



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES

INSTITUTO DE INGENIERÍA

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES-JURIQUILLA

**Variación de componentes de Ciclo Rankine
Orgánico cerrado enfocado a conversión de
energía oceánica térmica (OTEC) usando
simulación computacional para evaluar la
eficiencia térmica del ciclo**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero en Energías Renovables

P R E S E N T A

Sebastian Alberto Reyes Romero

DIRECTOR DE TESIS

Edgar Gerardo Mendoza Baldwin

Temixco, Mor., a 28 de mayo de 2021





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

OF/IER/LIER/052/2021

ASUNTO: Notificación de jurado y fecha para examen profesional mediante aula virtual.

LIC. IVONNE RAMÍREZ WENCE
DIRECTORA GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
Presente.

Por medio de la presente le informo que el día viernes 28 de mayo de 2021, a las 10:00 h, mediante Aula Virtual del Instituto de Energías Renovables, habilitada por la Dirección General de Cómputo y de Tecnologías de Información y Comunicación de la UNAM, el **C. SEBASTIAN ALBERTO REYES ROMERO**, con número de cuenta 416044681 de la Licenciatura de Ingeniería en Energías Renovables, llevará a cabo la presentación del trabajo de tesis y examen profesional titulado:

“Variación de componentes de Ciclo Rankine Orgánico cerrado enfocado a conversión de energía oceánica térmica (OTEC) usando simulación computacional para evaluar la eficiencia térmica del ciclo”

Debido a que el alumno ha cumplido con los requisitos que establece el Reglamento General de Exámenes, el Comité Académico de la Licenciatura de Ingeniería en Energías Renovables, le asigna el Jurado de Examen Profesional integrado por los siguientes académicos.

PRESIDENTE:	DR. SERGIO CUEVAS GARCÍA
VOCAL:	DRA. MARÍA DEL ROCÍO NAVA LARA
SECRETARIO:	DR. EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN
SUPLENTE:	DR. RODOLFO SILVA CASARÍN
SUPLENTE:	DR. MIGUEL ROBLES PÉREZ

Sin otro particular, le envío un cordial saludo.

Atentamente,
“Por mi raza hablará el espíritu”
Temixco, Mor., a 25 de mayo de 2021



Dr. Jorge Alejandro Wong Loya
Coordinador de la LIER
IER-UNAM

JAWL´mfp.



Priv. Xochicalco s/n,
Col. Centro,
62580 Temixco, Morelos, México
T. 01 (777) 362 00 90
(52) 55 56 22 97 00

ier.unam.mx

Doy gracias a mis padres; L.A.E., Maricela Romero Andrade y el Dr. Alberto Reyes Ballesteros por darme la vida, enseñarme tanto de ella y sobretodo por su apoyo incondicional, moral y económico para levantarme de las múltiples enfermedades que he tenido a lo largo de toda mi vida. Ellos saben que de niño fui enfermizo, y gracias a ellos, ahora soy lo que soy y puedo terminar esta tesis.

A mis primos Daniel y José Ernesto (el Peps) Perezsoto Romero que siempre han estado en mi vida desde que tengo uso de razón. A Daniel por siempre inventar juegos cuando eramos niños y hacer de la infancia de Peps y la mía una muy divertida, y sobretodo a enseñarme por sobre todas las cosas el valor del trabajo, del esfuerzo y de que todo se puede lograr.

A Peps por ser un compañero de pláticas interminables, alguien muy inteligente como su hermano, y por su madurez a pesar de su edad. Gracias por enseñarme tanta música buena y por desvelarte conmigo en Xalapa jugando PES y/o viendo videos en YouTube. Las mejores series de la vida y los mejores consejos también, gran parte de ellos me los has dado tú.

A Mamá Martha, Martha y Tavo, que han sido un pilar importante en mi vida y que indirectamente y directamente siempre me respaldan y sé que siempre lo harán porque somos una FAMILIA; el apoyo de la familia es un pilar clave del éxito personal y profesional de una persona.

A Lizbeth Villeda Rodríguez, por quererme tanto y darme tanto apoyo en momentos difíciles y en los que no son tan difíciles. Porque gracias a ti he aprendido a querer de una manera que no sabía que se podía, y me has enseñado a perseverar aún más en el amor, y en todo.

Gracias a mis compañeros de la gloriosa y poderosísima 5G (Quinta Generación de la LIER) por enseñarme que el trabajo duro tiene sus recompensas y las verás si sabes tener paciencia y perseverancia. En particular, me gustaría mencionar al que fue mi equipo casi toda la carrera y que fue el mejor team que he tenido; Lulú, Arturo, Max, Yao.

A mi chavito el Yisus que al igual que yo está metido en los rollos de energía oceánica térmica; por ti tuve la fortuna de conectar con nuestro asesor, que a su vez nos ha conectado con mucha gente experta en nuestro tema y buenos amigos sobre todo.

Reconocimientos

También me gustaría agradecer a las instituciones y personas que me apoyaron durante la realización de este trabajo de tesis, que entre las que puedo destacar son al Instituto de Ingeniería de la UNAM y al Centro Mexicano de Innovación en Energía del Océano (CEMIE-Océano).

A mi asesor y amigo, Dr. Edgar Mendoza Baldwin quien me dio la orientación necesaria para encaminar este trabajo en algo productivo y que pudiera tener resultados interesantes.

A Yandy Rodríguez Cueto con su conocimiento en software de sistemas de información geográfica y sus conocimientos de geografía.

A Jassiel Hernández, por brindarme los datos proporcionados por el modelo de corrientes oceánicas HYCOM y de proveer recomendaciones para la orientación de este trabajo de tesis

A Jesús Florido Ortega, por brindarme la implementación de una Cadena de Markov en python para realizar la regionalización de los datos de gradiente de temperatura.

Resumen

Las energías marinas son fuentes de energías renovables que provienen de los océanos, y en caso de la energía oceánica por gradiente salino, proviene de la combinación de los océanos (agua salada) con los ríos u otro cuerpo marino de agua dulce. Su densidad energética es alta, debido a la cantidad de energía que pueden almacenar en un área grande, y es por esto que este tipo de fuente de energía renovable resulta ser prometedora a pesar de estar la mayoría de estas en fase de investigación.

En particular, la energía oceánica por gradiente térmico (OTEC, por sus siglas en inglés), aprovecha la diferencia de temperatura del agua de mar superficial (dentro del evaporador o caldera) y la temperatura del agua de mar profunda (dentro del condensador) como “fuente de calor de desecho” para accionar un Ciclo Rankine Orgánico, siendo un gradiente de más de 20 °C el establecido como óptimo por Luis A. Vega para que una planta de este estilo sea técnica y económicamente viable.

La identificación de los sitios potenciales se hacen con base al criterio de este gradiente, indicando aquellos como potenciales los que cumplen con este gradiente mínimo establecido. Estos valores de gradiente se obtienen mediante simulaciones del modelo de corrientes oceánicas HYCOM para un rango temporal de 5 años y con una resolución espacial en longitud-latitud de 1/12°.

La selección de sitios se realizará a partir de un algoritmo de *machine learning* para agrupación de datos o *clustering* mediante el algoritmo *K-Means*. Esto dará como resultado la agrupación de aquellas regiones con gradientes de temperatura similares, permitiendo así la discriminación de sitios potenciales.

Se realizará la simulación de un Ciclo Rankine Orgánico utilizando diferentes fluidos de trabajo orgánicos para determinar la eficiencia térmica y exergética de cada uno de los sitios para este periodo de tiempo.

La simulación arrojó la ubicación de 2 sitios potenciales cuyos gradientes térmicos medios son superiores a los 27 °C con unas eficiencias térmicas y exergéticas que oscilan entre 3% y 24% respectivamente, lo cual corresponde con los valores de eficiencias reportadas generalmente en la literatura.

Índice general

Resumen	v
Índice de figuras	xi
Índice de tablas	xv
1. Introducción	1
1.1. Justificación	1
1.2. Objetivo	2
1.2.1. General	2
1.2.2. Particulares	2
1.3. Planteamiento del problema	3
1.4. Metodología	3
1.5. Estructura de la tesis	4
2. Antecedentes	7
2.1. Interés en la energía de los océanos	7
2.2. Energía Oceánica	7
2.2.1. Energía por Oleaje	7
2.2.1.1. Dispositivos convertidores de energía de las olas (WEC, por sus siglas en inglés)	8
2.2.2. Energía de mareas	9
2.2.2.1. Potencial de mareas	9
2.2.2.2. Corrientes marinas	9
2.2.3. Energía por Gradiente Térmico	10
2.2.4. Energía por Gradiente Salino	10
3. Desarrollo Histórico	13
3.1. Historia significativa	13
3.2. Variaciones con respecto al ciclo OTEC convencional	15
3.2.1. Solar Ocean Thermal Energy Conversion (SOTEC)	15
3.2.2. Geothermal Ocean Thermal Energy Conversion (Geo-OTEC)	16
3.2.3. Nucleo-OTEC	18

ÍNDICE GENERAL

3.2.4. Producción de Hidrógeno con OTEC	19
3.2.5. Ciclo Uehara	19
3.2.6. Ciclo Kalina	21
4. Situación en México de la Energía Oceánica Térmica	25
5. Fundamentos Teóricos	29
5.1. Ciclo Rankine Orgánico	29
5.1.1. Principio de funcionamiento	29
5.1.2. Eficiencias termodinámicas: caso OTEC	31
5.1.2.1. Eficiencia Térmica	31
5.1.2.2. Eficiencia Exergética	32
5.1.3. Fluidos de trabajo orgánicos	33
5.1.4. Aplicaciones del Ciclo Rankine Orgánico	35
5.1.4.1. Biomasa	35
5.1.4.2. Energía solar	37
5.1.4.3. Geotermia	38
5.2. Oceanografía Física	39
5.2.1. Distribución térmica de los océanos	40
6. Metodología	45
6.1. Fuente de datos	45
6.1.1. Formato de datos tipo netCDF	45
6.1.2. Modelo Híbrido Coordinado Oceánico (HYCOM, por su siglas en Inglés)	47
6.1.3. Procesamiento de los datos	49
6.1.3.1. Limpieza de datos	51
6.2. Análisis termodinámico y simulación de una planta OTEC de ciclo cerrado	69
7. Proyección en México	81
7.1. Estado del arte de OTEC en México	81
8. Conclusiones	83
8.1. Trabajo futuro	84
A. Apéndice	85
A.1. Fundamentos teóricos	85
A.1.1. Entalpía	85
A.1.2. Estados de vapor saturado y líquido saturado	85
A.1.3. Mezcla saturada: calidad x	86
A.1.4. Ecuación de balance de Energía	87
A.1.5. Ecuación de balance de Entropía	88
A.1.6. Ecuación de balance de Exergía	89
A.2. Python	90

A.2.1. Librerías	90
A.2.1.1. Pandas	90
A.2.1.2. Matplotlib	90
A.2.1.3. CoolProp	90
A.2.1.4. IAPWS-08	91
Bibliografía	93

Índice de figuras

2.1. Esquema del método de captación de energía por electrodiálisis. Adaptada de (1)	11
3.1. Primera planta OTEC de ciclo abierto en la nave <i>Tunisia</i> . Adaptada de (2)	14
3.2. Esquema de un ciclo SOTEC. Adaptado de (3)	16
3.3. Esquema del sistema propuesto Geo-OTEC. Adaptada de (4)	17
3.4. Esquema de un sistema regenerativo que se emplea en conjunto con el effluente condensado de las plantas nucleares de Corea del Sur. Adaptada de (5)	18
3.5. Esquema del ciclo híbrido OTEC para producción de electricidad mediante celdas de combustible y paneles fotovoltaicos. Adaptada de (6)	19
3.6. Esquema del ciclo Uehara en una planta OTEC. Adaptada de (7)	21
3.7. Esquema de un ciclo Kalina OTEC simplificado. Los componentes son: (1) Caldera, (2) Turbina, (3) Destilador, (4) Separador, (5) Recalentador 1, (6) Recalentador 2, (7) Absorbedor, (8) Bomba del condensador, (9) Válvula de expansión, (10) Condensador, (11) Bomba de alimentación de la caldera, (12) Calentador del agua. Adaptada de (8)	22
4.1. Disponibilidad de gradiente térmico superior a 20°C en mares mexicanos. Adaptada de (9)	27
5.1. Esquema de un Ciclo Rankine Orgánico simple. Adaptada de (10)	30
5.2. Diagrama Temperatura-Entropía de un ciclo Rankine Orgánico simple. Adaptada de (10)	31
5.3. Esquema de sistema de conversión de energía oceánica térmica de ciclo cerrado. Adaptada de (11)	32
5.4. Diagrama Temperatura-Entropía para fluidos de trabajo secos, isentrópicos y húmedos. Adaptada de (10)	35
5.5. Esquema de un ciclo Rankine Organico aplicado a un sistema de biomasa de ciclo binario. Adaptada de (10)	36
5.6. Esquema de una planta solar con un Ciclo Rankine Orgánico. Adaptada de (10)	38

ÍNDICE DE FIGURAS

5.7. Esquema de una planta geotérmica de ciclo binario con un Ciclo Rankine Orgánico. Adaptada de (10)	39
5.8. Distribución típica de temperatura potencial $\frac{^{\circ}C}{m}$. (a) Lado Noroeste del Pacífico (5°N). (b) Noreste y Noroeste del Pacífico (24°N). (c) Región subpolar Noroeste (47°N). Adaptada de (12)	40
5.9. Variación superficial con respecto a la latitud de (a) temperatura, (b) salinidad y (c) densidad promedio para todos los océanos en invierno. Adaptada de (12)	43
6.1. Descripción del formato tipo netCDF utilizando notación de la red común de lenguaje de trabajo (CDL, por sus siglas en Inglés). Adaptada de (13).	46
6.2. Estructura de la base de gradiente térmico obtenida mediante (14) utilizada para este trabajo.	48
6.3. Archivos de gradiente temperatura obtenidos mediante (14). Los archivos con terminación 0_X.nc corresponden a aquellos con valor de gradiente térmico superficial, mientras que la terminación 1000_X.nc indica valores para 1000 m de profundidad.	49
6.4. Temperatura superficial para costas y mares de la República Mexicana para el 05 de septiembre de 2015.	50
6.5. Gradiente de temperatura a 1000m con respecto a la superficie marina para costas y mares de la República Mexicana para el 05 de septiembre de 2015.	51
6.6. Selección de la capa de puntos en formato csv con los datos de gradiente térmico de toda la República Mexicana.	52
6.7. Visualización de todos los puntos con una resolución de 1/12° para los datos de gradiente térmico de los océanos de la República Mexicana.	53
6.8. Herramienta de corte para reducir todos los puntos de gradiente térmico de los océanos de México a únicamente una zona de 10km de profundidad lo más cercano a la costa posible.	54
6.9. Visualización de la capa de puntos recortada a una distancia de 10km cercana a la línea de costa.	55
6.10. Gráfico de ejemplo para la explicación del algoritmo de clusterización <i>K-Means</i> con $K = 3$. Ejemplo obtenido en (15).	56
6.11. Selección de 3 centroides iniciales correspondientes al número de grupos inicial ($K = 3$).	57
6.12. Selección de los puntos más cercanos a cada centroide.	58
6.13. Clusterización de los datos en 3 grupos.	58
6.14. Porcentaje de semanas durante 5 años de datos para el cluster 1.	60
6.15. Porcentaje de semanas durante 5 años de datos para el cluster 2.	61
6.16. Porcentaje de semanas durante 5 años de datos para el cluster 3.	62
6.17. Porcentaje de semanas durante 5 años de datos para el cluster 4.	63
6.18. Porcentaje de semanas durante 5 años de datos para el cluster 5.	64
6.19. Porcentaje de semanas en un periodo de 5 años de datos para la Isla de Cozumel, Quintana Roo.	65

6.20. Porcentaje de semanas en un periodo de 5 años de datos para las costas de Chiapas, cerca del municipio de Pijijiapan.	66
6.21. Promedio diario con sus respectivas desviaciones estándar para gradiente térmico en los sitios de “El Palmarcito” en Chiapas y en Isla de Cozumel en Quintana Roo.	67
6.22. Promedio mensual con sus respectivas desviaciones estándar para gradiente térmico en los sitios de “El Palmarcito” en Chiapas y en Isla de Cozumel en Quintana Roo.	68
6.23. Esquema del Ciclo Rankine Orgánico enfocado a una planta OTEC de ciclo cerrado.	70
6.24. Eficiencia neta promedio semanal de la planta OTEC de ciclo cerrado. Fluidos de trabajo: R717, Isobutano y n-butano como fluidos de trabajo.	75
6.25. Eficiencia exergética promedio semanal de la planta OTEC de ciclo cerrado. Fluidos de trabajo: R717, Isobutano y n-butano como fluidos de trabajo	77
6.26. Potencia neta promedio semanal de la planta OTEC de ciclo cerrado utilizando R717 como fluido de trabajo.	78

Índice de tablas

3.1. Cronología de la energía oceánica por gradiente térmico. Adaptada de (16)	15
6.1. Características de la base de datos utilizada para este estudio	47
6.2. Estructura de la base de datos procesada a partir de los archivos de la Figura 6.3 mediante la librería de python <i>xarray</i> . El valor de gradiente de temperatura $\Delta T_{Lon_x Lat_x x} [^{\circ}C]$ está calculado como la diferencia entre la temperatura superficial menos la temperatura a 1000 m de profundidad.	51
6.3. Sitios con mayor porcentaje de semanas en un periodo del 17 de agosto de 2013 al 24 de septiembre de 2018 para el cluster 1. Gradiente de temperatura medio: $\mu_{\Delta T} = 22.8489^{\circ}C \pm 0.9387^{\circ}C$	59
6.4. Sitios con mayor porcentaje de semanas en un periodo del 17 de agosto de 2013 al 24 de septiembre de 2018 para el cluster 2. Gradiente de temperatura medio: $\mu_{\Delta T} = 25.8717^{\circ}C \pm 0.7946^{\circ}C$	60
6.5. Sitios con mayor porcentaje de semanas en un periodo del 17 de agosto de 2013 al 24 de septiembre de 2018 para el cluster 3. Gradiente de temperatura medio: $\mu_{\Delta T} = 16.0891^{\circ}C \pm 1.4464^{\circ}C$	62
6.6. Sitios con mayor porcentaje de semanas en un periodo del 17 de agosto de 2013 al 24 de septiembre de 2018 para el cluster 4. Gradiente de temperatura medio: $\mu_{\Delta T} = 28.3776^{\circ}C \pm 0.8606^{\circ}C$	63
6.7. Sitios con mayor porcentaje de semanas en un periodo del 17 de agosto de 2013 al 24 de septiembre de 2018 para el cluster 5. Gradiente de temperatura medio: $\mu_{\Delta T} = 19.5932^{\circ}C \pm 0.9734^{\circ}C$	64
6.8. Gradiente térmico medio con su respectiva desviación estándar para los sitios de estudio marcados contemplando todo el rango de 5 años de datos	65
6.9. Parámetros de simulación para el ciclo OTEC cerrado utilizando amoníaco (R717) como fluido de trabajo	72
6.10. Balance de energía en componentes del ciclo cerrado OTEC, partiendo del análisis de (11)	73
6.11. Balance de exergía en componentes del ciclo cerrado OTEC	74
6.12. Gradiente térmico promedio, potencia neta del ciclo y eficiencia exergética para los sitios de “El Palmarcito”, Pijijiapan, Chiapas y la Isla Cozumel, Quintana Roo para un periodo de 5 años.	79

Introducción

1.1. Justificación

La energía oceánica por gradiente térmico (OTEC, por sus siglas en inglés), es una de las 5 formas reconocidas en la literatura como fuentes explotables de energía del océano. Esta aprovecha la diferencia de temperatura superficial y profunda de los océanos como “fuente de calor de desecho” para ser procesada en el evaporador y condensador de un Ciclo Rankine Orgánico (ORC, por sus siglas en inglés) y así elevar la temperatura de un fluido orgánico de trabajo, ya sea un refrigerante, un hidrocarburo, u otro.

La tecnología en cuestión ha demostrado tener un desarrollo de investigación importante en Japón y de aplicación en otros lugares del mundo como en la Isla de Mauricio (República de Mauricio), una región en los océanos de la India (17); así como también en la Isla de Martinica, Francia (18).

Las limitaciones de esta tecnología se pueden ver, entre otras, en (19), donde se enlistan varios puntos importantes a considerar. Uno de ellos es justamente la disponibilidad del gradiente térmico, ya que se han realizado cálculos teóricos que dictan la necesidad de un gradiente de al menos 20°C para que la planta sea rentable en términos económicos y técnicos. Debido a esta limitación, se han tenido que buscar componentes capaces de aprovechar al máximo este gradiente; dichos componentes comprenden evaporadores y condensadores de buena calidad, bombas de trabajo que soporten las columnas de agua de donde se extrae el agua profunda, turbinas que den la potencia suficiente, y por supuesto, un fluido de trabajo eficiente, ya que la conversión de energía térmica del fluido orgánico de trabajo en energía mecánica de la turbina depende de él.

Todo ello ha dado lugar a recientes investigaciones y propuestas enfocadas en (3, 4, 5, 7, 20) dar respuesta a estos retos tecnológicos, siendo parteaguas para remover o utilizar en menor medida este gradiente límite que se impone ($\Delta T = 20^{\circ}\text{C}$) al utilizar otro tipo de fuentes de calor como lo son los desperdicios térmicos arrojados por el sistema de enfriamiento de una planta nuclear, aprovechar la radiación solar para calentar agua en colectores solares y así poder elevar el potencial del gradiente térmico, o utilizar

1. INTRODUCCIÓN

residuos de calor de sistemas geotérmicos para, de igual manera, elevar este gradiente sin tener que buscar agua a menor temperatura a mayores profundidades, ya que esto repercute directamente en los costos de instalación y mantenimiento de una planta al construir tuberías muy largas, además del transporte de estas.

Este trabajo pretende aportar conocimiento para mejorar la eficacia de los sistemas OTEC, a fin de acercarlos a ser alternativas de producción de energía rentables y asequibles. Para lograr esto, se realizará una evaluación del recurso oceánico térmico mediante la agrupación de gradientes de temperatura oceánico para diferentes regiones del país, utilizando el algoritmo de clasificación de aprendizaje de máquina denominado K-Means, cuyo funcionamiento básico es, agrupar todos los datos en k grupos, cuyos centros se formarán mediante un proceso recursivo en el cual se identifican las distancias más cercanas a estos y se fijarán mediante una media estática de los datos. Este proceso se explicará más a detalle en la Sección [6.1.3.1](#)

1.2. Objetivo

1.2.1. General

Evaluar el potencial por gradiente térmico en territorio oceánico mexicano para la determinación de su potencial aprovechamiento mediante una simulación de Ciclo OTEC.

1.2.2. Particulares

- Obtener y analizar 5 años de datos de gradiente de temperatura del territorio oceánico mexicano.
- Procesar los datos para obtener los valores útiles para OTEC ubicados cerca de la costa de la República Mexicana.
- Determinar los sitios de estudio mediante el algoritmo de clusterización *K-Means*; esta se fundamenta en *aprendizaje de máquina* para agrupación y clasificación de datos.
- Obtener propiedades termodinámicas como: volumen específico, temperatura de saturación, presión de saturación, entalpía específica y entropía específica de los fluidos de trabajo seleccionados para el ciclo OTEC cerrado.
- Utilizar la librería de python *pandas* para el manejo de datos, así como *matplotlib* para el manejo de gráficas y la librería *CoolProp* (21) para el manejo adecuado de las propiedades termofísicas mencionadas.
- Realizar la simulación del ciclo OTEC cerrado (ciclo Rankine Orgánico).

- Obtener una serie temporal de los parámetros más importantes del ciclo como son: eficiencia neta de ciclo (contemplando la potencia consumida por las bombas de agua de mar), su eficiencia neta y exergética; todo asociado a los fluidos de trabajo R717, Isobutano R600a y n-butano R601.

1.3. Planteamiento del problema

Diversos estudios de factibilidad de plantas de energía oceánica térmica se han realizado a lo largo del mundo, teniendo como “hito” la única planta OTEC que opera a nivel comercial, ubicada en el Laboratorio de la Autoridad de Hawái de Energía Natural (NELHA, por sus siglas en inglés), siendo el Dr. Luis Vega el pionero de esta tecnología a nivel comercial, y con esto demostrando la factibilidad y viabilidad de esta tecnología.

Estudios realizados en la República Mexicana(9, 22, 23) demuestran que nuestro país tiene amplio potencial para generar electricidad mediante OTEC. Se ha corroborado, en más de una ocasión, que la zona más viable para montar una planta de esta índole, se encuentra en la región del Océano Pacífico; específicamente entre las costas de Guerrero y Chiapas, y de igual manera en zonas más turísticas como la Isla de Cozumel, en Quintana Roo. Esto se debe a que en estas zonas existen circulaciones marinas que permiten que las temperaturas oceánicas sean más altas, y en combinación con las circulaciones termohalinas provocan que este fenómeno térmico sea más marcado.

La determinación de estas zonas se ha realizado mediante bases de datos probadas como es el caso de HYCOM (14); esta constituye una serie de ecuaciones de corrientes oceánicas que se simulan para obtener y conocer ciertos parámetros de interés como lo es la temperatura superficial, la diferencia de temperatura del agua superficial con respecto a una profundidad específica, nivel de oxígeno entre otras.

El manejo de estos datos se ha realizado, hasta ahora, de manera estadística para las costas de México; sin embargo, no se ha realizado este camino por medio del aprendizaje de máquina (aprendizaje de máquina), que constituye una de tantas ramificaciones de la inteligencia artificial moderna.

De igual manera, la simulación de una planta OTEC en los sitios idóneos determinados por estos algoritmos de agrupación de aprendizaje de máquina con las condiciones más realistas posibles no se ha realizado, y es por esta razón que este trabajo se enfoca en observar la factibilidad de una planta OTEC mediante parámetros fundamentales como la potencia neta del ciclo, la eficiencia térmica y neta de este; todo esto en cada uno de los sitios seleccionados como probables por su buen potencial de gradiente térmico.

1.4. Metodología

La metodología con la que se desarrolló este trabajo es la siguiente:

Como primera instancia se consiguieron los datos de gradiente de temperatura de un periodo de 5 años (los datos se obtuvieron de la base de datos de HYCOM (14)), los cuales están en un formato de datos con extensión tipo *.nc* que según Unidata (24), “... es una librería de formato de datos que apoya la creación, vinculación y colaboración de arreglos de datos de índole científicos”.

Una vez recopilados los datos, se hará uso de librerías como *pandas* y *matplotlib* para el correcto manejo de datos y visualización de los mismos; así como también la librería *scikit-learn* para la implementación de algoritmos de aprendizaje de máquina; específicamente el algoritmo denominado *k-means*, empleado para separar los datos en conjuntos o *clusters* cuyas características sean semejantes en cada uno de éstos.

El objetivo de este agrupamiento es la detección de la media de los datos de gradiente para así realizar una selección de los sitios costeros candidatos para realizar la simulación del ciclo Rankine con ayuda de la librería de python para determinar propiedades termodinámicas de fluidos, *CoolProp* (21).

1.5. Estructura de la tesis

El Capítulo 1 será dedicado a la sección introductoria; por qué se realiza esta tesis, así como la utilidad de la misma y los métodos que se utilizaron para realizarla.

El Capítulo 2 se centrará en definir cuándo se comenzó a tener interés por las energías oceánicas en general, así como una explicación de cada una de las energías oceánicas que se estudian actualmente a nivel mundial.

Para el Capítulo 3 se abordará el tema de la energía oceánica por gradiente térmico (OTEC), comprendiendo así su historia, datos de su implementación y las variaciones que ha tenido esta tecnología a lo largo del tiempo, como por ejemplo, la implementación de ciclos de refrigeración junto con los ciclos de potencia para producir electricidad así como calefacción de espacios y el uso de desechos del sistema de enfriamiento de las centrales nucleares.

En el Capítulo 4 se dará un panorama general de la situación de la energía oceánica térmica en el país, así como los retos que esta presenta y la importancia del Centro Mexicano de Innovación en Energía del Océano (CEMIE-O) como institución proveedora de recurso económico y científico en apoyo a este tipo de energía renovable.

El Capítulo 5 dará cuenta del marco teórico que permitió realizar un análisis de resultados más completo. Se abordarán temas desde los fundamentos termodinámicos (contenidos en la Sección A.1) de un ciclo de potencia como lo es el ciclo Rankine, hasta el funcionamiento de la distribución de las temperaturas en los océanos mediante el entendimiento de la oceanografía física.

El Capítulo 6 es el capítulo medular de la tesis, ya que presenta de forma detallada y ordenada todos los datos y parámetros tomados en cuenta para la realización de la misma, el algoritmo empleado para la clasificación de los datos de temperatura y la selección del sitio; así como también se muestran los resultados obtenidos por las simulaciones del ciclo OTEC cerrado realizadas con python.

El Capítulo 7 se considerará como una “pre conclusión”, ya que aquí se plasmarán los proyectos de tesis realizados para México en materia OTEC y el rumbo que se ha tomado hasta ahora para esta energía oceánica.

El final de la tesis se estipula en el Capítulo 8 en donde se concluye el trabajo realizado mencionando los sitios potenciales con base a los resultados obtenidos en el trabajo, así como el trabajo futuro que se podría realizar partiendo de esta tesis.

Antecedentes

2.1. Interés en la energía de los océanos

Los océanos cubren tres cuartas partes de la Tierra (25), y esto tiene como consecuencia que estos sean un almacén de energía de grandes proporciones. La energía almacenada en estos proviene de fuentes como el sol (radiación solar), la atracción gravitatoria entre la Luna y el Sol, los cambios de presión en el ambiente debido a la atmósfera (por el viento), entre otras.

Según Vanegas (9), el potencial energético oceánico mundial teórico es de 1800 TWh/año para mareas (considerando amplitud y corrientes locales), 29500 TWh/año en energía del oleaje, 1650 TWh/año para gradiente salino, y 44000 TWh/año para gradiente térmico.

El panorama de las energías oceánicas en cuanto a producción de electricidad refiere, es alentador y positivo. Sin embargo, estas poseen problemas de tipo tecnológico-económico, y por ello, únicamente contribuyen en una pequeña proporción del suministro de energía a nivel mundial.

Considerando las 4 fuentes de energía del océano, la energía proveniente de las mareas, aporta la mayor generación de energía eléctrica, seguido de las corrientes marinas, y teniendo por último lugar a la energía oceánica por gradiente térmico y gradiente salino.

Estas últimas energías son las que menos están comercializadas debido a los retos tecnológicos que cada una de estas presenta, ya que tecnológicamente y económicamente son costosas y se quieren más estudios.

2.2. Energía Oceánica

2.2.1. Energía por Oleaje

Abordando los temas consecuentes mediante la lectura de (26), este tipo de energía es una promesa del presente y futuro inmediato, ya que es muy frecuente, es abundante

además de ser limpia, y sobre todo, es predecible, lo que hace de alguna manera fácil su modelado en condiciones diversas. Además, esta energía tiene el potencial para competir con la densidad energética de los combustibles fósiles.

Esta energía se puede extraer directamente de la superficie de los mares o bien, por debajo de estos aprovechando las diferencias de presiones, siendo estas las dadoras de aproximadamente 2 TW de potencia (26).

La manera en la que se cuantifica o se estima el recurso de este tipo de energía es a través de las olas irregulares y sus unidades son watts/unidad de longitud de cresta de ola (W/m).

Las potencias mayores en cuestión de energía del oleaje son: Alaska, el norte de Canadá, las costas al oeste de Escocia, el sur de África y en Australia, teniendo un potencial global de 29,500 TWh anuales.

2.2.1.1. Dispositivos convertidores de energía de las olas (WEC, por sus siglas en inglés)

Estos dispositivos se pueden utilizar tanto en mar profundo, en la costa y en mar abierto, de acuerdo con (26). No importa en que región se coloquen, el principio de funcionamiento es el mismo para todos: la energía de la ola se convierte a energía mecánica en el WEC y de ahí esta energía se convierte en energía eléctrica a través de generadores; o también, la energía de la ola se convierte en energía de alta presión hidráulica, que a su vez esta se usa para dirigir un motor hidráulico que está conectado a un generador eléctrico.

Estos dispositivos se clasifican en 4 grupos principales:

- *Atenuadores*: se colocan paralelos a la ola incidente y colectan energía radialmente. Algunos ejemplos son: Pelamis, Anaconda, Salter Duck, entre otros.
- *Columna de agua oscilantes (OWC, por sus siglas en inglés)*: son de configuración flotante o de huecos fijados al suelo, que están abiertos al agua debajo de la superficie dentro de una columna de aire confinado, que con el movimiento de las olas, este aire realiza presión dentro de la columna y el aire impulsa una turbina con un generador eléctrico. Algunos ejemplos de estos sistemas son: Limpet, Mighty Whale, Oceanlix, entre otros.
- *Sistemas "overtopping"*: Estos sistemas están hechos de una barrera en la que la ola colisiona, realizando un desplazamiento del agua hacia un reservorio/estuario que acciona una turbina (normalmente de baja potencia). El ejemplo más común de este dispositivo es el Wave Dragon.
- *Sistema de puntos absorbedores*: Debido a su pequeño tamaño se realizan en arreglos largos para que pueda absorber más flujo de energía de las olas. Estos dispositivos son boyas flotantes que extraen la energía del movimiento de las olas. Algunos ejemplos son: AquaBuoy (Canada), Arcimedes Buoy (Escocia), BioWave (Australia), entre otras.

2.2.2. Energía de mareas

Este tipo de energía se clasifica en dos tipos: potencial de mareas y corrientes marinas. En la primera se extrae construyendo una presa a través de un río, y la segunda es generalmente extraída usando diferentes tipos de turbinas.

Se necesita un rango de mareas de al menos 3.05 *m* para que un proyecto de esta naturaleza sea económica viable y que la generación de potencia lo sea también.

Como se mencionó en secciones previas, las energías oceánicas poseen alta predictibilidad, además de que son limpias en su producción; y el caso de la energía por mareas no es la excepción.

El fenómeno de las mareas se da debido a la interacción de las fuerzas gravitatorias que existen entre la Luna, el Sol y la Tierra, convirtiendo así el movimiento de las mareas en energía cinética que puede ser aprovechada en diversos dispositivos que se clasificarán en las siguientes subsecciones.

La cantidad que potencialmente se puede extraer de energía de las mareas es de aproximadamente 1 *TW*, siendo la energía de corrientes marinas la que aporta más potencia a esta cantidad.

2.2.2.1. Potencial de mareas

Como se mencionó anteriormente, este tipo de energía se genera al construir una presa en un estuario que recolecta las subidas y bajadas del nivel del mar que ocurren a lo largo del ciclo de marea, siendo ésta una tecnología cuya construcción más antigua data de 1966 con la planta mareomotriz “La Rance”, en la provincia francesa del mismo nombre, y que sigue operando.

En cuestión de capacidad instalada, las plantas más grandes son:

1. Sihwa Lake Tidal Power Station, Corea del Sur; 254 MW.
2. La Rance, Francia; 240 MW.
3. Annapolis Royal en Nova Scotia, Canadá; 20 MW.

Las desventajas más notables de este tipo de energía es el alto impacto ambiental que tiene el realizar presas de concreto tan grandes y además es un costo muy grande el que se debe realizar, además de que modifica las características del estuario y el ritmo de la vida marina en esa única y particular ubicación.

2.2.2.2. Corrientes marinas

Este tipo de energía, implica el uso directo de la corriente marina para la generación de potencia mediante turbinas y sin necesidad de construir presas enormes.

Estas turbinas extraen la energía de las corrientes marinas cuando existe una diferencia de altura considerable en las mareas capaz de provocar corrientes rápidas. La

energía cinética del movimiento lateral de las mareas con velocidades considerables es transformada en este tipo de dispositivos.

La energía aprovechada de las mareas puede ir desde unos pocos kilowatts (kW) hasta varios megawatts (MW) en granjas marinas que usualmente se interconectan entre sí para generar aún más potencia por parte de turbinas (cientos de ellas). A pesar de todo esto, dichas turbinas están sujetas a la bio-incrustación, problemas de cavitación por experimentar distintos tipos de flujos turbulentos, entre otros problemas.

2.2.3. Energía por Gradiente Térmico

Este tipo de energía oceánica, que además es el tema central de este trabajo, aprovecha el gradiente de temperatura que existe entre la superficie y las profundidades marinas en una determinada ubicación geográfica, mediante la implementación de un Ciclo Rankine Orgánico (ORC) cuya configuración puede ser de ciclo cerrado, ciclo abierto y ciclo híbrido:

- *Ciclo Cerrado OTEC*: utiliza un fluido de trabajo orgánico (ya sea un refrigerante, un hidrocarburo o un fluido con un bajo punto de ebullición) que pueden ser desde amoníaco R717 hasta R134a.

El fluido de trabajo entra en contacto con el agua de mar a alta temperatura en un evaporador. El fluido evaporado viaja hacia una turbina en donde se expande isentrópicamente para después salir como una mezcla saturada de líquido-vapor y entrar en contacto con el agua a baja temperatura en el condensador. Una vez en fase líquida, entra a la bomba y se inyecta nuevamente al evaporador y se repite el ciclo. El esquema de este ciclo se encuentra en la Figura 5.3.

- *Ciclo Abierto OTEC*: el fluido de trabajo es un vapor de baja presión. Este vapor se genera del agua a alta temperatura al colocarla en un contenedor de baja presión, en el cual el vapor sale casi sobrecalentado, debido a que se desalinizó en el contenedor de baja presión, y dicho vapor se utiliza para generar electricidad en la turbina.
- *Ciclo Híbrido OTEC*: esta configuración tiene por objetivo combinar los dos ciclos anteriormente mencionados para crear un ciclo que realice generación de potencia y al mismo tiempo desalinización de agua. Lo similar al ciclo abierto está en el que el agua a alta temperatura se evapora en una bomba flash para pasarla a una cámara de vacío; y posterior a esto, este vapor sirve para evaporar un fluido orgánico de trabajo que moverá al generador eléctrico.

El potencial teórico de esta tecnología es de al rededor 83,300 TWh al año.

2.2.4. Energía por Gradiente Salino

De acuerdo con (27), existen dos tecnologías disponibles para este tipo de fuente energética, las cuales son:

- *Electrodiálisis inversa*: es una técnica que, aprovecha el gradiente salino entre el agua de mar y el agua de río (salada y dulce respectivamente) en los cuales se deja fluir los dos tipos de agua a través de compartimentos con membranas intercambiadoras de cationes y aniones entre un electrodo positivo y negativo.

Al permitir que ambas aguas fluyan a través de las membranas contrarias a ellas, se producirá una diferencia de potencial entre el cátodo y el ánodo, permitiendo así generar electricidad de corriente directa.

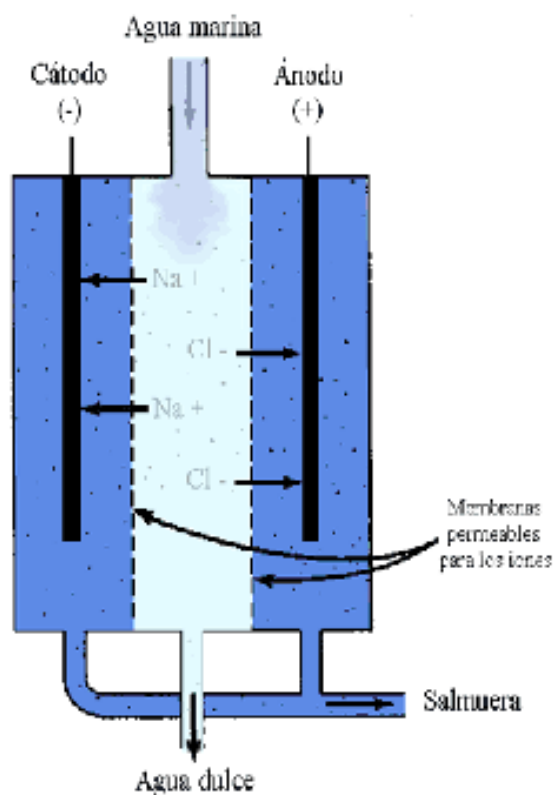


Figura 2.1: Esquema del método de captación de energía por electrodiálisis. Adaptada de (1)

- *Retardo de la presión osmótica*: esta tecnología consiste en embalsar en cámaras agua dulce y agua salada separadas por una membrana semi-permeable. Debido a reacciones químicas por contacto entre fluidos de diferentes densidades, existirá un diferencial de presión que elevará la altura del agua salada, que a su vez accionará una turbina hidráulica para generar electricidad mediante un generador

2. ANTECEDENTES

acoplado. Esta tecnología resulta ser la más limpia de su género.

Desarrollo Histórico

3.1. Historia significativa

En el año 1881, Arsène d'Arsonval ideó un sistema de ciclo cerrado donde el fluido de trabajo era dióxido de azufre (SO_2) el cual iba a ser evaporado por agua caliente (30°C) del cuerpo de agua de Grenelle, Paris, para después ser condensado por agua fría del río Sena. Él fue el primero en notar el potencial de los mares tropicales en cuestión de extracción del océano (2).

La historia de OTEC comienza a desarrollarse de manera más aplicada en 1974 (2); sin embargo, el autor menciona que existieron diferentes intentos varias décadas atrás en materia de esta tecnología emergente. En marzo de 1926, Claude junto con Boucherot idearon un ciclo abierto para generación de potencia utilizando agua de mar como fluido de trabajo, demostrando esta idea con una planta de 60 kW en Ougrée, Francia a través del río Meuse como fuente de agua de baja temperatura con una diferencia de 20°C . En 1930, Claude probó su máquina térmica en Cuba con una tubería de 2km de largo y 1.5m de diámetro en condiciones climáticas muy malas, operando únicamente con un gradiente de 14°C . En 1934, Claude presentó su proyecto OTEC originalmente al gobierno brasileño mediante las siguientes palabras: “el objetivo de esta demostración es esencialmente probar que el mar puede convertirse en la fuente de energía más barata y formidable en el futuro”. En 1933 se construyó la primera planta OTEC flotante en las inmediaciones del buque de carga “Tunisie” (Figura 3.1). Dicha planta era de ciclo abierto con tuberías de 25m de longitud y 8 de diámetro que producía 2 MW utilizando amoníaco como fluido de trabajo. Posteriormente y en 1956, se construyó una planta de 3 MWe en la costa Este de Africa fue abandonada. (28). Desde 1972 a 1973 se mantuvo sin actividad la investigación y aplicación; pero en 1973, debido a la crisis petrolera, se aceleró la búsqueda de fuentes de energías alternativas, entre otras, se reexaminó el potencial de OTEC. Posteriormente y para 1985, Kalina inventó un nuevo ciclo que utilizó una mezcla de amoníaco-agua como fluido de trabajo en el sistema, y para 1994 se creó un ciclo aún más avanzado por Uehara (16).

En la Tabla 3.1 se muestra el avance y desarrollo tecnológico que tuvo esta energía.

3. DESARROLLO HISTÓRICO

Dichos datos fueron proporcionados por (16).

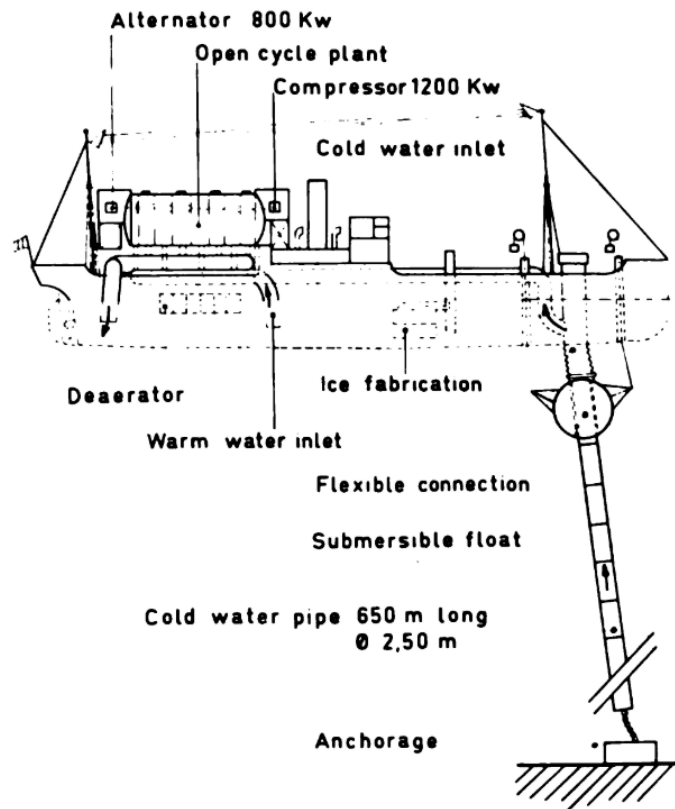


Figura 3.1: Primera planta OTEC de ciclo abierto en la nave *Tunisia*. Adaptada de (2)

Tabla 3.1: Cronología de la energía oceánica por gradiente térmico. Adaptada de (16)

Año	Acontecimiento
1881	Jacques D'Arsonval conceptualizó OTEC
1926	George Claude experimentó en OTEC
1933	George Claude construyó un prototipo de OTEC offshore
1964	Anderson propuso un modelo OTEC offshore
1974	La primera conferencia en OTEC (E.U.A.)
1977	La Universidad de Saga, Japón, generó 1kW
1979	Mini planta OTEC generó 50kW en E.U.A.
1981	Tokyo Electric Power Co. generó 120kW en Nauru
1985	El Dr. Alex Kalina inventó un ciclo con mezcla amoníaco-agua
1988	Se estableció la asociación OTEC en Japón
1993	Se creó una planta OTEC de ciclo abierto (210kW) en Hawaii, E.U.A.
1994	Haruo Uehara creó un ciclo térmico avanzado
2001	Se construyó una planta OTEC de 1MW de ciclo cerrado en India por el Instituto Nacional de Tecnologías Oceánicas (NIOT, por sus siglas en Inglés)

3.2. Variaciones con respecto al ciclo OTEC convencional

A través de los años, han surgido diferentes versiones de esta tecnología de conversión de energía oceánica térmica, cuya finalidad es, “suprimir” o independizarse cada vez más de ese gradiente térmico mínimo de 20 °C.

En este apartado se hablará de las variaciones más conocidas de esta tecnología de las que se tiene registro actualmente.

3.2.1. Solar Ocean Thermal Energy Conversion (SOTEC)

El gradiente térmico marino no se puede conseguir en todos lados de los mares; y es por esta razón principalmente por la que se crea esta tecnología híbrida entre la energía solar térmica y la energía oceánica por gradiente térmico, donde, según Yue (3) se emplean colectores solares con características específicas. Se ha comprobado que esta nueva tecnología ha mejorado la eficiencia térmica neta de este ciclo significativamente, según el autor.

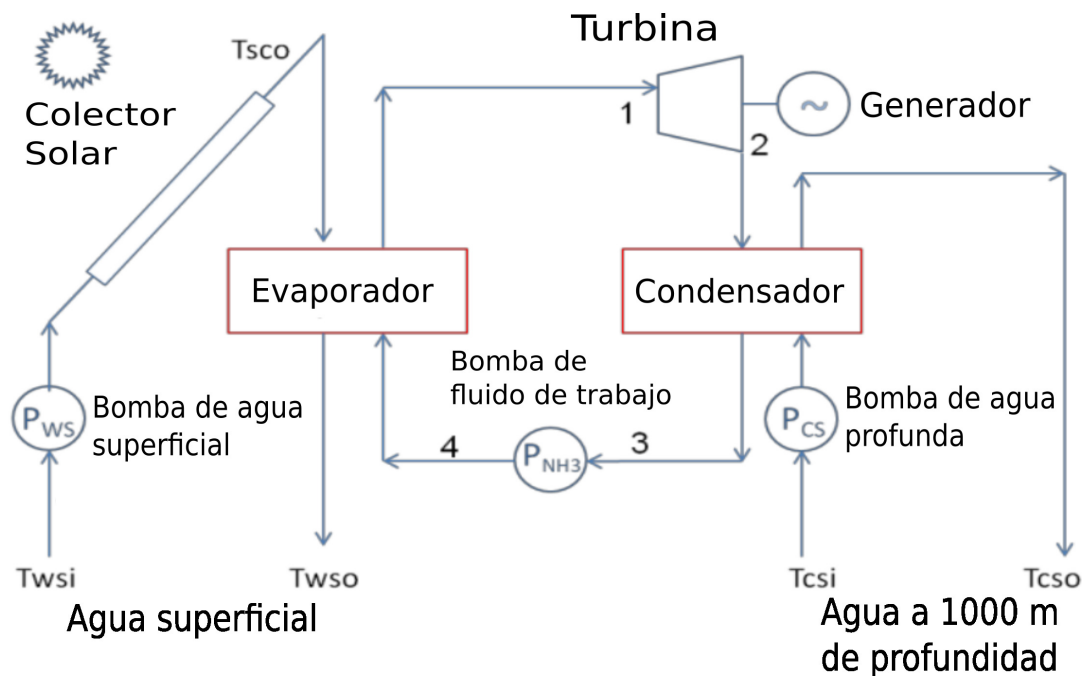


Figura 3.2: Esquema de un ciclo SOTEC. Adaptado de (3)

El ciclo de la Figura 3.2 difiere de la configuración original de la Figura 5.3 en que se agrega un colector solar de placa plana, que será el encargado de calentar el agua superficial. Este colector se ocupó para este estudio en particular ya que trabaja en un rango de bajas temperaturas menores a 100 °C.

La radiación solar es recibida por el colector solar que, a su vez, se encarga de elevar la temperatura del agua superficial y así hacerla circular a través del evaporador entrando en contacto con el fluido de trabajo que se vaporiza en este intercambiador de calor.

3.2.2. Geothermal Ocean Thermal Energy Conversion (Geo-OTEC)

El sistema propuesto por Mohd Idrus (4) se basa fundamentalmente en aprovechar el gas natural crudo de las plantas petroleras lejos de la costa en un sistema de calentamiento de agua geotérmico. Este gas natural es aprovechado para sobrecalentar el vapor saturado del fluido orgánico (en este caso amoníaco) antes de que entre a la turbina para generar electricidad.

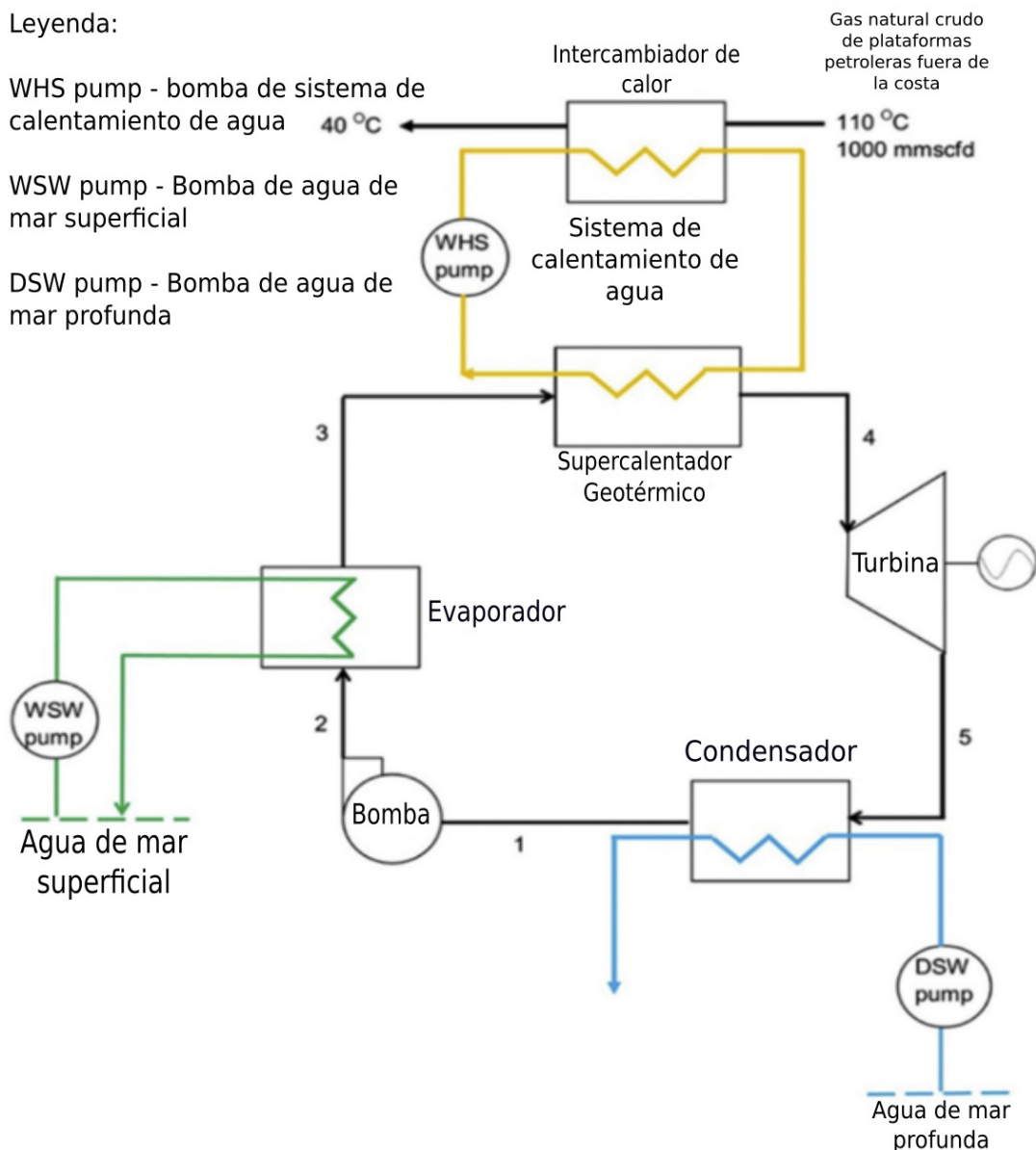


Figura 3.3: Esquema del sistema propuesto Geo-OTEC. Adaptada de (4)

El sistema Geo-OTEC de la Figura 3.3 contempla una adición de componentes como el sistema de calentamiento de agua geotérmico y un supercalentador geotérmico.

El sistema de calentamiento de agua geotérmico (GWHS, por sus siglas en inglés) es el corazón de este nuevo ciclo, ya que este captura el calor del gas natural crudo de las plataformas de producción de gas fuera de la costa para ingresarla al ciclo. Dicha energía es transferida mediante el sistema GWHS mediante el calentamiento de agua.

3. DESARROLLO HISTÓRICO

3.2.3. Nucleo-OTEC

Esta configuración de ciclo planteada por Park (5) contiene una mejora que no es en sí la adición de algo novedoso como en los anteriores; más bien se trata del uso de un ciclo Rankine Regenerativo (Figura 3.4) que utiliza agua del condensador de plantas nucleares a la entrada del evaporador del Ciclo Rankine.

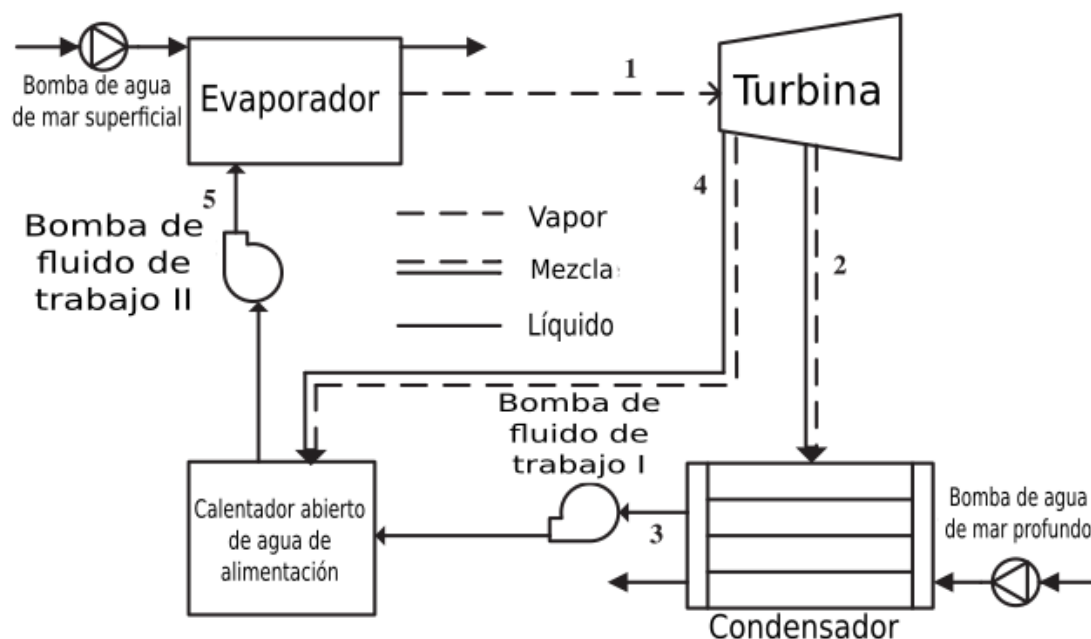


Figura 3.4: Esquema de un sistema regenerativo que se emplea en conjunto con el efluente condensado de las plantas nucleares de Corea del Sur. Adaptada de (5)

Generalmente se utiliza el gradiente de temperatura del agua superficial con agua a una profundidad de alrededor 1000m para la extracción de agua fría. Para este caso particular, se utilizó una temperatura a la entrada de 1 °C a la entrada del condensador.

Las temperaturas que se utilizaron como efluente condensado variaban de entre 25 °C en enero a 32 °C en septiembre, siendo la primera la más baja y la segunda la más alta del año, lo que nos proporciona buenos gradientes para operar la planta, aprovechando este efluente de desecho del sistema de enfriamiento de las plantas nucleares.

Se corroboró que la eficiencia del ciclo OTEC regenerativo utilizando los efluentes condensados de las nucleares aumentó un 2% con respecto al ciclo tradicional que utiliza el agua superficial de mar.

3.2.4. Producción de Hidrógeno con OTEC

Este es un sistema híbrido propuesto por Khosravi (6) el cual emplea los componentes de un ciclo OTEC convencional, paneles fotovoltaicos, un electrolizador, tanques de hidrógeno, celdas de combustible y convertidores, ya que este sistema se creó con la finalidad de suministrar energía eléctrica en islas y áreas remotas.

Las celdas solares son capaces de producir electricidad de corriente directa en los paneles fotovoltaicos en ciclo híbrido de la Figura 3.5; y cuando esta electricidad es mayor a la carga demandada, ese remanente de electricidad se transfiere al electrolizador que a su vez descompone la molécula del agua en hidrógeno y oxígeno. Este hidrógeno se almacena en el tanque de hidrógeno por un largo tiempo, y cuando la potencia producida por el ciclo OTEC es menor a la demanda, la electricidad requerida será suministrada por la celda de combustible.

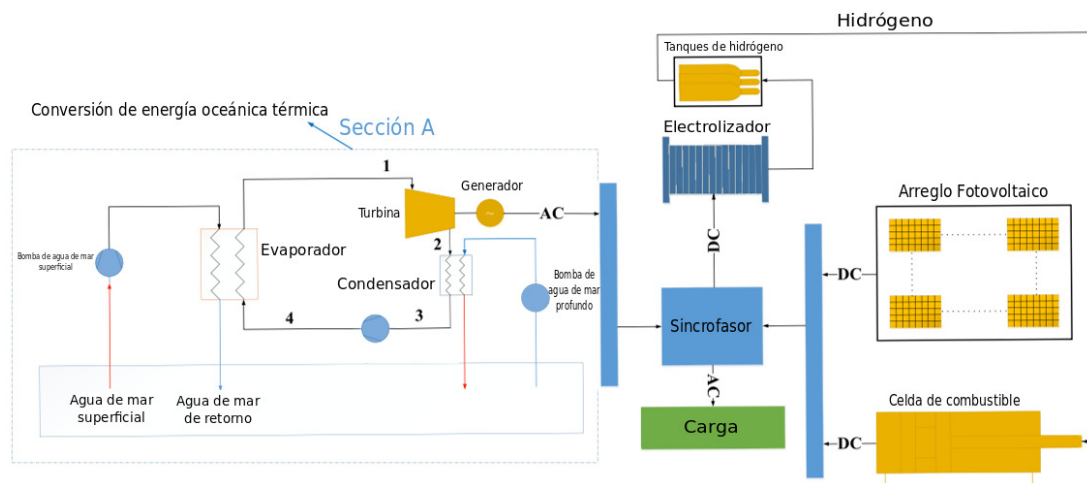


Figura 3.5: Esquema del ciclo híbrido OTEC para producción de electricidad mediante celdas de combustible y paneles fotovoltaicos. Adaptada de (6)

3.2.5. Ciclo Uehara

La Figura 3.6 muestra uno de los ciclos más complicados empleados en OTEC; el esquema del ciclo Uehara elaborado por el Instituto de Energía Oceánica de la Universidad de Saga (IOES, por sus siglas en Inglés).

Los componentes del mismo como se pueden apreciar son: un condensador y evaporador; dos turbinas, un generador, dos bombas para el fluido de trabajo, una caldera, un regenerador, un separador, un difusor, y un absorbedor junto con dos tanques.

Resumiendo el principio de funcionamiento de este ciclo se tiene lo siguiente:

1. El fluido de trabajo se evapora parcialmente en el evaporador al entrar en contacto con agua de mar superficial.

3. DESARROLLO HISTÓRICO

2. Este vapor parcialmente evaporado se separa en vapor y líquido en el separador.
3. El vapor se manda a la turbina 1 y el líquido se manda al regenerador.
4. El vapor hace girar la turbina y se condensa parcialmente, mandándolo hacia el tanque 2 mediante la caldera.
5. El resto del vapor se manda a la turbina 2 y este sale hacia el absorbedor.
6. El líquido contenido en el regenerador cede calor al fluido del evaporador mediante el intercambio de calor.
7. Este líquido se manda al absorbedor a través del difusor.
8. Este fluido se manda al condensador y se condensa mediante el intercambio de calor con el agua fría de las profundidades.
9. Este líquido es enviado al tanque 1 el cual se mezcla con el del tanque 2 antes de ser enviado al regenerador por las bombas de trabajo 1 y 2.
10. Esta mezcla es enviada al evaporador a través del regenerador.

Este ciclo se conceptualizó para alcanzar mayores eficiencias térmicas ($\eta_{ter} > 6\%$) al utilizar una mezcla amoníaco-agua como en el ciclo Kalina para plantas OTEC junto con dos turbinas para absorción y extracción del fluido de trabajo vaporizado.

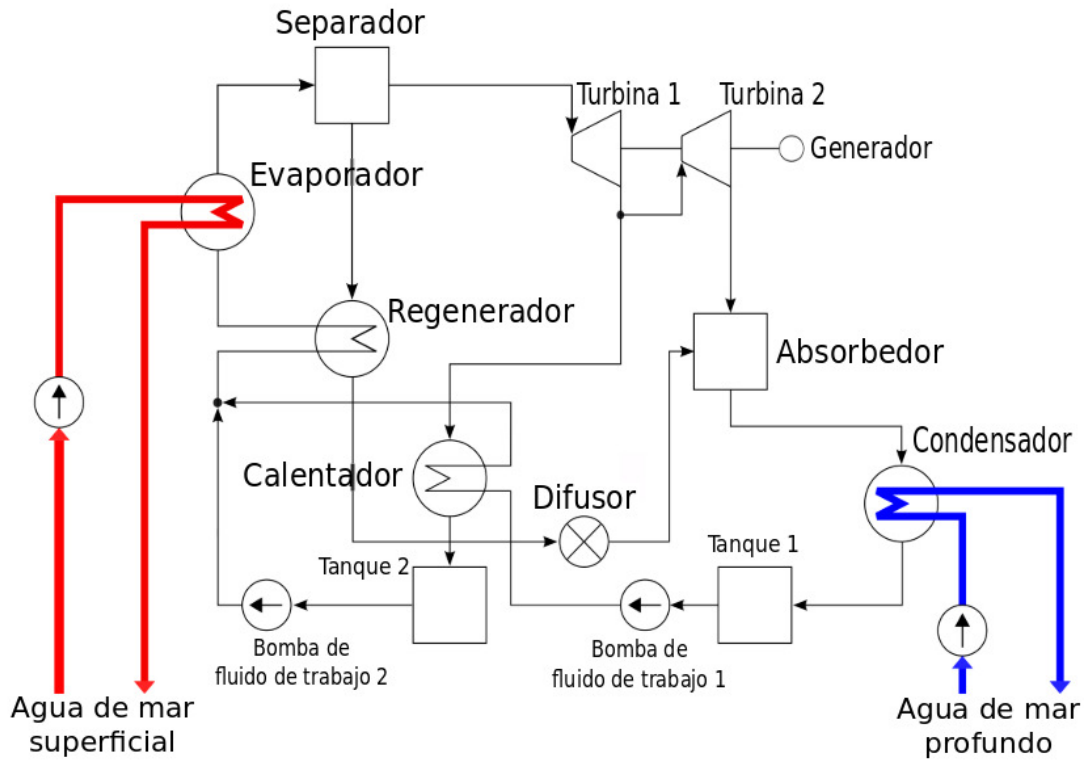


Figura 3.6: Esquema del ciclo Uehara en una planta OTEC. Adaptada de (7)

3.2.6. Ciclo Kalina

Este ciclo vió la luz en 1980 gracias a Alexander Kalina, cuya propuesta de un revolucionario ciclo termodinámico que utilizaba una mezcla de amoníaco-agua como fluido de trabajo fue bien recibida. Este brillante ciclo, que lleva su nombre, es comparado con la útil invención del Ciclo Rankine, aunque este nuevo ciclo que se examinará en esta sección posee una mejora significativa en la potencia neta para la planta OTEC.

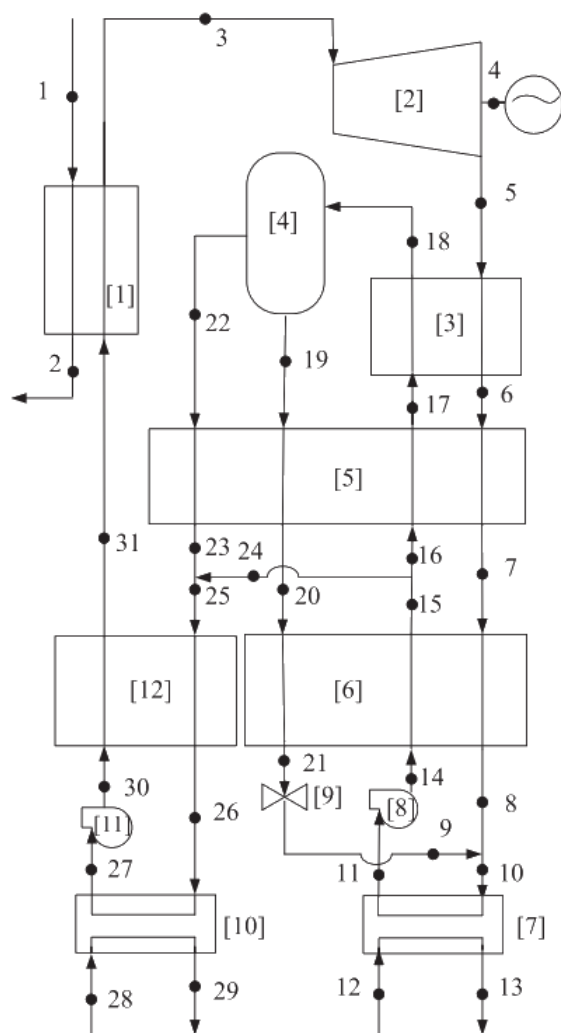


Figura 3.7: Esquema de un ciclo Kalina OTEC simplificado. Los componentes son: (1) Caldera, (2) Turbina, (3) Destilador, (4) Separador, (5) Recalentador 1, (6) Recalentador 2, (7) Absorbedor, (8) Bomba del condensador, (9) Válvula de expansión, (10) Condensador, (11) Bomba de alimentación de la caldera, (12) Calentador del agua. Adaptada de (8)

El principio de funcionamiento del ciclo Kalina de la Figura 3.7 se muestra en el siguiente orden, asumiendo que los números dentro de corchetes [] se trata de un componente del ciclo y los números en solitario representan un estado propio del ciclo. A continuación se expondrá el modo de funcionamiento de este ciclo:

1. El ciclo se alimenta del calor de gases que entran a la caldera en (1) y (2).
2. El vapor sobrecalentado de la mezcla amoniaco-agua en (3) es expandido en una turbina en (4).

3. A la salida de la turbina en (5) el vapor húmedo es enfriado en (5), (6) y (7) y diluido con semilíquido de amoníaco en (9) y (10) y condensado en (11) en el absorbedor por agua a baja temperatura (12) y (13).
4. El líquido saturado saliente del absorbedor es comprimido en (14) a una presión intermedia y es calentado en (15), (16), (17) y (18).
5. La mezcla saturada es separada en líquido bajo en amoníaco en (19) que es enfriado en (20) y (21) y despresurizado en una válvula de expansión para pasar a amoníaco vaporizado en (22). Este es enfriado en (23) y parte del fluido condensado en (24) es añadido al vapor de amoníaco para obtener una concentración del 70 % en el fluido de trabajo en (25).
6. La mezcla es enfriada en (26), condensada en (27) por agua de baja temperatura en (28) y (29) que se vuelve líquido comprimido en (30) y enviado a la caldera a través del alimentador de agua del calentador.

Como se puede observar, este es uno de los ciclos más complicados que se ha creado para la tecnología OTEC, cuyo éxito se encuentra en el proceso de intercambio de calor de la ganancia de calor en el evaporador y el rechazo de calor en el condensador; todo esto aunado a los intercambiadores de recuperación de calor, haciendo la mezcla amoníaco-agua la responsable del proceso de ebullición y condensación.

Cabe mencionar que cuando la mezcla amoníaco-agua es calentada, el amoníaco se vaporiza primero, provocando que la temperatura saturada aumente dejando atrás el estado líquido, logrando así la completa vaporización de este.

Situación en México de la Energía Oceánica Térmica

La situación actual en México de las energías oceánicas y en particular de la conversión de energía oceánica térmica (OTEC, por sus siglas en Inglés) tiene sustento en el documento de Vanegas (9), en el que comienza a definir piezas claves en la investigación y el desarrollo de este tipo de fuente térmica de energía oceánica.

El pilar clave para la investigación y desarrollo de OTEC recae en el Centro Mexicano de Innovación en Energía del Océano (CEMIE - Océano), el cual se comenzó a financiar en el 2017 una vez empezados otros CEMIE's en 2016 como el CEMIE-Sol, CEMIE-Geo y CEMIE-Eólico.

En particular, el CEMIE-Océano posee ciertas metas que se planean a corto y mediano plazo, las cuales en breves palabras son (29):

1. Creación de tecnologías con eficiencia energética a partir de energías oceánicas.
2. Desarrollar materiales y formas de almacenamiento de esta energía.
3. Realizar metodologías para que estas energías se integren ambiental y socialmente.
4. Formación de recursos humanos

Básicamente el concepto de esta institución es conjuntar apoyos de tipo científico, económico, un tanto político y por supuesto tecnológico; para con lo anterior, poder formar grupos multidisciplinarios que se encarguen de desarrollar formas innovadoras de extracción de energía del océano en sus diferentes formas.

Uno de los retos tecnológicos que aquejan a la energía por gradiente térmico así como a otras energías oceánicas involucra el desarrollo de materiales y tecnologías que soporten un ambiente hostil como lo es el mar. Por tanto, una de tantas actividades del CEMIE - Océano es justamente el desarrollo de este tipo de materiales; en específico materiales de tipo cerámicos, poliméricos y metálicos.

4. SITUACIÓN EN MÉXICO DE LA ENERGÍA OCEÁNICA TÉRMICA

Los materiales comúnmente desarrollados son el compuesto de carburo de silicio (SiC) para evitar la corrosión en las turbinas que se instalan en estos ambientes marinos, *concreto resistente al agua* para las cimentaciones de obras de tipo flotante (offshore) y el recubrimiento de polimetilmetacrilato con nanopartículas de óxido de silicio y zinc metálico para la resistencia al ambiente salino.

En México, así como en otras zonas en las que se realiza OTEC, es necesario contar con bases de datos que contengan diferencias de temperatura para profundidades específicas que cumplan ese requerimiento de al menos 20 °C.

Investigadores del CEMIE - Océano utilizan bases de datos como *Era-Interim* *ECMWF* para obtener altura significativa de la ola y *HYCOM* para obtener velocidad de corrientes, gradientes térmicos y salinidades del mar en un rango espacial y temporal bien definido. Para el caso de México, el rango espacial debe comprender latitudes y longitudes que permanezcan dentro de la Zona Económica Exclusiva de México (ZEEM) y en un periodo de tiempo considerable, como por ejemplo al menos 5 años.

El mapa de la Figura 4.1 se realizó utilizando la base datos *HYCOM* con una resolución espacial de $1/12^\circ$ y temporal de 5 años. En ésta se puede observar que, para gradientes mayores a 20 °C, existen condiciones favorables tanto para el Golfo de México como para el Océano Pacífico casi el 100% del tiempo. No obstante, se debe tomar en cuenta que no en todos los lugares se encuentran condiciones, ya que el recurso se encuentra suficientemente lejos de la línea de costa como para hacer de este un proyecto económicamente inviable. Dados los análisis de la Figura 4.1 se puede concluir que los sitios en los que colocar una planta OTEC será viable tanto técnicamente como económicamente sería en los estados de Chiapas, Oaxaca, Guerrero y Michoacán. En el presente trabajo se corroborará que estos sitios concidan con los analizados por Vanegas (9) y posteriormente realizar simulaciones en los puntos encontrados.

Una vez localizados los sitios potenciales de OTEC, será necesario realizar estudios ambientales y sociales cerca de la región para establecer sintonías iguales de trabajo entre la gente, la flora y fauna y los especialistas en materia de energía.

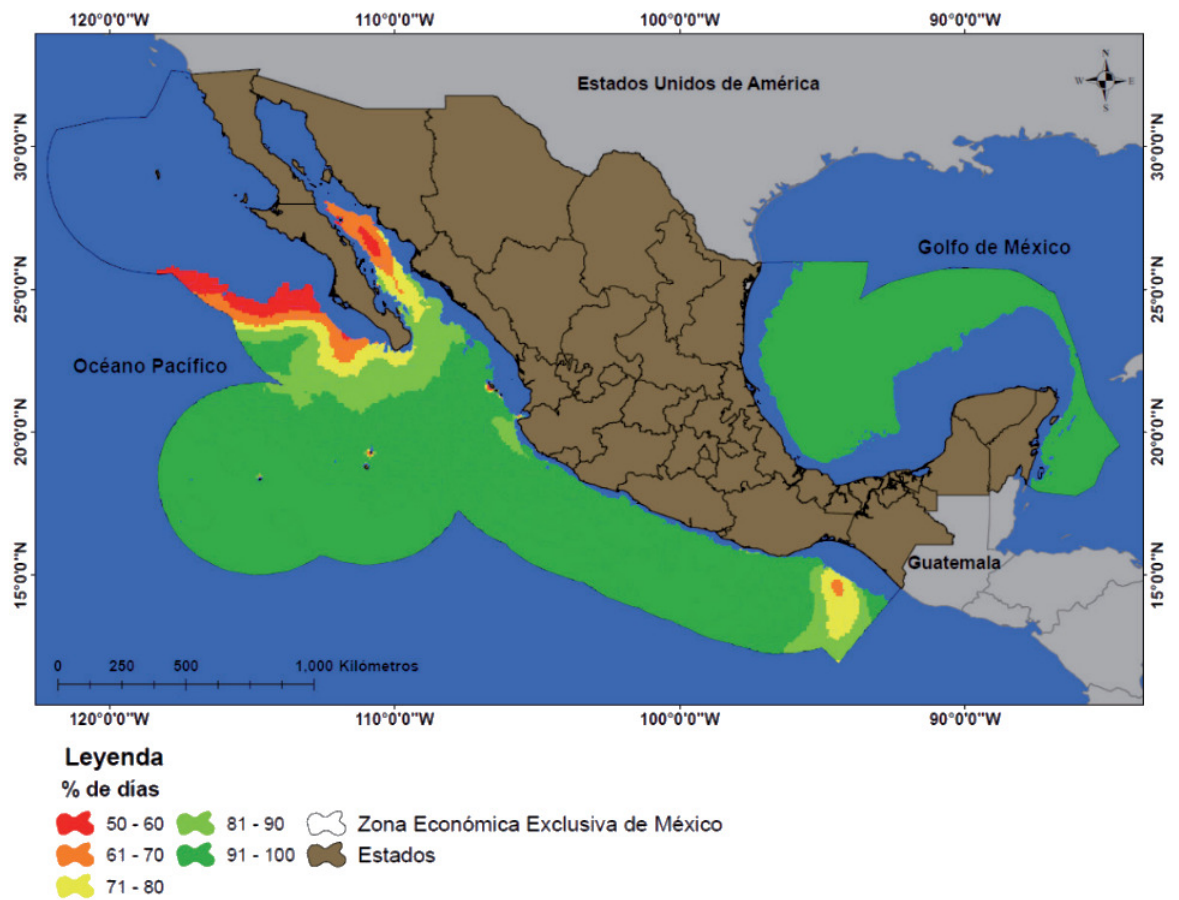


Figura 4.1: Disponibilidad de gradiente térmico superior a 20°C en mares mexicanos.
Adaptada de (9)

Fundamentos Teóricos

En este capítulo se recopila la termodinámica teórica necesaria (contenida en la Sección A.1) para comprender el funcionamiento de la tecnología, así como también aplicaciones diversas del Ciclo Rankine Orgánico, y teoría de oceanografía física.

5.1. Ciclo Rankine Orgánico

Como menciona Rahbar et al. (10), los Ciclos Rankine Orgánicos son análogos a los ciclos Rankine de vapor convencionales con todos sus elementos iguales, con la diferencia de que utilizan fluidos orgánicos como se mencionó previamente, que pueden ser hidrocarburos, refrigerantes, éteres y siloxanos.

Este concepto de los ciclos Rankine que utilizan fluidos orgánicos son más antiguos de lo que parece, ya que la primera patente de este tipo de tecnologías data de 1836 al utilizar éteres como fluido de trabajo (30).

En esencia, el funcionamiento del Ciclo Rankine Orgánico es más simple que el Rankine tradicional, ya que no se necesita una fuente de calor sumamente alta conectada al calentador y un simple intercambiador de calor puede realizar las tres fases del proceso de calentamiento, como lo es el pre-calentamiento, vaporización y sobrecalentamiento (31).

5.1.1. Principio de funcionamiento

Siguiendo el esquema de un ciclo Rankine Orgánico simple de la Figura 5.1 y observando el diagrama temperatura-entropía de la Figura 5.2, el funcionamiento del Ciclo Rankine Orgánico (ORC, por sus siglas en inglés) será el siguiente:

- 1 - 2: El vapor a alta presión del fluido orgánico circula a través de la turbina (expansor) y dicha energía térmica se convierte en energía mecánica y sale de esta como vapor húmedo a baja presión.

5. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

- 2- 3: El vapor húmedo es condensado en el condensador utilizando un medio enfriante (agua o aire).
- 3 - 4: El fluido orgánico a baja presión es presurizado con una bomba.
- 4 - 1: El fluido orgánico es vaporizado en el evaporador utilizando una fuente de calor de desecho de bajo grado.

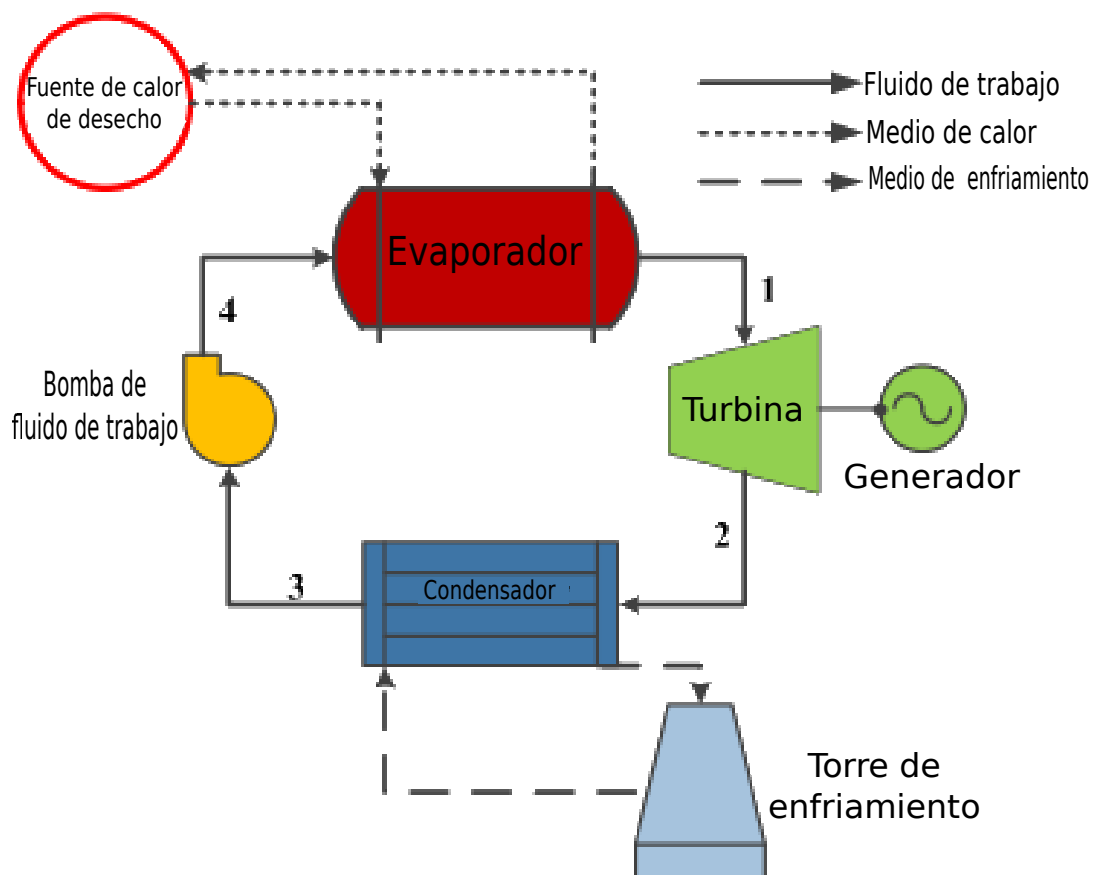


Figura 5.1: Esquema de un Ciclo Rankine Orgánico simple. Adaptada de (10)

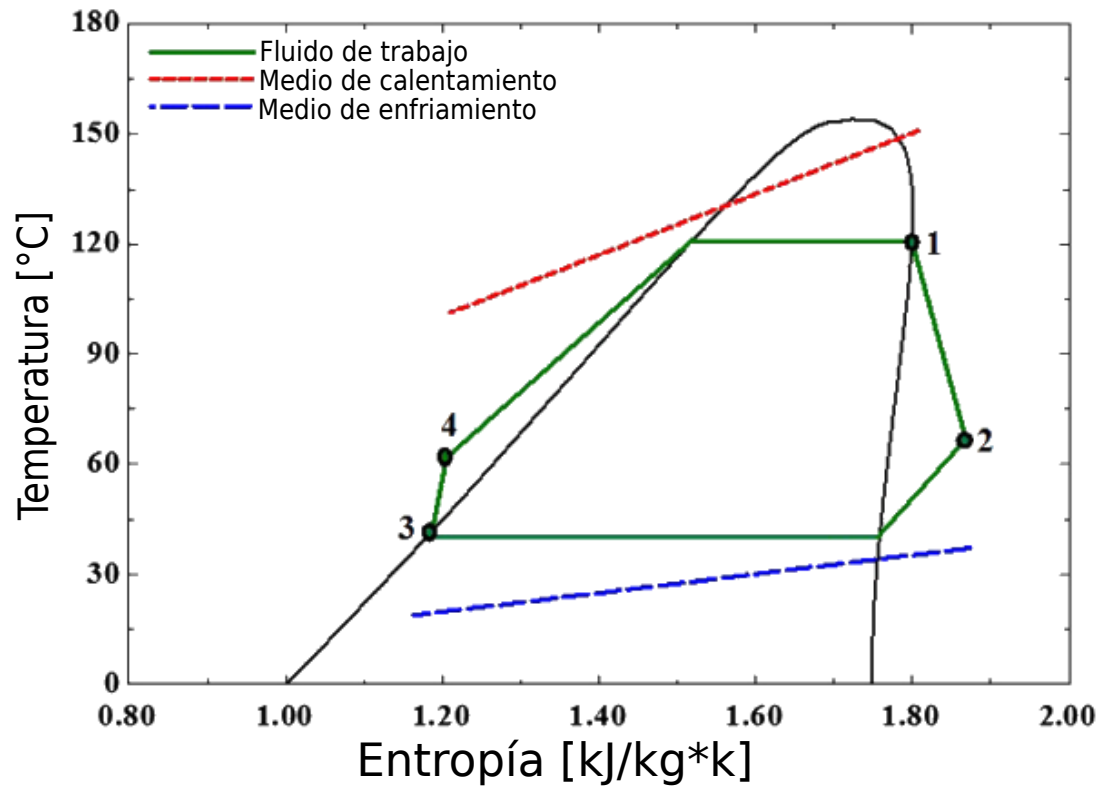


Figura 5.2: Diagrama Temperatura-Entropía de un ciclo Rankine Orgánico simple. Adaptada de (10)

5.1.2. Eficiencias termodinámicas: caso OTEC

5.1.2.1. Eficiencia Térmica

Es la cantidad de calor/potencia que se aprovecha en un ciclo Rankine Orgánico, y para fines de la tecnología de conversión de energía oceánica térmica, según (11) y siguiendo la configuración de ciclo OTEC propuesta por este autor ilustrada en la Figura 5.3, la eficiencia térmica neta se define como:

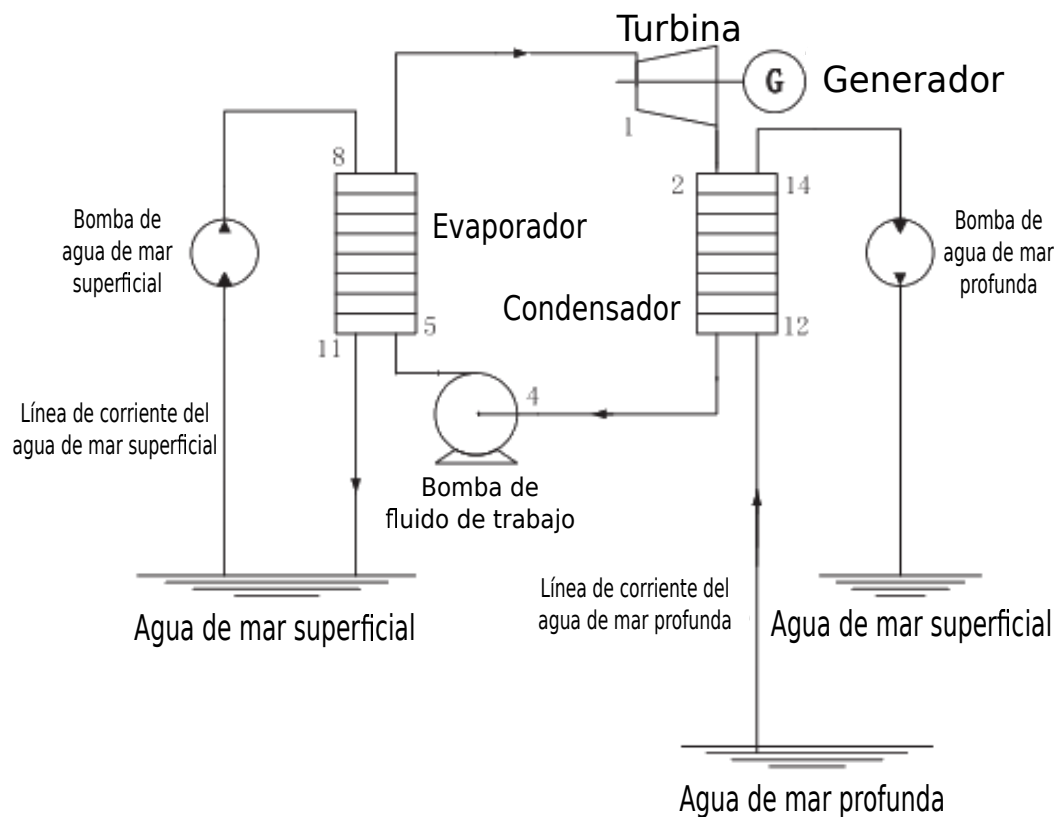


Figura 5.3: Esquema de sistema de conversión de energía oceánica térmica de ciclo cerrado. Adaptada de (11)

$$\eta_{net} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_E} = \frac{\dot{W}_T - \dot{W}_p - \dot{W}_{wsp} - \dot{W}_{csp}}{\dot{Q}_E} \quad (5.1)$$

donde:

\dot{W}_T - Potencia generada por la turbina, kW

\dot{W}_p - Potencia consumida por la bomba del fluido de trabajo, kW

\dot{W}_{wsp} - Potencia consumida por la bomba del agua superficial (agua caliente), kW

\dot{W}_{csp} - Potencia consumida por la bomba de agua profunda (agua fría), kW

\dot{Q}_E - Potencia disipada por el evaporador, kW

5.1.2.2. Eficiencia Exergética

Asimismo, se tiene la eficiencia exergética del ciclo, que en simples palabras se refiere a la máxima eficiencia que se puede alcanzar, considerando irreversibilidades,

cuya ecuación está definida como:

$$\eta_{ex} = 1 - \frac{\dot{\chi}_{out.tot}}{\dot{\chi}_{in.tot}} - \sum_{i=1}^n \frac{\dot{\chi}_{loss.i}}{\dot{\chi}_{in.tot}} \quad (5.2)$$

donde:

$\dot{\chi}_{out.tot}$ - Exergía total a la salida, kW

$\dot{\chi}_{in.tot}$ - Exergía total a la entrada, kW

$\dot{\chi}_{loss.tot}$ - Destrucción total de exergía, kW

5.1.3. Fluidos de trabajo orgánicos

La selección de estos fluidos de trabajo es crucial, ya que de ellos depende la alta eficiencia térmica del ciclo y por consiguiente, maximizar la extracción de calor de la temperatura del agua superficial, menciona Rahbar et al. (10).

Estos fluidos de trabajo contienen componentes con largos pesos moleculares y puntos de presión y ebullición bajos, lo que propicia el uso de este ciclo rankine sin utilizar altas presiones y temperaturas.

Los fluidos de trabajo orgánicos se caracterizan por su pendiente de saturación de vapor como *secos* (pendiente positiva), *isentrópicos* (pendiente igual a cero) y *húmedos* (pendiente negativa). Su diagrama t-s se muestra en la Figura 5.4, siendo los fluidos de trabajo secos e isentrópicos los más adecuados para usar con bajas temperaturas de operación para el ciclo a comparación de los fluidos de trabajo húmedos convencionales; esto se debe a su capacidad de sobrecalentamiento después de la expansión en la turbina, lo que elimina el equipo de calentamiento y todos los riesgos asociados a este.

A continuación se mostrarán algunas propiedades termofísicas a tomar en cuenta para la selección del fluido de trabajo orgánico descritas por Rahbar et al. (10).

- *Calor latente de vaporización*: para este tipo de ciclos, los fluidos orgánicos que poseen un calor latente de vaporización bajo ayudan a que la transferencia de calor dentro del evaporador ocurra de exitosamente para temperaturas variables.
- *Volumen específico*: los fluidos orgánicos con bajo volumen específico son mejores, ya que esto implica una reducción del flujo a través del ciclo, reduciendo así el tamaño del evaporador y la turbina y por lo tanto en la reducción de los costos generales.
- *Temperatura crítica*: para obtener una buena eficiencia en un O.R.C. se necesita que la temperatura crítica de los fluidos orgánicos sea cercana a la máxima temperatura de la fuente de calor.
- *Estabilidad térmica*: se deberá mantener la estabilidad térmica de los fluidos orgánicos, ya que debido a las altas temperaturas y presiones de estos, es posible que surja una descomposición de los mismos, causando corrosión e ignición.

5. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

- *Impactos ambientales*: el fluido orgánico debe seguir las normas de protección ambiental actuales, como tener un Potencial de Destrucción del Ozono (O.D.P., por sus siglas en inglés) igual a cero, un mínimo Potencial de Calentamiento Global (G.W.P., por sus siglas en inglés) y una Vida Atmosférica (A.L.T., por sus siglas en inglés) baja.
- *Seguridad*: procurando la vida de los operarios de la planta y de estos fluidos, se prefiere trabajar con fluidos orgánicos no tóxicos y no inflamables, simplemente por precaución.
- *Peso molecular*: para reducir las etapas de expansión en la turbina, se deberá contar con un largo y basto peso molecular en el fluido de trabajo, ya que esto reduce la caída de entalpía específica y por ende, menores etapas de expansión.
- *Compatibilidad de materiales*: estos fluidos deberán ser amigables con los materiales involucrados en el funcionamiento del ciclo. Estos deberán poseer características no corrosivas ni erosivas. Estas características afectan directamente a los intercambiadores de calor, turbinas, tuberías, entre otros componentes.
- *Costos y disponibilidad*: Es necesario realizar una búsqueda de mercado cuyo objetivo principal sea encontrar fluidos orgánicos de trabajo que cumplan regulaciones ambientales del mercado y legislaciones como la “F-gas regulation”, así como encontrar precios accesibles.

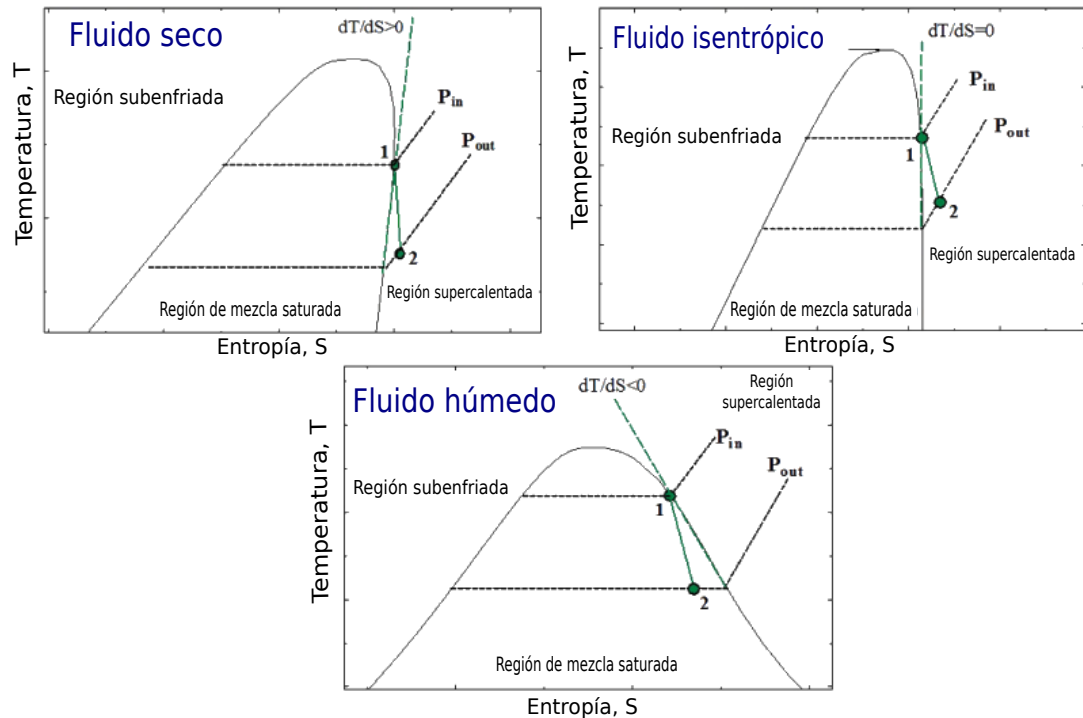


Figura 5.4: Diagrama Temperatura-Entropía para fluidos de trabajo secos, isentrópicos y húmedos. Adaptada de (10)

5.1.4. Aplicaciones del Ciclo Rankine Orgánico

5.1.4.1. Biomasa

Esta fuente de energía renovable es la cuarta mayor fuente de energía y satisface el 10% de la demanda energética mundial según IEA (32). Asimismo, esta fuente de energía se puede procesar mediante diferentes técnicas como la combustión para producir electricidad utilizando ciclos Rankine Orgánicos. La mayoría de estos ciclos Rankine Orgánicos aplicado a la biomasa son ciclos binarios. Dichos ciclos se ejemplifican en la Figura 5.5.

5. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

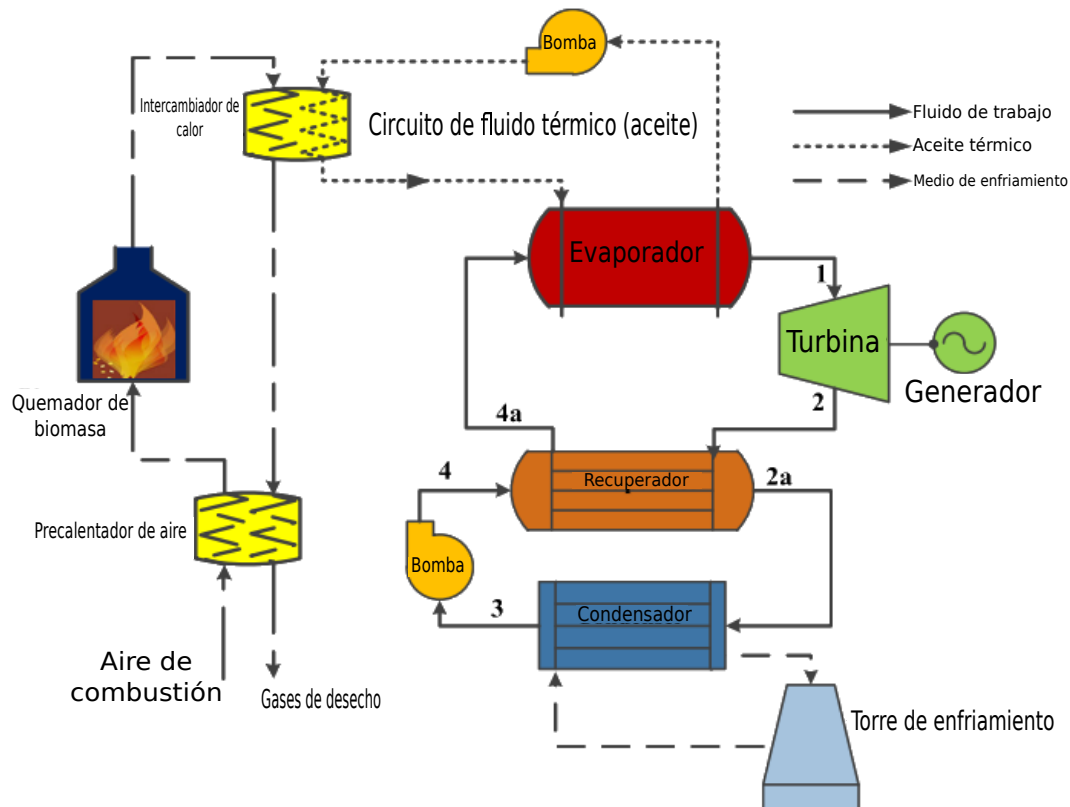


Figura 5.5: Esquema de un ciclo Rankine Orgánico aplicado a un sistema de biomasa de ciclo binario. Adaptada de (10)

La forma en la que esto es posible refiere al uso de un quemador de toda esta materia orgánica con poder suficiente para realizar combustión (biomasa). En éste se realiza la combustión de la biomasa, haciendo pasar el calor producido hacia el “fluido de transferencia de calor (aceite térmico)”. Posteriormente, este fluido antes mencionado es dirigido al evaporador del ciclo que servirá para vaporizar el fluido orgánico de trabajo.

El uso de un medio intermedio de calentamiento (aceite térmico) tiene ventajas como lo es la presión baja en el evaporador, control seguro, operación, entre otras ventajas para el ciclo.

El autor menciona de igual manera que la eficiencia del Ciclo Rankine Orgánico depende de elementos como las condiciones en las que se trabaja, los fluidos de trabajo, la alta temperatura que será utilizada en la caldera para las reacciones en la biomasa, entre otras cosas.

5.1.4.2. Energía solar

La energía solar, específicamente hablando de la concentración solar, es una energía viable, sin contaminaciones en el proceso de producción y es viable debido a la densidad energética que nos entrega el sol, y es que según su revisión, el sol en una hora ofrece la misma cantidad energética que la cantidad consumida mundialmente en el año 2001 (aproximadamente $(430 \times 10^{20} \text{J})$) (10).

En este caso, la combinación de un ORC y la energía solar tiene sentido cuando hablamos de concentradores solares, ya que este ciclo orgánico es viable cuando se tiene un desecho de calor como en los colectores de sistemas en pequeña escala.

La Figura 5.6 muestra el proceso por el cual esta tecnología se lleva a cabo que, al igual que el caso de la biomasa, aquí también se utiliza un fluido de trabajo intermedio como lo es el aceite térmico; sólo que, para este caso, primero se calienta el fluido mediante los colectores solares que recirculan a través de estos mediante bombas, y luego este fluido ya calentado entra en contacto en el evaporador junto con el fluido de trabajo orgánico.

Se descubrió mediante ciertos experimentos, que los fluidos secos requieren un área de apertura menor excepto por el amoníaco, consiguiendo la menor apertura solar con un colector de tubos evacuados utilizando el vapor directo con una irradiancia solar de $1000 \text{W}/\text{m}^2$

5. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

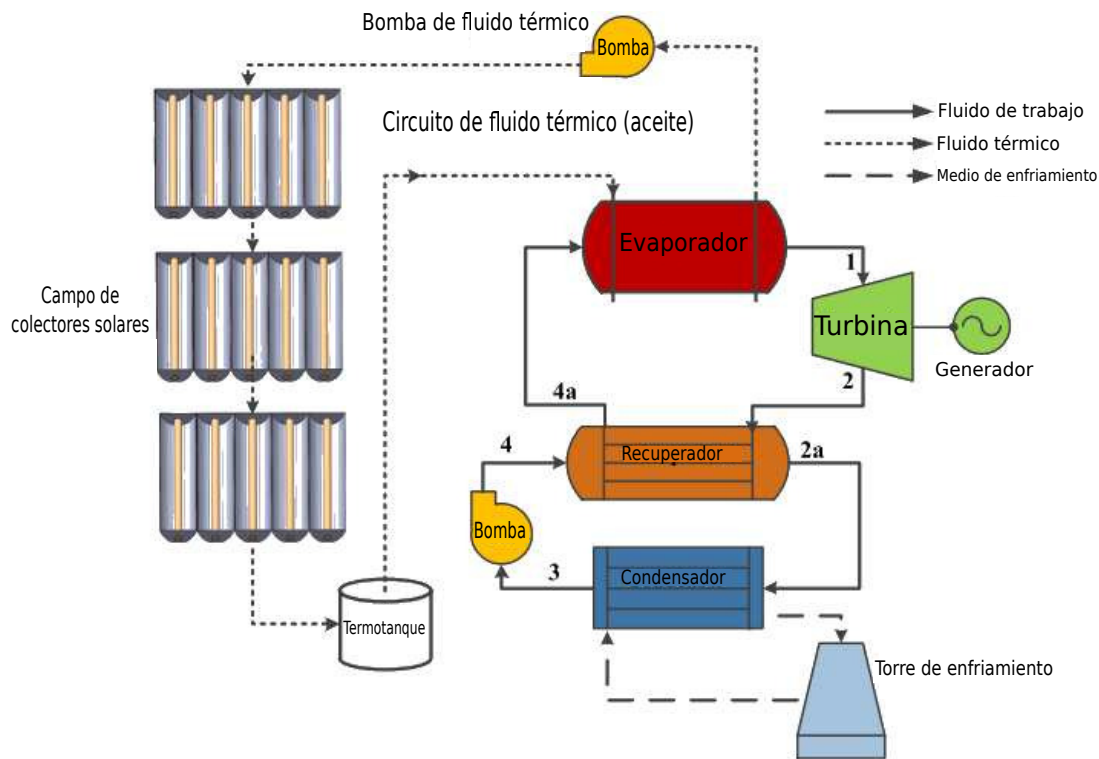


Figura 5.6: Esquema de una planta solar con un Ciclo Rankine Orgánico. Adaptada de (10)

5.1.4.3. Geotermia

El calor en las capas más internas de la Tierra sirve para calentamiento de espacios o refrigeración (usos directos de la geotermia), o para la generación de electricidad que es su uso más común. Si bien, se puede utilizar la geotermia en casi cualquier parte del planeta en cuanto a usos directos refiere; pero para la cuestión de generación de electricidad se necesitan sitios específicos en donde se tenga un gradiente geotérmico anómalo; es decir, más grande de lo normal para poder aprovechar de esta manera. Es por esto que el uso de este tipo de ciclos orgánicos son una buena alternativa para aprovechar de una mejor manera toda la energía posible en forma de calor.

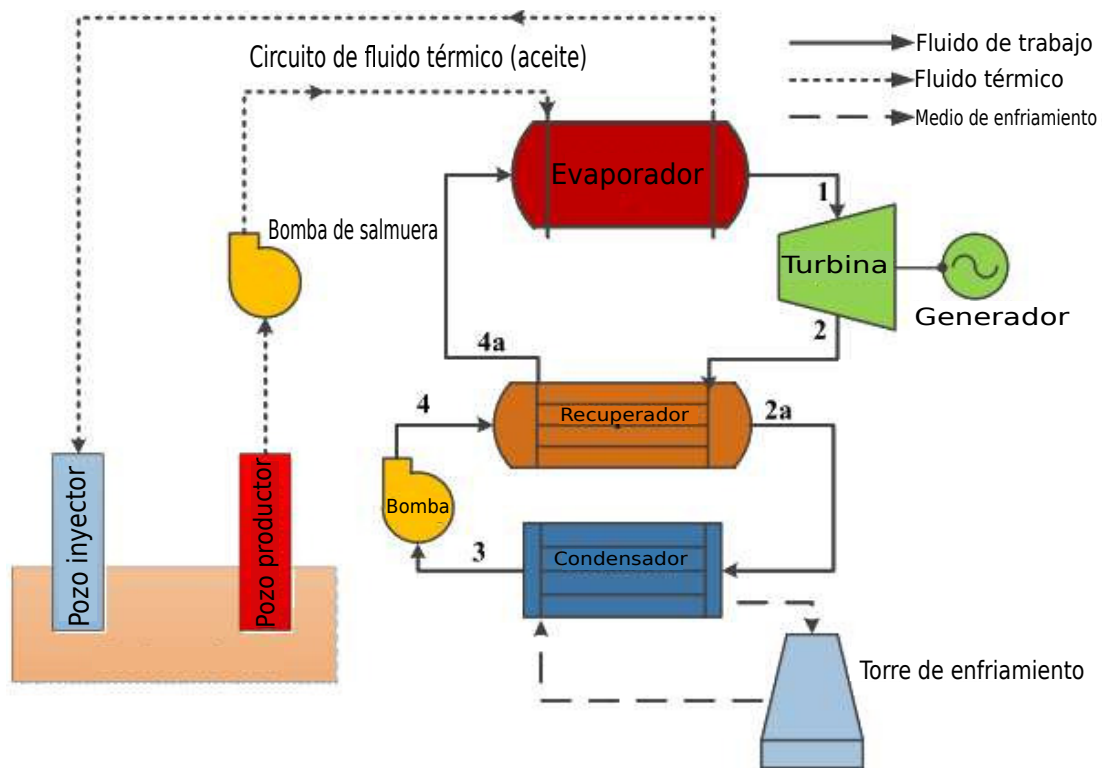


Figura 5.7: Esquema de una planta geotérmica de ciclo binario con un Ciclo Rankine Orgánico. Adaptada de (10)

5.2. Oceanografía Física

Se debe tener un conocimiento previo de la oceanografía física; para este trabajo en particular, de la distribución térmica de los océanos, ya que de esta manera se podrá explicar de manera fundamentada el por qué de las variaciones de temperatura en ciertas regiones del mundo, como lo es la zona de México, que, según Talley et al. (12) (autor en el que se basará esta sección), comprende la región tropical en cuestión de climas y mares.

Básicamente, las propiedades del agua en el mar como la temperatura, densidad, salinidad entre otras, comienzan teniendo su valor inicial en la superficie del mar, y conforme avanza en lo profundo de este, se tienen procesos en los cuales cambian sus propiedades o parámetros. A esto se le conoce como *ventilación*, teniendo que el flujo en el interior del océano es casi adiabático debido a la estratificación vertical en densidades.

Las variaciones de las propiedades del agua son distintas en dirección vertical y en dirección horizontal. Un ejemplo claro de esto, es que cerca del Ecuador existen caídas de temperatura del agua de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ en una distancia de 1 km, mientras que si se quiere lograr el mismo gradiente de temperatura llenando de Norte a Sur, se debe recorrer

5. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

una distancia de aproximadamente 5000 km, lo cual es excesivo. Las variaciones más significativas en cuanto a propiedades oceanográficas y atmosféricas se dan en dirección *meridional* (Norte-Sur), y las que son más uniformes, se realizan de manera *zonal*.

De esta manera, se puede observar que, como se mencionó hace un momento, dentro de la zona de los trópicos (23°S - 23°N) es en donde se da un calentamiento de la superficie del mar más intenso; es por esta razón, entre otras, que la mayoría de las aguas nacionales son propensas para explotar la energía oceánica por gradiente térmico, debido a la zona tropical y a estos fenómenos de transferencia de calor.

5.2.1. Distribución térmica de los océanos

Las fuerzas relacionadas a la atmósfera y al Sol sobre la superficie, crean un patrón general específico de la temperatura superficial (12); esto quiere decir que las variables más complejas de esta temperatura, se dan debido a la circulación oceánica y las variaciones espaciales de las fuerzas atmosféricas.

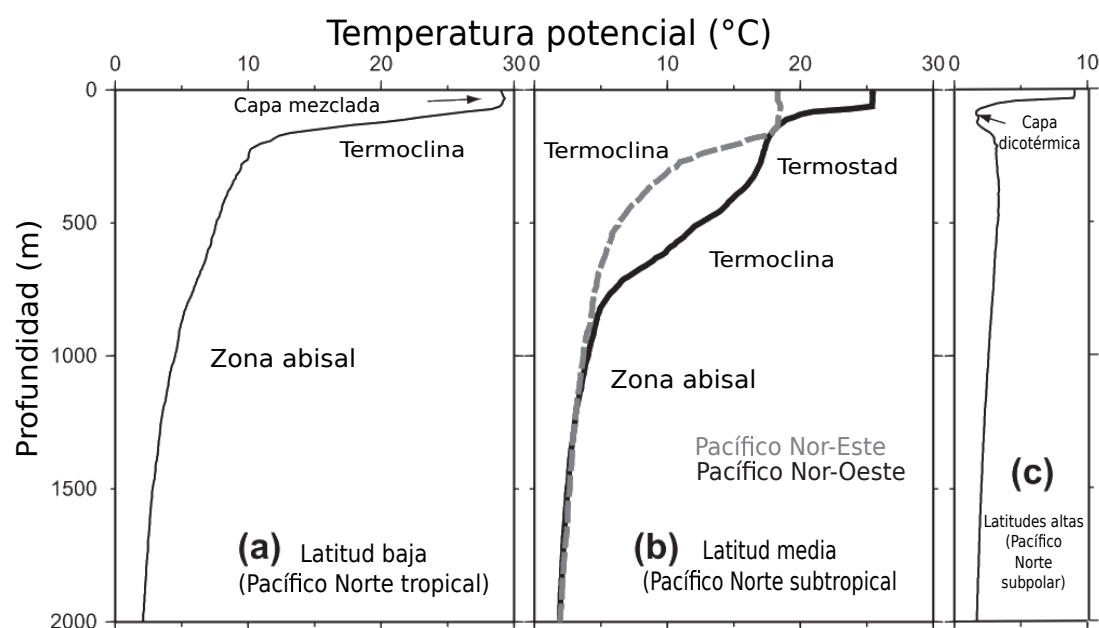


Figura 5.8: Distribución típica de temperatura potencial $\frac{^{\circ}C}{m}$. (a) Lado Noroeste del Pacífico (5°N). (b) Noreste y Noroeste del Pacífico (24°N). (c) Región subpolar Noroeste (47°N).

Adaptada de (12)

En la Figura 5.8 se ejemplifica el perfil del potencial de temperatura típico en bajas y medianas latitudes (desde Ecuatoriales hasta subtropicales). Este perfil se comprende de tres zonas:

- *Capa mixta*: esta capa junto con la termoclina, se pueden considerar como “capas

superficiales”, y en particular esta primera se reconoce por tener propiedades mixtas bien definidas. Estas capas son mezcladas por el viento y las fuerzas que existen en la interfaz aire-superficie.

- *Termoclina*: se caracteriza esta zona principalmente por poseer un cambio brusco vertical de temperatura con una profundidad de 1000m aproximadamente.
- *Capa Abisal*: en esta capa, la temperatura decae más lento.

En el transcurso de esta sección se detallará de mejor manera la clasificación anterior.

Es conveniente recalcar que en latitudes altas en donde la temperatura superficial del mar es baja, las capas de la Figura anterior difieren en orden y en magnitud de la temperatura a lo largo del perfil.

Las temperaturas típicas que se pueden encontrar en latitudes de las regiones subtropicales varían de 20 °C en la superficie, 8 °C a 500 m, 5 °C a 1000 m y de 1 a 2 grados centígrados a 4000 m aproximadamente; aunque en zonas anómalas, temperaturas más bajas se pueden encontrar a mayores profundidades.

En regiones subpolares (latitudes altas) en donde existen altas precipitaciones, la salinidad se vuelve una propiedad con mayor importancia que la temperatura misma para definir la estructura vertical de densidad, mayormente de manera vertical en la que esta columna de agua debe ser estable.

En cuestión de temperatura superficial, se obtiene una distribución “zonal”, lo que significa que las isotermas van de Este a Oeste; siendo en los límites del lado Este que la temperatura superficial es menor debido al ascenso de temperatura fría de la subsuperficie.

Esta temperatura superficial decrece de 28 °C al Norte del Ecuador hasta -1.5 °C en los océanos de hielo en altas latitudes, ya que la radiación de onda corta es mayor en los trópicos y menor en latitudes altas (regiones subpolares y polares). Lo anterior se ejemplifica de mejor manera en la Figura 5.9

Los conceptos de “alberca caliente” y “lengua fría” cobran sentido al saber que el primero refiere a las zonas con mayores temperaturas superficiales y se presenta en las regiones del Pacífico oeste tropical; mientras que el segundo es un “pasaje” estrecho de agua a menor temperatura a través del Ecuador, siendo la razón de esta temperatura menor el que la termoclina es más superficial del lado Este, y esta sube y provoca temperaturas menores en la superficie para estas regiones. Es por esta razón que las regiones con temperaturas altas se dan del lado Oeste al Ecuador, en cada uno de los océanos.

Las capas ligeramente profundas a la superficie no se extienden más allá de los 150 m de profundidad y los perfiles verticales de temperatura no presentan un comportamiento muy grueso ni muy mezclado uniforme de temperatura, salinidad o densidad.

El desarrollo de estas capas mezcladas se ve afectado por la turbulencia que se provoca en la superficie y las olas internas generadas por el viento, y decrecen conforme se es más profundo. Esto tiene sentido ya que a mayor profundidad, las consecuencias

5. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

de las fuerzas de fricción que rozan la superficie van teniendo menor efecto a mayores profundidades.

En zonas más profundas por debajo de la superficie, comienza una zona en donde existe un decaimiento rápido de la temperatura con respecto a la profundidad; por tanto, la zona en la que existe un gradiente vertical de temperatura mayor se llama *termoclina*, y usualmente se encuentra entre los 200 m y 1000 m de profundidad en latitudes bajas a medianas con respecto al Ecuador.

Esta zona vertical se desarrolla por procesos en donde la transferencia de calor baja de la superficie y vuelve a subir a esta desde la termoclina. La temperatura baja en esta capa se alimenta continuamente del mar superficial en latitudes mayores (principalmente en el Atlántico Norte y en Groelandia),

Por debajo de la termoclina se encuentra la región *abisal*, en la que la temperatura decrece lentamente al acercarse a la profundidad, siendo en el fondo marino en donde la temperatura incrementa casi por completo debido a las altas presiones que comprimen el agua, produciendo un incremento de temperatura adiabático.

Se recomienda usar el valor de la temperatura potencial θ para comprender cuál era la temperatura del agua al estar cerca de la superficie, y esta suele incrementar en corta medida debido al calentamiento geotérmico en esta capa gruesa, decreciendo hacia el fondo marino casi en cualquier lado.

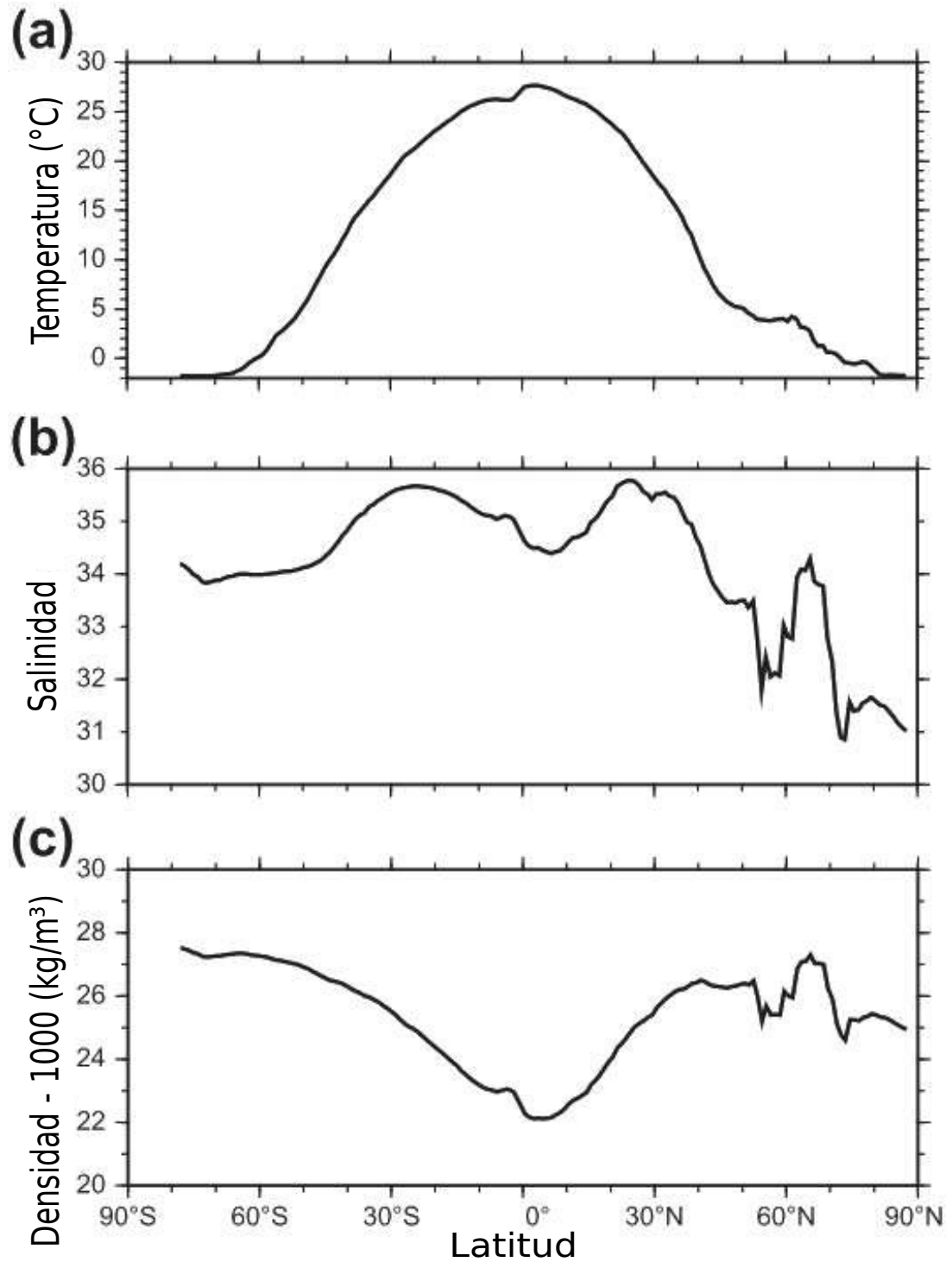


Figura 5.9: Variación superficial con respecto a la latitud de (a) temperatura, (b) salinidad y (c) densidad promedio para todos los océanos en invierno. Adaptada de (12)

6.1. Fuente de datos

Es necesario comprender la necesidad de capturar datos confiables y legibles al momento de ser procesados para el analista de dichos datos, y eso en gran medida depende de la manera en la que se almacenan estos. Muchas veces existen ausencias de estos datos para ciertas regiones y en ocasiones la lectura de los datos o incluso su representación gráfica resulta muy difícil.

6.1.1. Formato de datos tipo *netCDF*

Es por esto y por otras razones que los datos de tipo climatológico suelen almacenarse en un formato/extensión de archivos llamado *netCDF* o *.nc*, que, como se había mencionado en las primeras secciones, es un tipo de archivo que se utiliza mayormente por la comunidad científica para mostrar arreglos de ciertas variables desde una dimensión (por ejemplo, la variación de la temperatura con respecto al tiempo) hasta arreglos de cuatro dimensiones en los que se tiene que la temperatura es dependiente de la variación del área (longitud y latitud), del tiempo y de la altura para la que es calculada dicha temperatura (13).

6. METODOLOGÍA

```
netcdf nombre_de_archivo.nc {
dimensiones:
  lat = 3;
  lon = 4;
  time = UNLIMITED; // (2 actualmente)

variables:
  float lat(lat);
    lat:nombre_variable = "Latitud";
    lat:unidades = "grados_norte";
  float lon(lon);
    lon:nombre_variable = "Longitud";
    lon:unidades = "grados_este";
  int tiempo(tiempo);
    tiempo:nombre_variable = "Tiempo";
    tiempo:unidades = "días desde 1895-01-01";
    tiempo:calendario = "gregoriano";
  float lluvia(tiempo, lat, lon);
    lluvia:nombre_variable = "Precipitación";
    lluvia:unidades = "mm yr-1";
    lluvia:valor_valtante = -9999.f;

// atributos globales:
  :titulo = "Escenarios climáticos históricos";
  :convenciones = "CF-1.0";

datos:
  lat = 48.75, 48.25, 47.75;
  lon = -124.25, -123.75, -123.25, -122.75;
  tiempo = 364, 730;
  lluvia =
    761, 1265, 2184, 1812, 1405, 688, 366, 269, 328, 455, 524, 877,
    1019, 714, 865, 697, 927, 926, 1452, 626, 275, 221, 196, 223;
}
```

Figura 6.1: Descripción del formato tipo netCDF utilizando notación de la red común de lenguaje de trabajo (CDL, por sus siglas en Inglés). Adaptada de (13).

Este tipo de archivos contienen dimensiones, variables y atributos, que en conjunto sirven para dar información detallada de la variable que se quiere medir y de las coordenadas que tiene. En la Figura 6.1 se muestra la estructura de un archivo de este tipo mediante la notación CDL indicada los mismos.

Las dimensiones de estos archivos son útiles para representar dimensiones reales como el tiempo, la latitud y la longitud, y de igual manera sirve para indexar otras cantidades como lo son el número de estación o el modelo de esta; teniendo en cuenta esto, las variables pueden poseer el título *ilimitado*, lo que indica que una variable puede tener un crecimiento de cualquier longitud para dicha dimensión.

Las variables en este tipo de archivos básicamente son arreglos que tienen valores del mismo tipo de dato (entero, flotante), y estos contienen el nombre, el tipo de dato y la forma (longitudes de cada dimensión) de ese arreglo. Cada variable puede tener atributos que se pueden agregar, borrar o cambiar después de crear la variable.

Los atributos son utilizados para proveer de metadatos a las variables y así tener más información. Un atributo puede ser el nombre de la estación meteorológica de la que se tomó la variable o incluso notas sobre los posibles valores faltantes; mientras que los atributos globales son aquellos que dan una descripción definitiva de todo el archivo netCDF.

6.1.2. Modelo Híbrido Coordinado Oceánico (HYCOM, por su siglas en Inglés)

Como ya se ha descrito brevemente en secciones anteriores, la base de datos empleada en este estudio, es la que se detalla en HYCOM (14).

Este es un modelo general de circulación oceánica con ecuaciones primitivas que evolucionó del “Modelo Isopícnico Coordinado Oceánico” (MICOM, por sus siglas en Inglés), cuyo uso fue extenso en su tiempo y fue sujeto a estudios de validación (33).

El modelo HYCOM se realizó para suplir ciertas fallas conocidas del modelo MICOM; una de esas fallas era que las coordenadas verticales eran isopícnicas (densidad constante) excepto de la capa 1.

Tabla 6.1: Características de la base de datos utilizada para este estudio

Atributo	Valor
Título de la base de datos	HYCOM GLBu0.08
Resolución espacial	1/12° ($\approx 0.08^\circ$)
Resolución temporal	1 día
Profundidades de estudio	0 m (superficie) 1000 m (profundidad)
Institución proveedora de datos	Laboratorio de Investigación Naval (NRL, por sus siglas en inglés)
Rango temporal	2013-08-17 – 2018-09-24
Dominio computacional	Resolución de 1/12°. De 80.48°S a 80.48°N
Coordenadas del área de estudio	(118.4°W – 86.56°W), (14.4°N – 32.56°N)

Para este trabajo se empleó una de las bases de datos integradas en el modelo HYCOM, denominada GOFS 3.0 mediante predicciones oceánicas que corren diariamente en el Centro de Supercómputo del Departamento de Defensa Naval de los Estados Unidos de América (EUA) con una extensión de archivos *.nc* o *netCDF*

Las características de la base de datos empleada se muestran en la Tabla 6.1

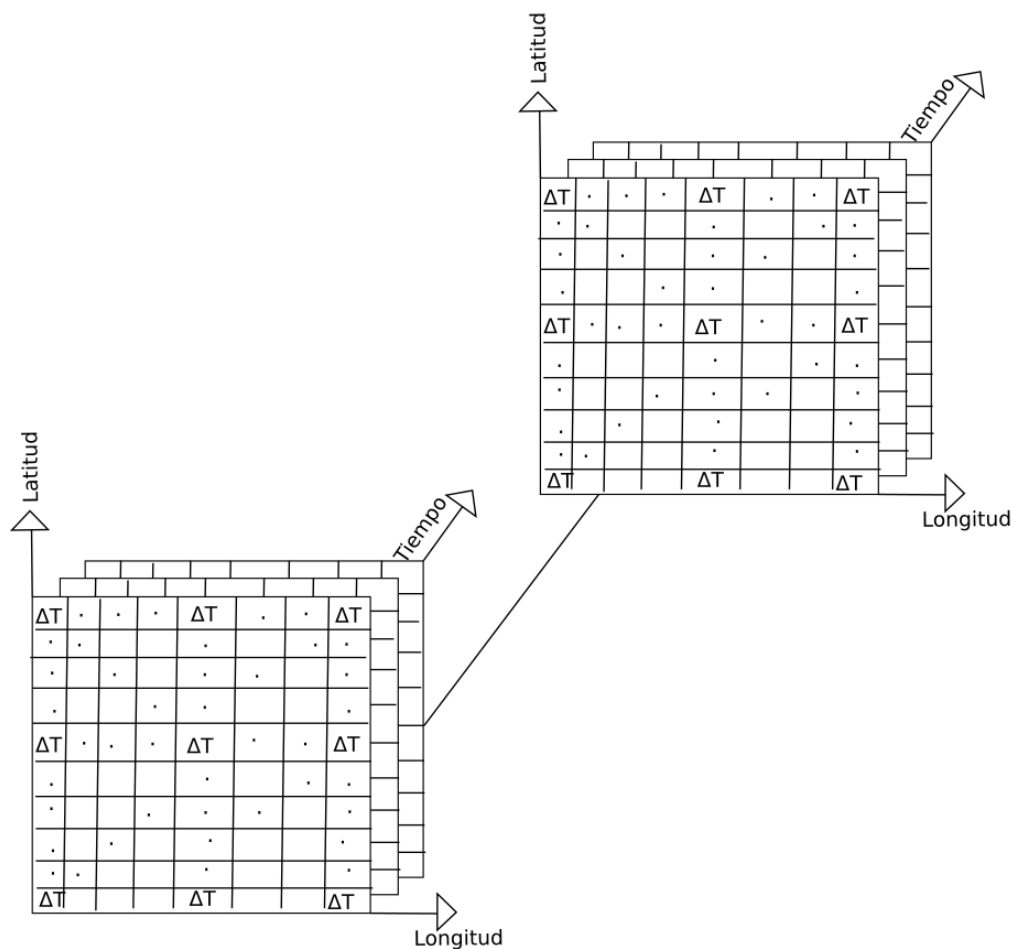


Figura 6.2: Estructura de la base de gradiente térmico obtenida mediante (14) utilizada para este trabajo.

Para fines de entendimiento de los datos que se obtienen como extensión *.nc*, la Figura 6.2 muestra que los datos de gradiente de temperatura se visualizan en el plano de la longitud vs latitud que a su vez es dependiente del tiempo en una dimensión w en diagonal.

En palabras más sencillas, para poder obtener un valor puntual de gradiente de temperatura, se debe indicar la posición geográfica (longitud, latitud), la profundidad (cada archivo posee una profundidad única: 0m ó 1000m) y el tiempo para ese valor de gradiente de temperatura.

6.1.3. Procesamiento de los datos

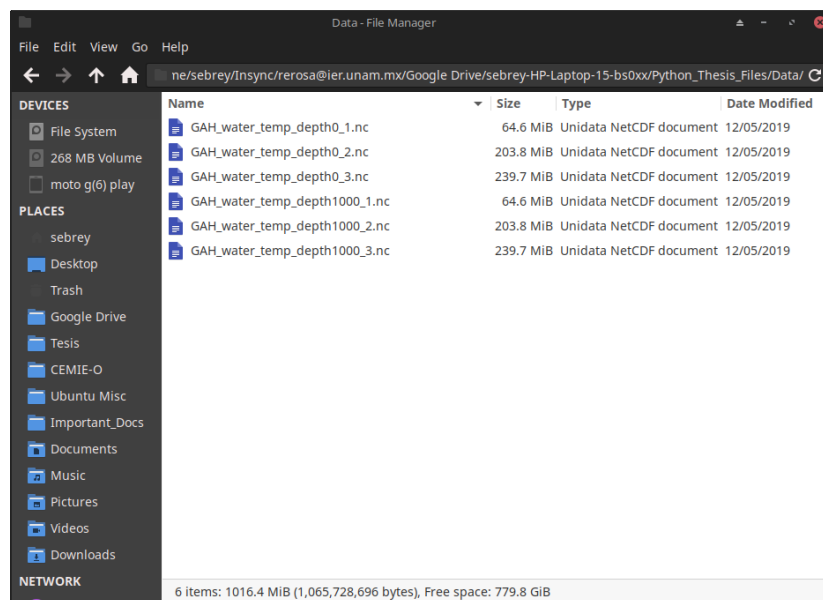


Figura 6.3: Archivos de gradiente temperatura obtenidos mediante (14). Los archivos con terminación 0_X.nc corresponden a aquellos con valor de gradiente térmico superficial, mientras que la terminación 1000_X.nc indica valores para 1000 m de profundidad.

NOTA:

Subíndice 1: indica datos para un rango temporal entre el 17 de agosto de 2013 al 8 de abril de 2014

Subíndice 2: indica datos para un rango temporal entre el 7 de abril de 2014 al 18 de abril de 2016

Subíndice 2: indica datos para un rango temporal entre el 18 de abril de 2016 al 24 de septiembre de 2018

Los archivos de la Figura 6.3 se procesaron en el ambiente de desarrollo integrado para Python (IDE), PyCharm mediante el atributo *open_mfdataset* contenido en la paquetería *xarray* para procesar este tipo de datos y convertirlos en una base de datos (de la forma de la Tabla 6.2) al estilo de la librería *pandas* y obtener un mejor manejo de los datos. Cabe mencionar que, debido al tamaño extensivo de los datos se tuvo que partir dicha tabla anualmente; es decir, se obtuvo una base de datos por cada uno de los 5 años de datos para después integrarlas mediante la librería *glob* y *pandas*.

Paralelamente a todo este trabajo realizado, se graficaron los gradientes de temperatura en un mapa de la República Mexicana para la superficie oceánica y a una

6. METODOLOGÍA

profundidad de 1000 m en las Figuras 6.4 y 6.5 respectivamente. Estos mapas fueron realizados mediante la librería *Basemap* de Python, y se escogió el 05 de septiembre de 2015 como valor temporal para acceder a la variable del gradiente térmico.

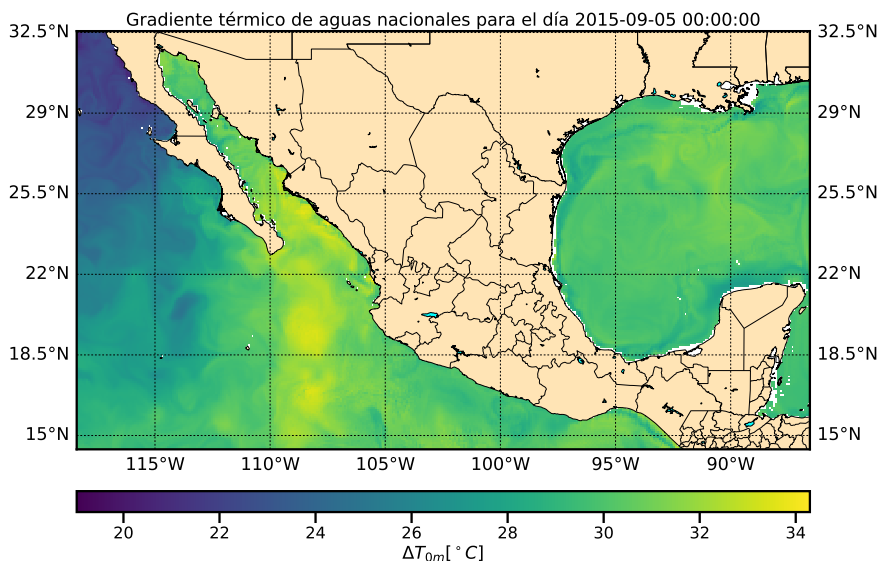


Figura 6.4: Temperatura superficial para costas y mares de la República Mexicana para el 05 de septiembre de 2015.

Se puede observar que en la Figura 6.5 son apreciables menos datos que para la Figura anterior, y esto se debe a que no en todos los sitios de los mares de México se encuentra una profundidad de 1000 m, y por ende, no existe este valor de temperatura para esas posiciones geográficas.

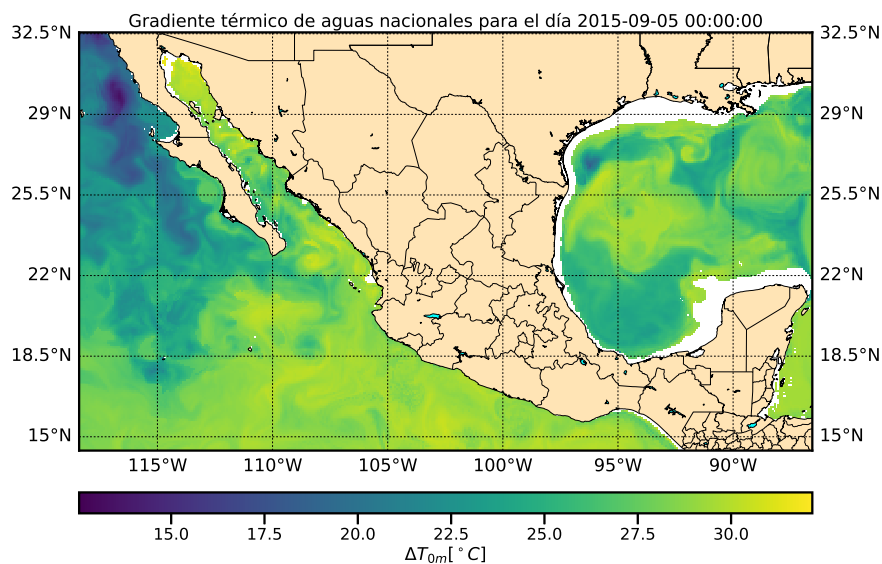


Figura 6.5: Gradiente de temperatura a 1000m con respecto a la superficie marina para costas y mares de la República Mexicana para el 05 de septiembre de 2015.

Tabla 6.2: Estructura de la base de datos procesada a partir de los archivos de la Figura 6.3 mediante la librería de python *xarray*. El valor de gradiente de temperatura $\Delta T_{Lon_x Lat_x} [^{\circ}C]$ está calculado como la diferencia entre la temperatura superficial menos la temperatura a 1000 m de profundidad.

Lon [°W]	Lat [°N]	2013-08-17	2013-08-18	2013-08-19	...	2018-09-24
Lon ₁	Lat ₁	$\Delta T_{Lon_1 Lat_1 2013-08-17}$	$\Delta T_{Lon_1 Lat_1 2013-08-18}$	$\Delta T_{Lon_1 Lat_1 2013-08-19}$...	$\Delta T_{Lon_1 Lat_1 2018-09-24}$
Lon ₂	Lat ₂	$\Delta T_{Lon_2 Lat_2 2013-08-17}$	$\Delta T_{Lon_2 Lat_2 2013-08-18}$	$\Delta T_{Lon_2 Lat_2 2013-08-19}$...	$\Delta T_{Lon_2 Lat_2 2018-09-24}$
Lon ₃	Lat ₃	$\Delta T_{Lon_3 Lat_3 2013-08-17}$	$\Delta T_{Lon_3 Lat_3 2013-08-18}$	$\Delta T_{Lon_3 Lat_3 2013-08-19}$...	$\Delta T_{Lon_3 Lat_3 2018-09-24}$
...
Lon _M	Lat _M	$\Delta T_{Lon_M Lat_M 2013-08-17}$	$\Delta T_{Lon_M Lat_M 2013-08-18}$	$\Delta T_{Lon_M Lat_M 2013-08-19}$...	$\Delta T_{Lon_M Lat_M 2018-09-24}$

6.1.3.1. Limpieza de datos

Se utilizó la herramienta de información geográfica *QGIS 2.18* (34) para recortar todos los datos de los océanos del país a una distancia de 10 km de la línea de costas mexicanas dentro de la Zona Económica Exclusiva del país.

6. METODOLOGÍA

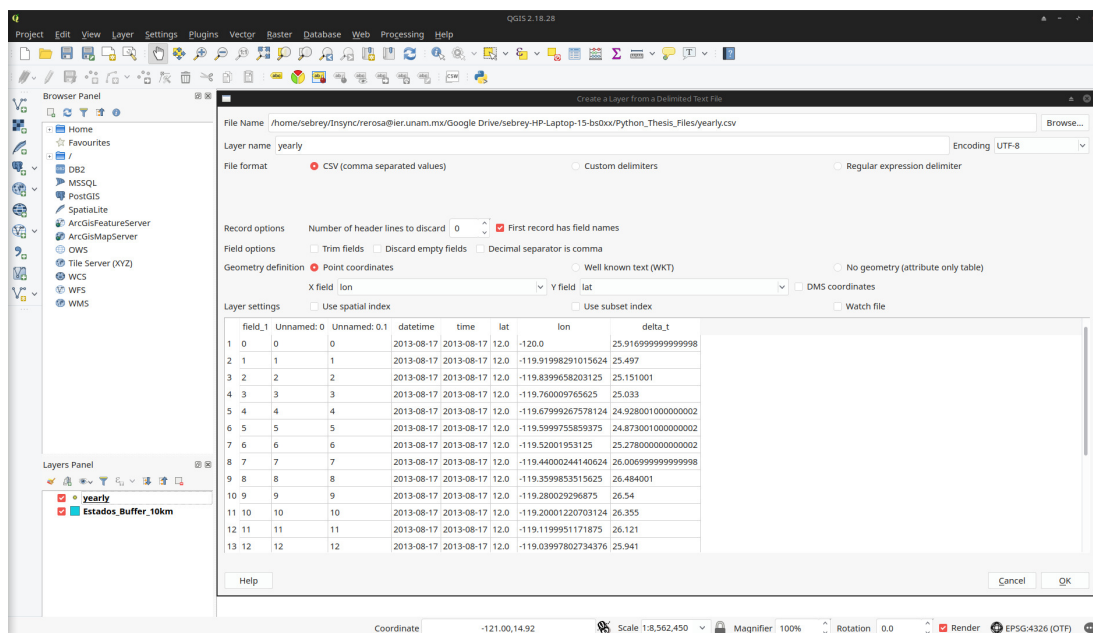


Figura 6.6: Selección de la capa de puntos en formato csv con los datos de gradiente térmico de toda la República Mexicana.

El primer archivo que se debe importar será una capa de puntos con extensión .shp que funcionará como nuestra capa delimitadora de la franja de los 10 kilómetros dentro de la Zona Económica Exclusiva de México (ZEEM). La creación de esta capa se resume en los siguientes puntos que se utilizaron en *QGIS 3.4 Madeira* (35)

1. Se importa una capa tipo .shp, la cual en este caso será la República Mexicana.
2. Se abre la herramienta búfer dentro de la pestaña “Vectorial” → “Geoprocesos” → “Búfer”.
3. Se selecciona la distancia del área de influencia; para el caso de este estudio se seleccionarán 10km.
4. Se selecciona el tipo de límite; si será plano, redondeado, polígonos, etc. Para el caso de este estudio serán redondeados.
5. Se da el botón “Run” o “Iniciar”.

Ya creada esta capa del área de influencia a 10km de la línea de costa, se ingresará el archivo .csv con todos los datos de gradiente térmico junto con sus respectivas coordenadas de la forma como se muestra en la Figura 6.6 mediante la herramienta relacionada con la adición de archivos de valores separados por comas.

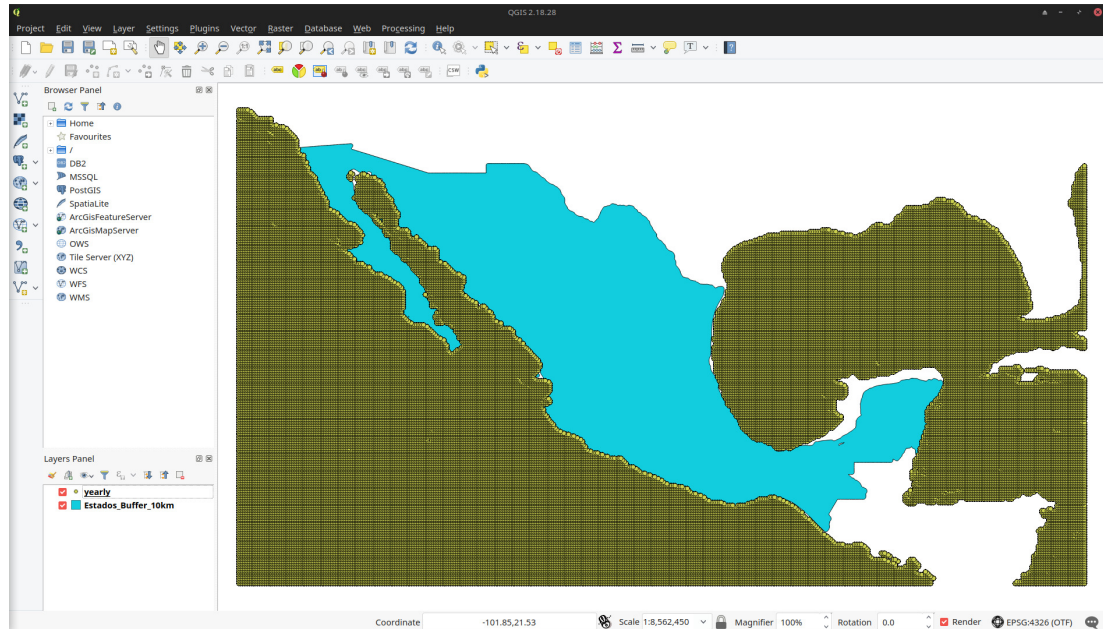


Figura 6.7: Visualización de todos los puntos con una resolución de $1/12^\circ$ para los datos de gradiente térmico de los océanos de la República Mexicana.

La visualización de todos los puntos de gradiente de temperatura cada $1/12^\circ$ serán mediante la representación de la Figura 6.7. Esta figura muestra todos los datos recabados de gradiente térmico de los océanos del país, cuyo límite para este trabajo será únicamente los datos que estén cercanos a la costa debido a que esta tecnología de energía oceánica por gradiente térmico requiere de tuberías y conexiones tanto para el sistema termodinámico como para el sistema de interconexión a la red, por lo que estos cables y tuberías no deberán exceder un máximo de longitud específico debido a los costos que esto implicaría, y en cuanto a las tuberías para el sistema termodinámico, mientras más largas puedan ser, mayores pérdidas de calor se pueden presentar.

6. METODOLOGÍA

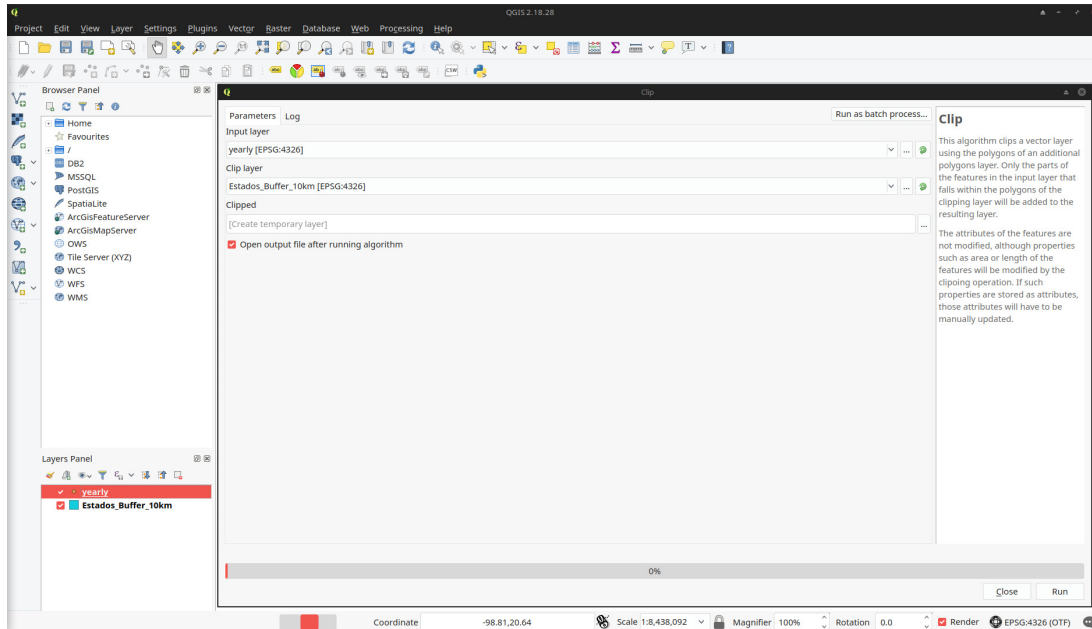


Figura 6.8: Herramienta de corte para reducir todos los puntos de gradiente térmico de los océanos de México a únicamente una zona de 10km de profundidad lo más cercano a la costa posible.

El proceso de recorte de la capa de puntos de nuestro archivo, con todos los datos de gradiente térmico con la capa a 10 km de distancia a partir de la línea de costa, se puede apreciar en la Figura 6.8. En este proceso, se abre primero la capa de puntos mediante el archivo .csv que son todos los datos de gradiente térmico, y como capa de base o la que se recortará será la capa con extensión .shp que contiene los 10 km de distancia con respecto a la línea de costa.

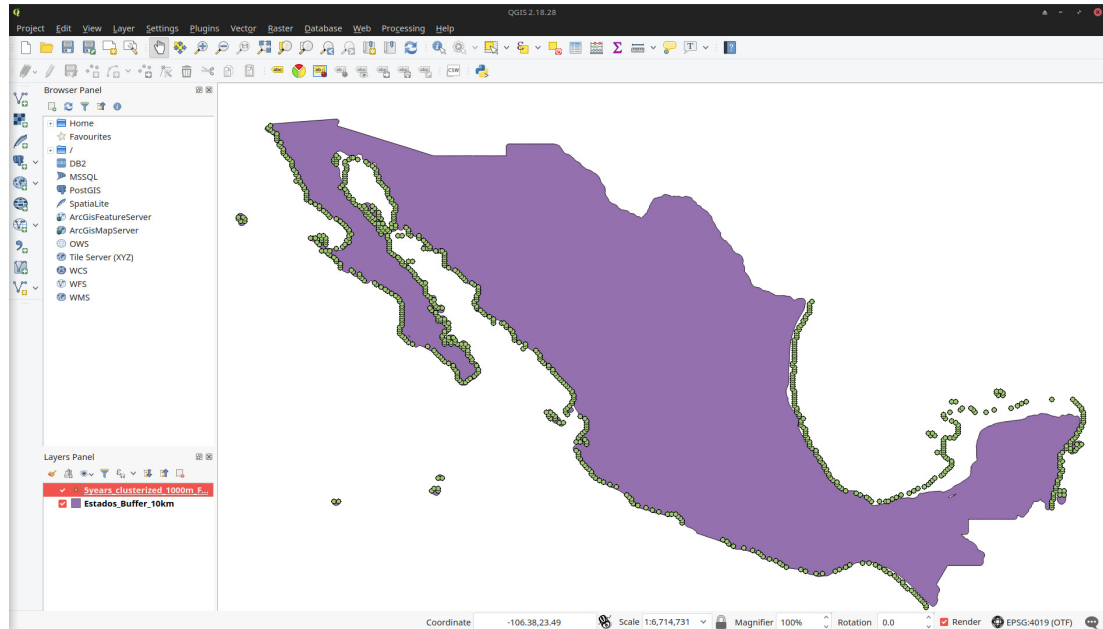


Figura 6.9: Visualización de la capa de puntos recortada a una distancia de 10km cercana a la línea de costa.

Por último se tiene una capa nueva recortada únicamente con los valores de gradiente térmico cercanos a 10 km de la línea de costa de la República Mexicana (Figura 6.9) que posteriormente se guardará como un archivo .csv para su posterior análisis en python.

Uno de los procedimientos medulares de este trabajo es el algoritmo de agrupación o *clustering* para clasificar todos los valores de temperatura en 5 grupos distintos y así poder corroborar alguna correlación existente entre las temperaturas dadas y su ocurrencia en determinada posición geográfica o incluso en el ámbito temporal.

Dentro del aprendizaje de máquina o machine learning existen dos tipos de aprendizaje: el *supervisado*, en el cual el analista de datos le “enseña” un patrón de comportamiento a un algoritmo para que este lo aprenda y lo replique, y el aprendizaje *no supervisado* es aquél en el que el algoritmo por sí mismo descubre correlaciones en los datos y aprende sobre la marcha a hacer algo sin necesidad de tener “datos de entrenamiento”.

El algoritmo de clusterización es un tipo de aprendizaje no supervisado el cual se divide en dos tipos: *agrupación plana*, en la que se le indica al algoritmo la cantidad de grupos en los que será dividido todo el conjunto de datos, mientras que el algoritmo de *agrupación jerárquica* descifra cuántos son los grupos óptimos en los cuales los datos se pueden dividir.

Para este trabajo se ocupará un algoritmo común de agrupación plana el cual es denominado *K-Means* en el que el único parámetro a ingresar será el número de agrupación o clusters k .

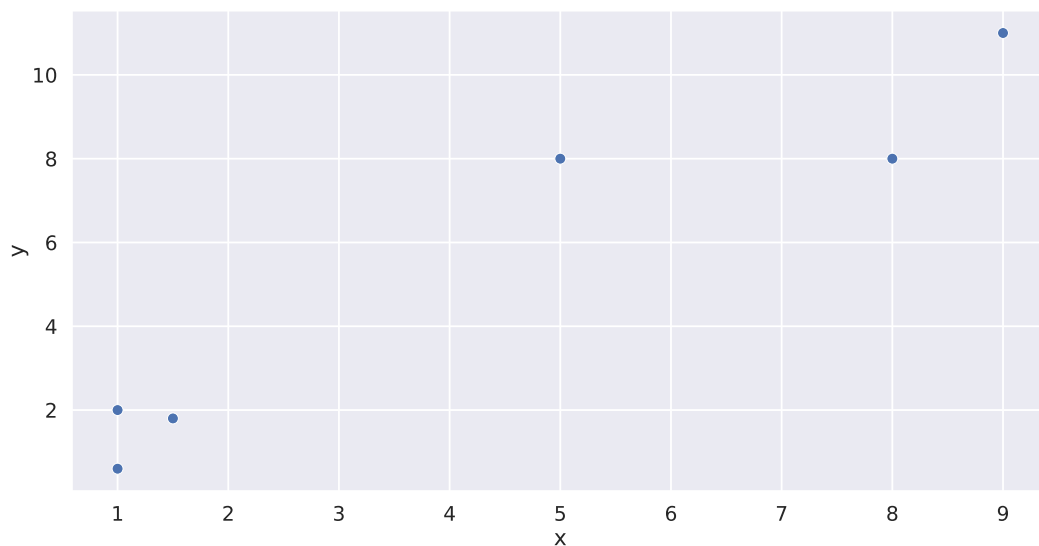


Figura 6.10: Gráfico de ejemplo para la explicación del algoritmo de clusterización K -Means con $K = 3$. Ejemplo obtenido en (15).

El ejemplo más sencillo para este tipo de agrupaciones es el propuesto por Sentdex (YouTube), (15) que comienza con la Figura 6.10 con un set de datos al azar. Visualmente se puede apreciar que existen más de dos agrupaciones o incluso únicamente dos dependiendo de cómo se agrupen.

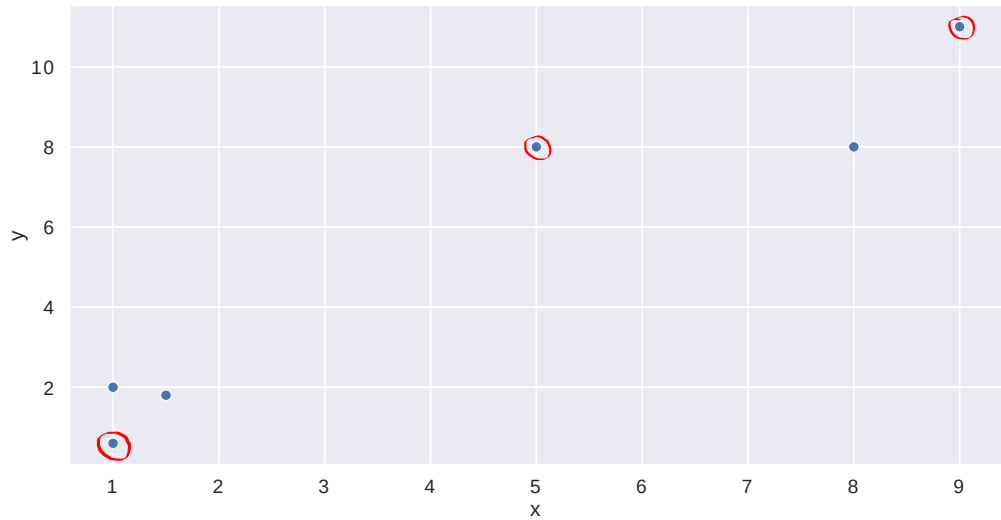


Figura 6.11: Selección de 3 centroides iniciales correspondientes al número de grupos inicial ($K = 3$).

Enseguida se procede a seleccionar un número de centroides igual al número de grupos que se consideró en un principio, el cual para este ejemplo será $k = 3$, por lo que inicialmente se seleccionarán 3 centroides de forma aleatoria en los datos como en la Figura 6.11

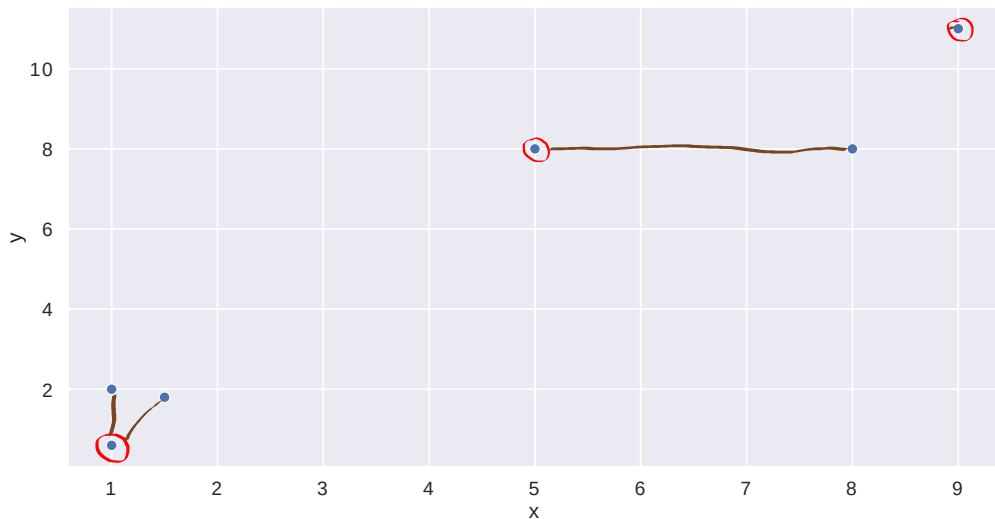


Figura 6.12: Selección de los puntos más cercanos a cada centroide.

Se buscarán los puntos más cercanos a cada centroide como en la Figura 6.12 y se asociarán a cada uno de los centroides.

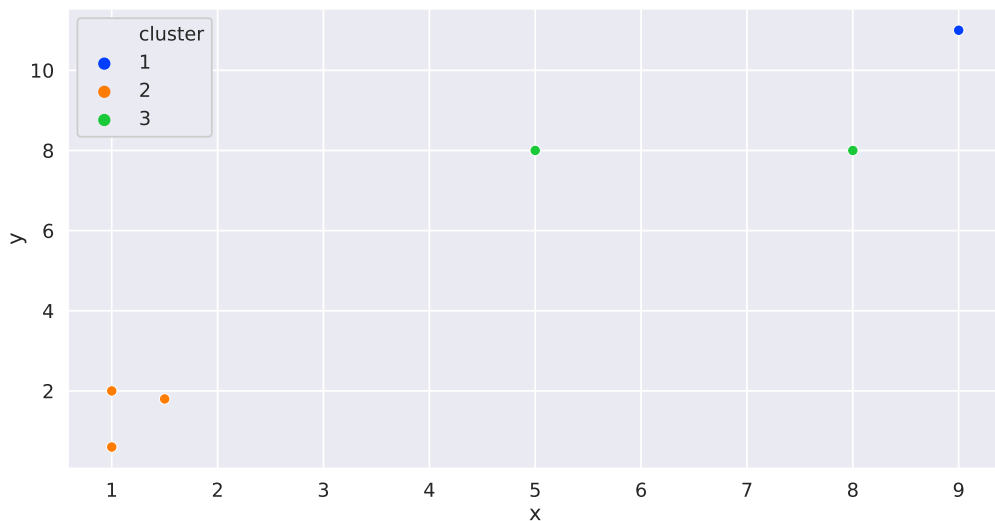


Figura 6.13: Clusterización de los datos en 3 grupos.

Posterior al paso anterior se calculará la media de todos los datos, consiguiendo así nuevos centroides que serán dichas medias y se volverá a calcular la distancia de

los puntos más cercanos a los nuevos centroides repitiendo así el proceso de manera iterativa hasta que los centroides ya no se muevan y sean posibles de cuantificar.

Una vez que ya no se muevan estos centroides, se tendrán las $k = 3$ agrupaciones listas como se aprecia en la Figura 6.13 correctamente separados y cada uno con su respectivo centroide (forma de “x”).

Se procederá a hacer el algoritmo de clusterización *K-Means* únicamente sobre los datos de temperatura, ya que si se incluyen otras variables como el tiempo o la posición geográfica, se sesgará el resultado dejándo los grupos o clusters en una región específica cuando en realidad se desea corroborar su incidencia sobre todas las aguas nacionales.

Una vez clusterizados y clasificados los datos de acuerdo únicamente al valor del gradiente de temperatura al emplear la paquetería *sklearn* de python para machine learning, se obtuvieron 5 clusters ingresando los valores de gradiente térmico del archivo .csv generado a partir del recorte de capas del proceso realizado con QGIS, los cuales fueron satisfactoriamente representado en las figs. 6.14 to 6.18.

Cada una de estas imágenes representa el número de semanas dentro del rango completo de 5 años datos, en el cual se posee un valor medio de temperatura correspondiente a la media aritmética obtenida de los datos de cada cluster. Para el cluster 1 que corresponde a la Figura 6.14 se tiene una media de $\mu_{\Delta T} = 22.8494^{\circ}\text{C} \pm 0.9387^{\circ}\text{C}$ con una frecuencia máxima de 74.44 % de semanas en un rango de 5 años para este valor medio de temperatura. Esto quiere decir que el 74.44 % de las semanas dentro de estos 5 años de datos el valor medio de temperatura es el mencionado anteriormente.

A continuación se presentará la información de los 3 sitios con mayor porcentaje de semanas durante los 5 años de datos en los que se tiene una media de gradiente térmico $\mu_{\Delta T}$ igual a $\mu_{\Delta T} = 22.8494^{\circ}\text{C} \pm 0.9387^{\circ}\text{C}$:

Tabla 6.3: Sitios con mayor porcentaje de semanas en un periodo del 17 de agosto de 2013 al 24 de septiembre de 2018 para el cluster 1. Gradiente de temperatura medio: $\mu_{\Delta T} = 22.8489^{\circ}\text{C} \pm 0.9387^{\circ}\text{C}$

Lugar aproximado	Semanas [%] en 5 años	Longitud [°W]	Latitud [°N]
Cancún, Quintana Roo	74.4444	86.6400	21.9200
Isla San Benedicto, Archipiélago de Revillagigedo	64.8148	110.8800	19.2800
San Andrés Tuxtla, Veracruz	64.0740	94.9600	18.6399

Los sitios anteriormente mencionados, no cuentan con suficientes criterios para ser considerados como elegibles para realizar una simulación de la tecnología OTEC. Estos criterios básicamente contemplan lo que es la cercanía del punto de muestra a la línea de costa o de masa continental, además de que en general, el cluster posee un gradiente de temperatura entre la superficie y 1000 m de profundidad relativamente bajo, aunque suficiente según la teoría para que una planta de esta índole sea puesta en marcha.

6. METODOLOGÍA

Sin embargo, en este trabajo se está buscando que sea un gradiente de temperatura lo suficientemente elevado para poder proveer de energía a alguna localidad o si es posible, realizar su interconexión a la red.

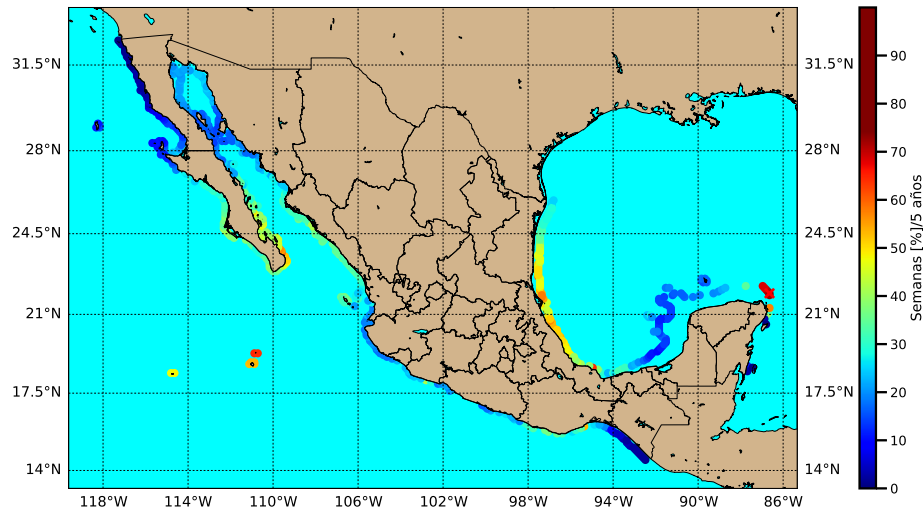


Figura 6.14: Porcentaje de semanas durante 5 años de datos para el cluster 1.

Para el cluster 2 representado en la Figura 6.15 se tiene un gradiente de temperatura medio de $\mu_{\Delta T} = 25.8717^{\circ}\text{C} \pm 0.7946^{\circ}\text{C}$ el cual es mayor al gradiente de temperatura medio del cluster 1, lo que también indica que los sitios designados para este cluster puede que sean aún más elegibles que el primero para la puesta en marcha de una planta OTEC.

A continuación se presentará la información de los 3 sitios con mayor porcentaje de semanas durante los 5 años de datos en los que se tiene una media de $\mu_{\Delta T} = 25.8717^{\circ}\text{C} \pm 0.7946^{\circ}\text{C}$:

Tabla 6.4: Sitios con mayor porcentaje de semanas en un periodo del 17 de agosto de 2013 al 24 de septiembre de 2018 para el cluster 2. Gradiente de temperatura medio: $\mu_{\Delta T} = 25.8717^{\circ}\text{C} \pm 0.7946^{\circ}\text{C}$

Lugar aproximado	Semanas [%] en 5 años	Longitud [°W]	Latitud [°N]
“El Coyul”, Oaxaca	91.4814	95.7600	15.8400
Isla Mujeres, Quintana Roo	90.7407	86.6400	21.2000
Barra de Nexpa, Michoacán	80.3703	102.7999	18.0800

Los sitios correspondientes a este cluster poseen características y razgos más amigables que el cluster 1 para colocar y poner en marcha una planta OTEC. Una de las razones por las que esto es posible es la cercanía de cada posición geográfica con las líneas de costa y además las ubicaciones que se plantean en este cluster corresponden más a los sitios que, según la literatura (9), son más propensos a estas tecnologías. Otro punto positivo es que permanece un número mayor de semanas durante los 5 años de datos, lo que lo hace una ubicación más constante de gradiente de temperatura a una profundidad de 1000m en el rango de tiempo mencionado.

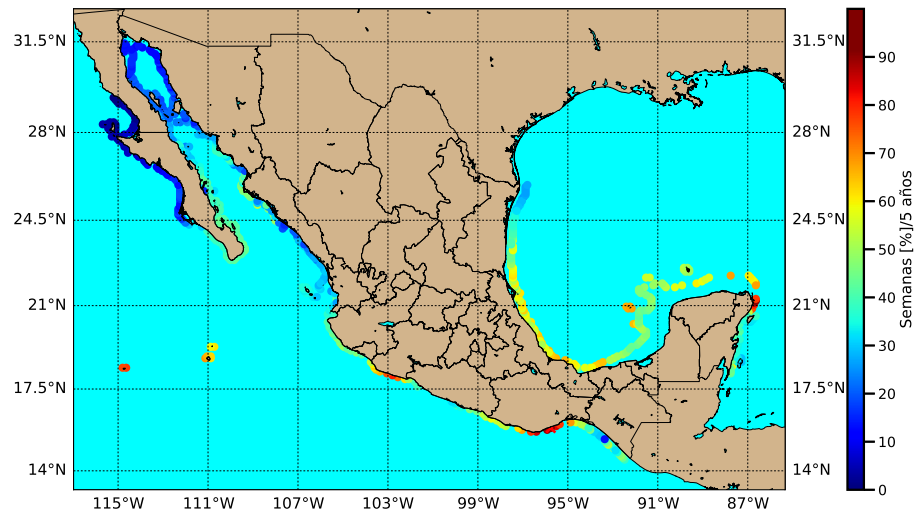


Figura 6.15: Porcentaje de semanas durante 5 años de datos para el cluster 2.

El cluster 3 mostrado en la Figura 6.16 es el cluster más especial de los 5 clusters analizados en este trabajo, ya que muestra las zonas en las que existen los gradientes térmicos más bajos de todo el país con una media de $\mu_{\Delta T} = 16.0891^{\circ}\text{C} \pm 1.4464^{\circ}\text{C}$ y que si bien no podrían operar en una planta OTEC de manera natural, siempre se pueden realizar hibridaciones de ciclos para suplir esta temperatura alta a la entrada del evaporador. Una de las hibridaciones más comunes, cuando se trata de una temperatura baja en el evaporador y se provee de una alta radiación solar en la zona, es mediante la energía de concentración solar en un ciclo denominado SOTEC, explicado brevemente en la Sección 3.2.1.

A continuación, se presentará la información de los 3 sitios con mayor porcentaje de semanas durante los 5 años de datos en los que se tiene una media de $\mu_{\Delta T} = 16.0891^{\circ}\text{C} \pm 1.4464^{\circ}\text{C}$:

6. METODOLOGÍA

Tabla 6.5: Sitios con mayor porcentaje de semanas en un periodo del 17 de agosto de 2013 al 24 de septiembre de 2018 para el cluster 3. Gradiente de temperatura medio: $\mu_{\Delta T} = 16.0891^{\circ}\text{C} \pm 1.4464^{\circ}\text{C}$

Lugar aproximado	Semanas [%] en 5 años	Longitud [$^{\circ}\text{W}$]	Latitud [$^{\circ}\text{N}$]
“El Pescador”, Baja California Norte	92.9629	116.9600	32.2400
Puente La Joya, Tijuana, B.C.N.	92.5925	117.2800	32.4800
“El Rosario De Abajo”, Ensenada, B.C.N.	80.7407	115.8399	30.0800

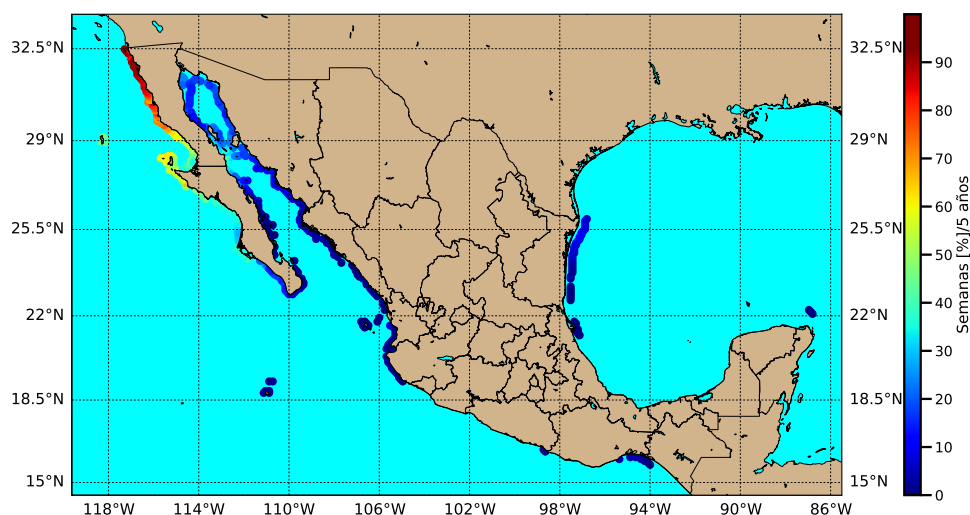


Figura 6.16: Porcentaje de semanas durante 5 años de datos para el cluster 3.

El cluster 4 mostrado en la Figura 6.17 representa el cluster con el mayor gradiente de temperatura medio durante los 5 años de datos que es de $\mu_{\Delta T} = 28.3776^{\circ}\text{C} \pm 0.8606^{\circ}\text{C}$. Este cluster no sólo es aquél que posee un gradiente térmico oceánico privilegiado, sino que también la mayoría de los sitios con estos gradientes de temperatura elevados, están cerca de la costa y con posibilidades altas de ser explotados, además de que el número de semanas al año en el que este cluster permanece activo es prácticamente todas las semanas durante estos 5 años de datos, teniendo un máximo de 96.67 % semanas durante los 5 años activo para las costas de Chiapas.

Los resultados de este trabajo serán basados en el cluster 4 representado en la Figura 6.17.

A continuación se presentará la información de los 3 sitios con mayor porcentaje de semanas durante los 5 años de datos en en los que se tiene una media de $\mu_{\Delta T} =$

$28.3776^{\circ}\text{C} \pm 0.8606^{\circ}\text{C}$:

Tabla 6.6: Sitios con mayor porcentaje de semanas en un periodo del 17 de agosto de 2013 al 24 de septiembre de 2018 para el cluster 4. Gradiente de temperatura medio:
 $\mu_{\Delta T} = 28.3776^{\circ}\text{C} \pm 0.8606^{\circ}\text{C}$

Lugar aproximado	Semanas [%] en 5 años	Longitud [$^{\circ}\text{W}$]	Latitud [$^{\circ}\text{N}$]
“El Palmarcito”, Pijijiapan, Chiapas	96.6666	93.3599	15.3600
“Brisas del Mar”, Suchiate, Chiapas	89.6296	92.4799	14.4800
Isla Cozumel, Quintana Roo	78.8888	86.7199	20.4800

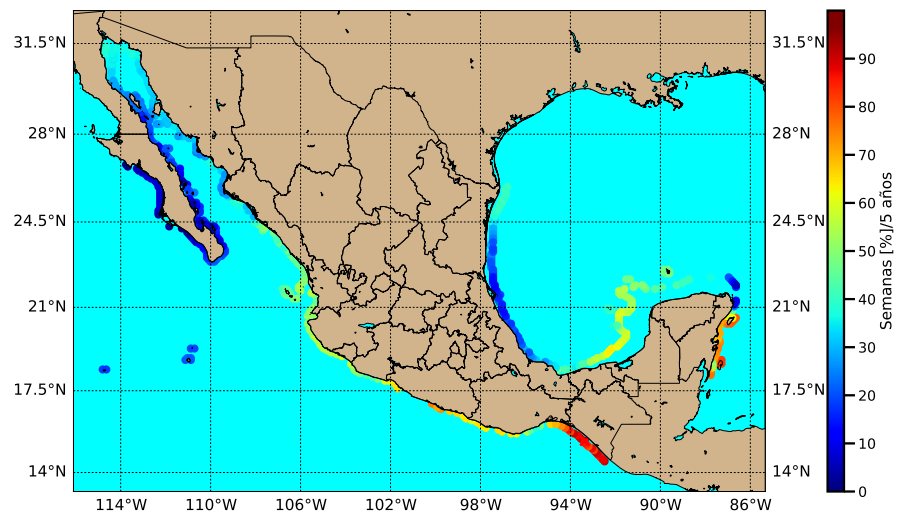


Figura 6.17: Porcentaje de semanas durante 5 años de datos para el cluster 4.

El cluster 5 de la Figura 6.18 se caracteriza por tener un comportamiento muy similar al cluster 3 de la Figura 6.16 en cuanto al gradiente de temperatura medio refiere, ya que el cluster 5 posee un gradiente de temperatura medio de $\mu_{\Delta T} = 19.5932^{\circ}\text{C} \pm 0.9734^{\circ}\text{C}$.

El análisis de este cluster puede resultar un tanto similar al del cluster 3, con la excepción de que se tiene que este gradiente predomina mayormente en la Isla Guadalupe en el municipio de Ensenada, Baja California Norte. Esta es una pequeña isla al oeste de la Península de California la cual parece no tener mucha densidad poblacional salvo una base militar, la cual, en algún futuro se podría considerar la opción de realizar la hibridación SOTEC antes mencionada para suplir de energía eléctrica a esta pequeña

6. METODOLOGÍA

isla.

A continuación se presentará la información de los 3 sitios con mayor porcentaje de semanas durante los 5 años de datos en los que se tiene una media de $\mu_{\Delta T} = 19.5932^{\circ}\text{C} \pm 0.9734^{\circ}\text{C}$:

Tabla 6.7: Sitios con mayor porcentaje de semanas en un periodo del 17 de agosto de 2013 al 24 de septiembre de 2018 para el cluster 5. Gradiente de temperatura medio:

$$\mu_{\Delta T} = 19.5932^{\circ}\text{C} \pm 0.9734^{\circ}\text{C}$$

Lugar aproximado	Semanas [%] en 5 años	Longitud [$^{\circ}\text{W}$]	Latitud [$^{\circ}\text{N}$]
Isla Guadalupe, Ensenada, B.C.N.	78.1481	118.1600	28.9599
“El Tavo”, Baja California Sur	64.4444	114.7199	27.9200
“La Lobera”, Baja California Sur	59.2592	114.9600	27.8400

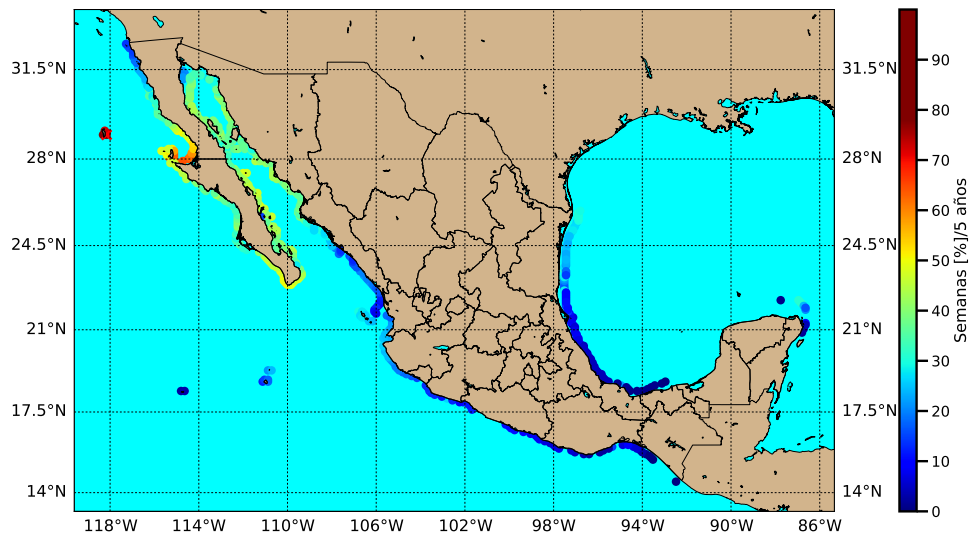


Figura 6.18: Porcentaje de semanas durante 5 años de datos para el cluster 5.

Una vez presentados los clusters, se determinó que el cluster que contiene un rango de temperatura idóneo para esta tecnología es el cluster 4 de la Figura 6.17; por tanto, los resultados posteriores a este punto serán en función a este cluster.

Los lugares que se han seleccionado para realizar simulaciones de Ciclo Rankine Orgánico (ORC) han sido la localidad de “El Palmarcito” en el municipio de Pijijiapan, Chiapas (Figura 6.20), y en la zona Este de la Isla de Cozumel, Quintana Roo (Figura

6.19); esto debido a que, además de cumplir con un gradiente de temperatura medio más que aceptable, su ocurrencia a lo largo de un periodo de 5 años, en especial al sitio de Chiapas, es considerablemente mayor con respecto a la ocurrencia de los demás agrupaciones.

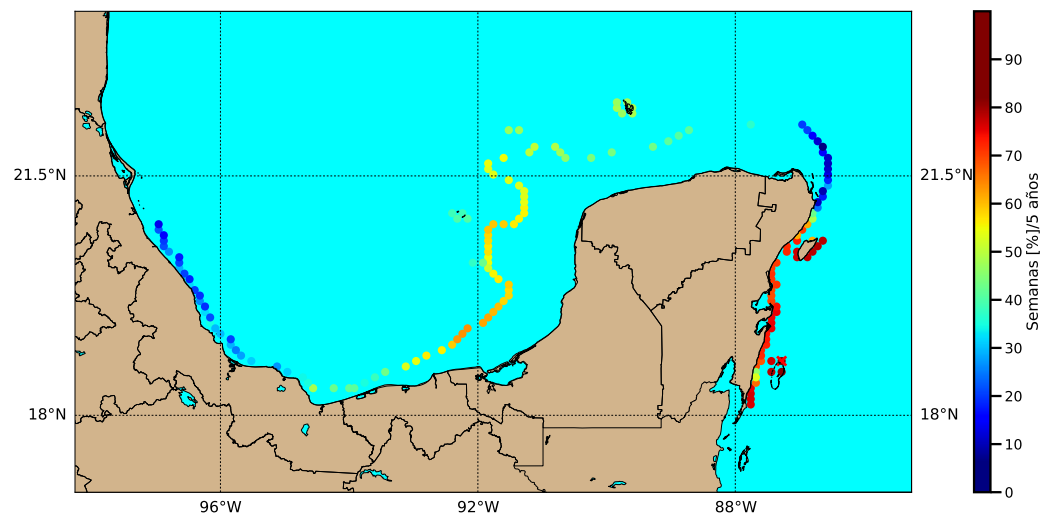


Figura 6.19: Porcentaje de semanas en un periodo de 5 años de datos para la Isla de Cozumel, Quintana Roo.

“El Palmarcito” en el municipio de Pijijiapan, Chiapas posee un número mayor de semanas durante los 5 años de datos que en Isla de Cozumel, Quintana Roo y también un mayor gradiente térmico medio que este último. A continuación se presenta una tabla con los valores de gradiente térmico medio para cada ubicación contemplando cada uno de los meses de los 5 años de datos.

Tabla 6.8: Gradiente térmico medio con su respectiva desviación estándar para los sitios de estudio marcados contemplando todo el rango de 5 años de datos

Sitio de Estudio	$\mu\Delta T_{1000m} \pm \sigma\Delta T_{1000m}$ [°C]
“El Palmarcito”, Pijijiapan, Chiapas	29.3851 ± 0.9521
Isla Cozumel, Quintana Roo	28.2583 ± 0.5911

6. METODOLOGÍA

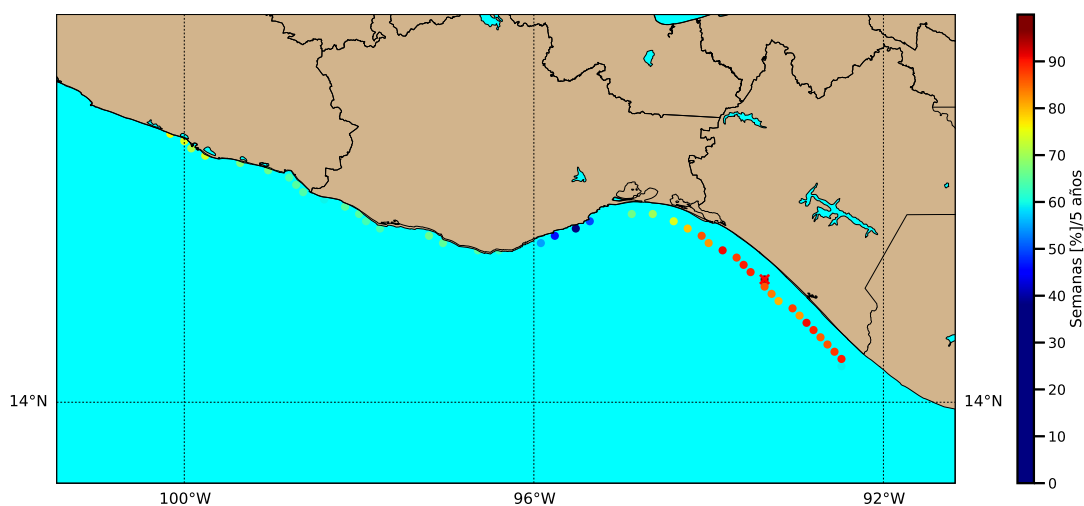


Figura 6.20: Porcentaje de semanas en un periodo de 5 años de datos para las costas de Chiapas, cerca del municipio de Pijijiapan.

Según los datos de la Tabla 6.8, es posible observar que el gradiente térmico medio del sitio en Chiapas es mayor que el del sitio ubicado en Isla de Cozumel, Quintana Roo; la diferencia de ambos sitios es de aproximadamente 1.1°C , lo cual no es una diferencia considerable, pero cuando se toma en cuenta que este gradiente de temperatura entre la superficie y 1000 metros de profundidad permanece un 96 % de las semanas de todo el rango temporal en Chiapas. Por tanto, el mejor sitio para ubicar esta tecnología sería en Chiapas debido a la disponibilidad casi permanente del recurso y el buen gradiente de temperatura.

Ahora, en la Figura 6.22 se puede observar de manera clara la variación de este gradiente de temperatura medio a lo largo de los meses durante los 5 años de datos. Se pueden ubicar diferentes sectores como por ejemplo, en los meses entre enero y marzo es una zona en la que existe un decremento en el gradiente de temperatura medio para ambas zonas.

Para la Isla de Cozumel entre los meses de marzo a octubre existe un crecimiento casi constante en el gradiente de temperatura medio, mientras que de octubre a diciembre este gradiente decae casi al valor que tenía este en enero.

En “El Palmarcito”, sitio en Chiapas, se presenta un crecimiento fuerte del gradiente de temperatura entre los meses de marzo a mayo, seguido de un decremento en los meses de mayo a junio para después crecer nuevamente hasta el mes de agosto y a partir de este mes comenzar un decremento ligero. Cabe destacar que este decremento es mucho menos considerable que el decremento encontrado para el sitio de la Isla de Cozumel en Quintana Roo, por lo que una inferencia que se puede realizar es que el

sitio localizado en el municipio de Pijijiapan, Chiapas, posee una mayor estabilidad en cuanto a gradiente térmico refiere, mientras que en el sitio de la Isla de Cozumel se puede apreciar un rango temporal de crecimiento mayor en el gradiente de temperatura.

Promedio diario del gradiente térmico del 17 de agosto de 2013 al 24 de septiembre del 2018 para cada sitio de estudio

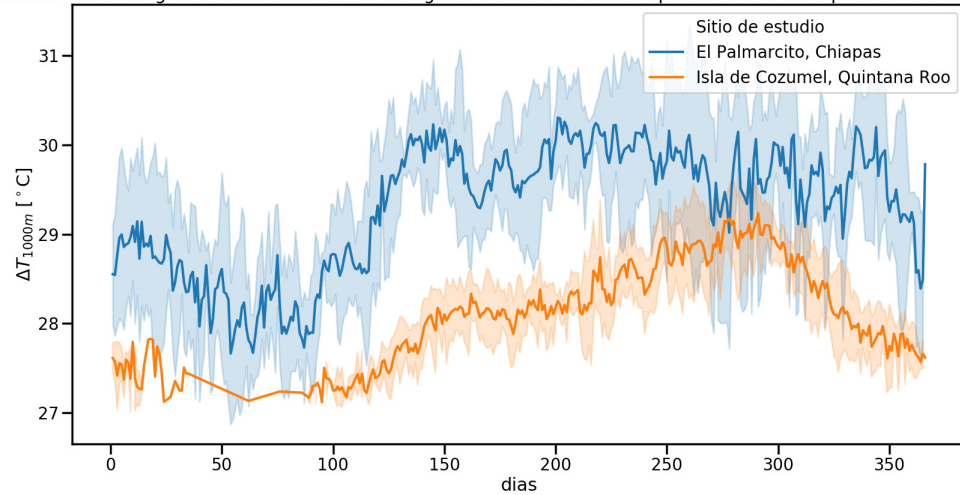


Figura 6.21: Promedio diario con sus respectivas desviaciones estándar para gradiente térmico en los sitios de “El Palmarcito” en Chiapas y en Isla de Cozumel en Quintana Roo.

6. METODOLOGÍA

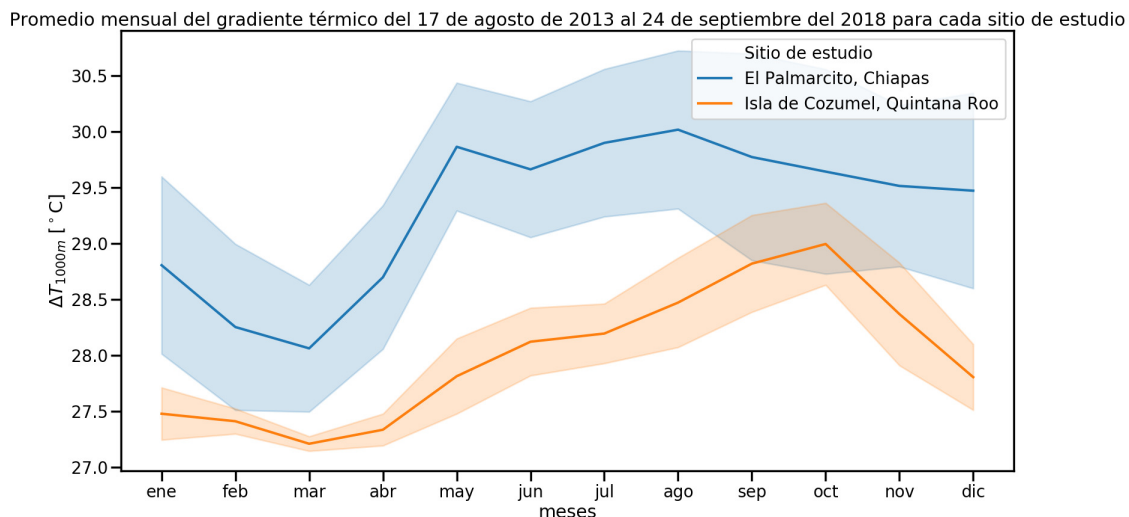


Figura 6.22: Promedio mensual con sus respectivas desviaciones estándar para gradiente térmico en los sitios de “El Palmarcito” en Chiapas y en Isla de Cozumel en Quintana Roo.

Debido a esto, se llegó a la conclusión de que el sitio idóneo en este estudio para simular una planta OTEC es en el poblado de “El Palmarcito” del municipio de Pijijiapan en el Estado de Chiapas, no sólo debido a su buen gradiente de temperatura, sino también a la disponibilidad en tiempo de este recurso. Otra aseveración que se puede realizar es que, debido a la desviación de los datos de gradiente de temperatura de ambos sitios con respecto a la media de cada uno, responde de manera adecuada permitiendo que el sitio en Chiapas esté en un rango considerablemente elevado en cuanto a gradiente de temperatura con respecto a Isla de Cozumel, excepto para los meses entre agosto y noviembre que son los meses en los que las desviaciones estándar de ambos sitios se empalman.

Lo anterior se puede interpretar como que en estos meses entre agosto y noviembre, ambos sitios podrían llegar a producir cantidades de potencia muy similares aunque no necesariamente en el mismo rango de tiempo, ya que, como se puede observar en la Tabla 6.6, el gradiente térmico promedio de Chiapas permanece alrededor de un 28 % más semanas que el sitio de la Isla de Cozumel, por lo que este primero producirá por mayor tiempo una buena cantidad de potencia.

La variación promedio diaria del gradiente de temperatura medio expresada en la Figura 6.21 muestra una tendencia muy similar a la Figura 6.22 y se puede apreciar que en la primera figura mencionada se tiene una mayor resolución de estas variaciones, pudiendo identificar la ausencia de gradiente térmico para el sitio de Cozumel entre los días 45 al 100 aproximadamente en el día juliano, que en el calendario civil equivaldría a los meses de febrero al mes de abril.

6.2. Análisis termodinámico y simulación de una planta OTEC de ciclo cerrado

En esta sección se realizará el análisis termodinámico de una planta OTEC de ciclo cerrado siguiendo las ecuaciones de balance de energía, entropía y exergía definidas en las Secciones [A.1.4](#), [A.1.5](#) y [A.1.6](#), respectivamente.

Asimismo y con el fin de dar particular atención en las ecuaciones como resultado de un balance de energía y exergía, se utilizó el análisis específico de Wang et. al ([11](#)), particularmente porque es uno de los pocos artículos, si no es que el único, cuyo análisis termodinámico contempla el trabajo neto realizado por el ciclo, y con este, el trabajo consumido por las dos bombas de agua de mar tanto de agua superficial como de agua profunda a 1000 m.

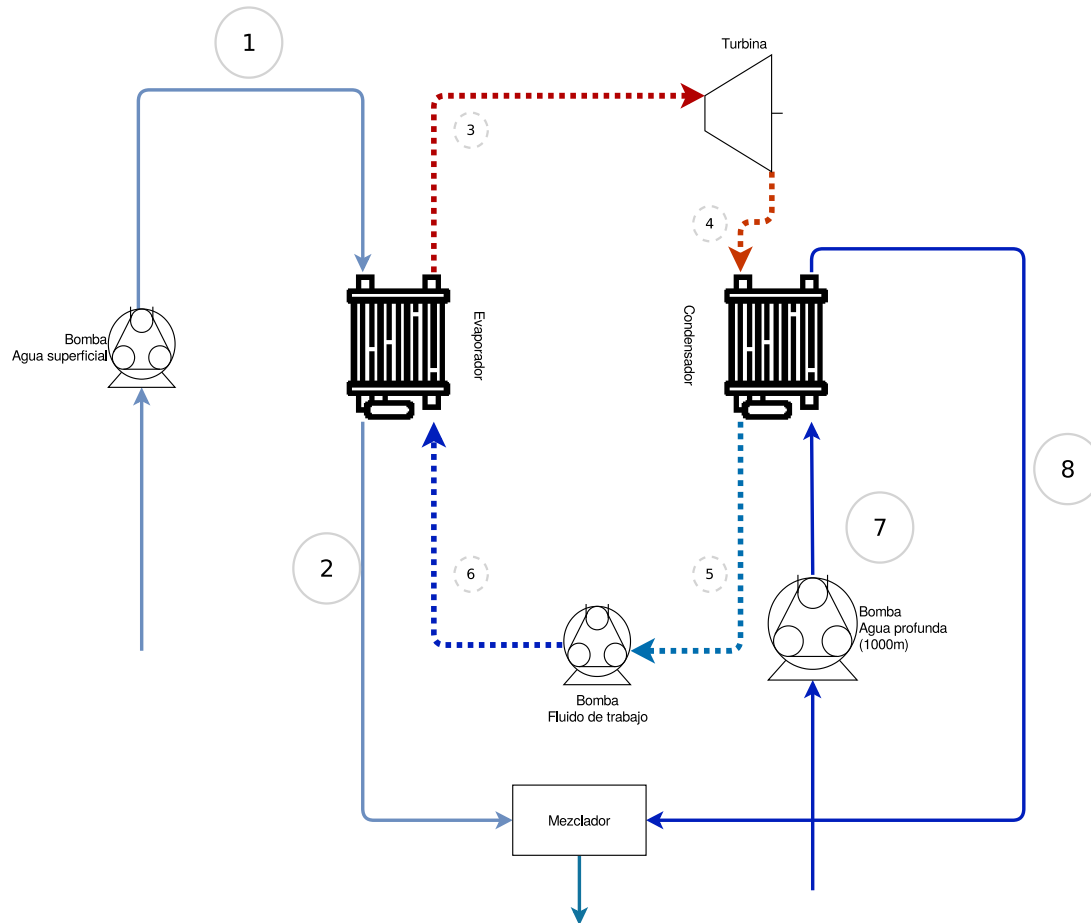


Figura 6.23: Esquema del Ciclo Rankine Orgánico enfocado a una planta OTEC de ciclo cerrado.

En la Figura 6.23 se muestra el esquema de una planta OTEC de ciclo cerrado con sistema de descarga a una profundidad de 60 m. Esto quiere decir que, la descarga de agua del evaporador y del condensador se efectuará a dicha profundidad. Esto se debe a que, a esta profundidad existe una menor afectación al ambiente marino, ya que la mezcla de agua de mar a mayor temperatura a una profundidad donde la temperatura no es tan alta, puede repercutir a la larga en cuestiones de la biota marina (36).

Siguiendo el esquema de la Figura 6.23, el ciclo funciona de la siguiente manera:

1. El agua de mar de la superficie (20 m de profundidad) es bombeada hacia el evaporador en el punto 1 a través de una de sus líneas de flujo hasta salir a una profundidad de 60 m en el punto 2

2. El fluido de trabajo en la línea de flujo del ciclo cerrado cambia de fase a vapor sobrecalentado en el punto 3 gracias a la transferencia de calor que le proporciona el agua de mar de la superficie y entra a la turbina a la presión del evaporador y se expande.
3. El vapor sobrecalentado sale de la turbina como vapor húmedo y entra al condensador en el punto 4 a la presión de condensación (la más baja del ciclo).
4. El vapor húmedo en el condensador sale como líquido saturado en el punto 5 debido a la transferencia de calor que existe entre el vapor húmedo del fluido de trabajo y el agua de mar a 1000m de profundidad bombeada hacia la línea de flujo del condensador en el punto 7.
5. El líquido saturado del punto 5 es bombeado como líquido comprimido hacia el evaporador en el punto 6 y así comenzar el ciclo nuevamente.
6. El agua de mar a 1000m de profundidad es rechazada a la misma profundidad que el punto 2.

Las siguientes consideraciones fueron realizadas para el desarrollo de este análisis:

- Se considera un sistema en estado estacionario tal que $\frac{dE}{dt} = \frac{dS}{dt} = \frac{d\chi}{dt} = 0$.
- Se considera un ciclo Rankine Orgánico simple teniendo en cuenta eficiencias isentrópicas para la bomba del fluido de trabajo y para la turbina.
- La energía cinética y potencial contenida en cada línea de flujo tanto de agua de mar como del fluido de trabajo se considerarán despreciables: por lo que $\Delta E_k = \Delta E_p = 0$
- Los componentes involucrados en el ciclo Rankine se consideran adiabáticos, lo que implica que no existe transferencia de calor por parte de estos hacia sus alrededores por cuestiones mecánicas o eléctricas.
- Las pérdidas de presión en las tuberías dentro del ciclo son despreciables.
- Los flujos mássicos y volumétricos tanto de las bombas de agua superficial y profunda, así como los del fluido de trabajo, se considerarán constantes a lo largo de todo el ciclo.
- La velocidad del flujo a la entrada de las bombas de agua de mar será de $2 \frac{m}{s}$, ya que a esta velocidad, el consumo de la bomba será del 30% de la potencia de la turbina obtenida del ciclo (36).
- La presión en el condensador y evaporador para el flujo de agua de mar se considerará como la presión hidrostática que existe a una profundidad de 60 m.

6. METODOLOGÍA

Tabla 6.9: Parámetros de simulación para el ciclo OTEC cerrado utilizando amoniaco (R717) como fluido de trabajo

Variable	Identificador	Valor		Unidad
		Chiapas	Quintana Roo	
Día de la muestra	t_{dia}	2015-09-05		AAAA-mm-dd
Lugar de la muestra	–	“El Palmarcito”	Isla de Cozumel	–
Densidad del agua de mar	ρ_{sw}	1023.0000		$\frac{kg}{m^3}$
Profundidad de la tubería de descarga (36)	H_{desc}	60.0000		m
Temp. salida del evaporador, agua superficial (11)	$T_{salEvap_{sw}}$	295.1500		K
Temp. salida del condensador, agua a 1000 metros (11)	$T_{salCond_{sw}}$	279.1500		K
Temp. superficial, agua de mar	T_{ww}	304.2240	301.1480	K
Temp. 1000 metros, agua de mar	T_{cw}	272.5010	273.1480	K
Temp. a la entrada de la turbina (R717) (11)	T_{turb}	296.1500		K
Presión a la entrada de la turbina (R717) (37)	P_{turb}	850.0000		kPa
Temp. de condensación (R717) (11)	T_{cond}	277.1500		K
Presión de condensación (R717) (11)	P_{cond}	497.4810		kPa
Flujo másico, agua superficial (36)	\dot{m}_{ww}	10000.0000		$\frac{kg}{s}$
Flujo másico, agua 1000 metros (36)	\dot{m}_{cw}	5000.0000		$\frac{kg}{s}$
Flujo másico, R717 (11)	\dot{m}_{R717}	285.8210	188.4880	$\frac{kg}{s}$
Flujo volumétrico, agua superficial	\dot{Q}_{ww}	9.7751		$\frac{m^3}{s}$
Flujo volumétrico, agua 1000 metros	\dot{Q}_{cw}	4.8875		$\frac{m^3}{s}$
Flujo volumétrico, R717	\dot{Q}_{R717}	0.2793	0.1842	$\frac{m^3}{s}$
Longitud de la tubería, agua superficial (36)	L_{ww}	20.0000		m
Longitud de la tubería, agua profunda	L_{cw}	1000.0000		m
Diámetro de tuberías, agua de mar (11)	D_{sw}	1.5000		m
Factor de fricción de las tuberías (11)	f	0.0700		–
Eficiencia bombas de agua de mar (11)	$\eta_{bomba_{sw}}$	85.0000		%
Eficiencia isentrópica de la bomba de R717 (11)	$\eta_{bomba_{R717}}$	80.0000		%
Eficiencia isentrópica de la turbina (11)	η_{turb}	80.0000		%

La Tabla 6.9 muestra los parámetros de simulación empleados tanto para la Isla de Cozumel en Quintana Roo, y para la playa de “El Palmarcito” en Chiapas. Cabe destacar que los valores que varían entre una ubicación y otra, están relacionados con la temperatura superficial y profunda del mar en cada locación para cierto día en específico.

La Tabla mencionada contiene la información de un día en particular (05 de septiembre de 2015) a manera de ilustración de los valores de entrada para ese día. Los demás parámetros técnicos como el flujo másico del agua de mar superficial y profunda, diámetro de las tuberías, eficiencias de ciertos componentes, velocidad a la entrada de las bombas de agua de mar, entre otros parámetros, son valores que no varían con el tiempo.

Estos parámetros fueron obtenidos de 3 artículos diferentes; esto con el objetivo de evaluar con cuáles parámetros y fluidos de trabajo funcionaba mejor el ciclo. Los parámetros obtenidos en el trabajo de Wang et. al (11), sirvieron como referencia para establecer límites inferiores y superiores para los temperaturas de evaporación y condensación respectivamente y de esta manera evaluar el resultado de la eficiencia neta OTEC de ciclo cerrado.

La presión de 850 kPa a la entrada de la turbina fue obtenida mediante la propuesta de Chen et al. (37) al realizar un análisis teórico-experimental de una planta OTEC en el cual se construyó un prototipo a nivel laboratorio en el que se determinó que esta presión utilizando R717 era la adecuada, y por ende se utilizó este criterio.

Finalmente, las consideraciones realizadas por Vega (36) para la puesta en marcha de una planta OTEC, son de suma importancia, ya que el autor mencionado es considerado como uno de los pioneros en la implementación de plantas de este tipo a nivel comercial. Gracias a sus aportes experimentales y teóricos, se obtuvieron parámetros como la relación de flujo volumétrico de agua caliente a agua fría es de 1:2 por cada MW instalados en la planta.

Los valores que varían con el tiempo son: temperatura superficial y a 1000 metros de profundidad para determinada ubicación y el flujo másico del refrigerante utilizado, que para fines ilustrativos, los valores de flujo másico en la Tabla son respectivos al amoniaco (R717).

A continuación se resumirá el análisis de balance de energía realizado en cada uno de los componentes del ciclo de la Figura 6.23:

Tabla 6.10: Balance de energía en componentes del ciclo cerrado OTEC, partiendo del análisis de (11)

Componente	Balance de energía
Evaporador	$\dot{Q}_E = \dot{m}_{ww}(h_1 - h_2)$
Fluido de trabajo	$\dot{m}_{ft} = \frac{\dot{Q}_E}{h_3 - h_6}$
Turbina	$\dot{W}_{turb} = \dot{m}_{ft}(h_3 - h_4)\eta_{turb}$
Condensador	$\dot{Q}_C = \dot{m}_{ft}(h_4 - h_5)$
Bomba fluido de trabajo	$\dot{W}_{bomba_{ft}} = v_5(P_6 - P_5)$
Bomba, agua superficial	Caída de presión: $\Delta P_{ww} = f \frac{\rho_{sw} L_{ww} V_{sw}^2}{2D_{sw}}$ $\dot{W}_{bomba_{ww}} = \frac{\dot{m}_{ww} \Delta P_{ww}}{\rho_{sw} \eta_{bomba_{sw}}}$
Bomba, agua 1000 metros	Caída de presión: $\Delta P_{cw} = f \frac{\rho_{sw} L_{cw} V_{sw}^2}{2D_{sw}}$ $\dot{W}_{bomba_{cw}} = \frac{\dot{m}_{cw} \Delta P_{cw}}{\rho_{sw} \eta_{bomba_{sw}}}$

Una vez teniendo las ecuaciones provenientes del balance de energía, se obtendrá la potencia neta del ciclo y la eficiencia neta de este; siendo el primero una medida de la potencia que entrega el sistema OTEC contemplando las pérdidas de energía por las 3 bombas involucradas y la potencia generada por la turbina, mientras que la eficiencia neta es la relación entre lo que se produce con respecto a la entrada de calor generada por el gradiente térmico en el evaporador.

Dichas relaciones se muestran a continuación:

$$\dot{W}_{neta} = \dot{W}_{turb} - \dot{W}_{bomba_{ft}} - \dot{W}_{bomba_{ww}} - \dot{W}_{bomba_{cw}} \quad (6.1)$$

6. METODOLOGÍA

Y para la eficiencia neta se define como:

$$\eta_{meta} = \frac{\dot{W}_{neta}}{\dot{Q}_E} \quad (6.2)$$

Esta eficiencia es una medida tangible para visualizar la cantidad de energía térmica o potencia que se está generando en el ciclo con respecto a lo que se suministra.

El análisis que determina la cantidad de energía que se convertirá en trabajo real, se dará mediante un balance de exergía en cada uno de los componentes del sistema; específicamente, en los estados o puntos inicial y final de cada componente de la Figura 6.23. Se tomará como punto de partida la exergía de cada línea de flujo, tanto de agua de mar como del fluido de trabajo, mediante la expresión del flujo de exergía, contemplando $\Delta E_k = \Delta E_p = 0$ (38) que se define a continuación:

$$\dot{E}_i = \dot{m}(h_i - h_0) - T_0(s_i - s_0)[Potencia] \quad (6.3)$$

En donde el sufijo i refiere a cada uno de los estados obtenidos en el esquema del ciclo, y el sufijo 0 indica que es una propiedad del estado que permanece en equilibrio termodinámico con el ambiente a 25°C y 1atm. Este estado se denomina *estado muerto*

Siguiendo las ecuaciones descritas por Wang et al. (11), se muestra la Tabla 6.11 con los valores del cambio de exergía o destrucción de exergía de cada componente del sistema.

Tabla 6.11: Balance de exergía en componentes del ciclo cerrado OTEC

Componente	Destrucción de exergía
Evaporador	$\dot{E}_{evap} = (\dot{E}_1 - \dot{E}_2) + (\dot{E}_6 - \dot{E}_3)$
Turbina	$\dot{E}_{turb} = \dot{E}_3 - \dot{E}_4 - \dot{W}_{turb}$
Condensador	$\dot{E}_{cond} = (\dot{E}_7 - \dot{E}_8) + (\dot{E}_4 - \dot{E}_5)$
Bomba fluido de trabajo	$\dot{E}_{bomba_{ft}} = \dot{E}_5 - \dot{E}_6 + \dot{W}_{bomba_{ft}}$

Para finalizar se estimará la eficiencia de la segunda ley η_{II} o también conocida como eficiencia exergetica del sistema η_{ex} , que indica el porcentaje del máximo trabajo útil que podemos extraer del ciclo con respecto al trabajo extraíble bajo condiciones reversibles.

Una manera para definir la eficiencia exergetica, es utilizar la exergía total que ingresa al ciclo y la que sale, así como las pérdidas o destrucción de exergía descritos en la Tabla 6.11 (11).

La relación de la exergía total suministrada y de salida son las siguientes:

$$\dot{E}_{inTot} = \dot{E}_1 + \dot{E}_7 + \dot{W}_{bomba_{ft}} \quad (6.4)$$

$$\dot{E}_{outTot} = \dot{E}_2 + \dot{E}_8 \quad (6.5)$$

La relación para obtener la eficiencia exergética es la siguiente:

$$\eta_{ex} = 1 - \frac{\dot{E}_{outTot}}{\dot{E}_{inTot}} - \sum_{i=1}^k \frac{\dot{E}_i}{\dot{E}_{inTot}} \quad (6.6)$$

En donde \dot{E}_i indica la destrucción de exergía del i -ésimo componente del sistema.

Una vez definidas las ecuaciones y parámetros necesarios para el ciclo, se procedió a realizar la simulación del ciclo Rankine mediante la librería CoolProp (21) para Python, en la que se ingresaron los parámetros de la Tabla 6.9 y usando 3 fluidos de trabajo diferentes como lo son: Amoniaco (R717), IsoButano (R600a) y n-Butano (R601).

Para el cálculo de propiedades termofísicas del agua de mar, se utilizó una librería que implementa los cálculos necesarios para el agua de mar según la Asociación Internacional para las Propiedades del Agua y Vapor (IAPWS, por sus siglas en Inglés); específicamente utilizando el módulo para agua de mar (IAPWS-08 (39)).

Esencialmente se calcularon 2 parámetros importantes del ciclo para cada uno de los 3 fluidos de trabajo mencionados anteriormente. Estos parámetros fueron la eficiencia neta del ciclo (Ec. 6.2) y el trabajo neto realizado por ciclo (Ec. 6.1) contemplando el consumo de las 3 bombas involucradas en el ciclo. Adicionalmente se obtuvo un valor constante de potencia consumida por la bomba de agua a 1000 m (mediante ecuación de Tabla 6.10) que sería otro parámetro importante a considerar para el desempeño térmico del ciclo.

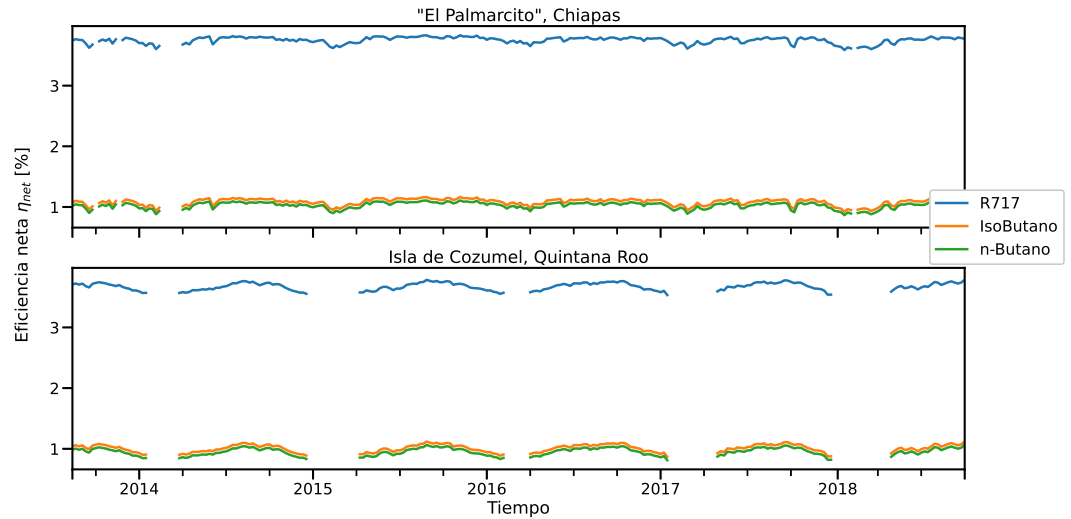


Figura 6.24: Eficiencia neta promedio semanal de la planta OTEC de ciclo cerrado.

Fluidos de trabajo: R717, Isobutano y n-butano como fluidos de trabajo.

Los resultados de la Figura 6.24 arrojan que, para “El Palmarcito” y para la Isla de Cozumel, el fluido de trabajo con la mayor eficiencia neta del ciclo es el amoniaco

6. METODOLOGÍA

(R717), lo cual coincide con lo estipulado en la literatura de este tipo de tecnologías de energía oceánica; y es que este refrigerante orgánico, además de tener un potencial de calentamiento global (GWP, por sus siglas en Inglés) igual a cero, posee una de las temperaturas críticas más altas entre los tres fluidos de trabajo seleccionados para este trabajo.

Como se estipuló en la Sección 5.1.3, es conveniente que la temperatura crítica del fluido de trabajo sea alta, ya que de esta manera se puede trabajar con presiones más altas a la entrada de la turbina, y esto se traduce a una mayor eficiencia del ciclo. Aunque, si se rebasa un límite de presión a la entrada de la turbina, se puede caer la fase de líquido a la entrada, lo que ocasiona que la eficiencia del ciclo decrezca rápidamente, además de que se puede dañar permanentemente este dispositivo al grado de ser inservible.

Al momento de realizar la simulación de este ciclo con diferentes parámetros como la temperatura y presión a la entrada de la turbina, se descubrió que existe una configuración específica para la cual a una temperatura y presión dadas, la eficiencia neta de ciclo es máxima, tomando en cuenta que a mayor presión a la entrada de la turbina puede elevar considerablemente la eficiencia neta del ciclo, pero los retos técnicos de conseguir tuberías que resistan presiones altas siempre estará latente, lo que se traducirá como un costo extra en la inversión de la planta.

Por tanto, se llegó a la conclusión de que el mejor sitio para poner una planta OTEC de acuerdo a este análisis sería en la playa de “El Palmarcito” en el municipio de Pijijiapan, Chiapas utilizando amoníaco como fluido de trabajo.

A pesar de que la eficiencia neta para la Isla de Cozumel es casi similar a la presentada en “El Palmarcito”, lo que hace a esta isla un lugar menos viable es la poca frecuencia de tiempo con la que se cuenta este gradiente térmico por encima de los 28° de acuerdo a lo mencionado en la Tabla 6.6

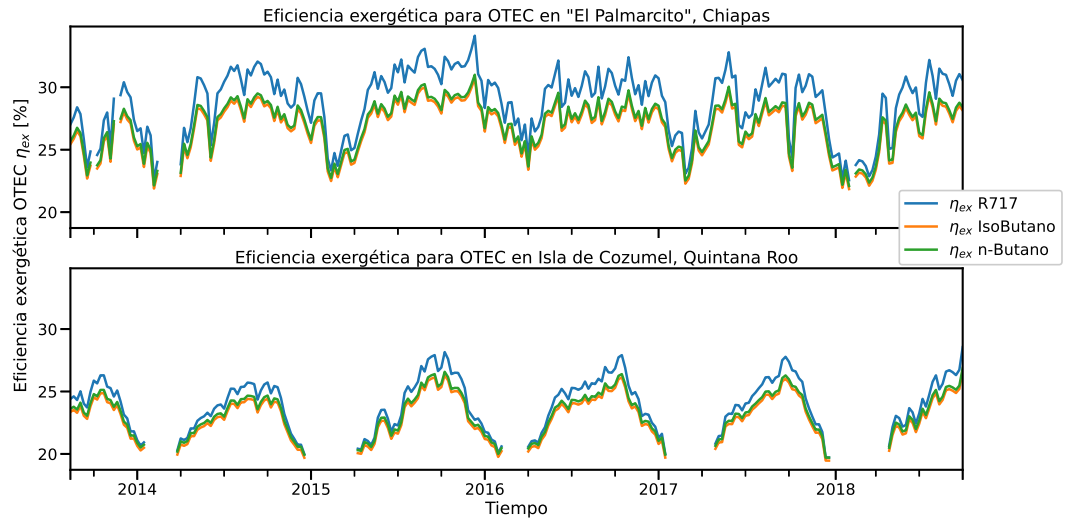


Figura 6.25: Eficiencia exergetica promedio semanal de la planta OTEC de ciclo cerrado.

Fluidos de trabajo: R717, Isobutano y n-butano como fluidos de trabajo

Los resultados de la Figura 6.25 muestran el panorama del Ciclo Rankine Orgánico de acuerdo a la Segunda Ley de la Termodinámica que menciona que no existe una máquina térmica o un ciclo termodinámico, en este caso, que no tenga pérdidas de calor por fricción en las tuberías, por calentamiento en el equipo eléctrico del generador de la turbina, y que la entropía no es constante para ningún tipo de dispositivo, en especial para la bomba y la turbina, y que además, ningún proceso es reversible por medios naturales; siempre se gastará energía para lograr una “estabilidad” térmica.

Es por esto que la figura anterior muestra la eficiencia de la Segunda Ley o eficiencia exergetica la cual determina la cantidad de potencia útil aprovechable en el ciclo respecto a la potencia reversible de este. La figura muestra que para ambos lugares, la variación de esta eficiencia exergetica con respecto a los 3 fluidos de trabajo no presenta cambios tan grandes como se muestran en el caso de la eficiencia neta del ciclo.

Esto quiere decir que la potencia útil en el ciclo no posee una variación importante para definir si un fluido de trabajo u otro lo hace mejor o peor, aunque sí es posible puntualizar que para este caso de esta gráfica, el amoníaco R717 sigue siendo la mejor opción para fluido de trabajo con una eficiencia exergetica máxima de $\eta_{ex} \approx 33\%$ para la playa de “El Palmarcito” en Chiapas.

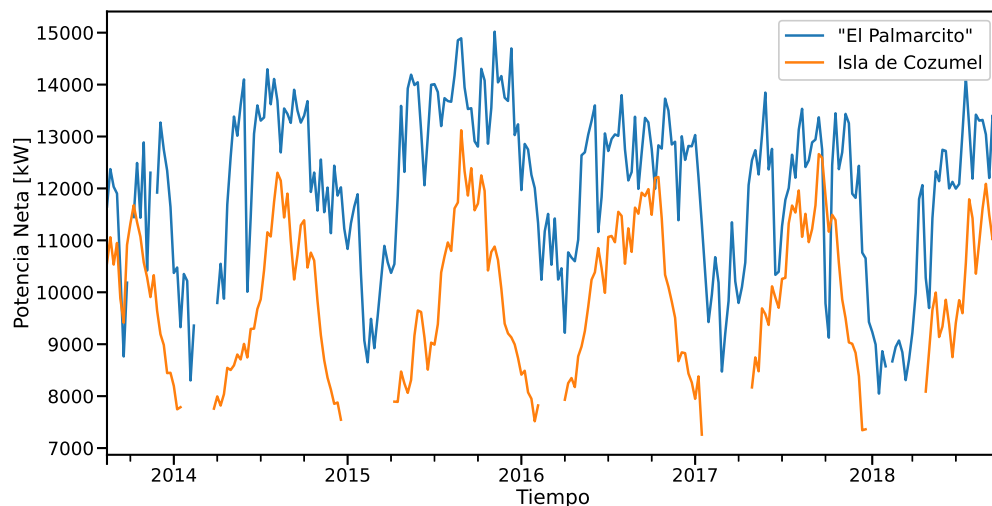


Figura 6.26: Potencia neta promedio semanal de la planta OTEC de ciclo cerrado utilizando R717 como fluido de trabajo.

En la Figura 6.26 se muestra la potencia neta entregada por el ciclo utilizando el refrigerante amoniac R717 para la Isla de Cozumel y la playa “El Palmarcito”. La tendencia de las curvas para ambos sitios muestran un comportamiento estacional en el cual se tiene un máximo de potencia neta extraída por el ciclo que resulta ser aproximadamente en el último cuarto de cada año y teniendo su etapa más baja en el primer cuarto de cada año de igual manera.

La potencia neta en “El Palmarcito” a lo largo de 5 años fue de 12.0980 ± 1.6621 MW, a comparación de los 10.0770 ± 1.4159 MW correspondientes a la Isla de Cozumel. Asimismo, la eficiencia exergetica del primer sitio mencionado para el mismo periodo de tiempo fue de 29.0226 ± 2.5870 %, mientras que para el segundo sitio fue de 24.1911 ± 2.0370 %. El gasto del amoniac obtenido para la localidad de “El Palmarcito” en Chiapas y en Isla de Cozumel en Quintana Roo fue de $0.2793 \frac{m^3}{s}$ y $0.1842 \frac{m^3}{s}$ respectivamente para un día particular dentro del periodo de los 5 años.

La información anterior se resume en la Tabla 6.12 a excepción de los valores del gasto que se encuentran en la Tabla 6.9.

Tabla 6.12: Gradiente térmico promedio, potencia neta del ciclo y eficiencia exergética para los sitios de “El Palmarcito”, Pijijiapan, Chiapas y la Isla Cozumel, Quintana Roo para un periodo de 5 años.

Location	$\mu_{\Delta T_{1000m}} \pm \sigma_{\Delta T_{1000m}}$ [°C]	$\mu P_{net} \pm \sigma_{P_{net}}$ [MW]	$\mu \eta_{ex} \pm \sigma_{\eta_{ex}}$ [%]
“El Palmarcito”, Pijijiapan, Chiapas	29.3851 ± 0.9521	12.0980 ± 1.6621	29.0226 ± 2.5870
Isla Cozumel, Quintana Roo	28.2583 ± 0.5911	10.0770 ± 1.4159	24.1911 ± 2.0370

Los datos anteriores muestran que “El Palmarcito” en Chiapas, es el mejor sitio para situar una planta OTEC, debido a que entre los aspectos mencionados, posee un gradiente de 29.3851 ± 0.9521 [°C], así como también una alta eficiencia exergética a comparación de la obtenida en la Isla de Cozumel en Quintana Roo.

“El Palmarcito” en las costas de Chiapas, posee condiciones ventajosas ya mencionadas anteriormente comparadas con las mencionadas por García Huante (40) respecto a Puerto Ángel, Oaxaca como sitio potencial. No obstante, en el trabajo antes mencionado, se contemplan otros aspectos como los biológicos, a comparación de este trabajo, cuyo análisis es más termodinámico. Por lo tanto, como trabajo futuro a este trabajo de tesis realizado, se sugiere hacer un análisis extensivo que contemple diferentes áreas como las sociales y biológicas, entre otras.

Proyección en México

La producción de trabajos realizados para México en materia OTEC se han hecho de manera mixta en el sentido de que tanto investigación básica e investigación aplicada se ha llevado a cabo, y en la sección siguiente se hablará más a detalle.

Se debe insistir en las consideraciones/retos tecnológicos que se tienen al pensar en las energías oceánicas, y en particular en la energía oceánica térmica.

Vanegas et al. (9) menciona ciertos puntos a tratar como lo son los materiales a utilizar en ambientes hostiles como lo es el mar; entre ellos están la bioincrustación, la corrosión, esfuerzos mecánicos para los dispositivos y demás, y es por esta razón que los costos de la energía oceánica térmica, así como las otras fuentes de energía en el océano, son costosas en mantenimiento y operación y por esto mismo pueden llegar a ser no tan competitivas a nivel comercial.

Hablando específicamente de la energía oceánica térmica en México y en general, los costos de los intercambiadores de calor para evaporar y condensar, así como la longitud y el diámetro de las tuberías, ya que se ha calculado que deben pasar entre 1000 y 2000 m³ por segundo (19).

El mismo autor menciona que uno de los retos tecnológicos a tratar en materia OTEC es la cuantificación de la disponibilidad del recurso mediante datos locales de alta calidad y así determinar aquellas variaciones espaciales y temporales y así definir sitios claves y estratégicos para la puesta en marcha de esta tecnología.

7.1. Estado del arte de OTEC en México

Uno de los primeros trabajos relacionados a la sugerencia de sitios de OTEC en México es por parte de (Aviña-Jiménez, 2007) (23), en el cual menciona que la zona idónea para operar una planta de energía oceánica térmica es en la Isla de Cozumel, debido a las características térmicas y batimétricas, además de que el gradiente óptimo se encuentra a no más de 10km de la costa y de instalaciones eléctricas. Aviña-Jiménez concluye que la obtención de subproductos como lo es la desalinización de agua de mar, calefacción de espacios, la acuacultura entre otros, pueden representar un punto

7. PROYECCIÓN EN MÉXICO

competitivo de la OTEC contra su generación de electricidad.

En el año 2013, Romero Moya surgió la señalización de un gradiente térmico favorable en San Andrés Tuxtla, Veracruz para una planta OTEC off-shore utilizando un gradiente térmico de 21.6°C a una profundidad de 600 metros y con una potencia bruta teórica de 155 MW.

En el año 2017, Luna Gómez (41) llevó a cabo la tarea de crear una planta OTEC a nivel laboratorio, utilizando agua calentada por una resistencia térmica como fuente de energía de alta temperatura, y agua contenida en un refrigerador aproximadamente a 4°C como fuente de energía de baja temperatura. La finalidad de este proyecto era monitorear y controlar cada uno de los puntos termodinámicos mediante conexión bluetooth implementando microcontroladores como un Arduino y la creación de una aplicación para la plataforma Android utilizando el lenguaje de programación MIT App Inventor 2.

El autor concluye que es necesario utilizar una turbina/generador con el propósito de medir en tiempo real la energía eléctrica que se genera de acuerdo al gradiente térmico que se suministra; así como también recomienda seguir realizando prototipos a nivel laboratorio y utilizar instrumentación propia para saber realmente qué sucede en el experimento y así poder realizar un monitoreo constante y a bajo costo.

Para 2018, Garcia-Huante (40) sugirió que en Puerto Ángel en Oaxaca es un lugar idóneo para realizar la puesta en marcha de esta tecnología.

En el año 2019, Gonzáles Mendoza (42) realizó una evaluación del recurso oceánico en las costas de Michoacán mediante la implementación de una evaluación multicriterio para la toma de decisiones con base a factores y restricciones ambientales, económicas y sociales.

Mediante el análisis multicriterio, determinó que para la energía oceánica por gradiente térmico se tiene una potencia media de 310 a 330 MW, además obtener mediante este análisis, que la energía por oleaje y de gradiente térmico son aprovechables mar adentro; las demás fuentes de energía oceánica no cumplen con el umbral mínimo para el funcionamiento de dispositivos convertidores de energía en mar abierto.

Conclusiones

Los resultados de la Sección 6 permiten hacer una conclusión puntual y breve que se detalla a continuación:

- Una vez realizado el algoritmo de clusterización de “K-Means” se determinaron 5 distribuciones distintas de temperatura en costas mexicanas.
- El cluster 3 de la Figura 6.16 posee el gradiente de temperatura promedio más bajo de los 5 clusters en un periodo de 5 años de datos, ubicándose en sitios principalmente del norte del país en la zona de Baja California Norte y Baja California Sur.
- El cluster 2 (Figura 6.15) y el cluster 4 (Figura 6.17) contienen la información de los sitios con el gradiente de temperatura promedio más altos para las zonas de Guerrero, Chiapas y Quintana Roo, siendo estos dos últimos los seleccionados como idóneos para la puesta en marcha de una planta OTEC y que pertenecen al cluster número 4.
- La simulación OTEC se realizó en la Isla de Cozumel, Quintana Roo y en la costa cercana del pueblo de “El Palmarcito” en el municipio de Pijijiapan, Chiapas. Los parámetros de la simulación para ambos sitios se encuentran en la Tabla 6.9.
- Las simulaciones concluyeron que el amoniaco R717 para ambas regiones de Chiapas y Quintana Roo mejoró notablemente la eficiencia térmica, exergética y la potencia neta del ciclo.
- El sitio idóneo para colocar una planta OTEC en las costas mexicanas es en el pueblo de “El Palmarcito” en Chiapas, debido a que la potencia neta promedio (12.0980 ± 1.6621 [MW]) y la eficiencia exergética promedio (29.0226 ± 2.5870 [%]) es mayor a los valores de los mismos parámetros en Isla de Cozumel: 10.0770 ± 1.4159 [MW] y 24.1911 ± 2.0370 [%] respectivamente.
- El amoniaco R717 se escogió como mejor fluido de trabajo ya que, entre otros aspectos, posee una temperatura y presión crítica mayor a los otros fluidos de

trabajo considerados en el análisis, ya que esto permite que la temperatura y presión a la entrada de la turbina sea mayor, permitiendo así una mayor eficiencia del ciclo.

8.1. Trabajo futuro

El trabajo futuro relacionado a este trabajo es de amplio espectro debido a que se han omitido diversos aspectos que son de vital importancia para un análisis más detallado de la factibilidad de este proyecto.

La lista de trabajo futuro incluye:

- Determinar el número óptimo de grupos a seleccionar para el algoritmo de clus-terización mediante el método gráfico de la “curva de codo” (elbow curve).
- Analizar la viabilidad del proyecto en las zonas seleccionadas de acuerdo a factores ambientales (estudiar presencia de zonas naturales protegidas), turismo de la región, estudios sociales para la determinación de la utilidad del proyecto en la zona (aceptación social), entre otros factores.
- Realizar variación de parámetros de todos los componentes del ciclo (turbinas, evaporadores, condensadores, fluidos de trabajo orgánicos) y determinar con cuál configuración se tiene una mayor eficiencia neta, exergética y potencia neta.
- Obtener valores de gradiente térmico a menor profundidad y proponer acciones para reemplazar el trabajo realizado por la bomba de agua de mar profunda.
- Realizar simulaciones individuales utilizando R744 (CO₂) para demostrar su po-tencial y efecto sobre los parámetros del ciclo antes mencionados, así como fo-mentar la investigación y desarrollo del secuestro de CO₂.

Apéndice

En esta sección se enlistarán las librerías de python más utilizadas en este trabajo, así como también fundamentos teóricos termodinámicos.

A.1. Fundamentos teóricos

A.1.1. Entalpía

En la mayoría de procesos termodinámicos en donde están involucrados la generación de electricidad y refrigeración, aparecen dos propiedades que son fundamentales para el entendimiento de estos: la energía interna u y la relación presión-volumen Pv y se expresa de la forma $u + Pv$. Por cuestiones de simplicidad, se le da una definición a esta relación, denominándola entalpía, que viene dada por la Ecuación A.1:

$$h = u + Pv \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (\text{A.1})$$

donde:

u - Energía interna específica, $\frac{kJ}{kg}$

P - Presión, kPa

v - Volumen específico, $\frac{m^3}{kg}$

Mollier reconoció la importancia de esta relación en las turbinas de vapor y en este tipo de procesos de manera gráfica (38).

A.1.2. Estados de vapor saturado y líquido saturado

Esta cantidad se conforma de la diferencia de la entalpía del líquido saturado y la entalpía del vapor saturado y se expresa de la siguiente manera:

$$h_{fg} = h_f - h_g \quad (\text{A.2})$$

donde:

h_f - Entalpía del líquido saturado, $\frac{kJ}{kg}$

h_g - Entalpía del vapor saturado, $\frac{kJ}{kg}$

Este concepto representa la cantidad de energía requerida para vaporizar una unidad de masa de un líquido saturado a una temperatura/presión dadas.

La relación establece que, a mayor temperatura o presión, el valor de la entalpía de saturación disminuirá ya que se necesita menos energía debido a una temperatura mayor. Esta se vuelve cero cuando el estado se encuentra en el punto crítico (38).

A.1.3. Mezcla saturada: calidad x

En este estado transitorio en la que un fluido pasa de un estado líquido a vapor, coexisten estos dos estados al mismo tiempo, llamando a esto una mezcla de estos dos estados.

Para comprender más este proceso, se ha creado una relación termodinámica en la que se analiza la cantidad de masa de la fase líquida y de la fase en vapor. Dicha relación tomó el nombre de *calidad* “ x ” y se define de la siguiente manera:

$$x = \frac{m_{vapor}}{m_{total}} \quad (A.3)$$

donde:

m_{vapor} - la cantidad de masa de vapor en el fluido, kg

m_{total} - la cantidad de masa total en el fluido, definiendo esta como $m_{total} = m_{liquid} + m_{vapor}$, kg

ó

$$x = \frac{v_i - v_f}{v_{fg}} \quad (A.4)$$

donde:

v_i - valor actual/promedio del volumen específico, $\frac{m^3}{kg}$

v_f - valor del volumen específico del líquido saturado a una temperatura/presión dada, $\frac{m^3}{kg}$

v_{fg} - valor de la diferencia del volumen específico del líquido saturado menos el volumen específico del vapor saturado a una temperatura/presión dada, $\frac{m^3}{kg}$

Este valor toma cantidades desde 0 (líquido saturado) a 1 (vapor saturado) y puede fungir como una de las dos propiedades intensivas independientes necesarias para describir un estado (38).

Durante un proceso de vaporización, lo único que cambia del fluido es la cantidad de líquido y vapor saturado, pero sus propiedades termodinámicas se conservan intactas a una presión y temperatura dadas.

La Ecuación A.4 se puede expresar de la misma manera para la entalpía y la energía interna, dando como resultado una expresión “generalizada” para el volumen específico, la entalpía y la energía interna que se describe de la siguiente manera:

$$y_i = y_f + xy_{fg} \quad (\text{A.5})$$

donde:

y_i - valor actual/promedio de las propiedades termodinámicas antes mencionadas, $\frac{m^3}{kg}$ ó $\frac{kJ}{kg}$
 y_f - valor de líquido saturado de una de las propiedades termodinámicas mencionadas, $\frac{m^3}{kg}$ ó $\frac{kJ}{kg}$
 x - valor de la calidad del fluido en cuestión
 y_{fg} - valor de la diferencia de líquido y vapor saturado de una de las propiedades mencionadas anteriormente, $\frac{m^3}{kg}$ ó $\frac{kJ}{kg}$

Este valor medio o puntual y_i siempre estará entre el valor del líquido saturado y del vapor saturado, satisfaciendo la siguiente relación:

$$y_f \leq y_i \leq y_g \quad (\text{A.6})$$

,donde:

y_f - valor de la propiedad del líquido saturado
 y_g - valor de la propiedad del vapor saturado

A.1.4. Ecuación de balance de Energía

La definición del balance de energía es el enunciado de la conservación de la energía que estipula que el cambio neto de la energía del sistema durante un proceso es igual a la diferencia de la energía total que entra al sistema menos la energía total que sale del mismo durante un proceso (38). Esta relación matemática es aplicable para cualquier tipo de sistema que experimenta diversos procesos.

Existen diferentes formas en las que la energía se puede encontrar, como lo es la energía cinética (referente al movimiento de partículas), la energía potencial (la que es debida a la altura del sistema) y la energía interna (referente a la energía molecular del sistema), energía nuclear, entre otras. Es por esta razón que para un ingeniero es de suma importancia lograr identificar estas formas de energía para realizar un balance de esta, y sobretodo, identificar cada uno de los estados o procesos en los que se encuentre el sistema.

Al hablar de sistema, se hace referencia a que existe energía que entra y sale de este, y esta energía puede ser por transferencia de calor, transferencia de trabajo o energía asociada al transporte de materia. Por simplicidad, se tomará el caso de estado estacionario, en el que, las propiedades tales como el volumen, la masa o la energía,

permanecerán constantes en el tiempo (38), por lo que la ecuación de balance de energía en estado estacionario será la siguiente:

$$Q_{in} + W_{in} + \sum_{in} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) = Q_{out} + W_{out} + \sum_{out} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) \left[\frac{\text{Energía}}{\text{Masa}} \right] \quad (\text{A.7})$$

donde:

- Q_{in} - Transferencia de calor entrante al sistema por unidad de masa, $\frac{kJ}{kg}$
- Q_{out} - Transferencia de calor saliente del sistema por unidad de masa, $\frac{kJ}{kg}$
- W_{in} - Transferencia de trabajo entrante al sistema por unidad de masa, $\frac{kJ}{kg}$
- W_{out} - Transferencia de trabajo saliente al sistema por unidad de masa, $\frac{kJ}{kg}$
- $\sum_{in/out} \theta$ - Suma de la energía del flujo del fluido $\theta = h + \frac{v^2}{2} + gz$ por unidad de masa para cada entrada y salida de masa, $\frac{kJ}{kg}$
- $h \left[\frac{\text{Energía}}{\text{Masa}} \right]$ - Entalpía de entrada o salida del volumen de control, $\frac{kJ}{kg}$
- $V \left[\frac{\text{Distancia}}{\text{Tiempo}} \right]$ - Velocidad del fluido de entrada o salida del volumen de control, $\frac{m}{s}$
- $gz \left[\frac{\text{Energía}}{\text{Masa}} \right]$ - Energía potencial del fluido por unidad de masa, $\frac{kJ}{kg}$

La Ecuación A.7 se puede expresar de la misma manera, contemplando el flujo másico en la ecuación para obtener potencia; eso se logra con la siguiente relación:

$$\dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in} + \sum_{in} \dot{m} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) = \dot{Q}_{out} + \dot{W}_{out} + \sum_{out} \dot{m} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) \left[\frac{\text{Energía}}{\text{Tiempo}} \right] \quad (\text{A.8})$$

donde:

- \dot{Q}_{in} - Transferencia de calor entrante al sistema por unidad de tiempo, kW
- \dot{Q}_{out} - Transferencia de calor saliente del sistema por unidad de tiempo, kW
- \dot{W}_{in} - Transferencia de trabajo entrante al sistema por unidad de tiempo, kW
- \dot{W}_{out} - Transferencia de trabajo saliente al sistema por unidad de tiempo, kW
- \dot{m} - Flujo másico, $\frac{kg}{s}$
- $\sum_{in/out} \dot{m}\theta$ - Suma de la energía del flujo del fluido $\theta = h + \frac{v^2}{2} + gz$ por unidad de tiempo para cada entrada y salida de masa, $\frac{kg}{s} * \frac{kJ}{kg} = kW$
- $h \left[\frac{\text{Energía}}{\text{Masa}} \right]$ - Entalpía de entrada o salida del volumen de control, $\frac{kJ}{kg}$
- $V \left[\frac{\text{Distancia}}{\text{Tiempo}} \right]$ - Velocidad del fluido de entrada o salida del volumen de control, $\frac{m}{s}$
- $gz \left[\frac{\text{Energía}}{\text{Masa}} \right]$ - Energía potencial del fluido, $\frac{kJ}{kg}$

A.1.5. Ecuación de balance de Entropía

“ ...el cambio de entropía de un sistema durante un proceso es mayor a la transferencia de entropía en una cantidad igual a la entropía generada durante el proceso

dentro del sistema” (38). Este concepto refiere a la medida de la cantidad del desorden molecular en un sistema.

Para sistemas cerrados, la ecuación de balance de entropía se puede expresar de la siguiente manera:

$$S_{in} - S_{out} + S_{gen} = \Delta S_{system} \quad (A.9)$$

donde:

S_{in} - Entropía de entrada al sistema, $\frac{kJ}{kg \cdot K}$

S_{out} - Entropía de salida del sistema, $\frac{kJ}{kg \cdot K}$

Y de igual manera se puede expresar como:

$$\sum_{k=1}^n \frac{Q_k}{T_k} + S_{gen} = S_2 - S_1 \quad (A.10)$$

donde:

Q_k - Transferencia de calor desde o hacia el sistema, $\frac{kJ}{kg}$

T_k - Temperatura absoluta desde o hacia el sistema, K

S_{gen} - Entropía generada, $\frac{kJ}{kg \cdot K}$

S_2 - Entropía del estado final, $\frac{kJ}{kg \cdot K}$

S_1 - Entropía del estado inicial, $\frac{kJ}{kg \cdot K}$

A.1.6. Ecuación de balance de Exergía

Para el caso general del balance de exergía se tiene la siguiente relación denotada por Cengel (38):

$$\chi_{in} - \chi_{out} - \chi_{destr} = \Delta \chi_{system} \quad (A.11)$$

donde:

χ_{in} - Exergía entrante al sistema, $\frac{kJ}{kg}$

χ_{out} - Exergía saliente del sistema, $\frac{kJ}{kg}$

χ_{destr} - Exergía destruida, $\frac{kJ}{kg}$

χ_{system} - Exergía del sistema, $\frac{kJ}{kg}$

Para sistemas cerrados se tiene que la ecuación anterior se reduce y desglosa como:

$$\sum_{k=1}^n \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) Q_k - [W - P_0 (v_2 - v_1)] - T_0 S_{gen} = \chi_2 - \chi_1 \quad (A.12)$$

donde:

T_0 - Temperatura de los alrededores del sistema (generalmente 298.150K, K)

T_k - Temperatura del sistema para el proceso k, K

Q_k - Transferencia de calor del sistema para el proceso k, $\frac{kJ}{kg}$

P_0 - Presión de los alrededores del sistema (generalmente 101.325 kPa), kPa

v_2 - Volumen específico del estado final, $\frac{m^3}{kg}$
 v_1 - Volumen específico del estado inicial, $\frac{m^3}{kg}$
 S_{gen} - Entropía generada en el sistema, $\frac{kJ}{kg \cdot K}$
 χ_1 - Exergía del estado inicial, $\frac{kJ}{kg}$
 χ_2 - Exergía del estado final, $\frac{kJ}{kg}$

A.2. Python

A.2.1. Librerías

La definición práctica de las librerías se basará en la descripción realizada por Müller y Guido (43) a menos que se indique lo contrario.

A.2.1.1. Pandas

Es una librería para el manejo y análisis de datos numéricos y/o texto y fue creada pensando en las bases de datos de R . Estas bases de datos tanto en Python como en R tienen la forma de una hoja de cálculo Microsoft Excel, permitiendo operaciones de filtrado similares a las bases de datos creadas en SQL.

Estas bases de datos pueden ser creadas a partir de archivos de datos de distinto formato, como por ejemplo: .csv, .xlsx, .json, entre otros, y posee la habilidad de almacenar diversos tipos de datos en cada columna como se mencionó en un principio.

A.2.1.2. Matplotlib

Es la librería principal para gráficas científicas en python capaz de realizar gráficas de calidad científica como histogramas, gráficas de puntos, de líneas, gráficas de barras, diagrama de cajas, entre otras.

A.2.1.3. CoolProp

Esta es una librería de código abierto de propiedades termofísicas escrita originalmente en C++, y que tiene extensiones para diversos programas y lenguajes como es el caso de Microsoft Excel, Matlab, Python, entre otras. Esta fue creada por Bell et al. (21).

A la fecha de creación de esta (2014), se tiene registro de 110 sustancias puras y pseudo-puras, así como también las propiedades de 40 fluidos incompresibles y aire húmedo.

Una de las mayores limitaciones de esta librería así como de otras similares, es que no incluyen mezclas de fluidos. Esto se debe a que la solución computacional de estas,

representan un reto tecnológico a comparación de las propiedades termodinámicas de fluidos puros.

Cabe mencionar que, las propiedades termodinámicas de todos los fluidos implementados en esta librería son basadas en las ecuaciones de estado explícitas de energía de Helmholtz.

A.2.1.4. IAPWS-08

Esta librería corresponde a la implementación en python de las propiedades termodinámicas del agua de mar de la “Asociación Internacional para las Propiedades del Agua y Vapor” (IAPWS, por sus siglas en inglés) fundamentadas en el trabajo de la IAPWS en Berlin, Alemania (39), con su implementación en Python por Gómez Romera (44).

Bibliografía

- [1] F. Roa, “Electrodiálisis,” Julio 2014. Obtenido el 01 de Junio de 2020 de <https://desalinizaciondelagua.wordpress.com/2014/07/14/electrodialisis/>. [XI, 11](#)
- [2] P. Marchand, “The French OTEC Program,” in *Proceedings of the 6th Ocean Thermal Energy Conversion Conference: Ocean Thermal Energy for the 80’s*, pp. 1–6, 1980. [XI, 13, 14](#)
- [3] J. Yue, D. Li, Z. Li, G. Xiao, L. Zhang, Y. Wu, and T. Yu, “Performance simulation of solar-ocean thermal energy conversion,” in *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE*, vol. 10, American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2018. [XI, 1, 15, 16](#)
- [4] N. H. Mohd Idrus, M. N. Musa, W. J. Yahya, and A. M. Ithnin, “Geo-Ocean Thermal Energy Conversion (GeOTEC) power cycle/plant,” *Renewable Energy*, vol. 111, pp. 372–380, 2017. [XI, 1, 16, 17](#)
- [5] S. S. Park, W. Joong Kim, Y. H. Kim, J. D. Hwang, and N. J. Kim, “Regenerative OTEC systems using condenser effluents discharged from three nuclear power plants in South Korea,” *International Journal of Energy Research*, vol. 39, pp. 397–405, mar 2015. [XI, 1, 18](#)
- [6] A. Khosravi, S. Syri, M. Assad, and M. Malekan, “Thermodynamic and economic analysis of a hybrid ocean thermal energy conversion/photovoltaic system with hydrogen-based energy storage system,” *Energy*, vol. 172, pp. 304–319, apr 2019. [XI, 19](#)
- [7] Y. Matsuda, D. Urayoshi, S. Goto, T. Sugi, T. Morisaki, T. Yasunaga, and Y. Ikegami, “Seawater flow rate regulation of OTEC plant using Uehara cycle by considering warm seawater temperature variation,” *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, vol. 13, no. 6, pp. 2123–2131, 2017. [XI, 1, 21](#)
- [8] X. Zhang, M. He, and Y. Zhang, “A review of research on the Kalina cycle,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 7, pp. 5309–5318, 2012. [XI, 22](#)

BIBLIOGRAFÍA

- [9] G. P. Vanegas, V. C. Cerón, J. V. H. Fontes, Y. R. Cueto, G. C. Sánchez, A. F. Delgado, R. G. Huerta, E. L. Honorato, and S. Casarín, “El Futuro de las Energías Marinas en México,” *Temas de Agenda para la Sostenibilidad de Costas y Mares Mexicanos*, pp. 255–274, 2019. [XI](#), [3](#), [7](#), [25](#), [26](#), [27](#), [61](#), [81](#)
- [10] K. Rahbar, S. Mahmoud, R. K. Al-Dadah, N. Moazami, and S. A. Mirhadizadeh, “Review of organic Rankine cycle for small-scale applications,” *Energy Conversion and Management*, vol. 134, pp. 135–155, 2017. [XI](#), [XI](#), [XI](#), [XI](#), [XI](#), [XII](#), [29](#), [30](#), [31](#), [33](#), [35](#), [36](#), [37](#), [38](#), [39](#)
- [11] M. Wang, R. Jing, H. Zhang, C. Meng, N. Li, and Y. Zhao, “An innovative Organic Rankine Cycle (ORC) based Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) system with performance simulation and multi-objective optimization,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 145, pp. 743–754, dec 2018. [XI](#), [XV](#), [31](#), [32](#), [69](#), [72](#), [73](#), [74](#)
- [12] L. D. Talley, G. L. Pickard, W. J. Emery, and J. H. O. Swift, “Typical Distributions of Water Characteristics,” in *Descriptive Physical Oceanography: an introduction*, pp. 67–111, Elsevier, 2011. [XII](#), [XII](#), [39](#), [40](#), [43](#)
- [13] ESRI, “Fundamentals of netCDF data storage—ArcGIS Pro — Documentation,” 2019. Obtenido de: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/help/data/multidimensional/fundamentals-of-netcdf-data-storage.htm>. [XII](#), [45](#), [46](#)
- [14] “HYCOM + NCODA Global 1/12deg Analysis.” Funding for the development of HYCOM has been provided by the National Ocean Partnership Program and the Office of Naval Research. Data assimilative products using HYCOM are funded by the U.S. Navy. Computer time was made available by the DoD High Performance Computing Modernization Program. The output is publicly available at <http://hycom.org>. [XII](#), [XII](#), [3](#), [4](#), [47](#), [48](#), [49](#)
- [15] Sentdex, “Clustering introduction - practical machine learning tutorial with python p.34.” YouTube, 2016. [XII](#), [56](#)
- [16] H. Kobayashi, S. Jitsuhara, and H. Uehara, “The Present Status and Features of OTEC and Recent Aspects of Thermal Energy Conversion Technologies,” *Engineering*, pp. 1–8, 2001. [XV](#), [13](#), [14](#), [15](#)
- [17] J. Rovisham, S. Doorga, O. Gooroochurn, B. Anand, and M. Vimal, “A novel modelling approach to the identification of optimum sites for the placement of ocean thermal energy conversion (OTEC) power plant : application to the tropical island climate of Mauritius,” *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, vol. 9, no. 4, pp. 363–382, 2018. [1](#)
- [18] D. A. Devault and A. Péné-Annette, “Analysis of the environmental issues concerning the deployment of an OTEC power plant in Martinique,” *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 24, pp. 25582–25601, nov 2017. [1](#)

-
- [19] E. P. Garduño Ruiz, A. García Huante, Y. Rodríguez Cueto, J. F. Bárcenas Graniel, M. a. Alatorre Mendieta, E. Cerezo Acevedo, J. G. Tobal Cupul, V. M. Romero Medina, and R. Silva Casarín, “Desventajas y limitaciones de OTEC,” in *Conversión de Energía Térmica Oceánica (OTEC), Estado del Arte*, pp. 45–47, Campeche, México: Instituto de Ingeniería, UNAM, 1 ed., 2017. [1](#), [81](#)
- [20] H. Ishaq, O. Siddiqui, and I. Dincer, “Design and Analysis of a Novel Integrated Wind-Solar-OTEC Energy System for Producing Hydrogen, Electricity, and Fresh Water,” *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 141, dec 2019. [1](#)
- [21] I. H. Bell, J. Wronski, S. Quoilin, and V. Lemort, “Pure and pseudo-pure fluid thermophysical property evaluation and the open-source thermophysical property library coolprop,” *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 53, no. 6, pp. 2498–2508, 2014. [2](#), [4](#), [75](#), [90](#)
- [22] J. V. Hernández-Fontes, A. Felix, E. Mendoza, Y. R. Cueto, and R. Silva, “On the Marine Energy Resources of Mexico,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 7, p. 191, jun 2019. [3](#)
- [23] H. M. Aviña Jiménez, *Factibilidad de instalar una planta OTEC (Conversión de la energía oceánica térmica del océano) en las costas de México*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, 2007. [3](#), [81](#)
- [24] Unidata, “Unidata — NetCDF.” Obtenido de: <https://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/>. [4](#)
- [25] A. Hussain, S. M. Arif, and M. Aslam, “Emerging renewable and sustainable energy technologies: State of the art,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 71, no. January, pp. 12–28, 2017. [7](#)
- [26] M. Melikoglu, “Current status and future of ocean energy sources: A global review,” jan 2018. [7](#), [8](#)
- [27] M. T. Graciá Ribes, *Estudio de las diferentes formas de conseguir energía con el mar y su aplicabilidad en el litoral español*. Proyecto final de carrera, Universitat Politècnica de Catalunya, 2014. [10](#)
- [28] P. K. Takahashi and A. Trenka, “Ocean thermal energy conversion: Its promise as a total resource system,” *Energy*, vol. 17, no. 7, pp. 657–668, 1992. [13](#)
- [29] “CEMIE Océano.” Centro Mexicano de Innovación en Energía del Océano, <https://cemioceano.mx/>. [25](#)
- [30] E. Galloway and L. Hebert, *History and Progress of the Steam Engine: With a Practical Investigation of Its Structure and Application*. 1836. [29](#)
- [31] S. Quoilin, *Sustainable Energy Conversion Through the Use of Organic Rankine Cycles for Waste Heat Recovery and Solar Applications*. Phd tesis for applied sciences, University of Liège, 2011. [29](#)
-

BIBLIOGRAFÍA

- [32] IEA, “Key world energy statistics,” tech. rep., IEA, 2008. [35](#)
- [33] B. G. Halliwell, “HYCOM Overview,” Tech. Rep. February, 2002. [47](#)
- [34] QGIS Development Team, *QGIS Geographic Information System*. Open Source Geospatial Foundation, 2016. [51](#)
- [35] QGIS Development Team, *QGIS Geographic Information System*. Open Source Geospatial Foundation, 2018. [52](#)
- [36] L. A. Vega, “Ocean thermal energy conversion,” *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*, vol. 1975-May, no. August, pp. 7296–7328, 2012. [70](#), [71](#), [72](#), [73](#)
- [37] F. Chen, L. Liu, J. Peng, Y. Ge, H. Wu, and W. Liu, “Theoretical and experimental research on the thermal performance of ocean thermal energy conversion system using the rankine cycle mode,” *Energy*, vol. 183, pp. 497–503, sep 2019. [72](#), [73](#)
- [38] Y. A. çengel and M. A. Boles, *Thermodynamics: an engineering approach*. McGraw Hill Education, 8 ed., 2014. [74](#), [85](#), [86](#), [87](#), [88](#), [89](#)
- [39] “Release on the IAPWS Formulation 2008 for the Thermodynamic Properties of Seawater,” tech. rep., The International Association for the Properties of Water and Steam, Berlin, Germany, 2008. [75](#), [91](#)
- [40] A. García Huante, Y. Rodríguez Cueto, R. Silva, E. Mendoza, and L. Vega, “Determination of the Potential Thermal Gradient for the Mexican Pacific Ocean,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 6, no. 1, pp. 20–31, 2018. [79](#), [82](#)
- [41] V. E. Luna Gómez, *Instrumentación y control de plantas de energía térmica del océano y monitoreo de los parámetros oceanográficos de su entorno en tiempo real*. Maestría en ciencias (oceanografía física), Universidad Nacional Autónoma de México, 2017. [82](#)
- [42] J. L. Gonzáles Mendoza, *Evaluación del potencial de las energías del océano en el Estado de Michoacán*. Maestría en ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 2019. [82](#)
- [43] A. C. Müller and S. Guido, *Introduction to Machine Learning with Python: A Guide for Data Scientists*. California, United States: O’Reilly, 1st ed., 2016. [90](#)
- [44] J. J. Gómez Romera, “iapws.iapws08 module,” tech. rep., 2014. [91](#)