuitivo para evitar suposiciones de compensación. En ese sentido, para el presente trabajo de investigación se desarrollará con la metodología de selección del sitio OTEC (J. Zhang et al., 2019).

En el artículo de investigación del año 2019 desarrollado por el autor Yilmaz, Fatih, se propone un sistema de ciclo híbrido para satisfacer las demandas diarias energética para una estación de servicio en Antalya, Turquía, es así que se obtuvo los siguientes resultados: la eficiencia energética total y eficiencia energética de la planta de conversión de la planta OTEC son 4.49% y 14.87%, respectivamente (Yilmaz, 2019).

En el artículo de investigación del año 2020 desarrollado por Langer detalla que la OTEC es una energía renovable con un potencial global de hasta 30 TW, su potencial económico es desconocido ya que sigue siendo una tecnología inmadura. En este artículo se basó en literatura académica e industrial reciente desde el año 2005 hasta el año 2020, para proporcionar una visión general y una discusión crítica de las prácticas actuales en la evaluación de la economía de OTEC. En ese sentido, se verifican siete brechas de conocimientos, cuáles son las siguientes (Langer et al., 2020):

- Los análisis económicos actuales se centran en plantas individuales en lugar de las economías colectivas.
- Las influencias naturales específicas de la ubicación en la salida de potencia neta real son mayormente omitidas.
- Existe incertidumbre sobre los costos de capital tanto a nivel de sistema como de componentes.
- Existen incertidumbres sobre los costos operativos y propiedades como vida útil.
- El impacto de las tasas de interés y su selección no son discutidas en las investigaciones.
- El aprendizaje tecnológico se omite predominantemente en la literatura OTEC.
- Los análisis económicos se limitan principalmente a costo nivelado de electricidad (LCOE), mientras que otras herramientas como el periodo de recuperación y la tasa de rendimiento (TIR) son descuidados.

En ese sentido, la presente investigación tomará en cuenta en análisis de la vida útil del sistema OTEC.

## **1.2 Planteamiento del problema**

De acuerdo con la introducción expuesta, los consumos de combustibles fósiles representan un problema para el Perú y el planeta, por lo que la obtención de energía eléctrica a través de energía renovables sería una solución para la disminución de emisiones gases de efecto invernadero (en adelante, GEI) al ambiente y la mejora de la calidad de aire en el país.

### **1.2.1 Formulación del problema**

“¿La implementación de la tecnología Energía térmica oceánica (OTEC) en el Océano pacífico peruano será favorable, para la producción de energía eléctrica y agua potable?”

Si bien la energía térmica oceánica (OTEC), sería una alternativa para generar energía eléctrica y agua potable, para poder calcular el potencial energético del océano pacífico del Perú es necesario el conocimiento de algunos factores que conducen al cálculo, es en este sentido que se plantearon las siguientes preguntas:

- ¿Cuál será la mejor región o área en el océano pacífico del Perú para implementar la tecnología de la energía térmica oceánica?
- ¿Cuál es el ciclo Rankine adecuado para el aprovechamiento de la energía térmica oceánica?
- ¿Cuál es el potencial impacto ambiental debido a una implementación de una planta de energía térmica oceánica (OTEC)?
- ¿Cuál es el impacto económico que llevaría una implementación de una planta de energía térmica oceánica (OTEC)?

### **1.3 Justificación y motivación**

La demanda de energía eléctrica en el mundo está en aumento, debido a la globalización, progreso económico y el aumento de la población humana. Según los datos del Banco Mundial, el consumo de energía eléctrica aumentó aproximadamente un 160% desde 1960 hasta 2014 (Bank, 2014). Asimismo, para la producción de energía eléctrica, los combustibles fósiles seguirán siendo la fuente principal y se espera que se encuentre alrededor del 84% de la demanda de energía en 2030 (Database, 2008).

Además, la Unión Europea tiene como objetivo reducir las emisiones de gases de efecto invernadero<sup>1</sup> (en adelante, GEI) en un 80 % - 95 % en el 2050, mediante la sustitución de la producción de la energía fósil por alternativas renovables (European Commission, 2012). Cabe resaltar que, la energía solar, eólica y de biomasa son más prominente entre las fuentes de energía renovable en el Perú. Sin embargo, la OTEC es importante en sistemas de producción de energía como en los países de México, Estados Unidos y China.

---

<sup>1</sup> Los gases de efecto invernadero son componentes gaseosos de la atmósfera, naturales y resultantes de la actividad humana, que absorben y emiten radiación infrarroja y esta propiedad causa el efecto invernadero.

El calentamiento global es conocido como un peligro esencial para la producción de alimentos debido al aumento de las temperaturas en diferentes regiones de todo el mundo durante el periodo 1964 – 2007. En ese sentido, los desastres climáticos han sido la causa principal de las reducciones de maíz, arroz, cereales y trigo en el mundo. La producción de cereales se reduce entre un 9 y un 10% por la sequía en diferentes países (Lesk et al., 2016), es por ello que el Perú siendo un país con un importante subsector industrial de agricultura necesita cambiar parte de su matriz energética teniendo en cuenta obtener energía eléctrica a través de energía renovable como es la OTEC.

Por otro lado, dado que el Ministerio de Energías y Minas plantea en aumentar en un 10 % el uso de energías renovables en el Perú (OSINERGMIN, 2016), esto influencia de manera positiva para el desarrollo de las energías renovables en el país, dado que el desarrollo de energías renovables no comunes como es el de la energía térmica oceánica podría ser parte en la matriz energética del país. Asimismo, en el documento “Energías Renovables Experiencia y Perspectiva en la Ruta del Perú hacia la Transición Energética” del Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (Osinergrmin) en el capítulo de energías renovables hace mención en dos párrafos a la OTEC como una opción tentativa para el país y toma de referencia una investigación del estado del arte de OTEC, es decir una investigación que brinda solo un bosquejo de esta tecnología.

Un punto importante de la OTEC es que en ella se bombea DOW<sup>2</sup> que tiene otros usos beneficiosos potenciales como bioproductividad primaria y producción pesquera. Se conoce que los océanos abiertos son caracterizados como “Desiertos húmedos” la razón es por la falta de nutrientes, es así como la maricultura en mar abierto se puede desarrollar mediante el DOW que es rico en nutrientes

Por estas razones se deduce la necesidad del desarrollo de la tecnología OTEC en el Perú, pero primero se debe realizarse la estimación del potencial gradiente térmico de la tecnología OTEC en el área más óptima del Litoral Peruano, lo cual tiene como fin u objetivo la presente investigación. De acuerdo con lo descrito líneas arriba la matriz energética depende de los combustibles fósiles, y en el remplazo de parte de ella está la OTEC que

---

<sup>2</sup> DOW es el agua del océano profundo como nuestro próximo recurso natural

está disponible todos los días del año dado que su fuente es el desnivel de temperatura que existe en la parte superficial del océano y a profundidades.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo general**

Determinar el potencial gradiente para una determinada área del océano pacifico para su aprovechamiento en el Perú.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Obtener los datos de temperatura de las estaciones de Tumbes y Piura que resguarda el Instituto del Mar del Perú
- Determinar la región o área optima en el mar peruano para implementar la tecnología de la energía térmica oceánica.
- Determinar el ciclo térmico más adecuado para el aprovechamiento de la energía térmica oceánica y el refrigerante de trabajo
- Evaluar la simulación óptima para el sistema OTEC y la eficiencia de la planta
- Evaluar el impacto económico y ambiental debido a la implementación de una planta de energía térmica oceánica (OTEC) en el litoral peruano.

## **1.5 Formulación de Hipótesis**

La investigación demuestra mediante el análisis físico termodinámico que una planta de energía térmica oceánica en el norte del Perú tiene una eficiencia térmica mayor al 3.3%, factibilidad económica y ambiental.

## **1.6 Alcance**

En el presente trabajo de investigación comprende la estimación del potencial de la Energía Térmica Oceánica, en una zona del litoral del océano pacifico peruano. Para ello es necesario definir el alcance que tendrá la presente investigación para el aprovechamiento de la energía térmica oceánica.

En primer lugar, se seleccionará el lugar para implementar la planta de Energía térmica Oceánica<sup>3</sup> (en adelante, OTEC), que para ello se tomará una metodología extendida de criterios múltiples, en donde gracias a esta metodología se seleccionará el lugar óptimo para desarrollar OTEC. Posterior a ello, es necesario que caractericemos la zona y establecer su data correspondiente.

Segundo, se desarrollará la metodología propia para el cálculo del potencial energético, estructurando una metodología a base de los antecedentes dado que para la primera etapa que es el cálculo de la ubicación de la planta se basa en la referencia “Decision framework for ocean thermal energy plant site selection from a sustainability perspective: The case of China” (J. Zhang et al., 2019), de la misma forma para la selección de datos y la estimación de los parámetros óptimos de la planta OTEC.

Finalmente, se desarrollará la evaluación del impacto económica que conlleva el desarrollo del proyecto en el área de influencia, con ello se quiere establecer que, el presente proyecto no solo abordará temas de producción de energía, si no, también temas de aspecto económico y ambiental para enmarcar su viabilidad.

---

<sup>3</sup> En lo habitual este tipo de energía es conocido por su traducción en inglés “ocean thermal energy” que en sus siglas conllevan a la abreviatura OTEC

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

El presente capítulo detalla el fundamento teórico necesario para la obtención de los resultados del proyecto de investigación en estudio. Primero se describe la fuente de energía solar hacia el océano para entender porque este se almacena en la superficie del mar, luego definir los parámetros físicos del océano que permiten la interpretación de la OTEC, el funcionamiento de las plantas y sus componentes, el ciclo Rankine a usarse y, por último, se detalla el cálculo del potencial gradiente térmico e impacto económico que conlleva el desarrollo de la planta OTEC.

#### **2.1 La Energía Solar Directa**

La energía solar es fundamental para el desarrollo de la humanidad, considerado como fuente de energía renovable, dado que es una fuente abundante en el planeta tierra. La energía solar que recibe el planeta es resultado de un proceso de fusión nuclear que tiene lugar en el interior del Sol, ahora de toda la energía que produce en ese proceso nuestro planeta recibe menos de una milmillonésima parte. Por lo tanto, este fenómeno es que la radiación solar que llega a la superficie terrestre se puede transformar directamente en electricidad o calor. El calor, a su vez puede ser utilizado directamente para producir vapor y generar electricidad.

Es esencial comprender, que el océano es fuente diversas energías renovables, pero no todas se encuentran en el mismo desarrollo, en esta línea de tiempo depende en gran medida de superar las barreras que enfrentan los desarrolladores de energía oceánica. Figura 1. las condiciones de inversión estables y predecibles a largo plazo son esenciales. La inacción retrasará el despliegue industrial, o en el peor de los casos, da como resultado una pérdida de conocimiento acumulado y poner en peligro la posición de liderazgo global de Europa en energía oceánica (Ocean Energy Forum, 2016).

#### **2.2 Características Físicas del Océano**

Se denomina océano a las grandes masas de agua que separan a los continentes, para este capítulo se explicará en funcionamiento del recurso, entendiendo la interacción

con el clima y la irradiación solar. El más extenso es el Océano Pacífico, que con sus 180 millones de  $km^2$  supera a los otros dos océanos Atlántico e Índico. En ese sentido, el presente trabajo se deberá conocer la zona de estudio, por ello desarrollamos características del Océano Pacífico peruano, que es en donde se llevara a cabo a la estimación del potencial gradiente térmico.

### **2.2.1 Perfiles Físicos del Océano**

La oceanografía física dinámica busca comprender los procesos que gobiernan el fluido el fluido en movimiento del océano principalmente a través de teórico estudios y modelos. La termodinámica también se muestra en esta discusión, través de los procesos que gobiernan su contenido de calor y sal, por tanto, su distribución de densidad (Talley et al., 2011).

En cuanto, líneas generales las latitudes del océano están estratificadas verticalmente y se puede diferenciar tres (3) regiones: la capa límite superficial que se tiene propiedades uniformes debido a turbulencia por acción de los vientos y flujos de calor, una zona de rápida disminución de la temperatura llamada termoclina y el océano profundo donde la temperatura varía relativamente poco y esto se observa en la Figura 2.1. Es preciso indicar, que cerca del 75% de las aguas en los océanos tienen temperatura entre 0 y 4 °C. La termoclina generalmente coincide con la haloclina (zona de rápida variación de la salinidad con la profundidad) y con la pycnoclina (zona de gran gradiente vertical de densidad) (Tierra & Índico, 2012).

La razón de la existencia de aguas cálidas confinadas a la superficie es que el océano absorbe la radiación del sol. En ese sentido más del 50% de la radiación que llega a la superficie es absorbida en el primer metro de la columna de agua y aún en las aguas más claras menos del 1% de la radiación incidente penetra hasta 100 m. En regiones costeras donde hay sedimentos en suspensión y alta productividad biológica el 99% de la radiación es absorbida en los primeros 10 metros (Talley et al., 2011).



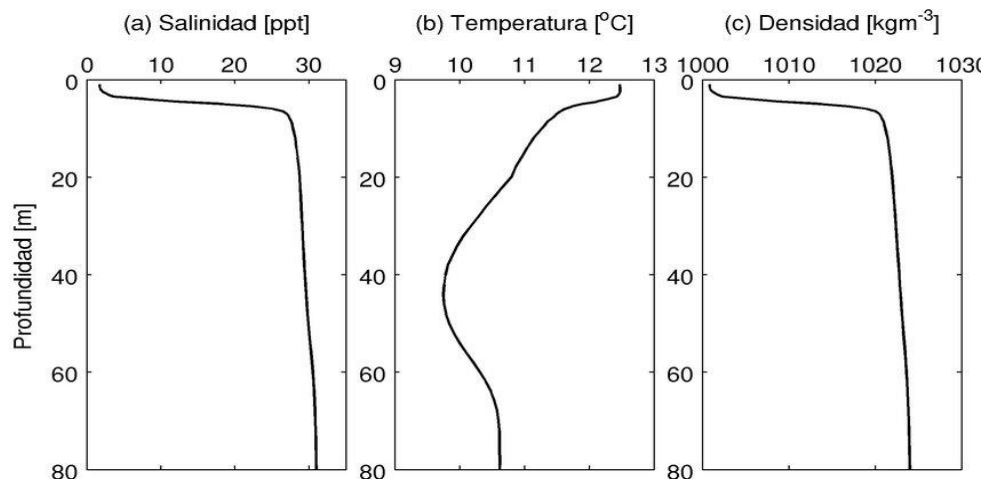


Figura 2.1 Perfiles típicos de temperatura, salinidad y densidad en el océano

Fuente: Departamento de Ciencias de la Atmosfera de la Universidad de la República

En la Figura 2.1 se muestra el comportamiento de la temperatura, salinidad y la densidad respecto de la profundidad del océano, estos parámetros son muy importantes porque definen líneas como una termoclina y la haloclina.

### 2.2.2 Temperatura superficial del océano

Al año 2020 se puede conocer la temperatura de la superficie marina a escala global con una precisión de decimas de grado centígrados (Marina et al., 2018), pero la única manera de tener información de la temperatura en profundidad sigue siendo mediante medidas in situ, es decir tomar registros de forma directa.

Los océanos son calentados a través de calor de la irradiación solar, convirtiéndose en el almacén de la mayor parte del calor mundial. Para el estudio de la temperatura de las masas de aguas se determinan mediante tres flujos de calor: el intercambio de calor entre la atmosfera y el océano, el calor transferido por advección y difusión turbulenta y el imperceptible intercambio de calor en las aguas profundas oceánicas. En ese sentido, la

temperatura superficial del mar (en adelante, SST<sup>4</sup>) juega un papel clave en el control del clima.

Se toma en cuenta que la temperatura de la superficie del océano depende de la irradiación solar que reciba y que fracción de esta refleje. En cualquier caso, la penetración de la luz solar es escasa y se reduce a los primeros metros, entre 15 m en algunas aguas costeras y 200m en aguas oceánicas abiertas muy claras muy claras, según (Dom et al., 2015).

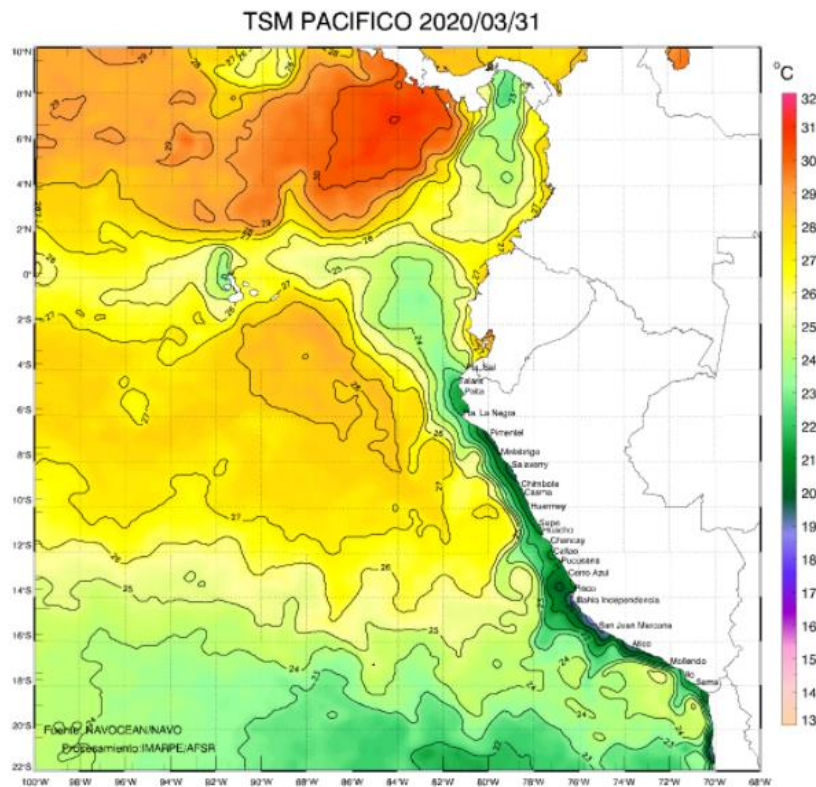


Figura 2.2 Temperatura superficial del Mar del Perú

Fuente: Boletines del Instituto del Mar Peruano (*Instituto Del Mar Del Perú*, n.d.)

En la Figura 2.2 de la temperatura superficial, se puede observar que, en la costa norte del Perú, la temperatura superficial supera los 25 °C, este dato es conveniente para el desarrollo de la OTEC.

---

<sup>4</sup> SST en sus siglas en ingles Sea Surface Temperature

### 2.2.3 Gradiente Térmico Global

Los océanos son grandes acumuladores de energía solar térmica, donde la diferencia de temperatura entre la superficie y la profundidad de varios cientos de metros genera una térmica gradiente que se puede utilizar en plantas termoeléctricas oceánicas, operando con fluidos con bajo punto de ebullición (Fabião et al., 2018). Las variables para evaluar la gradiente térmica son la temperatura de las aguas superficial y la temperatura a las aguas a profundidades.

Es necesaria una diferencia de temperatura entre las aguas superficiales y profundas del océano, de al menos 20°C para que una planta OTEC sea viable. Además de esto, el agua fría tiene que estar lo suficientemente cerca de la superficie para que sea más fácil su extracción. Es por ello que la ubicación de la planta es uno de los factores más importantes para su instalación (I. Mitrani, 2017).

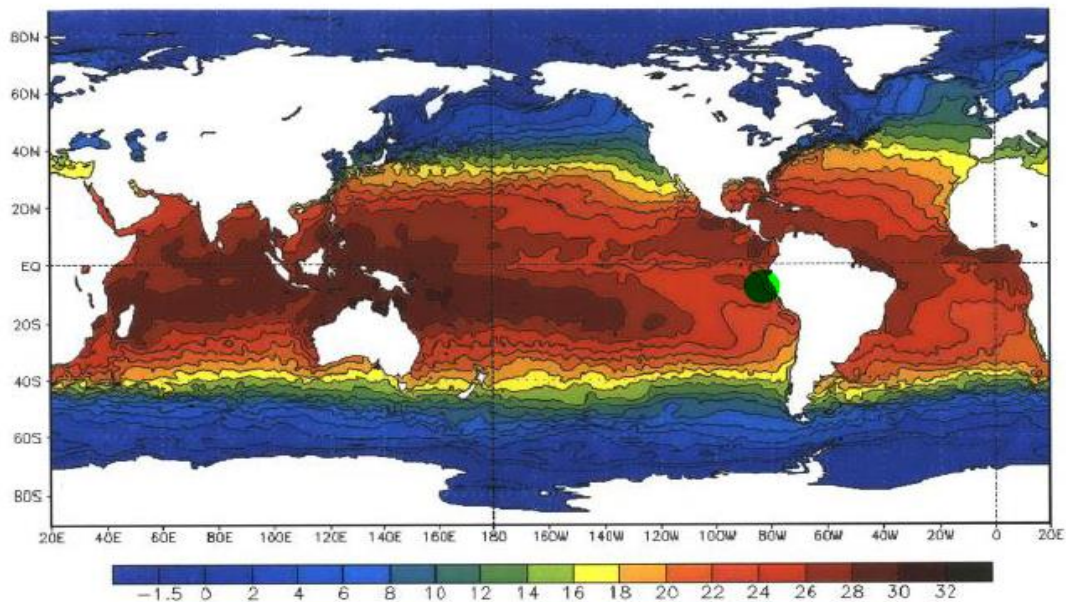


Figura 2.3 Gradiente térmico de los Océanos

Fuente: Estado del Arte, Situación y perspectivas de los Sistemas de Gradiente Térmico OTEC (Marina et al., 2018).

En la Figura 2.3 se muestra el gradiente térmico global, se observa que en el Perú se supera los 20° C y por ello es un dato interesante porque a través de esta información

se puede considerar que es factible la implementación de la OTEC en el Perú y países cercanos a la línea ecuatorial.

#### 2.2.4 Termoclina Estacional

Una de las características más importantes del océano es la gran contraposición entre el curso fútil cálida de unos 100 m de aplanamiento donde la luz es prolongado y donde existe la generalidad del vigor cuadro, con el frio y caótico océano recóndito. La circunscripción de transición entre el curso cálido y la fría se denomina termoclina. La Figura 2.4 muestra el contraste térmico y la concentración de nitrato que es un nutriente (Ciencias, 2000).

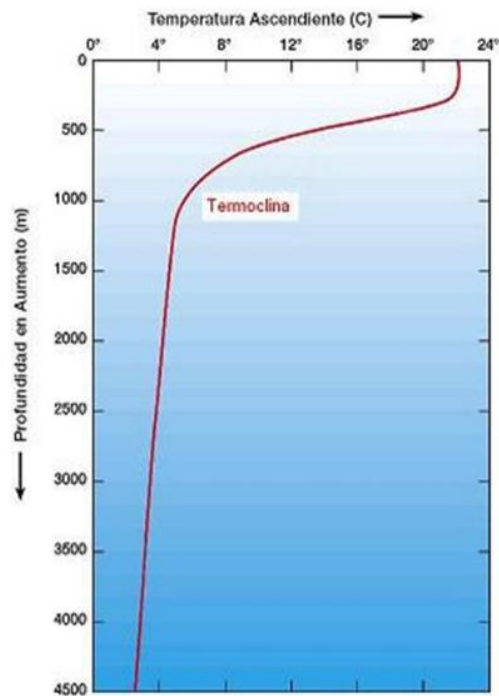


Figura 2.4 Perfil en el océano

Fuente: The Uncertain Science of Global Warming (Ciencias, 2000).

En la Figura 2.4 se muestra la termoclina el cual relaciona la temperatura superficial y la profundidad, según esta grafica se observa que cerca de los 1000 m de profundidad la temperatura suele alcanzar los 4 °C.

Se observa que aun en el ecuador la vaguada imprudente cálida es tan pizca profunda que el promedio de la temperatura es cercano a la temperatura de congelamiento. Contrariamente a la medio, la cual es calentada por debajo y la convección redistribuye el afecto en dirección a en lo alto eficientemente, el océano es calentado por arriba provocando que la cauce más cálida permanezca en superficie y la gradación tieso inhiba los movimientos verticales de las parcelas de jugo (L. A. Vega, Ph.D., Hawaii, 1999).

### 2.3 Tipos de Energía Renovable en el Océano

Es esencial comprender que el océano es fuente diversas energías renovables, pero no todas se encuentran en el mismo desarrollo, en la Figura 2.5 se da cuenta de ello. También se detalla en que etapa se encuentra la tecnología OTEC cual es “desarrollo e innovación” que es la primera etapa en el desarrollo.

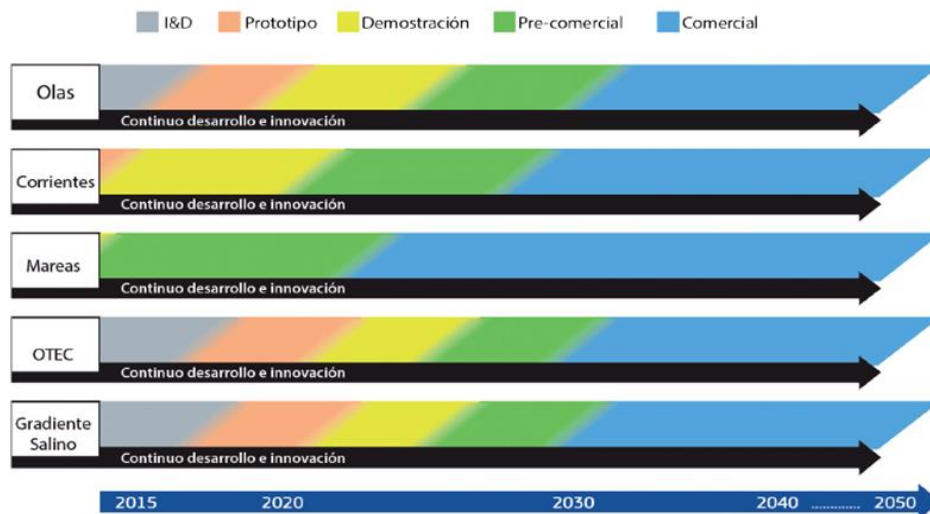


Figura 2.5 Fases de desarrollo de las tecnologías renovables provenientes del océano.

Fuente: Ocean Energy Forum and Ocean Energy strategic Roadmap 2016 (Ocean Energy Forum, 2016).

En esta línea, se muestra que la energía térmica oceánica, se encuentra en una etapa de desarrollo y se espera que para el año 2030 se encontrará en etapa comercial, lo que se considera que la presente investigación contribuye parte de su desarrollo a fin de que en lo posterior se pueda implementar.

## **2.4 Energía Térmica Oceánica (OTEC)**

La OTEC es una surgencia de empaque renovable embaldosar, el cual aprovecha el ardor de derrame que existe por la gradiente de temperatura. La vehemencia solar recolectada por el océano queda almacenada en las capas superiores del océano en los 35 a 100 metros de aplanamiento y redistribuida entre el océano y la atmósfera a instrucción de la brisa, olas, nubes, sirimiri y el calentamiento de las regiones polares. Alrededor de estas profundidades, la temperatura y salinidad del zumo se mantienen uniformes en el océano. En las zonas tropicales del asfalto, la temperatura de la envoltorio del licor es de entre 27 y 29°C mientras tanto que abajo de estas capas la temperatura disminuye hasta los 4°C o 5°C a unos 1000 metros de bajura. Pasados estos 1000 metros, la temperatura decrece unos pocos grados. Asimismo, es importante soltar que, la densidad aumenta con la empequeñecimiento de la temperatura, lo que provoca que el licor de las capas inferiores no se mezcle con las de la envoltura (Marina et al., 2018).

### **2.4.1 Identificación del análisis del área mediante análisis PEST y método PROMETHEE**

De acuerdo con la metodología de criterio múltiples (MCDM), el cual propone un nuevo marco de tomas de decisiones para la selección del área óptimo. En ese sentido, los lugares más viables para el proyecto se desarrollan mediante el análisis PEST, posterior a ello el método PROMETHEE extendido resuelve el problema de compensación e intuitivo difuso. Por lo tanto, se dividirá en siete grupos diferentes para la toma de decisiones de acuerdo con sus antecedentes, incluid la energía, construcción y mantenimiento, estado auxiliar, económico, medio ambiente y sociedad.

### **2.4.2 Bases de datos del Instituto del Mar Peruano (IMARPE)**

En el Perú el Instituto del Mar Peruano periódicamente está monitoreando el Océano Pacifico peruano y poseen información detallada sobre datos físicos como de temperatura, salinidad, densidad, microorganismos, etc. Se realizó el pedido de la información mediante una solicitud de acceso a la información pública a IMARPE, en lo cual se solicitará los perfiles térmicos del océano pacifico peruano, dentro de lo ya sabido, se conoce que las

regiones que serían óptimas para el desarrollo de la tecnología son la región de Tumbes y Piura.

## 2.5 Teoría de Funcionamiento OTEC

OTEC es un sistema de energía solar que utiliza la capacidad de almacenamiento térmico del agua del océano para impulsar un ciclo Rankine para generar electricidad. El agua superficial tibia se usa para evaporar un fluido de trabajo que pasa a través de una turbina que hace girar un generador para generar electricidad, como se muestra en la Figura 2.6. A continuación, se extrae calor del vapor del fluido de trabajo en un intercambiador de calor utilizando agua fría de las profundidades del océano, lo que hace que el vapor se condense de nuevo en líquido. Una bomba envía el fluido de trabajo de regreso al evaporador donde se repite el ciclo (Report et al., 2012).

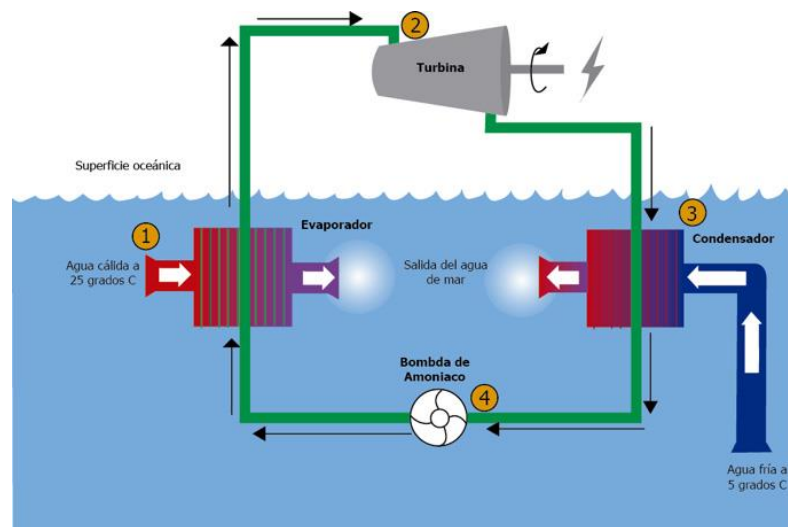


Figura 2.6 Ciclo de Energía OTEC

Fuente: Ocean Thermal Energy Conversion Life Cycle Cost Assessment (Report et al., 2012)

## 2.6 Planta On-Shore

La planta se encuentra a una distancia cercana de la costa, disminuyendo las probabilidades de daños por desastres naturales. Una de las desventajas son que se necesitan tuberías de hasta 1000 m de largo para coleccionar el agua marina y consume energía para bombear el agua a la planta, lo cual reduce la producción neta de electricidad y un costo económico; sin embargo, el mantenimiento es sencillo, no se necesitan largos



cables para transportar la energía generada, y provee agua para múltiples usos como agua potable, maricultura y aire acondicionado, haciéndola una atractiva alternativa. Otros parámetros a tomar en cuenta es que los sitios seleccionados tengan cerca mares con un buen gradiente térmico, el fondo marino debe presentar una pendiente pronunciada para tener acceso a las aguas profundas y el terreno en la costa debe ser estable, amplio y plano (L. A. Vega, Ph.D., Hawaii, 1999)(Report et al., 2012)(Bernal Franciso, 2016).

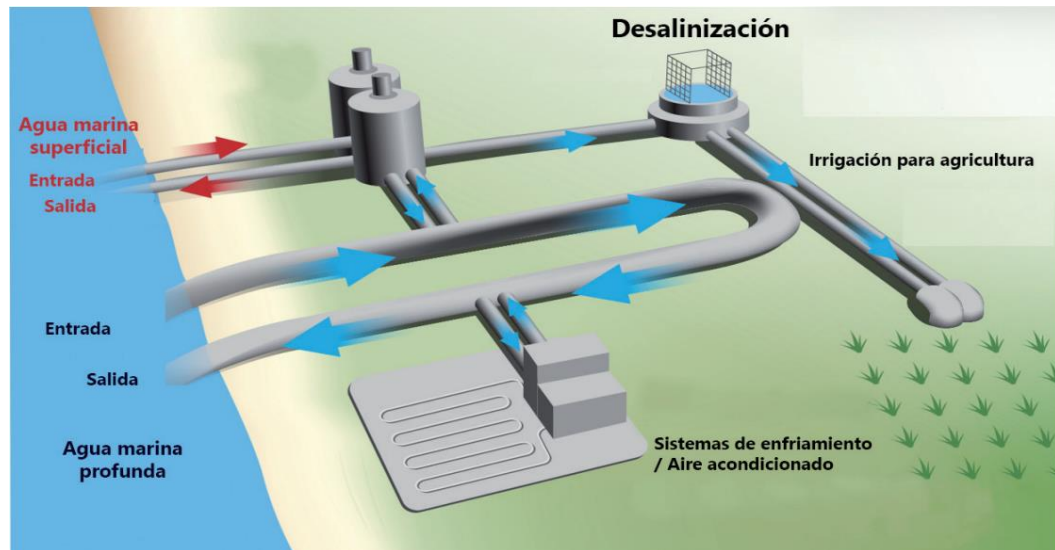


Figura 2.7 Esquema conceptual de una planta OTEC On-Shore

Fuente: Ocean Thermal Energy Corporation (Centro Mexicano de Innovación en Energía - Océano, 2017)

## 2.7 Planta fuera de la costa (Off – shore)

Las plantas cerca de la costa están amarradas al fondo del mar con electricidad transmitida a la red eléctrica en tierra a través de un cable de energía marino, de ahí el apodo de planta OTEC "Grid Connected" (Roels et al., 1977). Tienen la ventaja de que la distancia para bombeo de agua fría del mar profundo es más corta, pero requieren cables submarinos largos para llevar la electricidad a la costa. Para que la planta pueda ser conectada a los cables de energía, necesita permanecer relativamente inmóvil. Por otra parte, este tipo de sistemas pueden ser más vulnerables a tormentas o algún otro tipo de desastres naturales.





Figura 2.8 Esquema conceptual de una planta OTEC Off-Shore

Fuente: Ocean Thermal Energy Corporation (Roels et al., 1977)

## 2.8 Componentes de una planta OTEC

Es necesario conocer los conceptos básicos de los componentes principales para el diseño de una planta OTEC, los cuales son intercambiadores, bombas, refrigerantes y generador eléctrico.

### 2.8.1 Intercambiadores

Un intercambiador de calor es un equipo utilizado para enfriar un fluido que está más caliente de lo deseado, transfiriendo este calor a otro fluido que está frío y necesita ser calentado. La transferencia de calor se realiza a través de una pared metálica o de un tubo que separa ambos fluidos, esta pared metálica en las plantas OTEC son en su mayoría de material de titanio (Jacqueline Triviño, 2017)

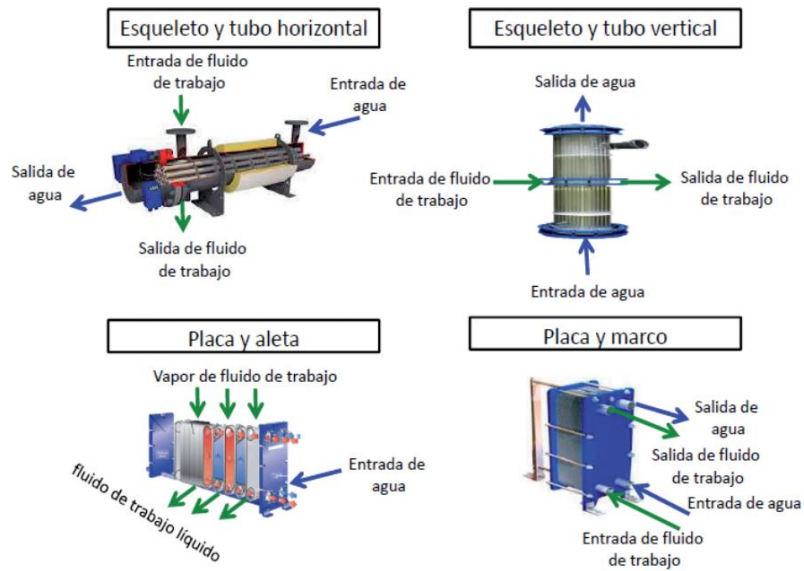


Figura 2.9 Diseño de intercambiadores

Fuente: Centro Mexicano de Innovación y Tecnología (Centro Mexicano de Innovación en Energía - Océano, 2017)

De acuerdo con los antecedentes, la Figura 2.9 muestra diseños de intercambiadores usados en plantas OTEC como son el de placa y aleta, placa y marco, esqueleto y tubo horizontal y vertical.

### 2.8.2 Sistema de bombeo

Es necesario mencionar que la energía no se crea ni se destruye, este sistema de bombeo cumple el mismo principio dado que absorbe energía mecánica y la restituye en energía hidráulica al fluido que la transita; desplazando el fluido de un punto a otro (Cortés, 2008)

El sistema de bombeo en paralelo de bombas centrifugas cumple con las condiciones para poder suministrar a la planta con el flujo de agua de mar a profundidades, de acuerdo a las siguientes consideraciones y usos (Cortés, 2008)

- Mantener un alto nivel de disponibilidad en el sistema. Con varias bombas trabajando si es que una de ellas falla o necesita mantenimiento, no causa la parada total del sistema.
- Cumplir con el volumen, caudal y potencial eléctrico requerido por el sistema.

- Las bombas centrifugas radial fueron diseñadas para bombear aguas a profundidades.

La bomba centrifuga son un tipo de bomba hidráulica que transforma la energía mecánica de un impulsor en energía cinética o de presión de un fluido incompresible (Gil Alba, 2016).



Figura 2.10 Bomba centrifuga radial

Fuente: Estudio sobre la implementación de la tecnología maremotérmica (Cortés, 2008)

### 2.8.3 Generador eléctrico

El generador eléctrico propuesto es un síncrono trifásico y este tipo de generador es una máquina rotatoria que es capaz de convertir energía mecánica a eléctrica, su mayor aplicación es en potencias elevadas. El generador propuesto no solo implica ser usado a potencias elevadas como el hecho de 20 MW, si no se obtiene una eficiencia de generación en el orden de 0.9 a 0.95 (Martínez & Andrada, 2017).

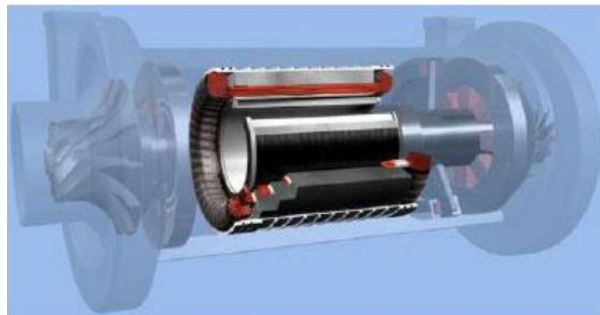


Figura 2.11 Generador síncrono

Fuente: Generadores Síncronos de Alta Velocidad (Martínez & Andrada, 2017)

#### **2.8.4 Fluido de trabajo**

Los fluidos son necesarios en plantas de ciclo cerrado e híbrido, así como sus características de operación, medioambientales y de seguridad. Los aspectos que deben tenerse en cuenta a la hora de decantarse por un fluido de trabajo son los siguientes: presión de trabajo, gasto másico, coeficiente de transferencia de calor, seguridad en condiciones de operación, coste de refrigerante, poder de calentamiento global y el potencial de destrucción de la capa de ozono.

Entre los refrigerantes cuyas características se ajustan a las requeridas de la OTEC destacan los siguientes (Gil Alba, 2016):

- R717 (Amoníaco): Se utiliza en numerosas aplicaciones industriales y es uno de los refrigerantes más eficientes. Destaca por su pequeño impacto ambiental y su bajo punto de ebullición. Además, se caracteriza por su bajo precio y su elevada capacidad calorífica, que permite utilizar tuberías de menor diámetro.
- R290 (Propano): Es utilizado en varios sistemas de refrigeración y bombas de calor. Se caracteriza por tener un volumen específico inferior al resto de refrigerantes y un impacto ambiental muy bajo; sin embargo, se trata de un refrigerante altamente inflamable.
- R32: Gas ligeramente inflamable utilizado en bombas de calor y aires acondicionados. Su impacto ambiental es moderado y las fugas no alteran su composición.
- R410a: Se trata de una mezcla casi azeotrópica de R32 (50%) y R125 (50%) usada en la climatización de instalaciones fijas con presiones de evaporación elevadas. Se caracteriza por operar en aplicaciones de baja temperatura y su uso es recomendable únicamente en equipos nuevos.

#### **2.9 Sistema para el aprovechamiento de la OTEC**

Para el funcionamiento de la tecnología OTEC es necesario un ciclo de calor termodinámico Rankine para su generación de energía eléctrica y tiene tres modalidades de ciclo: abierto, cerrado e híbrido (Centro Mexicano de Innovación en Energía - Océano, 2017).

### 2.9.1 Ciclo Rankine Cerrado

En el ciclo cerrado se usan fluidos que tengan bajos puntos de ebullición como por ejemplo amoníaco, propano, freón, R134, R123, R152, entre otros refrigerantes, para impulsar una turbina y con ello la generación de electricidad. El proceso inicia con el bombeo del agua marina superficial para ingresar al evaporador que vaporiza al fluido de trabajo provocando el movimiento de la turbina (generador de energía eléctrica).

El agua proveniente de las profundidades del mar es bombeada a través de un condensador donde el fluido de trabajo se transforma de vapor a líquido para comenzar nuevamente el ciclo termodinámico (Centro Mexicano de Innovación en Energía - Océano, 2017).

En la Figura 2.12 se muestra los puntos termodinámicos de un Ciclo Rankine Cerrado y sus componentes.

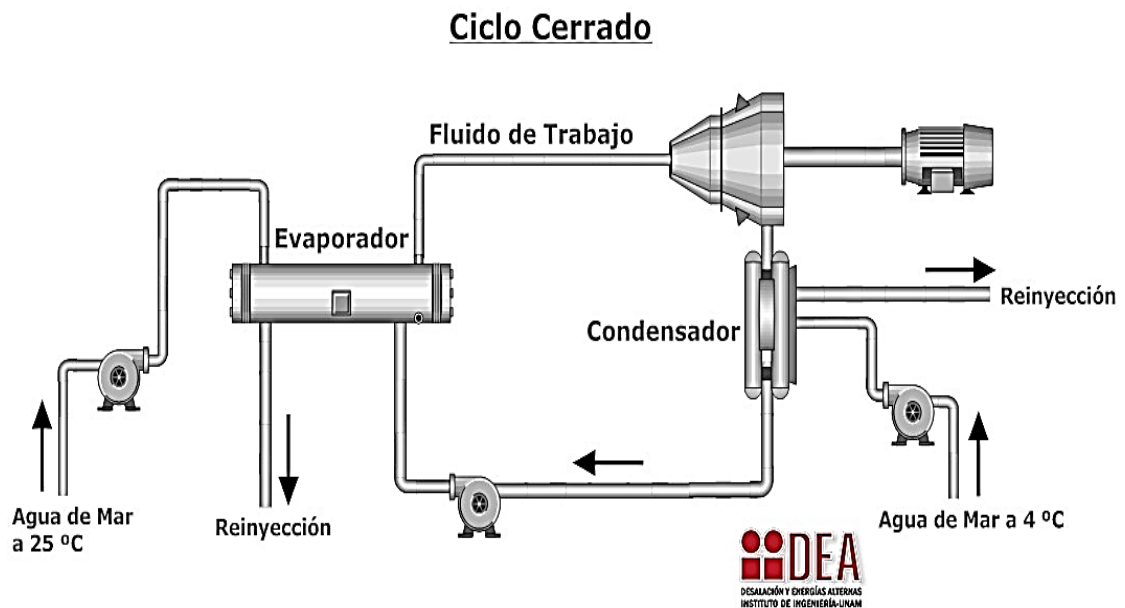


Figura 2.12 Ciclo Rankine Cerrado  
Fuente: Grupo IIDEA (IIDEA, 2017)

## 2.9.2 Ciclo Rankine Abierto

El ciclo Rankine abierto usa el agua marina como fluido de trabajo para la maquina térmica, este funciona cuando la temperatura del agua superficial (SST) alcanza aproximadamente 25°C, con ello esta agua es bombeada y sometida a vacío para bajar su presión hasta que el agua llega a su punto de ebullición, con vertiendo el líquido en vapor, este se dirige a un condensador, en el que se obtienen de nuevo agua líquida saturada a un presión y temperatura aproximada de 1.7 kPa y 15°C, respectivamente. Este procedimiento es dado a cavo de utilizar el agua de las profundidades del océano, aproximadamente 100m de profundidad que se usa como fluido refrigerante. El agua del condensador se regresa al mar, así el proceso se repite de manera continua. Es en el proceso de evaporación en donde la mayor parte de sales se precipita, este vapor es el que pasa a la turbina y luego al pasar en el condensador se recupera el agua sin sal, entonces se da el proceso de desalinización para la producción de agua potable (Centro Mexicano de Innovación en Energía - Océano, 2017).

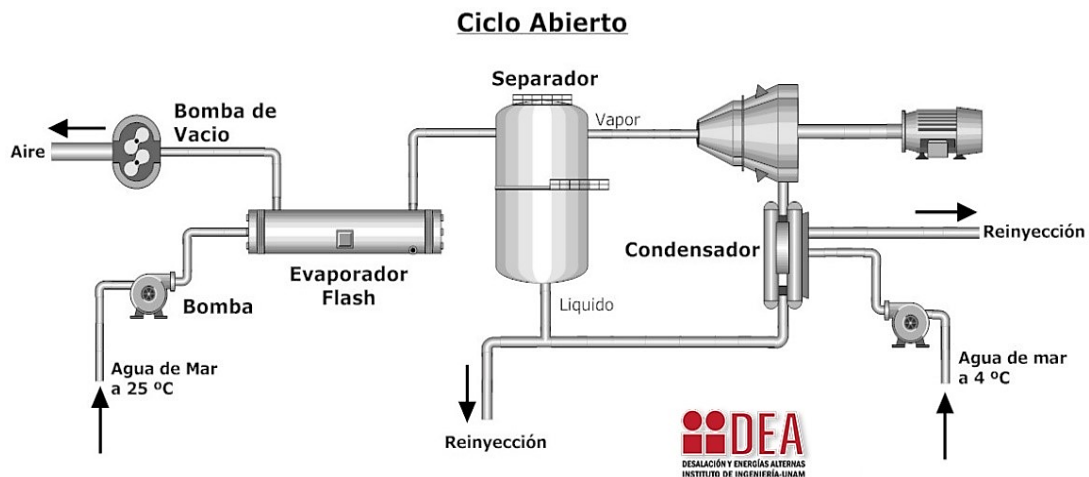


Figura 2.13 Ciclo Rankine Abierto  
Fuente: Grupo IIDEA (IIDEA, 2017)

En la Figura 2.13 se muestra los puntos termodinámicos de un Ciclo Rankine Abierto y sus componentes.

### 2.9.3 Ciclo Rankine Híbrido

Este tipo de ciclo genera energía eléctrica y desalinizan agua, que inicia con el bombeo del agua marina superficial es flasheado en el evaporador 1, el vapor es conducido al evaporador 2, dónde este cederá su calor al fluido de trabajo, el cual será enviado a la turbina para la generación de energía eléctrica, asimismo el condensado obtenido en el evaporador 2 será un subproducto de la planta (IIDEA, 2017).

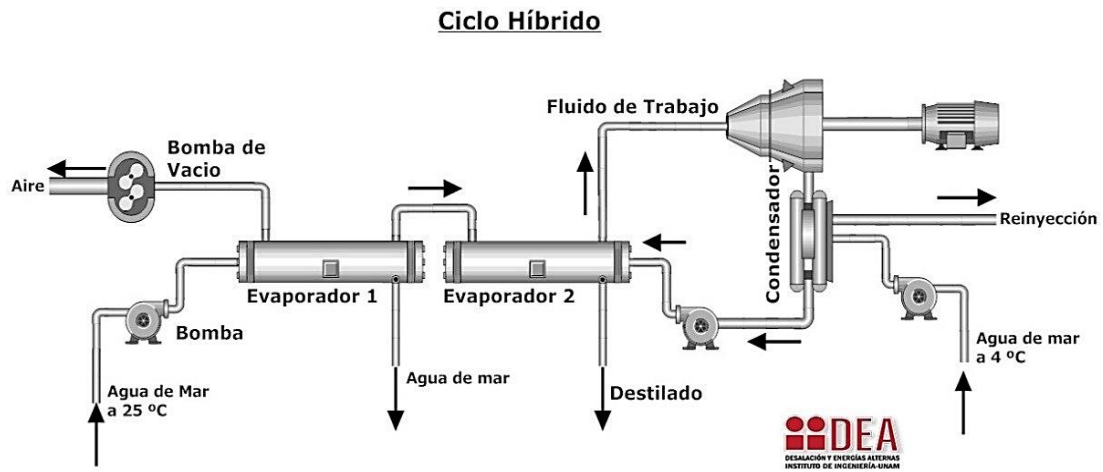


Figura 2.14 Ciclo Rankine Híbrido

Fuente: Grupo IIDEA (IIDEA, 2017)

En la Figura 2.14 se muestra los puntos termodinámicos de un Ciclo Rankine Híbrido y sus componentes.

### 2.10 Revisión de proyectos OTEC

Para la evaluación de la eficiencia del potencial energético de la planta OTEC en el Perú, es necesario dar cuenta a la evolución de la presente energía renovable.

#### 2.10.1 Los primeros dispositivos de la tecnología OTEC

En 1881, Jacques Arsene D'Arsonval un físico francés, fue el primero en proponer aprovechar la energía térmica del océano. Georges Claude, un estudiante de D'Arsonval, construyó un dispositivo OTEC de ciclo abierto experimental en la bahía de Matanzas, Cuba, en 1930. El sistema produjo 22 kW de electricidad mediante el uso de una turbina de baja presión. En 1935, Claude construyó otra planta de ciclo abierto, esta vez a bordo de

un buque de carga de 10,000 toneladas anclado en las costas de Brasil. Ambas plantas fueron destruidas la primera por una tormenta y la otra por las olas. Claude nunca logró su objetivo de producción de potencia neta que es la potencia que queda después de restar el poder necesario para autoabastecer el sistema de ciclo abierto OTEC (Bárcenas Graniel, 2014).

Después de G. Claude otros proyectos se han estudiado sobre todo en Francia y USA. En 1956, investigadores franceses diseñaron una planta de 3 MWe de ciclo abierto para Abidjan, en la costa oeste de África, pero la planta nunca fue terminada debido a la competencia con energía hidroeléctrica más barata. A finales de la década de 1970, Francia puso en marcha otro proyecto de planta piloto OTEC de 5 MW para producción de electricidad que se pretendía instalar en la Polinesia Francesa, pero en 1986 la fuerte caída en el precio del petróleo llevó a una reducción en todo el mundo y la financiación para el desarrollo de OTEC y Francia decidieron abandonar el proyecto. USA por su parte estableció en el año de 1974 el Laboratorio de Energía Natural de Hawai (NELHA, antes NELH), en el punto de Keahole en la costa de Kona de la isla de Hawai, laboratorio que se convirtió en el laboratorio de pruebas de tecnologías OTEC para todo el mundo. De acuerdo al Departamento de Energía de USA (DOE 2011) Toshiba Corporation, la Universidad de Saga Japón, el National Institute of Ocean Technology (NIOT) y el Indian Institute of Science (IISc) se han construido varios prototipos de los cuales se describe brevemente sus cualidades técnicas y el periodo en que funcionaron (Bárcenas Graniel, 2014).

### 2.10.2 Proyectos de plantas OTEC en el mundo

En la Tabla 1 se muestra los datos de locación de la planta, tipo, tamaño, LCOE, tiempo de vida y gradiente térmico de ocho proyectos OTEC.

**Tabla 1.** Resumen de proyectos OTEC anteriores

Locación de la Planta	Tipo de Planta	Tamaño de Planta (MW)	LCOE (US\$2018/kWh)	Tiempo de vida (años)	$\Delta T$ °C	Referencia
Korea del Sur	L, CC	0.02	0.38	20	21.3	(Jung et al., 2016)



Irán	N.A., CC	1.6	0.09	25	22	(Khosravi et al., 2019)
Hawái	F, CC	2.35	0.30	25	21.6	(Manassa s, n.d.)
Hawái	F, CC	53.5	0.20	15	20	(Vega, 2010)
Nigeria	F, CC	100	0.11	25	24	(Oko & Obeneme , 2017)
Puerto Rico	F, CC	75	0.15	30	20	(Plocek et al., 2009)
Hawái	F, CC	100	0.20	15	20	(“Encycl. Sustain. Sci. Technol., ” 2012)
Florida	F,CC	400	0.14	30	20.4	(Report et al., 2012)

Por último, en enero de 2020, una novedosa conversión de energía térmica oceánica (OTEC) de tres generaciones, se desarrolla y analiza un sistema que produce amoníaco, refrigeración y energía. La eficiencia energética del ciclo fue del 1.83% de un potencial 7.2% que conduce a una gran cantidad de pérdidas. Finalmente, el servicio de refrigeración a la máxima eficiencia energética y exergética se encontró que era de 64.4 MW donde la temperatura del condensador resultó ser 11.38 C (Hasan & Dincer, 2020).

## 2.11 Evaluación económica

En esta parte, se definen las ecuaciones de costo económico de cada componente. La compra por costos de los componentes de la planta híbrida OTEC se dan a conocer en el Tabla 2.

**Tabla 2.** Ecuaciones del costo de los componentes del sistema híbrido

Componente	Ecuación de costo
Turbina	$Z_{turbina}(\$) = 4750(\dot{W}_{turbina})^{0.75} + 60(\dot{W}_{turbina})^{0.95}$
Bombas (aguas de mar superficiales y profundas)	$Z_{bomba}(\$) = 3500(\dot{W}_{bomba})^{0.41}$
Condensador	$Z_{cond}(\$) = 1500(A_{cond})^{0.8}; A_{condensador} = \frac{\dot{Q}_{hex}}{U_{cond}\Delta T_{ln}}$
Intercambiador de Calor	$Z_{HEX}(\$) = 276(A_{hex})^{0.88}; A_{hex} = \frac{\dot{Q}_{hex}}{U_{hex}\Delta T_{ln}}$

En cuanto, al costo nivelado de la electricidad (LCOE) es calculado para evaluar la economía de OTEC. El LCOE es el mínimo precio medio al que se debe vender la electricidad para alcanzar la paridad con todos los gastos de un proyecto al final de su vida útil (IEA, 2015; Visser E, 2014). Eso se puede calcular usando la ecuación (1) a continuación.

$$LCOE = \frac{CRF(CAPEX) + OPEX}{E_t} \quad (1)$$

La recuperación de costos de capital (CRF) se puede definir de la siguiente manera; (Ahmadi et al., 2015; Bejan A, Tsatsaronis G(George), n.d.):

$$CFR = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (2)$$

Donde,  $i$  y  $n$  son definen la tasa de interés y el período operativo de la planta y que asumió como 7.5% y 30 años, respectivamente. Después de esta ecuación, la tasa de costo total de cada componente del ciclo se puede escribir como:

### 2.12 Estimación del tiempo de vida de la maquina térmica

Con respecto a la vida operativa de una planta OTEC, en la Tabla 3 se muestra cinco plantas OTEC, las cuales muestran diferente tiempo de vida para cada planta.

**Tabla 3.** Estado del arte de los estudios de caso sobre economía OTEC

Locación de la planta	Tamaño de la planta (MW)	LCOE (US\$/kwh)	Tasa de interés (%)	Tiempo de vida (años)
Hawái 1	53.5	0.209	8	15
Hawái 2	51.25	0.167	8	15
Hawái 3	100	0.2	8	15
Nigeria	100	0.12	13	25

### 2.13 Comparación de las condiciones económicas de tecnologías energéticas

La Tabla 4 nos muestra los LCOE calculados para las diferentes tecnologías de energía renovable entre ella la de OTEC, es importante resaltar que para el cálculo del

LCOE de la tecnología OTEC en todas se usó un interés del 12% (Langer et al., 2020).

**Tabla 4.** Comparación de los LCOE

Tecnología energética	LCOE (US\$/kWh)
10 MWe OTEC (original interest rate)	0.15
100 MWe OTEC (original interest rate)	0.03-0.22
Solar PV Crystalline Utility Scale	0.04-0.046
Wind	0.029-0.056
Gas Peaking	0.152-0.206
Nuclear	0.112-0.189

## **2.14 Matriz de Leopold modificada**

La matriz de Leopold modificada toma en cuenta las características ambientales del área de influencia y por otro lado las actividades desarrolladas por el proyecto para las diferentes fases.

En cuanto a la calificación y valorización de impactos tiene como propósito establecer y determinar los impactos que generan los mayores efectos negativos, de acuerdo a su orden de importancia, obtenido de la jerarquización de los mismos, a efectos de proceder a su mitigación y control, mediante la aplicación de medidas ambientales preventivas (Consortio HTA, 2007).

La valoración cualitativa de impactos se deberá realizar calificando el grado de magnitud e importancia del impacto identificado, mediante los siguientes criterios:

- Carácter
- Intensidad
- Extensión
- Duración
- Reversibilidad
- Riesgo

### **2.14.1 Carácter del impacto en evaluación ambiental**

En este punto se define si el impacto será positivo o negativo respecto al estado preoperacional de la actividad. Es decir, positivo si el componente presenta una mejora respecto a su estado previo a la ejecución del proyecto y negativo si el componente presente deterioro con respecto a su estado previo a la ejecución del proyecto.

### **2.14.2 Intensidad del impacto**

Es el grado con que el impacto alterará un componente ambiental, de acuerdo con el siguiente detalle:

- Alta: Alteración muy notoria y extensiva, que puede recuperarse a corto o mediano plazo, siempre y cuando exista una intervención oportuna y profunda del hombre, que puede significar costos elevados.

- Moderada: Alteración notoria, producida por la acción de una actividad determinada, donde el impacto es reducido y puede ser recuperado con una mitigación sencilla y poco costosa.
- Baja: Impactos que con recuperación natural o con una ligera ayuda por parte del hombre, es posible su recuperación.

### **2.14.3 Extensión del impacto**

Hace referencia a la extensión espacial que el efecto tendrá sobre el componente ambiental, de acuerdo con el siguiente detalle:

- Regional: La región geográfica del proyecto
- Local: Aproximadamente tres kilómetros a partir de la zona donde se realizarán las actividades del proyecto.
- Puntual: En el sitio en el cual se realizarán las actividades y su área de influencia directa.

### **2.14.4 Duración del impacto**

Hace referencia a la duración de la acción impactante, no de sus efectos, de acuerdo con el siguiente detalle:

- Permanente: Cuando la permanencia del efecto continúa aun cuando se haya finalizado la actividad.
- Temporal: Si se presenta mientras se ejecuta la actividad y finaliza al terminarla.
- Periódica: Si se presenta en forma intermitente mientras dure la actividad que los provoca.

### **2.14.5 Reversibilidad del impacto**

Implica la posibilidad, dificultad o imposibilidad de que el componente ambiental afectado retorne a su situación inicial, y la capacidad que tiene el ambiente para retornar a una situación de equilibrio dinámico similar a la inicial, de acuerdo con el siguiente detalle:

- Irrecuperable: Si el elemento ambiental afectado no puede ser recuperado.
- Poco recuperable: Señala un estado intermedio donde la recuperación será dirigida y con ayuda humana.

- Recuperable: Si el elemento ambiental afectado puede volver a un estado similar a la inicial en forma natural.

#### 2.14.6 Riesgo del impacto

Expresa la probabilidad de ocurrencia del impacto, de acuerdo con el siguiente detalle:

- Alto: Existe la certeza de que el impacto se produzca en forma real.
- Medio: La condición intermedia de duda de que se produzca o no el impacto.
- Bajo: No existe la certeza de que el impacto se produzca, es una probabilidad.

#### 2.14.7 Magnitud e importancia del impacto

La magnitud y la importancia son parámetros que deben ser calculados, sobre la base de los valores de escala dados a las variables señaladas. En la tabla presentada a continuación, los criterios de Valoración de Impactos Ambientales, se presenta los valores que deberán ser asignados en base a las variables analizadas.

**Tabla 5.** Criterio de valorización de impactos ambientales

Variable	Simbología	Carácter	Valor
Magnitud	M		
Intensidad	I	Alta	3
		Moderada	2
		Baja	1
Extensión	e	Regional	3
		Local	2
		Puntual	1
Duración	D	Permanente	3
		Temporal	2
		Periódica	1
Importancia	I		
Reversibilidad	R	Irrecuperable	3
		Poco recuperable	2
		Recuperable	1

Riesgo	g	Alto	3
		Medio	2
		Bajo	1
Extensión	e	Regional	3
		Local	2
		Puntual	1

Se realizará el cálculo de la magnitud de los impactos, la cual constituye una valoración del efecto de la acción, por lo que su cálculo se basará en la sumatoria acumulada de los valores de las variables intensidad, extensión y duración. Para lo que se deberán asumir los siguientes valores de peso:

- Peso del criterio de intensidad: 0.40
- Peso del criterio de extensión: 0.40
- Peso del criterio de duración: 0.20

La fórmula que se utilizará para calcular la magnitud del impacto para cada una de las interacciones ambientales identificadas es:

$$M = (0.40i) + (0.40e) + (0.20d) \quad (3)$$

Además, se calculará la importancia la cual está en función de las características del impacto, y la misma se deduce a la sumatoria acumulada de la extensión, reversibilidad y riesgo. Se deberán asumir los siguientes valores de peso:

- Peso del criterio de extensión: 0.30
- Peso del criterio de reversibilidad: 0.20
- Peso del criterio de riesgo: 0.50

La fórmula que deberán utilizar para calcular la importancia del impacto para cada una de las interacciones ambientales identificadas es:

$$I = (0.30e) + (0.20r) + (0.50g) \quad (4)$$

La interpretación de los resultados obtenidos, de la magnitud e importancia del impacto se valorarán de acuerdo con la siguiente tabla denominada Escala de Valoración de la Magnitud e Importancia del Impacto.

**Tabla 6.** Escala de valoración de la magnitud e importancia del impacto

Escala valores estimados	Valorización de impactos
1.0 – 1.6	Bajo
1.7 – 2.3	Medio
2.4 – 3.0	Alto

Para finalizar se definirá la severidad de los impactos como el nivel de impacto ocasionado sobre el componente ambiental. Dicho valor se obtendrá multiplicando la magnitud por la importancia antes calculada. El resultado se deberá comparar con la escala de valores asignados para el efecto que se presenta en la siguiente tabla de escala de Valoración de la Severidad del Impacto

**Tabla 7.** Escala de valoración de la severidad del impacto

Escala valores estimados	Severidad del impacto
1.0 – 3.0	Poco Significativo
3.1 – 6.0	Mediantemente Significativo
6.1 – 9.0	Altamente Significativo



## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA**

El presente capítulo tiene como objetivo mostrar los pasos desarrollados en el trabajo de investigación hasta obtener los resultados de las simulaciones de la planta OTEC, el potencial energético y el tiempo de vida de la planta. Finalmente, se realizará la evaluación del impacto económico, comparar el costo por energía en el Perú.

#### **3.1 Tipo y enfoque de la investigación**

El presente trabajo de investigación es de tipo no experimental porque es investigativa, de igual forma se manipula una independiente para analizar los puntos óptimos de las variables dependientes, es así que, manipularemos las variables de temperatura de la superficie del mar y el flujo masico de agua de profundidades con el fin de determinar las variables dependientes como la eficiencia del sistema térmico, el LCOE y la obtención de los puntos óptimos de trabajo.

#### **3.2 Fuentes y técnicas de recolección de información**

Dado que se evaluará el potencial energético de la tecnología OTEC en el litoral peruano y este es considerada como tipo experimental, para lograr ello se debe tener los datos de los gradientes térmicos en el litoral peruano y este es almacenado por el Instituto del mar peruano (IMARPE). Es así que, IMARPE brindo la información de gradiente térmico de agosto de 2020 hasta julio 2021.

#### **3.3 Variables de la investigación**

Las variables fundamentales para evaluar el potencial térmico de la tecnología OTEC están relacionadas con los factores que alteran el rendimiento del sistema OTEC. Estas variables de estudio fueron recopiladas y sustentadas en diferentes estudios que forman parte de los antecedentes de la presente investigación. Dentro de ella se definieron dos tipos de variables: los controlables y no controlables. Con respecto a las variables no controlables se tiene a la temperatura superficial y a profundidades, la salinidad y la barimetría. Asimismo, se ha considerado parámetros de diseño estándares para cada

simulación planteada y esta ha sido seleccionada bajo criterio propio de acuerdo con los antecedentes seleccionados.

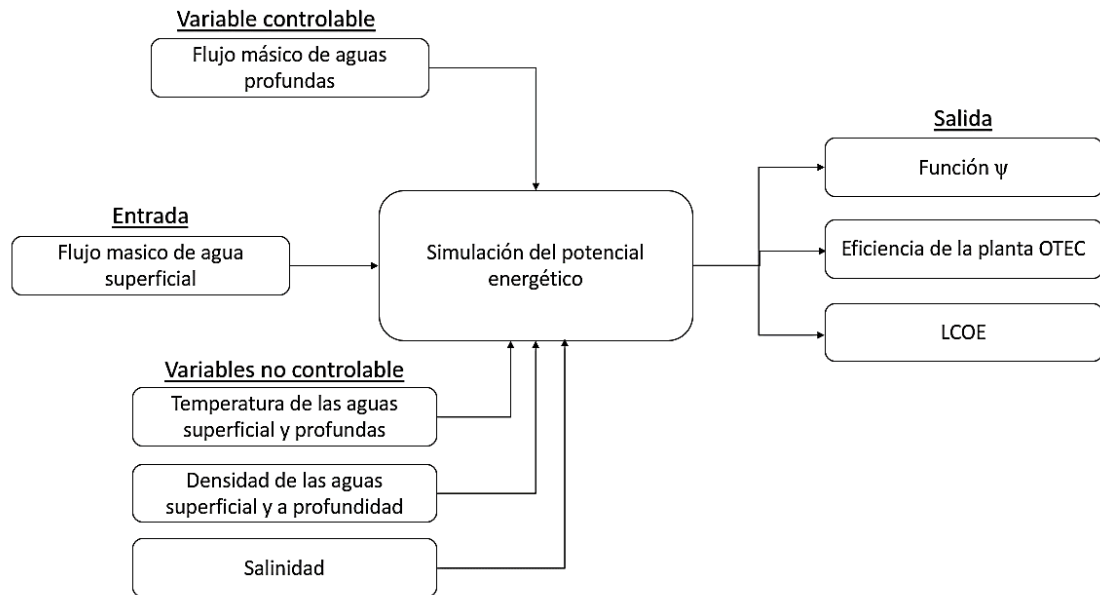


Figura 3.1 Diagrama de variable controlable, no controlables, entrada y salida  
fuente: Elaboración propia

En la Figura 3.1 se detalla las variables controlables y no controlables en nuestras simulaciones con la finalidad de obtener los puntos óptimos de diseño energético, económico y ambiental.

### 3.4 Diseño experimental

El diseño de la presente investigación está basado en un diseño factorial porque evaluamos el efecto de las variables controlables sobre las variables de salida.

A partir de lo descrito anteriormente, se elaboró el diagrama de flujo, en donde se desarrolla el proceso metodológico que se utilizará para obtener el cálculo del potencial energético de la planta OTEC.

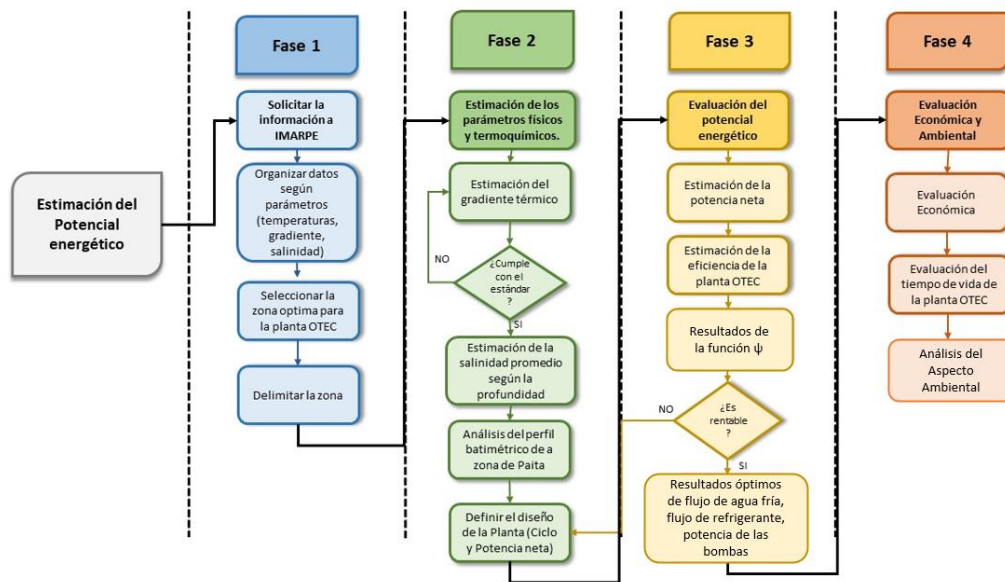


Figura 3.2 Diagrama de flujo  
fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la Figura 3.2, se detalla cuatro fases para el desarrollo de la metodología. En Primer lugar, tenemos la selección del área, en el cual se detallará el área de estudio y analizar los datos recolectados por IMARPE. En el segundo proceso, se caracterizará el área de estudio en relación con sus propiedades físico-térmicas. En el tercer proceso, se llevará a cabo las simulaciones de la planta con el fin de obtener el punto óptimo, en función al diseño de la planta y las estaciones del año.

Finalmente, se hará un análisis de la potencia obtenida por la tecnología OTEC con los datos de potencial energética de los antecedentes de la presente investigación.

### 3.5 Recolección de información

Se dará detalle de los pasos a seguir para la recolección de la información como son los datos de físico térmicos.

#### 3.5.1 Solicitud de acceso a la información pública y organización de datos

Se tiene conocimiento de que la información necesaria para la formulación de la tesis se encuentra resguardada por el IMARPE, el dato importante a registrar son las que te

permitan obtener la gradiente térmica. Es así, que a través de la plataforma virtual de acceso a la información de IMARPE se solicitó la información de acuerdo con la siguiente especificación:

“Datos de temperaturas y salinidad, de las temperaturas superficiales y perfiles de temperatura oceanográficos de tumbes sobre 600 metros de profundidad para los años 2017,2018 y 2019 - solicito en formato excel y en la entrega en si fuera necesario en google drive”

De otro lado, se pudo obtener los datos de la temperatura superficial promedio a través de los boletines diarios publicados en el portal institucional del IMARPE.

Con la información brindada por IMARPE se podrá establecer datos como temperatura superficial promedio por estación y una anual. También se obtendrá datos de la salinidad que es un punto importante para poder estimar los datos densidad.

### **3.5.2 Selección de la zona óptima para la implementación de la tecnología OTEC**

La selección del sitio es la base crítica y la primera prioridad en planificación de la energía térmica oceánica. Una buena decisión de ubicación es esencial para la planta OTEC en todo el ciclo de vida. En la presente investigación se realizó una evaluación en función a sus características físico-térmicas.

Por otro lado, existen otros factores que deben tenerse en cuenta para la selección de un sitio de planta OTEC son la presencia de sistemas de generación eléctrica e infraestructura en el lugar, factores ambientales o posibles impactos ecológicos, la distancia de la fuente térmica a la costa y las condiciones oceanográficas como corrientes, olas o tormentas que podrían afectar el funcionamiento continuo de la planta (Around & World, 2000).

### **3.5.3 Evaluación y delimitación de la zona de estudio**

La red de estaciones oceanográficas en el litoral peruano comprende de doce (12) estaciones: Tumbes, Paita, San José, Chicama, Huanchaco, Chimbote, Huacho, Callao, Pisco, Ático, Matarani e Ilo. Sin embargo, en la presente investigación solo se examinaron los recursos de OTEC para las regiones de Tumbes y Paita.

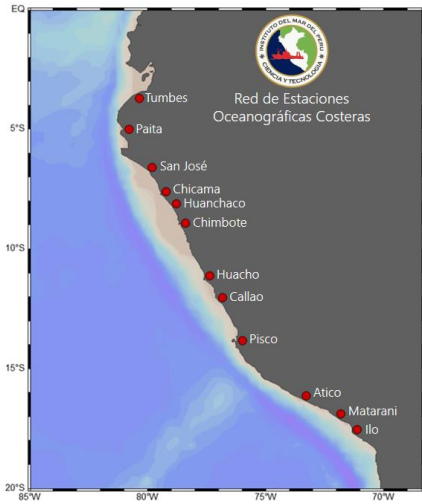


Figura 3.3 Red de estaciones oceanográficas en el litoral peruano

Fuente: Instituto del Mar Peruano

En la Figura 3.3 se observa que las estaciones de monitoreo Tumbes y Paita son las más cercanas a la Línea Ecuatorial y es por ello que estas presentan mayor gradiente térmico a diferencia de las demás estaciones de monitoreo.

Para Delimitar la zona, primero se hizo una comparación entre las zonas de Tumbes y Paita de sus temperaturas superficiales a través de Series de tiempo mensuales, en el cual se puede detallar un promedio de temperatura superficial a través del tiempo.

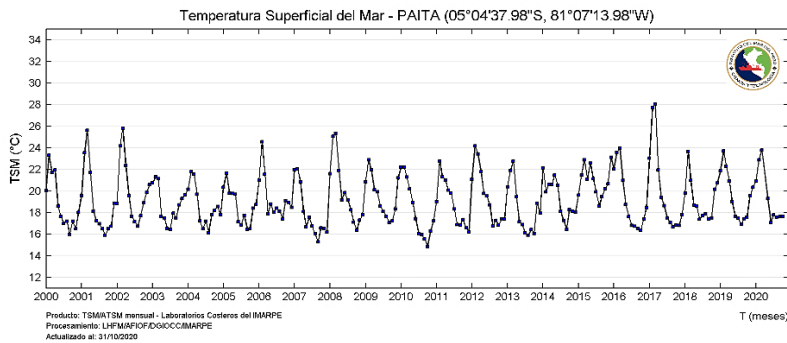


Figura 3.4 Series de tiempo mensuales de temperatura superficial en Tumbes

Fuente: Instituto del Mar Peruano

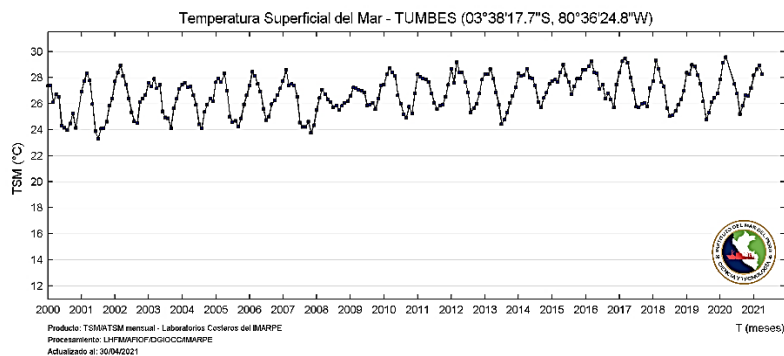


Figura 3.5 Series de tiempo mensuales de temperatura superficial en Chicama

Fuente: Instituto del Mar Peruano

A través de las Figura 3.4 y 3.5, se concluye que la zona de Tumbes es la óptima en comparación con la estación de Paita, dado que las temperaturas superficiales son superiores a 24°C en el periodo de tiempo del año 2000 al 2021. En ese sentido, en el punto posterior se determinará los otros puntos clave para analizar la implementación de la tecnología OTEC.

### 3.6 Estimación de los parámetros físicos – térmicos

Se dará detalle de la zona óptima para el desarrollo de la planta OTEC, por lo que se explicará las condiciones básicas que debe tener la zona como su barimetría, salinidad y su gradiente térmico.

#### 3.6.1 Descripción de la estación tumbes

La zona adecuada para la implementación de la tecnología OTEC es la estación de Tumbes, ubicada en la región de Tumbes. La estación está ubicada en 03° 38' 17.7" S, 80° 36' 24.8" W, la cual se obtuvo los registros de los perfiles térmicos de los años 2017, 2018 y 2019.

En ese sentido, la ubicación que se propone se establece con el fin de cumplir los parámetros; gradiente térmico y la barimetría.



Figura 3.6 Ubicación de la Planta OTEC

### 3.6.2 Descripción de los parámetros de la zona de estudio

El primer paso en la evaluación de la disponibilidad del Gradiente térmico oceánico necesario para la operación OTEC en Perú fue la determinación de las condiciones oceanográficas climatológicas. En ese sentido, los campos de temperatura utilizados para generar los mapas de medias mensuales se calcularon mediante análisis objetivo de todos científicamente datos históricos de temperatura.

### 3.6.3 Determinación de las temperaturas superficiales y las aguas profundas

De acuerdo con los datos obtenidos del IMARPE se pudo reunir los datos de las temperaturas superficiales desde el mes de agosto del 2021 al mes de julio de 2021. Es así, que se pudo obtener los datos de las temperaturas superficiales promedio por mes durante 1 año y sería el representativo para la zona de estudio.

Es importante señalar que las temperaturas superficiales se vieron conveniente trabajar por estación por el hecho que representaría las condiciones supuestas de que en la estación de verano representa la estación del año óptima para el funcionamiento de la planta OTEC.

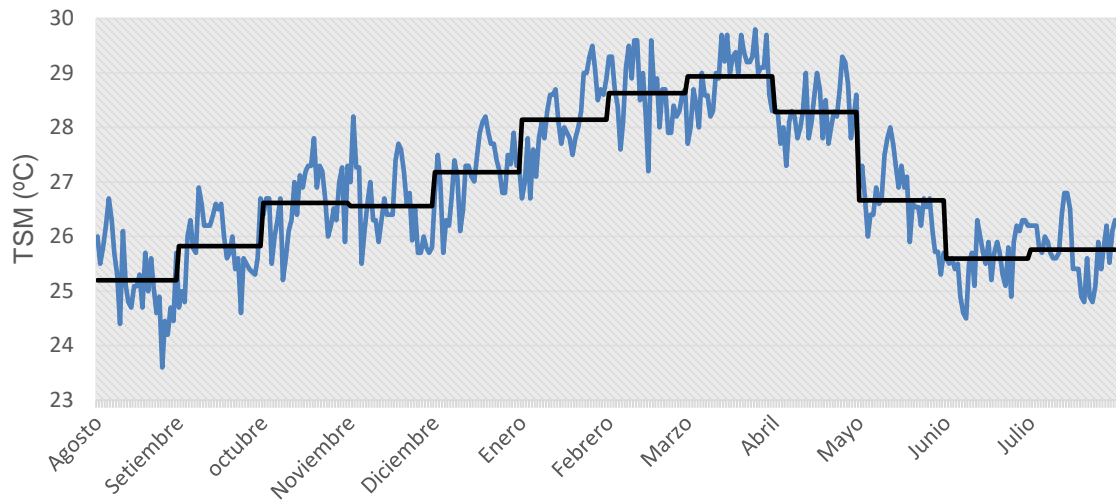


Figura 3.7 Temperatura superficial promedio por mes evaluada desde agosto 2020 hasta julio 2021

Fuente: Elaboración propia

De otro lado, en relación con la temperatura promedio de aguas profundas se obtiene las temperaturas para las profundidades (en adelante “z”, nivel de profundidad)  $z = 600$  m,  $z = 800$  m y  $z = 1000$  m. En la figura 20 se muestra las temperaturas promedio para los niveles de profundidad propuestos, es así como para un  $z = 600$  m de profundidad la temperatura es de  $6$  °C, para un  $z = 800$  de profundidad la temperatura promedio es  $8$ °C y para un  $z = 1000$  la temperatura promedio es  $4$  °C.

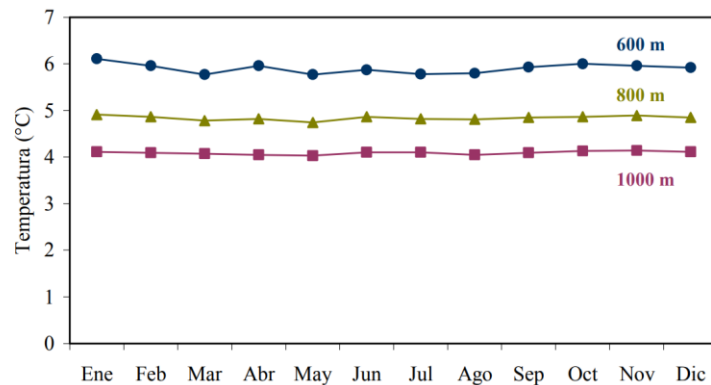


Figura 3.8 Temperatura promedio para aguas profundas

Fuente: Elaboración Propia



### 3.6.4 Descripción de la salinidad del mar

La salinidad del mar está enmarcada dentro de las propiedades físicas y termoquímicas, dado que esta contribuye junto a la temperatura para poder estimar con precisión estas propiedades. En los puntos anteriores se estableció la temperatura superficial y de aguas profundas promedios anuales. En ese sentido, se precisa que IMARPE entrega también los datos de perfiles de salinidad. Sin embargo, la variación durante el año es mínimo, de modo que solo se consideran los promedios anuales para las profundidades de interés. La cuales se muestran en la siguiente table.

**Tabla 8.** Salinidad vs profundidad

	0 m	100 m	150 m	200 m	600 m	800 m	1000 m
Salinidad	33.2	33.8	35.09	34.9	34.65	35.4	35.6

### 3.6.5 Perfil batimétrico

Las Figuras 2.9 y 2.10 muestra la vista la zona disponible para la implementación de la planta OTEC y la batimetría del litoral peruano, es decir nos muestra las zonas que cuentan con 800 m de profundidad. En ese sentido, con este perfil batimétrico se diseña el ducto de captación y el ducto de retorno del agua de mar fría, con ello se conoce el largo de las tuberías que es igual a la distancia recorrida por sobre el perfil batimétrico.



Figura 3.9 Mapa de la zona disponible para la implementación de la Planta OTEC

Fuente: Elaboración propia

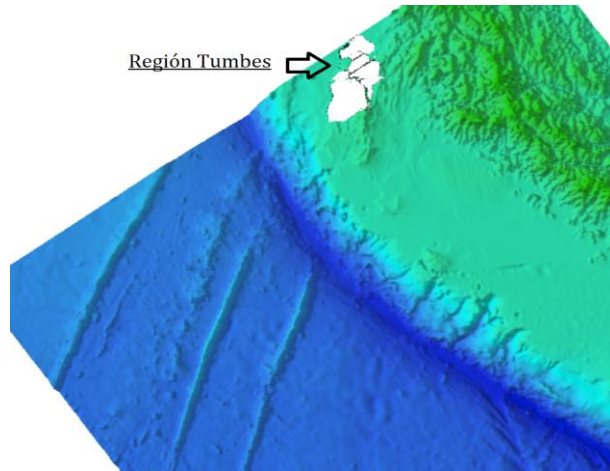


Figura 3.10 Mapa de la Batimetría en tres dimensiones del Litoral Peruano  
Fuente: Elaboración propia

### 3.6.6 Diseño del sistema OTEC

Posterior al análisis de los parámetros físicos de la zona de Tumbes, es necesario establecer el modelo del sistema OTEC. Se ha visto la necesidad de diseñar un sistema híbrido de OTEC, debido a que en la zona es necesario la energía eléctrica y el agua potable. Entonces, en lo posterior se mostrará las condiciones necesarias para el desarrollo de la planta OTEC; como la ubicación de esta y los parámetros de cálculo para la estimación del potencial.

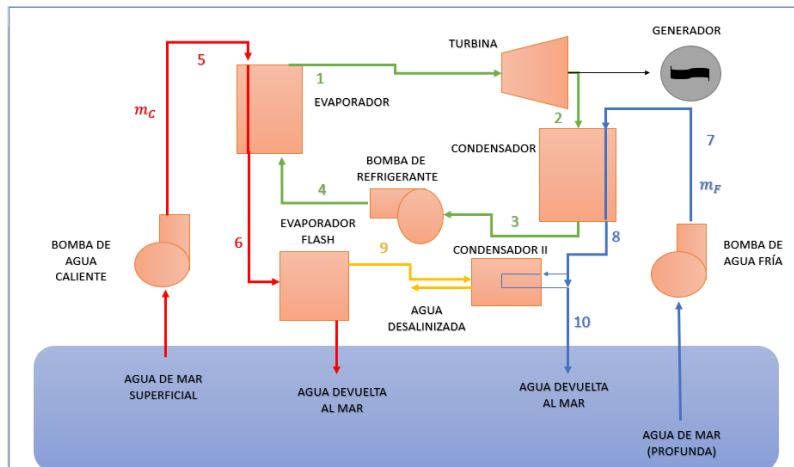


Figura 3.11 Diseño termodinámico de la planta OTEC  
Fuente: Elaboración propia

### 3.7 Metodología planteada para la estimación del Gradiente térmico y el potencial energético

En el siguiente modelo matemático, se considerará cada componente de los sistemas como un volumen de control en la condición de estado estacionario. Para simplificar el modelado matemático, se establecieron las siguientes condiciones de diseño (Dincer et al., 2017):

- Todos los procesos considerados en estado estacionario.
- La pérdida de calor en todas las tuberías y accesorios son insignificantes.
- La diferencia de altura de las tuberías se considera en todas las líneas
- Todos los componentes son adiabáticos
- El estado 1 es vapor saturado.

Las ecuaciones que gobiernan la masa y la energía en las condiciones de estado estacionario, en el sistema estudiado se puede expresar de la siguiente manera (Farahat et al., 2009):

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \quad (5)$$

$$\dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in} + \sum \dot{m}_{int} \left( h + \frac{v^2}{2} + gz \right) = \dot{Q}_{out} + \dot{W}_{out} + \sum \dot{m}_{out} \left( h + \frac{v^2}{2} + gz \right) \quad (6)$$

#### 3.7.1 DORC Turbina

La potencia generada por la turbina depende del flujo del refrigerante en la planta OTEC  $\dot{m}_R$ , el trabajo específico de la turbina  $W_T$  y la eficiencia del generador  $\eta_G$ . La potencia de salida se puede calcular como:

$$P_{G,base} = \eta_G \dot{m}_R W_T \quad (7)$$

Al respecto, al fijar la potencia base que se generará  $P_{G,base}$ , se calcula el flujo masico del refrigerante de la planta  $\dot{m}_R$  (Soto & Vergara, 2012). Además, cabe precisar que  $W_T$  es el trabajo real realizado.

### 3.7.2 Potencia de la bomba del refrigerante

Para el cálculo de la potencia de alimentación de la bomba del refrigerante  $P_{BR}$  se calcula con el flujo masico de refrigerante  $\dot{m}_R$ , el trabajo especifico  $W_{BR}$  y la eficiencia de la bomba  $\eta_B$ . El trabajo especifico  $W_{BR}$  se calcula con el producto entre el volumen especifico del fluido de trabajo  $V$  y la diferencia de presión  $\Delta p_{BR}$  (Soto & Vergara, 2012).

$$P_{BR} = \frac{\dot{m}_R W_{BR}}{\eta_B} = \frac{\dot{m}_R V \Delta p_{BR}}{\eta_B} \quad (8)$$

### 3.7.3 Evaporador

Para el cálculo de la energía intercambiada en el evaporador  $q_E$  se calcula a través de un balance de energía. Es la diferencia de entalpía específica del fluido refrigerante a la salida del evaporador  $h_1$  y a la entrada  $h_4$ .

$$q_E = h_1 - h_4 \quad (9)$$

El calor intercambiado en el evaporador  $\dot{Q}_E$  se calcula con el flujo de refrigerante  $\dot{m}_R$  y la energía específica intercambiada en el evaporador  $q_E$ .

$$\dot{Q}_E = \dot{m}_R q_E = \dot{m}_R (h_1 - h_4) \quad (10)$$

En el evaporador el intercambio se supone en condiciones adiabáticas. El balance de energía aplicado al flujo de agua de mar fría indica que:

$$\dot{m}_c c_{p,am}(\bar{T}_p, \bar{S}_0)(T_5 - T_6) = \dot{Q}_E \quad (11)$$

Donde  $\dot{m}_c$  es el flujo masico de agua de mar caliente (efluente de la planta),  $c_{p,am}$  la capacidad calorífica específica del agua de mar a la  $\bar{T}_p$  temperatura del efluente de planta y a la salinidad superficial  $\bar{S}_0$  del océano (promedios anuales),  $T_5$  la temperatura del flujo caliente cuando ingresa al evaporador y  $T_6$  la temperatura a la salida del evaporador. Esta temperatura  $T_6$  con que el flujo caliente sale del evaporador e ingresa a la cámara flash se obtiene entonces del balance anterior.

$$T_6 = T_5 - \frac{\dot{Q}_E}{\dot{m}_C c_{p,am}(\bar{T}_p, \bar{S}_0)} \quad (12)$$

Con miras a dimensionar el evaporador, las diferencias de temperatura en la entrada y la salida,  $\Delta T_{e,E}$  y  $\Delta T_{s,E}$  se definen utilizando las relaciones de temperaturas de un intercambiador de calor con flujo contracorriente.

$$\Delta T_{e,E} = T_5 - T_1 \quad (13)$$

$$\Delta T_{s,E} = T_6 - T_4 \quad (14)$$

Luego, la diferencia de temperatura media logarítmica en el evaporador  $\Delta T_{m,E}$  se define de la siguiente forma.

$$\Delta T_{m,E} = \frac{\Delta T_{e,E} - \Delta T_{s,E}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{e,E}}{\Delta T_{s,E}}\right)} \quad (15)$$

Para el dimensionamiento del evaporador se considera la siguiente relación general (Frank P. Incropera, 1999).

$$\dot{Q}_E = U_E A_E \Delta T_{m,E} \quad (16)$$

Donde  $U_E$  es el coeficiente global de transferencia de calor en el evaporador y  $A_E$  el área de transferencia. Ésta última se obtiene de la relación anterior aplicada al mes base.

$$A_E = \frac{\dot{Q}_{E,base}}{U_E \Delta T_{m,E}} \quad (17)$$

### 3.7.4 Condensador

La energía específica intercambiada en el condensador  $q_c$  se obtiene, al igual que en el evaporador, mediante un balance de energía. Pero esta vez se calcula como la diferencia entre la entalpía específica del fluido refrigerante a la entrada del condensador

$h_2$  y a la salida  $h_3$ . El calor intercambiado en el evaporador  $\dot{Q}_C$  se obtiene con el flujo de refrigerante  $\dot{m}_R$  y la energía específica intercambiada  $q_C$ .

$$q_C = h_2 - h_3 \quad (18)$$

$$\dot{Q}_C = \dot{m}_R q_C = \dot{m}_R (h_2 - h_3) \quad (19)$$

Haciendo un balance de energía al flujo de agua fría en el condensador y en condiciones adiabáticas, se tiene:

$$\dot{Q}_C = \dot{m}_R q_C = \dot{m}_R (h_2 - h_3) \quad (20)$$

$$\dot{m}_F c_{p,am}(\bar{T}_Z, \bar{S}_Z)(T_8 - T_7) = \dot{Q}_E \quad (21)$$

Donde  $\dot{m}_F$  es el flujo másico de agua de mar fría,  $c_{p,am}$  la capacidad calórica específica del agua de mar a la temperatura y salinidad de captación (promedios anuales),  $T_7$  la temperatura del flujo frío cuando ingresa al condensador y  $T_8$  la temperatura cuando sale de él. Esta temperatura  $T_8$  con la que el flujo frío es devuelto al mar, se determina a partir del balance anterior.

$$T_8 = T_7 - \frac{\dot{Q}_C}{\dot{m}_F c_{p,am}(\bar{T}_Z, \bar{S}_Z)} \quad (22)$$

Para el intercambio de energía, la temperatura de condensación  $T_2$  debe ser mayor a la temperatura de salida del flujo frío  $T_8$ , de modo que existe un flujo mínimo de agua fría  $\dot{m}_{F,min}$  para el sistema, dado por:

$$\dot{m}_{F,min} = \frac{\dot{Q}_C}{c_{p,am}(\bar{T}_Z, \bar{S}_Z)(T_2 - T_7)} \quad (23)$$

Para dimensionar el condensador, las diferencias de temperatura en la entrada y salida del intercambiador,  $\Delta T_{e,C}$  y  $\Delta T_{s,C}$  se definen como sigue.

$$\Delta T_{e,C} = T_2 - T_8 \quad (24)$$

$$\Delta T_{s,C} = T_3 - T_7 \quad (25)$$

La diferencia de temperatura media logarítmica en el condensador  $\Delta T_{m,C}$  es entonces (Frank P. Incropera, 1999).

$$\Delta T_{m,C} = \frac{\Delta T_{e,C} - \Delta T_{s,C}}{\ln \left( \frac{\Delta T_{e,C}}{\Delta T_{s,C}} \right)} \quad (26)$$

Para el dimensionamiento se considera la relación de intercambiadores de calor usada también en el evaporador, esto es:

$$\dot{Q}_C = U_C A_C \Delta T_{m,C} \quad (27)$$

Donde  $U_C$  es el coeficiente global de transferencia de calor en el evaporador y  $A_C$  el área de transferencia. Ésta última se obtiene de la relación anterior aplicada al mes base.

$$A_C = \frac{\dot{Q}_{C,base}}{U_C \Delta T_{m,C,base}} \quad (28)$$

Esta área depende de  $\Delta T_{m,C}$ , que a su vez depende de  $T_8$ , y esta última del flujo  $\dot{m}_F$ . De modo que para la selección del flujo másico de agua fría se debe analizar el impacto final de  $\dot{m}_F$  en el desempeño de la planta.

### 3.7.5 Ducto de agua fría

El ducto recorre el fondo costero, siguiendo su forma, hasta alcanzar la profundidad de interés. El largo del ducto  $L_F$  es la suma del segmento de captación  $L_{F1}$ , el segmento de paso por el sistema  $L_{F2}$  y el segmento de retorno al mar  $L_{F3}$ . Este último devuelve el flujo cuando éste ya ha circulado por todo el ciclo. Tal como el segmento de captación, el segmento de retorno recorre el relieve del fondo del mar hasta alcanzar la profundidad a la que se realiza la descarga.

$$L_F = L_{F1} + L_{F2} + L_{F3} \quad (29)$$

Una vez fijado el flujo másico de agua fría  $\dot{m}_F$ , el flujo volumétrico  $\dot{V}_F$  se obtiene como:

$$\dot{V}_F = \frac{\dot{m}_F}{\rho_{am}(\bar{T}_z, \bar{S}_z)} \quad (30)$$

Donde  $\rho_{am}(\bar{T}_z, \bar{S}_z)$  es la densidad del agua de mar a la temperatura y salinidad de captación (promedios anuales). La velocidad del flujo frío  $\dot{V}_F$  está dada por:

$$V_F = \frac{\dot{V}_F}{A_{DF}} = \dot{V}_F \left( \frac{\pi D_{i,F}^2}{4} \right)^{-1} \quad (31)$$

Donde  $A_{DF}$  es el área transversal y  $D_{i,F}$  el diámetro interno del ducto de agua fría. La velocidad  $V_F$  es una limitante en el diseño del ducto. ASHRAE (2009) limita la velocidad para bombas de succión y líneas de drenaje a un mínimo de 1.2 m/s y un máximo de 2.1 m/s. Se sugiere que la velocidad promedio del flujo de agua de mar en un sistema OTEC sea menor a 2 m/s (Soto & Vergara, 2012).

En base a la limitación de  $V_F$ , ésta es fijada a priori para evitar efectos indeseados, y el diámetro interno  $D_{i,F}$  es calculado despejando la ecuación de  $V_F$ , es decir:

$$D_{i,F} = 2 \left( \frac{\dot{V}_F}{A_{DF}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (32)$$

El espesor del ducto  $t_F$  depende de la presión externa máxima  $P_{max}$  a la que es sometido el material, según la siguiente expresión, cuya derivación proviene de la integración de la fuerza distribuida ejercida por el agua sobre el material.

$$t_F = \frac{P_{max} D_{i,F}}{2(\sigma_a - P_{max})} \quad (33)$$

Donde  $\sigma_a$  es el esfuerzo admisible, calculado como la razón entre el esfuerzo máximo del material  $\sigma_u$  y el factor de seguridad  $n$ .



$$\sigma_a = \frac{\sigma_u}{n} \quad (34)$$

La presión externa máxima  $P_{max}$  corresponde a la presión hidrostática a la profundidad de captación, calculada como:

$$P_{max} = \frac{1}{2}(\rho_0 + \rho_z)gz = \frac{1}{2}[\rho_{am}(\bar{T}_0, \bar{S}_0) + \rho_{am}(\bar{T}_z, \bar{S}_z)]gz \quad (35)$$

Donde  $\rho_0$  es la densidad del agua de mar promedio a nivel superficial,  $\rho_z$  la densidad del agua de mar promedio a la profundidad de captación  $z$ ,  $g$  la aceleración de gravedad y  $z$  la distancia vertical de captación (Frank P. Incropera, 1999).

### 3.7.6 Potencia de la bomba de agua fría

La potencia de alimentación de agua de mar fría  $P_F$  se calcula con el flujo masico  $\dot{m}_F$ , el trabajo específico realizado por la bomba  $W_{BF}$  y la eficiencia de la bomba  $\eta_B$  (Soto & Vergara, 2012).

$$P_F = \frac{\dot{m}_F W_{BF}}{\eta_B} \quad (36)$$

El cálculo del trabajo específico de la bomba  $W_{BF}$  se obtiene con la diferencia de presión total en el ducto de agua fría  $\Delta P_{BF}$  y la densidad del agua de mar  $\rho_{am}(\bar{T}_z, \bar{S}_z)$  a la temperatura y la salinidad de captación. La diferencia de presión  $\Delta P_{BF}$  es la suma de la caída de presión asociada a la fricción en la tubería  $\Delta P_{BF,t}$ , la caída de presión del flujo en su paso por el condensador  $\Delta P_{BF,c}$  y la caída de presión inducida por la diferencia de densidad entre la zona de captación y la zona de descarga  $\Delta P_{BF,\Delta p}$ . Se desprecia la caída de presión del flujo en su paso por el condensador de desalinización (Soto & Vergara, 2012).

$$W_{BF} = \frac{\Delta P_{BF}}{\rho_{am}(\bar{T}_z, \bar{S}_z)} = \frac{\Delta P_{BF,t} + \Delta P_{BF,c} + \Delta P_{BF,\Delta p}}{\rho_{am}(\bar{T}_z, \bar{S}_z)} \quad (37)$$

La caída de presión por la fricción del flujo en la tubería  $\Delta P_{BF}$ , se calcula como:

$$\Delta P_{BF,t} = f_{F,t} \left( \frac{L_F}{D_{i,F}} \right) \frac{\rho_{am}(\bar{T}_Z, \bar{S}_Z) V_F^2}{2} \quad (38)$$

Donde  $f_{F,t}$  es el factor de fricción en el ducto de agua fría,  $L_F$  el largo total del ducto,  $D_{i,F}$  el diámetro interno,  $\rho_{am}(\bar{T}_Z, \bar{S}_Z)$  la densidad del agua de mar a la temperatura y salinidad de captación, y  $V_F$  la velocidad del flujo de agua fría.

El factor de fricción  $f_{F,t}$  se determina con la ecuación de Churchill. La elección se basa en su validez para cualquier valor del número de Reynolds y en que no es iterativa, facilitando su aplicación en algoritmos.

$$f_{F,t} = \left[ \left( \frac{8}{Re_{F,t}} \right)^{12} + (A + B)^{\frac{3}{2}} \right]^{\frac{1}{12}} \quad (39)$$

Los parámetros A y B se definen de acuerdo con las siguientes expresiones:

$$A = \left[ -2.457 \ln \left( \left( \frac{7}{Re_{F,t}} \right)^{0.9} + 0.27 \frac{\varepsilon_{F,t}}{D_{i,F}} \right) \right]^{16} \quad (40)$$

$$B = \left( \frac{37530}{Re_{F,t}} \right)^{16} \quad (41)$$

Donde  $\varepsilon_{F,t}$  es la rugosidad absoluta del interior de la tubería,  $D_{i,F}$  el diámetro interno del ducto y  $Re_{F,t}$  el número de Reynolds del flujo de agua fría en su paso por la tubería, dado por:

$$Re_{F,t} = \frac{D_{i,F} V_F \rho_{am}(\bar{T}_Z, \bar{S}_Z)}{\mu_{am}(\bar{T}_Z, \bar{S}_Z)} \quad (42)$$

Donde  $V_F$  es la velocidad del flujo frío,  $\rho_{am}(\bar{T}_Z, \bar{S}_Z)$  la densidad del fluido a la profundidad de captación y  $\mu_{am}(\bar{T}_Z, \bar{S}_Z)$  la viscosidad dinámica del agua de mar a la temperatura y salinidad de captación (promedios anuales).

La caída de presión del flujo de agua fría en su paso por el condensador  $\Delta P_{BF,c}$  se calcula con la siguiente relación para intercambiadores de calor de placas.

$$Re_{F,t} = \frac{D_{i,F} V_F \rho_{am}(\bar{T}_Z, \bar{S}_Z)}{\mu_{am}(\bar{T}_Z, \bar{S}_Z)} \quad (43)$$

El primer término representa la pérdida por fricción dentro de los canales. Donde  $f_{F,c}$  es el factor de fricción en el condensador,  $L_{P,c}$  la distancia vertical entre los centros de los puertos de cada placa del condensador,  $P_{F,c}$  el número de pasos del condensador,  $\rho_{F,c}$  la densidad del flujo de agua fría en el condensador,  $D_{e,c}$  el diámetro equivalente de cada canal del condensador,  $\dot{m}_F$  el flujo masico de agua fría,  $N_{c/p,c}$  el número de canales por paso en el condensador y  $A_{canal,c}$  el área de la sección transversal de cada canal, que puede ser calculado como el producto entre el espaciamiento  $\Delta x_c$  y el ancho de cada placa  $D_{placa,c}$ .

$$A_{canal,c} = \Delta x_c D_{placa,c} \quad (44)$$

El segundo término en la ecuación de  $\Delta P_{F,c}$  es la variación de la presión por efecto gravitacional, donde  $g$  es la aceleración de gravedad.

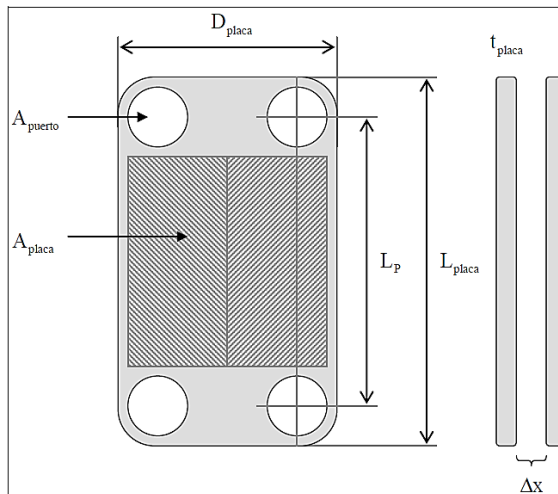


Figura 3.12 Dimensiones de las placas del intercambiador

Fuente: Grupo IIIDEA (IIIDEA, 2017)

El factor de fricción del flujo de agua fría en las placas del condensador R, C se obtiene con la ecuación de Churchill.

$$f_{F,c} = \left[ \left( \frac{8}{Re_{F,c}} \right)^{12} + (A + B)^{-\frac{3}{2}} \right]^{\frac{1}{12}} \quad (45)$$

Donde los parámetros A y B se definen de acuerdo la siguiente ecuación:

$$f_{F,c}A = \left[ -2.457 \ln \left( \left( \frac{7}{Re_{F,c}} \right)^{0.9} + 0.27 \frac{\varepsilon_c}{D_{e,c}} \right) \right]^{16} \quad (46)$$

$$B = \left( \frac{37530}{Re_{F,c}} \right)^{16} \quad (47)$$

Donde  $\varepsilon_c$  es la rugosidad absoluta del material de las placas del condensador,  $D_{e,c}$  el diámetro equivalente de cada canal y  $Re_{F,c}$  el número de Reynolds del flujo de agua fría en su paso por el condensador, calculado de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$Re_{F,t} = \frac{D_{e,c} V_{F,c} \rho_{F,C}}{\mu_{F,C}} \quad (48)$$

Donde  $\mu_{F,C}$ , es la viscosidad dinámica del flujo de agua fría en el condensador y  $V_{F,c}$  la velocidad del flujo en su paso por los canales del condensador, calculado de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$V_{F,c} = \frac{\dot{m}_F}{N_{p,C} \rho_{F,C} A_{canal,C}} \quad (49)$$

En el condensador, el diámetro equivalente  $D_{e,c}$  puede ser aproximado al doble del espaciamiento entre las placas  $\Delta x_c$  (Soto & Vergara, 2012).

$$D_{e,c} = 2 \Delta x_c \quad (50)$$

Igualmente, el número de canales en el condensador  $N_{canales,C}$  se puede obtener conociendo el área de transferencia  $A_C$  y el área de cada placa  $A_{placa,C}$ .

$$N_{canales,C} = 1 + \frac{A_C}{A_{placa,C}} \quad (51)$$

Finalmente, el número de canales por paso  $N_{c/p,C}$  en el condensador se puede obtener dividiendo el número de canales  $N_{canales,C}$  y el número de pasos  $P_{F,C}$ .

$$N_{c/p,C} = \frac{N_{canales,C}}{P_{F,C}} \quad (52)$$

Volviendo a  $W_{BF}$ , la caída de presión provocada por la diferencia de densidad entre el agua en la zona de captación y el agua en la zona de descarga  $\Delta P_{BF,\Delta\rho}$  se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$\frac{\Delta P_{BF,\Delta\rho}}{\rho_{am}(\bar{T}_Z, \bar{S}_Z) g} = \Delta Z - \frac{1}{\rho_{am}(\bar{T}_Z, \bar{S}_Z)} \left( \frac{1}{2} (\rho_{am}(\bar{T}_Z, \bar{S}_Z) + \rho_{am}(\bar{T}_Z, \bar{S}_Z)) \Delta Z \right) \quad (53)$$

Donde  $\Delta Z = z - z$  es la diferencia entre la profundidad de captación y de descarga,  $\rho_{am}(\bar{T}_Z, \bar{S}_Z)$  la densidad del agua de mar a la temperatura y salinidad de captación (promedios anuales),  $\rho_{am}(\bar{T}_Z, \bar{S}_Z)$  la densidad del agua de mar a la temperatura y salinidad promedio del mar a la profundidad en que se realiza la descarga, y la eficiencia de la bomba (Frank P. Incropera, 1999).

### 3.7.7 Potencia de la bomba de agua caliente

La potencia de alimentación de la bomba de agua de mar caliente  $P_c$  se calcula con el flujo masico  $\dot{m}_c$ , el trabajo específico realizado por la bomba y la eficiencia de la bomba  $\eta_B$ .

$$P_c = \frac{\dot{m}_c W_{Bc}}{\eta_B} \quad (54)$$

El trabajo específico de la bomba  $W_{BC}$  se obtiene con la caída de presión total en el ducto de agua caliente  $\Delta P_{BF}$  y la densidad del agua de mar  $\rho_{am}(\overline{TSM} + \Delta T_p, \bar{S}_o)$ , S a la temperatura del efluente y a la salinidad superficial (promedios anuales).

$$W_{BC} = \frac{\Delta P_{BC}}{\rho_{am}(\overline{TSM} + \Delta T_p, \bar{S}_o)} \quad (55)$$

La diferencia de presión  $\Delta P_{BC}$  es igual a la caída de presión del flujo en su paso por el evaporador  $\Delta P_{BC,E}$ . La caída de presión en el evaporador  $\Delta P_{BC,E}$  se obtiene, al igual que en el condensador:

$$\Delta P_{BC,E} = \frac{4f_{C,E}L_{P,E}P_{C,E}}{2\rho_{C,E}D_{C,E}} \left( \frac{\dot{m}_C}{N_{c/p,E}A_{canal,E}} \right)^2 + \rho_{C,E} g L_{P,E} \quad (56)$$

Donde  $f_{C,E}$  es el factor de fricción (Fanning factor),  $L_{P,E}$  la distancia vertical entre los centros de los puertos de cada placa del evaporador,  $P_{C,E}$  el número de pasos del evaporador,  $\rho_{C,E}$  la densidad promedio del flujo de agua caliente en el evaporador,  $D_{e,E}$  el diámetro equivalente de cada canal del evaporador,  $\dot{m}_C$  el flujo masico de agua,  $N_{c/p,E}$  el número de canales por paso en el evaporador y  $A_{canal,E}$  el area de la seccion transversal de cada canal, que puede ser calculado como el producto entre el espaciamiento  $\Delta X_E$  y el ancho de cada placa  $D_{placa,E}$ .

$$A_{canal,E} = \Delta X_E D_{placa,E} \quad (57)$$

El factor de fricción del flujo de agua caliente en las placas del evaporado  $f_{C,E}$  se obtiene con la ecuación de Churchill.

$$f_{C,E} = \left[ \left( \frac{8}{Re_{F,c}} \right)^{12} + (A + B)^{-\frac{3}{2}} \right]^{\frac{1}{12}} \quad (58)$$

Donde los parámetros A y B se calculan a través de la siguiente ecuación:

$$A = \left[ -2.457 \ln \left( \left( \frac{7}{Re_{C,E}} \right)^{0.9} + 0.27 \frac{\varepsilon_E}{D_{e,E}} \right) \right]^{16} \quad (59)$$

$$B = \left( \frac{37530}{Re_{C,E}} \right)^{16} \quad (60)$$

Donde  $\varepsilon_E$  es la rugosidad absoluta del material de las placas del evaporador y  $Re_{C,E}$  el número de Reynolds del flujo caliente en su paso por las placas del evaporador, calculado a través de la siguiente ecuación:

$$Re_{C,E} = \frac{D_{e,E} V_{C,E} \rho_{C,E}}{\mu_{C,E}} \quad (61)$$

Donde  $\mu_{C,E}$  es la viscosidad dinámica promedio del flujo de agua caliente en el evaporador y  $V_{C,E}$  la velocidad del flujo en su paso por los canales del evaporador, calculado a través de la siguiente ecuación:

$$V_{C,E} = \frac{\dot{m}_C}{N_{c/p,E} \rho_{C,E} A_{canal,E}} \quad (62)$$

Volviendo a  $\Delta P_{Bc,E}$  el diámetro equivalente  $D_{e,c}$  puede ser aproximado al doble del espaciamiento entre las placas  $\Delta x_c$ .

$$D_{e,c} = 2 \Delta x_c \quad (63)$$

El número de canales en el evaporador  $N_{canales,E}$  se puede obtener conociendo el área de transferencia  $A_E$  y el área de cada placa  $A_{placa,E}$ .

$$N_{canales,E} = 1 + \frac{A_E}{A_{placa,E}} \quad (64)$$

El número de canales por paso  $N_{c/p,E}$  en el evaporador se puede obtener dividiendo el número de canales  $N_{canales,C}$  por el número de pasos  $P_{F,C}$  (Soto & Vergara, 2012).

$$N_{c/p,E} = \frac{N_{canales,E}}{P_{C,E}} \quad (65)$$

### 3.7.8 Volumen del evaporador y condensador

El volumen total ocupado por el evaporador ( $V_E$ ) y por el condensador ( $V_C$ ) se puede estimar con el ancho de cada placa  $D_{placa}$ , el largo placa  $L_{placa}$ , el espesor placa  $t_{placa}$ , el espaciamiento entre placas  $\Delta x$  y el número de canales  $N$  (Soto & Vergara, 2012).

$$V_E = N_{canales,E}(\Delta X_E + t_{placa,E}) D_{placa,E} L_{placa,E} \quad (66)$$

$$V_C = N_{canales,C}(\Delta X_C + t_{placa,C}) D_{placa,C} L_{placa,C} \quad (67)$$

### 3.7.9 Potencia del Evaporador FLASH

La Potencia total de la bomba de vacío,  $P_{vp}$  es calculado como la suma de potencias necesarios para evacuar los gases no condensables en el sistema. En la primera etapa, la mitad de estos gases se libera en la cámara de pre-aireación a una presión de alrededor de 17 kPa y evacuado por compresión a una presión de 30 kPa con reinyección en el efluente de agua de mar caliente. En la segunda etapa, lo no condensable los gases se liberan en el evaporador flash que se extraen con el vapor generado al condensador de desalinización y rechazado por compresión a la presión atmosférica ambiental. La potencia total de la bomba de vacío se expresa por siguiendo la ecuación:

$$P_{vp} = P_{vp1} + P_{vp2} \quad (68)$$

Cuando  $P_{vp1}$  y  $P_{vp2}$  son calculados a través de las siguientes ecuaciones:

$$P_{vp1} = \frac{nm_w k_a R_a}{2(k_a - 1)} (T_w + 273.15) \left( \left( \frac{3}{1} \right)^{\frac{k_a - 1}{k_a}} - 1 \right) \quad (69)$$

$$P_{vp2} = \frac{nm_w k_a R_a}{2(k_a - 1)} (T_s + 273.15) \left( \left( \frac{P_{atm}}{P_s} \right)^{\frac{k_a - 1}{k_a}} - 1 \right) \quad (70)$$



Donde  $k_a$  es la relación de calor específico del aire tomado como 1.4,  $R_a$  es el valor constante de aire estándar tomado como 287 J/kgK y  $n$  es la concentración másica de aire en el agua de mar de alimentación tomada como 19,36 mg /kg.

### 3.7.10 Evaluación del sistema

La salida de la potencia neta del sistema OTEC se calcula de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\dot{P}_{net} = \dot{P}_G - (\dot{P}_{BR} + \dot{P}_F + \dot{P}_C + \dot{P}_V) \quad (71)$$

Otro punto importante es la exergía y energética eficiencia, para ello ya se debe tener definida la potencia neta generada dividida por la tasa de transferencia de calor en el evaporador.

$$n_p = \frac{\dot{P}_{net}}{\dot{Q}_E} = \frac{\text{Energía de salida o producida}}{\text{Insumos de Energía}} \quad (72)$$

### 3.7.11 Propiedad de ciclo híbrido

Para el ciclo cerrado del sistema híbrido primero debe establecerse el refrigerante, el cual es el amoníaco y las condiciones de balance propias del ciclo cerrado por lo que la Figura 2.13 nos ayuda a entender los estados de acuerdo con la Figura 2.12 que nos muestra un panorama general de todos los puntos del sistema híbrido.

Es necesario mostrar paso a paso como es que se establecen cada estado en el ciclo cerrado del sistema híbrido para poder definir las condiciones variantes y las estacionarias dentro de las simulaciones que se tendrán para evaluar las condiciones más óptimas.

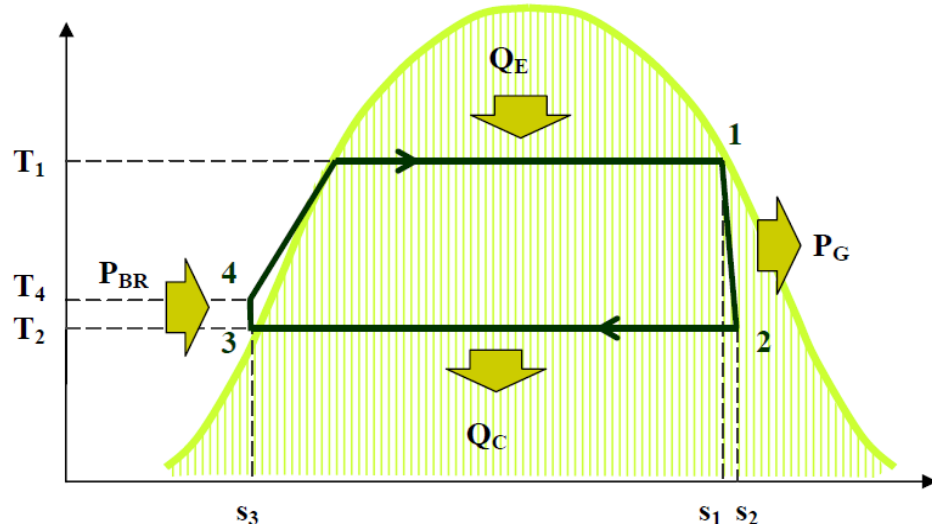


Figura 3.13 Diagrama del ciclo Rankine cerrado  
Fuente: Elaboración propia

Es así como a la salida del evaporador el estado 1 se tiene como vapor saturado  $T_E$ .

$$T_1 = T_E = T_5 - \Delta T_E \quad (73)$$

Dada la condición de vapor saturado, se determinan la presión  $P_1$ , entalpía específica  $h_1$  y entropía específica  $S_1$  en forma directa, ingresando con la temperatura  $T_1$ .

$$P_1 = P_{sat}(T_1) \quad (74)$$

$$h_1 = h_{vap\ sat}(p_1) = h_{vap\ sat}(T_1) \quad (75)$$

$$S_1 = S_{vap\ sat}(P_1) = S_{vap\ sat}(T_1) \quad (76)$$

El estado 2s es el estado isentrópico, que supone una eficiencia de 100% en la turbina. En él hay mezcla liquido-vapor a temperatura de condensación  $T_C$ , y supone conservación de entropía respecto al estado 1.

$$T_{2s} = T_2 = T_C = T_3 \quad (77)$$

$$S_{2s} = S_1 \quad (78)$$

Se determinan la presión  $P_{2s}$  con la temperatura de condensación  $T_2$ . Se determina la calidad del vapor  $X_{2s}$  y la entalpia específica  $h_{2s}$  ingresando los datos secuencialmente.

$$P_{2s} = P_2 = P_{sat}(T_2) \quad (79)$$

$$X_{2s} = X(T_{2s}, S_{2s}) \quad (80)$$

$$h_{2s} = h(p_2, x_{2s}) \quad (81)$$

El trabajo específico realizado en la turbina  $W_T$  se obtiene con la diferencia de entalpia específica entre los estados 1 y 2s, y con la eficiencia isentrópica de la turbina  $\eta_T$ .

$$W_T = W_{1-2} = (h_1 - h_2) \eta_T \quad (82)$$

Habiendo determinado el trabajo específico real en la turbina  $W_T$ , se calcula la entalpia específica del estado 2,  $h_2$ , mediante un balance de energía.

En el estado 2, a la salida de la turbina, hay mezcla liquido-vapor, que queda ahora completamente determinado. Se calcula la calidad del vapor  $x_2$  y la entropía específica  $S_2$ , secuencialmente.

$$X_2 = X(P_2, h_2) \quad (83)$$

$$S_2 = S(T_2, X_2) \quad (84)$$

En el estado 3 hay liquido saturado a la temperatura de condensación  $T_3$ , de modo que es posible calcular directamente la presión  $P_3$ , la entalpia específica  $h_3$  y la entropía específica  $S_3$ .

$$T_3 = T_2 = T_c \quad (85)$$

$$P_3 = P_2 = P_{sat}(T_2) \quad (86)$$

$$h_3 = h_{liq\ sat}(P_3) = h_{liq\ sat}(T_3) \quad (87)$$

$$S_3 = S_{liq\ sat}(P_3) = S_{liq\ sat}(T_3) \quad (88)$$

Además, para efectos de calcular el trabajo en la bomba, se determina el volumen específico  $V_3$ .

$$V_3 = V_{liq\ sat}(P_3) = V_{liq\ sat}(T_3) \quad (89)$$

El trabajo específico efectuado por la bomba del refrigerante  $W_{BR}$  para producir el aumento de presión requerido, se obtiene con la diferencia de presión  $\Delta P$  y el volumen específico  $V_3$ .

$$W_{BR} = W_{3-4} = V_3 \Delta P = V_3 (P_4 - P_3) = V_3 (P_1 - P_3) \quad (90)$$

En el estado 4 hay líquido subenfriado. La presión  $P_4$  es la del evaporador y la entalpia  $h_4$  se obtiene al sumar el trabajo específico ejercido por la bomba  $W_{BR}$  a la entalpia del estado 3:

$$P_4 = P_1 = P_{sat}(T_1) \quad (91)$$

$$h_4 = h_3 + w_{BR} \quad (92)$$

Con estos dos datos se determina la temperatura  $T_4$  y el ciclo de vapor queda determinado por completo.

$$T_4 = T(P_4, h_4) \quad (93)$$

Explicado esto se puede decir los demás estados del sistema híbrido de acuerdo con los demás componentes como en el evaporador, condensador y en la bomba de vacío.

### 3.8 Evaluación del potencial energético

En esta fase se detalle el proceso para calcular los resultados energéticos como la potencia base del sistema, la eficiencia del sistema OTEC y el tiempo de vida.

#### 3.8.1 Potencia base del sistema

En los capítulos anteriores se establecieron los parámetros necesarios para la implementación de la planta, como el perfil de barimetría, la salinidad y el gradiente de la Región de Paita. En ese sentido, se detallará la potencia base del sistema, el  $P_{G,base}$  es de 20 MW, el cual se establece a partir de la necesidad en la región de Tumbes.

#### 3.8.2 Estimar la eficiencia de la planta OTEC

Para el cálculo de la eficiencia del sistema de un punto de vista termodinámico, se deberá conocer los parámetros termodinámicos del intercambiador de calor, evaporador y el condensador, teniendo en cuenta como fluido de trabajo el amoniaco. En sentido, se describe el procedimiento para el cálculo de la eficiencia de la planta.

Los componentes asociados al ciclo Rankine (la bomba, evaporador, la turbina y el condensador) para el cual se diseña en flujo estacionario, por lo tanto, se considera que los cambios en la energía potencial y cinética del vapor son pequeños en relación con los parámetros de trabajo y transferencia de calor, de manera que son insignificantes. En ese sentido, la ecuación de energía de flujo estacionario por unidad de masa de vapor se reduce a la siguiente ecuación:

$$(Q_{entrada} - Q_{salida}) + (W_{entrada} - W_{salida}) = h_e - h_i \quad (94)$$

Cabe precisar que los dispositivos de evaporador y condensador no realizan ningún trabajo y el diseño establece que la bomba y la turbina son isentrópicos, entonces a continuación se dará calculo a la relación de conservación de energía para cada dispositivo.

Para el cálculo de la potencia generada por el fluido Refrigerante de trabajo que para este diseño es el amoniaco depende de la  $\dot{m}_R$ , el trabajo específico de la turbina  $W_T$  y la eficiencia del generador  $\eta_G$ .

$$P_G = n_G \dot{m}_R W_T \quad (95)$$

Potencia de alimentación de la bomba del refrigerante  $P_{BR}$ , se calcula con el flujo masico del refrigerante  $\dot{m}_R$ , el trabajo especifico  $W_{BR}$  y la eficiencia de la bomba  $n_B$ .

$$P_{BR} = \frac{\dot{m}_R W_{BR}}{n_B} \quad (96)$$

En cuanto, para mantener la presión en la cámara flash se requiere una bomba de vacío cuya potencia  $P_v$ , el cual depende del flujo masico total entrante.

$$P_{v1} = \frac{nm_w k_a R_a}{2(k_a - 1)} \left[ (T_w + 273.15) \left( \left( \frac{3}{1} \right)^{\frac{k_a - 1}{k_a}} - 1 \right) \right] \quad (97)$$

$$P_{v2} = \frac{nm_w k_a R_a}{2(k_a - 1)} \left[ (T_w + 273.15) \left( \left( \frac{P_{atm}}{P_s} \right)^{\frac{k_a - 1}{k_a}} - 1 \right) \right] \quad (98)$$

La potencia de alimentación de la bomba de agua de mar fría  $P_F$  se calcula con el flujo masico  $\dot{m}_F$ , el trabajo específico realizado por la bomba  $W_{BF}$  y la eficiencia de la bomba  $n_B$ .

$$P_F = \frac{\dot{m}_F W_{BF}}{n_B} \quad (99)$$

La potencia de la bomba de agua de mar caliente  $P_C$  se calcula con el flujo masico  $\dot{m}_C$ , el trabajo específico realizado por la bomba  $W_{BC}$  y la eficiencia de la bomba  $n_B$ .

$$P_C = \frac{\dot{m}_C W_{BC}}{n_B} \quad (100)$$

La eficiencia de la planta OTEC,  $\eta_p$ , se obtiene como la potencia eléctrica final en el generador  $P_G$ , menos la potencia de la bomba del refrigerante  $P_{BR}$ , la potencia de la bomba de agua fría  $P_F$ , la potencia de la bomba de agua caliente  $P_C$  y la potencia de la bomba de vacío  $P_V$ , dividido por la energía intercambiada en el evaporador  $\dot{Q}_E$ .

$$\eta_p = \frac{P_n}{\dot{Q}_E} = \frac{P_G - P_{BR} - P_F - P_C - P_V}{\dot{Q}_E} \quad (101)$$

### 3.8.3 Parámetros de diseño

En la Tabla 9 se da detalle de los parámetros comunes para los 45 sistemas simulados. El fluido de trabajo para el ciclo cerrado es amoniaco, la potencia en el generador para todos los sistemas propuestos, es igual a 20 MW. Los coeficientes globales de transferencia de calor en el evaporador, la velocidad del ducto de agua fría y demás parámetros se encuentran en un intervalo el cual cumple con los criterios de trabajo (Soto & Vergara, 2012).

**Tabla 9.** Parámetros de diseño para los sistemas

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Potencia generada	$P_G$	20000	kW
Refrigerante de trabajo	NH <sub>3</sub>	amoniaco	
Eficiencia isentrópica de la turbina	$\eta_T$	0.9	
Eficiencia de conversión del generador	$\eta_G$	0.95	
Eficiencia de alimentación de las bombas	$\eta_B$	0.8	
Coeficiente global evaporador	$U_E$	4.9	$kWm^{-2}K^{-1}$
Coeficiente global condensador	$U_C$	4.42	$kWm^{-2}K^{-1}$
Diferencia de temperatura en el evaporador	$\Delta T_E$	3	°C
Diferencia de Temperatura en el condensador	$\Delta T_C$	3	°C
Aumento de temperatura para el efluente	$\Delta T_P$	10	°C
Rugosidad en el ducto de agua fría	$\varepsilon_{F,t}$	0.000004	m
Velocidad del flujo e ducto de agua fría	$V_f$	1.9	$ms^{-1}$
Esfuerzo máximo del material del ducto	$\sigma_u$	618.9	MPa
Factor de seguridad en el ducto	n	1.3	
Material de las placas en intercambiadores	Ti	Titanio	
Distancia entre puertos en condensador	$L_{p,c}$	0.8	m
Numero de pasos del condensador	$P_{f,c}$	1	
Área efectiva de cada placa del condensador	$A_{placa,c}$	3.2	$m^2$
Espaciamiento entre placas del condensador	$\Delta X_c$	0.005	M
Ancho de cada placa del condensador	$D_{placa,c}$	4	M
Espesor de las placas del condensador	$t_{placa,c}$	0.001	m
Rugosidad absoluta en placas del condensador	$\varepsilon_C$	0.00135	m

Distancia entre puertos en evaporador	$L_{p,E}$	0.8	m
Numero de pasos del evaporador	$P_{F,E}$	1	
Área efectiva de cada placa del evaporador	$A_{placa,E}$	3.2	$m^2$
Espaciamiento entre placas del evaporador	$\Delta X_E$	0.005	m
Ancho de cada placa del evaporador	$D_{placa,E}$	4	m
Espesor de las placas del evaporador	$t_{placa,E}$	0.001	m
Rugosidad absoluta en placas del evaporador	$\varepsilon_E$	0.00135	m
Presión en el evaporador flash	$P$	1.5	kPa
Entalpia en el punto 1	$h_1$	1463.4	kJ/kg
Entalpia en el punto 2	$h_2$	1404.14965	kJ/kg
Entalpia en el punto 3	$h_3$	223.6	kJ/kg
Entalpia en el punto 4	$h_4$	224.2632	kJ/kg
Temperatura en el punto 1	$T_1$	24.9	°C
Temperatura en el punto 2	$T_2$	9.29	°C
Temperatura en el punto 3	$T_3$	9.29	°C
Temperatura en el punto 4	$T_4$	9.40183	°C
Presión en el punto 1	$P_1$	1000	kPa
Presión en el punto 2	$P_2$	600	kPa
Presión en el punto 3	$P_3$	600	kPa
Presión en el punto 4	$P_4$	1000	kPa

### 3.8.4 Función Psi

Para el cálculo del flujo  $\dot{m}_F$  optimo y comparación de las 45 simulaciones propuestas para obtener resultados de optimización, se utiliza la siguiente ecuación:

$$\psi = \frac{C_I + C_{II}}{P_n} = \frac{c_i(A_E + A_C) + c_{ii}V}{P_G - P_{BR} - P_F - P_C - P_V} \quad (102)$$

Donde  $c_i$  es el costo de las placas de los intercambiadoras por unidad de área de transferencia,  $c_{ii}$  el costo del ducto de agua fría por unidad de volumen y  $V$  el volumen total de material usado en el ducto.

El costo  $c_i$  se estima con el precio del material de las placas, las dimensiones de cada placa y la densidad del material. El costo  $c_{ii}$  se estima con el precio promedio por unidad de longitud de ductos de distintas dimensiones, la densidad del material y las dimensiones. El volumen  $V$  se calcula como:



$$V = \frac{\pi}{4} \left[ (D_{i,F} + t_F)^2 - D_{i,F}^2 \right] L_F \quad (103)$$

Donde  $D_{i,F}$  es el diámetro interno,  $t_F$  el espesor del ducto y  $L_F$ , el largo total. La función  $\psi$  tiene unidades de costo dividido por potencia, y respecto el costo de los ítems principales y variables de un sistema a otro por unidad de potencia neta de la planta.

### 3.8.5 Sistemas propuestos

Para el diseño de la planta OTEC se establecieron las temperaturas superficiales promedio para cada estación del año con el fin de obtener una simulación de la planta a lo largo del año, así mismo se estableció la temperatura superficial promedio para todo del año (en adelante, TSMp), de acuerdo con la Tabla 10:

**Tabla 10.** Temperatura superficial promedio para cada estación del año

MES	TSM (°C)	Estaciones	TSM	TSMp (°C)
Ene	28.15	Verano	28.57	26.95
Feb	28.63			
Mar	28.94			
Abr	28.29	Otoño	26.85	
May	26.67			
Jun	25.60			
Jul	25.76	Invierno	25.60	
Ago	25.20			
Set	25.83			
Oct	26.62	Primavera	26.79	
Nov	26.56			
Dic	27.18			

Para el diseño de la planta OTEC se propuso como profundidad de captación  $z$ : 600 m, 800 m y 1000 m, y como profundidad de retorno  $z'$ : 100 m,  $z'$ : 150 m y  $z'$ : 200 m. Como la operación de la planta se simuló mensualmente, los 9 sistemas propuestos en las diferentes estaciones del año y a la TSMp, siendo así un total de 45 simulaciones.

**Tabla 11.** Simulación de la planta OTEC

Simulación	Z	Z'	Estación	Simulación	Z	Z'	Estación
1	600	100	verano	24	800	200	invierno
2	600	150	verano	25	800	100	primavera
3	600	200	verano	26	800	150	primavera
4	600	100	otoño	27	800	200	primavera
5	600	150	otoño	28	800	100	TSMp
6	600	200	otoño	29	800	150	TSMp
7	600	100	invierno	30	800	200	TSMp
8	600	150	invierno	31	1000	100	verano
9	600	200	invierno	32	1000	150	verano
10	600	100	primavera	33	1000	200	verano
11	600	150	primavera	34	1000	100	otoño
12	600	200	primavera	35	1000	150	otoño
13	600	100	TSMp	36	1000	200	otoño
14	600	150	TSMp	37	1000	100	invierno
15	600	200	TSMp	38	1000	150	invierno
16	800	100	verano	39	1000	200	invierno
17	800	150	verano	40	1000	100	primavera
18	800	200	verano	41	1000	150	primavera
19	800	100	otoño	42	1000	200	primavera
20	800	150	otoño	43	1000	100	TSMp
21	800	200	otoño	44	1000	150	TSMp
22	800	100	invierno	45	1000	200	TSMp
23	800	150	invierno				

### 3.9 Aspecto económico y ambiental

En este punto se dará detalle a la evaluación económica de la OTEC de acuerdo con los indicadores LCOE, el tiempo de vida y la función para el flujo óptimo.

#### 3.9.1 Estimación del costo nivelado eléctrico

El LCOE es una herramienta que permite analizar distintos proyectos de generación, que pueden ser de distintos tamaños o distintas tecnologías, y llevarlos a una unidad común de comparación. Esta unidad de comparación facilita la toma de decisiones del inversionista, permitiendo evaluar y comparar una cartera de proyectos respecto a sus

costos (Hugh Rudnick, Federico Heisig Mohr, 2016), el cual se calcula de la siguiente forma (Langer et al., 2020):

$$LCOE = \frac{CRF * CAPEX + OPEX}{E_t} \quad (104)$$

$$RF = \frac{i * (1 + i)^N}{(1 + i)^N - 1} \quad (105)$$

CAPEX: Gasto en Capital

OPEX: Gasto Operacional

$E_t$ : Energía Producida en un año

CRF: Factor de recuperación de capital

N: Tiempo de vida del proyecto

i: Tasa de interés

### 3.9.2 Evaluación del tiempo de vida de la planta OTEC

En cuanto a la vida útil operativa de una planta OTEC, existen diferencias entre estudios similares. Sin embargo, en el estudio (Langer et al., 2020) en el cual hace mención nueve (9) proyectos de planta OTEC representativos y en ellos se considera que el tiempo de vida útil de una planta es de treinta (30) años.

### 3.9.3 Aspecto Ambiental

En cuanto a la identificación de los aspectos ambientales comunes en las plantas de aprovechamiento OTEC, se realizará la siguiente metodología:

- Identificación de las actividades a desarrollarse en la etapa de construcción y operación del proyecto, y que podrían causar impactos ambientales. Para el desarrollo de esta actividad se consideran las investigaciones usadas en los antecedentes de esta investigación.

- Identificación de componentes ambientales. Para la identificación de las alteraciones de estos componentes se tomará en consideración las características ambientales del entorno y las potenciales acciones generadoras de impactos en la zona de ubicación del proyecto.
- Para la evaluación del impacto ambiental, se ha desarrollado la matriz de Leopold modificada, que permite establecer las relaciones causa efecto de acuerdo con las características del proyecto.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS

Posterior a la recopilación y control de la información, se evaluó las 45 simulaciones propuestas. Estas simulaciones toman como punto de partida el flujo masico de agua fría, que sería el punto desde que se procede a evaluar todos los sistemas hasta llegar al cálculo de la Función  $\psi$ , la eficiencia del sistema OTEC, el cálculo del diámetro del ducto de agua fría y demás parámetros del sistema.

#### 4.1 Selección de profundidad de captación y retorno para 20 MW

En este punto se evaluará las condiciones de diseño de planta como el punto de captación y de retorno, a partir de la función  $\psi$  y la eficiencia del sistema OTEC.

##### 4.1.1 Flujo de agua fría

Para el sistema propuesto de 20 MW se estableció el flujo másico de agua de mar fría  $\dot{m}_F$  como el valor optimo que minimiza la razón  $\psi$ . La Figura 4.1 muestra la relación entre la razón  $\psi$  y el flujo  $\dot{m}_F$  cuando  $z$  es 1000 m,  $z'$  es 100 m y a TSMp. El mínimo valor de  $\psi$  es 10.12 US\$/W cuando el flujo frio es 22600 kg/s y el diámetro interno del ducto frio  $D_{i,F}$  es 3.84 m.

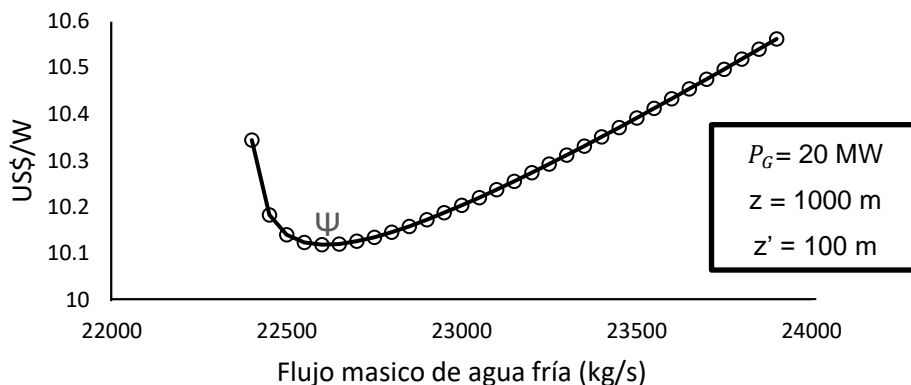


Figura 4.1 Flujo de masa agua fría óptimo para la simulación 43.

La Figura 4.2 muestra la relación entre la razón  $\psi$  y el flujo  $\dot{m}_F$  cuando  $z$  es 1000 m,  $z'$  es 150 m y a TSMp. El mínimo valor de  $\psi$  es 10.131 US\$/W cuando el flujo frío es 22600 kg/s y el diámetro interno del ducto frío  $D_{i,F}$  es 3.84 m.

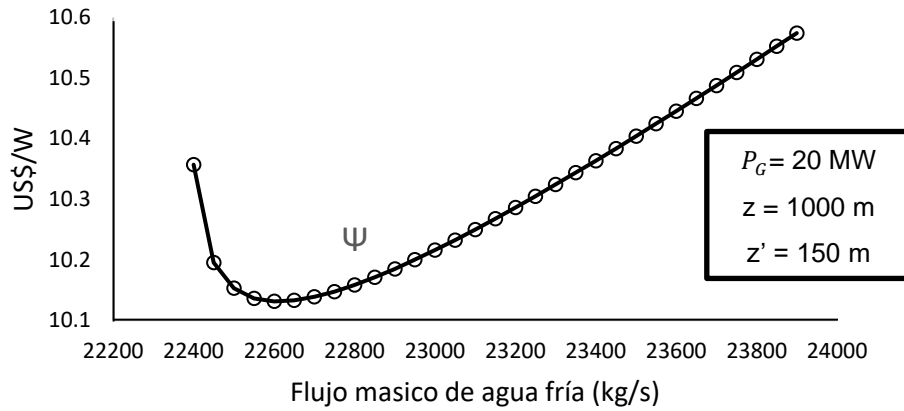


Figura 4.2 Flujo de masa agua fría óptimo para la simulación 44.

La Figura 4.3 muestra la relación entre la razón  $\psi$  y el flujo  $\dot{m}_F$  cuando  $z$  es 1000 m,  $z'$  es 200 m y a TSMp. El mínimo valor de  $\psi$  es 10.138 US\$/W cuando el flujo frío es 22600 kg/s y el diámetro interno del ducto frío  $D_{i,F}$  es 3.84 m.

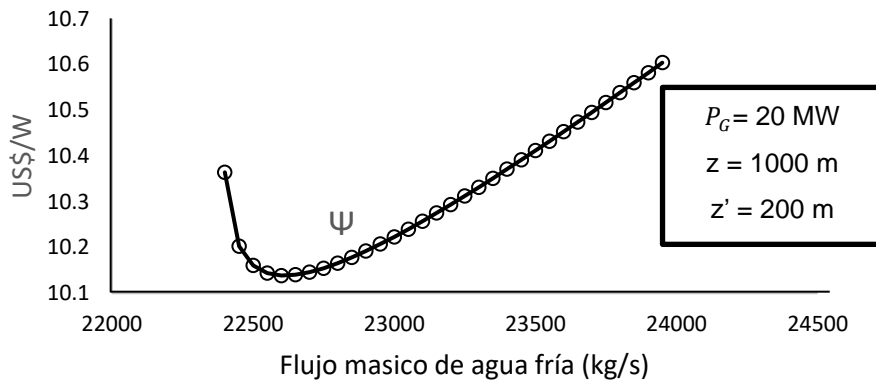


Figura 4.3 Flujo de masa agua fría óptimo para la simulación 45.

La Figura 4.4 muestra la relación entre la razón  $\psi$  y el flujo  $\dot{m}_F$  cuando  $z$  es 600 m,  $z'$  es 100 m y a TSMp. El mínimo valor de  $\psi$  es 10.439 US\$/W cuando el flujo frío es 36500 kg/s y el diámetro interno del ducto frío  $D_{i,F}$  es 4.88 m.

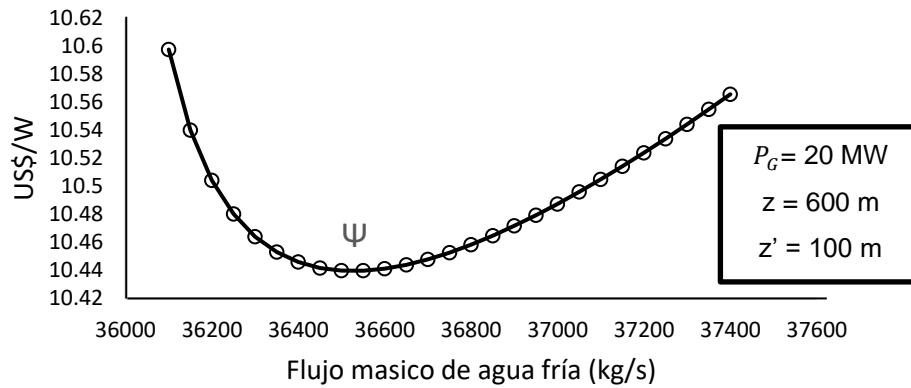


Figura 4.4 Flujo de masa agua fría óptimo para la simulación 14.

La Figura 4.5 muestra la relación entre la razón  $\psi$  y el flujo  $\dot{m}_F$  cuando  $z$  es 600 m,  $z'$  es 150 m y a TSMp. El mínimo valor de  $\psi$  es 10.456 US\$/W cuando el flujo frío es 36550 kg/s y el diámetro interno del ducto frío  $D_{i,F}$  es 4.88 m.

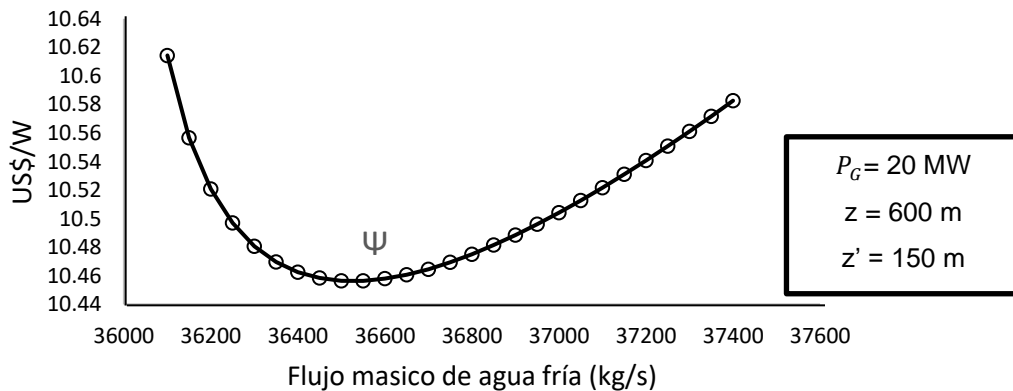


Figura 4.5 Flujo de masa agua fría óptimo para la simulación 15.

La Figura 4.6 muestra la relación entre la razón  $\psi$  y el flujo  $\dot{m}_F$  cuando  $z$  es 600 m,  $z'$  es 200 m y a TSMp. El mínimo valor de  $\psi$  es 10.467 US\$/W cuando el flujo frío es 36550 kg/s y el diámetro interno del ducto frío  $D_{i,F}$  es 4.88 m.

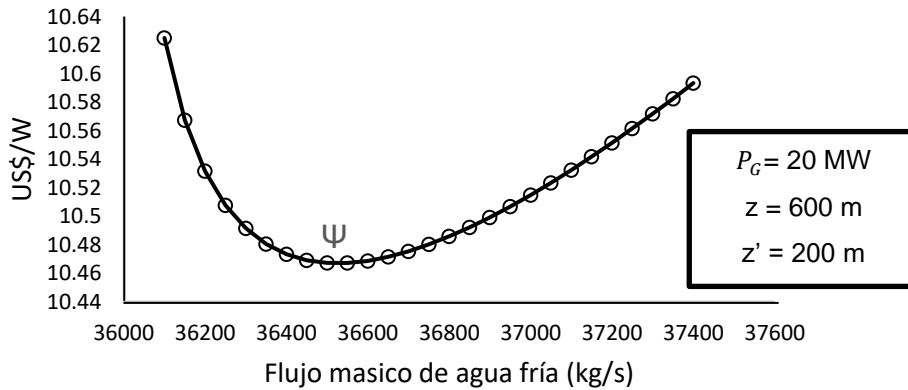


Figura 4.6 Flujo de masa agua fría óptimo para la simulación 16.

La Figura 4.7 muestra la relación entre la razón  $\psi$  y el flujo  $\dot{m}_F$  cuando  $z$  es 800 m,  $z'$  es 100 m y a TSMp. El mínimo valor de  $\psi$  es 10.233 US\$/W cuando el flujo frío es 27900 kg/s y el diámetro interno del ducto frío  $D_{i,F}$  es 4.27 m.

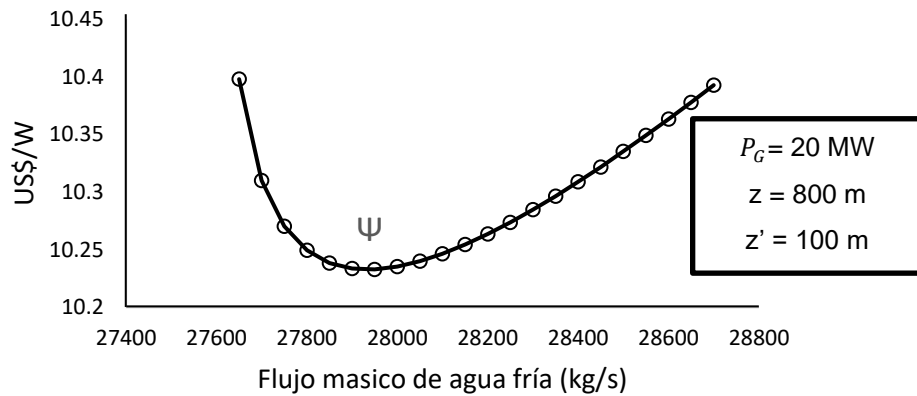


Figura 4.7 Flujo de masa agua fría óptimo para la simulación 28.



La Figura 4.8 muestra la relación entre la razón  $\psi$  y el flujo  $\dot{m}_F$  cuando  $z$  es 800 m,  $z'$  es 150 m y a TSMp. El mínimo valor de  $\psi$  es 10.247 US\$/W cuando el flujo frío es 27900 kg/s y el diámetro interno del ducto frío  $D_{i,F}$  es 4.27 m.

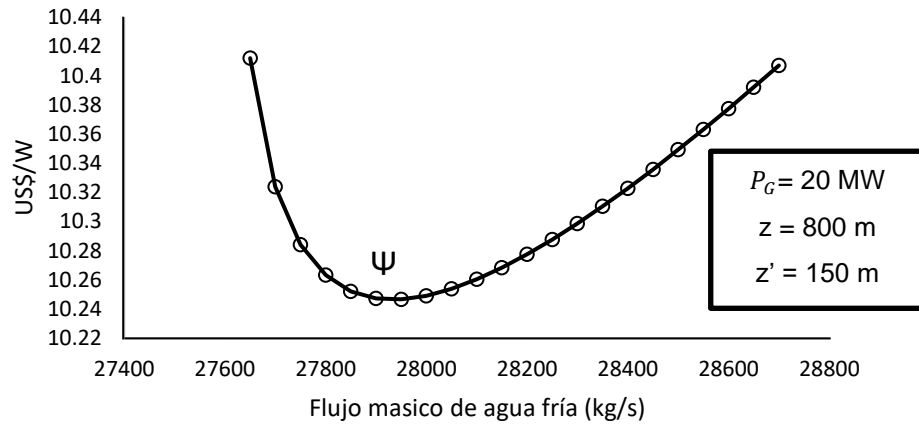


Figura 4.8 Flujo de masa agua fría óptimo para la simulación 29.

La Figura 4.9 muestra la relación entre la razón  $\psi$  y el flujo  $\dot{m}_F$  cuando  $z$  es 800 m,  $z'$  es 200 m y a TSMp. El mínimo valor de  $\psi$  es 10.256 US\$/W cuando el flujo frío es 27900 kg/s y el diámetro interno del ducto frío  $D_{i,F}$  es 4.27 m.

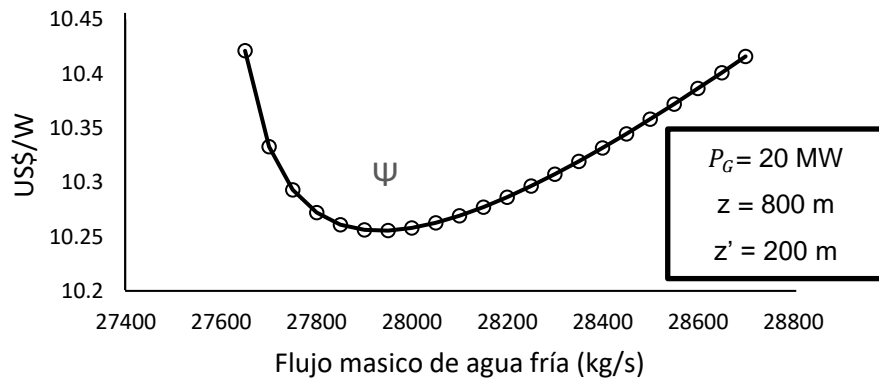


Figura 4.9 Flujo de masa agua fría óptimo para la simulación 30.

La Figura 4.10 se muestra los niveles de agua fría óptimos, cuando  $z$  es igual a 600, 800 y 1000, siendo 22 600 kg/s el flujo masico óptimo de agua fría el menor cuando  $z$  es igual a 1000 m.

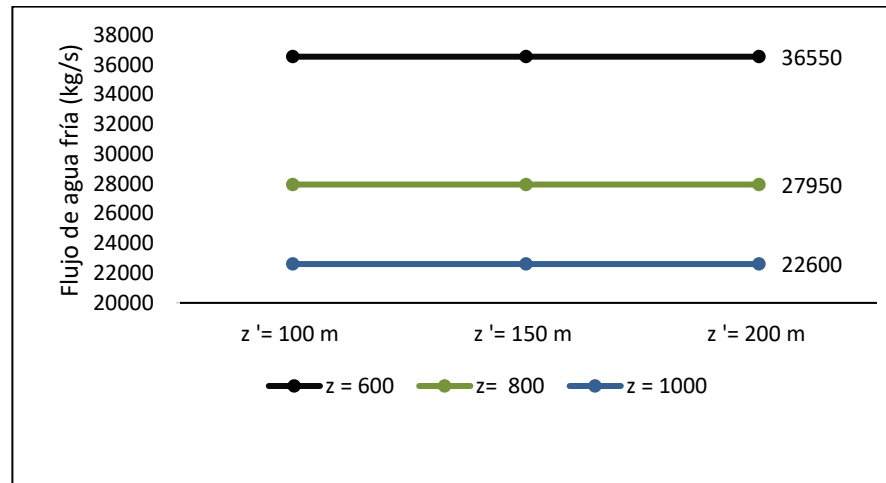


Figura 4.10 Flujo masico de agua fría en función de  $z$

En la Tabla 12 se muestra los diámetros óptimos para el ducto de agua fría para cada uno de los diferentes sistemas propuestos y a condiciones a TSMp. Siendo 3.84 m el menor diámetro, agua fría extraída a unos  $z=1000$ .

**Tabla 12.** Diámetro optimo del ducto de agua fría (m) para 20 MW

$D_{i,f}(m)$	$z' = 100\text{ m}$	$z' = 150\text{ m}$	$z' = 200\text{ m}$
$z = 600$	4.88	4.88	4.87
$z = 800$	4.27	4.27	4.27
$z = 1000$	3.84	3.84	3.84

#### 4.1.2 Flujo refrigerante

En la Tabla 13 el flujo masico del refrigerante (amonaco) es de 394.796 kg/s para cada valor de  $z$  y  $z'$ . Esto se debe a que las condiciones del ciclo cerrado Rankine cerrado fueron dadas a condiciones ideales por el software DWSIM.

**Tabla 13.** Flujo masico del refrigerante (kg/s) en el ciclo cerrado Rankine

	z = 600	z = 800	z = 10000
$m_R$ (kg/s)	394.796	394.796	394.796

#### 4.1.3 Caída de presión en el flujo de agua fría

La Figura 4.11 nos muestra la composición de  $\Delta p_{BF}$  para los sistemas de captación de 600, a TSMp y para las profundidades de retorno ( $z'$ ) 100 m, 150 m y 200 m, siendo  $\Delta p_{BF}$  23.797, 24.435 y 24.849; respectivamente. Asimismo, es preciso indicar que  $\Delta p_{BF,c}$  varía desde 67 % hasta el 70 % de  $\Delta p_{BF}$  para cada  $z'$ .

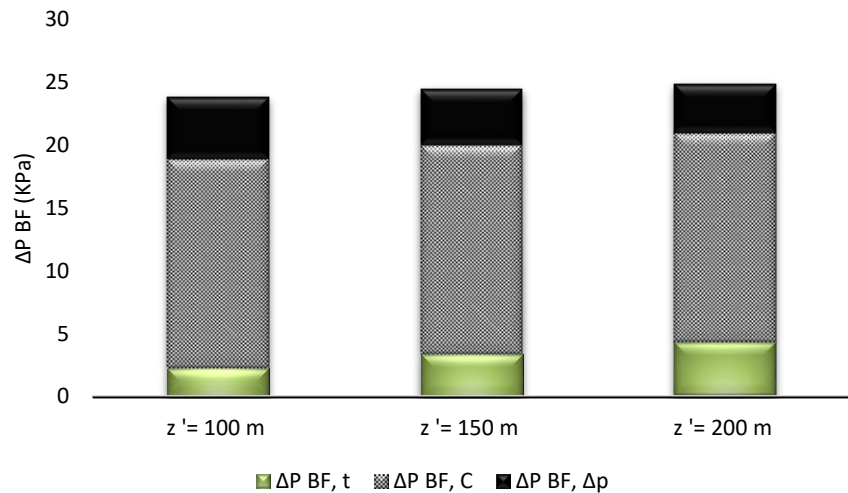


Figura 4.11 Caída de presión  $\Delta P_{BF}$  en el flujo de agua fría para  $z = 600$  m y TSMp

La Figura 4.12 nos muestra la composición de  $\Delta p_{BF}$  para los sistemas de captación de 800, a TSMp y para las profundidades de retorno ( $z'$ ) 100 m, 150 m y 200 m, siendo  $\Delta p_{BF}$  27.501, 28.231 y 28.695; respectivamente. Asimismo, es preciso indicar que  $\Delta p_{BF,c}$  varía desde 57 % hasta el 59 % de  $\Delta p_{BF}$  para cada  $z'$ .

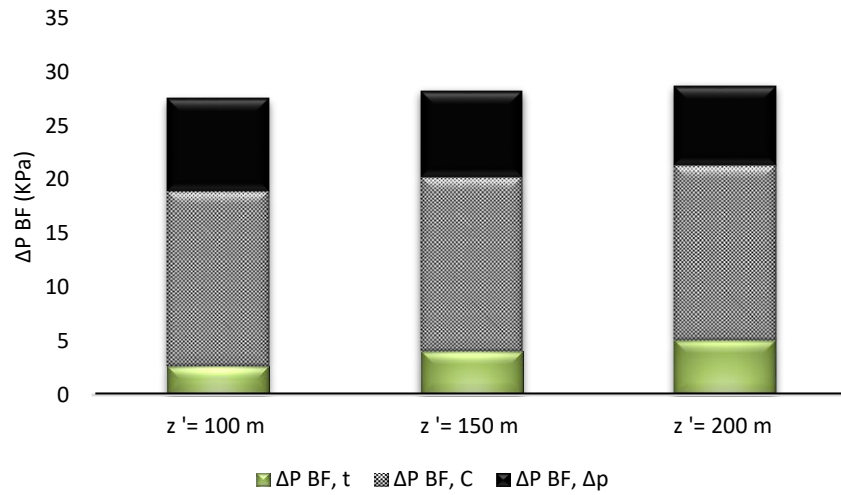


Figura 4.12 Caída de presión  $\Delta P_{BF}$  en el flujo de agua fría para  $z = 800$  m y TSMp

La Figura 4.13 nos muestra la composición de  $\Delta p_{BF}$  para los sistemas de captación de  $z = 1000$ , a TSMp y para las profundidades de retorno ( $z'$ ) 100 m, 150 m y 200 m, siendo  $\Delta p_{BF}$  32.086, 32.895 y 33.397; respectivamente. Asimismo, es preciso indicar que  $\Delta p_{BF, C}$  varía desde 47 % hasta el 49 % de  $\Delta p_{BF}$  para cada  $z'$ .

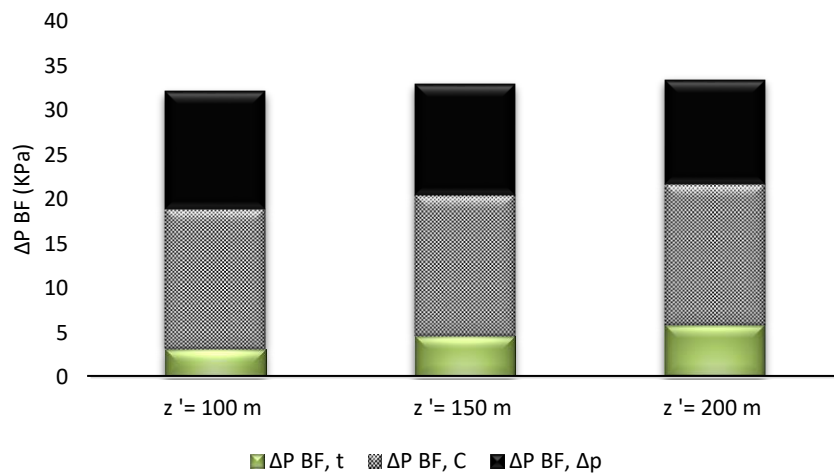


Figura 4.13 Caída de presión  $\Delta P_{BF}$  en el flujo de agua fría para  $z = 1000$  m y TSMp

La Figura 4.14 compara  $\Delta p_{BF}$ , esta vez para distintos valores de  $z$  habiendo fijado la descarga en  $z' = 100$  m. La caída de presión del flujo va de 23.798 kPa ( $z = 600$  m) a 32.086 ( $z = 1000$  m). Asimismo, se observa que la influencia en la variación en  $\Delta p_{BF}$  es la  $\Delta p_{BF,C}$  y la  $\Delta p_{BF,\Delta p}$  va en aumento de acuerdo con la diferencia entre  $z$  y  $z'$ .

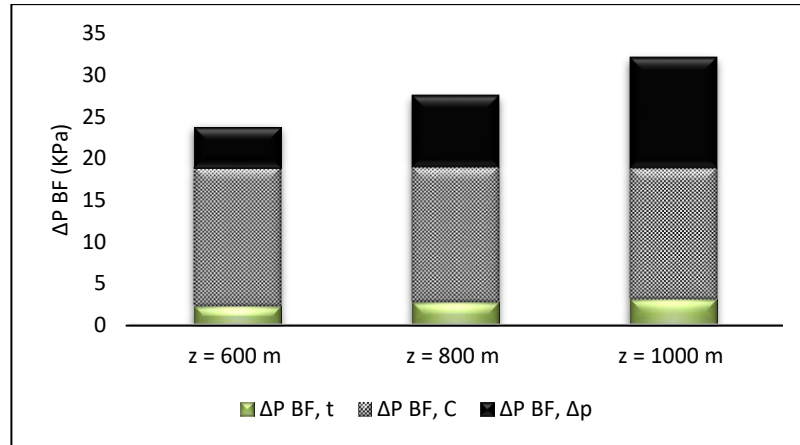


Figura 4.14 Caída de presión  $\Delta P_{BF}$  en el flujo de agua fría para  $z' = 100$  m y TSMp

#### 4.1.4 Potencia de las bombas

Las Figura 4.15, 4.16 y 4.17 compara el consumo energético de todas las bombas, esta vez para distintos valores de  $z'$  habiendo fijado  $z = 600$  m, 800 y 1000; respectivamente. El consumo total por las bombas del sistema varía desde 1.868 a 2.4 MW. Se observa que la única varían para un  $z$  fijo se da en el consumo de la potencia de agua fría ( $\Delta p_{BF}$ ) que tiene relación directamente proporcional con  $z'$ .

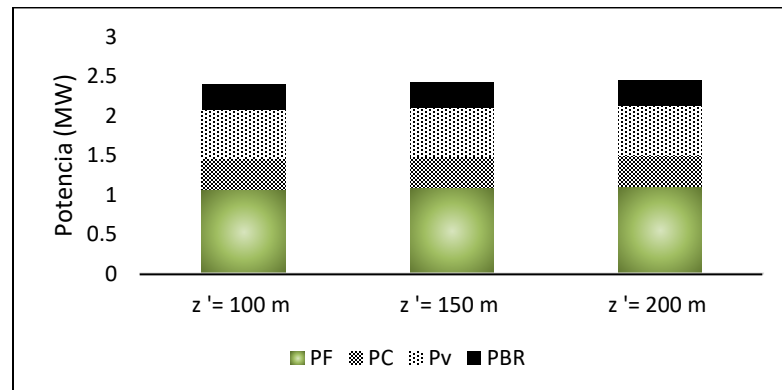


Figura 4.15 Consumo energético de las bombas para  $z=600$

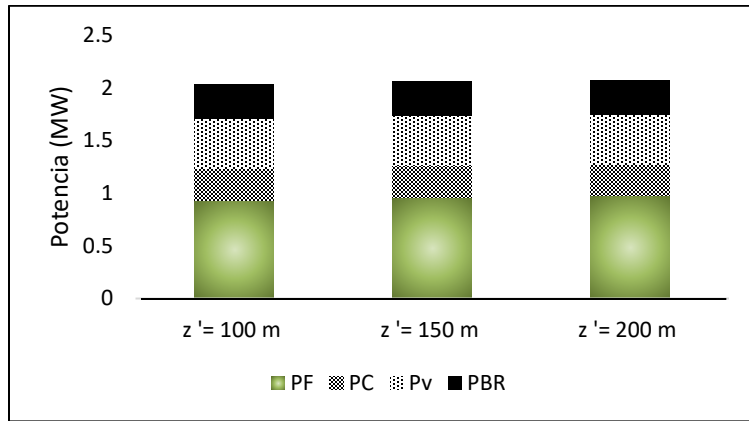


Figura 4.16 Consumo energético de las bombas para  $z=800$

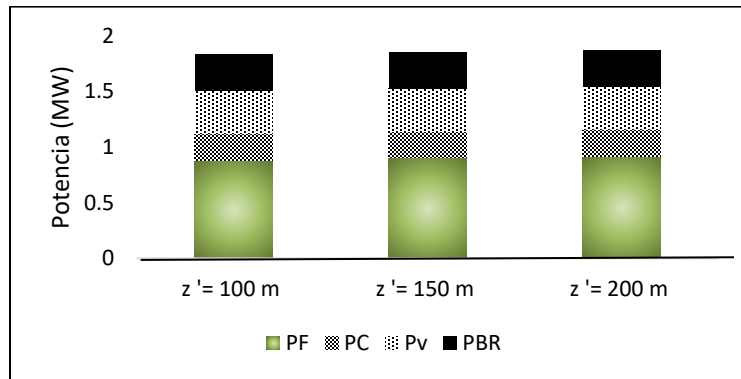


Figura 4.17 Consumo energético de las bombas para  $z=1000$

La Figura 4.18 compara el consumo energético de las bombas para distintas profundidades de captación  $z$ , a un nivel de profundidad de descarga de  $z'=150$ .

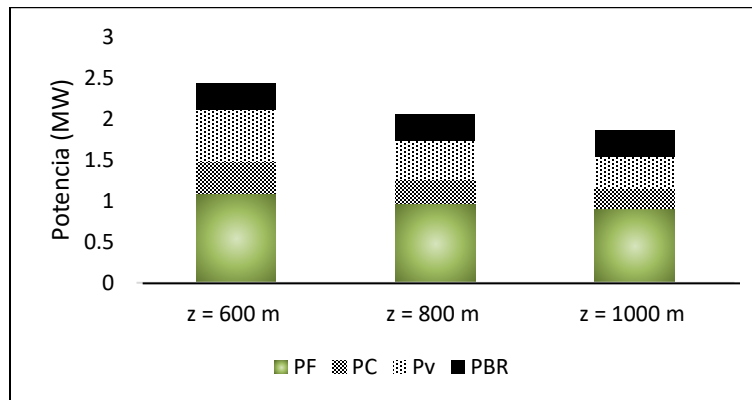


Figura 4.18 Consumo energético de las bombas para  $z'=150$

#### 4.1.5 Eficiencia de la planta OTEC

La Figura 4.19 nos muestra la eficiencia de la planta, se evidencia una mayor eficiencia para  $z = 1000$  y está a la par guarda relación de indirectamente proporcional con  $z'$ , por lo cual cuando  $z'=100$  se muestra una eficiencia de 3.781% que representa la mayor para estas simulaciones.

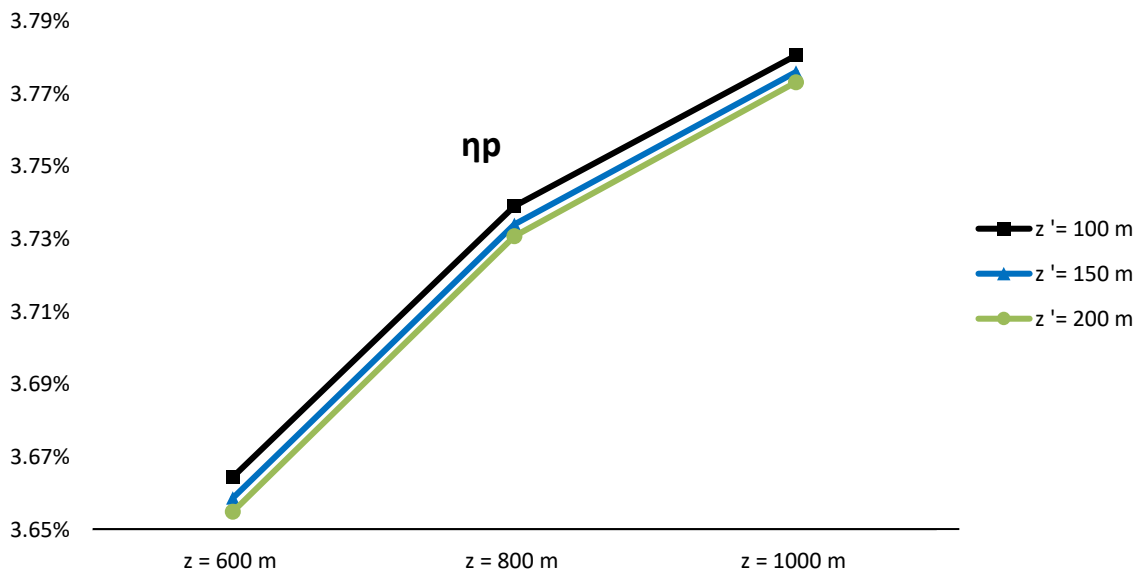


Figura 4.19 Eficiencia de la planta  $\eta_p$  para los sistemas propuestos a TSMp.

#### 4.1.6 Función $\psi$

La Figura 4.20 se comparan los valores de la función de  $\psi$  para los sistemas TSMp, usando los costos  $c_I$  y  $c_{II}$ . La función  $\psi$  disminuye cuando  $z$  aumenta y también la función  $\psi$  crece con  $z'$ . Con el fin de poder minimizar la función  $\psi$ , el sistema optimo es aquel que tiene una captación de  $z = 1000$  y una descarga  $z' = 100$ .

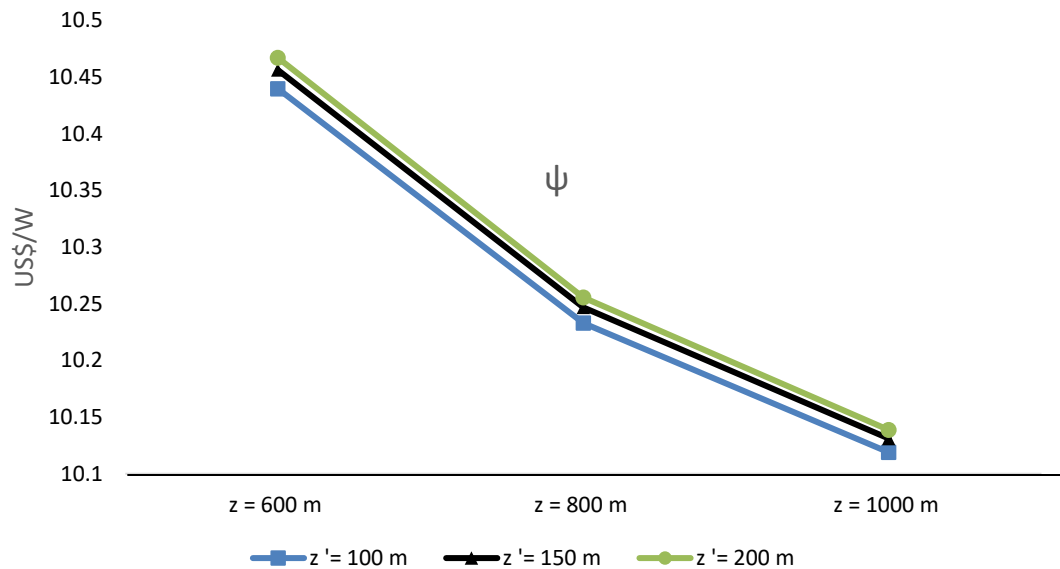


Figura 4.20 Función  $\psi$  para los sistemas propuestos TSMp

Fuente: Elaboración propia

## 4.2 Estimación del LCOE de la planta OTEC

### 4.2.1 Parámetros de diseño para obtener el LCOE óptimo

En la Tabla 14 se da detalle de los parámetros comunes para los 45 sistemas simulados para el cálculo del LCOE. El tiempo de vida se estableció en el capítulo 2, al igual que la tasa de interés y las horas de trabajo.

**Tabla 14.** Parámetros de diseño para el cálculo del LCOE

Parámetro	Valor	Unidad
Tiempo de vida	30	años
OPEX	3.875	%CAPEX
Tasa de Interés	7.5	%
CRF	0.084671236	
Horas de trabajo	5475	h



#### 4.2.2 Evaluación de la LCOE

La tabla 15 compara los valores de LCOE para todos los sistemas a TSMp, de acuerdo con los parámetros de diseño. Con el fin de minimizar el valor de LCOE, el sistema óptimo es aquel que tiene una captación de  $Z= 1000$  y una descarga  $z'=100$ , con un valor de LCOE 0.16992 US\$/kWh.

**Tabla 15.** LCOE para los sistemas propuestas a TSMp

np	$z' = 100$ m	$z' = 150$ m	$z' = 200$ m
$z = 600$ m	0.1914	0.1918	0.1920
$z = 800$ m	0.1779	0.1779	0.1779
$z = 1000$ m	0.1699	0.1701	0.1703

#### 4.3 Aspecto e impacto ambiental significativo

Para la evaluación del aspecto ambiental significativo negativo del sistema OTEC simulados, se tiene los siguientes resultados.

##### 4.3.1 Actividades generadoras de impactos

A continuación, se indica las principales acciones que generarían los posibles impactos ambientales en la etapa de operaciones.

**Tabla 16.** LCOE para los sistemas propuestas a TSMp

Actividad	Componente	Aspecto Ambiental	Resultado
Descarga de salmuera	Agua	Calidad de agua	Contaminación del agua por aumentar la concentración de sales en la zona de descarga.
Descargas de agua fría y agua caliente	Agua	Calidad de agua	Aumento de nutrientes en las aguas de la zona de descarga.

Posibles fugas de refrigerantes	Aire	Calidad de aire	Si llegase a dañar las tuberías, las fugas ocasionarían alteración en la calidad del aire en el punto de descarga.
Emisiones de gases condensables en los evaporadores	Aire	Calidad de aire	Alteración de la calidad de aire por estos gases condensables.
Emisiones de dióxido de carbono en los condensadores	Aire	Calidad de aire	Alteración de la calidad de aire por la emisión de dióxido de carbono.
Mantenimiento de la planta	Aire	Calidad de aire	Afección de la calidad de aire por generación de material particulado, gases de combustión e incremento de nivel sonoro.
	Agua	Calidad de agua	Afección de la calidad de agua por el uso de productos de limpieza.
	Suelo	Calidad de suelo	Alteración de la calidad de suelo por emitir residuos sólidos durante el mantenimiento.

Bombeo de aguas profundas y de superficie	Fauna	Hábitat	Afección en el hábitat de los peces en la superficie y a profundidades
---	-------	---------	--

#### 4.3.2 Factores ambientales

A continuación, se presentan los factores que serían afectados negativamente por las actividades del Proyecto.

**Tabla 17.** Factores Ambientales

N°	Factores	Impacto
Medio físico	Componente abiótico	
	Calidad de aire	En la etapa de operación se prevé la generación de malos olores, gases de combustión, refrigerantes y gases de efecto invernadero.
	Calidad de agua	Contaminación de la zona de descargar por los vertimientos de salmuera y aumento del número de peces en la zona de descarga debido a las descargas de altos nutrientes.
	Calidad de suelo	Generación y disposición inadecuada de lodos, material sedimentable y otros residuos.
Medio biótico	Componente biótico	
	Fauna	Aumento del número de peces en la zona de descarga.

#### 4.3.3 Matriz de la valoración de impactos

En la parte de anexos se adjunta matriz de Leopold modificada con la valoración de los impactos ambientales de las actividades de la etapa de operaciones descritas.

De acuerdo con la matriz, la actividad de descarga de salmuera posee una valorización de -5.28 con una severidad de medianamente significativo siendo esta el impacto ambiental negativo más severo y este resultado está de acuerdo con lo descrito en los antecedentes.

## CAPÍTULO V

### DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

#### 5.1 Evaluación de la Función $\Psi$ para la planta óptima OTEC para cada estación del año

De acuerdo con el capítulo de resultados, la simulación 43 se mostró como el sistema óptimo estableciendo una captación de  $z = 1000$  y una descarga  $z' = 100$ . Este sistema fue avaluado a una TSMp, por lo cual se tendrá que evaluar las condiciones de este sistema en las diferentes estaciones del año.

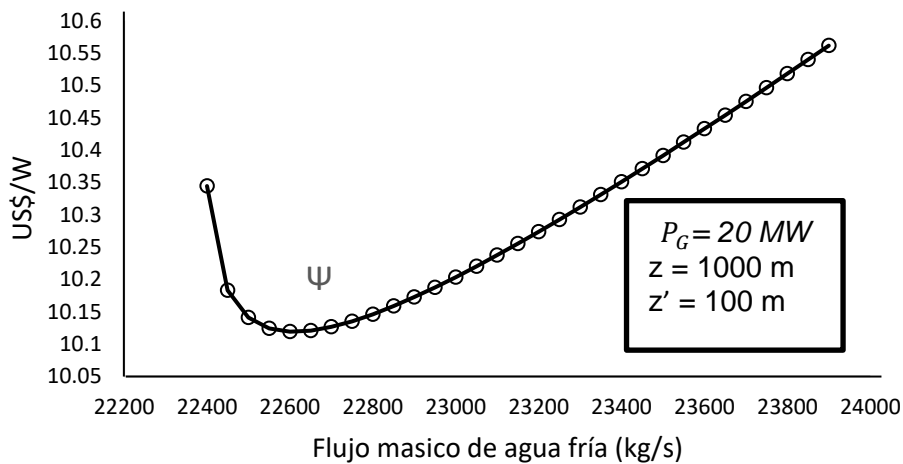


Figura 5.1 Sistema de captación y descarga óptimo

La Figura 5.2 se compara los valores de la función  $\psi$  para los sistemas que tienen en común el nivel de captación  $z=1000$  y descarga  $z' = 100$ . Con el objetivo de minimizar la función  $\psi$  se observa que en verano es la estación que presenta un menor valor de 10.090 US\$/W y se denota que la función  $\psi$  y la TSM tienen una relación indirectamente proporcional dado que la estación de verano es donde se presenta la mayor TSM en el año y la de invierno la menor TSM.

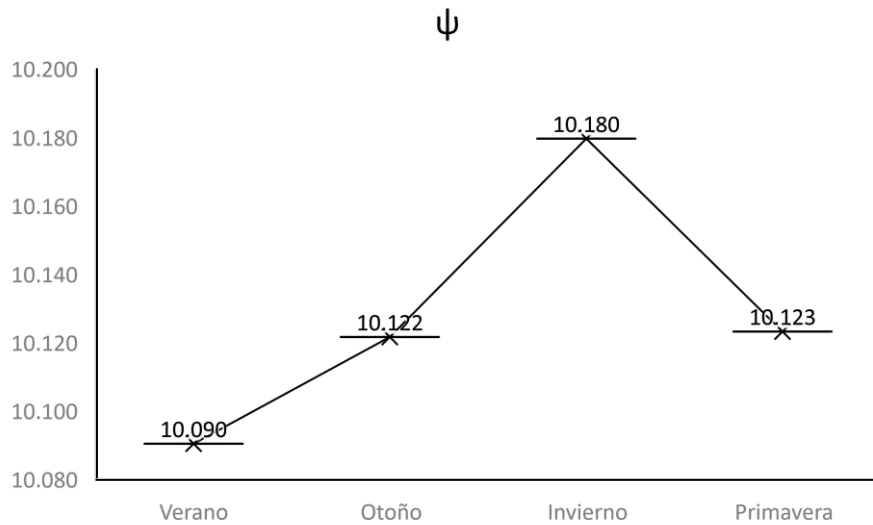


Figura 5.2 Función  $\psi$  para los sistemas propuestos 31, 34,37 y 40

La Figura 5.3 se compara los valores de la función  $\eta$  para los sistemas que tienen en común el nivel de captación  $z=1000$  y descarga  $z' = 100$ . Con el objetivo de minimizar la función  $\eta$  se observa que en verano es la estación que presenta un mayor valor de 3.7809 % y se denota que la función  $\eta$  y la TSM tienen una relación directamente proporcional dado que la estación de verano es donde se presenta la mayor TSM en el año y la de invierno la menor TSM.

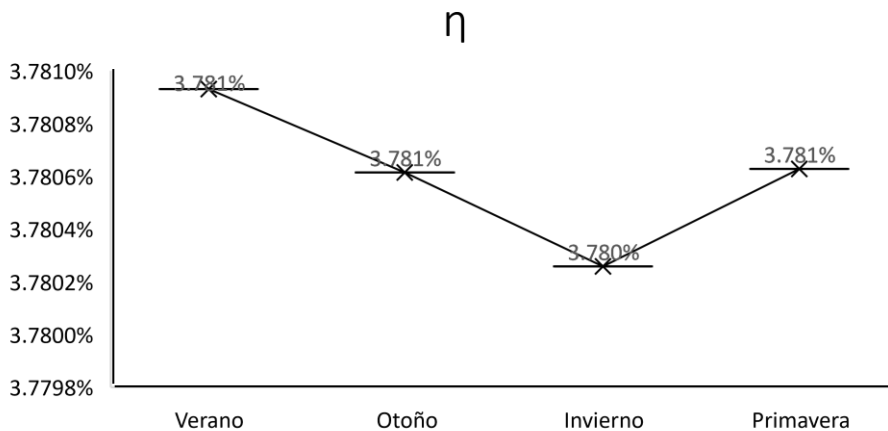


Figura 5.3 Función  $\eta$  para los sistemas propuestos 31, 34,37 y 40

## 5.2 Discusión del LCOE para plata optima OTEC

Se procede a evaluar los resultados de LCOE para la simulación optima en cada estación año, comparar el LCOE con las energías renovables empleadas en el país y con otros proyectos LCOE.

### 5.2.1 Evaluación del LCOE para la planta óptima OTEC para cada estación del año

La Figura 5.4 se compara los valores del LCOE para los sistemas que tienen en común el nivel de captación  $z=1000$  y descarga  $z' = 100$ . Con el objetivo de minimizar el LCOE se observa que en verano es la estación que presenta un menor valor de 0.166 US\$/kWh en la estación de verano y un mayor valor de 0.1782 US\$/kWh en la estación de invierno.

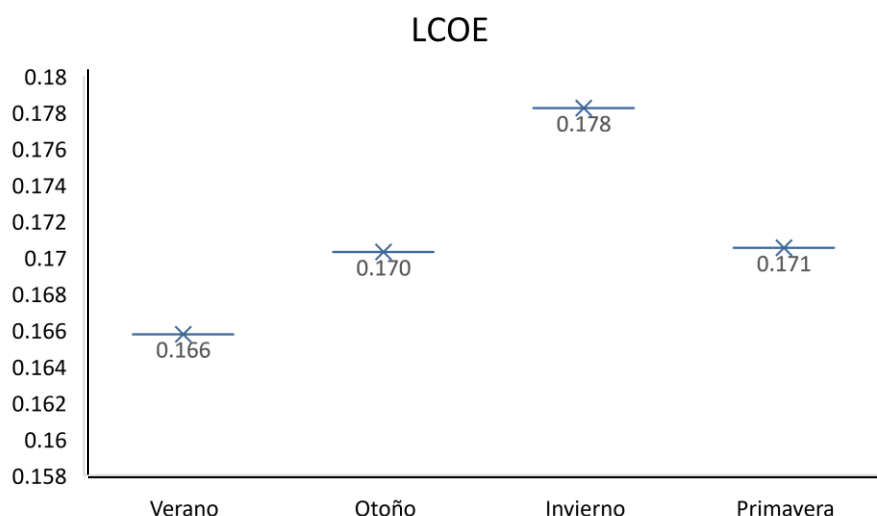


Figura 5.4 LCOE para los sistemas propuestos 31, 34,37 y 40

### 5.2.2 Comparación del LCOE de la planta OTEC propuesta con LCOE de otras alternativas de energía renovable

La Figura 5.5 nos muestra el LCOE de las energías renovables implementadas en el Perú para el año 2018, con el objetivo de minimizar el LCOE se observa que la energía eólica presenta el valor de 0.05 US\$/kWh y la energía hidroeléctrica 0.08 US\$/kWh, siendo estas las energías con menor LCOE en el Perú.

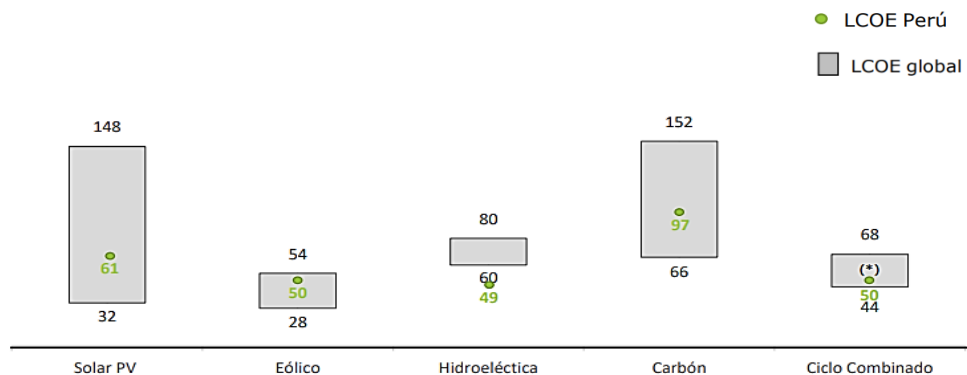


Figura 5.5 LCOE (\$/MWh) – Energías Renovables y Convencionales 2018

Fuente: Enel Perú

### 5.2.3 Comparación del LCOE de la planta OTEC propuesta con LCOE de antecedentes de plantas OTEC

La Figura 5.6 nos muestra el LCOE de las plantas OTEC implementadas en otros países, con el objetivo de minimizar el LCOE se observa en el país de Nigeria la planta OTEC alcanzó un valor de 0.12 US\$/kWh para un potencial de planta de 100 MW, el valor los LCOE evaluados para nuestros sistemas de 20 MW es comparable con LCOE en locación de planta en Hawái que tienen valor de 0.209 US\$/kWh, 0.167 US\$/kWh y 0.2 US\$/kWh para una las potencias de 53.5 MW, 51.25 MW y 100 MW respectivamente.

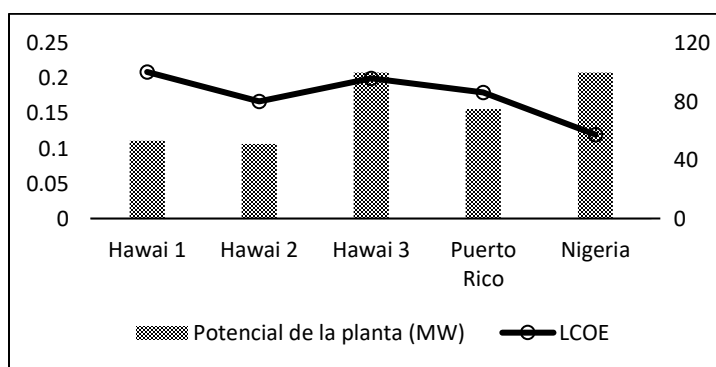


Figura 5.6 LCOE de proyectos OTEC en diferentes países

## CONCLUSIONES

Las energías renovables representan una solución para el sector eléctrico en cuento al proceso de transición de tecnologías emergentes para la disminución de emisiones de dióxido de carbono ( $CO_2$ ). El sistema propuesto en este estudio responde a las necesidades de la evolución hacia un modelo con menor dependencia de la generación fósil y con una matriz que considere mayor porcentaje de energías renovables entre ellas las plantas de Energía Térmica Oceánica (OTEC).

Los antecedentes de la energía térmica oceánica señalan que su factibilidad está limitada a regiones cercanas al Ecuador, donde la temperatura superficialmente promedio en la región Tumbes es de 26.5 siendo la más alta en comparación a todas las regiones.

La temperatura superficial del mar para región de Tumbes para las estaciones verano, otoño, invierno y primavera son de 28.57 °C, 26.85 °C, 25.60 °C y 26.79 °C respectivamente. Asimismo, la temperatura superficial promedio anual (TSMp) es aproximadamente 26.95 °C de acuerdo con los boletines diarios publicados por el Instituto del Mar Peruano (IMARPE). Los valores de las temperaturas superficial del mar de la región Tumbes son mayores en relación con las otras regiones de la costa del Perú.

En el estudio de la maquina térmica para la planta térmica oceánica (OTEC), el proceso de desalinizar agua que forma porta de un ciclo Rankine abierto presenta desventajas para la eficiencia de la maquina térmica, por lo tanto, la maquina térmica experimental para la producción de energía y desalinizar agua aumentará su eficiencia en un ciclo Rankine hibrido para lo cual se empleará el refrigerante amoniaco ( $NH_3$ ).

La función  $\psi$ , la potencia requerida por las bombas de vacío, agua fría, agua caliente y del refrigerante tiene una relación indirectamente proporcional con el nivel de captación  $z$  y directamente proporcional con el nivel de descarga  $z'$ . Esto permite llegar a la conclusión de las condiciones de planta para el sistema optimo.



La simulación 31 es considerada en la presente investigación como la óptima con sus características de planta y estación del año de  $z=1000$ ,  $z'=100$  y estación de verano, respectivamente, para lo cual el consumo de bombas es de 1.834 MW, la eficiencia térmica  $\eta= 3.781\%$ , la función  $\psi = 10.090$  US\$/W y un LCOE = 0.166 US\$/kWh.

Los flujos masicos de agua fría óptimo para cada nivel de captación  $z$ , el LCOE para cada simulación, la eficiencia térmica y la función  $\psi$  están en el orden de acuerdo con los antecedentes mostrados por lo que los datos muestran la viabilidad energética y económica. Además, que los antecedentes promueven la implementación como solución para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

La descarga de altas concentraciones de salmuera representa el aspecto ambiental significativo negativo y para ello se recomienda evaluar a través de una simulación la distribución de la concentración en la zona de descarga. Asimismo, se observa que la descarga de DOW represente un aspecto ambiental positivo dado que representa una oportunidad de mejor en la maricultura.

## **RECOMENDACIONES**

Se plantea la siguiente recomendación, elaborar una investigación en cuanto al impacto ambiental que genera este tipo de plantas que involucren la simulación como el método adecuado para evaluar la dispersión de los efluentes de sal muera, para observar la dispersión de la concentración de este efluente puede y las descargas de DOW con ello observar cómo los sus nutrientes pueden afectar de forma positiva al ecosistema.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmadi, P., Dincer, I., & Rosen, M. A. (2015). Performance assessment of a novel solar and ocean thermal energy conversion based multigeneration system for coastal areas. *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*, 137(1). <https://doi.org/10.1115/1.4028241>
- Around, C. O. N. V. E. R. S. I. O. N. S., & World, T. H. E. (2000). Pergamon THE VIABILITY AND BEST LOCATIONS FOR OCEAN THERMAL ENERGY. *Science*, 6(95), 359–365.
- Bank, T. world. (2014). *Electric power consumption (kWh per capita) | Data*. <https://data.worldbank.org/indicator/EG.USE.ELEC.KH.PC>
- Bárceñas Graniel, J. (2014). *Evaluación del potencial de conversión de energía renovable en el caribe mexicano. March*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2481.6402>
- Bejan A, Tsatsaronis G(George), M. M. (n.d.). *Thermal design and optimization*.
- Bernal Franciso, M. (2016). *Estudio técnico y económico de una planta OTEC y sus usos secundarios en México*. 112. [https://repositorio.unam.mx/contenidos/estudio-tecnico-y-economico-de-un-planta-otec-y-sus-usos-secundarios-en-mexico-99006?c=pNL1gN&d=false&q=\\*&i=1&v=1&t=search\\_0&as=0](https://repositorio.unam.mx/contenidos/estudio-tecnico-y-economico-de-un-planta-otec-y-sus-usos-secundarios-en-mexico-99006?c=pNL1gN&d=false&q=*&i=1&v=1&t=search_0&as=0)
- Centro Mexicano de Innovación en Energía - Océano. (2017). *Conversión de Energía Térmica Oceánica (OTEC)*. <https://doi.org/10.26359/EPOMEX.CEMIE012017>
- Ciencias, F. D. E. (2000). 8. Circulación general de los océanos. *UNIVERSIDAD DE LA REPUBLICA FACULTAD DE CIENCIAS*.
- Consortio HTA. (2007). *Estudio de Impacto Ambiental, Planta de Tratamiento de Aguas Residuales*. 1–21. [https://www.grupo-epm.com/site/Portals/22/Docs/documentos\\_de\\_interes/ptar\\_bello/hta-a-rp-01-10-c02-r2.pdf?ver=2015-06-16-124545-913&msclkid=8098fcb3cf3c11ecbecb685a7d5ea5d9](https://www.grupo-epm.com/site/Portals/22/Docs/documentos_de_interes/ptar_bello/hta-a-rp-01-10-c02-r2.pdf?ver=2015-06-16-124545-913&msclkid=8098fcb3cf3c11ecbecb685a7d5ea5d9)
- Cortés, F. (2008). *Selección de equipo de bombeo para un sistema de suministro de agua*

- Database, W. E. O. (2008). *World Economic Outlook Database October 2008*.  
<https://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2008/02/weodata/index.aspx>
- Dincer, I., Rosen, M. A., & Ahmadi, P. (2017). Optimization of energy systems. In *Optimization of Energy Systems*. <https://doi.org/10.1002/9781118894484>
- Dom, M., Barreiro, M., Co, C., Ortega, L., Acu, R., Tribunal, C., & Defeo, O. (2015). *Tesina para optar por el grado de Licenciado en Ciencias Biológicas Opción : Oceanografía Variabilidad climática en el Atlántico Sudoccidental y su influencia en la abundancia de Mesodesma mactroides en la playa de Barra del Chuy ( Uruguay )*.
- Encyclopedia of Sustainability Science and Technology. (2012). *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0851-3>
- Energía, A. I. de la. (2015). *Consumo de energía procedente de combustibles fósiles (% del total) | Data*. <https://datos.bancomundial.org/indicador/EG.USE.COMM.FO.ZS>
- European Commission. (2012). Roadmap 2050. *Policy, April*, 1–9.  
<https://doi.org/10.2833/10759>
- Fabião, A. W., Mitrani, I., & Cabrales, J. (2018). Possibilities of using the potential of the oceanic thermal energy in the waters near the borders of Mozambique. *Revista Cubana de Física*, 35(1), 24–31.
- Farahat, S., Sarhaddi, F., & Ajam, H. (2009). Exergetic optimization of flat plate solar collectors. *Renewable Energy*, 34(4), 1169–1174.  
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.06.014>
- Frank P. Incropera, D. P. D. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. School of Mechanical Engineering Purdue University.
- Gil Alba, R. (2016). *Estudio sobre la implantación de la tecnología maremotérmica Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial-Sin Obra Derivada*.
- Greenpeace. (2020). *Aire Tóxico : Los Combustibles*. <https://es.greenpeace.org/es/sala-de-prensa/documentos/aire-toxico-el-precio-de-los-combustibles-fosiles/>

- Hasan, A., & Dincer, I. (2020). An ocean thermal energy conversion based system for district cooling, ammonia and power production. *International Journal of Hydrogen Energy*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.173>
- Hugh Rudnick, Federico Heisig Mohr, A. (2016). *Costo de abatimiento de nueva energía (LACE) y costo de desarrollo de la energía (LCOE): La nueva forma de determinar la entrada de nuevas tecnologías al sistema* [PONTIFICA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE]. [https://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno16/abatim/Entrega final LCOE LACE.htm](https://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno16/abatim/Entrega_final_LCOE_LACE.htm)
- I. Mitrani. (2017). *Meteorología Marina*.
- IEA. (2015). *No Projected costs of generating electricity 2015*.
- IIDEA. (2017). <http://proyectos2.iingen.unam.mx/IIDEA/plantas.html>
- Instituto del Mar del Perú. (n.d.). Retrieved September 26, 2020, from <http://www.imarpe.gob.pe/imarpe/>
- Jacqueline Triviño. (2017). *DISEÑO DE EQUIPOS E INSTALACIONES*.
- Jung, J. Y., Lee, H. S., Kim, H. J., Yoo, Y., Choi, W. Y., & Kwak, H. Y. (2016). Thermoeconomic analysis of an ocean thermal energy conversion plant. *Renewable Energy*, 86, 1086–1094. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2015.09.031>
- Khosravi, A., Syri, S., Assad, M. E. H., & Malekan, M. (2019). Thermodynamic and economic analysis of a hybrid ocean thermal energy conversion/photovoltaic system with hydrogen-based energy storage system. *Energy*, 172, 304–319. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2019.01.100>
- L. A. Vega, Ph.D., Hawaii, U. (1999). *Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC)*. 52(December), 1–23. <http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=0LiK9OhKljYC&oi=fnd&pg=PA1&dq=%22in+Jules+Verne's+Twenty+Thousand+Leagues+Under+the+Sea%22+published+in+1870.+Eleven%22+%22concept+was+demonstrated+in+1979,+when+a+small+plan+t+mounted+on+a+barge+off%22+&o>

- Langer, J., Quist, J., & Blok, K. (2020). Recent progress in the economics of ocean thermal energy conversion: Critical review and research agenda. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 130(December 2019), 109960. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109960>
- Lesk, C., Rowhani, P., & Ramankutty, N. (2016). Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature*, 529(7584), 84–87. <https://doi.org/10.1038/nature16467>
- Liu, C. C. K. (2018). Ocean thermal energy conversion and open ocean mariculture: The prospect of Mainland-Taiwan collaborative research and development. *Sustainable Environment Research*, 28(6), 267–273. <https://doi.org/10.1016/j.serj.2018.06.002>
- Manassas, V. (n.d.). *NAVFAC ocean thermal energy conversion (OTEC) project. configuration report and development plan for 2.5 MW OTEC mini-spar pilot plant. 20110*, 2011.
- Marina, E., Del, E., & Perspectivas, S. N. Y. (2018). *ENERGÍA MARINA: ESTADO DEL ARTE, SITUACIÓN Y PERSPECTIVAS DE LOS SISTEMAS DE GRADIENTE TÉRMICO OTEC. 2017–2018*.
- Martínez, F., & Andrada, P. (2017). High-Speed Synchronous Generators: A Critical Assessment. *Información Tecnológica*, 28(2), 47–58. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642017000200006>
- Minas, M. de E. y. (2018). *Balance Nacional de Energía 2018*. 208.
- Ocean Energy Forum. (2016). *Ocean Energy Strategic Roadmap: Building Ocean Energy for Europe*. 74. <https://webgate.ec.europa.eu/maritimeforum/en/frontpage/1036>
- Oko, C. O. C., & Obeneme, W. B. (2017). Thermo-economic analysis of an ocean thermal power plant for a Nigerian coastal region. <https://doi.org/10.1080/01430750.2017.1318789>, 39(6), 562–572. <https://doi.org/10.1080/01430750.2017.1318789>
- OMS. (2012). *OPS/OMS | En las Américas siete de cada diez casos de enfermedad pulmonar obstructiva crónica son causados por uso del tabaco*. [https://www3.paho.org/hq/index.php?option=com\\_content&view=article&id=7443:201](https://www3.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=7443:201)

2-americas-siete-cada-diez-enfermedad-pulmonar-obstruccion-cronica-tabaco&Itemid=4327&lang=es

OSINERGMIN. (2016). La industria de la electricidad en el Perú. In *Perú fuente de energía natural*.

[http://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro\\_documental/Institucional/Estudios\\_Economicos/Libros/Osinergmin-Industria-Electricidad-Peru-25anios.pdf](http://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/Institucional/Estudios_Economicos/Libros/Osinergmin-Industria-Electricidad-Peru-25anios.pdf)

Plocek, T. J., Laboy, M., & Marti, J. A. (2009). *SS: Panel: Ocean Thermal Energy Conversion: Technical Viability, Cost Projections and Development Strategies*. <https://doi.org/10.4043/19979-MS>

Report, F. T., Martin, L., & Systems, M. (2012). *OCEAN THERMAL ENERGY CONVERSION*. May.

Roels, O. A., Laurence, S., Farmer, M. W., & Van Hemelryck, L. (1977). Organic Production Potential of Artificial Upwelling Marine Culture. In *MICROBIAL ENERGY CONVERSION* (Issue 1975). UNITAR. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-021791-8.50015-9>

Soto, R., & Vergara, J. (2012). *AUMENTO DE EFICIENCIA DE CENTRALES TERMOELÉCTRICAS Y NUCLEARES USANDO ENERGÍA OCÉANO TÉRMICA*. PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE.

Talley, L. D., Pickard, G. L., Emery, W. J., & Swift, J. H. (2011). Introduction to Descriptive Physical Oceanography. *Descriptive Physical Oceanography*, 1–6. <https://doi.org/10.1016/b978-0-7506-4552-2.10001-0>

Tierra, L., & Indico, E. (2012). *1. Características generales de los océanos*. 1–16.

Unidas, N. (2017). *Datos de interés | Naciones Unidas*. <https://www.un.org/es/climatechange/science/key-findings#temperature-rise>

Vega, L. A. (2010). Economics of Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC): An Update. *Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference*, 4, 3239–3256. <https://doi.org/10.4043/21016-MS>

- Visser E, H. A. (2014). Methodologies for estimating levelised cost of electricity (LCOE) implementing the best practice LCoE methodology of the guidance methodologies for estimating levelised cost of electricity (LCOE). *Ecofys*, 35.
- Yilmaz, F. (2019). Energy, exergy and economic analyses of a novel hybrid ocean thermal energy conversion system for clean power production. *Energy Conversion and Management*, 196(June), 557–566. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.06.028>
- Zhang, J., Xu, C., Song, Z., Huang, Y., & Wu, Y. (2019). Decision framework for ocean thermal energy plant site selection from a sustainability perspective: The case of China. *Journal of Cleaner Production*, 225, 771–784. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.032>
- Zhang, W., Li, Y., Wu, X., & Guo, S. (2018). Review of the applied mechanical problems in ocean thermal energy conversion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93(May), 231–244. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.048>



## **ANEXOS**

ANEXO 1: MATRIZ DE LEOPOLD PARA EL SISTEMA OTEC EN LA ETAPA DE OPERACIÓN

Actividad	Componente	Aspecto Ambiental	Resultado	Calificación de impactos ambientales											Severidad	
				C	Magnitud (M)				Importancia (I)				Total			
					i	e	d	Cal.	Escala	e	r	g	Cal.	Escala		I*M
Descarga de salmuera	Agua	Calidad de agua	Contaminación del agua por aumentar la concentración de sales en la zona de descarga.	-1	3	2	2	-2.4	Medio	2	3	2	2.2	Medio	-5.28	Medianamente significativo
Descargas de agua fría y agua caliente	Agua	Calidad de agua	Aumento de nutrientes en las aguas de la zona de descarga.	1	2	1	2	1.6	Bajo	1	2	1	1.2	Bajo	1.92	Poco significativo

Posibles fugas de refrigerantes	Aire	Calidad de aire	Si llegase a dañar las tuberías, las fugas ocasionarían alteración en la calidad del aire en el punto de descarga.	-1	2	1	1	-1.4	Bajo	1	2	1	1.2	Bajo	-1.68	Poco significativo
Emisiones de gases condensables en los evaporadores	Aire	Calidad de aire	Alteración de la calidad de aire por estos gases condensables.	-1	2	1	1	-1.4	Bajo	1	2	1	1.2	Bajo	-1.68	Poco significativo
Emisiones de dióxido de carbono en los condensadores	Aire	Calidad de aire	Alteración de la calidad de aire por la emisión de dióxido de carbono.	-1	2	1	1	-1.4	Bajo	1	2	1	1.2	Bajo	-1.68	Poco significativo

Mantenimiento de la planta	Aire	Calidad de aire	Afección de la calidad de aire por generación de material particulado, gases de combustión e incremento de nivel sonoro.	-1	2	1	1	-1.4	Bajo	1	2	1	1.2	Bajo	-1.68	Poco significativo
	Agua	Calidad de agua	Afección de la calidad de agua por el uso de productos de limpieza.	-1	2	1	1	-1.4	Bajo	1	2	1	1.2	Bajo	-1.68	Poco significativo

	Suelo	Calidad de suelo	Alteración de la calidad de suelo por emitir residuos sólidos durante el mantenimiento.	-1	2	1	1	-1.4	Bajo	1	2	1	1.2	Bajo	-1.68	Poco significativo
Bombeo de aguas profundas y de superficie	Fauna	Hábitat	Afección en el hábitat de los peces en la superficie y a profundidades	-1	2	1	1	-1.4	Bajo	1	2	1	1.2	Bajo	-1.68	Poco significativo