



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES

ESTUDIO DE VIABILIDAD DE UN SISTEMA DE
ENERGÍA OCEÁNICA POR GRADIENTE TÉRMICO
ASISTIDO CON TECNOLOGÍA TERMOSOLAR
(SOTEC) EN LAS COSTAS DEL NOROESTE DE
MÉXICO.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
Ingeniero en Energías Renovables

PRESENTA:

Jesús Florido Ortega

Tutor de tesis:

Edgar Gerardo Mendoza Baldwin

Temixco Morelos, 15 de enero de 2021



IER

Instituto de Energías
Renovables



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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/003/2021

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 15 de enero de 2021, a las 10:00 hrs., 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. JESÚS FLORIDO ORTEGA**, con número de cuenta 313261839 de la Licenciatura de Ingeniería en Energías Renovables, llevará a cabo la presentación del trabajo de tesis y examen profesional titulado:

“Estudio de viabilidad de un sistema de energía oceánica por gradiente térmico asistido con tecnología termosolar (SOTEC) en las costas del noroeste de México”

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. FABIOLA MÉNDEZ ARRIAGA
SECRETARIO:	DR. EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN
SUPLENTE:	DR. MIGUEL ROBLES PÉREZ
SUPLENTE:	DR. DAVID MORILLÓN GÁLVEZ

Sin otro particular, le envío un cordial saludo.

Atentamente,
“Por mi raza hablará el espíritu”
 Temixco, Mor., a 11 de enero 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

0.1. Jurado asignado

Presidente: Dr. Sergio Cuervas García.

Vocal: Dra. Fabiola Méndez Arriaga.

Secretario: Dr. Edgar Gerardo Mendoza Baldwin.

1er Suplente: Dr. Miguel Robles Pérez.

2ndo Suplente: Dr. David Morillón Gálvez.

Firma: _____

Tutor de Tesis
Edgar Gerardo Mendoza Baldwin

0.2. Agradecimientos

Soy consciente de que cada mérito propio es el resultado de un conjunto de interacciones colectivas de distintos tipos que a su vez nos permiten avanzar y madurar en nuestro camino de la vida, es por ello que me gustaría agradecer en primera instancia a Dios por la vida que me ha dado y por la oportunidad de seguirla desempeñando. En segundo lugar, me complace agradecer a mis padres Guillermina Ortega Cabrera y Jesús Florido Díaz por todos sus esfuerzos empeñados en mi vida, en la suya y en la de mis hermanas permitiéndonos desenvolver nuestros sueños. Acto seguido, me gustaría agradecerle a cada uno de los integrantes de mi familia más cercana, a mis dos hermanas Sara Metzin Margarita Florido Ortega y Karla Paola Florido Ortega, a mi tía Rufina Ortega Cabrera, a mi primo José Roberto Macias Ortega, Jonathan Macias Ortega y familia, a mi abuela María del Refugio Díaz y Barragán, a mi tío Santiago Florido Díaz quienes siempre han estado a mi lado, me han apoyado y guiado en mi vida. También y no menos importante, me gustaría agradecerle a todos los integrantes de mi familia en general por su apoyo incondicional en mi existir, a partir del cual tomé inspiración para lograr este momento de mi vida. También me gustaría agradecerle a mi perrita Lila por siempre extenderme cariño y compañía incondicional.

De manera general, me gustaría agradecerle a todos mis amigos, compañeros y conocidos del IER con quienes compartí y fui formando mi inspiración. En particular, le agradezco a mi generación 5G con quienes viví la universidad, destacando a Natalia Correa Solis, Sebastián Alberto Reyes Romero y Lourdes Guadalupe Zamora García.

Por otro lado, me gustaría agradecerle a Jael Cordova Gallegos por su cariño, compañía y apoyo que me otorgó desde el inicio de mis inspiraciones alrededor de este trabajo. De igual manera, agradezco a la familia Córdova Gallegos por su apoyo y ánimos durante la elaboración de este trabajo.

Además, quisiera extender un enorme agradecimiento a la UNAM por la educación y oportunidades académicas que me ha dado, al personal del IER quienes me ayudaron en mi formación e hicieron posibles cada una de las oportunidades que tuve. También quisiera agradecerle a mi tutor Edgar Gerardo Mendoza Baldwin por creer en mí y por apoyarme en la realización de este trabajo. A su vez, quisiera agradecerle a la Doctora Fabiola Méndez Arriaga y al Doctor Rafael Almanza Salgado por permitirme trabajar en las instalaciones de la planta solar, así como toda la ayuda y facilidades que he tenido de su parte. De igual manera, quisiera extender mis agradecimientos a los integrantes de la planta solar por su amistad

y ayuda en todo momento, destacando a Rosalba Chavez Morales quien siempre me ayudó en todo momento.

Índice general

0.1. Jurado asignado	3
0.2. Agradecimientos	4
Índice de figuras	11
Índice de cuadros	19
0.3. Nomenclatura	23
0.4. Unidades	27
0.5. Siglas	28
0.6. Resumen	30
1. Fundamentos	31
1.1. Planteamiento del problema	31
1.2. Hipótesis a comprobar	34
1.3. Objetivos de investigación	35
1.3.1. Objetivo general	35
1.3.2. Objetivos particulares	35
2. Fundamentos teóricos	37
2.1. La energía del océano.	37
2.1.1. Fuerzas de origen radiativo y termodinámico.	38
2.1.2. Fuerzas gravitacionales y rotacionales.	40
2.1.3. Efecto Coriolis	43
2.1.4. Fuerzas de presión	46
2.1.5. Circulación termohalina	47
2.1.6. Aprovechamiento de la energía del océano	51
2.2. Energía solar	63
2.2.1. El sol	63
2.2.2. La constante solar	64
2.2.3. Bases de datos del recurso solar.	66
2.2.4. Dispositivos de conversión fototérmica.	70
2.2.5. Factor modificador del ángulo de incidencia.	72

2.2.6.	Dispositivos termosolares de baja temperatura.	73
2.3.	Plantas OTEC	76
2.3.1.	Historia de la OTEC	76
2.3.2.	Principios de funcionamiento.	79
2.3.3.	Tipos de Plantas OTEC.	83
2.3.4.	Eficiencia OTEC.	91
2.3.5.	Modalidades de plantas OTEC.	92
2.3.6.	Criterios de selección.	93
2.3.7.	Sitios con potencial OTEC en México.	95
2.4.	Análisis de datos.	98
2.4.1.	Machine Learning	98
2.4.2.	Clusterización.	100
2.4.3.	Método de clusterización K-means.	101
3.	Metodología	103
3.1.	Obtención de datos oceanográficos y meteorológicos.	103
3.1.1.	Datos oceanográficos.	103
3.1.2.	Datos meteorológicos	104
3.2.	Curvas de calentadores solares planos.	105
3.3.	Unión,limpieza y manejo de datos oceanográficos.	108
3.3.1.	Programación para la unión y selección de datos para una coordenada y para el noroeste de México.	109
3.3.2.	Extracción de datos de salinidad para el Noroeste de México.	110
3.3.3.	Unión de datos de salinidad NOAA y la selección de datos para una región con una resolución de 1/4°.	110
3.4.	Manejo de datos oceanográficos de manera individual.	111
3.4.1.	Temperatura superficial del mar (HYCOM).	111
3.4.2.	Datos del estudio regional climatológico del Pacífico nororiental (NOAA).	112
3.4.3.	Salinidad superficial del mar(NOAA).	112
3.4.4.	Salinidad superficial del mar (HYCOM).	112
3.4.5.	Union de datos de temperatura y salinidad superficial del mar(HYCOM).	113
3.5.	Clusterización de los datos oceanográficos.	113
3.5.1.	Programación para calcular el número de días/meses al año de cada clúster.	115
3.5.2.	Cálculo de propiedades termodinámicas del agua de mar.	116
3.6.	Unión, manejo de datos meteorológicos.	117

3.7. Simulación del calentamiento del agua superficial del mar con calentadores solares planos.	119
4. Resultados y análisis	129
4.1. Curvas de calentadores solares planos.	129
4.2. Clusterización de los datos oceanográficos.	138
4.2.1. Primer criterio de clusterización.	139
4.2.2. Segundo criterio de clusterización.	145
4.3. Mapas del número de días al año de cada cluster.	153
4.4. Cálculo de propiedades termodinámicas del agua de mar.	157
4.4.1. Tablas de valores	157
4.4.2. Gráficos.	158
4.5. Simulación del calentamiento del agua superficial del mar con calentadores solares planos.	159
4.5.1. Cabo San Lucas, Baja California Sur.	160
4.5.2. Bahía Asunción, Baja California Sur.	166
4.5.3. Rosarito, Baja California.	171
5. Conclusiones.	181
6. Trabajo a futuro.	185
Bibliografía	191
Appendices	197
A. Histogramas de criterios de clusterización.	199
A.1. Primer criterio.	201
A.2. Segundo criterio.	206
B. Propiedades termodinámicas del agua de mar	213
B.1. Densidad.	213
B.2. Calor específico.	215
C. Tablas y gráficos de resultados de la simulación de calentadores solares en las playas de estudio.	219
C.1. Cabo San Lucas, Baja California Sur.	220
C.2. Bahía Asunción, Baja California Sur.	229
C.3. Rosarito, Baja California.	238

Índice de figuras

2.1. El mar, el colector solar más grande de nuestro planeta. . .	37
2.2. Diagrama esquemático del flujo de energía en los componentes del sistema climático [9].	39
2.3. Esquema de distribución de la insolación y re-radiación terrestre en distintas zonas del planeta [9].	40
2.4. Modelo conceptual de la Ley de atracción gravitacional entre dos cuerpos.	41
2.5. Análisis de fuerzas en el modelo de equilibrio de marea [11].	42
2.6. Diagrama de fuerzas en el sistema Sol-Tierra-Luna [9]. . . .	43
2.7. Evolución natural del bajamar y pleamar en la superficie de los mares y océanos [12].	44
2.8. Esquema vectorial general del modelo de equilibrio de marea [11].	44
2.9. Gaspard-Gustave Coriolis [14].	45
2.10. Fuerza de Coriolis para dos espectadores P1 y P2.	45
2.11. Isotermas bajo la superficie oceánica en un plano vertical de norte a sur en el océano Pacífico [15].	46
2.12. Líneas de flujo esquemáticas para la circulación abisal [9]. .	48
2.13. Esquema de la circulación termohalina [16].	49
2.14. Esquema de distribución de temperaturas en función de la profundidad para latitudes, tropicales, latitudes medias y latitudes en zonas polares durante el invierno(línea continua) y el verano (línea punteada) [9].	50
2.15. Pleamar y Bajamar en Bahía de Fundy / Mont Saint-Michel [17].	51
2.16. Mapa de distribución mundial de los rangos de marea [8]. .	52
2.17. Corrientes de marea en isla del Tiburón Sonora [18].	53
2.18. Corrientes oceánicas del Golfo, Brasil y del este de Australia [20].	54
2.19. Corriente oceánica de Agulhas [20].	55

2.20. Corriente oceánica de Kuroshio [20].	56
2.21. Mapa de distribución mundial de la energía de las olas [8].	57
2.22. Desembocadura del Río Amazonas [21].	58
2.23. Esquema mecánico para aprovechar la presión osmótica [22].	59
2.24. Sistema de electrodiálisis inversa [8].	60
2.25. Mapa de distribución mundial de la energía térmica oceánica [8].	61
2.26. Reacción nuclear de fusión dentro del Sol [24].	64
2.27. Espectro solar sobre la atmósfera y a nivel del mar [24]. . .	65
2.28. Irradiación solar global horizontal promedio diaria y total anual (kWh/m^2) [25].	67
2.29. Irradiación global horizontal promedio diaria y total anual en México (kWh/m^2) [25].	68
2.30. Irradiación solar directa normal promedio diaria y total anual en México (kWh/m^2) [25].	69
2.31. Curva de eficiencia instantánea de un calentador solar [24].	71
2.32. Factor modificador del ángulo de incidencia [24].	73
2.33. Calentadores solares planos [24].	74
2.34. Captador de tubos de vacío: a) Flujo directo, b) Flujo indirecto [24].	75
2.35. Captador parabólico compuesto. a) Geometría b) Equipo comercial [24].	75
2.36. Máquina de Carnot [26].	79
2.37. Diagrama temperatura-entropía del ciclo de Carnot [26]. . .	80
2.38. Diagrama temperatura-entropía del ciclo Rankine [26]. . .	81
2.39. Componentes del ciclo Rankine [26].	82
2.40. Diagrama de Planta OTEC de ciclo cerrado en Makai, Hawaii [32].	83
2.41. Esquema del principio de operación de un ciclo abierto OTEC [27].	85
2.42. Diagrama esquemático de un sistema híbrido OTEC [34]. . .	86
2.43. Representación esquemática del ciclo Kalina [34].	87
2.44. Representación esquemática del ciclo Uehara.	88
2.45. Diagrama esquemático de un ciclo GeOTEC [35].	89
2.46. Esquema de un sistema SOTEC y refrigeración por eyector [29].	90
2.47. Esquema de un sistema SOTEC de ciclo cerrado y un electrolizador tipo PEM para la producción de hidrógeno [36]. . .	91
2.48. Comparativa entre la temperatura (a) y de la potencia neta generada (b) considerando como fluido de trabajo al agua superficial del mar y al efluente de enfriamiento nuclear [34].	92

ÍNDICE DE FIGURAS

13

2.49. Esquema conceptual de una planta OTEC on-shore [5].	93
2.50. Esquema conceptual de una planta OTEC off-shore [5].	94
2.51. Gradiente térmico anual histórico en el Pacífico mexicano a una profundidad de bombeo de 500 m [5].	95
2.52. Gradiente térmico anual histórico en el Pacífico mexicano a una profundidad de bombeo de 1000 m [5].	96
2.53. Batimetría del Pacífico mexicano con isolíneas de 500 y 1000 m [5].	97
2.54. Zonas potenciales OTEC y batimetría en el Caribe mexicano [5].	98
2.55. Ideal y principio conceptual del Machine Learning.	99
2.56. Curva del punto codo para estimar el valor de K [41].	100
3.1. Gráfico comparativo entre las curvas instantáneas del calentador ECOSUN y Heliocol.	106
3.2. Diagrama del criterio de selección de coordenadas más cercanas a una ubicación no contemplada en el mallado de datos oceanográficos.	124
4.1. Curvas de eficiencia instantánea de los calentadores solares planos Ecosun y Heliocol considerando un valor de $G=1250 [W/m^2]$. a)Curvas obtenidas a partir del método gráfico, b) Ecuaciones lineales de eficiencia instantánea, c)Curvas cuadráticas de eficiencia instantánea, d)Todas las curvas de eficiencia instantánea disponibles.	131
4.2. Comparación gráfica de las curvas cuadráticas de eficiencia instantánea de los calentadores solares planos Ecosun y Heliocol. a)Comparativa entre las curvas certificadas de los calentadores Ecosun y Heliocol, las curvas obtenidas por el método gráfico y la curva calculada para el calentador solar Heliocol. b)Comparación entre las curvas de eficiencia obtenidas de las certificaciones para los calentadores Ecosun y Heliocol, considerando la modificación propuesta para el calentador Heliocol. c) Comparación entre las curvas del método gráfico, la calculada para el calentador Heliocol y las curvas de eficiencia obtenidas de las certificaciones para los calentadores Ecosun y Heliocol, considerando la modificación para este último. d) Comparación entre las curvas obtenidas a partir del método gráfico y las ecuaciones cuadráticas del calentador Ecosun y Heliocol. Esta última con su modificación pertinente.	137

4.3. Curvas codo contemplando el ajuste desde 1 cluster hasta 9 o 6 clusters en cada archivo oceanográfico.	140
4.4. Gráfico de temperatura contra salinidad de cada conjunto de datos.	142
4.5. Ubicación de los clusters ajustados a los archivos de la NOAA implementando el primer criterio.	143
4.6. Ubicación de los clusters ajustados a los datos seleccionados y a los datos descargados del servidor HYCOM.	144
4.7. Curvas codo contemplando el ajuste desde 1 cluster hasta 9 o 6 clusteres en cada archivo oceanográfico.	146
4.8. Curvas codo contemplando el ajuste desde 1 cluster hasta 9 clusters en cada archivo oceanográfico de la NOAA.	147
4.9. Curvas codo contemplando el ajuste desde 1 cluster hasta 6 clusters en cada archivo oceanográfico del servidor HYCOM.	147
4.10. Gráfico de temperatura contra salinidad de cada conjunto de datos.	149
4.11. Ubicación de los clusteres ajustados a los archivos de la NOAA implementando el primer criterio.	150
4.12. Ubicación de los clusteres ajustados a los datos seleccionados y a los datos descargados del servidor HYCOM.	151
4.13. Ubicación de los clusteres ajustados a los datos de salinidad superficial del mar del estudio mundial de la NOAA.	152
4.14. Mapas ilustrativos que permiten conocer el número de días en los que una coordenada dentro de la unión de los datos HYCOM presentan el cluster 3	154
4.15. Mapas ilustrativos que permiten conocer el número de días en los que una coordenada dentro de la unión de los datos HYCOM presentan el cluster 1	155
4.16. Mapas ilustrativos que permiten conocer el número de días en los que una coordenada dentro de la unión de los datos HYCOM presentan el cluster 2	156
4.17. Cruvas de densidad del agua de mar calculadas(ver figura B.2).	158
4.18. Cruvas del calor específico del agua de mar calculadas (ver figura B.3).	158
4.19. Histogramas del delta de temperaturas obtenidos a partir de 5 a 40 calentadores solares planos interconectados en serie en Cabo San Lucas, Baja California Sur.	161
4.20. Funciones de probabilidad para distintos rangos de operación al día durante todo el estudio de arreglos en serie desde 15 hasta 40 calentadores solares Ecosun o Heliocol.	162

4.21. Delta de temperatura disponible a la salida de cada calentador considerando considerando dos días consecutivos, el primero con condiciones meteorológicas óptimas y el segundo con condiciones desfavorables en Cabo San Lucas, Baja California Sur.	165
4.22. Recurso solar disponible sobre la superficie de los calentadores solares simulados en Cabo San Lucas, Baja California Sur durante los periodos anuales disponibles.	166
4.23. Histogramas del delta de temperaturas obtenidos a partir de 5 a 40 calentadores solares planos interconectados en serie en Bahía Asunción, Baja California Sur.	168
4.24. Funciones de probabilidad para distintos rangos de operación al día durante todo el estudio de arreglos en serie desde 15 hasta 40 calentadores solares Ecosun o Heliocol.	169
4.25. Recurso solar disponible sobre la superficie de los calentadores solares simulados en Bahía Asunción, Baja California Sur durante los periodos anuales disponibles.	172
4.26. Delta de temperatura disponible a la salida de cada calentador considerando considerando dos días consecutivos, el primero con condiciones meteorológicas óptimas y el segundo con condiciones desfavorables en Bahía Asunción, Baja California Sur.	173
4.27. Histogramas del delta de temperaturas obtenidos a partir de 5 a 40 calentadores solares planos interconectados en serie en Rosarito, Baja California.	174
4.28. Funciones de probabilidad para distintos rangos de operación al día durante todo el estudio de arreglos en serie desde 15 hasta 40 calentadores solares Ecosun o Heliocol.	175
4.29. Recurso solar disponible sobre la superficie de los calentadores solares simulados en Rosarito, Baja California durante los periodos anuales disponibles.	178
4.30. Delta de temperatura disponible a la salida de cada calentador considerando considerando dos días consecutivos, el primero con condiciones meteorológicas óptimas y el segundo con condiciones desfavorables en Rosarito, Baja California.	179
5.1. Playas estudiadas y sitios con potencial SOTEC en las costas del noroeste de México.	181

6.1.	Simulador solar dentro de la cámara de envejecimiento de la planta solar.	185
6.2.	Superficies de potencia radiativa por unidad de superficie irradiada por el simulador solar sobre la superficie del calentador OKU.	186
6.3.	Prototipo cubierto durante las pruebas de radiometría sobre su superficie.	187
6.4.	Sensores implementados en el prototipo experimental del sistema.	188
6.5.	Delta de temperatura registrado a la entrada, salida del calentador en agua extraída de la red convencional.	189
6.6.	Delta de temperatura registrado a la entrada, salida del calentador en agua con cloruro de sodio.	189
6.7.	Monitoreo de la temperatura al interior de la cámara de prueba durante la prueba del calentamiento de agua extraída de la red de la planta solar.	190
A.1.	Histogramas de cada cluster ajustado a los datos de temperatura y salinidad del estudio regional climatológico del pacífico nororiental de la NOAA (1995-2004).	201
A.2.	Histogramas de cada cluster ajustado a los datos de temperatura y salinidad del estudio regional climatológico del pacífico nororiental de la NOAA (2005-2012).	202
A.3.	Histogramas de cada cluster ajustado a los datos seleccionados para el noroeste de México.	203
A.4.	Histogramas de cada cluster ajustado a los datos de temperatura y salinidad superficial del servido HYCOM.	204
A.5.	Histogramas de cada cluster ajustado a los datos de temperatura y salinidad del estudio regional climatológico del pacífico nororiental de la NOAA (1995-2004).	206
A.6.	Histogramas de cada cluster ajustado a los datos de temperatura y salinidad del estudio regional climatológico del pacífico nororiental de la NOAA (2005-2012).	207
A.7.	Histogramas de cada cluster ajustado a los datos de temperatura superficial del mar obtenidos del servidor HYCOM.	208
A.8.	Histogramas de cada cluster ajustado a los datos de salinidad superficial del mar obtenidos del servidor HYCOM.	209
A.9.	Histogramas de cada cluster ajustado a los datos de salinidad del estudio mundial de la NOAA, analizando únicamente el noroeste de México.	210

A.10. Histogramas de cada cluster ajustado a los datos seleccionados para el noroeste de México.	211
A.11. Histogramas de cada cluster ajustado a los datos de temperatura y salinidad superficial del mar que resultaron de la unión de los dos estudios obtenidos del servidor HYCOM.	212
B.1. Variación de la densidad del agua de mar en función de la temperatura y salinidad [45].	214
B.2. Tabla de valores de la variación de la densidad en función de la temperatura y de la salinidad [45].	215
B.3. Variación del calor específico del agua de mar en función de la temperatura y salinidad [45].	216
B.4. Tabla de valores de la variación del calor específico en función de la temperatura y de la salinidad [45].	217
C.1. Funciones de probabilidad para distintos rangos de operación al día durante el 2014 de arreglos en serie desde 15 hasta 40 calentadores solares Ecosun o Heliocol instalados en Cabo San Lucas, Baja California Sur.	225
C.2. Funciones de probabilidad para distintos rangos de operación al día durante el 2015 de arreglos en serie desde 15 hasta 40 calentadores solares Ecosun o Heliocol instalados en Cabo San Lucas, Baja California Sur.	226
C.3. Funciones de probabilidad para distintos rangos de operación al día durante el 2016 de arreglos en serie desde 15 hasta 40 calentadores solares Ecosun o Heliocol instalados en Cabo San Lucas, Baja California Sur.	227
C.4. Funciones de probabilidad para distintos rangos de operación al día durante el 2017 de arreglos en serie desde 15 hasta 40 calentadores solares Ecosun o Heliocol instalados en Cabo San Lucas, Baja California Sur.	228
C.5. Funciones de probabilidad para distintos rangos de operación al día durante el 2014 de arreglos en serie desde 15 hasta 40 calentadores solares Ecosun o Heliocol instalados en Bahía Asunción, Baja California Sur.	234
C.6. Funciones de probabilidad para distintos rangos de operación al día durante el 2015 de arreglos en serie desde 15 hasta 40 calentadores solares Ecosun o Heliocol instalados en Bahía Asunción, Baja California Sur.	235

C.7. Funciones de probabilidad para distintos rangos de operación al día durante el 2016 de arreglos en serie desde 15 hasta 40 calentadores solares Ecosun o Heliocol instalados en Bahía Asunción, Baja California Sur.	236
C.8. Funciones de probabilidad para distintos rangos de operación al día durante el 2017 de arreglos en serie desde 15 hasta 40 calentadores solares Ecosun o Heliocol instalados en Bahía Asunción, Baja California Sur.	237
C.9. Funciones de probabilidad para distintos rangos de operación al día durante el 2014 de arreglos en serie desde 15 hasta 40 calentadores solares Ecosun o Heliocol instalados en Rosarito, Baja California.	243
C.10. Funciones de probabilidad para distintos rangos de operación al día durante el 2015 de arreglos en serie desde 15 hasta 40 calentadores solares Ecosun o Heliocol instalados en Rosarito, Baja California.	244
C.11. Funciones de probabilidad para distintos rangos de operación al día durante el 2016 de arreglos en serie desde 15 hasta 40 calentadores solares Ecosun o Heliocol instalados en Rosarito, Baja California.	245
C.12. Funciones de probabilidad para distintos rangos de operación al día durante el 2017 de arreglos en serie desde 15 hasta 40 calentadores solares Ecosun o Heliocol instalados en Rosarito, Baja California.	246

Índice de cuadros

2.1. Mínima distancia para países con costas con agua cálida tropical [22].	62
2.2. Bases de datos solares de libre acceso.	70
3.1. Playas ubicadas en el noroeste de México seleccionadas para descargar sus años meteorológicos típicos del servidor de NREL. Las coordenadas de latitud y longitud corresponden a un punto sobre el mar cercano a cada playa descrita en este cuadro.	105
3.2. Ecuaciones de eficiencia instantánea para los calentadores Ecosun y Heliocol de acuerdo con sus certificadores, en donde $P=Ti-Ta$	107
3.3. Códigos asignados dentro del programa de simulación de calentadores solares planos en el noroeste de México para cada una de las 3 playas de estudio.	120
4.1. Medidas de los ejes de la figura 3.1	129
4.2. Coordenadas de la curva de eficiencia instantánea del calentador solar plano Heliocol obtenidas de la figura 3.1 por el método gráfico.	130
4.3. Coordenadas de la curva de eficiencia instantánea del calentador solar plano Ecosun obtenidas de la figura 3.1 por el método gráfico.	130
4.4. Curvas cuadráticas ajustadas a los valores del calor útil para los calentadores solares planos Ecosun y Heliocol, tanto para el método gráfico como para la curva cuadrática del laboratorio Solar Rating.	132
4.5. Ecuaciones de eficiencia instantánea de los calentadores solares planos Ecosun y Heliocol, tanto para el método gráfico como para la curva cuadrática del laboratorio Solar Rating.	133

4.6. Corrección del coeficiente constante del término de segundo grado de la ecuación de eficiencia instantánea del calentador solar plano Heliocol reportada en la certificación realizado por Florida Solar Energy Center, en donde $P=(T_i-T_a)$.	135
4.7. Asignación de colores para cada cluster.	138
4.8. Valores de densidad del agua de mar contemplando distintos valores de temperatura y salinidad (ver figura B.2). . . .	157
4.9. Valores del calor específico del agua de mar contemplando distintos valores de temperatura y salinidad (ver figura B.4).	157
4.10. Cantidad de datos oceanográficos disponibles para cada uno de los puntos más cercanos a una coordenada sobre el mar cerca de Cabo San Lucas, Baja California Sur.	160
4.11. Resultados característicos de los periodos anuales de la simulación.	163
4.12. Valor promedio de radiación solar necesaria para obtener un delta de temperatura mayor o igual a 20°C en función del número de calentadores solares planos Ecosun/Heliocol instalados en Cabo San Lucas, junto con sus valores de desviación estándar asociados.	164
4.13. Coordenadas más cercanas dentro del mallado de los datos oceanográficos del servidor HYCOM con disponibilidad de datos para un punto sobre el mar cerca de Bahía Asunción, Baja California Sur.	167
4.14. Resultados característicos de los periodos anuales de la simulación en Bahía Asunción, Baja California Sur.	170
4.15. Valor promedio de radiación solar necesaria para obtener un delta de temperatura mayor o igual a 20°C en función del número de calentadores solares planos Ecosun/Heliocol instalados en Bahía Asunción, junto con sus valores de desviación estándar asociados.	170
4.16. Coordenadas más cercanas dentro del mallado de los datos oceanográficos del servidor HYCOM con disponibilidad de datos para un punto sobre el mar cerca de Rosarito, Baja California.	171
4.17. Resultados característicos de los periodos anuales de la simulación en Rosarito, Baja California.	176
4.18. Valor promedio de radiación solar necesaria para obtener un delta de temperatura mayor o igual a 20°C en función del número de calentadores solares planos Ecosun/Heliocol instalados en Rosarito, junto con sus valores de desviación estándar asociados.	177

C.1. Tabla de resultados de la simulación del calentamiento de agua superficial del mar de un arreglo de calentadores solares Ecosun/Heliocol interconectados en serie de 5 hasta 40 calentadores ubicados en Cabo San Lucas, Baja California Sur.220

C.2. Tabla de resultados de la simulación del calentamiento de agua superficial del mar durante el año 2014 de un arreglo de calentadores solares Ecosun/Heliocol interconectados en serie de 5 hasta 40 calentadores ubicados en Cabo San Lucas, Baja California Sur. 221

C.3. Tabla de resultados de la simulación del calentamiento de agua superficial del mar durante el año 2015 de un arreglo de calentadores solares Ecosun/Heliocol interconectados en serie de 5 hasta 40 calentadores ubicados en Cabo San Lucas, Baja California Sur. 222

C.4. Tabla de resultados de la simulación del calentamiento de agua superficial del mar durante el año 2016 de un arreglo de calentadores solares Ecosun/Heliocol interconectados en serie de 5 hasta 40 calentadores ubicados en Cabo San Lucas, Baja California Sur. 223

C.5. Tabla de resultados de la simulación del calentamiento de agua superficial del mar durante el año 2017 de un arreglo de calentadores solares Ecosun/Heliocol interconectados en serie de 5 hasta 40 calentadores ubicados en Cabo San Lucas, Baja California Sur. 224

C.6. Tabla de resultados de la simulación del calentamiento de agua superficial del mar de un arreglo de calentadores solares Ecosun/Heliocol interconectados en serie de 5 hasta 40 calentadores ubicados en Bahía Asunción, Baja California Sur.229

C.7. Tabla de resultados de la simulación del calentamiento de agua superficial del mar durante el año 2014 de un arreglo de calentadores solares Ecosun/Heliocol interconectados en serie de 5 hasta 40 calentadores ubicados en Bahía Asunción, Baja California Sur. 230

C.8. Tabla de resultados de la simulación del calentamiento de agua superficial del mar durante el año 2015 de un arreglo de calentadores solares Ecosun/Heliocol interconectados en serie de 5 hasta 40 calentadores ubicados en Bahía Asunción, Baja California Sur. 231

C.9. Tabla de resultados de la simulación del calentamiento de agua superficial del mar durante el año 2016 de un arreglo de calentadores solares Ecosun/Heliocol interconectados en serie de 5 hasta 40 calentadores ubicados en Bahía Asunción, Baja California Sur.	232
C.10. Tabla de resultados de la simulación del calentamiento de agua superficial del mar durante el año 2017 de un arreglo de calentadores solares Ecosun/Heliocol interconectados en serie de 5 hasta 40 calentadores ubicados en Bahía Asunción, Baja California Sur.	233
C.11. Tabla de resultados de la simulación del calentamiento de agua superficial del mar de un arreglo de calentadores solares Ecosun/Heliocol interconectados en serie de 5 hasta 40 calentadores ubicados en Rosarito, Baja California.	238
C.12. Tabla de resultados de la simulación del calentamiento de agua superficial del mar durante el año 2014 de un arreglo de calentadores solares Ecosun/Heliocol interconectados en serie de 5 hasta 40 calentadores ubicados en Rosarito, Baja California.	239
C.13. Tabla de resultados de la simulación del calentamiento de agua superficial del mar durante el año 2015 de un arreglo de calentadores solares Ecosun/Heliocol interconectados en serie de 5 hasta 40 calentadores ubicados en Rosarito, Baja California.	240
C.14. Tabla de resultados de la simulación del calentamiento de agua superficial del mar durante el año 2016 de un arreglo de calentadores solares Ecosun/Heliocol interconectados en serie de 5 hasta 40 calentadores ubicados en Rosarito, Baja California.	241
C.15. Tabla de resultados de la simulación del calentamiento de agua superficial del mar durante el año 2017 de un arreglo de calentadores solares Ecosun/Heliocol interconectados en serie de 5 hasta 40 calentadores ubicados en Rosarito, Baja California.	242

0.3. Nomenclatura

- η -Eficiencia instantánea.
- P -Temperatura del fluido a la entrada menos la temperatura ambiente.
- G -Radiación solar incidente en el plano del captador por unidad de superficie.
- C_1 y C_2 -Coeficientes constantes de la ecuación de eficiencia instantánea.
- η_0 -Coeficiente constante del término lineal de la ecuación de eficiencia instantánea.
- η_1 -Coeficiente constante del término cuadrático de la ecuación de eficiencia instantánea.
- G_u -Radiación solar por unidad de superficie absorbida por el calentador solar.
- δ -Ángulo de declinación solar.
- β_0 -Parámetro beta.
- E -Ecuación del tiempo solar.
- ω -Ángulo horario.
- θ -Ángulo de incidencia solar.
- G_b -Radiación solar directa por unidad de superficie.
- G_d -Radiación solar difusa por unidad de superficie.
- G_g -Radiación solar global por unidad de superficie.
- Q_u -Calor útil.
- Q_T -Calor total.
- T_s -Temperatura de salida.
- T_i -Temperatura de entrada.
- \dot{m} -Flujo másico.

- \approx -Aproximadamente.
- ρ -Densidad.
- C_p -Calor específico.
- T_c -Temperatura del fluido a la salida del calentador solar utilizada en el proceso iterativo.
- X -Concentración de salinidad.
- %-Porcentaje.
- F -Fuerza
- G_c -Constante de gravitación universal.
- m_1 y m_2 -Magnitud de las masas uno y dos.
- R -Distancia existente entre dos cuerpos.
- FC -Fuerza centrífuga.
- FA -Fuerza de atracción.
- P_1 y P_2 -Puntos sobre la superficie de la Tierra a la altura de la línea ecuatorial.
- P_1 y P_2 -Espectadores en distintos puntos dentro de un sistema de referencia.
- ^{14}C -Carbono catorce.
- CO_2 -Dióxido de carbono.
- aprox -Aproximadamente.
- \leq y \geq -Mayor o igual.
- δ -Delta
- $^\circ\text{N}$ y $^\circ\text{S}$ -Grados Norte, grados Sur.
- O_3 -Ozono.
- H_2O -Agua.
- \pm -Más menos.

- G_o -Radiación solar extraterrestre.
- $G_{T_{sup}}$ -Radiación solar total sobre una superficie inclinada.
- G_a -Radiación solar terrestre.
- G_T -Radiación solar total.
- β -Ángulo de inclinación de una superficie.
- H -Insolación por unidad de tiempo.
- I -Irradiación.
- AM -Masa de aire.
- $h_{altitud}$ -Altitud.
- θ_z -Ángulo cenital.
- t -Tiempo.
- TS -Tiempo solar.
- TE -Tiempo estándar.
- L_{st} -Meridiano de referencia.
- L_{loc} -Meridiano local.
- V -Ajuste del horario de verano.
- B -Parámetro B.
- n -Número de día juliano.
- α_s -Ángulo de altura solar.
- Φ -Latitud.
- γ -Ángulo azimutal de superficie.
- N, S, w, E -Norte, sur, oeste, este.
- W_s -Ángulo horario de amanecer.
- $t_{sol-noch}$ -Tiempo solar de anochecer.

- $t_{sol-aman}$ -Tiempo solar de amanecer.
- $\delta t_{dia-solar}$ -Duración del día solar.
- T_{mf}, T_{fav} -Temperatura promedio del fluido.
- T_{amb} -Temperatura ambiente.
- Q_{abs} -Calor absorbido.
- Q_{ut} -Calor utilizable.
- Q_{pe} -Calor perdido.
- Q_{Al} -Calor almacenado.
- α -Absortancia.
- τ -Transmitancia.
- U_c -Coeficiente total de pérdidas térmicas.
- F' -Eficiencia de extracción de calor.
- I_T -Irradiancia solar incidente en el plano del captador solar por unidad de superficie.
- $K_{T\alpha}$ -Factor modificador del ángulo de incidencia.
- η_{carnot} -Eficiencia de carnot.
- T_L -Temperatura absoluta fría.
- T_H -Temperatura absoluta caliente.
- $\eta_{Rankine}$ -Eficiencia del ciclo rankine.
- W_{neto} -Trabajo neto.
- $q_{entrada}$ -Calor de entrada.
- q_{salida} -Calor de salida.
- $W_{turbina,salida}$ -Trabajo de salida de la turbina.
- $W_{bomba,entrada}$ -Trabajo de entrada de la bomba.
- σ -Desviación estándar.

0.4. Unidades

- °-Grados.
- °C-Grados celcius.
- W/m^2 -watts por metro cuadrado.
- *min*-minutos.
- m^2 -metros cuadrados.
- kg/m^3 -kilogramos por metros cúbicos.
- kJ/kgK -Kilojules por kilogramo.
- *w*-watts.
- *m*-metros.
- *N*-Newtons.
- $(Nm^2)/kg^2$ -Newtons metro cuadrados por kilogramos cuadrados.
- *km*-kilómetros.
- *km/h*-kilómetros por hora.
- *km/año*-kilómetros por año.
- *h*-hora.
- *Twh/año*-Terawatts hora por año.
- *m/s*-metros por segundo.
- *Gw*-Gigawatts.
- *s*-Segundos.
- *kw/m*-Kilowatts por metro.
- *UPS*-Unidades prácticas de salinidad.
- *ppm*-Partes por millón.
- *K*-Grados Kelvin.

- *cm*-Centímetros.
- *o''*-Grados minutos y segundos.
- *J/m²*-Jules por metro cuadrado.
- *o/h*-Grados por hora.
- *o/min*-Grados por minuto.
- *kwh/m²*-Kilowatts hora por metro cuadrado.
- *MJ/m²*-Megajules por metro cuadrado.
- *(m²K)/w*-Metros cuadrados kelvin por watts.
- *kw*-Kilowatts.
- *Mw*-Megawatts.

0.5. Siglas

- SOTEC-Solar Ocean Thermal Energy Conversion.
- ONU-Organización de las Naciones Unidas.
- LAFERTE-Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética.
- LECZ-Low Elevation Coastal Zones.
- OTEC-Ocean Thermal Energy Conversion.
- CEMIE-OCÉANO-Centro Mexicano de Investigación en Energía del Océano.
- AION-Archivo de Información Oceanográfica Nacional.
- SEMAR-Secretaría de Marina Nacional.
- IER-Instituto de Energías Renovables.
- UNAM-Universidad Nacional Autónoma de México.
- HYCOM-Hybrid Coordinate Ocean Model.
- NOOP-National Ocean Partnership Program.

- GODAE-Global Ocean Data Assimilation Experiment.
- WOD-World Ocean Database.
- NOAA-National Oceanic and Atmospheric Administration.
- NREL-National Renewable Energy Laboratory.
- NSRDB-National Solar Radiation Database.
- LAPECAS-Laboratorio de Pruebas de Equipos de Calentamiento Solar.
- NetCDF4-Network Common Data Form version 4.
- GRIB-General Regularly Distributed Information in Binary Form.
- CSV-Comma-Separated Values.
- NaN-Not a Number.
- CENAM-Centro Nacional de Metrología.
- GIS-Geographic Information System.
- WB-World Bank.
- NASA-National Aeronautics and Space Administration.
- CPC-Captador Parabólico Compuesto.
- NELHA-Natural Energy Laboratory of Hawái Authority.
- NIOT-National Institute of Ocean Technology
- DCNS-Hoy en día Naval Group of France.
- KIOST-korean Institute of Ocean Science and Thecnology.
- CC-Closed Cycle.
- OC-Open Cycle.
- NORMEX-Normatividad Mexicana.
- ISO-International Organization for Standardization.
- PEM-Polymeric Membrane Electrolyzers.

0.6. Resumen

En este trabajo, se realizó una evaluación de la viabilidad de obtener los 20°C necesarios para la operación de un sistema OTEC asistido con calentadores solares planos interconectados en serie en tres costas ubicadas en el noroeste de México. Para ello, se utilizaron las curvas de eficiencia instantánea de dos calentadores solares planos comerciales, utilizados en el calentamiento de albercas.

Por otro lado, se utilizaron datos oceanográficos de temperatura y salinidad superficiales del mar del noroeste de México, disponibles en distintas bases de datos. Dichos paquetes de información, fueron tratados y analizados a través del método de aprendizaje de computadora no supervisado K-means, mismo que fue ejecutado bajo dos criterios de clusterización. Del agrupamiento obtenido con esta técnica, fueron seleccionadas el mismo número de playas que clusters ajustados. Para cada una de estas playas, se descargaron los datos meteorológicos de cada año típico inmerso en los datos oceanográficos. Posteriormente, se trataron estos datos para empatar el periodo temporal de los datos oceanográficos y se realizaron los cálculos solares pertinentes para llevar a cabo la simulación del calentamiento con calentadores solares.

Para poder llevar a cabo la simulación del calentamiento del agua superficial del mar, se escribió un programa en python que permite la simulación pertinente. Hecha la simulación, se identificó que el calentamiento del agua superficial del mar llega a suplir el delta de temperatura que requiere un sistema OTEC para operar. Además, se logró identificar una estrecha relación entre la disponibilidad del calentamiento del agua superficial marina con la radiación total disponible sobre la superficie de los calentadores solares planos.

Finalmente, después de analizar los resultados obtenidos de la simulación de cada playa de estudio, se concluyó que un sistema SOTEC resulta ser viable en las costas del noroeste de México en las que es posible instalar un sistema OTEC convencional; mientras que, aquellas costas que no cuentan con un esta posibilidad, requieren de un respaldo térmico adicional para operar durante todo el año. Aunado a esto, se identificaron tres regiones en las que existe el gradiente térmico natural relativamente lejos de la costa, por lo que se propuso un sistema SOTEC fuera de costa. En todas estas alternativas, el sistema puede prescindir del bombeo de agua fría durante los periodos diurnos en los que se obtiene una buena operación del sistema termosolar.

Capítulo 1

Fundamentos

1.1. Planteamiento del problema

Durante la historia de la humanidad la energía ha representado diferentes facetas desde ser concebida como un fenómeno cotidiano, divino, militar hasta en lo que hoy se conoce como un factor de calidad de vida esencial para el empleo, la seguridad, el cambio climático, la producción de alimentos o para aumentar los ingresos [1]; todo esto relacionado con un impacto antropogénico sobre el planeta que empezó como algo mínimo pero que con el paso de los años fue incrementándose hasta convertirse en lo que hoy en día es un tema de urgencia ambiental a nivel mundial.

No fue hasta finales del siglo XX que el desarrollo económico de la humanidad se relacionó con la explotación de los recursos naturales a través del informe Brundtland titulado “Our Common Future” dirigido a la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en el año 1987 [2], este informe, definió y utilizó por primera vez el término “desarrollo sustentable” acompañado de una crítica severa a las políticas de desarrollo económico mundial ya que el desarrollo social que se estaba logrando era una realidad a un costo medioambiental alto.

Con el paso de los años comenzaron especulaciones sobre la seguridad energética del mundo tomando como referencia las inestabilidades económicas derivadas de la fluctuación del precio del petróleo a nivel mundial en periodos cortos de tiempo, y con el inicio del surgimiento del interés científico referente a temas como: la sobrepoblación, escases de recursos, el aumento de las partes por millón de contaminantes en la atmósfera, el impacto ambiental, etc.; formaron parte de los argumentos para comprobar un inminente cambio climático por causa del hombre en nuestro planeta, esto fue razón suficiente para que la humanidad se perca-

tara de la necesidad de realizar un cambio radical en el esquema mundial. Dentro de todas las modificaciones pertinentes una transición energética resulta ser pieza fundamental para lograr la gestión y el aprovechamiento de los recursos energéticos renovables del planeta sin provocar impactos que afecten o limiten el acceso a la energía de las futuras generaciones.

A nivel mundial las energías renovables se han presentado como una alternativa para el sector energético con el cometido de sustituir a las fuentes de generación de energía convencionales. En México, el gobierno ha fijado metas de corto y mediano plazo para la generación eléctrica a partir de fuentes de Energías Limpias [3]. El cumplimiento de este mandato se estuvo reportando en el documento titulado “Reporte de Avance sobre la participación de las Energías Limpias” [3] por lo menos hasta el primer semestre del 2018. Dentro de este último reporte se estipula que en México el 75.88% de la energía producida se generó a través de combustibles fósiles, 17.29% se generó a partir de fuentes renovables de energía y 6.83% fue generada a través de otras energías limpias [3].

En México, el Artículo 17 del Reglamento de la Ley para el aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (LAFERTE) y la Prospectiva de Energías Renovables 2012-2026, incluyen a las energías renovables, para cumplir con la meta de al menos 35% de participación en generación de la energía proveniente de fuentes no fósiles para el año 2024 [4].

En el año 2017 se estimó que el 10% de la población mundial vivía en zonas costeras a menos de 10 metros sobre el nivel del mar (Low Elevation Coastal Zones LECZ por sus siglas en inglés) [5] gracias a que los recursos marinos representan un gran potencial de suministro de energía y agua, como consecuencia de lo anterior, se prevee que durante el periodo de 2010 a 2100 las personas que habitan en estas zonas pasarán de ser 704 millones a más de 1000 millones [5].

En el caso exclusivo de México el 25% del territorio nacional está clasificada como región costera distribuida [6] abarcando 17 estados de la República Mexicana en donde 157 municipios tienen frente costero y cuentan con las tasas de crecimiento poblacional más altas de todo el país [4]. Dentro de esta región costera nacional 213,246 personas se dedican a la pesca y acuicultura, actividad económica que ocupa el quinto lugar dentro de los otros sectores de nuestra economía por el número de personas que trabajan en ella [7]. En general la humanidad depende de la obtención de una enorme variedad de recursos tales como los alimentos, recreación, turismo y los múltiples servicios ambientales que provee el mar, además de ello, su recurso energético disponible se ha considerado recientemente como una alternativa para cubrir una parte o completamente la demanda

energética actual de las regiones costeras del mundo o lograr la independencia energética del territorio insular mundial.

En la actualidad el contenido energético del océano se puede aprovechar de seis maneras diferentes: oleaje, gradiente térmico, gradiente salino, mareas, corrientes marinas y corrientes oceánicas; cada una de estas alternativas fue definida, estudiada, experimentada en años anteriores por diversos especialistas que en su momento buscaron aprovechar los recursos energéticos presentes en el océano para la obtención de la energía, sin embargo, la rentabilidad de los recursos fósiles era mayor y los beneficios derivados de estos desplazaron la oportunidad de estas y otras alternativas renovables provocando que quedaran estancadas u olvidadas durante muchos años. Recientemente el panorama mundial anteriormente planteado ha permitido el desarrollo de fuentes renovables de energía, siendo el mismo caso para la energía oceánica.

Una de las seis alternativas para obtener energía del océano es la conversión de energía oceánica por gradiente térmico (Ocean Thermal Energy Conversion OTEC por sus siglas en inglés) misma que ha sido un tema de investigación desde finales del siglo XIX por la posibilidad de generar energía eléctrica y la obtención de múltiples pseudoprocesos a partir del gradiente de temperatura natural que existe entre la capa superficial del mar y el agua de mar de bajas profundidades, sin embargo, la baja eficiencia de esta tecnología, la complejidad del relieve marino, su impacto ambiental, la exclusividad del gradiente térmico natural en la zona tropical del planeta y las dificultades técnicas de la tubería requerida para el bombeo de agua fría de bajas profundidades son limitantes cruciales para su implementación. En los últimos años se han propuesto tecnologías que se acoplan al sistema OTEC como es el caso de sistemas geotérmicos, sistemas de producción de hidrógeno, paneles solares fotovoltaicos, calor residual de procesos industriales, entre otros; y de igual manera se han propuesto tecnologías que se integran al sistema OTEC, como es el caso de los ciclos Kalina y Uehara para resolver las problemáticas que este sistema presenta.

En nuestro país el Centro Mexicano de Investigación en Energía del Océano (CEMIE-OCÉANO) ha realizado estudios de investigación relacionados con la energía oceánica por gradiente térmico, estos estudios indican que México cuenta con regiones óptimas para el aprovechamiento del gradiente térmico natural. De manera particular, en las costas del pacífico mexicano en los estados de Michoacán, Guerrero y Chiapas, los cuales, cuentan con un gradiente térmico natural óptimo ($\Delta T \approx 25^{\circ}\text{C}$) para un sistema OTEC durante todo el año considerando las profundidades de bombeo de agua de mar dentro de los límites usuales de esta tecnología, sin

embargo, existen otras zonas del pacífico mexicano como es el caso de las costas del noroeste de México en donde la temperatura de la capa superficial del mar suele ser más fría, hecho que provoca un gradiente térmico natural por debajo del valor mínimo requerido de 20°C durante gran parte del año. Además, otra problemática que presentan la mayoría de estas costas es la poca profundidad de su relieve marino, esto repercute en la necesidad de instalación de un sistema OTEC fuera de costa a no más de 10 km lejos de la misma para el bombeo del agua fría desde una profundidad de 1000 metros. Lo anterior no es posible en una gran cantidad de costas en el mar de Cortés en donde la profundidad no es suficiente y si consideramos aquellas costas ubicadas al oeste de los estados de Baja California y Baja California Sur la isobata de 1000 metros se encuentra muy lejos de la mayoría de la líneas de costa. Con lo expuesto anteriormente se puede inferir que en las costas del noroeste de México no se han desarrollado proyectos de esta tecnología por las complicaciones anteriormente mencionadas y por las propias características de México [5]. Por otro lado, las costas del noroeste de México cuentan con el mayor recurso solar de todo el territorio costero de nuestro país, es por esto que la integración de un sistema termosolar para el calentamiento del agua superficial del mar podría ser suficiente para obtener el gradiente térmico que una planta OTEC necesita. Creando la posibilidad de eliminar la necesidad del bombeo de agua de mar fría proveniente de bajas profundidades. Además, esto podría representar una brecha de oportunidad para las zonas costeras de nuestro país con limitantes semejantes o incluso en aquellos países bajo situaciones similares.

1.2. Hipótesis a comprobar

Un sistema OTEC asistido con tecnología termosolar puede obtener el gradiente térmico necesario que un sistema OTEC requiere para su operación. La meta es evitar el bombeo de agua marina proveniente de bajas profundidades al calentar el agua superficial del mar con calentadores solares planos a lo largo del día solar.

La instalación de este sistema es viable en costas con alto recurso solar. Dentro de nuestro país, las costas del Noroeste de México cuentan con estas condiciones de recurso solar necesarias.

1.3. Objetivos de investigación

1.3.1. Objetivo general

Realizar una simulación que permita evaluar la viabilidad de calentar el agua superficial del mar en 3 costas del noroeste de México con calentadores solares planos interconectados en serie para alcanzar un delta de temperatura mayor o igual a 20 °C.

1.3.2. Objetivos particulares

- 1.- Solicitar, verificar y comparar las curvas de eficiencia instantánea de dos calentadores solares planos comerciales que sean utilizados para el calentamiento de albercas.
- 2.- Obtener datos temporales de las condiciones de temperatura y salinidad superficial del mar de la región de interés. Realizar su limpieza, tratamiento y análisis posterior con métodos de aprendizaje de computadora no supervisado (K-means).
- 3.- Elaborar medios gráficos para el análisis e interpretación del método de clusterización.
- 4.- Obtener los datos temporales de radiación solar, temperatura ambiente de 3 playas distribuidas dentro de las regiones de clusterización.
- 5.- Realizar un programa que permita iterar los cálculos solares sobre la superficie de los calentadores solares en cada punto de estudio.
- 6.- Elaborar un programa que permita simular el calentamiento del agua superficial del mar en las 3 costas de estudio.
- 7.- Analizar e interpretar los resultados del calentamiento superficial del mar con calentadores solares planos en cada una de las playas de estudio.

Capítulo 2

Fundamentos teóricos

2.1. La energía del océano.

El 97% del agua que existe en la Tierra se encuentra en los océanos, esta gran extensión de masa de agua marina representa el 71% de la superficie total de nuestro planeta [8] convirtiéndolo en el mayor colector solar natural que existe en la Tierra. Esto es posible porque los océanos retienen el 15% del total de la energía proveniente del Sol en forma de energía térmica, razón por la cual el hombre recientemente ha adquirido un gran interés por estudiar los océanos. El recurso energético global de energía oceánica es enorme, al grado de poder suplir y superar ampliamente la demanda energética actual. Lamentablemente la extracción de esta energía resulta complicada principalmente por el estado de desarrollo actual en el que se encuentra la tecnología oceánica a nivel mundial [8].

El contenido energético de los océanos se puede clasificar con la ecuación de Navier-Stokes utilizada para describir la mecánica de cualquier fluido [9]:

- Fuerzas gravitacionales → Estas fuerzas permean completamente al fluido, por ello son las de mayor magnitud.
- Fuerzas derivadas de desequilibrios termodinámicos → Aquellas derivadas de transferencias radiativas que provoquen calentamiento o enfriamiento, precipitaciones o evaporación.



Figura 2.1: El mar, el colector solar más grande de nuestro planeta.

- Esfuerzos mecánicos → Aquellas fuerzas derivadas de variaciones en la presión atmosférica, movimientos sísmicos o por el actuar del viento sobre las masas oceánicas.
- Fuerzas internas → La presión y viscosidad ejercida por el agua marina proveniente una de sus secciones a sus alrededores complican su dinámica interna.

En general, el contenido energético en el océano proviene de la radiación solar que recibe la Tierra, las fuerzas gravitacionales entre la Luna, el Sol y nuestro planeta, acompañado de los fenómenos meteorológicos globales que se generan para mantener el equilibrio termodinámico en la Tierra [10].

2.1.1. Fuerzas de origen radiativo y termodinámico.

La energía radiativa responsable de mover a los fluidos que se encuentran en la Tierra proviene de dos fuentes importantes: la primera fuente es el Sol, como una fuente externa y la segunda es el decaimiento de materia radioactiva, misma que es responsable de mantener al material debajo de la corteza terrestre al interior de la tierra tanto en condiciones plásticas como líquidas. Cabe mencionar que la contribución energética de este tipo de fuente de radiación influye, hasta cierto grado, en la temperatura del mar profundo; esta contribución térmica no alcanza a provocar efectos dinámicos importantes en el océano [9].

Como se muestra en el diagrama del flujo de energía en un sistema geoespacial (figura 2.2) conformado por atmósfera, hidrósfera (océanos, lagos, y otros cuerpos de agua), litósfera, criósfera (hielo). Del total de la energía radiativa sobre la Tierra, 30% es reflejada por las nubes, polvo, y por la superficie terrestre (albedo); 70% es re-emitida en radiación infrarroja, misma que se divide en 64% emitido por gases radiativamente activos y nubes dentro de la atmósfera y 6% es emitida por la superficie terrestre, tanto por la litósfera como por la hidrósfera. Antes de que la re-emisión ocurra, muchas transmutaciones de la energía incidente se llevan a cabo. Como se muestra en el diagrama, 20% del total de radiación incidente es directamente absorbida por la atmósfera y 50% entra a la porción no atmosférica del sistema, principalmente océanos. Esta radiación calienta las capas superficiales de los océanos lo que contribuye directamente a su circulación termohalina (impulsada por temperatura y salinidad) e indirectamente en la circulación de los vientos a través de la evaporación de agua en los trópicos y subtropicos del planeta. Del 50% de la radiación

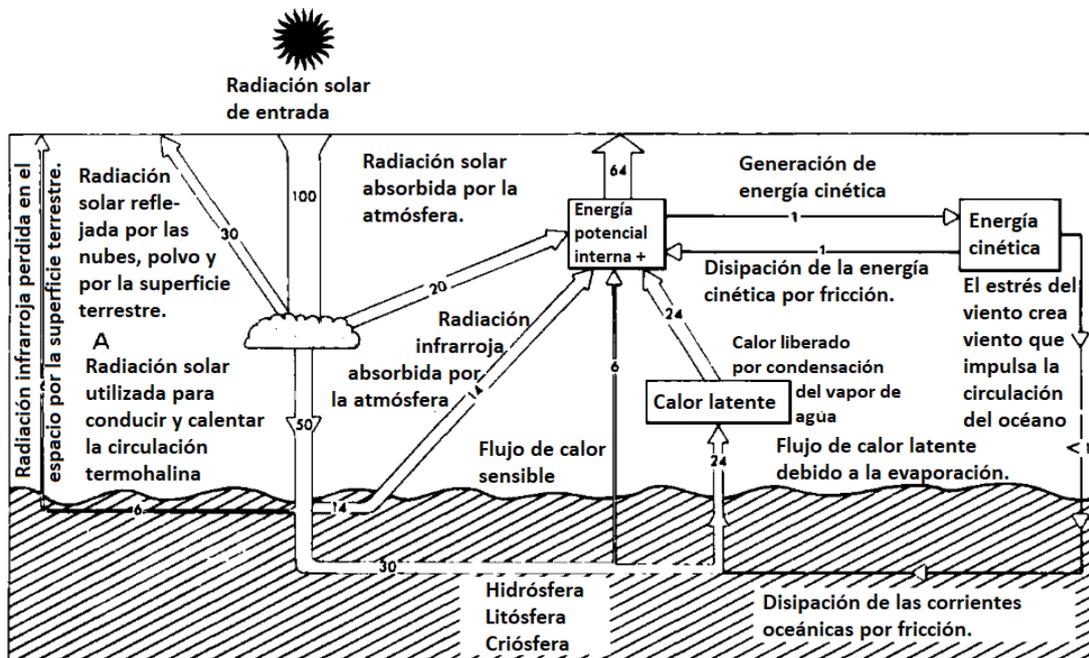


Figura 2.2: Diagrama esquemático del flujo de energía en los componentes del sistema climático [9].

solar incidente sobre la superficie terrestre, 6% y 14% es re-irradiado en radiación infrarroja, con el primer porcentaje escapando al espacio y el resto absorbido por la atmósfera. El 30% restante es transportado por las corrientes oceánicas a zonas del planeta en donde el depósito energético es más lento. Eventualmente, esta energía térmica transportada es cedida a la atmósfera: 24% es utilizada en energía latente de vaporización y 6% en calor sensible, por ejemplo: la energía transferida por conducción entre interfaz de aire/océano. El calor para la vaporización se transfiere a la atmósfera convirtiéndose en energía interna térmica con valores por arriba de la condensación, por ejemplo: la formación de nubes y precipitaciones, tras lo cual se provoca la circulación atmosférica a regiones del planeta en donde esto ocurre en menor medida [9].

Las consideraciones anteriores no se cumplen al pie de la letra debido a la oblicuidad de las regiones polares frente a la radiación, la variación estacional de la declinación solar, la interrupción del flujo de las masas oceánicas por las masas continentales e insulares y por la gran asimetría en la proporción de Tierra/agua entre los hemisferios Norte y Sur. Esto contribuye en gran medida a la dinámica tanto oceánica como atmosférica.

La variación estacional de 23.5° en la declinación solar resulta en una

distribución del baño de radiación solar mucho más tenue en las zonas Norte-Sur del planeta. Esto provoca gradientes energéticos en las distintas latitudes del planeta por la variación del ángulo de incidencia sobre la superficie siendo más directa en el ecuador y más tangencial en las zonas polares. Además, las condiciones climatológicas locales como: cantidad de cuerpos de agua, vegetación, días de lluvia, presencia de nubes y geomorfología de la corteza terrestre modifican la cantidad de radiación en distintas zonas del planeta. Estas temperaturas las adoptan las masas de agua y aire de cada zona provocando una circulación como consecuencia del desequilibrio termodinámico global, y éstas contribuyen en la formación de las corrientes oceánicas, la circulación de los vientos que genera el oleaje y el movimiento termohalino en las masas oceánicas [10].

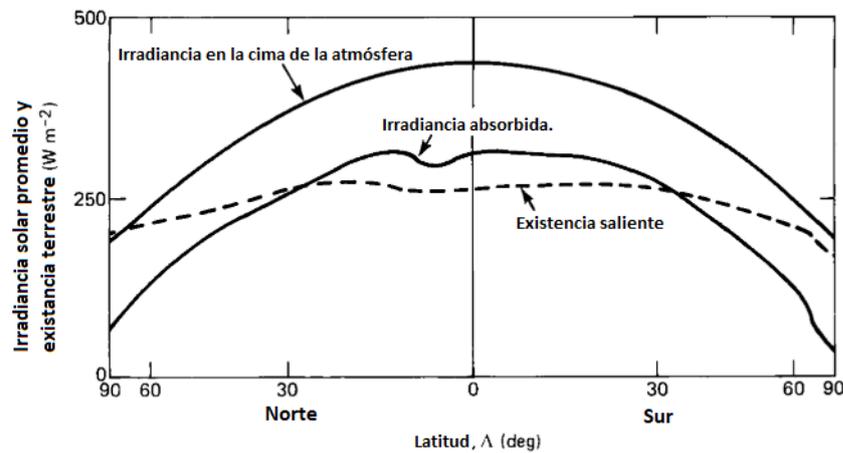


Figura 2.3: Esquema de distribución de la insolación y re-radiación terrestre en distintas zonas del planeta [9].

La curva superior representa el flujo de energía solar incidente, la curva intermedia representa el flujo absorbido por la Tierra y atmósfera, mientras que la curva punteada representa el flujo de energía re-radiado al exterior.

2.1.2. Fuerzas gravitacionales y rotacionales.

Las fuerzas gravitacionales que se ejercen sobre el océano obedecen a la Ley de Gravitación Universal de Newton. Esta ley explica que la fuerza gravitacional existente entre dos masas es directamente proporcional al producto de las masas multiplicado por una constante e inversamente

proporcional al cuadrado de la distancia comprendida entre las mismas, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\vec{F} = \frac{G_c m_1 m_2}{R^2} \hat{r} \quad (2.1)$$

En donde \vec{F} es el vector de fuerza de atracción gravitacional cuya magnitud está expresada en Newtons [N], G_c es la constante de gravitación universal cuyo valor conocido es de 6.674×10^{-11} (Nm^2/kg^2); m_1 y m_2 representan la magnitud de cada una de las masas expresadas en kilogramos [kg], siendo éstas las que experimentan una atracción gravitacional entre sí, \hat{r} es el vector unitario cuya dirección une el centro de las masas y R es la distancia de separación entre el centro de las masas expresada en metros [m]. Ver figura 2.4

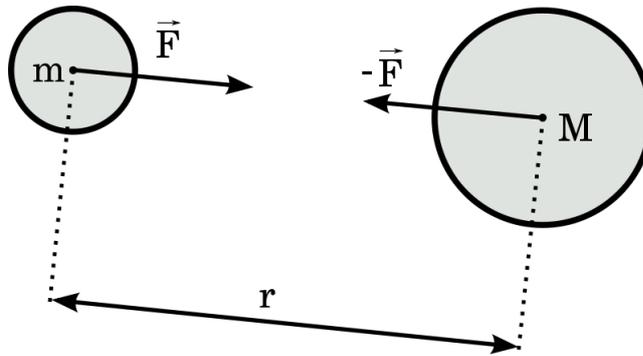


Figura 2.4: Modelo conceptual de la Ley de atracción gravitacional entre dos cuerpos.

En el caso del sistema de referencia Tierra-Luna, la Tierra y la Luna orbitan alrededor de un centro de gravedad común. Para ello la atracción gravitacional es balanceada por la fuerza centrífuga del sistema. Debido a que la masa de la Tierra es dos órdenes de magnitud mayor que la masa de la Luna, el centro de gravedad de este sistema se encuentra dentro de la Tierra aproximadamente a unos 1700 km debajo de la superficie terrestre. Este sistema completa un ciclo completo cada mes conocido normalmente como el ciclo de la Luna. La fuerza centrífuga que experimentan tanto la Luna como la Tierra es constante para cada punto de estos objetos ya que cada fracción másica experimenta la misma inercia orbital, sin embargo, la atracción gravitacional que ejerce la Luna sobre la Tierra resulta progresivamente más débil conforme nos alejamos de la Luna tal y como lo expresa la Ley de gravitación universal. El resultado provoca que estas dos fuerzas no se puedan balancear entre ellas en todos los puntos sobre

la Tierra; es precisamente por este desequilibrio que se generan las mareas en los océanos de la Tierra.

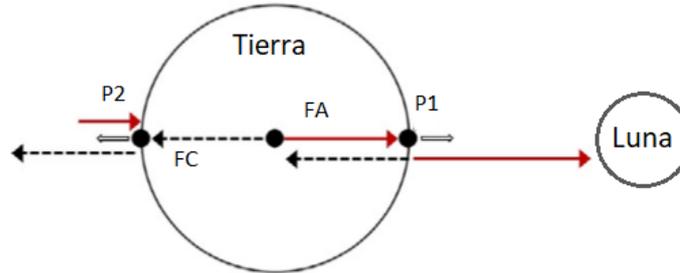


Figura 2.5: Análisis de fuerzas en el modelo de equilibrio de marea [11].

Al hacer un análisis de fuerzas en el centro de la Tierra podemos percatarnos que tanto la fuerza de atracción gravitacional como la fuerza centrífuga, alcanzan el equilibrio como se puede ver en la figura 2.5 en donde FC representa al vector de fuerza centrífuga distinguido por un vector seccionado, FA representa a la Fuerza de atracción gravitacional distinguida por un vector rojo. De igual manera, si analizamos dos puntos ubicados sobre la superficie de la Tierra a la altura de la línea ecuatorial pero uno colocado de frente a la Luna y el otro en el otro extremo de espaldas a esta, siendo P1 Y P2 en la figura 2.5, nos percatamos que el equilibrio de fuerzas no se cumple. En el punto ubicado frente a la Luna la atracción gravitacional es mayor debido a la menor distancia entre ese punto y el cuerpo celeste lunar como lo dicta la Ley de gravitación universal; de manera análoga el otro punto ubicado a la misma altura que la del punto anterior colocado en el otro extremo de la superficie terrestre experimenta una fuerza de atracción gravitacional menor provocando un vector resultante a favor de la fuerza centrífuga. La interacción entre estos vectores de fuerza se pueden apreciar mejor en la figura 2.5. La información anterior se conoce como el modelo de equilibrio de marea en donde los continentes no se toman en cuenta, tampoco se consideran los efectos derivados de la fuerza de Coriolis, ni el movimiento de rotación de la Tierra, este modelo se puede apreciar en la figura 2.8, en dicha figura los vectores representan las fuerzas que se ejercen sobre la superficie terrestre. La atracción gravitacional que ejerce el Sol sobre la Tierra también es responsable de generar un aumento y disminución del nivel del mar de acuerdo con el movimiento de traslación que tiene la Tierra alrededor del Sol, un modelo análogo al anterior se puede aplicar al sistema Sol-Tierra con resultados similares a los anteriormente mencionados haciendo que este no sea detallado nuevamente (ver figura 2.6).

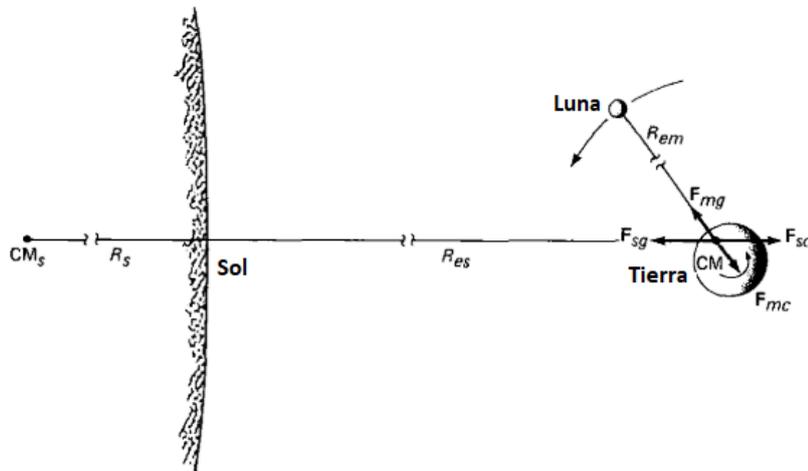


Figura 2.6: Diagrama de fuerzas en el sistema Sol-Tierra-Luna [9].

Se han analizado los efectos del sistema Tierra-Luna-Sol y se ha encontrado que las mayores fuerzas sobre la masa oceánica en nuestro planeta ocurren tanto en Lunas nuevas y Lunas llenas, mientras que las fuerzas sobre el mar, con menor magnitud, ocurren durante el periodo de medias lunas (ver figura 2.7), esto tiene origen en el desalineamiento de la Tierra con la Luna y el Sol. Para explicar mejor lo anterior, consideremos que nuestro planeta gira sobre el eje terrestre a una velocidad de 16,500 (km/h) y en su movimiento de traslación se desplaza a una velocidad de 107,000 (km/año), esto hace que la Tierra realice una vuelta sobre su propio eje en un día (24 h), mientras que la Luna gire un revolución completa alrededor de la Tierra en 29.53 días terrestres. La información anterior nos ayuda a estipular que un mes solar puede ser considerado con una duración de 30 días, mientras que un mes lunar se cumple en 29 días y 10 minutos. En un mes solar la Tierra, la Luna y el Sol se alinean dos veces, durante este fenómeno se ejerce la máxima fuerza gravitatoria sobre las aguas oceánicas creando elevaciones máximas de hasta 12 m en diferentes partes del mundo.

2.1.3. Efecto Coriolis

Como consecuencia del movimiento de rotación Terrestre, las grandes masas de agua y aire sufren de una desviación de acuerdo con su ubicación geográfica. Este efecto se conoce como el efecto Coriolis, descrito por el científico francés Gaspard-Gustave Coriolis (ver figura 2.9) en el año 1835. Este efecto se observa desde todo sistema que esté en rotación, no inercial,

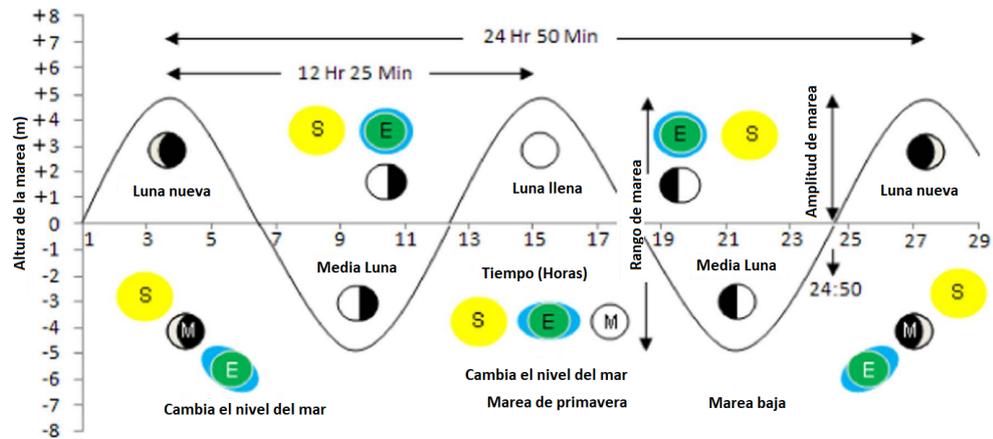


Figura 2.7: Evolución natural del bajamar y pleamar en la superficie de los mares y océanos [12].

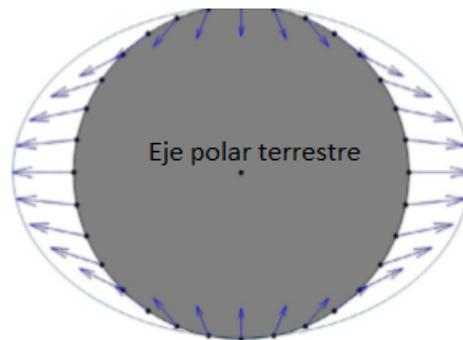


Figura 2.8: Esquema vectorial general del modelo de equilibrio de marea [11].

sobre cualquier objeto que varíe su distancia respecto al eje de rotación de dicho sistema. Este efecto consiste en una aceleración relativa que siempre es perpendicular al eje de giro del sistema rotatorio y a la velocidad del cuerpo en movimiento cuando se acerca o se aleja del eje del sistema en rotación.

Debido a que el objeto sufre una aceleración desde el punto de vista del observador en rotación, es como si para éste existiera una fuerza sobre el objeto que lo acelera provocando un ligero desvío en su trayectoria. A esta fuerza se le conoce como fuerza de Coriolis, se trata de una fuerza inercial o ficticia que se utiliza para explicar, desde el punto de vista del sistema en rotación, la aceleración relativa del cuerpo, cuyo origen está en el hecho de que el sistema en observación está rotando [13].

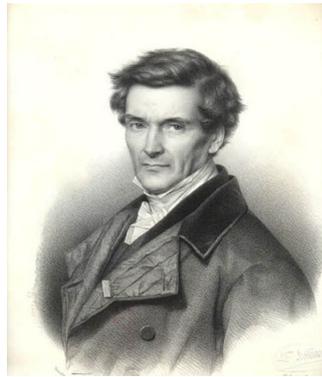


Figura 2.9: Gaspard-Gustave Coriolis [14].

Para ilustrar mejor este efecto, se indica el siguiente ejemplo: al colocar un cañón sobre una base giratoria, para este caso en sentido antihorario y realizar un disparo, la percepción del movimiento de la bala de cañón para dos observadores ubicados en distintos puntos de observación sería diferente. Colocando a uno de los espectadores sobre la base giratoria en la parte trasera del cañón para que él lleve a cabo el disparo y al otro espectador como el blanco en algún punto afuera de la base giratoria. En la figura 2.10 se ilustra la percepción del movimiento de la bala de cañón para cada observador, en donde P1 y P2 son los observadores. Para el observador encargado de disparar, el movimiento de la bala de cañón realizaría una trayectoria curva, mientras que para el segundo observador la bala de cañón realizaría una trayectoria vertical en dirección hacia él.

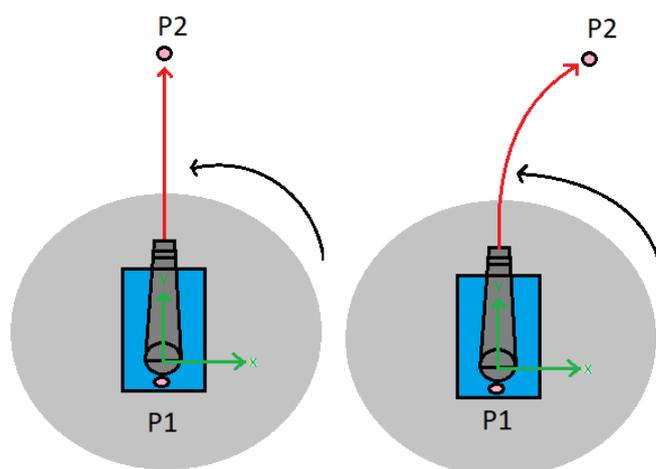


Figura 2.10: Fuerza de Coriolis para dos espectadores P1 y P2.

El efecto Coriolis se ha confirmado en movimientos libres a gran escala, con largas distancias y tiempos prolongados, como es el caso de proyectiles, aviones, péndulos, y movimientos de grandes masas como vientos, ciclones y corrientes marinas [13].

2.1.4. Fuerzas de presión

Otra fuerza mecánica que mueve a las capas superficiales del océano es el efecto barométrico inverso. Existen regiones en el mar en donde la presión atmosférica es más alta o más baja, ejerciendo cambios en la elevación de la superficie del mar y por ende flujos asociados a estos cambios de presión.

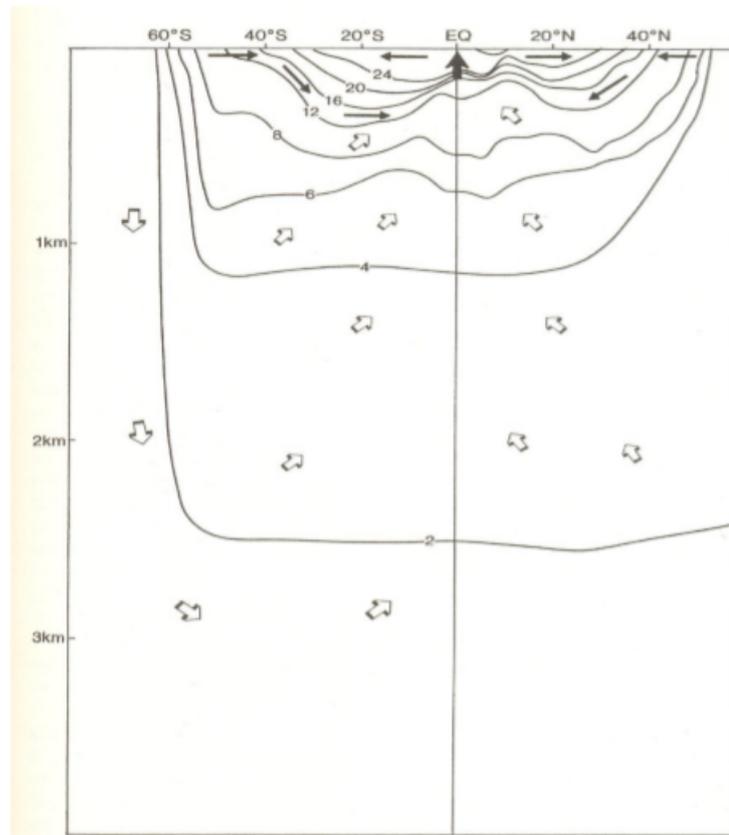


Figura 2.11: Isotermas bajo la superficie oceánica en un plano vertical de norte a sur en el océano Pacífico [15].

Las circulaciones oceánicas que mantienen la termoclina se muestran esquemáticamente con flechas negras para la circulación generada por los

vientos, y con flechas blancas para la circulación termohalina.

2.1.5. Circulación termohalina

Existe un fenómeno en el océano de gran magnitud, mejor conocido como “Circulación termohalina” y consiste en el movimiento del agua salada de los océanos a escala global principalmente por las diferencias de temperatura y salinidad que existe en el océano, provocando que su densidad se vea modificada en distintas regiones del planeta. Este fenómeno es muy importante por su significativa participación en el flujo neto de calor desde las regiones tropicales hacia las polares.

A pesar de que la sal representa únicamente el 3% de la masa de los océanos, es de gran importancia debido a que su concentración afecta la densidad del agua marina. Si los océanos no tuvieran sal, el agua caliente siempre se mantendría sobre el agua fría, no obstante, si la densidad de las aguas cálidas aumenta por la adición de sal, éstas se hundirían aún siendo más cálidas que las capas inferiores. Este fenómeno ocurre en latitudes altas en donde la diferencia de temperaturas entre las aguas superficiales y las profundas es pequeña, por lo que una pequeña adición de sal provoca que las aguas superficiales se hundan. Para que esto suceda se necesita que suscite alguno de los siguientes casos:

- 1.- Proceso evaporativo: El aumento de la salinidad ocurre cuando parte del agua superficial del mar se evapora dejando atrás aguas marinas más saladas. Esto se lleva a cabo durante el invierno cuando masas de aire frío y seco se desplazan desde la corteza continental hacia un océano cálido, lo cual calienta el aire y absorbe humedad, ocasionando que las aguas superficiales de ese océano se enfrién, se hagan más salinas y se hundan.
- 2.- Solidificación: El hielo que se encuentra en las regiones polares del planeta se caracteriza por ser agua dulce debido a que el agua salada al alcanzar el punto de congelación de las moléculas de agua contenidas en ella, estas tienden a cristalizarse formando hielo y la sal contenida anteriormente se disuelve en la masa oceánica circundante, aumentando así la salinidad en esas zonas.

El hundimiento de las aguas frías y salinas en latitudes altas requiere de un flujo con dirección a los polos cerca de la superficie, de un flujo dirigido al ecuador en aguas profundas y de movimientos ascendentes para completar el ciclo que cumple la circulación termohalina. Como se muestra en la figura 2.11 esta circulación es asimétrica respecto al ecuador dado que

de igual manera la distribución de los continentes también es asimétrica. La circulación asimétrica en el planeta comienza tanto en los hemisferios

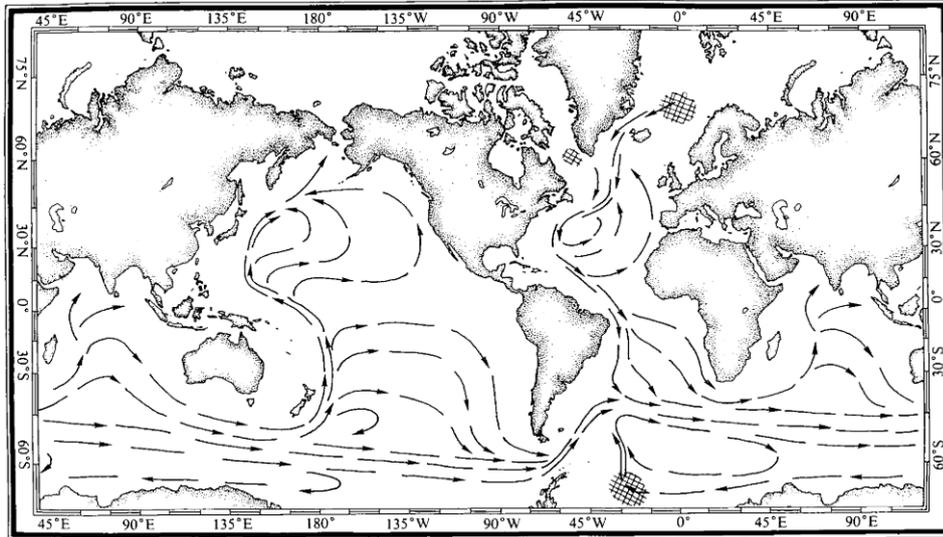


Figura 2.12: Líneas de flujo esquemáticas para la circulación abisal [9].

Norte y Sur del planeta, en la región norte la formación de aguas profundas ocurre en los mares de Labrador y de Groenlandia (ver figura 2.12), al hundirse las aguas profundas estas fluyen hacia el sur, atraviesan el ecuador y se reúnen a la corriente circumpolar Antártica en donde la formación de icebergs se lleva a cabo cerca de la Antártida en los mares de Ross y Weddell, provocando que las aguas aumenten su salinidad y se hundan. Un gran volumen de la masa oceánica dentro de la corriente circumpolar Antártica se bifurca hacia el océano Índico y luego hacia el océano Pacífico, donde ascienden y vuelven como aguas superficiales hacia el Atlántico norte. Este proceso se puede apreciar mejor en la figura 2.13; a partir de ella y con la explicación anterior se puede notar que el agua densa y fría que se hunde en latitudes altas se expande sobre el fondo oceánico y mantiene el océano profundo a temperaturas muy frías.

En general la velocidad de las corrientes que forman la circulación termohalina son muy pequeñas y difíciles de medir, principalmente las que ocurren en aguas profundas. Esto se debe a que se estima que un volumen confinado de agua de mar tarda al menos 1000 años en completar toda la circulación. El método más claro para comprobar la existencia de esta circulación es a través de la medición del Carbono 14 en aguas profundas, conociendo su vida media podemos saber cuándo fue la última vez que ese volumen de agua estuvo en contacto con la superficie y asignarle una edad

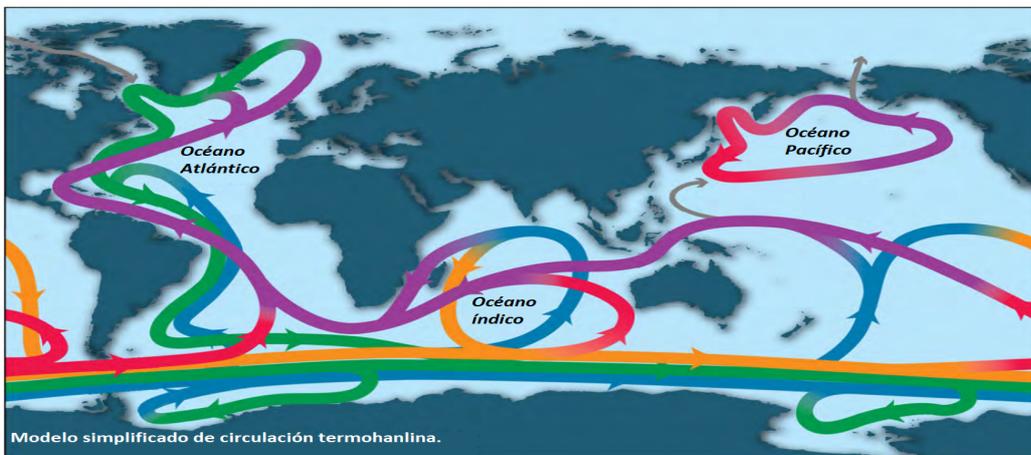


Figura 2.13: Esquema de la circulación termohalina [16].

en el océano. El ^{14}C es creado en la atmósfera alta por los rayos cósmicos y éste entra al océano durante la absorción de CO_2 por parte de las masas de agua de mar. Al quedar aislado comienza a decaer. Con lo anterior podemos inferir que las aguas más jóvenes se encuentran en el Atlántico norte y la Antártida, y las aguas más viejas en el Pacífico norte [15].

Otra manera de explicar la existencia de la circulación termohalina vienen de la distribución de nutrientes. La cantidad de nutrientes es mínima en el Atlántico norte ya que ahí el agua recién llegó de la superficie donde los nutrientes son consumidos por el fitoplancton. De manera opuesta, la concentración de nutrientes es máxima en el Pacífico norte ya que a lo largo de su trayecto las corrientes profundas se enriquecen de nutrientes de la descomposición de materia orgánica que se muere y se hunde [15].

La concentración de nutrientes también está íntegramente relacionada con el gran contraste entre la capa cálida superficial marina (aprox 100 de profundidad) en donde la luz es abundante y propicia la proliferación mayoritaria de la vida marina, con el frío y oscuro océano profundo. Esta zona de transición es comúnmente conocida como termoclina. La variación de este perfil de temperatura en función de la profundidad en el océano se presenta en distintos perfiles de acuerdo a su latitud. En la figura 2.14 se pueden apreciar los perfiles que presenta la termoclina en el hemisferio norte, en latitudes intermedias y tropicales durante el invierno y el verano. Los tres perfiles verticales fueron hechos en la capa mixta superficial del mar, en la zona de termoclina estacional y permanente (ver figura 2.14); cada capa tiene las siguientes características:

- Termoclina superficial mixta: En esta capa de agua marina la tempe-

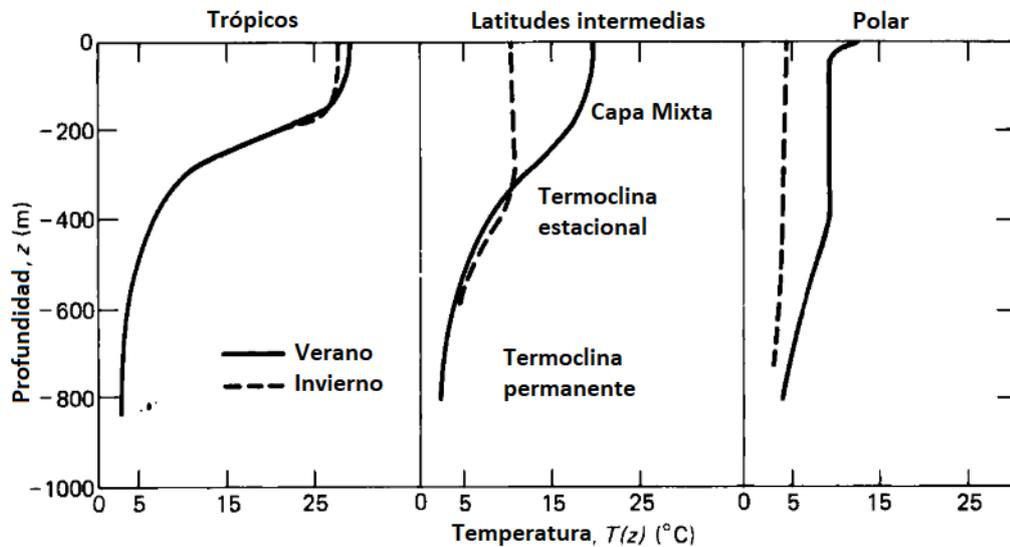


Figura 2.14: Esquema de distribución de temperaturas en función de la profundidad para latitudes, tropicales, latitudes medias y latitudes en zonas polares durante el invierno (línea continua) y el verano (línea punteada) [9].

ratura se puede considerar casi isotérmica. Los valores de temperatura que adquiere esta capa se ajustan rápidamente por los valores adquiridos en la superficie del mar y la recombinación con la temperatura del resto de esta capa.

- Termoclina estacional: Es la capa del mar en donde la temperatura cambia relativamente rápido respecto a la profundidad. Los cambios de estos valores de temperatura considerando las mismas profundidades cambian de manera estacional.
- Termoclina permanente (profunda): En esta sección la temperatura del agua de mar cambia de manera gradual respecto a la profundidad, sin embargo las variaciones de temperatura son excesivamente lentos en el tiempo.

En la figura 2.14 es posible apreciar que en los trópicos existe una pequeña variación entre las termoclinas de verano e invierno, mientras que en los perfiles de la region polar y en latitudes medias el cambio de la termoclina son considerables. Es en estas regiones en donde gran parte de la energía proveniente del sol es almacenada y redistribuida por las corrientes marinas y por las interacciones entre el aire/mar.

2.1.6. Aprovechamiento de la energía del océano

Hoy en día existen seis maneras principales de aprovechar la energía almacenada en los océanos. Actualmente la tecnología oceánica aprovecha: las corrientes de mareas, las corrientes oceánicas, el rango de mareas, el gradiente térmico, el gradiente salino y el oleaje. A continuación se definen los principios energéticos necesarios para la operación de estas tecnologías.



Figura 2.15: Pleamar y Bajamar en Bahía de Fundy / Mont Saint-Michel [17].

Rango de Marea:

El recurso energético que puede aprovecharse de la energía potencial presente en el mar es inmenso, esto surge en congruencia con lo mencionado anteriormente, como una consecuencia de la fuerza centrífuga de la Tierra. Las fuerzas de atracción gravitacional que son ejercidas por el Sol, otros cuerpos astronómicos y en mayor medida la que ejerce la Luna, y la interacción de estas fuerzas con el relieve del fondo del mar provocan lo que comúnmente conocemos como mareas. Las mareas se pueden definir como una elevación y disminución del nivel del agua de mar; este fenómeno consiste en cuatro etapas:

- Aumento progresivo del nivel del mar.
- El nivel del mar alcanza el punto máximo.
- Descenso progresivo del nivel del mar.
- Punto más bajo del nivel del mar.

De estas cuatro etapas destacan dos para el aprovechamiento de este recurso, cuando el nivel del mar se encuentra en su punto más alto, mejor conocido como Pleamar, y cuando el nivel del mar se encuentra en su punto más bajo, definido como Bajamar (figura 2.15). Los efectos de estas mareas son complejos y la mayoría de los océanos y mares tienen sistemas internos de mareas. La amplitud de marea no es visible en mar abierto, sin embargo se amplifica cerca de la costa (figura 2.16) [8].

Al aprovechamiento de la energía potencial de las mareas se le denomina energía maremotriz, el principio básico de aprovechamiento energético parte de la diferencia de altura entre la Bajamar y Pleamar, misma diferencia que por lo menos debe ser de 5 m para asegurar factibilidad. Para aprovechar el ascenso y descenso del nivel del mar es necesario construir grandes diques con la capacidad de retener una gran cantidad de agua marina en su Pleamar y aprovechar la energía potencial antes del siguiente ciclo de marea.

En la actualidad el aprovechamiento de las mareas es una de las formas más favorables para aprovechar la energía renovable del océano, debido a que el origen astronómico de las fuerzas que generan las mareas, las vuelve un fenómeno muy predecible, aunque pueden ser modificadas por las condiciones climáticas locales [8, 11]. El potencial teórico mundial de la

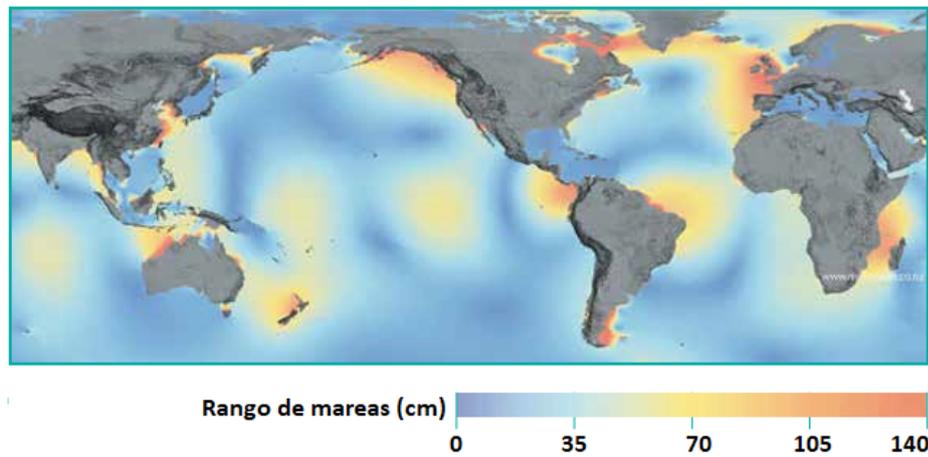


Figura 2.16: Mapa de distribución mundial de los rangos de marea [8].

energía de marea (rangos de marea y corrientes de marea) ha sido estimado en torno a 1200 TWh/año [8].

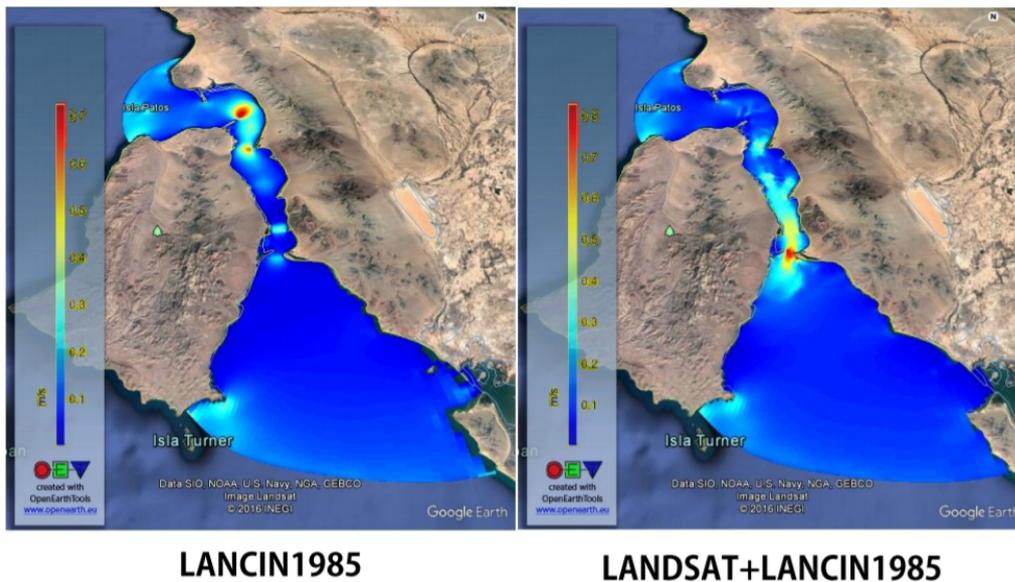
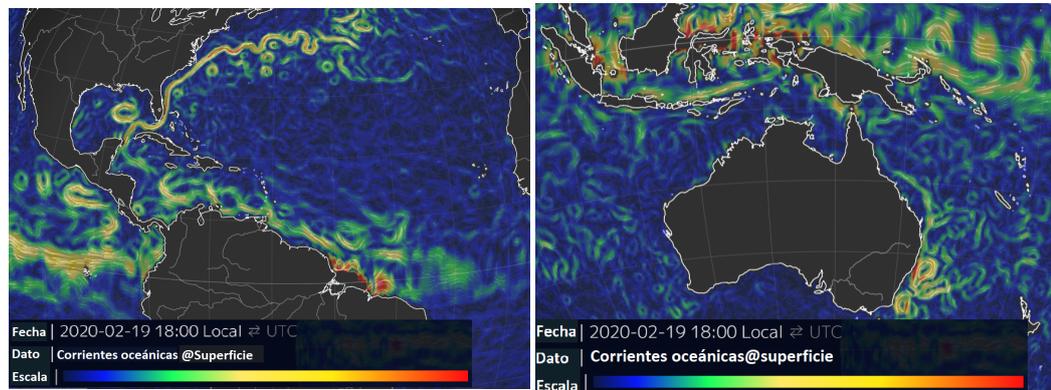


Figura 2.17: Corrientes de marea en isla del Tiburón Sonora [18].

Corrientes de marea

Las corrientes de marea son un fenómeno que deriva de los cambios de altura que existen en el nivel del mar debido a la combinación de las mismas fuerzas que provocan el ascenso y descenso de las mareas. Si recordamos que cuando un fluido adquiere o pierde energía potencial, en la mayoría de los casos, parte de esta energía termina transformándose en energía cinética, de esta manera podemos intuir que las corrientes de marea son la componente cinética que resulta de los cambios de altura por mareas que suceden en el mar [19]. Las corrientes de marea provienen de los flujos locales regulares diarios (24 horas) o semidiurnos (12 + horas), mejor conocido como ciclo de mareas. Las mareas crean movimientos cinéticos que pueden ser aprovechados, con dispositivos similares a las turbinas eólicas, utilizando las corrientes de agua marina en lugar del viento, para convertir la energía cinética en electricidad.

La mayor cantidad del recurso energético para esta conversión de la energía a través del océano está típicamente localizada en áreas con grandes rangos de marea. Este recurso generalmente incrementa cerca de la costa y en particular donde se encuentran constricciones geomorfológicas, como estrechos, islas y puertos (figura 2.17) [8]. Sin embargo, debido a la geomorfología de la zona, las adaptaciones técnicas necesarias para adaptar un equipo en esas condiciones y a la importancia ambiental que la mayoría de esas zonas tienen, sólo una fracción del total de la energía



(a) Corrientes del Golfo y de Brasil.

(b) Corriente del este de Australia.

Figura 2.18: Corrientes oceánicas del Golfo, Brasil y del este de Australia [20].

disponible puede ser aprovechada en términos prácticos. A pesar de esto, el potencial teórico mundial de la energía de marea, incluyendo las corrientes de marea, ha sido estimado en torno a 1.200 TWh/año [8, 19].

Corrientes oceánicas

La energía contenida en las corrientes oceánicas proviene de la energía cinética que reside en las corrientes superficiales del océano geostrofico a gran escala. Estas corrientes oceánicas fluyen en patrones complejos alrededor de los océanos del mundo. Son impulsadas por el calentamiento solar de la capa superficial del mar cerca del ecuador, mientras que otras resultan del sistema de convección termohalino del mundo debido a las variaciones de la densidad y salinidad del agua de mar. Su funcionamiento consiste en transferir el calor de las zonas tropicales a zonas polares, influyen en los fenómenos meteorológicos y en los climas del mundo, distribuyen nutrientes y dispersan organismos marinos.

Se puede considerar que al ser impulsadas por los vientos, las corrientes oceánicas son una manera indirecta de la absorción de la energía solar.

Estas corrientes, a diferencia de las corrientes costeras, se presentan en aguas más profundas y frecuentemente son estacionales, con movimientos normalmente lentos (1 m/s) y unidireccionales [8].

El movimiento del océano es impulsado por vientos de intercambio (orientales) en combinación con los vientos occidentales. La fricción entre estos vientos relativamente persistentes y la superficie del océano mueven flujos de agua marina en dirección a los sistemas de circulación natu-

ral (por ejemplo: La circulación Atlántica Norte.). El desvío de las masas oceánicas por los efectos de la fuerza de Coriolis provoca que los centros de giro de los sistemas naturales de circulación estén orientados hacia el oeste, y por ende las corrientes son intensificadas hacia esa dirección. Si comparamos las corrientes que se encuentran en el este, estas circulaciones se caracterizan por ser extensas, poco profundas y lentas, mientras que las corrientes que se encuentran en el oeste son más estrechas, profundas y rápidas.

Se han identificado cinco corrientes occidentales candidatas para la obtención de recursos energéticos provenientes del aprovechamiento de corrientes oceánicas:

- Corriente del Golfo
- Corriente de Kuroshio
- Corriente de Brasil
- Corriente de Agulhas
- Corriente del este de Australia

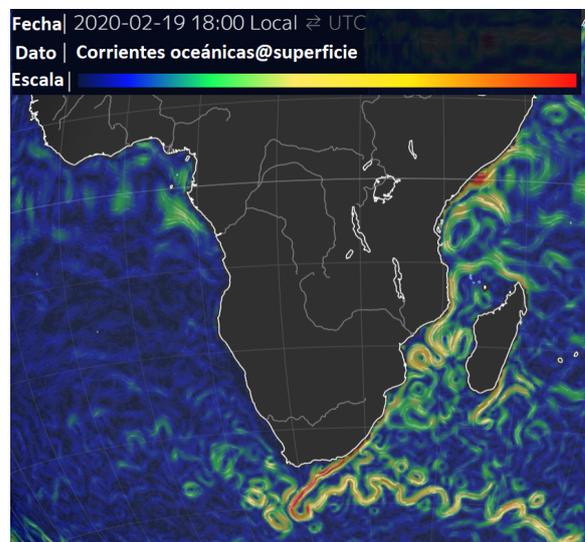


Figura 2.19: Corriente oceánica de Agulhas [20].

El Consejo Oceánico de Energía (World Energy Council) ha estimado que el potencial global extraíble de las corrientes oceánicas es de 450 GW. Gracias a que las corrientes oceánicas como la circulación de los vientos que

las provocan son relativamente estables, estos representan una manera útil de energía-base marina para la generación de electricidad que puede ser considerada en la oferta energética futura en países que cuenten con costas óptimas para la implementación de esta energía.

Energía del oleaje

Las olas son generadas cuando el viento fluye sobre la capa superficial del océano, mismo efecto que está en función de la diferencia de temperatura y presión a través del mundo derivado de la distribución de energía solar. La energía del oleaje es un fenómeno dual energéticamente hablando, su fenómeno está compuesto por una componente cinética y otra componente potencial gravitacional. Esto provoca que la energía que se puede aprovechar a partir de un dispositivo que aproveche el oleaje esté en función de la altura y el periodo de las olas [11].

Las olas en el océano ocurren en una gran variedad de escalas, desde olas con una gran duración (olas por marea), con periodos de bastantes horas, hasta olas capilares con periodos incluso menores que 0.1s. Sin embargo, las olas que son óptimas para la generación de energía son las producidas por el actuar del viento y aquellas que resultan como consecuencia del oleaje mismo. Los periodos de estas olas generalmente se encuentran entre los 2 s a los 25 s [11]. Inicialmente, cuando la superficie del

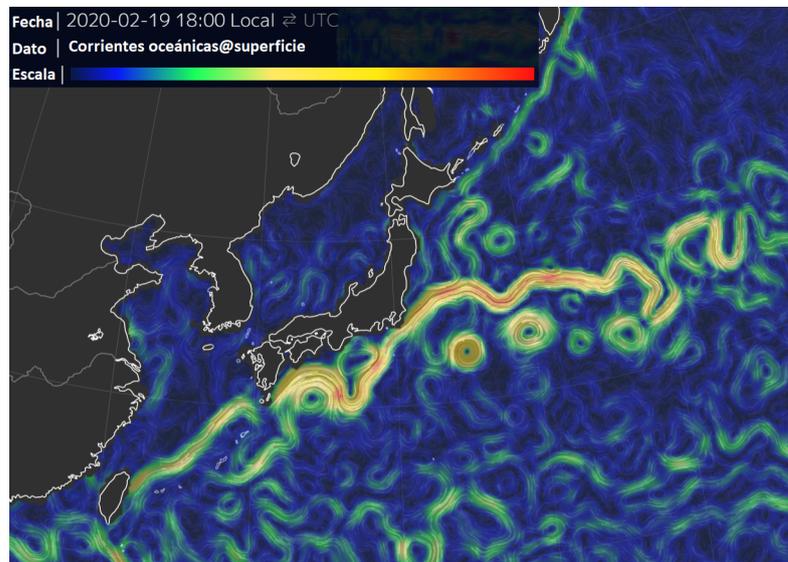


Figura 2.20: Corriente oceánica de Kuroshio [20].

mar está en completa calma, pequeñas fluctuaciones de presión asociadas

con la turbulencia en el flujo del viento sobre la superficie oceánica es suficiente para inducir pequeñas ondulaciones o remolinos sobre la superficie del mar. Una vez que estas fluctuaciones se han formado, las pequeñas pendientes derivadas del actuar del viento proveen un mecanismo para los vientos horizontales y facilitan su actuar sobre la superficie del mar, repercutiendo en el desarrollo de olas con gran tamaño. Este tipo de olas generadas localmente son conocidas como olas de viento, mientras que las olas que tienen partida lejos de la fuente de generación a través de la propagación de otras olas son denominadas olas de expansión [11].

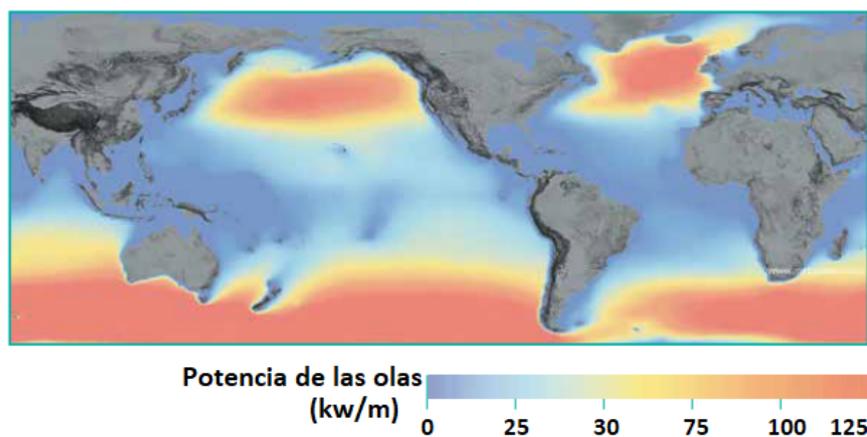


Figura 2.21: Mapa de distribución mundial de la energía de las olas [8].

De manera muy similar al viento, y en contraste con los rangos de marea, la energía del oleaje es un fenómeno estocástico, por lo que al generar energía a partir del oleaje esta característica de su naturaleza se vuelve de suma importancia. Hoy en día existen múltiples métodos modernos que permiten estimar el recurso energético del oleaje y permiten predecir el oleaje en periodos cortos de tiempo (24 h-48 h), por lo que en la estimación a medio o largo plazo se implementan diversos métodos estadísticos para determinar la variación estacional, entre otros parámetros de este fenómeno. Este es uno de los retos que enfrenta este tipo de tecnología, sin embargo, las condiciones extremas naturales locales en los diversos puntos de estudio hacen particulares a cada sitio a evaluar debido a que el oleaje depende de igual manera de la profundidad del relieve oceánico [8, 11, 12].

En general, la energía del oleaje tiene un gran potencial a nivel global y su distribución es generalmente más diversa que la correspondiente al potencial ofrecido por mareas (ver figuras 2.16 y 2.21) [11]. Como se puede apreciar en la figura 2.21 la altura de las olas, y por ende, su energía es

mayor en latitudes más altas (Latitudes $> 40^\circ$ desde el ecuador). En estas latitudes la circulación del viento es más alisa a través de grandes extensiones de mar abierto y transmiten su energía al océano en forma de oleaje. Las olas generadas llegan a tener varios metros de altura en océanos profundos y entre 1.3 a 2.86 m de altura cerca de la costa, lo que representa grandes flujos energéticos a lo largo de zonas costeras [12]. Cabe recalcar que las costas que se encuentran orientadas al oeste de los continentes tienden a tener mejores recursos de energía del oleaje [8].

La escala de la figura 2.21 se encuentra entre los 15 y los 75 kW/m, que es el rango de funcionamiento probable de los convertidores de energía de las olas. Esta tecnología busca aprovechar parte de la energía teórica mundial del oleaje calculado de 29.500 TWh/año. Esto provoca que a nivel global exista un mayor esfuerzo en investigación y desarrollo en proyectos así como en tecnologías que aprovechen el oleaje [8].

Gradiente salino



Figura 2.22: Desembocadura del Río Amazonas [21].

La salinidad en el mar se puede definir como una cantidad total de material disuelto en el agua de mar cuando todo el bromo y el yodo han sido reemplazados por una cantidad equivalente de cloro, implicando que todo el carbonato se ha convertido en óxido, y toda la materia orgánica ha sido oxidada completamente. La salinidad es expresada en gramos de sal por kilogramo de agua (UPS), o en partes por millón (ppm). La concentración de sal se distribuye tanto vertical como horizontalmente. Grandes concentraciones de sal generalmente se pueden encontrar en mares cerrados, semi-cerrados, en zonas estrechas del planeta y también cerca de ciertas costas. El agua de mar es aproximadamente 200 veces más sal-

na que el agua dulce de los ríos, ya que esta última se origina del agua de lluvia, de la nieve derretida y del agua subterránea que fluye a la costa por los principales ríos. Mientras la salinidad normal del agua marina en el océano varía entre 33 y 37 UPS, en algunos lugares del mar Rojo se pueden alcanzar 42 UPS y en el Golfo de Bothnia se pueden encontrar las concentraciones más bajas de hasta 5 UPS. La diferencia de salinidad global proviene de los movimientos submarinos y de la corriente superficial [22]. La desembocadura en el mar de los principales ríos del mundo

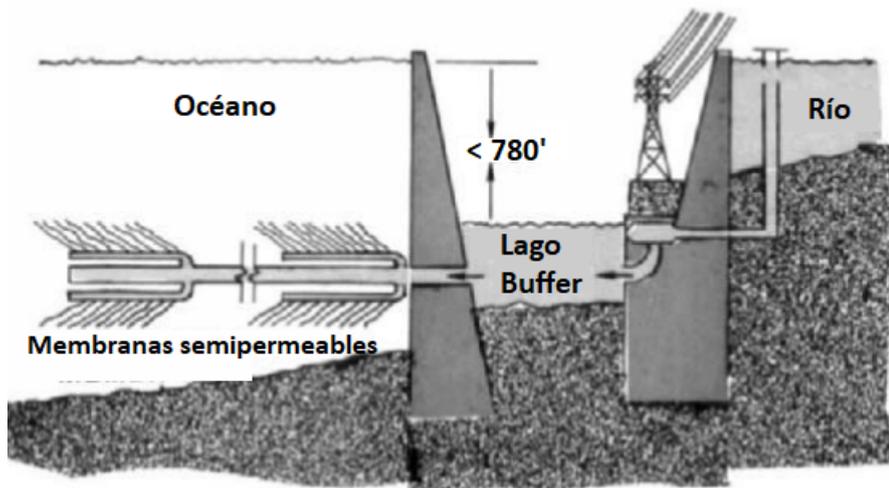


Figura 2.23: Esquema mecánico para aprovechar la presión osmótica [22].

trae consigo el contacto de grandes masas de agua dulce y agua marina. La energía involucrada en este proceso, de ser aprovechada puede proveer grandes cantidades de energía eléctrica. El principio básico para su aprovechamiento es mediante ósmosis [22].

Cuando en un recipiente se coloca una solución salina y una solución con poca concentración de sal, ambas separadas por una membrana que permite el flujo de agua pero no permite el cruce de las sales disueltas en ambos fluidos, se lleva a cabo el fenómeno conocido como ósmosis. El agua contenida en el recipiente fluye desde la solución de menor concentración a la solución de mayor concentración, de esta manera ambas soluciones se encontrarán a la misma concentración, alcanzando el equilibrio osmótico. Sin embargo, durante este proceso la solución con mayor concentración incrementa su volumen provocando creando una diferencia de presión conocida como presión osmótica. El recurso energético dentro de un sistema que presenta un gradiente salino puede ser aprovechado al convertir la presión osmótica del sistema en energía mecánica y así po-

der generar energía eléctrica, aunque de igual manera en celdas o baterías (dialíticas) la electricidad puede ser directamente generada [8, 22].

Del total de métodos propuestos para la conversión de esta energía, los más implementados son: el balance de los potenciales químicos, aprovechamiento de las propiedades electroquímicas de las soluciones con distinta salinidad separadas por una membrana de intercambio catiónico y aniónico, expansiones y contracciones cilíndricas de polímeros inmersos en las soluciones con diferente salinidad a la misma temperatura y el uso del calor generado por la mezcla irreversible de agua fresca y agua marina [22]. Los lugares óptimos para la instalación de este tipo de tecnología,



Figura 2.24: Sistema de electrodiálisis inversa [8].

además de aquellos con desembocadura de ríos, son los sumideros hipersalinos, marismas y estanques de evaporación. Por lo general, las plantas de esta tecnología pueden llegar a vincularse con células de concentración electromecánica o asistirse con otros sistemas de energía renovable. Esto se debe a que hoy en día el tipo de tecnologías necesarias para el aprovechamiento del gradiente salino en el océano no ha avanzado más allá del desarrollo e investigación. Estos desarrollos tecnológicos buscan aprovechar el potencial teórico mundial para la energía de gradiente salino de 1.650 TWh/año [8, 22].

Gradiente térmico

El Sol es la principal fuente de energía que tiene la Tierra. Los glaciares reflejan la luz del Sol, pero los océanos la absorben en aproximadamente 30% del total que se cierra sobre de ellos, además, si consideramos que este masivo cuerpo de agua cubre el 70% de la superficie de la Tierra, no es sorpresa alguna que las estimaciones de energía absorbida por los océanos en toda la Tierra se estime en 250 billones de barriles de petróleo equivalentes [12]. Esto hace que el océano sea el encargado de convertir la

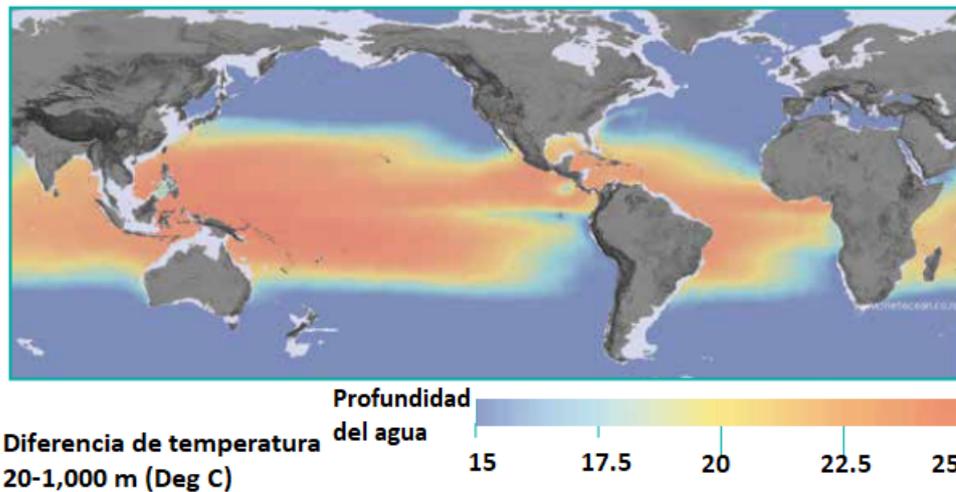


Figura 2.25: Mapa de distribución mundial de la energía térmica oceánica [8].

energía solar en gradientes térmicos. Aunque gran parte de la energía del océano puede ser considerada como energía solar, la manera más directa de aprovechar la energía oceánica-solar es probablemente a través de una planta OTEC. Este tipo de planta a lo largo de la historia, ha sido referida a través del acrónimo OTEC, mismo que refiere en español a la conversión de la energía térmica oceánica (Ocean Thermal Energy Conversion) [22].

En algunas zonas profundas del océano ocurren ascensos de agua marina con baja temperatura a zonas menos profundas, mientras que en estos mismos lugares la temperatura superficial del mar es más cálida por el calentamiento solar. Este fenómeno conforma el principio básico de esta fuente energética del océano. Una planta OTEC permite aprovechar la diferencia de temperaturas que existe naturalmente en el océano a través de ciclos termodinámicos para alimentar una turbina y generar electricidad. La tecnología necesaria requiere una diferencia de temperatura de al menos $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre el agua caliente superficial y el agua fría de las profundidades marinas durante todo el año. Gran parte del recurso solar absorbido por el océano en su capa superficial se concentra en los océanos tropicales y subtropicales que, de ser aprovechado cada hora, se podrían producir al menos 10^{21} kW [22]. Debido a que la conductividad térmica del agua marina es baja, la caída de temperatura es exponencial con la profundidad (ver figura 2.14). Entre el trópico de Cáncer y el trópico de Capricornio, el océano representa el 90% del área superficial. Es aquí en donde la capa cálida del mar está sobrepuesta sobre agua fría disponible a distintas pro-

Mínima distancia existente entre la costa y las aguas marinas cálidas tropicales

	Distancia			Distancia	
	km	millas		km	millas
Países con costas en el Océano Índico (Ordenados en sentido horario)			Países con costas en el Océano Atlántico (Ordenados en sentido horario)		
Madagascar	32	20	Sierra Leone	50	30
Mozambique	25	15	Liberia	50	30
Tanzania	25	15	Côte d'Ivoire	50	30
Kenya	25	15	Ghana	50	30
República de Somalia	25	15	Bénin(Dahomey)	50	30
Yemen	32	20	Camerún	65	40
Muscat y Oman	6	4	Brazil:		
Iran	32	20	1-20° al sur	15	10
Pakistán	32	20	Para el resto de sus costas	100	62
India:			Guayana Francesa	130	80
Costas del oeste	120	70	Surinam	130	80
Costas del este	65	40	Guayana	130	80
Birmania	75	50	Venezuela	3	2
Países con costas en el Océano Pacífico (Ordenados en sentido horario)			Colombia	32	20
Hawái	10	6	Panamá	25	15
México	25	15	Costa Rica	15	10
Guatemala	32	20	Nicaragua	150	100
El Salvador	65	40	Honduras	24	15
Honduras	75	50	México	7	5
Nicaragua	95	60	Estados Unidos de América		
Costa Rica	7	5	Florida	6	4
Panamá	25	15	Puerto Rico	2	1
Colombia	25	15	Cuba	2	1
Ecuador	25	15	Jamaica	2	1
Australia:			Haiti	2	1
Costas del noroeste	65	40	República Dominicana	2	1
Resto de costas	300	200	Guadalupe (Región francesa)	2	1
Nueva Guinea	5	3	Dominica	5	3
Java	5	3	Martinica	2	1
Filipinas	5	3	Santa Lucía	2	1
Vietnam	75	50	San Vicente y las Granadinas	2	1
Sumatra	50	30	Granada	2	1

Cuadro 2.1: Mínima distancia para países con costas con agua cálida tropical [22].

fundidades, mismas que varían de acuerdo con la latitud desde 1000 m cerca de los 30 °N y 30 °S hasta incluso menos de 100 m de profundidad cerca del ecuador (ver cuadro 2.1).

A nivel mundial, ciertas regiones dentro de la zona señalada por la figura 2.25, se han propuesto para la implementación de este tipo de tecnología como es el caso de las costas este y oeste de África, las costas tropicales del oeste y sureste del continente americano, y muchas islas del Caribe y del Pacífico. Aunque de manera general un sistema OTEC puede ser implementado dentro del cinturón tropical del planeta, las regiones tropicales y subtropicales dentro de la latitud 20° del ecuador parecen óptimas debido a que ofrecen un gradiente de temperatura adecuado a profundidades convenientes.

2.2. Energía solar

2.2.1. El sol

La humanidad, con el paso de los años ha conceptualizado al Sol desde diferentes perspectivas: desde su adoración como un ser celestial hasta lo que hoy en día conocemos a través de su estudio como la mayor fuente de energía que tiene nuestro planeta.

Este astro se puede considerar como una esfera de materia gaseosa incandescente con un diámetro de 1.39×10^9 m y a una distancia promedio de 1.5×10^{11} m de la Tierra. Desde la perspectiva de nuestro planeta, el Sol gira sobre su propio eje una vez cada 4 semanas. Si embargo, no gira como un cuerpo sólido, como lo hacen otros cuerpos celestes de nuestro sistema solar, mientras su región ecuatorial completa un giro en 27 días aproximadamente, a las regiones polares del Sol les toma 30 días [23].

El Sol puede ser considerado como un cuerpo negro dado que tiene una temperatura efectiva de 5777 K. Este cuerpo celeste es un reactor nuclear de fusión continua, en donde los gases incandescentes que lo conforman funcionan como un contenedor debido a las fuerzas gravitacionales que actúan sobre ellos. Distintas reacciones nucleares de fusión se han propuesto para describir el origen de la energía radiativa proveniente del Sol. La reacción considerada más importante es el proceso en el cual el hidrógeno se combina para formar helio (ver figura 2.26). La energía producida en el interior de la esfera solar, equivalente a los millones de grados, es transferida a través de las capas que conforman al Sol y posteriormente son radiadas al espacio. Todo a través de procesos radiativos, convectivos, de emisión, de absorción y re-radiación [23].

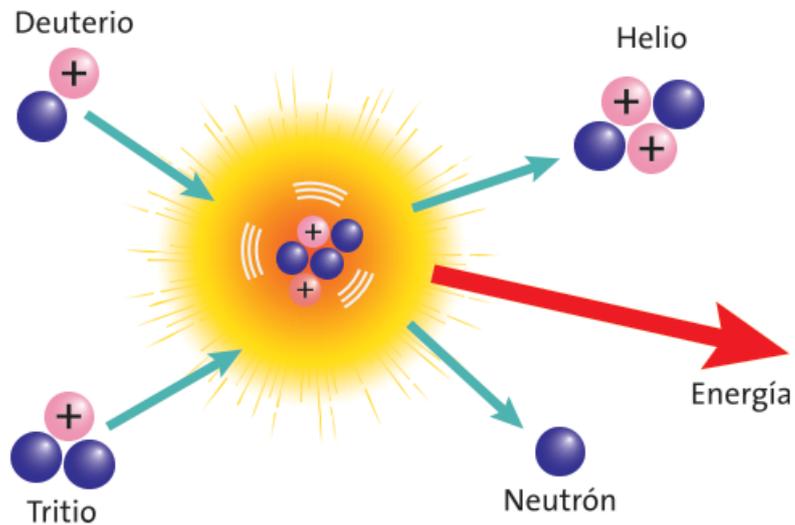


Figura 2.26: Reacción nuclear de fusión dentro del Sol [24].

La estructura general del Sol puede dividirse en núcleo, zona convectiva-radiativa y corona. En el núcleo es donde se lleva a cabo la reacción de fusión, en donde se estima que se encuentra el 40% de la masa del Sol y se genera el 90% de su energía. La siguiente capa se conoce como la zona convectiva-radiativa se estima que la temperatura disminuye unos 130000 K, la densidad en esa capa disminuye de igual forma, provocando que los procesos convectivos se vuelvan importantes. Finalmente la energía llega a la superficie del Sol en donde se alcanzan temperaturas promedio de casi 5777 K [23,24].

2.2.2. La constante solar

La constante solar puede definirse como la energía proveniente del Sol por unidad de tiempo recibida en una unidad de área correspondiente a una superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación a una distancia media del sistema Tierra-Sol fuera de la atmósfera [23].

De la superficie solar, parte de su energía se emite hacia la Tierra de manera casi constante por unidad de área en el tope de la atmósfera. La variación en magnitud ocurre a lo largo del año debido a que la órbita terrestre alrededor del Sol es eclíptica, presentando acercamientos y alejamientos del ente solar. Otra causa de la variación en la radiación se debe a la actividad solar cuyo ciclo es de 11 años aproximadamente. El valor actualizado de la constante solar es de 1360.8 W/m^2 ; este valor no es pre-

cisamente constante por los cambios en el sistema Tierra-Sol, por las modificaciones provocadas por el clima terrestre, sin embargo, para algunas aplicaciones de la energía solar son poco importantes.

Generalmente, este valor es obtenido después de que cohetes, naves espaciales o satélites puestos en órbita realizan mediciones para posteriormente obtener estimaciones a partir de la comparación entre las lecturas de radiación solar en estaciones terrestres, luego de que parte de la radiación solar atravesara la atmósfera y en parte fuera absorbida y dispersada por los componentes de la atmósfera, y las lecturas realizadas por los dispositivos espaciales [23, 24].

Relacionado al total de energía solar proveniente del Sol, es útil saber y conocer la distribución de la radiación solar tanto afuera de la atmósfera como dentro de la misma. Existen curvas estándares del espectro que generalmente se obtienen a partir de distintas mediciones realizadas en perfiles a distintas alturas [23].

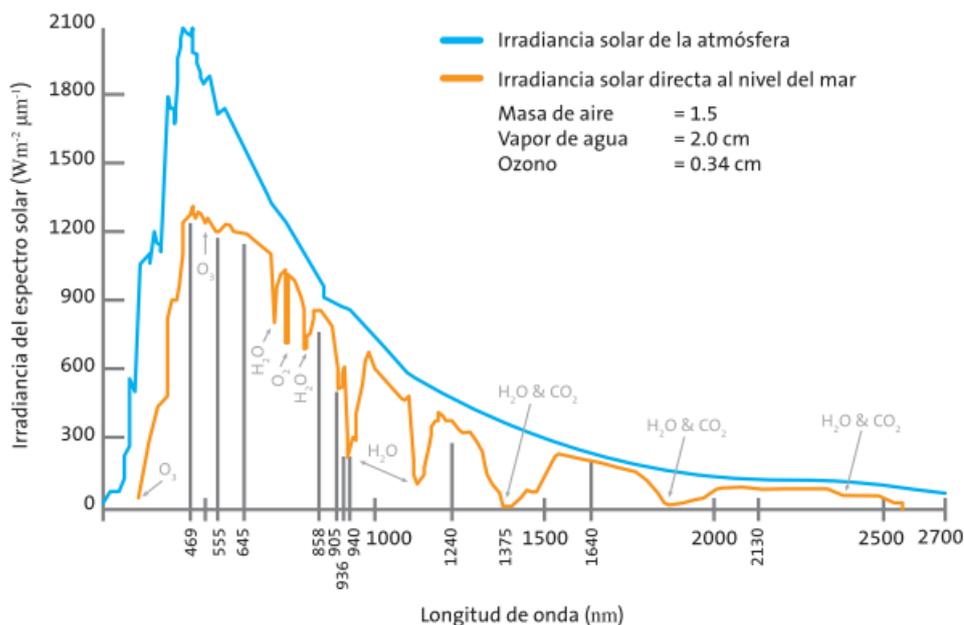


Figura 2.27: Espectro solar sobre la atmósfera y a nivel del mar [24].

La radiación emitida por la superficie solar tiene una distribución espectral que se asemeja a la de un cuerpo negro a 5777 K, como se puede apreciar en la figura 2.27 [24]. Sin embargo, podemos llegar a notar una diferencia entre la irradiancia solar fuera de la atmósfera y la irradiancia solar directa al nivel del mar. El motivo principal de esta diferencia son

las distintas capas que conforman a la atmósfera, misma en la que ocurren principalmente los siguientes fenómenos [24]:

- **Dispersión:** Este fenómeno ocurre cuando las partículas o moléculas de los gases presentes en la atmósfera redireccionan en forma aleatoria sin cambiar la longitud de onda (dispersión de Rayleigh) de la radiación electromagnética proveniente del Sol. El tamaño de las partículas y de las moléculas afecta de diferente manera a las distintas longitudes de onda. En general parte de la radiación solar es dispersada en distintas direcciones pero otra parte es devuelta al espacio por este fenómeno. Un ejemplo de este fenómeno es el color azul del cielo, el fenómeno de dispersión ocurre en mayor medida en las longitudes de ondas pequeñas (cercanas al azul), lo que provoca el color azul del cielo [24].
- **Reflexión:** Las nubes conformadas por aerosoles hielo y agua reflejan una gran cantidad de radiación incidente, esto depende del espesor de la capa de nube, que puede tener la capacidad de bloquear totalmente, parcialmente o casi nada.
- **Absorción:** Se presenta cuando moléculas de vapor de agua (H_2O), de dióxido de carbono (CO_2), de ozono (O_3), junto con aerosoles de partículas de polvo, hielo y otras sustancias, son irradiadas con radiación solar aumentando su temperatura para posteriormente reemitir en forma de radiación térmica [24].

Es importante recalcar que la presencia de ozono, agua y dióxido de carbono en la atmósfera es notable en distintas longitudes de onda como se muestra en la figura 2.27.

2.2.3. Bases de datos del recurso solar.

Los datos de energía solar están disponibles en muchos formatos. El entendimiento de la información sobre los datos de radiación es importante para su interpretación y uso; ya que existen tanto mediciones instantáneas (irradiancia) como valores integrados en un periodo de tiempo específico (irradiación-generalmente por hora o por día) para una fecha concreta o para una serie temporal, en donde las mediciones pueden ser de radiación directa, difusa, global. Otras cuestiones a considerar son los instrumentos utilizados junto con sus errores de medición y la inclinación como la orientación de la superficie sobre la que se encuentran los instrumentos de medición [23].

En la actualidad la importancia de los datos del recurso solar es tal que existe un negocio alrededor de la obtención de estos datos en series temporales para periodos de tiempo recientes. Esto ha requerido un mayor esfuerzo para determinar con mayor precisión la cantidad de radiación solar que llega a la superficie terrestre [24]. Los instrumentos de medición

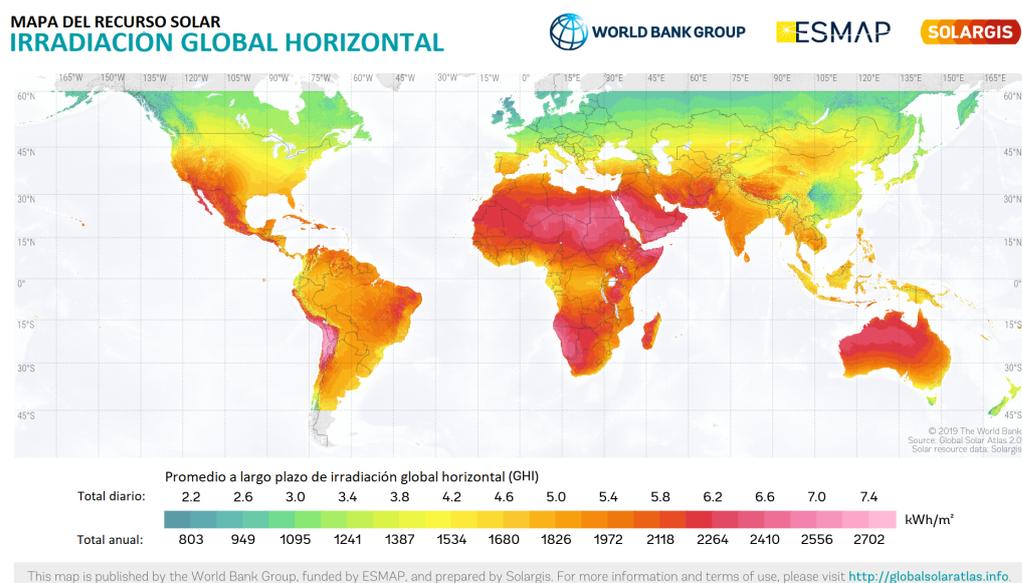


Figura 2.28: Irradiación solar global horizontal promedio diaria y total anual (kWh/m^2) [25].

del recurso solar pueden medir la radiación sólo para un punto, lo ideal sería contar con una red de sensores para aumentar la precisión de la estimación del recurso solar. Además de la necesidad de un mayor número de estaciones solarimétricas para aumentar la disponibilidad de lugares en el planeta con disponibilidad de datos. Sin embargo, esto resulta imposible debido a que los equipos necesarios son costosos, requieren una alta demanda de vigilancia, limpieza, calibración, provocando que su instalación remota sea inestable y poco confiable [24]. Los datos que un país puede tener o alguna región en el planeta están limitados por la cantidad de estaciones solarimétricas disponibles, mismas que pueden llegar a encontrarse en lugares no idóneos pero garantizan una seguridad de operación. Es por esto que se han desarrollado algunas otras formas de estimar el recurso en áreas entre puntos de medición o en general para cualquier punto, como son: Modelos matemáticos que extrapolen la información medida a otro punto, modelos matemáticos para calcular la radiación solar en el planeta y lecturas de satélites (limitados por su ángulo de vista y su falta de dis-

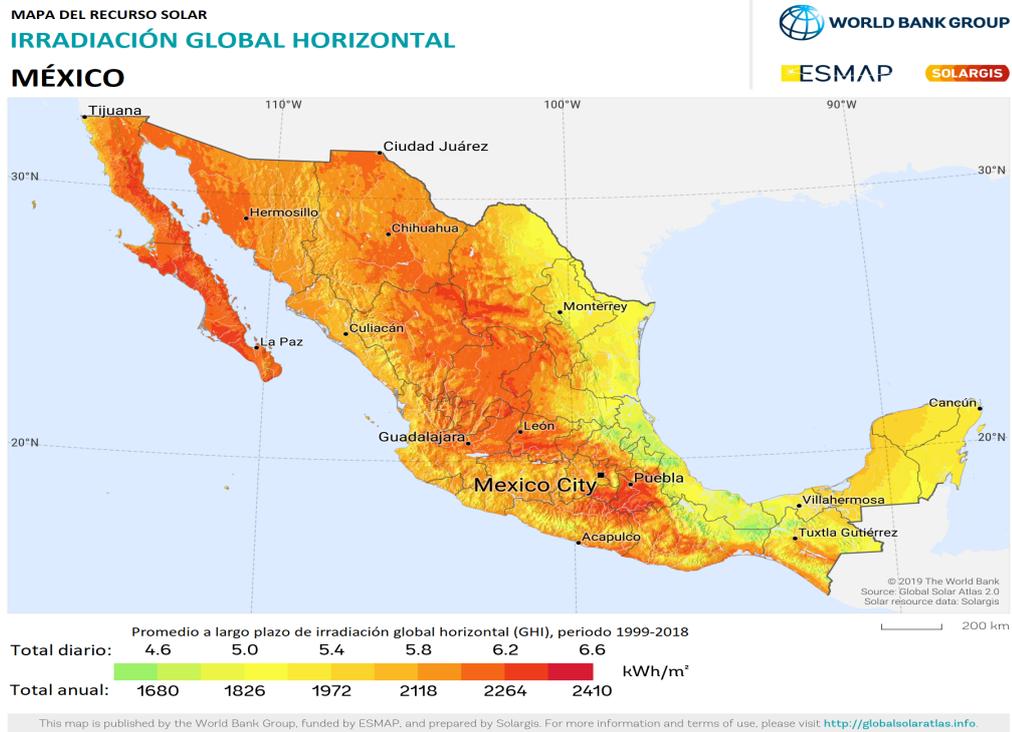


Figura 2.29: Irradiación global horizontal promedio diaria y total anual en México (kWh/m²) [25].

cernimiento entre la información satelital entre el hielo, nieve y las nubes). Estos métodos han demostrado ser consistentes y sus algoritmos de cálculo son cada vez más sofisticados mejorando sustancialmente con el paso de los años [23].

Con mucha frecuencia estos datos se reportan en forma de promedios diarios, por lo que las unidades están en MJ/m² día o en kWh/m² día. También pueden encontrarse integrados en todo el año. En la figura 2.28 se puede apreciar la irradiación solar global horizontal a partir de datos solares del Global Solar Atlas, Solar GIS [24]. A partir de la figura 2.28 podemos conocer: 1) los lugares con mayor recurso solar, 2) los valores más altos de radiación global horizontal y 3) la limitación de la base de datos y del modelo utilizado para el recurso solar en la región polar delimitada por los círculos polares. Esta información es importante como información indicativa general para determinar regiones con mayor o menor recurso. En la figura 2.29, podemos apreciar un mapa de irradiación solar global promedio diaria y total anual para México con el cuál, además de inferir los incisos uno y dos del listado anterior para nuestro país, podríamos

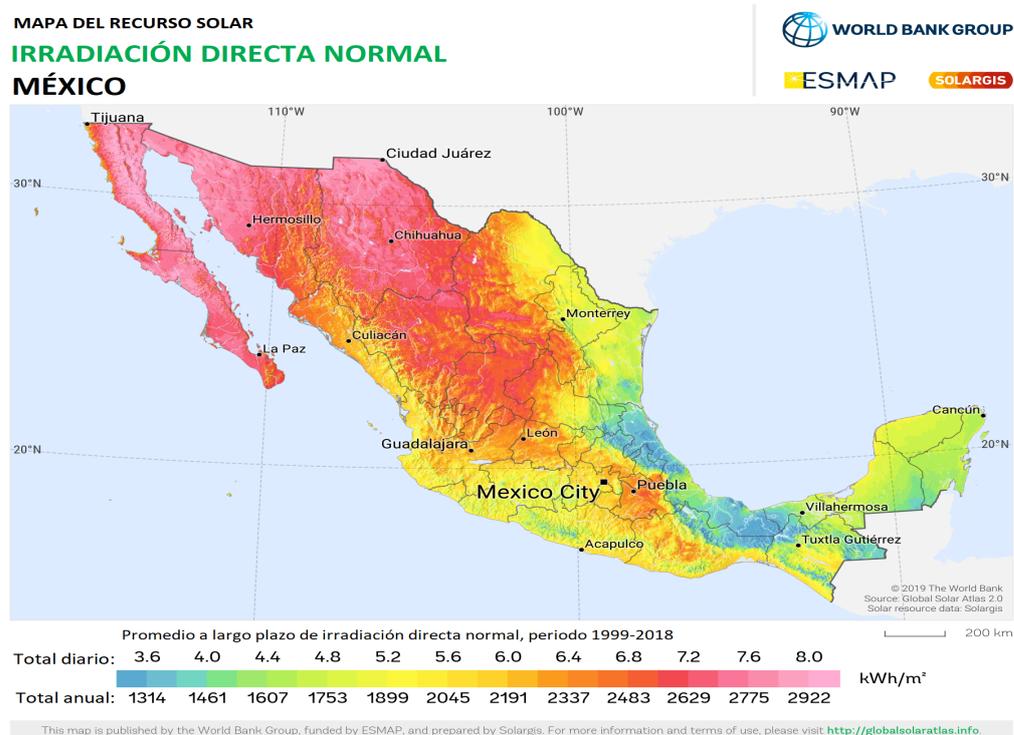


Figura 2.30: Irradiación solar directa normal promedio diaria y total anual en México (kWh/m²) [25].

inferir un resumen de la energía solar estimada disponible para la generación de energía y otras aplicaciones de energía solar en México [24].

En la figura 2.30 podemos apreciar un mapa de irradiación solar directa normal promedio diaria y total anual para México, a partir del cual se puede ubicar con mayor facilidad aquellas áreas con mayor potencial para la aplicación de tecnología solar que contempla concentración dentro de nuestro país. Sin embargo, si estamos interesados en realizar cálculos para un lugar en específico se requiere una mayor cantidad de datos solares en serie temporal o en el debido caso el año típico para dicho sitio [24].

Con lo anterior podemos inferir que para cualquier posición sobre la Tierra, entre los círculos polares, es posible estimar el recurso solar, lo que a su vez resulta útil para aquellos lugares en donde la información confiable de estaciones solarimétricas es limitada. Esta información puede ser útil para complementar o llegar a suplir la información sobre el recurso solar para una determinada localidad, sin embargo, es indispensable denotar que la información más confiable es aquella que se mide directamente en el sitio a evaluar.

Algunas bases de datos del recurso solar y de libre acceso son las siguientes:

Nombre	Institución responsable
Global Solar Atlas	Banco mundial (The World Bank)
NSRDB Data Viewer	Laboratorio Nacional de Energías Renovables de Estados Unidos(NREL)
POWER Data Access Viewer	La Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA)

Cuadro 2.2: Bases de datos solares de libre acceso.

2.2.4. Dispositivos de conversión fototérmica.

La energía del Sol se propaga como un espectro continuo de emisión en forma ondulatoria en un intervalo característico (ver figura 2.27). Esto implica que su contenido energético dependa de la frecuencia. Es por ello que el elemento principal de un dispositivo termosolar radica en una superficie recubierta con un material de alta absorción de la radiación solar, lo que propicia la elevación de la temperatura. Para esto, existen consideraciones básicas para el aprovechamiento de la energía termosolar [24]:

La primera consideración se basa en la geometría solar óptima del dispositivo, como es su inclinación y su orientación, además es necesario considerar los materiales de construcción adecuados y la elección de la mejor época del año [24].

La segunda consideración contempla la necesidad de reducir las pérdidas térmicas en el sistema ya que se centra en conservar la energía almacenada por el absorbedor el mayor tiempo posible. Es por ello que se busca proveer al absorbedor con aislamientos térmicos para disminuir pérdidas térmicas convectivas, radiativas y conductivas. Para ello es necesario conocer la interacción del absorbedor con la radiación solar de longitud de onda corta y con aquella radiación emitida por cuerpos terrestres de longitud de onda larga. El aislamiento convectivo se logra al colocar una cubierta sobre el absorbedor que sea transparente a la radiación solar y opaca a la radiación térmica. Las pérdidas radiativas se logran al realizar un depósito de materiales sobre el absorbedor para dar una propiedad selectiva espectral con alta absorptividad para la radiación solar y baja emisividad en el infrarrojo. Las pérdidas conductivas se contrarrestan al colocar materiales de baja conductividad térmica en los laterales y en la cara posterior del absorbedor [24].

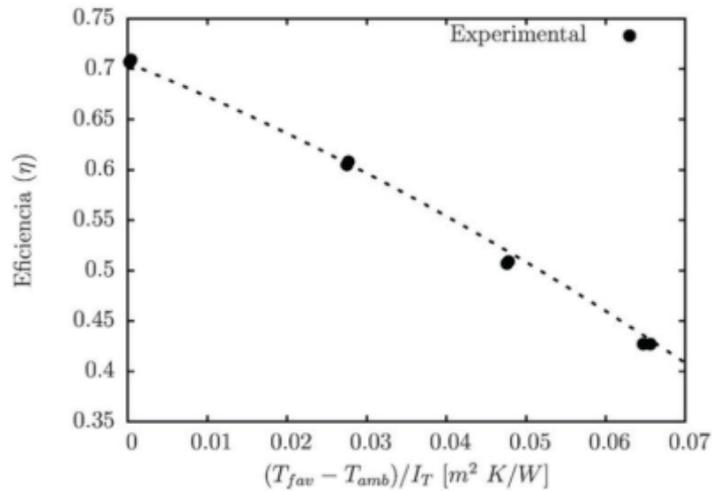


Figura 2.31: Curva de eficiencia instantánea de un calentador solar [24].

Finalmente la tercera consideración se basa en extraer de la forma más eficiente el calor almacenado en el absorbedor. Para esto se utiliza un fluido de trabajo que por sus características permita optimizar la recuperación de la energía térmica. En lo general se utiliza agua, soluciones acuosas, aceites y en algunas otras aplicaciones aire [24].

Con las consideraciones anteriores se puede intuir un balance térmico en un absorbedor termosolar como:

$$Q_{Abs} = Q_{ut} + Q_{pe} + Q_{Al} \quad (2.2)$$

en donde Q_{Abs} es el calor absorbido por el sistema, Q_{ut} refiere al calor útil, Q_{pe} es el calor perdido y Q_{Al} es el calor almacenado por el sistema [24].

Sin embargo, a nivel comercial es necesario definir el concepto de eficiencia de un dispositivo termosolar en función de las propiedades ópticas de los materiales, en especial para la absorptancia (α) del absorbedor y la transmitancia (τ) de la cubierta, con la finalidad de relacionar una eficiencia máxima con la eficiencia óptica ($\tau\alpha$), es decir, el producto entre la transmitancia y la absorptancia. Además, es necesario incluir la diferencia entre la temperatura promedio del fluido térmico o la de entrada del mismo (T_{fi}) y la temperatura del medio ambiente ($T_{mf} - T_{amb}$). De igual manera, la radiación solar incidente debe de ser considerada por unidad de superficie (I_T) junto con el coeficiente total de pérdidas térmicas (U_c) y la eficiencia de extracción del calor acumulado (F'). Todos estos parámetros mencionados se pueden generalizar en la siguiente ecuación

de eficiencia(η) [24]:

$$\eta = F' \left[\tau \alpha - \frac{U_c}{I_T} (\Delta T) \right] \quad (2.3)$$

La eficiencia a partir de esta ecuación es obtenida de manera experimental en relación a las consideraciones determinadas por normas que pueden ser internacionales (ISO 9806) como nacionales (NMX-ES-001-NORMEX-2005). Es importante referir bajo cuál norma se ha realizado la experimentación para evitar confusiones en cuanto a los términos utilizados para determinar la eficiencia instantánea; ya que para el caso de la NMX-ES-001-NORMEX-2005 las temperaturas inmersas en el ΔT son $\Delta T = T_{fi} - T_{amb}$ en donde T_{fi} es la temperatura a la entrada del calentador y la T_{amb} es la temperatura ambiente, mientras que para la ISO 9806 el ΔT está definido por $\Delta T = T_{mf} - T_{amb}$ en donde T_{mf} es la temperatura promedio del fluido y T_{amb} es la temperatura ambiente [24].

En la figura se muestra una curva que representa la eficiencia instantánea de un calentador solar bajo la norma ISO 9806. En esta gráfica la eficiencia instantánea se ubica en el eje Y cuando la incidencia de la radiación solar directa es perpendicular al plano del captador solar. Esta eficiencia instantánea se obtiene en función de parámetros climatológicos y de funcionamiento, como son la diferencia de temperatura entre el fluido dentro del calentador solar y el ambiente, dividido por la irradiancia solar incidente en el plano del captador por unidad de superficie (I_T). Estos parámetros climatológicos y de funcionamiento se pueden apreciar en el eje X. A partir de los puntos experimentales y de una regresión lineal o cuadrática, es posible obtener la curva característica del calentador solar [24]:

$$\eta = \eta_0 + \eta_1 \left(\frac{\Delta T}{I_T} \right) \quad (2.4)$$

$$\eta = \eta_0 + \eta_1 \left(\frac{\Delta T}{I_T} \right) + \eta_2 \left(\frac{\Delta T^2}{I_T} \right) \quad (2.5)$$

En donde η_0 , η_1 , η_2 resulta de la multiplicación entre F' y los parámetros inmersos en las ecuaciones de ajuste de eficiencia instantánea utilizadas [24].

2.2.5. Factor modificador del ángulo de incidencia.

Un captador solar plano modifica su rendimiento de acuerdo con el ángulo de incidencia de la radiación solar directa sobre el plano del captador. El factor modificador del ángulo de incidencia ($K_{\tau\alpha}$) permite conocer la variación del rendimiento del calentador solar cuando la radiación solar

directa no es normal a la superficie del calentador. Se obtiene de manera experimental en función del ángulo comprendido entre el vector normal a la superficie y el vector solar [24].

Para el cálculo correcto de la eficiencia instantánea cuando la radiación solar directa no es normal a la superficie del calentador, es necesario multiplicar el valor de $K_{\tau\alpha}$ por el término η_0 de la ecuación de rendimiento térmico del captador. En la figura 2.32 se puede apreciar una gráfica del factor modificador del ángulo de incidencia:

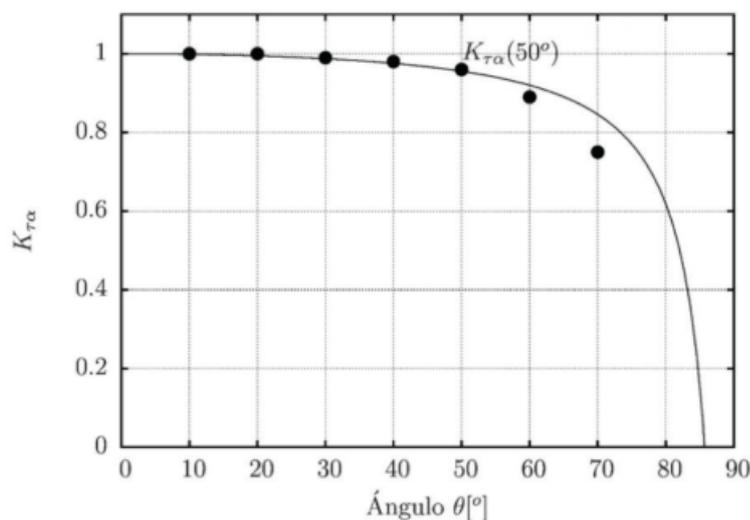


Figura 2.32: Factor modificador del ángulo de incidencia [24].

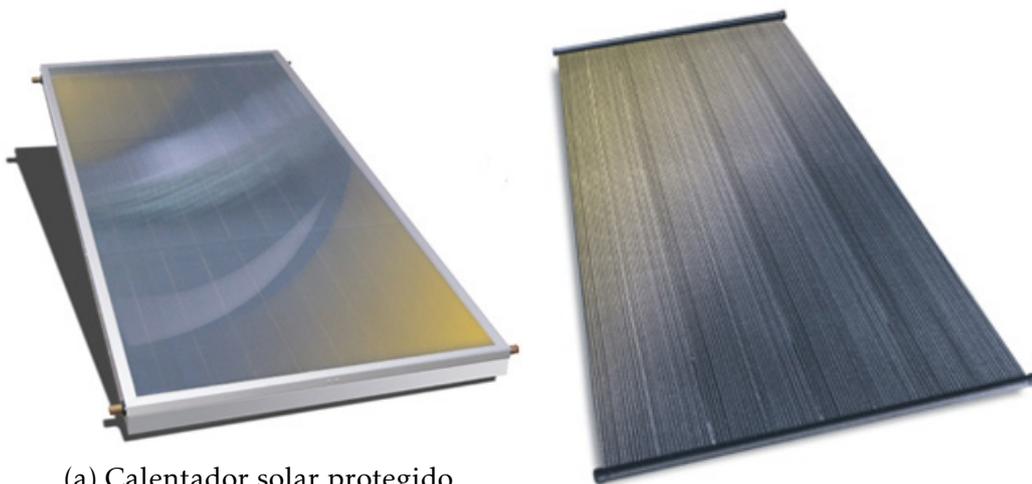
2.2.6. Dispositivos termosolares de baja temperatura.

Los sistemas termosolares de baja temperatura pueden clasificarse en los siguientes tipos:

- **Captador solar plano.** Consiste en una superficie plana a la que se le añaden generalmente tubos por los que circula un fluido que se calienta durante su paso a través del panel. Este panel es revestido de una superficie absorbente selectiva color negro. Estos dispositivos también se pueden clasificar de la siguiente manera:
 - a) **Calentador plano protegido** (ver figura 2.33a). Este tipo de calentadores solares colocan al absorbedor dentro de una caja con una de sus cubiertas translúcida a la radiación solar pero opaca

a la radiación térmica, las demás cubiertas contienen un aislante térmico para disminuir las pérdidas térmicas y un marco que les otorga rigidez. De esta manera se disminuyen las pérdidas de calor por convección, radiación, conducción y se protege el conjunto de las condiciones atmosféricas [24].

- b) **Calentador plano descubierto** (ver figura 2.33b). Este tipo de calentadores se caracterizan por tener el absorbedor expuesto, mismo que generalmente representa la estructura del calentador plano, y por no contar con ningún método para disminuir las pérdidas térmicas [24].



(a) Calentador solar protegido.

(b) Calentador solar descubierto.

Figura 2.33: Calentadores solares planos [24].

- **Captador de tubos de vacío.** Estos calentadores aíslan la superficie absorbidora del exterior por un tubo de vidrio simple o doble que crea una cámara de vacío. Existen dos tipos:
 - a) **Flujo directo.** El flujo absorbedor circula por los tubos del sistema al igual que en un captador plano (ver figura 2.34).
 - b) **Flujo indirecto o Heat pipe.** Consiste en un sistema que contiene el absorbedor dentro de un tubo de calor en donde un fluido es evaporado y éste transfiere su energía al condensarse en el extremo del tubo de calor (ver figura 2.34) [24].

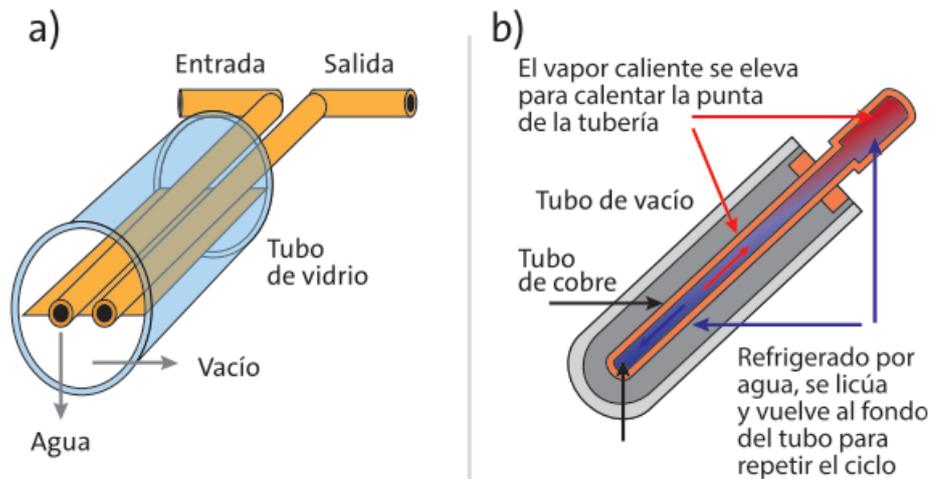


Figura 2.34: Captador de tubos de vacío: a)Flujo directo, b)Flujo indirecto [24].

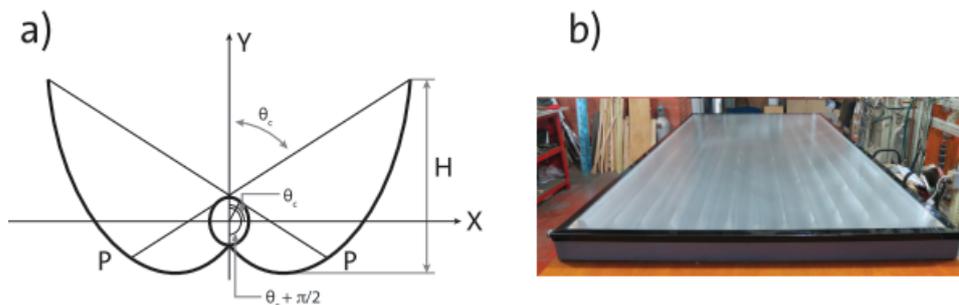


Figura 2.35: Captador parabólico compuesto. a) Geometría b) Equipo comercial [24].

- **Captador parabólico compuesto (CPC).** Es un calentador solar que concentra la radiación solar incidente sobre un primer receptor, cuya geometría está compuesta por un segmento de parábola y un segmento de involuta, en un segundo receptor cilíndrico (ver figura 2.35). Este dispositivo puede utilizarse en rangos de baja y mediana temperatura, dependiendo la aplicación [24].

Otra clasificación de los captadores solares es en sistemas activos y pasivos:

- **Activos:** Este tipo de sistemas utilizan algún tipo de energía externa para mover el fluido en el interior del circuito.
- **Pasivos:** Estos sistemas no utilizan energía interna para circular el

fluido en su interior. La circulación dentro del sistema sucede por el principio de convección natural, mejor conocido como efecto temo-sifónico [24].

2.3. Plantas OTEC

2.3.1. Historia de la OTEC

El concepto de “energía solar del mar”, no es un concepto nuevo. El 17 de septiembre de 1881, la revista francesa “*La Revue Scientifique*” publicó un documento que en su momento debatió la habilidad de la “fuerzas naturales” para la producción de electricidad. Este tema fue escrito por el físico francés Arsène d’Arsonval, quien sugirió la operación de un sistema cerrado en el cual un fluido de trabajo, posiblemente dióxido de azufre, podría ser vaporizado por las aguas cálidas (30 °C) de primavera en *Geneve*, para que después de ser aprovechado, fuera condensado por agua fría proveniente de un río (15 °C). A partir de esto d’Arsonval mencionó que la caída de presión resultante a lo largo del sistema representaba una fuente de energía constante. Además, él se percató que múltiples lugares alrededor del mundo contaban con la posibilidad de aprovechar el diferencial de temperaturas disponible en la región tropical del océano únicamente con la implementación de una máquina térmica que fuera diseñada para aprovechar el gradiente térmico existente entre las aguas superficiales y las que se encuentran en las profundidades marinas [22].

De manera análoga, el 7 de Agosto de 1913 el ingeniero americano Campbell propuso aprovechar el gradiente térmico natural del mar mediante la implementación del vapor de un fluido de trabajo intermedio como amoníaco, dióxido de carbono, clorometano (gases licuados). Esta propuesta fue publicada en la revista *Engineering News*. [22]

Estas publicaciones derivaron en el interés de Guggenheim, Romanovsky y Daric en 1957, quienes en Francia re-examinaron estas propuestas. A partir de los resultados obtenidos en Francia, Howe llevó a cabo estudios, en la Universidad de California, Berkeley direccionados a resolver los problemas del tamaño y costos de las turbinas necesarias para la operación de este tipo de sistemas. Años más tarde, surgió la propuesta de Rasson (1960), Gomella (1966) y Barjot (1971) que consideraba la posibilidad de combinar sistemas de energía solar térmicos dentro de los esquemas de operación de esta tecnología. En 1965 A. Lavi y C. Zener, quien era científico en jefe en *Westinghouse*, realizaron estudios relacionados con los aspectos prácticos por resolver en el aprovechamiento de la energía térmi-

ca del océano. Ellos re-examinaron la opción del ciclo abierto, mientras la División Solar de Energía de la Administración de Investigación y Desarrollo de Energía del gobierno de Estados Unidos lograba avances en materia del ciclo cerrado. Ambas investigaciones aportaron en las divergencias existentes en los diseños de los intercambiadores de calor y tuberías de bombeo de agua marina. En 1970 Gérard y Roels publicaron un artículo en "the Journal of Marine Technology Society" referente al uso del agua marina como un recurso. En este artículo determinaron las ventajas en las islas vírgenes para proveer agua fría que lograba la diferencia térmica con el agua superficial del mar y así poder generar electricidad, desalinizar agua marina y fertilización del mar. Tiempo después, Roels retomó este tema junto con Othmer en 1973, publicando un artículo en la revista *Science* en donde puntualizaron que los diversos diseños que involucraban tuberías suspendidas de succión vertical en plataformas o buques aumentaban las dificultades para la producción de energías y para la obtención de múltiples pseudo procesos [22].

Plantas.

Todo comenzó en 1930 con el ingeniero George Claude quien conceptualizó el sistema de ciclo cerrado para vaporizar el agua superficial del mar mediante un despresurizador, acto seguido este vapor era expandido en una turbina y se condensaba mediante el uso de agua fría marina. George Claude logró conceptualizar esta idea debido a que era estudiante de d'Arsonval con quien posteriormente estableció amistad, compartió ideas que le permitieron desarrollar pruebas experimentales exitosas cerca de Ougrée, Bélgica, en donde utilizó un gradiente de temperatura de 20°C comprendido entre el agua fría bombeada del río Meuse y el agua cálida de desecho descargadas por una siderúrgica en el mismo río [22].

En la segunda mitad de 1930, construyó una planta que llegó a producir 22 kWp en las costas de Matanzas Bay ubicadas en el este de la Havana, Cuba. Esta planta trabajaba con un gradiente térmico de 14°C . La operación de esta planta fue terminada en el último cuarto de 1930 cuando falló la tubería utilizada en el bombeo de agua fría. Esta tubería, o partes de la misma, se perdió en el mar a pesar de los flotadores que se habían conectado para aligerar la carga de la tubería en el piso de la bahía. Cabe señalar que la historia determina que esta planta OTEC instalada en Cuba era económicamente ineficiente, ya que fue necesario inyectar electricidad de la red cubana para asegurar el funcionamiento de las bombas del sistema. Sin embargo, Claude logró demostrar que el principio de funcionamiento se cumplía. Contemplando los retos ingenieriles y ambientales experi-

mentados en Matanzas, Claude desarrolló una planta flotante de 800 kW que fue instalada en un barco de carga llamado “La Tunisie”, mismo que fue equipado para ser un recipiente de refrigeración. Claude estacionó este buque en la costa de Brazil en 1934, en donde planeaba hacer hielo y venderlo en Rio. Desafortunadamente, el sistema tuvo una baja operación y la gran tubería pesada de agua fría se volvió a perder. Claude, hasta este punto de la historia había financiado sus proyectos con su propio recurso. Estos resultados, lo obligaron a abandonar este proyecto [22].

Durante la segunda guerra mundial, el gobierno francés adquirió un interés en la conversión de energía por gradiente térmico. Esto le dio la oportunidad a Claude de hacer planes para una planta de 40,000 kW que se instalaría en la costa africana de Ivory cerca de Abidjan. Después de innumerables inconvenientes y de la muerte de Claude, al proyecto se le disminuyó el presupuesto provocando que los recursos alcanzaran para una planta de 5000 kW que funcionara con un gradiente de 20 °C capaz de generar energía y de obtener agua potable. La construcción de la planta comenzó en 1950 pero tuvo los mismos problemas experimentados por Claude en Cuba. La última prueba realizada en esta planta fue en 1956, después de la cual fue abandonado el proyecto por un proyecto más barato de una planta hidroeléctrica en La Bia, cerca de Abidjan. En 1958, “Electricité de France” comenzó otro proyecto, sin embargo nunca lo llevó a cabo por la variación del recurso térmico en el lugar planeado. Esto ocurrió en otros múltiples proyectos como fue en Curacao, Rio de Janeiro [22]. Esto volvió a ocurrir en 1970 cuando el gobierno francés puso en marcha un proyecto piloto OTEC de 5 MW en la Polinesia Francesa. El abandono fue provocado por la caída del precio del petróleo en 1986. En 1974 el Laboratorio de Energía Natural en Hawái (NELHA) construyó una planta piloto montada en una barcaza de la Marina de Estados Unidos que sólo fue operativa durante tres meses. En 1982 se construyó una planta de ciclo cerrado de 32 kW en el Instituto de Energía del Océano de Japón, misma que dejó de operar en 1983 por consumir el 90% de la energía que producía. En 1994, se diseñó y construyó una planta OTEC con ciclo Uheara de 4.5kW en la Universidad de Saga en Japón. Años más tarde, en 1999 esta misma universidad en colaboración con el Instituto Nacional del Océano (NIOT), instalaron una planta flotante en India de 1 MW, sin embargo sólo operó del 2000 al 2002 debido a que presentó problemáticas en las tuberías de agua fría. En el año 2012, el Instituto Coreano de Ciencias Oceánicas (KIOST) diseñaron una planta de ciclo cerrado de 20 kW con la finalidad de utilizarla como un prototipo para una planta de 1 MW en 2013. En este último año mencionado, en la isla de Kumejima fue instalada una planta compuesta por dos unidades de 50 kW por la Universidad

de Saga. En 2014 la empresa francesa DCNS comenzó la instalación de una planta sobre la costa de 10.7 MW en Bellefontaine, Martinica, misma que actualmente se encuentra en construcción. En este mismo año, la Corporación OTEC firmó un acuerdo para la instalación de una planta sobre la costa en las islas vírgenes de Estados Unidos. En 2015 se instaló una planta de ciclo cerrado en Hawái de 100 kW. El Instituto Coreano de Ciencias Oceánicas construyó una planta prototipo OTEC entre el 2017 y 2018 con la finalidad de comenzar con prototipos para comercializar una planta de 100 MW para el 2020. En la figura se pueden apreciar las plantas OTEC que hoy en día son propuestas hasta aquellas que son operacionales [22].

2.3.2. Principios de funcionamiento.

Ciclo de Carnot.

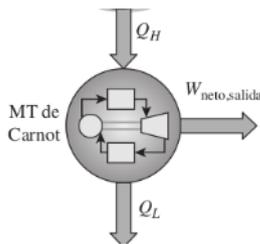


Figura 2.36: Máquina de Carnot [26].

Existen dispositivos cíclicos que utilizan fluidos de trabajo para su operación denominados máquinas térmicas. La eficiencia de la máquina térmica depende en gran medida de cómo se ejecuten los procesos que constituyen el ciclo con el que trabajan. Estos procesos se pueden maximizar haciéndolos reversibles, ya que al no generar entropía estos ciclos se convierten en ideales con la finalidad de utilizarse como puntos de partida en el desarrollo de ciclos reales.

El ciclo más conocido es el ciclo de Carnot propuesto en 1824 por el ingeniero francés Sadi Carnot, de ciclo que define la máquina térmica de Carnot compuesta por cuatro procesos reversibles, dos isotérmicos y dos ciclos adiabáticos pudiéndose llevar a cabo en un sistema cerrado o de flujo estacionario (ver figura 2.37). Este concepto es crucial para determinar dos enunciados relacionados a máquinas térmicas, mismos que se conocen como principios de Carnot, los cuales expresan los siguiente [26]:

- La eficiencia de una máquina térmica irreversible es siempre menor que la eficiencia de una máquina reversible que opera con los dos depósitos iguales.
- Las eficiencias de las máquinas térmicas reversibles que operan con los mismos dos depósitos son las mismas.

Los dos enunciados anteriores estipulan que la hipotética máquina de Carnot es la máquina reversible por excelencia con la eficiencia máxima

que puede tener una máquina térmica que opera entre dos depósitos de energía térmica con temperaturas T_L y T_H respectivamente; esto hace que todas las máquinas térmicas irreversibles (reales) que operan entre estas temperaturas tienen una eficiencia menor. La eficiencia térmica de Carnot

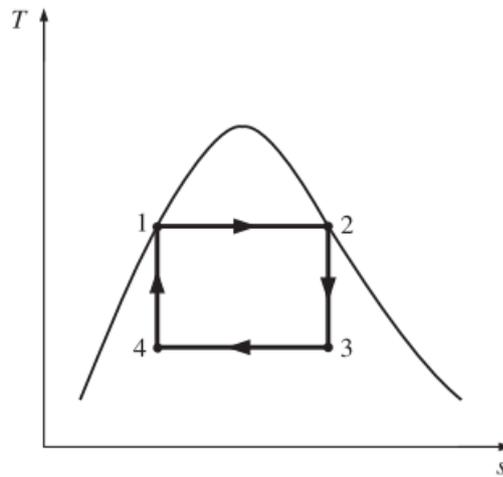


Figura 2.37: Diagrama temperatura-entropía del ciclo de Carnot [26].

se define como:

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (2.6)$$

En donde η_{Carnot} es la eficiencia de Carnot, T_L es la temperatura más baja y T_H es la temperatura más alta de los depósitos que permiten que funcione la máquina térmica de Carnot, recordando que ambas están expresadas en temperaturas absolutas $[K]$ [26].

Ciclo Rankine Ideal.

Este ciclo ideal es el que mejor se ajusta a centrales eléctricas de vapor y curiosamente es el más utilizado en los sistemas OTEC. El ciclo Rankine ideal consiste en cuatro procesos(ver figura 2.38) [26]:

- **Compresión isentrópica en una bomba(1-2):** En esta etapa el fluido de trabajo entra a la bomba como líquido saturado para ser bombeado isentrópicamente hasta la presión de operación de la caldera. La temperatura del fluido de trabajo aumenta ligeramente debido a la compresión isentrópica dado que existe una ligera disminución en el volumen específico del fluido de trabajo.

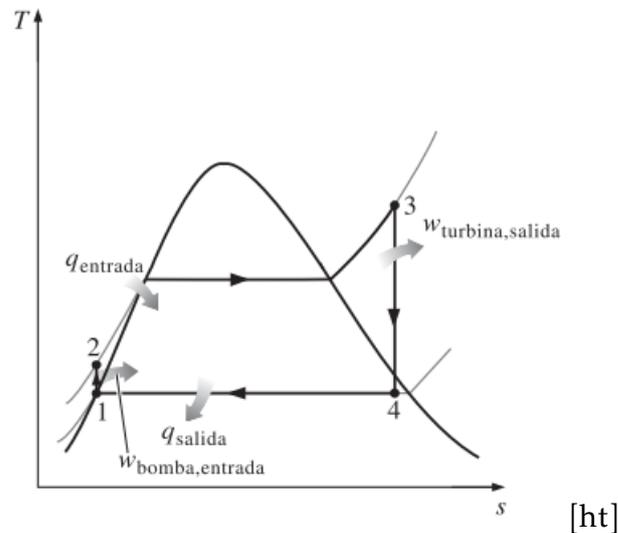


Figura 2.38: Diagrama temperatura-entropía del ciclo Rankine [26].

- **Adición de calor a presión constante en una caldera(2-3):** El fluido de trabajo ingresa a la caldera como líquido comprimido a la presión de operación de la caldera, es calentado en un proceso isobárico y sale como vapor sobrecalentado.
- **Expansión isentrópica de la turbina(3-4):** Vapor sobrecalentado entra a la turbina para expandirse isentrópicamente produciendo trabajo al hacer girar un eje conectado a un generador eléctrico. El fluido de trabajo disminuye su presión y su temperatura de tal modo que sale de la turbina como vapor saturado o como una mezcla con alta calidad (vapor húmedo).
- **Rechazo de calor a presión constante en un condensador(4-1):** El fluido de trabajo entra a un condensador, en donde se le retira calor a presión constante para salir como líquido saturado y poder volver a entrar a la bomba completando el ciclo.

Para calcular la eficiencia de este ciclo se deben conocer las entalpías de cada proceso o, en su debido caso, el calor de entrada en la caldera y el trabajo neto en la turbina o el calor de salida en el condensador para poder efectuar el cálculo de la eficiencia de la siguiente forma:

$$\eta_{Rankine} = \frac{W_{neto}}{q_{entrada}} = 1 - \frac{q_{salida}}{q_{entrada}} \quad (2.7)$$

En donde W_{neto} es el trabajo neto generado en la turbina, $q_{entrada}$ refiere al calor de entrada en la caldera y q_{salida} es el calor de salida en el condensador y $\eta_{Rankine}$ es la eficiencia del ciclo Rankine [26].

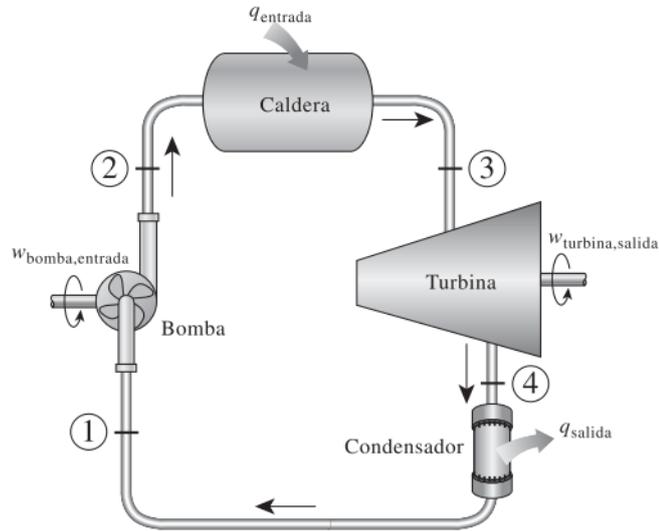


Figura 2.39: Componentes del ciclo Rankine [26].

Sistema OTEC

Un sistema OTEC es aquel conjunto de dispositivos que permiten aprovechar el gradiente térmico natural del océano ($\Delta T_{min} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$). Estos sistemas se basan en los principios termodinámicos del ciclo Rankine para generar electricidad por medio de turbinas de vapor [5]. Esta tecnología también puede ser utilizada para enfriamiento de edificaciones, proveer agua rica en nutrientes a la industria pesquera, dependiendo el tipo de ciclo OTEC utilizado, obtención de grandes cantidades considerables de agua dulce, producción de hidrógeno y Litio [5, 27–31].

El principio fundamental de un sistema OTEC radica en la diferencia de temperaturas entre la capa superficial del mar y el agua fría proveniente de bajas profundidades. De hecho, un sistema OTEC puede ser visualizado como una tecnología que aprovecha la energía solar temporalmente almacenada en las capas superficiales oceánicas. Aunque esta no parezca ser una fuente energética considerable, es una realidad que el agua es capaz de almacenar grandes cantidades de energía, por ejemplo: Con una diferencia de temperatura de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre un metro cúbico de agua superficial del mar y un metro cúbico de agua fría de bajas profundidades, la diferencia energética es aproximadamente de 20 millones de calorías o cerca

de 80 MJ, por lo que de liberarse esa cantidad de energía en un segundo se podrían generar cerca de 80 MW de potencia [27].

2.3.3. Tipos de Plantas OTEC.

Hoy en día existen diversas modalidades de ciclos OTEC: ciclo abierto (OC, por sus siglas en inglés), ciclo cerrado (CC, por sus siglas en inglés), ciclo híbrido y otros ciclos. Dentro de la definición de otros ciclos se encuentran ciclos OTEC asistidos o integrados a fuentes energéticas del tipo renovable y no renovable.

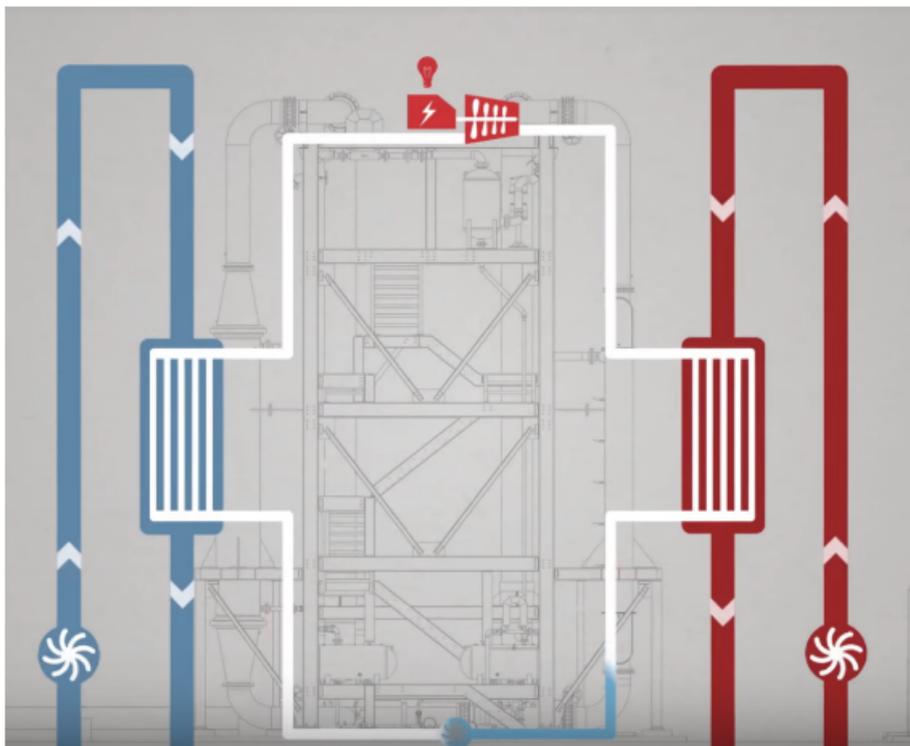


Figura 2.40: Diagrama de Planta OTEC de ciclo cerrado en Makai, Hawaii [32].

Ciclo cerrado

Este ciclo utiliza un fluido de trabajo con un bajo punto de ebullición, usualmente amoniaco, propano, freón, R134, R123, entre otros, que circula dentro de un sistema cerrado bajo el principio de operación y con los componentes necesarios del ciclo termodinámico Rankine para generar elec-

tricidad. Está compuesto por 7 dispositivos, tres bombas, un condensador, un evaporador, una turbina y un generador eléctrico (ver figura 2.40). En este tipo de ciclo se bombea el fluido de trabajo hasta la presión de operación del primer intercambiador de calor en donde el agua superficial del mar es utilizada para evaporar el fluido de trabajo y obtener vapor sobrecalentado que al entrar a la turbina acoplada a un generador se expanda y mueva los álabes de esta generando electricidad; el agua fría proveniente de bajas profundidades del mar se utiliza para condensar el vapor húmedo a la salida de la turbina cuando ambos fluidos circulan dentro del segundo intercambiador de calor (condensador) a la presión de entrada de la bomba, permitiendo así, que el ciclo comience de nuevo [5,27,33].

Las ventajas que presenta este ciclo son: para una misma potencia de generación el ciclo cerrado es más compacto que el ciclo abierto; otra ventaja es que este ciclo puede ser diseñado de tal manera que se pueden utilizar los diseños de turbo maquinaria e intercambiadores de calor existentes; la corrosión e incrustaciones biológicas son menores en comparación con el ciclo abierto debido a que el flujo de masa oceánica no es utilizada como el fluido de trabajo dentro del ciclo [33].

Algunas de las desventajas que presenta este ciclo son: el peligro ambiental o de contaminación que representa el fluido de trabajo para el ambiente y las aguas oceánicas en el caso de ocurrir un derrame o fuga, la nula posibilidad de obtener agua potable y sal como un subproducto derivado de su operación [33].

Ciclo abierto

A diferencia del ciclo cerrado, el fluido de trabajo del ciclo abierto es el agua superficial del mar. Este ciclo mantiene el principio básico de operación de un ciclo Rankine en los procesos de evaporación, condensación y generación eléctrica a partir de la expansión isentrópica del vapor en una turbina. Sin embargo, el fluido de trabajo no es recirculado por una bomba entre el evaporador y el condensador ya que se requiere el bombeo de agua marina superficial fresca para que vuelva a funcionar el ciclo.

Este ciclo comienza cuando agua superficial del mar es bombeada para el llenado de una cámara despresurizadora, en donde después de su llenado total, es cerrada completamente con el uso de válvulas que impiden fugas de presión y de fluido. Posteriormente una bomba de vacío disminuye la presión en el evaporador por debajo de la presión atmosférica en aproximadamente 1%. Esto ocasiona que una pequeña porción del volumen de entrada, cerca del 0.5%, cambie de fase y se convierta en vapor, momentos después, un compartimiento dentro de la cámara despresuri-

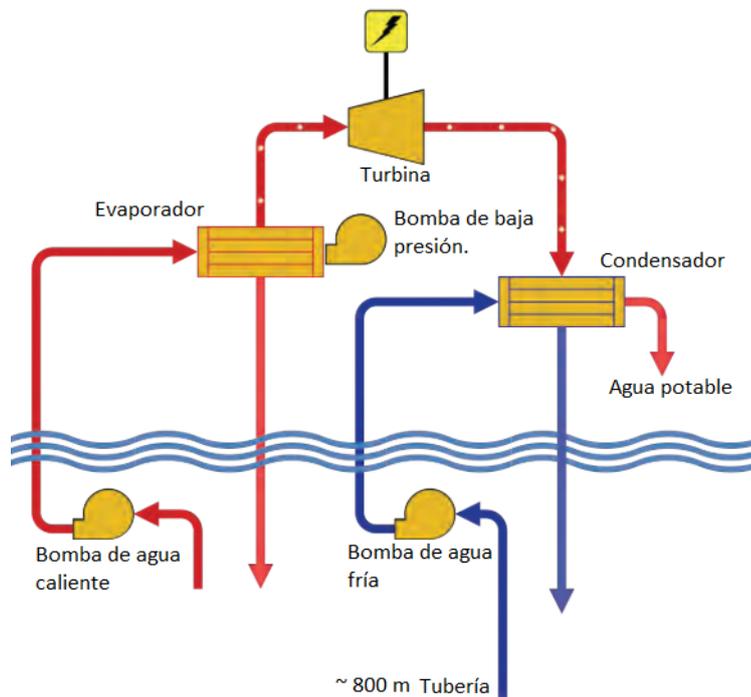


Figura 2.41: Esquema del principio de operación de un ciclo abierto OTEC [27].

zadora se abre para que el vapor de agua fluya hacia una turbina de baja presión para generar electricidad. Mientras lo anterior sucede, un compartimiento se abre dentro de la cámara despresurizadora para descargar al mar el agua marina superficial no evaporada y así posteriormente volverse a llenar. A continuación el vapor húmedo que sale de la turbina de baja presión fluye al interior de un intercambiador de calor en donde se utiliza el agua marina de bajas profundidades para la condensación del vapor de agua y así lograr obtener agua potable. Finalmente el agua marina fría es reinyectada al mar después de este proceso. Momentos después, se bombea agua marina superficial para iniciar de nuevo el ciclo [27, 33]. La ventaja de este ciclo es que se puede obtener agua potable que puede proveer agua fresca a comunidades cerca de la costa y, en aquellos casos en los que se cuenta con la tecnología correspondiente, se puede obtener sal. Otra gran ventaja de este tipo de ciclo es que el fluido de trabajo no representa una amenaza ambiental al ambiente y no representaría problema ambiental o de salud alguno en caso de existir algún derrame de este [33].

Algunas de las desventajas de este ciclo son: la necesidad de bombeo de una gran cantidad de agua marina superficial debido al pequeño por-

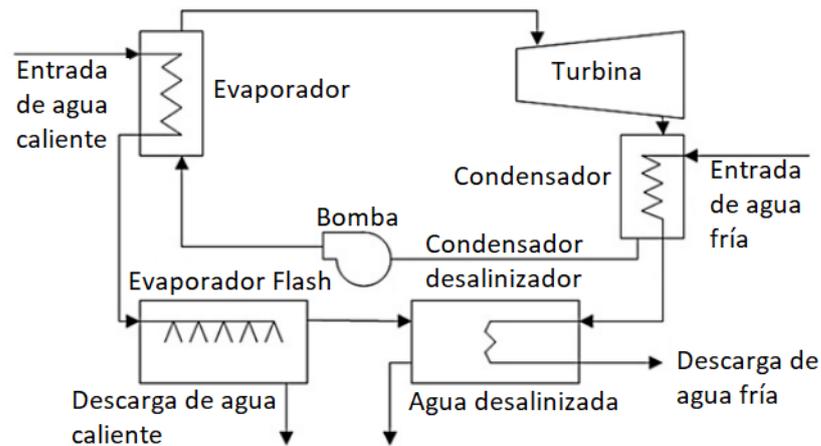


Figura 2.42: Diagrama esquemático de un sistema híbrido OTEC [34].

centaje de volumen que es evaporado y por ende la necesidad de una instalación mayor en comparación con un sistema cerrado, otra desventaja es la alta posibilidad de corrosión y de incrustación biológica en los sistemas de operación dado que el fluido de trabajo es el agua marina, la necesidad de diseñar intercambiadores de calor especiales para este tipo de plantas dado que los existentes no se pueden adaptar y finalmente la necesidad de lidiar con los gases naturales presentes en el agua que resultan ser no condensables y que por su consideración dentro del ciclo reducen la eficiencia de este [5, 27, 33].

Ciclo híbrido

El ciclo híbrido combina las características de los sistemas de ciclo abierto y de ciclo cerrado con la finalidad de optimizar su eficiencia. Este tipo de ciclo utiliza tanto al agua superficial del mar como un fluido de trabajo (normalmente amoníaco) para su operación, lo que permite la desalinización de agua y la producción de electricidad [5, 33].

Este ciclo comienza con el bombeo de agua superficial del mar a la entrada del evaporador de vacío como en el ciclo abierto, se despresuriza la cámara que contiene el agua marina superficial para evaporarla, pero al mismo tiempo o durante la descarga del agua superficial del mar no evaporada se logra el cambio de fase del fluido de trabajo utilizado en el ciclo cerrado. El vapor del fluido de trabajo genera electricidad en la turbina acoplada al generador, mientras al vapor de agua se le extraen los gases no condensables para después ser condensada con el agua de mar fría de bajas profundidades y obtener agua desalinizada. De igual

manera, el fluido de trabajo a la salida de la turbina es condensado con el agua marina fría para ser bombeado nuevamente al evaporador [5, 33].

Ciclo Kalina

Este ciclo fue creado para aumentar la eficiencia térmica del ciclo cerrado OTEC. Propuesto por primera vez en 1985 por el Dr. Alexander Kalina quien consideraba que al utilizar como fluido de trabajo una mezcla de amoníaco y agua se lograría generar mayor eficiencia a temperaturas más bajas gracias al bajo punto de ebullición del amoníaco. Esto aumenta la posibilidad de tener un aumento de temperatura más alto a la salida del evaporador, aumentando la potencia energética del ciclo, y disminuye la cantidad de volumen de agua marina fría necesaria en el condensador. Con esto el tamaño de las dimensiones de la tubería de entrada serían menores lo que disminuye el capital invertido en la central (ver figura 2.43). Las desventajas que presenta este ciclo radican en la disminución

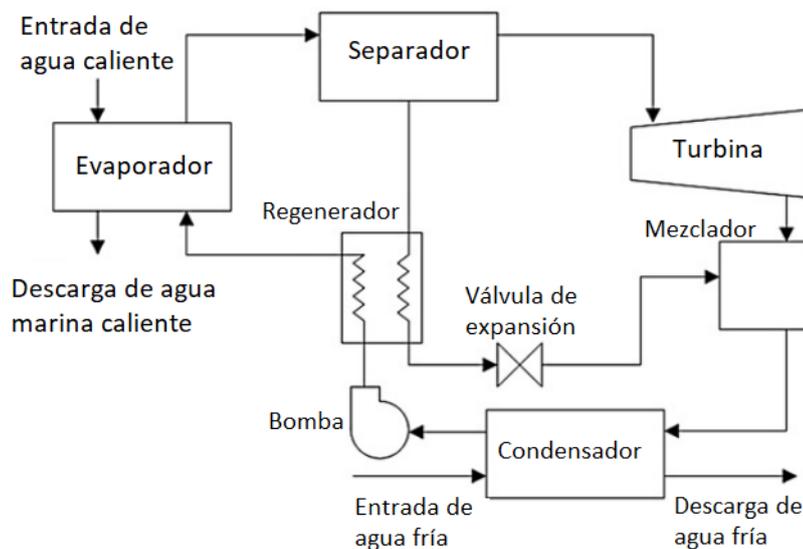


Figura 2.43: Representación esquemática del ciclo Kalina [34].

del desempeño del evaporador y del condensador respecto al ciclo Rankine derivado del uso de un fluido binario, provocando una mayor complejidad del arreglo de este ciclo.

Ciclo Uheara

Este ciclo, al igual que el ciclo Kalina, fue inventado para aumentar la potencia de salida del ciclo cerrado OTEC. Este ciclo fue propuesto en 1994 por el Dr. H. Uheara, mismo que propuso extraer parte del vapor de la turbina para reducir la carga del condensador y utilizar como fluido de trabajo la misma mezcla del ciclo Kalina. Con las consideraciones anteriores provocó que aumentara la complejidad del ciclo termodinámico (ver figura 2.44) [5].

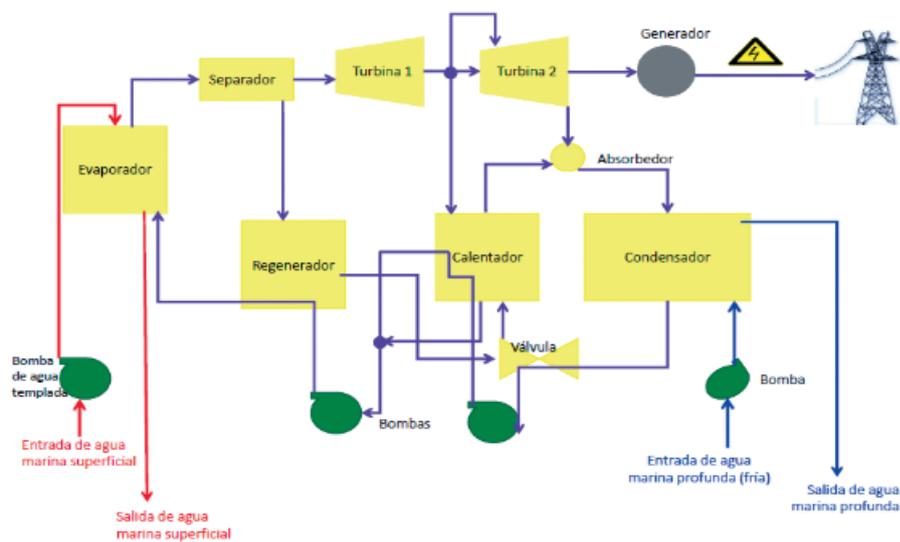


Figura 2.44: Representación esquemática del ciclo Uheara.

Hoy en día se han propuesto diversos ciclos OTEC asistidos o integrados con algún tipo de fuente energética de origen renovable como no renovable para aumentar la eficiencia del mismo como son:

Geo-energía oceánica por gradiente térmico (GEOTEC por sus siglas en inglés).

Este ciclo busca utilizar los efluentes energéticos del calor de una planta Geotérmica para sobrecalentar el vapor a la salida del evaporador antes de su ingreso a la turbina o asistir al evaporador del ciclo OTEC. De esta manera aumenta la eficiencia del ciclo (ver figura 2.45) [35].

En algunas propuestas se ha decidido utilizar gas natural proveniente de la producción de plataformas fuera de costa como una fuente de combustible que asegure el calentamiento del fluido de trabajo utilizado en el

ciclo cerrado o, por otro lado, mejorar la desalinización de un ciclo abierto [35].

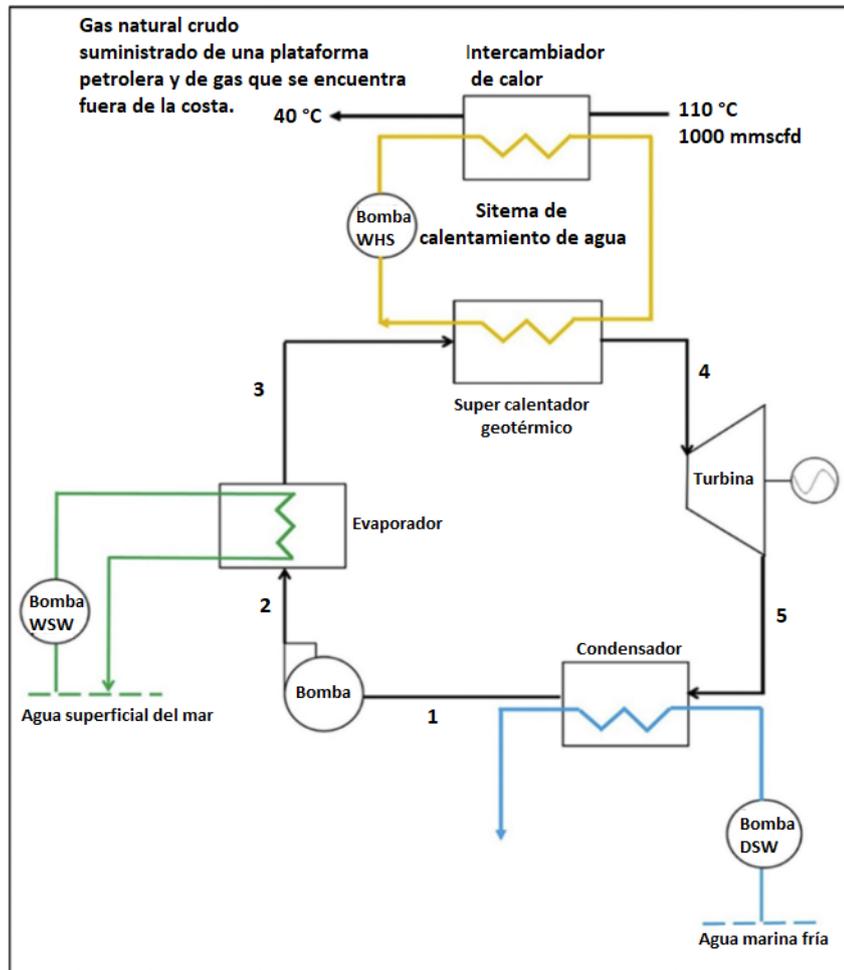


Figura 2.45: Diagrama esquemático de un ciclo GeOTEC [35].

Energía oceánica por gradiente térmico con energía termosolar (SO-TEC, por sus siglas en inglés.)

Esta alternativa busca el calentamiento del agua superficial del mar con un sistema termosolar.

En la literatura se ha descrito la posibilidad de precalentar el agua de mar de manera directa mediante su circulación dentro de un calentador solar (ver figura 2.46) o, de manera indirecta, mediante un intercambiador de calor dentro de un termotanque con agua calentada por el sistema

termosolar (ver figura 2.47); logrando así que el agua marina superficial eleve su temperatura antes de que ésta entre al evaporador, aumentando la temperatura del fluido de trabajo o la posibilidad de evaporar mayor volumen de agua marina en el caso del ciclo abierto. En ambos casos repercute en el aumento de la eficiencia térmica del ciclo [28–30, 36].

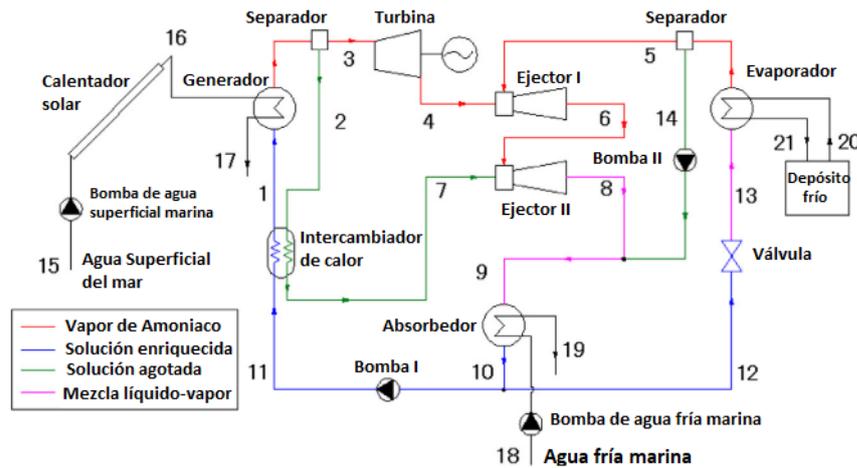


Figura 2.46: Esquema de un sistema SOTEC y refrigeración por ejector [29].

Energía oceánica por gradiente térmico con energía nuclear.

En este ciclo se busca aprovechar el calor del efluente de enfriamiento de las plantas nucleares. Esta idea se ha propuesto para ciclos OTEC abiertos, cerrados e incluso para un ciclo Kalina. La única diferencia con las opciones anteriores es que en el caso del ciclo cerrado y del ciclo Kalina se ha propuesto utilizar el efluente de enfriamiento de la planta nuclear como la fuente de calor, sustituyendo al agua marina superficial. La configuración de los tres ciclos anteriormente mencionados únicamente cambian en el fluido de entrada, en general lo demás queda igual [34].

En la figura 2.48 se muestra un comparativo entre la temperatura del efluente y la temperatura superficial del mar, así como un comparativo de la potencia neta generada con cada fluido como fuente de calor en un caso de estudio en particular. En los últimos años se han propuestos diversos sistemas híbridos para asistir o ser integrados a la operación de una planta OTEC.

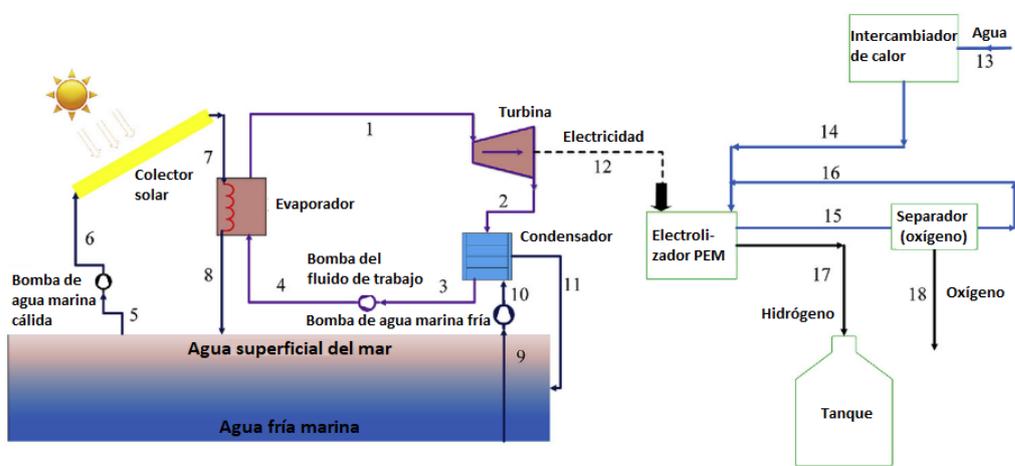


Figura 2.47: Esquema de un sistema SOTEC de ciclo cerrado y un electrolizador tipo PEM para la producción de hidrógeno [36].

2.3.4. Eficiencia OTEC.

Como se mencionó en los principios de funcionamiento, la eficiencia de una máquina térmica está limitada por la eficiencia que tendría una máquina reversible trabajando con las mismas condiciones de operación, en este caso la máquina de Carnot.

Si calculamos la eficiencia teórica de Carnot (ecuación 2.6) con las condiciones normales de operación de planta OTEC ($\Delta T \approx 20^\circ C$), suponiendo $T_L \approx 5^\circ C$ y $T_H \approx 25^\circ C$, obtenemos una eficiencia teórica:

$$\eta = \frac{T_H - T_L}{T_L}$$

$$\eta = \frac{298.15K - 278.15K}{278.15K} = 0.0719$$

Con el cálculo anterior nos podemos dar cuenta de que la máxima eficiencia teórica que podemos obtener en un sistema OTEC convencional es del 7%. Sin embargo, la realidad es aún más cruda por lo que la eficiencia térmica obtenida en plantas reales suele ser de entre 1% y 3%. Si comparamos esta eficiencia con un proceso hidro-termoeléctrico que tenga como base energética los hidrocarburos el valor obtenido en un sistema OTEC resulta muy bajo. Es por esto que un sistema OTEC requiere del bombeo de grandes cantidades de flujo marino para obtener una cantidad significativa de energía, tuberías muy largas que al mismo son muy costosas en su construcción, transporte y mantenimiento; esto repercute en la necesidad de plantas de un tamaño exorbitante aumentando su sensibilidad a pérdidas energéticas [5, 27].

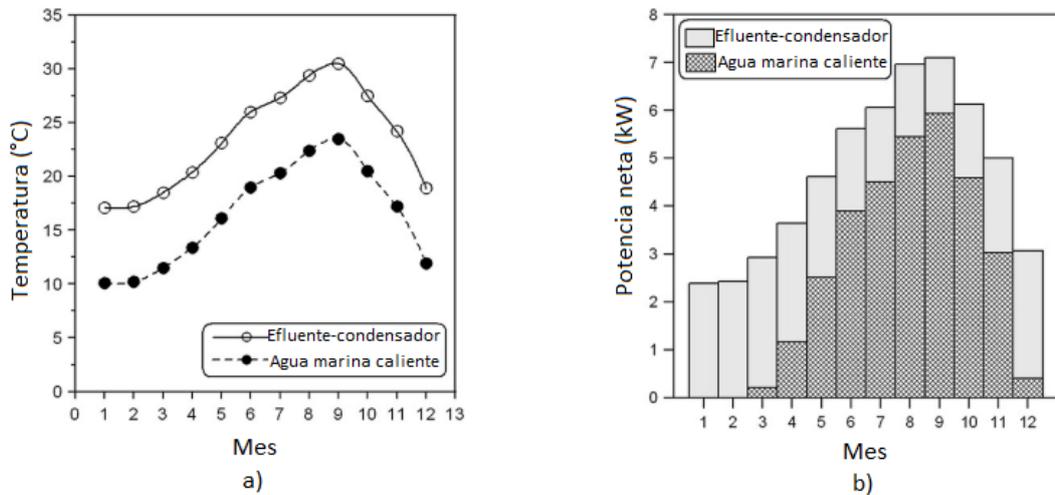


Figura 2.48: Comparativa entre la temperatura (a) y de la potencia neta generada (b) considerando como fluido de trabajo al agua superficial del mar y al efluente de enfriamiento nuclear [34].

Es por ello que los diversos tipos de ciclos mencionados anteriormente forman parte del conjunto de alternativas propuestas para esta fuente renovable. Ejemplo que nos da la perspectiva de la actual necesidad y ventaja que tienen las hibridaciones entre distintas fuentes energéticas.

2.3.5. Modalidades de plantas OTEC.

Planta sobre la costa (ON-Shore)

Este tipo de plantas OTEC se encuentran sobre la costa a una distancia cercana al mar. Los criterios para instalar una planta de este estilo radican en tener un gradiente térmico natural cercano a la costa, el fondo marino debe de tener una pendiente muy grande para tener acceso a las aguas profundas y de preferencia el terreno en la costa debe de ser amplio, estable y en su mayoría plano [5].

Las ventajas de esta clasificación son: que al encontrarse sobre la costa se disminuyen las probabilidades de daños por desastres naturales, su mantenimiento es sencillo, la interconexión eléctrica es accesible para el transporte de la electricidad generada y facilita el transporte y distribución de los productos derivados de su operación [5].

Sus desventajas están relacionadas en mayor medida con: la necesidad de tuberías largas para coleccionar el agua marina fría, además de que esto

implica una mayor energía de bombeo y disminuye la potencia neta del ciclo. Particularmente la tubería de agua fría de tal magnitud eleva los costos de la planta significativamente [5].

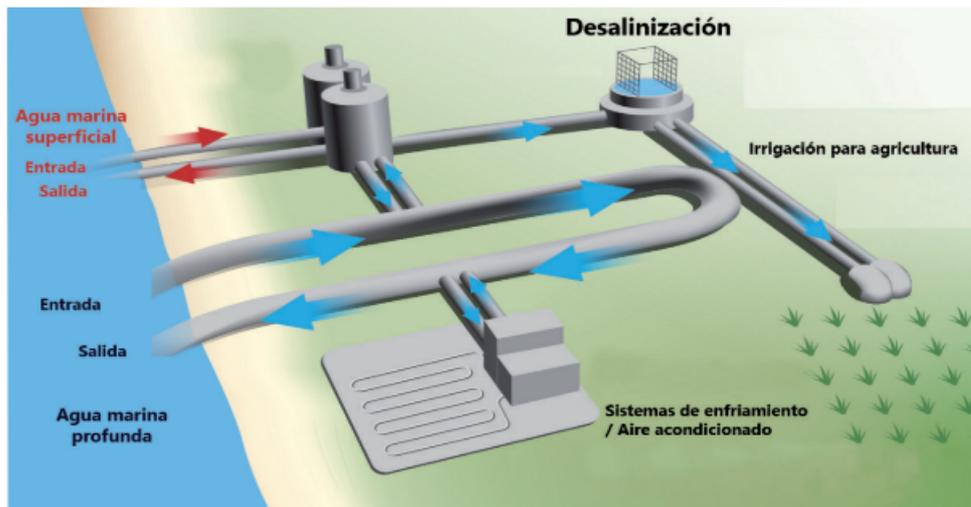


Figura 2.49: Esquema conceptual de una planta OTEC on-shore [5].

Planta fuera de costa o sistemas flotantes (Off-shore).

Esta modalidad de planta están construidas en sistemas flotantes (grandes barcos o plataformas tipo petrolero) que se encuentran a pocos kilómetros de la costa. Este tipo de modalidad debe de ser anclado al fondo marino o mantenerse lo más estables/inmóviles posibles [5].

Las ventajas de esta modalidad son: la accesibilidad del bombeo de agua marina fría, una menor energía de bombeo, por ende una tubería de menor costo [5].

Las desventajas son: la necesidad de cables submarinos largos para llevar la electricidad a la costa, además, para que estos cables puedan ser conectadas a la red eléctrica es necesario permanecer relativamente inmóvil, lo cual es muy complicado en aguas profundas, sin considerar la vulnerabilidad ante desastres naturales que esta modalidad enfrenta [5].

2.3.6. Criterios de selección.

Para el caso de esta fuente de energía renovable, como cualquier alternativa energética, es necesario conocer la presencia de áreas naturales protegidas, los marcos regulatorios de los diversos sitios candidatos para

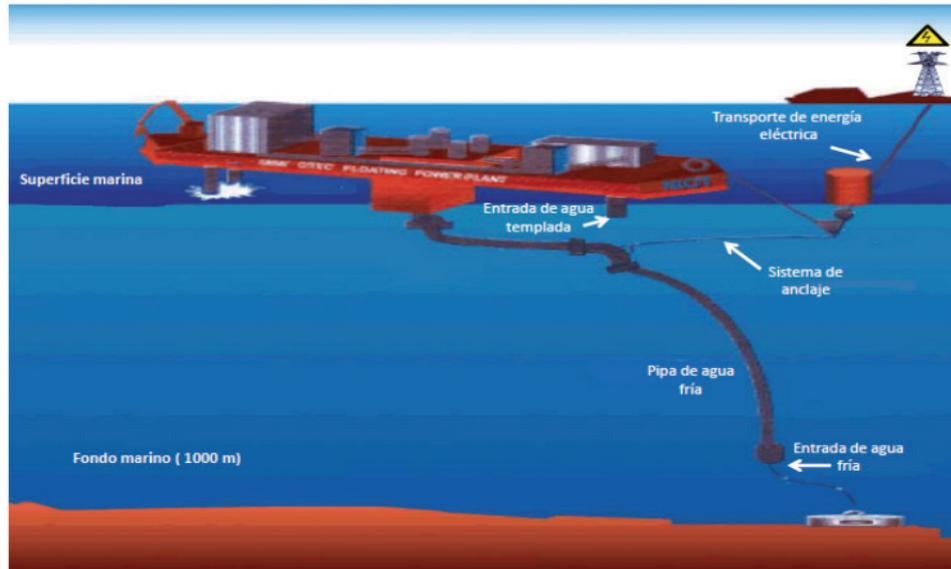


Figura 2.50: Esquema conceptual de una planta OTEC off-shore [5].

la instalación de esta energía, la densidad poblacional, la infraestructura turística y la cantidad de turistas al año del lugar que sería beneficiado con la aplicación de esta tecnología, así como su demanda energética *per cápita* y el conocimiento de la fuente actual de energía de la región [5].

Teniendo en cuenta lo anterior, existen un conjunto de criterios que se han propuesto para determinar si en un lugar cercano al mar se puede instalar una planta OTEC. A continuación se enumeran estos criterios [5]

- Debe de existir un gradiente térmico estable de al menos 20 °C entre las aguas superficiales y profundas del mar para obtener la mayor eficiencia posible.
- Debe de existir la posibilidad de bombeo de agua fría y en el caso de contar con este recurso a una profundidad máxima de 1000 m de profundidad.
- La distancia entre el lugar de bombeo de agua marina fría y la costa debe de ser menor a los 10 km, con una pendiente topográfica de 15-20°.
- Tener una baja probabilidad de daños ecológicos.
- Baja probabilidad de desastres naturales.

2.3.7. Sitios con potencial OTEC en México.

Los estudios realizados por el Centro Mexicano de Investigación en Energía del Océano [5, 10, 31, 37] para las costas mexicanas han tomado como criterios de selección: la distancia máxima de 10 km desde la costa para el bombeo de agua marina fría considerando dos profundidades de bombeo del fluido frío de 500 m y 1000 m de profundidad y la estabilidad estacional de un gradiente térmico entre la capa superficial del mar y la capa profunda del mismo con un valor mayor o igual que 20 °C.

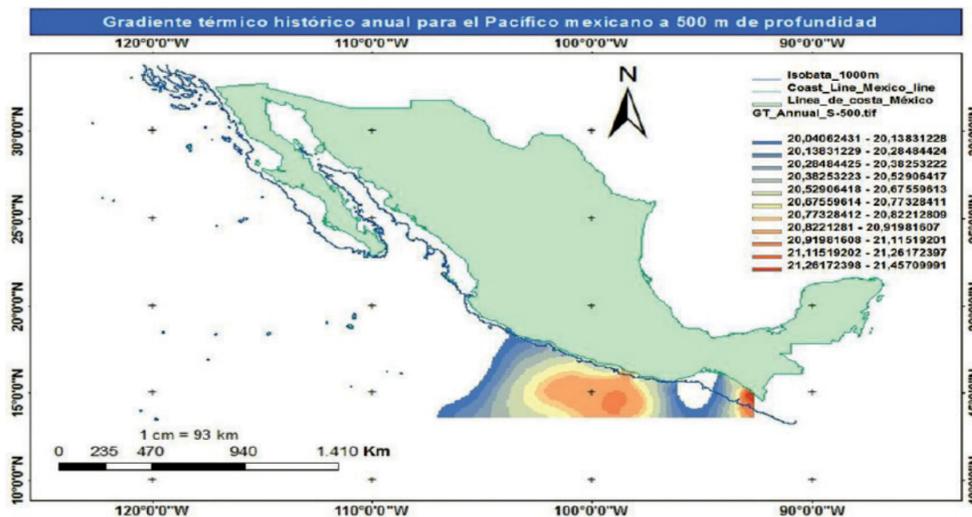


Figura 2.51: Gradiente térmico anual histórico en el Pacífico mexicano a una profundidad de bombeo de 500 m [5].

Potencial térmico en el Pacífico mexicano.

Si consideramos una profundidad de 500 m para la extracción de agua fría marina las costas de los estados de Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas presentan un gradiente térmico estable mayor o igual a los 20 °C a lo largo de todo el año (ver figura 2.51). El gradiente máximo dentro se encuentra en una pequeña zona en las costas del estado de Chiapas con un valor de hasta 21.45 °C y el gradiente térmico más bajo se reparte entre algunas zonas de Michoacán y el golfo de Tehuantepec con valores entre los 20 y 20.10 °C. Todo lo anterior sin considerar una zona en el golfo de Tehuantepec que no cumple con los criterios de selección ya que tiene valores menores entre 17 y 19 °C [5].

Por otro lado al considerar una profundidad máxima de bombeo de agua con un valor de 1000 m, el gradiente térmico disponible para las

costas del pacífico mexicano se extiende hacia el noroeste del país. El gradiente térmico disponible va en aumento de norte a sur (ver figura 2.52). El mínimo se ubica en Baja California Sur con un gradiente entre 20 y 20.4 °C y el máximo se encuentra en las costas de los estados de Guerrero, Oaxaca y Chiapas con valores entre los 23.9 y los 25 °C [5].

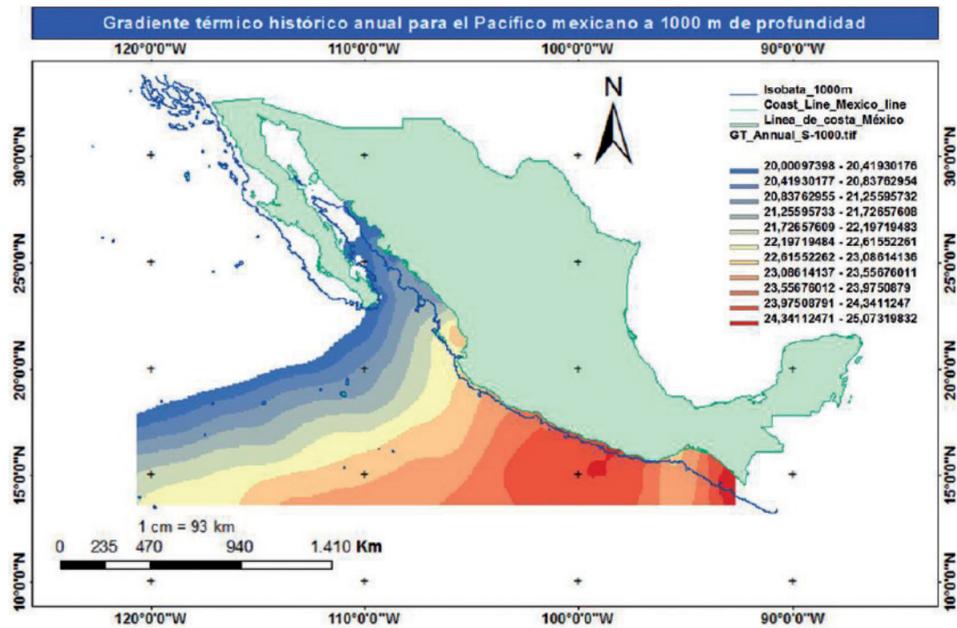


Figura 2.52: Gradiente térmico anual histórico en el Pacífico mexicano a una profundidad de bombeo de 1000 m [5].

Como se puede apreciar en las figuras 2.52 y 2.51, el noroeste de nuestro país resulta ser aquella con un gradiente térmico nulo, en el caso del bombeo de agua marina fría a 500 m en su totalidad y de manera parcial cuando se considera el bombeo a 1000 m. Al parecer, esta zona presenta un gradiente menor al valor requerido por el enfriamiento que provoca la corriente de California en estas aguas. Esto hace que en las costas en el este del estado de Baja California y Baja California Sur el gradiente térmico necesario no ocurra, a pesar de encontrarse dentro de las regiones con mayor recurso solar de México (ver figuras 2.29 y 2.30). De acuerdo con algunos estudios gran parte del noroeste de nuestro país cuenta con el gradiente térmico natural necesario en durante el verano, mientras que durante el otoño y la primavera este gradiente es menor para caer y adquirir valores por debajo de lo óptimo durante el invierno. Caso contrario a lo sucede en las costas del sureste de nuestro país en donde el gradiente térmico natural en esas zonas varía entre valores de 20 y 25 °C a lo largo de todo

el año [37].

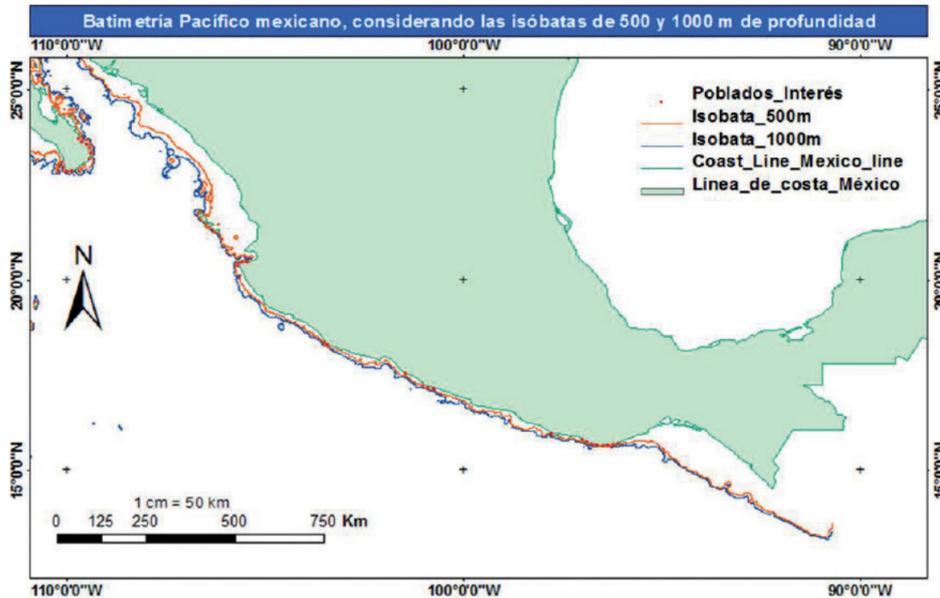


Figura 2.53: Batimetría del Pacífico mexicano con isolíneas de 500 y 1000 m [5].

Otro punto determinante para seleccionar las regiones con mayor viabilidad para instalar una planta OTEC es la batimetría, misma que permite conocer la variación de la profundidad del mar y océanos en el espacio. Con esta información al trazar una isolínea batimétrica a una profundidad específica en las costas del Pacífico mexicano es posible determinar la distancia entre las costas con gradiente térmico y la isolínea batimétrica, otorgándonos un filtro más para conocer aquellos lugares a un máximo de 10 km alejados de la costa (ver figura 2.53). En las figuras 2.52 y 2.51 también se encuentran definidas estas líneas trazadas para poder identificar que tanto en el noroeste de México, en las costas de Baja California, Baja California Sur, Sonora, Sinaloa, Nayarit; como en las costas del sureste, específicamente en algunas costas de Oaxaca y Chiapas, en nuestro país la profundidad del mar es menor provocando que la profundidad necesaria para el bombeo de agua marina profunda esté muy alejada de la costa. Por otro lado, también podemos apreciar que el mar es más profundo cerca de la costa en la mayoría del sureste de México en los estados de Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero y Oaxaca. Esta es una limitación que llega a presentar gran parte del golfo de California [5, 37].

Sitios con potencial térmico en el mar Caribe mexicano.

En las costas del estado de Quintana Roo se han identificados puntos que han resultado ser candidatos para un sistema OTEC, cumpliendo con el gradiente térmico natural y las condiciones batimétricas cercanas a la costa. En la figura 2.54 las líneas rosas representan isobaras entre 700 y 1000 m [5].

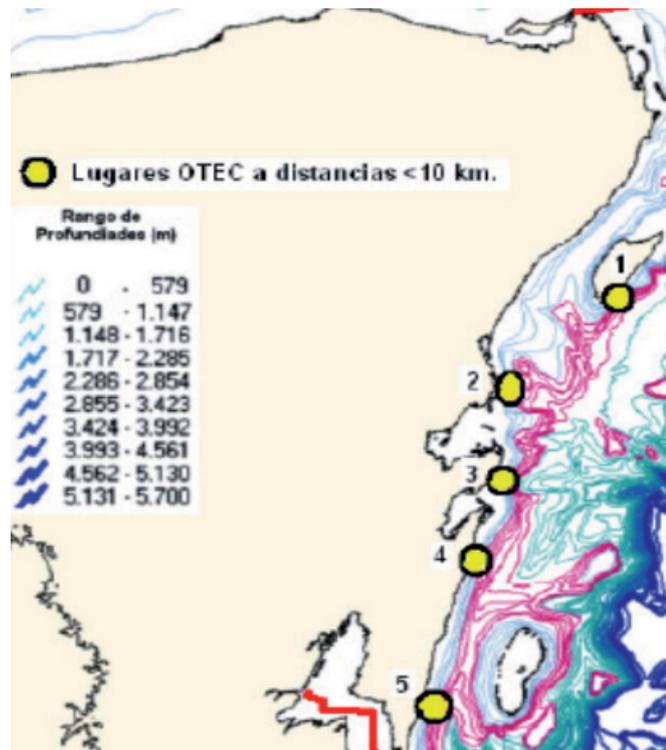


Figura 2.54: Zonas potenciales OTEC y batimetría en el Caribe mexicano [5].

2.4. Análisis de datos.

2.4.1. Machine Learning

El aprendizaje automático de una computadora (Machine Learning) es un subcampo de la inteligencia artificial que busca construir programas de computadora que tengan la capacidad de mejorar automáticamente generando experiencia durante ese proceso. Esto implica que dicho programa

sea independiente del programador referente a la instrucción de las reglas explícitas que debe seguir para lograr la tarea asignada [38].

La necesidad del aprendizaje automático de una computadora como una rama de la ciencia radica en tres tipos de áreas: Estudios orientados a la elaboración de tareas, simulaciones cognitivas y el desarrollo de análisis teóricos. Estas áreas buscan cubrir las dos maneras básicas de aprendizaje:

- 1) Adquisición del conocimiento.
- 2) Reafirmación y mejora de habilidades cognitivas.

Una definición más concreta sería: “Se dice que un programa ha aprendido a partir de una experiencia **E** relacionada con un tipo de tareas **T** cuyo desempeño puede ser medido por un parámetro **P**, si su desempeño al realizar las tareas **T**, medidas por **P**, es mejorada con la experiencia **E**” [38].

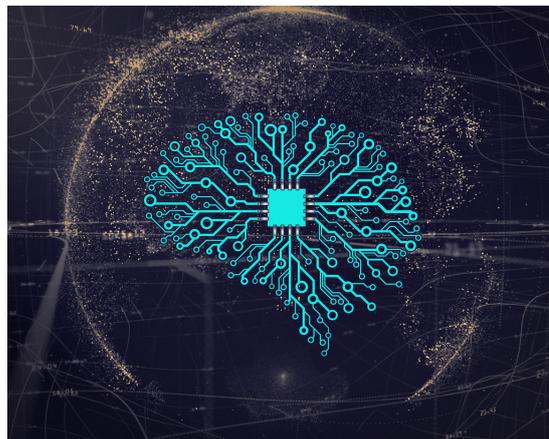


Figura 2.55: Ideal y principio conceptual del Machine Learning.

Existen tres clasificaciones de los métodos de aprendizaje automático por computadora [39]:

- **Aprendizaje no supervisado:** En este método no existen datos de entrada relacionados con algún tipo de información de salida. La información de entrada es únicamente analizada con algún algoritmo predeterminado. En este modelo no existe un aprendizaje final por parte de la computadora, únicamente identifica las propiedades de los datos ingresados y en la mayoría de los casos es utilizado para clasificar sin generar nueva información a partir de ellos.
- **Aprendizaje supervisado.** Este método consiste en hacer que la computadora aprenda a partir de su entrenamiento con información conocida, misma que consiste en un conjunto de condiciones de entrada

con sus respectivos valores de salida deseados o conocidos. De esta manera al ingresar información de entrada nueva o de interés se pueden generar valores nuevos de salida. Cabe señalar que este método depende de la calidad y utilidad de la información de entrenamiento.

Dado el surgimiento de grandes cantidades de datos provenientes de diversas fuentes actualmente y en los últimos años, el aprendizaje automático ha surgido como una brecha de oportunidad para procesar Gygas y/o Terabytes y así lograr obtener información útil [38].

2.4.2. Clusterización.

El método de clusterización es una técnica de machine learning de aprendizaje no supervisado para el agrupamiento de un conjunto de datos en grupos conformados por elementos con propiedades o características en común que los diferencia de las características o propiedades intrínsecas de los elementos presentes en otros grupos derivados de la clasificación de esta metodología [40].

Existen diversos métodos de clusterización que trabajan bajo diversos métodos para la clasificación de datos. Uno de ellos es el método de clusterización K-means, el cual es el más conocido y utilizado por su facilidad de entendimiento y de programación. El desarrollo y explicación de los demás métodos de clusterización exceden el alcance de este trabajo.

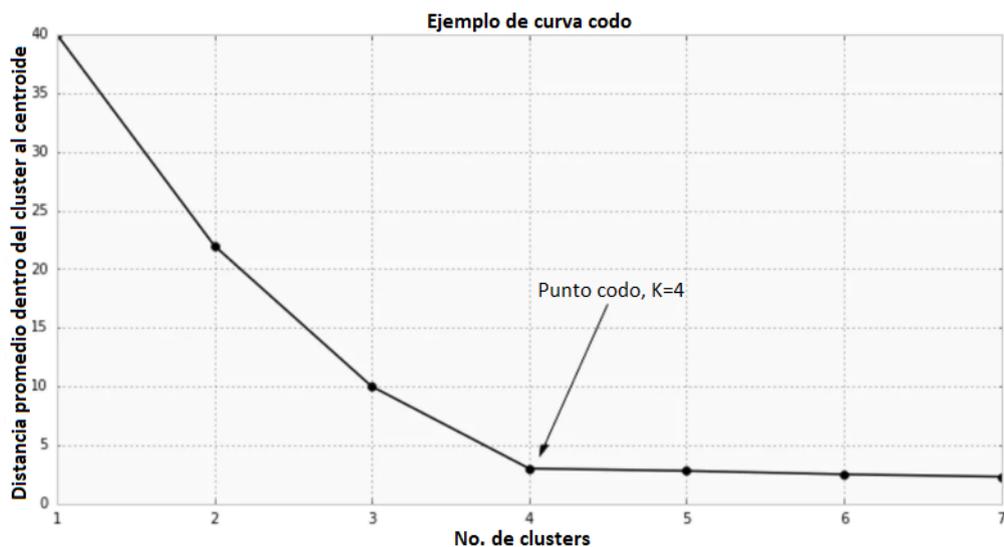


Figura 2.56: Curva del punto codo para estimar el valor de K [41].

2.4.3. Método de clusterización K-means.

La metodología de este método es el siguiente [40]:

- Se selecciona el número de clases o clusteres ($K=n$) de manera aleatoria o en su debido caso, de ser posible, se recomienda realizar la visualización de las variables de interés y visualmente identificar e inferir un número de grupos. Aunque en la actualidad existen programas que permiten otras metodologías para determinar el número de centroides K .
- Se asigna de manera aleatoria un número K de vectores centrales a los datos y se clasifican al computarse la distancia entre cada uno de los datos y el centroide más cercano.
- Con la información anterior se vuelven a calcular nuevos centroides a partir de la distancia media de los vectores entre el los datos y cada centroide anterior.
- Se vuelve a repetir este proceso el número de veces necesarias hasta que los centroides de los grupos no cambien significativamente entre cada iteración.

Las ventajas generales de este método son [40]:

- Su compilación es rápida en comparación con otros métodos de clusterización.
- Dependiendo el tipo de datos, se pueden obtener los centroides y definir los centroides de cada grupo en en pocas iteraciones.
- La complejidad de este método es la más simple, en comparación con otros métodos [$O(n)$].

Las desventajas más generales son [40]:

- Este método es menos consistente comparado con otros.
- Cada iteración resulta en un resultado diferente por lo que para problemas más complejos este método puede ser confuso.
- Es necesario determinar el número de grupos.

Método de “curva codo” para estimar el valor de “K”.

Para encontrar el valor óptimo de K para un conjunto de datos, además del método visual descrito en la sección anterior, se puede realizar una gráfica del valor entero que puede adquirir K (eje de las abscisas) y la distancia media de los centriodes correspondiente al número de clusteres K ajustado en esa iteración (eje de las ordenadas). De esta manera, se obtiene una gráfica se podrá visualizar que al aumentar el número de clusteres ajustados la distancia media de los centriodes a cada punto disminuye. El sentido de utilizar este medio gráfico es el de identificar aquel número K a partir del cual el incremento de la distancia media de los puntos a los centriodes no cambia significativamente. Generalmente se puede identificar a este punto fácilmente porque a partir del este valor de k la curva tiene un cambio de pendiente significativo de una pendiente mayor a una menor. Este método es mejor conocido como punto codo gracias a su visualización en el cambio drástico de pendiente en la curva (ver 2.56) [41].

Capítulo 3

Metodología

3.1. Obtención de datos oceanográficos y meteorológicos.

En esta sección se describen las distintas bases de datos de donde se obtuvieron los archivos utilizados y estudiados para la elaboración del presente trabajo:

3.1.1. Datos oceanográficos.

Datos del servidor de HYCOM.

Los datos de temperatura y salinidad superficial del mar fueron descargados de la página <https://www.hycom.org/>, misma que pertenece al consorcio "The HYCOM". Este consorcio es un esfuerzo multi-institucional patrocinado por el programa nacional de asociación oceánica (NOPP por sus siglas en inglés) como parte del Experimento mundial de asimilación de datos oceánicos de Estados Unidos (GODAE, por sus siglas en inglés) para desarrollar y evaluar un modelo de océano coordinado híbrido isopícnico-sigma-presión (generalizado) de asimilación de datos (denominado modelo híbrido de coordenadas del océano o HYCOM, (por sus siglas en inglés). Cabe recalcar que los datos generados por este consorcio cuentan con derechos de libre acceso, lo que permite su uso en múltiples proyectos. El conjunto de datos que este servidor provee a nivel global y regional, cuentan con una resolución espacial de $1/25^{\circ}$ ó $1/12^{\circ}$, a distintas profundidades desde 0 m hasta 5500 m dependiendo la batimetría de los océanos de estudio.

Los datos de temperatura superficial del mar que se descargaron de

este servidor fueron aquellos correspondientes a la República Mexicana dentro del periodo temporal comprendido entre el 17/Agosto/2013 y el 25/Noviembre/2018 en un formato de archivo “.nc”. Por otro lado, los datos de salinidad superficial del mar para la República Mexicana, descargados de igual manera de este servidor, corresponden al periodo temporal comprendido entre el 21/Agosto/2013 y el 27/Noviembre/2018 con el mismo formato de los datos de temperatura superficial [42].

Datos del servidor de la WOD-NOAA.

La Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos (NOAA, por sus siglas en inglés) a través de su base de datos oceánica mundial (WOD, por sus siglas en inglés) provee series de datos a nivel mundial y regional de distintas variables oceanográficas y atmosféricas de acceso libre.

De esta base de datos se descargaron archivos de temperatura y salinidad superficial del mar previamente procesados por la NOAA. Estos datos corresponden al estudio regional climatológico del Pacífico Nororiental en donde se presenta el valor promedio mensual obtenido entre las décadas de 1995-2004 y 2005-2012; con una resolución espacial de $1/4^{\circ}$ en formato “csv” [43].

Por otro lado, del Centro Mexicano de Innovación en Energía del Océano se obtuvo un archivo con los datos de salinidad de todo el mundo en archivos mensuales desde el 2013 al 2018 con una resolución espacial de $1/4^{\circ}$ en formato .GRIB2 proveniente de la base de datos oceánica mundial de la NOAA.

3.1.2. Datos meteorológicos

Datos del servidor del NREL .

El Laboratorio Nacional de Energías Renovables(NREL, por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos provee paquetes de datos atmosféricos a través de la Base de Datos de Radiación Solar Nacional(NSRDB por sus siglas en inglés) para los distintos programas que esta dependencia gubernamental ofrece de manera gratuita, por lo que sus datos también lo son. Al igual que para descargar uno de los programas de esta instancia, la descarga de archivos meteorológicos también solicita tus datos de contacto y el motivo del uso de los mismos.

Los datos de radiación solar y temperatura ambiente, humedad relativa, fueron descargados de esta base de datos para el periodo comprendido

entre el año 2013 y el 2018 de manera anual para 3 playas ubicadas en el noroeste de México. Cabe recalcar que es posible la descarga de datos dentro de una región espacial, sin embargo, al solicitar un paquete de información que cubriera todo el noroeste de México el servidor indicó que el tamaño del archivo a descargar, sobrepasaba la limitación de descarga disponible por este servidor. Para un manejo sencillo y puntual se decidió descargar un archivo para coordenadas específicas que no causaran una limitación en el tamaño del archivo descargable de este servidor. Estas coordenadas corresponden a puntos sobre el mar cercanos a las siguientes playas seleccionadas:

Estado	Nombre del lugar	Latitud	Longitud
Baja California Sur	Cabo San Lucas	22.84	-109.94
Baja California Sur	Bahía Asunción	27.13	-114.3
Baja California	Rosarito	32.37	-117.1

Cuadro 3.1: Playas ubicadas en el noroeste de México seleccionadas para descargar sus años meteorológicos típicos del servidor de NREL. Las coordenadas de latitud y longitud corresponden a un punto sobre el mar cercano a cada playa descrita en este cuadro.

3.2. Curvas de calentadores solares planos.

Se solicitó una cotización a la empresa Módulo Solar S.A. de C.V. para distintos modelos de calentadores solares planos. Dentro de los modelos cotizados se optó por el modelo ECOSUN, mismo que es utilizado para el calentamiento de albercas. Dentro del proceso de cotización la empresa Módulo Solar S.A. de C.V. incluyó las certificaciones que este calentador tiene junto con distintos documentos comparativos de su producto con su competencia en el mercado, el calentador solar plano Heliocol.

Las distintas curvas de eficiencia instantánea del calentador solar ECOSUN de la empresa Módulo Solar S.A. de C.V. se obtuvieron de las certificaciones anteriormente mencionadas. El segundo calentador solar plano seleccionado fue el calentador solar Heliocol. En cuanto a su curva de eficiencia instantánea, fue obtenida de la certificación de dicho calentador. El documento que contiene dicha certificación fue otorgado por el Dr. Víctor Hugo Gomez Espinoza encargado del Laboratorio de Pruebas de Equipos de Calentamiento Solar (LAPECAS) ubicado en el IER, UNAM.

Las ecuaciones de estas curvas fueron rectificadas de manera gráfica ya que dentro de los documentos proporcionados por la empresa Módu-

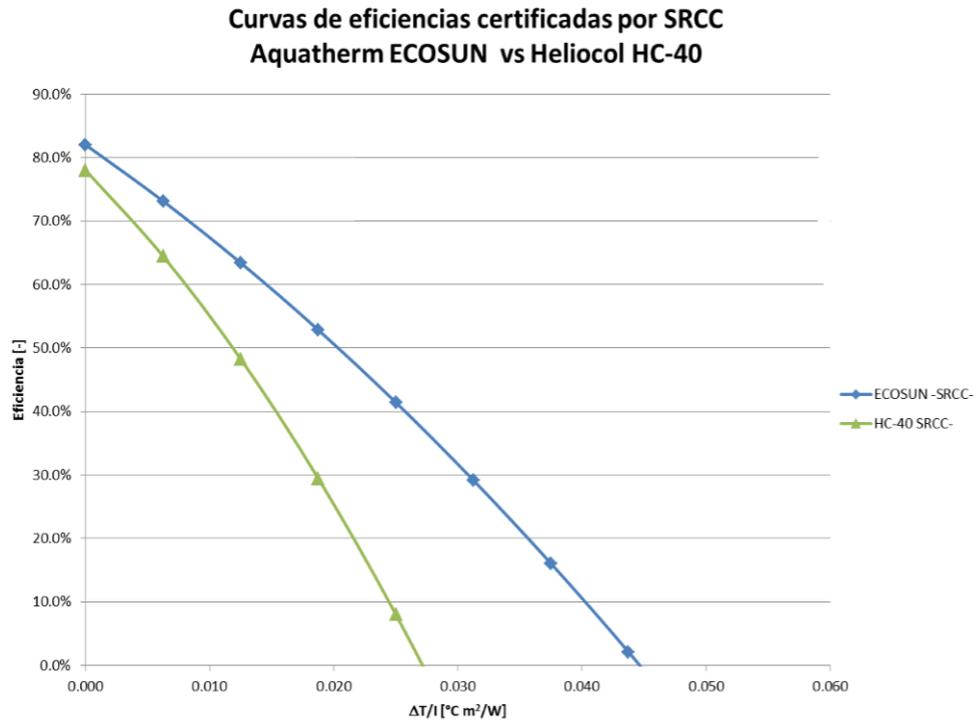


Figura 3.1: Gráfico comparativo entre las curvas instantáneas del calentador ECOSUN y Heliocol.

lo Solar S.A. de C.V., se encontró incluido un archivo pdf con una gráfica comparativa entre los dos calentadores solares planos seleccionados en este trabajo. Esta gráfica comparativa, fue utilizada para obtener las ecuaciones correspondientes de cada calentador. Este método es descrito a continuación:

Para rectificar las curvas de eficiencia de los calentadores solares Heliocol y Ecosun se utilizó el programa **Picpick**, el cual permite entre otras funciones, la posibilidad de medir con una regla virtual en el monitor distintas imágenes que sean abiertas en este programa. Con esta regla virtual y al abrir la gráfica comparativa mostrada en la figura 3.1 fue posible medir, en centímetros, cada una de las coordenadas correspondientes a cada curva de eficiencia instantánea de cada calentador solar, obteniendo así las coordenadas cartesianas de cada punto. Hecho esto se midieron en centímetros los ejes y mediante una regla de correspondencia con las unidades de cada eje fueron calculadas las equivalencias de cada coordenada cartesiana medida. Esta información fue graficada para su visualización en un programa de Jupyter en lenguaje de programación python. En donde

se implementaron las librerías Numpy y matplotlib. En este programa se definieron las ecuaciones de cada calentador solar disponibles en los distintos documentos con las certificaciones de distintos certificadores para cada calentador solar plano, descritas en el cuadro 3.2, en donde η refiere a la eficiencia instantánea, P es equivalente a la diferencia de temperaturas T_i y T_a , en donde T_i es la temperatura del fluido a la entrada del calentador solar, T_a es la temperatura ambiente y G es la radiación solar incidente en el plano del captador solar por unidad de superficie.

Tipo de curva	Calentador solar plano	Certificador	Ecuación
Lineal	Ecosun	Sociedad Mexicana de Normalización y Certificación	$\eta = 0.8638 - 6.9259P$
Cuadrática	Ecosun	Solar Rating and Certification Corporation	$\eta = 0.82 - 13.5264(P/G) - 0.1353(P^2/G)$
Lineal	Ecosun	Solar Rating and Certification Corporation	$\eta = 0.816 - 15.76P$
Cuadrática	Heliocol	Florida Solar Energy Center	$\eta = 0.8337 - 18.44(P/G) - 50.69(P^2/G)$
Lineal	Heliocol	Florida Solar Energy Center	$\eta = 0.828 - 18.52P$

Cuadro 3.2: Ecuaciones de eficiencia instantánea para los calentadores Ecosun y Heliocol de acuerdo con sus certificadores, en donde $P = T_i - T_a$.

Estas ecuaciones fueron graficadas para distintos rangos de valores de $(T_i - T_a)[^\circ C]$ y $G[W/m^2]$ con la finalidad de poder apreciar su comportamiento. Luego de este ejercicio, se identificó que los datos obtenidos por el método gráfico correspondían a un valor de $G [W/m^2]$ constante, ya que al graficarlos junto con las funciones de eficiencia instantánea contemplando distintos valores de $G[W/m^2]$ y $(T_i - T_a)[^\circ C]$, no era posible llevar a cabo su comparación, por lo que era necesario indentificar aquel valor de $G [W/m^2]$, para el mismo rango de $(T_i - T_a)[^\circ C]$, que permitiera la comparación. Para lograr esto, se tomó la decisión de multiplicar las funciones, las coordenadas cartesianas y sus valores de eficiencia instantánea correspondientes por distintos valores de $G[W/m^2]$ que permanecieran constantes mientras se graficaban las funciones y datos modificados para un rango de valores $(T_i - T_a)[^\circ C]$ determinado. Lo anterior se pensó así ya que si consideramos la siguiente ecuación general para una curva de eficiencia instantánea de calentadores solares planos, a saber:

$$\eta = C_1 + \eta_0 \frac{(T_i - T_a)}{G} + \eta_1 \frac{(T_i - T_a)^2}{G} \quad (3.1)$$

al multiplicar ambos lados de la ecuación por el valor de G , se obtiene:

$$G_u = C_2 + \eta_0(T_i - T_a) + \eta_1(T_i - T_a)^2 \quad (3.2)$$

en donde C_2 es $(C_1)(G)$ y G_u es $(\eta)(G)$; como es posible apreciar en estas dos ecuaciones, los valores de η_0 y η_1 permanecen constantes en ambas funciones, mientras que el valor de C_2 se puede calcular una vez determinado el valor de G con el que se trabaja. Teniendo esto en cuenta, únicamente se tuvo que encontrar el valor de G que produjera el corte exacto de la curva trazada por los puntos cartesianos multiplicados por G tanto en el eje de las ordenadas como en el eje de las abscisas, tal y como se aprecia en la figura 3.1. Obtenido este valor, se utilizó la librería Numpy para ajustar una función cuadrática a los valores medidos y multiplicados por G correspondientes a cada calentador y así obtener una ecuación similar a lo que dicta la ecuación 3.2, misma que al ser dividida por G , permite obtener una función similar a una ecuación de eficiencia instantánea convencional con las características de la ecuación 3.1. Los coeficientes del resultado, fueron comparados con los coeficientes de las distintas ecuaciones proporcionadas por los certificadores mostrados en la tabla 3.2. Para corroborar la exactitud del ajuste polinómico de la librería Numpy, se decidió ajustar una de las curvas de eficiencia instantánea del calentador solar Ecosun proporcionada por el certificador Solar Rating and Certification Corporation. Se comparó el polinomio ajustado con el polinomio original. Hecho esto se calculó el error entre los coeficientes de cada ecuación obtenida por el método gráfico para ambos calentadores y las curvas cuadráticas proporcionadas por los certificadores; procedimiento que permitió identificar una irregularidad en la curva de eficiencia del calentador plano Heliocol, por lo que se recalculó la ecuación cuadrática del mismo considerando el error absoluto y relativo entre el método gráfico y la curva cuadrática del calentador solar plano Ecosun. La curva de eficiencia instantánea que resultó del procedimiento anterior sirvió para identificar que la irregularidad dentro de la curva instantánea del calentador solar Heliocol, por lo que se propuso el arreglo de la misma.

3.3. Unión, limpieza y manejo de datos oceanográficos.

Para llevar a cabo el uso, limpieza, manejo, unión de datos fue necesario el aprendizaje desde cero del lenguaje de programación python para ejecutar las librerías correspondientes de análisis de datos, mismas que fueron ejecutadas en dos compiladores distintos: Jupiter y Spyder. El uso de cada uno de estos compiladores para distintos programas únicamente obedeció a la comodidad que cada uno ofrece, sin embargo, en cualquiera

de ellos es posible realizar todo el trabajo presentado en este documento.

La razón por la cual fue necesario aprender este lenguaje de programación, además de ser software libre, se debe a su capacidad para procesar una gran cantidad de datos contenidos en archivos con extensión “.nc”, “.grib2”, “.csv”, con gran facilidad. A continuación se describe el trabajo realizado:

3.3.1. Programación para la unión y selección de datos para una coordenada y para el noroeste de México.

Para facilitar el manejo de datos fue necesario realizar un programa previo. Cada archivo de datos fue abierto para su estudio y entendimiento. Los archivos previamente tratados fueron los de: temperatura superficial del mar (HYCOM), temperatura y salinidad superficial del mar (NOAA-estudio pacífico nororiental).

Se escribieron dos programas con la finalidad de unir y obtener los datos de temperatura y salinidad superficial del mar. El primero para un punto de estudio y el segundo para la región del noroeste de México. En ambos casos fueron necesarias las librerías de Pandas, NetCDF4, Numpy y math. Primero se abrieron cada uno de los archivos utilizando las librerías de Pandas y NetCDF4 depediendo el archivo. El primer programa fue hecho para ingresar una coordenada sobre el mar de estudio que se encontrara dentro de la región de interés, el segundo programa fue elaborado para introducir una resolución espacial mínima de 1° y máxima de $1/12^\circ$ correspondiente a la malla de selección de datos del programa. En el primer programa, al ingresar la latitud y longitud de interés, se obtuvo la coordenada más cercana para cada conjunto de datos y por ende su información temporal correspondiente. En el segundo programa, al ingresar la resolución deseada, se realiza un mallado de puntos equidistantes con la resolución ingresada y al computar punto por punto se calculó la coordenada más cercana correspondiente a cada estudio, obteniendo así un dataframe con la información temporal de cada archivo ingresado para una resolución determinada únicamente para aquellas coordenadas correspondientes al mar contenidas en cada estudio. En ambos programas se exportó el dataframe generado a un archivo csv, ya que este formato resulta ser más manejable, amigable y compatible con otros programas.

El primer programa sirvió para conceptualizar el procedimiento necesario para el segundo programa, de este último se realizaron 3 simulaciones para obtener información temporal para 1° , $1/2^\circ$ y $1/14^\circ$. La última resolución fue pensada para poder empatar el conjunto de datos de HYCOM

y los datos del estudio regional climatológico del Pacífico nororiental de la NOAA ya que resultaba en un archivo de menor tamaño y más accesible para su procesamiento de acuerdo con las limitaciones de mi equipo de cómputo personal.

3.3.2. Extracción de datos de salinidad para el Noroeste de México.

Para el manejo de la información dentro de los archivos de salinidad en formato GRIB2, se utilizó la librería xarray para poder concatenar todos los archivos mensuales de cada año para todo el mundo en uno solo, seccionar la región de interés para después convertir este archivo en un archivo csv y facilitar su manejo posterior. Dicho archivo csv fue manejado con la librería Pandas. La primer modificación realizada en este estudio fue en su eje temporal dado que la temporalidad de este estudio corresponde a seis datos cada día. Para tratar esto fue necesario promediar los valores de salinidad para obtener un valor diario en cada una de las coordenadas dentro de la región de interés. Hecho esto, se creó un archivo csv con la información obtenida.

3.3.3. Unión de datos de salinidad NOAA y la selección de datos para una región con una resolución de 1/4°.

En este programa se utilizaron las librerías Pandas, Numpy y os, con las que se facilitaron los algoritmos utilizados en el manejo de la información. Para lograr la unión de ambos archivos, primero fue necesario conocer la extensión temporal de cada uno. La serie temporal resultante del programa para el noroeste de México refiere a una temporalidad del 17/08/2013 al 24/09/2018, mientras que el archivo de salinidad mundial de la NOAA refiere al periodo desde el 01/08/2013 hasta el 01/08/2018. Teniendo esto en cuenta, de ambos archivos se seleccionó el periodo de tiempo en común: 17/08/2013 al 31/07/2018.

Para poder empatar ambos estudios espacialmente fue necesario realizar el mismo procedimiento utilizado para extraer la información en los dos primeros programas realizados, en donde coordenada a coordenada del estudio de salinidad de la NOAA fue empatada con la coordenada más cercana del mallado utilizado para la obtención de información dentro de la región del noroeste de México con la única diferencia de que las coordenadas obtenidas de este emparejamiento fueron colocadas en dos columnas dentro del dataframe de los datos de salinidad. Con las columnas resultan-

3.4. MANEJO DE DATOS OCEANOGRÁFICOS DE MANERA INDIVIDUAL.111

tes del procedimiento anterior fue posible emparar espacialmente ambos estudios.

A partir de esto se encontró que existían datos repetidos, días faltantes para coordenadas aleatorias y valores NaN dentro de la serie de temperatura superficial del estudio de HYCOM. Lo anterior debido a que, del emparejamiento espacial, existían coordenadas con fechas dentro del estudio de salinidad que no tenían un valor de temperatura asociado y, de igual manera, datos de temperatura superficial con una misma fecha sin un valor de salinidad. Otra característica de los valores de temperatura faltantes fue que eran aislados y nunca fueron consecutivos, siempre se encontraron rodeados de una fecha previa y posterior con información. Para lidiar con esto se eliminaron los valores de temperatura superficial repetidos para una misma fecha conservando el primer valor repetido; hecho esto se aplicó un algoritmo de extrapolación lineal incluido en la librería Pandas que permite ejecutar una interpolación lineal únicamente si existe un valor NaN con información previa y posterior. Hecho los dos procedimientos anteriores se decidió aplicar un algoritmo que verificara si aún existían valores repetidos o valores NaN, obteniendo un conjunto vacío para cada caso. Corroborado lo anterior, se exportó la información temporal emparejada a un archivo csv para su manejo posterior. Lamentablemente, esta unión de coordenadas resultó en un mallado con posiciones bastante lejanas a las costas del noroeste de México, por lo que se descargó, del servidor HYCOM, un archivo “nc” de salinidad superficial con la misma resolución espacial y temporalidad similar a la del archivo de temperatura superficial de HYCOM. Lo anterior, fue hecho para poder contar con una mayor resolución espacial en el estudio.

3.4. Manejo de datos oceanográficos de manera individual.

En congruencia con la necesidad anterior, se adecuó un conjunto de algoritmos para poder tratar cada uno de los datos de manera individual y así poder facilitar el manejo y preparación de los mismos.

3.4.1. Temperatura superficial del mar (HYCOM).

Para manejar con mayor facilidad estos datos en formato “nc” se utilizó la librería xarray para concatenar todos los archivos correspondientes a las costas de toda la República Mexicana dentro del periodo de estudio y

posteriormente seccionar espacialmente la región del noroeste de México. Este archivo xarray fue convertido en un dataframe para poder exportarlo a un archivo csv. Este archivo csv fue tratado para eliminar los duplicados y completar los días faltantes dentro de la serie temporal como se mencionó en el apartado anterior, ya que resultó ser la mayor problemática de esta información. Corregido esto, se procedió a eliminar los valores NaN contenidos en este archivo para después exportar la información útil a un archivo csv.

3.4.2. Datos del estudio regional climatológico del Pacífico nororiental (NOAA).

Estos datos en formato csv fueron concatenados utilizando la librería de Pandas logrando asegurar su manejo útil y práctico.

3.4.3. Salinidad superficial del mar (NOAA).

El archivo csv previamente trabajado para obtener un valor promedio de salinidad diaria para cada coordenada de estudio dentro del periodo de tiempo de dicho estudio fue fácilmente manipulado con la librería de Pandas.

3.4.4. Salinidad superficial del mar (HYCOM).

Al igual que el archivo homólogo de temperatura superficial de la misma fuente, este archivo fue manejado con la librería xarray para concatenar todos los archivos nc en uno solo correspondientes a todas las costas de la República Mexicana. Esta información fue filtrada para seleccionar únicamente la correspondiente al noroeste de México. Con la finalidad de empatar esta información con el archivo nc de temperatura superficial, la librería xarray permite interpolar de manera espacial la información contenida en distintos formatos, entre ellos el formato nc, por lo que se interpoló la información de salinidad para un mallado muy aproximado al mallado correspondiente del estudio de temperatura superficial del mar de HYCOM. Esta nueva información fue convertida en un dataframe y se verificó que no existieran valores duplicados ni faltantes dentro de la serie temporal. En este caso, la información no presentó ninguna de las dos complicaciones anteriores, sólo se eliminaron los valores NaN contenidos en este estudio para exportar esta información a un archivo csv.

3.4.5. Unión de datos de temperatura y salinidad superficial del mar(HYCOM).

Para lograr la unión de estos dos estudios, fue necesaria la librería Pandas la que permitió el emparejamiento por coordenadas y tiempo de ambas series temporales. Como resultado de este emparejamiento, se obtuvo un dataframe que logró unir la información de ambos estudios, sin embargo, el estudio de salinidad superficial resultó tener 459 menos puntos que el estudio de temperatura superficial. Lo anterior implica que esas coordenadas sin información de salinidad superficial resultaron sin datos de salinidad superficial para todo el periodo temporal. Para arreglar esto, se ordenó este dataframe de acuerdo con su latitud y tiempo, de tal manera que este orden juntara todas las coordenadas por día y por orden ascendente en las latitudes. Al corroborar la ubicación de los datos faltantes y su seriación, el número de valores NaN consecutivos llegó a variar entre el rango de 2 a 5. Cabe señalar que al revisar la cercanía espacial de estos valores faltantes, además de corresponder a la misma latitud y día, resultaron tener longitudes cercanas por lo que se consideró que al realizar una interpolación para estos valores utilizando la información circundante a ellos resultaba aceptable. Otro motivo que fue considerado para realizar lo anterior, fue la pequeña variación anual en la concentración de sal en el mar(33-36 UPS) comparada con la variación de temperatura superficial(14-35°C). El dataframe final fue exportado a un archivo csv. Finalmente, resulta importante mencionar que la temporalidad del archivo que resultó de esta unión va desde el 21/Agosto/2013 hasta el 24/Noviembre/2018.

3.5. Clusterización de los datos oceanográficos.

Para llevar a cabo la clusterización de los distintos archivos se utilizaron las librerías de Pandas, Numpy, os, sklearn.cluster, glob y matplotlib. Con la librería os se definió el directorio de los archivos por analizar, con la librería pandas se abrieron los documentos csv como dataframes, con la librería Numpy se declaró un numpyarray que definiera una variable para almacenar la información por clusterizar. En este procedimiento, los datos fueron clusterizados de dos maneras: el primer criterio fue para identificar la correspondencia entre los datos de temperatura y salinidad. Este criterio sólo se aplicó a aquellos archivos que contenían esta información oceanográfica con la misma resolución temporal, como fue el caso del archivo temporal que resultó de la unión de los datos de salinidad mundial

dentro de la región del noroeste de México con el resultado del programa que selecciona un conjunto de datos para esta región de estudio con una resolución determinada de $1/4^\circ$. El estudio regional climatológico del Pacífico nororiental de la NOAA y el archivo resultado de la unión de los datos de temperatura y salinidad superficial del mar, ambos de la base de datos HYCOM. El segundo criterio de clusterización fue considerando posición geográfica e información oceanográfica contenida en cada archivo, dejando a un lado el eje temporal, por ejemplo: la información del estudio climatológico del Pacífico nororiental de la NOAA fue clusterizado con la información de Latitud, Longitud, Temperatura superficial y Salinidad superficial; mientras que el archivo de temperatura superficial HYCOM fue clusterizado utilizando la información de Latitud, Longitud y Temperatura superficial del mar.

Para estimar el número k de clústeres por ajustar, se programó un ciclo **for**, mismo que durante su iteración ejecuta la librería sklearn para realizar un ajuste de n número de clusters y calcula el parámetro “score” que permite conocer, de acuerdo con la documentación de esta librería, el valor opuesto de x en el “objetivo de K-means”, en donde éste último, es el de reducir la suma de los cuadrados de las distancias entre los puntos y el respectivo centroide de su clúster. Este valor indica qué tan coherentes son los clústeres. Entre menor sea este valor los clústeres son más coherentes [44]. De esta manera se obtuvo una lista de números referentes al parámetro “score” para cada número de n clústeres ajustados. Con estos datos se graficó la “curva codo” para cada conjunto de datos. En donde se colocó el parámetro “score” en el eje de las ordenadas y al número de clústeres ajustados a la información en el eje de las abscisas. Este gráfico se elaboró con la librería matplotlib para determinar aquel número de n clústeres ajustados que cumple con el método de “curva codo” para estimar el valor óptimo de k descrito en los fundamentos teóricos.

Una vez estimado el número de clústeres por ajustar a los datos, se ejecutó el algoritmo correspondiente al método de clusterización “K-means”, inmerso en la librería sklearn, en donde se ingresó el número de k clústeres óptimo derivado de la curva codo. Con este algoritmo, se clasificaron los datos de cada archivo, se obtuvo el centroide de cada clúster y las etiquetas para cada dato referentes a su clúster asignado en un formato de lista que fue agregada como una columna del dataframe de datos original. Después de ejecutar el algoritmo de clusterización para cada archivo, se realizó un gráfico para visualizar la relación entre temperatura y salinidad superficial del mar o entre la ubicación geográfica y los datos oceanográficos de cada archivo, dependiendo el tipo de criterio de clusterización. Cabe recalcar que la asignación de cada clúster para cada conjunto de datos

resulta ser aleatoria en cada iteración del método de clusterización utilizado, sin embargo, al ejecutarlo repetidamente resultó evidente que el agrupamiento de los datos permanecía prácticamente constante a lo largo de cada iteración, con la única diferencia de la asignación del número de clúster correspondiente. Considerando lo anterior, se decidió ordenar cada clúster de acuerdo con el promedio de la variable oceanográfica más significativa, según los resultados del análisis de resultados, en un orden de menor a mayor. Al considerar este orden, fueron programados los histogramas de cada variable oceanográfica inmersa dentro de cada clúster. En cada histograma obtenido, se incluyen, dentro de un cuadro de texto, los parámetros de tendencia central de la variable oceanográfica del clúster en cuestión. Acto seguido se exportó cada dataframe con la nueva columna que indica la clasificación derivada de la clusterización de cada serie de datos a un archivo csv.

A partir de la comparación entre estos dos criterios, fue seleccionado el archivo que, de acuerdo con los resultados obtenidos, representa en mejor manera el fenómeno de agrupamiento de los datos de temperatura y salinidad superficial del mar.

3.5.1. Programación para calcular el número de días/meses al año de cada clúster.

El motivo de esta sección fue la necesidad de poder conocer el número de días al año en los que una coordenada presenta el mismo clúster dentro del estudio seleccionado a partir de los resultados de la metodología anterior. Este programa utiliza la librería `os` para ingresar la dirección en donde se ubican los archivos de interés; la librería `Pandas` para abrir y manejar el formato csv de este archivo y así poder manejarlo fácilmente como dataframes; la librería `Numpy` para crear listas que pueden ser agregadas fácilmente como columnas del dataframe de interés.

Este programa, después de ubicar y abrir el archivo correspondiente en formato csv, define las columnas de `Latitud` y `Longitud` como el multi-índice del dataframe en proceso para que acto seguido puedan ser obtenidos los valores únicos de este multi-índice, mismos que corresponden al conjunto de coordenadas únicas de la región de estudio. Hecho esto, se reinició el índice para obtener el dataframe original. Posteriormente, la información de interés fue filtrada para cada año contenido en su periodo temporal, misma que fue seccionada para cada clúster obtenido en su clasificación. Lo anterior resultó en subconjuntos de la información original que permitieron mediante un ciclo `for` el conteo en cada posición única del

número de datos clasificados en un clúster específico durante un año en específico, y teniendo en cuenta que cada dato tiene una resolución diaria, entonces el resultado obtenido representa el número de días al año para un determinado clúster en cada coordenada única considerada dentro del estudio. El resultado de la ejecución de este programa fue un conjunto de archivos csv con el número de días para cada clúster en cada año.

Mapas del número de días al año de cada clúster.

Para brindarle una mayor utilidad a la información obtenida en la metodología anterior, se decidió elaborar un conjunto de mapas que facilitaran su interpretación. Para ello se escribió un programa que utiliza las librerías Pandas, Numpy, os, xarray, cartopy y matplotlib que en conjunto permiten la visualización del número de días en los que cada clúster ocurre en cada una de las posiciones únicas del estudio seleccionado en el procedimiento de clusterización.

3.5.2. Cálculo de propiedades termodinámicas del agua de mar.

Después de conocer la disponibilidad de los datos oceanográficos cerca de las costas del noroeste de México mediante la visualización espacial del archivo de temperatura y salinidad superficial del mar del servidor HYCOM, se identificó la necesidad de calcular las propiedades termodinámicas del agua de mar para poder llevar a cabo la simulación del calentamiento del agua de mar. Esta necesidad fue cubierta al consultar un conjunto de tesis de doctorado relacionadas a geotermia de baja entalpía disponibles en la UNAM, dentro de las cuales se encuentra una referencia en común [45] que contiene un conjunto de ecuaciones en función de la temperatura y la salinidad del agua de mar. Dentro de esta referencia se encuentran las ecuaciones que permiten calcular la densidad y el calor específico a presión constante del agua de mar. Estas ecuaciones están disponibles en el apéndice de este trabajo.

Se escribió un programa que utiliza las librerías de Pandas, Numpy y math. En este programa fueron definidas cada una de estas ecuaciones para calcular cada una de estas propiedades del agua de mar a distintas concentraciones de sal (3000-36000 ppm) con distintos valores de temperatura (10-70 °C). Los resultados obtenidos fueron verificados con cada una de las tablas de valores disponibles dentro de la misma referencia para cada una de dichas propiedades. Una vez verificados los resultados, fueron graficados para su comparación visual con las curvas disponibles

dentro de la referencia consultada. Hecho esto, se abrió el archivo que contiene los datos temporales de temperatura y salinidad superficial del mar obtenidas del servidor de HYCOM para definirlo como un dataframe, mediante la librería de Pandas, de tal manera que fue posible calcular las propiedades termodinámicas de densidad y calor específico de cada uno de los datos inmersos dentro de la serie temporal del estudio. Estos resultados fueron agregados dentro del dataframe definido en este documento para exportar esta información a un archivo csv.

3.6. Unión, manejo de datos meteorológicos.

Los datos descargados del servidor de NREL para cada una de las playas, fueron proporcionados individualmente en carpetas que contenían sus datos meteorológicos correspondientes, en archivos anuales. Estos archivos, fueron abiertos uno a uno para conocer el arreglo y tipo de datos de cada playa estudiada. Hecho esto, se escribió un programa que permite calcular parámetros solares para una superficie inclinada con un ángulo de inclinación igual a la latitud del lugar de estudio, orientada al sur con un ángulo de desviación de cero grados respecto a este punto cardinal y que además une en un solo archivo csv toda la información temporal procesada referente a cada playa estudiada. Este programa implementa las librerías de Pandas, Numpy, os y math para llevar a cabo la ejecución del siguiente procedimiento: primero fueron definidas las ecuaciones solares que fueron ejecutadas en este programa referentes al ángulo de declinación solar (δ), al parámetro beta (β_o), a la ecuación del tiempo solar (E), al ángulo horario (ω), al ángulo theta comprendido entre el vector solar y el vector normal a la superficie inclinada (θ), las ecuaciones necesarias para calcular la radiación solar directa (G_b), difusa (G_d) y global (G_g) para una superficie inclinada. Definidas estas ecuaciones, el programa cambia el directorio actual por el correspondiente al interior de la carpeta que contiene los datos de un determinado lugar de estudio. Cuando el programa abre cada archivo anual, guarda la información del estudio en ejecución dentro de un dataframe para facilitar su manipulación. Hecho esto, fue necesario conocer las coordenadas de cada lugar de estudio para definir en forma de variables el meridiano local y el meridiano estándar correspondiente a cada playa de acuerdo con el Centro Nacional de Metrología (CENAM) [46].

Definidas estas variables, se agregaron en forma de columnas dentro del dataframe, el día de la semana correspondiente a cada dato de estudio y su fecha con el siguiente formato: Año-Mes-día Hora:Minuto ya que cada serie de datos proporcionada por el servidor de NREL tiene una re-

solución temporal de 30 minutos para las 24 horas del día de todo un año. Lo anterior fue necesario para poder calcular el Tiempo solar considerando el horario de verano para cada sitio de estudio. Para esto, se computó un conjunto de instrucciones que permite obtener el número entero de los días correspondientes al primer domingo de abril y al último domingo de octubre, ya en estos días es modificado el tiempo civil dependiendo de la zona horaria en la que se realiza el cálculo, de acuerdo con el Centro Nacional de Metrología (CENAM) [46].

Los dos números que resultaron de esta ejecución fueron guardados como variables para utilizarse más adelante. Posteriormente, se procedió a calcular el número de día juliano de cada dato dentro de la serie temporal, con la finalidad de poder calcular los valores correspondientes del ángulo de declinación solar (δ), del parámetro beta (β) y de la ecuación del tiempo solar (E). Con estos resultados fue posible calcular el tiempo solar contemplando el día y hora de aplicación del horario de verano para cada uno de los datos. Cabe recalcar que en esta sección se utilizaron las variables con los números enteros del primer domingo del mes de abril y del último domingo del mes de octubre, correspondientes a cada año del archivo analizado para que a partir de las dos de la mañana de ambos días fuera aplicado o no el horario de verano de cada lugar. Al concluir este procesamiento, el programa agrega, en forma de columnas, la información del ángulo de declinación solar (δ) y los valores del tiempo solar dentro del dataframe analizado en curso. La iteración continúa al calcular, para cada dato, el ángulo horario (ω), el ángulo theta comprendido entre el vector solar y el vector normal a la superficie inclinada (θ) y los valores de radiación solar directa, difusa y global sobre una superficie inclinada considerando los ángulos de inclinación y orientación análogos a la playa de estudio. Al terminar este cálculo, los resultados fueron colocados en columnas dentro del dataframe en curso. Este algoritmo fue aplicado para cada archivo anual de cada lugar de estudio. Antes de finalizar, el programa guarda la información del dataframe, correspondiente al archivo anual analizado en curso, dentro de uno nuevo que concatena toda la información resultante del procesamiento de cada archivo anual para un mismo sitio de estudio. Con esto se logró obtener una serie temporal completa desde el año 2013 hasta el año 2018 para un mismo lugar con información procesada.

3.7. Simulación del calentamiento del agua superficial del mar con calentadores solares planos.

Al igual que en las secciones anteriores, fue necesario el desarrollo de un programa. Dicho programa fue conceptualizado para realizar una simulación del calentamiento del agua superficial del mar con tecnología termosolar. Su ejecución permite simular un número n (determinado por el usuario) de calentadores solares planos tanto de la marca Ecosun como de la marca Heliocol colocados en un arreglo en serie para una de las 3 playas de estudio disponibles. Este programa obtiene la información oceanográfica y meteorológica de la playa de interés, con la finalidad de ejecutar las ecuaciones de eficiencia instantánea de los calentadores planos Ecosun y Heliocol, las ecuaciones de densidad y calor específico del agua de mar. Al ejecutar estas ecuaciones, es posible calcular los valores de entrada necesarios para una ecuación que permite el cálculo de la temperatura de salida de cada uno de los calentadores simulados. Al finalizar su iteración, este programa entrega un archivo "csv" con la información meteorológica, oceanográfica de la playa de interés junto con los resultados del calentamiento del agua superficial del mar y el incremento de temperatura del agua marina para cada uno de los n calentadores solares planos solicitados, tanto para un arreglo en serie de calentadores planos Ecosun como para un un arreglo en serie de calentadores solares planos Heliocol.

Para lograr todo lo descrito anteriormente, fueron necesarias las librerías Pandas, Numpy, os, matplotlib y math. En primer lugar la ejecución de este programa determina el directorio de la carpeta en donde se encuentra el archivo csv, previamente trabajado, que contiene los datos de temperatura y salinidad superficial del mar del servidor HYCOM junto con el cálculo de las propiedades termodinámicas de densidad y calor específico para cada medición. Se carga este archivo dentro del programa y se procede a modificar el directorio actual por aquel en donde se encuentra cada uno de los archivos con la información meteorológica anual correspondiente a cada playa de estudio. Posteriormente, este programa requiere que el usuario ingrese un número entero que refiere a un código asignado a cada una de las seis playas disponibles. Los códigos se muestran en el cuadro 3.3.

El programa al continuar su ejecución, solicita al usuario ingresar el número de calentadores solares interconectados en serie que desea calcular en la playa previamente seleccionada. Acto seguido, extrae la información meteorológica de la playa de interés bajo la ejecución de un conjunto

Estado	Nombre del lugar	Código
Baja California Sur	Cabo San Lucas	0
Baja California Sur	Bahía Asunción	1
Baja California	Rosarito	2

Cuadro 3.3: Códigos asignados dentro del programa de simulación de calentadores solares planos en el noroeste de México para cada una de las 3 playas de estudio.

de ciclos **if**. Estos condicionales existen para cada playa de interés y ejecutan un conjunto de instrucciones si el código del lugar, determinado por el usuario, corresponde con el código asignado a la playa anclada a ese condicional. Al ser verdadera una de estas instrucciones, este programa abre el archivo csv, previamente trabajado en el programa anterior para cada una de las playas, con la información meteorológica del lugar seleccionado. Además, se determinan cuatro variables; dos de tipo flotante que corresponden a la latitud y longitud de las coordenadas descritas en el cuadro 3.1 y dos de tipo texto; la primera determina parte del nombre con el que se guardarán los o el archivo csv al final de la ejecución del programa y la segunda variable de tipo texto guarda el nombre de la playa seleccionada para que durante las distintas ejecuciones, este nombre sea desplegado dentro de los mensajes contenidos en el cálculo del calentamiento del agua de mar con tecnología termosolar. Al concluir con la ejecución anterior, el programa filtra la información meteorológica de la playa de estudio al seleccionar el periodo del 21/08/2013 al 24/09/2018, mismo que corresponde al de los datos oceanográficos del servidor de HYCOM. Acto seguido, son definidas las ecuaciones necesarias para el cálculo del calentamiento del fluido superficial marino. Las ecuaciones definidas en esta sección son las siguientes:

- Densidad del agua mar en función de la temperatura y salinidad (Ver apéndice).

$$\rho = 10^3(A_1F_1 + A_2F_2 + A_3F_3 + A_4F_4) \quad (3.3)$$

tal que:

$$B = \frac{\frac{2X}{1000} - 150}{150} \quad (3.4)$$

$$G_1 = 0.5 \quad (3.5)$$

3.7. SIMULACIÓN DEL CALENTAMIENTO DEL AGUA SUPERFICIAL DEL MAR CON CALENTAMIENTO

$$G_2 = B \quad (3.6)$$

$$G_3 = 2B^2 - 1 \quad (3.7)$$

$$A_1 = 4.032219G_1 + 0.115313G_2 + 3.26 \times 10^{-4}G_3 \quad (3.8)$$

$$A_2 = -0.108199G_1 + 1.571 \times 10^{-3}G_2 - 4.23 \times 10^{-4}G_3 \quad (3.9)$$

$$A_3 = -0.012247G_1 + 1.74 \times 10^{-3}G_2 - 9 \times 10^{-6}G_3 \quad (3.10)$$

$$A_4 = 6.92 \times 10^{-4}G_1 - 8.7 \times 10^{-4}G_2 \quad (3.11)$$

$$A = \frac{2T - 200}{160} \quad (3.12)$$

$$F_1 = 0.5, F_2 = A, F_3 = 2A^2 - 1, F_4 = 4A^3 - 3A \quad (3.13)$$

En donde:

ρ es la densidad del agua de mar en (kg/m^3), X es la salinidad del agua expresada en partes por millón es decir cuántos gramos de sal por cada kilogramo de agua hay (mg_{sal}/L_{agua}) y T es la temperatura del agua de mar en $^{\circ}C$. Esta correlación es válida dentro del rango de valores de: $0 \leq X \leq 160000$ ppm y $10 \leq T \leq 180^{\circ}C$.

- Calor específico del agua de mar en función de la temperatura y salinidad (Ver apéndice).

$$C_p = (A + BT + CT^2 + DT^3) \quad (3.14)$$

en donde los valores de A,B,C y D están en función del agua de mar de la siguiente forma:

$$A = 4206.8 - 6.6197s + 1.2288 \times 10^{-2}s^2 \quad (3.15)$$

$$B = -1.1262 + 5.4178X10^{-2}s - 2.2719X10^{-4}s^2 \quad (3.16)$$

$$C = 1.2026X10^{-2} - 5.3566X10^{-4}s + 1.8906X10^{-6}s^2 \quad (3.17)$$

$$D = 6.8777X10^{-7} + 1.517X10^{-6}s - 4.4268X10^{-9}s^2 \quad (3.18)$$

En donde las unidades de cada parámetro son:

$C_p \rightarrow (kJ/(kg^{\circ}C))$, $T \rightarrow ^{\circ}C$ y s es la salinidad del agua expresada en $UPS \rightarrow (g/kg)$.

La correlación anterior es válida para los rango de salinidad de $20000 \leq s \leq 160000$ ppm y temperatura $20 \leq T \leq 180^{\circ}C$

- Curva de eficiencia instantánea del calentador solar plano Ecosun (Ecuación cuadrática- ver tabla 3.2).

$$\eta = 0.82 - 13.5264(P/G) - 0.1353(P^2/G) \quad (3.19)$$

- Curva de eficiencia instantánea del calentador solar plano Heliocol (Ecuación cuadrática- ver la sección de análisis de resultados cuadro 4.6).

$$\eta = 0.8337 - 18,44(P/G) - 0,5069(P^2/G) \quad (3.20)$$

- Ecuación de temperatura a la salida del calentador solar plano para el agua de mar-balance de energía (ver ecuación 3.22).

La ecuación que calcula la temperatura a la salida del calentador solar plano para el agua de mar fue planteada a partir del balance de energía descrito a continuación:

$$\eta = \frac{Q_u}{Q_T} = \frac{\dot{m}C_p\Delta T}{G \cos(\theta)A} = \frac{\rho\dot{v}C_p(T_s - T_i)}{G \cos(\theta)A} \quad (3.21)$$

En donde η se refiere a la eficiencia instantánea del calentador solar plano, Q_u es el calor útil absorbido por el calentador solar plano, Q_T es el calor total disponible sobre el calentador solar plano, \dot{m} es el flujo másico de agua marina, C_p el calor específico del agua de mar, T_i es la temperatura del fluido marino a la entrada del calentador solar, T_s es la temperatura del agua de mar a la salida del calentador solar, ρ es la densidad del agua de mar, \dot{v} es el flujo volumétrico del fluido marino, G es la radiación solar sobre el calentador solar, θ es el ángulo comprendido entre el vector solar y el vector normal a la superficie del calentador solar y A es el área del calentador. Cada parámetro de esta ecuación fue considerado con las

3.7. SIMULACIÓN DEL CALENTAMIENTO DEL AGUA SUPERFICIAL DEL MAR CON CALENTAMIENTO

unidades correspondientes al sistema internacional de unidades, excepto aquellas variables de temperatura cuyas unidades son grados Celsius. De esta ecuación se despejó el valor T_s . Obteniendo la ecuación que calcula la temperatura a la salida del calentador solar plano para el agua de mar:

$$T_s = T_i + \frac{\eta G \cos(\theta) A}{\rho \dot{v} C_p} \quad (3.22)$$

Concluido el procedimiento anterior, el programa calcula la posición más cercana dentro del mallado de los datos oceanográficos correspondientes a la longitud y latitud de la ubicación descrita en el cuadro 3.1 asociada con la playa seleccionada por el usuario. Hecho esto, se extrae la información oceanográfica de la ubicación calculada teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- Puede suceder que la ubicación calculada corresponda a un par de coordenadas que se encuentren dentro de las posiciones únicas del mallado de los datos oceanográficos de HYCOM. Esto permite que la disponibilidad de los datos oceanográficos sean los más cercanos a la ubicación de donde se obtuvieron los datos meteorológicos de la playa de interés.
- Como sucedió con los datos de salinidad superficial del mar del servidor HYCOM, se consideró la posibilidad de la existencia de coordenadas sobre el mar cercanas a la costa que no fueran contempladas dentro del mallado de los datos oceanográficos. Es por ello que se decidió escribir un algoritmo que consultara y guardara la información oceanográfica correspondiente al conjunto de coordenadas más cercanas a la ubicación calculada de acuerdo con la figura 3.2. Estas coordenadas resultan del incremento o decremento equivalente a la mitad de la resolución del estudio ($\approx 1/25$) en su latitud/longitud o incluso en ambas.

Tomando en cuenta estas consideraciones, el programa fue elaborado para que a través de un condicional revise y guarde la cantidad de datos oceanográficos disponibles para ambas posibilidades. En el debido caso de cumplirse que la posición calculada por el programa se encuentre dentro del conjunto de posiciones únicas del estudio oceanográfico, el programa despliega el mensaje de "Punto único válido" y filtra la información oceanográfica para esta ubicación única. De lo contrario despliega el mensaje "Punto único no válido" y comienza a filtrar la información oceanográfica para cada ubicación cercana, de acuerdo con la figura 3.2, y para cada una

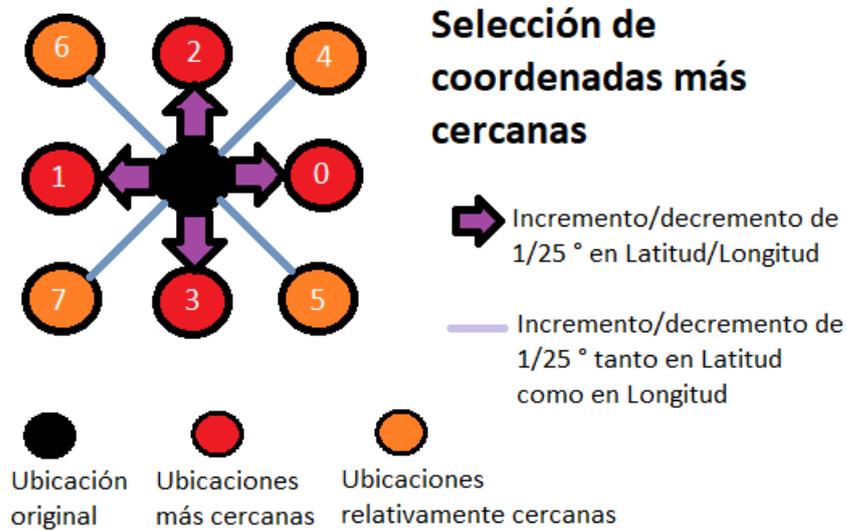


Figura 3.2: Diagrama del criterio de selección de coordenadas más cercanas a una ubicación no contemplada en el mallado de datos oceanográficos.

de ellas despliega un mensaje con la cantidad de datos disponibles en esa coordenada. A continuación se muestra un ejemplo:

- “Punto único no válido”
- “Cantidad de datos en punto único:”0
- “Cantidad de datos en punto cero:”x
- “Cantidad de datos en punto uno:”x
- “Cantidad de datos en punto dos:”x
- “Cantidad de datos en punto tres:”x
- “Cantidad de datos en punto cuatro:”x
- “Cantidad de datos en punto cinco:”x
- “Cantidad de datos en punto seis:”x
- “Cantidad de datos en punto siete:”x

En donde x puede tener dos valores, el primero de ellos es cero-para el caso en el que no existan datos para esas coordenadas o 1861 para el caso

3.7. SIMULACIÓN DEL CALENTAMIENTO DEL AGUA SUPERFICIAL DEL MAR CON CALENT

en que sí existan valores disponibles para esa posición. Este valor de 1861 refiere a la cantidad de días totales dentro del periodo temporal del estudio oceanográfico. La numeración de cada punto es referida en la figura 3.2.

A partir de aquí, el programa implementa la misma metodología, en cada punto de estudio posible, para el cálculo de la temperatura de salida en un arreglo en serie de n número de calentadores solares planos tanto Ecosun como Heliocol. La metodología implementada fue la siguiente: en cada punto de estudio posible el programa comienza con un condicional **if** que es verdadero si la longitud del dataframe que resultó del filtrado de información oceanográfica referente a esta ubicación es igual a cero. Si esto se cumple, el programa despliega un mensaje que indica que ese dataframe correspondiente es nulo. Por otro lado, si la evaluación resulta falsa, el cálculo de las temperaturas a la salida de cada calentador simulado da inicio. De suceder este último caso, el programa comienza a repetir 48 veces cada valor diario de temperatura y salinidad superficial contenidos en la información oceanográfica filtrada, para la ubicación de interés, debido a que la temporalidad del estudio oceanográfico es diaria y la temporalidad de los datos meteorológicos resulta ser cada 30 minutos. Hecho esto, se define un dataframe que resulta de la unión de la información meteorológica del lugar de interés junto con los valores de temperatura y salinidad superficial del mar del servidor HYCOM para la coordenada más cercana disponible de los datos oceanográficos. Posteriormente, con un ciclo **for** y un ciclo **if** se crea una lista con los valores inversos de la radiación solar global sobre una superficie inclinada a la latitud del lugar de interés orientada al sur; teniendo en cuenta que existen horas durante el día en los que no existe radiación solar, por lo que se asignó un valor de 0 en estos casos. Al finalizar la ejecución de estas instrucciones, el programa muestra un mensaje que determina el inicio de la simulación del calentador solar ya sea Ecosun o Heliocol. En cada caso, la metodología descrita a continuación fue la misma para cada calentador:

La simulación comienza al definir en una variable (A) el área de dicho calentador solar (m^2) y el flujo de operación recomendado (m^3/s) para dicho calentador(v). Los valores de cada una de estas variables son desplegados en forma de texto. Hecho esto, en un ciclo **for** se determina el rango de valores que adquiere el contador, mismo que se extiende desde cero y termina en la cantidad de calentadores solares planos por calcular. La primer instrucción dentro del ciclo **for** despliega un mensaje de texto que indica el número del calentador solar en proceso. Posteriormente, este ciclo ejecuta un condicional **if** que únicamente es verdadero cuando el valor del contador es cero y falso cuando el contador es distinto de cero. La úni-

ca diferencia entre el caso inicial y el resto de las iteraciones radica en que la temperatura de entrada, definida dentro de las ecuaciones de cálculo, es la temperatura superficial del mar, misma que se encuentra dentro de la serie temporal, mientras que en las demás iteraciones, la temperatura de entrada es definida por el resultado de la iteración anterior. Independientemente del número de iteración, el programa define, en forma de lista, el cálculo de la eficiencia instantánea del calentador solar de estudio (Ecosun/Heliocol) en función de la lista de valores que resultan de la diferencia entre la temperatura del agua de mar a la entrada del calentador solar y la temperatura ambiente; y del listado de valores del inverso de la radiación solar global sobre una superficie inclinada, previamente computado. Esta operación es ejecutada a lo largo de toda la serie temporal, obteniendo un listado de valores de eficiencia instantánea del calentador solar Ecosun o Heliocol. Hecho esto, se define una lista vacía en donde serán almacenados los valores de la temperatura del agua de mar a la salida del calentador solar de prueba. Declarada esta lista, se ejecuta un ciclo **for** con un contador que va desde cero hasta la longitud de datos de la serie temporal de estudio, ya que es necesario calcular la temperatura de salida del calentador solar fila por fila dentro de este dataframe. Las variables implementadas en cada iteración dentro de este ciclo **for** son:

- t_i = Valor n ésimo de la temperatura del fluido a la entrada del calentador solar.
- X = Valor n ésimo de la salinidad del fluido a la entrada del calentador solar.
- n = Valor n ésimo de eficiencia instantánea del calentador solar Ecosun/Heliocol.
- G = Valor n ésimo de la radiación solar global sobre una superficie inclinada.
- ρ = Cálculo de la densidad del agua de mar al evaluar la función de esta propiedad con valores de con los valores de t_i y X .
- C_p = Cálculo del calor específico del agua de mar al evaluar la función de esta propiedad con los valores de t_i y X .
- T_s = Cálculo de la temperatura del fluido a la salida del calentador solar.
- T_c = Temperatura del fluido a la salida del calentador solar que es utilizado para el proceso iterativo.

3.7. SIMULACIÓN DEL CALENTAMIENTO DEL AGUA SUPERFICIAL DEL MAR CON CALENT

Para poder calcular la temperatura del agua de mar a la salida de cada calentador solar plano, era necesario ingresar los valores de densidad y calor específico que contemplaran la temperatura de entrada y de salida. Para ello, se decidió aplicar un método iterativo, dentro de este ciclo **for**, que permitiera calcular la temperatura de salida del agua de mar. Este método es descrito a continuación:

- 1.- Una vez definidas las variables t_i, X, n y G , se calculan valores iniciales de densidad y calor específico del agua de mar en función de t_i y X .
- 2.- Con estos valores iniciales de ρ y C_p , junto con t_i, X, n, A, v y G (ver ecuación 3.22) se calcula la temperatura del agua de mar a la salida del calentador solar plano (T_s). Este valor de temperatura de salida se asignaba a T_c .
- 3.- Se vuelven a calcular los valores de densidad y calor específico del agua de mar utilizando la temperatura promedio ($(t_i + T_c)/2$) y el valor de X .
- 4.- Se vuelve a calcular el valor de la temperatura de salida del agua de mar a la salida del calentador solar con las variables anteriores y con los nuevos valores de ρ y C_p . Obteniendo un nuevo valor de T_s .
- 5.- Se define un ciclo **while** que es ejecutado siempre y cuando la diferencia entre el valor de $T_s - T_c$ sea mayor o igual que 0.05. Las instrucciones inmersas en el ciclo **while** son:
 - Se define a T_c como T_s .
 - Se calcula la densidad del agua de mar utilizando el valor promedio ($(t_i + T_s)/2$) y el valor de X .
 - Se calcula el calor específico del agua de mar utilizando el valor promedio ($(t_i + T_s)/2$) y el valor de X .
 - Se calcula la temperatura de salida con estos nuevos valores de ρ y C_p .
- Concluida la ejecución del ciclo **while**, el último valor de T_s es anexoado dentro del listado que almacena los valores de temperatura del agua de mar a la salida del calentador.

Al terminar de ejecutar el ciclo **for** para cada renglón del dataframe, el programa añade una columna dentro de este último con los valores de temperatura del agua de mar a la salida del calentador solar simulado.

Una vez finalizada esta metodología para ambos arreglos de calentadores solares planos, el programa muestra un mensaje de texto que indica el final de la simulación y despliega un segundo mensaje de texto que indica el inicio del cálculo del delta de temperatura producido por el calentamiento de cada calentador. Lo anterior es posible, gracias a la ejecución de un ciclo **for** que calcula el delta de temperatura entre la temperatura a la salida de cada calentador y la temperatura del agua superficial del mar de manera iterativa, a lo largo de toda la serie temporal, para el caso de cada calentador solar dentro del arreglo de calentadores tanto Ecosun como Heliocol. Acto seguido, el programa crea un conjunto de columnas con valores booleanos que resultan ser verdaderas cuando el delta de temperatura entre el agua superficial del mar y el agua marina calentada es mayor o igual a 20°C para cada número total de calentadores solares simulados de ambos calentadores. Con estas columnas, el programa logra calcular y guardar, en distintos dataframes, la cantidad de días, a lo largo del total del periodo temporal y dentro de cada periodo anual completo en la simulación, para los cuales se cumple un determinado número de horas con el delta de temperatura mayor o igual a 20°C . Esto lo hace para cada uno de los calentadores simulados tanto Ecosun como Heliocol. Acto seguido, este programa despliega un conjunto de gráficas que permiten la visualización de las funciones de probabilidad asociadas al número de horas operativas de operación posibles durante un día para el total del estudio, como para cada uno de los periodos anuales completos contenidos en el eje temporal del estudio. Luego, muestra los histogramas de frecuencia del delta de temperatura disponible para ciertos arreglos de calentadores planos Ecosun y Heliocol.

Capítulo 4

Resultados y análisis

4.1. Curvas de calentadores solares planos.

Como se mencionó en el capítulo 2, se decidió graficar las ecuaciones de eficiencia instantánea proporcionadas por las distintas certificaciones de cada calentador solar (ver cuadro 3.2) para ser comparadas con las curvas dentro de la figura 3.1. Para esto, se abrió el documento pdf que contiene dicha figura y se recortó directamente del mismo, sin modificar la escala de visualización predeterminada de Microsoft Edge. El resultado fue guardado como imagen (figura 3.1-La escala de esta imagen es 0.4 veces menor que la implementada en las mediciones). Los resultados de medir los ejes coordenados de esta figura son:

Ejes	Eje x	Eje y
Medidas (cm)	20.32	15.71
Rango medido	0-0.06 (Km^2)/W	0-90 %

Cuadro 4.1: Medidas de los ejes de la figura 3.1

Después de medir los ejes coordenados de esa figura, se procedió a medir punto por punto cada una de las curvas de eficiencia de cada calentador solar. Los resultados de estas mediciones se muestran en los cuadros 4.2 y 4.3. Estas coordenadas fueron graficadas junto con las ecuaciones de eficiencia instantánea disponibles. Al graficarlas, se encontró el inconveniente de no saber el valor de G (W/m^2) y el rango de valores $(T_i - T_a)$ [$^{\circ}C$] contemplados en la figura 3.1. Como se mencionó en la metodología, se procedió a multiplicar el conjunto de coordenadas medidas y cada ecuación disponible por la variable G (ver ecuaciones 3.1 y 3.2). Acto seguido, se determinó un rango de valores de $(T_i - T_a)$ [$^{\circ}C$] de 0 a 50 [$^{\circ}C$] ya que este

Medidas		Equivalencias	
x[cm]	y[cm]	x[(Km ²)/W]	y[%]
0	13.6	0	0.779
2.12	11.24	0.006	0.644
4.26	8.41	0.013	0.482
6.33	5.16	0.019	0.296
8.47	1.37	0.025	0.079
9.20	0	0.027	0

Cuadro 4.2: Coordenadas de la curva de eficiencia instantánea del calentador solar plano Heliocol obtenidas de la figura 3.1 por el método gráfico.

Medidas		Equivalencias	
x[cm]	y[cm]	x[(°Cm ²)/W]	y[%]
0	14.31	0	0.819
2.12	12.8	0.006	0.733
4.26	11.08	0.013	0.635
6.33	9.26	0.019	0.530
8.47	7.25	0.025	0.415
10.61	5.08	0.031	0.291
12.71	2.8	0.037	0.160
14.82	0.4	0.044	0.023
15.21	0	0.045	0

Cuadro 4.3: Coordenadas de la curva de eficiencia instantánea del calentador solar plano Ecosun obtenidas de la figura 3.1 por el método gráfico.

tipo de tecnología termosolar no se caracteriza por alcanzar altas temperaturas por encima del ambiente. Lo anterior fue verificado al computar las distintas curvas de eficiencia instantánea con valores de G (W/m^2) cercanos a la constante solar. Una vez conocido el rango de valores ($T_i - T_a$) [$^{\circ}C$] se procedió a determinar aquel valor de G (W/m^2) que permitía la comparación de las ecuaciones de eficiencia instantánea modificadas (ηG) de cada calentador solar con las coordenadas modificadas de cada curva de eficiencia instantánea medidas (ηG) de manera gráfica. Después de pocas iteraciones, con valores por debajo de la constante solar y por arriba de los 700 [W/m^2], se pudo determinar que el valor de G [W/m^2] que permite la comparación es de 1250 [W/m^2]. En la figura 4.1 se muestra la comparativa entre las ecuaciones de eficiencia instantánea del cuadro 3.2 y las curvas de la figura 3.1 obtenidas a partir del método gráfico.

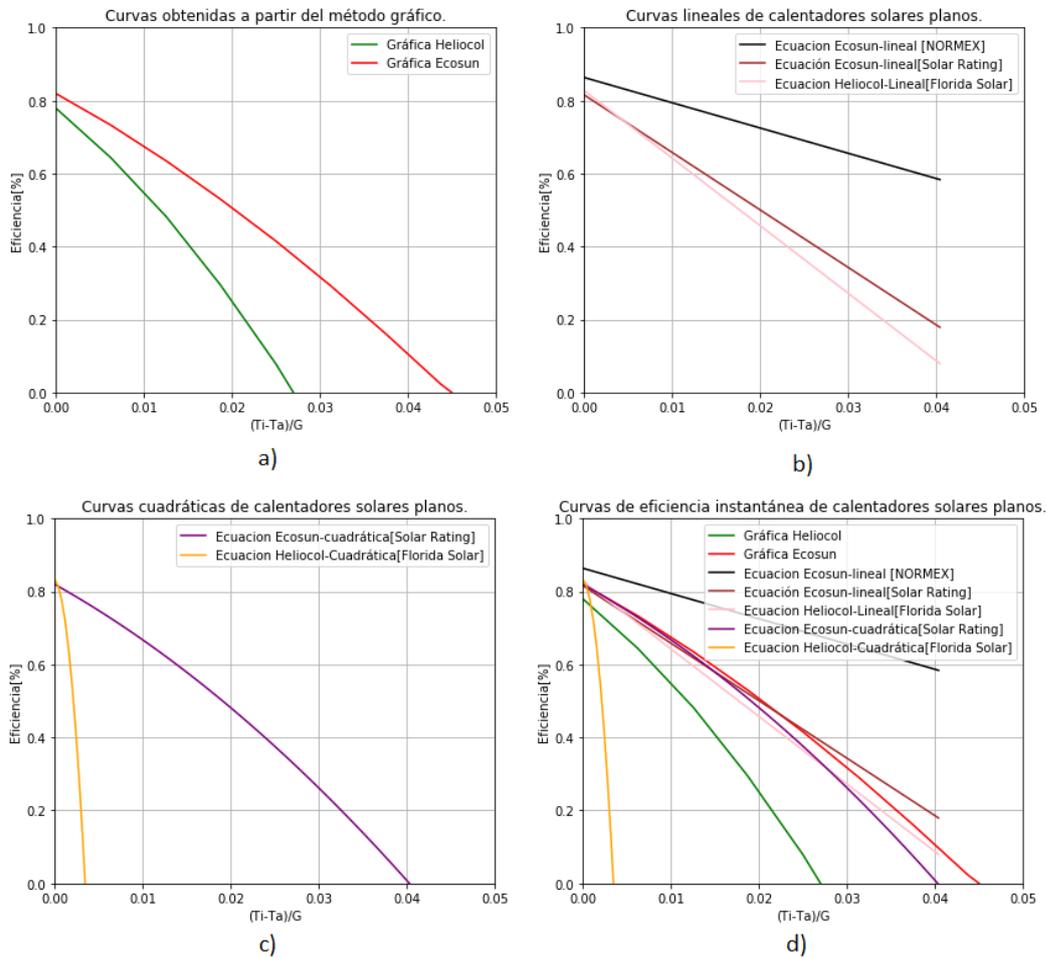


Figura 4.1: Curvas de eficiencia instantánea de los calentadores solares planos Ecosun y Heliocol considerando un valor de $G=1250 [W/m^2]$. a) Curvas obtenidas a partir del método gráfico, b) Ecuaciones lineales de eficiencia instantánea, c) Curvas cuadráticas de eficiencia instantánea, d) Todas las curvas de eficiencia instantánea disponibles.

En esta figura es posible apreciar que la ecuación cuadrática de eficiencia instantánea del calentador solar plano Heliocol (ver inciso c) parece ser distinta a lo que podemos apreciar en las curvas obtenidas por el método gráfico (ver inciso a). Sin embargo, las curvas lineales de eficiencia instantánea del calentador solar Heliocol (Florida Solar) y Ecosun (Solar Rating) parecieran tener una mayor similitud, sin considerar la otra curva lineal del calentador solar Ecosun (NORMEX). Por otro lado, la curva cuadrática de eficiencia instantánea del calentador Ecosun (Solar Rating), como se aprecia en el inciso d de la figura 4.1, presenta una similitud gráfi-

	Calentador	Ecuación ajustada
Método gráfico	Ecosun	$G_u = 1.027 \times 10^3 - (1.364 \times 10^1 \Delta T) - (8.344 \times 10^2 \Delta T^2)$
Método gráfico	Heliocol	$G_u = 9.743 \times 10^2 - (1.928 \times 10^1 \Delta T) - (2.822 \times 10^{-01} \Delta T^2)$
Solar Rating	Ecosun	$G_u = 1.025 \times 10^3 - (1.353 \times 10^1 \Delta T) - (1.353 \times 10^{-01} \Delta T^2)$

Cuadro 4.4: Curvas cuadráticas ajustadas a los valores del calor útil para los calentadores solares planos Ecosun y Heliocol, tanto para el método gráfico como para la curva cuadrática del laboratorio Solar Rating.

ca respecto a la curva de eficiencia instantánea, referente al calentador solar Ecosun, obtenida a partir del método gráfico. Además, es posible apreciar que la ecuación lineal de eficiencia del calentador solar Ecosun (Solar Rating) puede ser considerada como un ajuste lineal a la curva cuadrática del mismo calentador (Solar Rating). Lo anterior resulta falso para el caso particular del calentador solar Heliocol y sus curvas de eficiencia tanto cuadrática como lineal (Florida Solar).

Una vez identificada esta irregularidad con la ecuación del calentador solar plano Heliocol, se decidió calcular una ecuación cuadrática de eficiencia instantánea para este calentador considerando la curva cuadrática del calentador solar plano Ecosun (Solar Rating) y las curvas cuadráticas obtenidas por el método gráfico. Para ello, se fijó el valor de $G=1250$ [W/m^2]. Teniendo este valor en cuenta, se volvieron a expresar las ecuaciones cuadráticas y las coordenadas medidas en función del delta de temperatura (T_i-T_a) [$^{\circ}C$](ecuación 3.2). Estas ecuaciones y coordenadas fueron graficadas para generar un conjunto de valores. A estos valores se les ajustó, una ecuación de segundo grado mediante la librería de numpy. Las ecuaciones que resultaron de estos ajustes se muestran en el cuadro 4.4. Estas ecuaciones ajustadas permiten conocer los coeficientes η_0 y η_1 inmersos tanto en la ecuación 3.2 como en la ecuación 3.1. Acto seguido, las ecuaciones del cuadro 4.4 fueron divididas entre 1250 [W/m^2]. Con lo anterior, se logró calcular la constante inmersa en la ecuación 3.1. De esta forma, fue posible conocer las ecuaciones de eficiencia instantánea de las curvas obtenidas por el método gráfico en función del delta de temperaturas (T_i-T_a) [$^{\circ}C$] y del valor de radiación solar G [W/m^2]. Esta metodología se aplicó a la curva de eficiencia instantánea del calentador solar plano Ecosun proporcionada por el laboratorio Solar Rating and Certification Corporation, con la finalidad de corroborar la exactitud del ajuste

	Calentador	Ecuación de eficiencia
Método gráfico	Ecosun	$\eta = 0.821 - 13.644(\Delta T/G) - 0.08((\Delta T)^2/G)$
Método gráfico	Heliocol	$\eta = 0.779 - 19.283(\Delta T/G) - 0.282((\Delta T)^2/G)$
Solar Rating	Ecosun	$\eta = 0.82 - 13.5264(\Delta T/G) - 0.1353((\Delta T)^2/G)$

Cuadro 4.5: Ecuaciones de eficiencia instantánea de los calentadores solares planos Ecosun y Heliocol, tanto para el método gráfico como para la curva cuadrática del laboratorio Solar Rating.

obtenido por la librería numpy. Las ecuaciones de eficiencia instantánea obtenidas con el ajuste polinómico de esta librería se muestran en el cuadro 4.5. Considerando estos resultados, es posible apreciar que la ecuación de eficiencia instantánea del calentador solar Ecosun para el caso del laboratorio Solar Rating resultó ser exactamente la misma (ver cuadro 3.2), por lo que a partir de esto se consideró confiable el ajuste realizado por la librería numpy. Con esto en cuenta, en este trabajo se asumió que la curva cuadrática de eficiencia instantánea proporcionada por el laboratorio Solar Rating and Certification Corporation representaba la curva más representativa del funcionamiento del calentador solar plano Ecosun. Acto seguido, se calculó el error absoluto y relativo de cada uno de los coeficientes de la ecuación de eficiencia instantánea del calentador solar Ecosun obtenida con el método gráfico respecto a los coeficientes de la ecuación de eficiencia instantánea del calentador solar Ecosun certificada por el laboratorio Solar Rating and Corporation. Los resultados se muestran a continuación:

Coefficiente constante (C_1)

$$\text{Error absoluto} = |0.82 - 0.821| = |-0.01| = 0.001$$

$$\text{Error relativo} = \frac{(0.001 * 100\%)}{0.82} = \frac{0.1}{0.82} = 0.122\%$$

Coefficiente constante del término de primer grado (η_0).

$$\text{Error absoluto} = |-13.5264 + 13.644| = |0.1176| = 0.1176$$

$$\text{Error relativo} = \frac{(0.1176 * 100\%)}{-13.5264} = \frac{11.76}{-13.5264} = -0.869\%$$

Coefficiente constante del término de segundo grado (η_1).

$$\text{Error absoluto} = |-0.1353 + 0.08| = |0.055| = 0.055$$

$$\text{Error relativo} = \frac{(0.055 * 100\%)}{-0.1353} = \frac{5.5}{-0.1353} = -40.65\%$$

Una vez calculados el error absoluto y relativo de cada coeficiente inmerso dentro de la ecuación de eficiencia instantánea del calentador solar plano Ecosun obtenida con el método gráfico respecto a la certificación del mismo calentador, se decidió inferir que estos errores absolutos y relativos eran los mismos que mantenían los coeficientes de la ecuación de eficiencia instantánea del calentador solar plano Heliocol a partir del método gráfico respecto a una curva de eficiencia instantánea representativa para este calentador que fuera calculable. A partir de lo anterior, se calcularon los coeficientes de una curva de eficiencia del calentador solar plano Heliocol a partir de los errores relativos asociados a cada coeficiente inmerso en la ecuación de eficiencia instantánea. Los cálculos y los resultados se muestran a continuación:

Coefficiente constante (C_1)

$$0.779 \rightarrow 100\% + 0.122\%$$

$$\therefore C_1 = \frac{(0.779) * (100\%)}{100.122\%} = 0.778$$

Coefficiente constante del término de primer grado (η_0).

$$-19.283 \rightarrow 100\% - 0.869\%$$

$$\therefore \eta_0 = \frac{(-19.283) * (100\%)}{99.131\%} = -19.452$$

Coefficiente constante del término de segundo grado (η_1).

$$-0.282 \rightarrow 100\% - 40.65\%$$

$$\therefore \eta_1 = \frac{(-0.282) * (100\%)}{59.35\%} = -0.475$$

Con los coeficientes anteriores, se propuso una ecuación de eficiencia instantánea para el calentador solar plano Heliocol y a su vez fue comparada con las ecuaciones cuadráticas de eficiencia instantánea de los calentadores solares planos Ecosun y Heliocol. Al realizar esta comparación, fue evidente notar que el coeficiente constante del término de segundo grado correspondiente a la curva cuadrática de eficiencia instantánea del calentador solar plano Heliocol, proporcionada por el laboratorio Florida Solar Energy Center, está mal reportado dentro de la certificación dado que

al comparar los coeficientes constantes del término de segundo grado en cada una de las ecuaciones cuadráticas disponibles/calculadas, todos los coeficientes comparados resultan ser menores a uno. Con las consideraciones anteriores, se decidió modificar la ecuación cuadrática de eficiencia instantánea del calentador solar plano Heliocol certificada por Florida Solar Energy Center, de la siguiente forma:

Ecuación dentro de la certificación	Ecuación corregida
$\eta = 0.8337 - 18.44$ $(P/G) - 50.69(P^2/G)$	$\eta = 0.8337 - 18.44$ $(P/G) - 0.5069(P^2/G)$

Cuadro 4.6: Corrección del coeficiente constante del término de segundo grado de la ecuación de eficiencia instantánea del calentador solar plano Heliocol reportada en la certificación realizado por Florida Solar Energy Center, en donde $P=(T_i-T_a)$.

Luego de realizar lo anterior, fueron graficadas las curvas cuadráticas de eficiencia instantánea disponibles, propuestas y calculadas en este trabajo con la finalidad de compararlas entre sí. En la figura 4.2 se encuentran cuatro gráficas que permiten visualizar y comparar los resultados obtenidos en esta sección. En la primer gráfica (inciso a) se encuentran las curvas cuadráticas de eficiencia instantánea obtenidas mediante el método gráfico, las curvas de eficiencia instantánea disponibles en las certificaciones de cada calentador solar y la ecuación cuadrática de eficiencia instantánea calculada y propuesta para el calentador solar Heliocol. En este primer gráfico es posible denotar que la curva calculada para el calentador solar Heliocol logra tener congruencia con la comparativa inmersa dentro de la figura 3.1, a diferencia de la ecuación original contenida dentro de la certificación de dicho calentador. Por otro lado, en la gráfica siguiente (inciso b) se encuentran graficadas la curva cuadrática modificada del calentador solar Heliocol y la curva cuadrática de eficiencia del calentador solar Ecosun obtenida directamente de la certificación de este calentador. Al apreciar esta gráfica, podemos darnos cuenta que la ecuación de eficiencia instantánea del calentador Heliocol modificada presenta un comportamiento más parecido a lo que podemos ver en la figura 3.1, exceptuando la ordenada al origen correspondiente a la máxima eficiencia. A partir de lo anterior, se determinó que la curva de eficiencia instantánea contenida en la certificación se encuentra mal reportada en el coeficiente constante asociado al término de segundo grado. En el caso de la tercer gráfica (inciso c), se presenta una comparativa entre las mismas curvas cuadráticas de eficiencia instantánea mencionadas en el primer gráfico (inciso a) con la úni-

ca diferencia de ser modificada la curva de eficiencia instantánea referente al calentador solar Heliocol disponible en su certificación por esta misma curva de eficiencia instantánea corregida en el coeficiente constante del término de segundo grado. Es evidente denotar que en esta gráfica las curvas de eficiencia instantáneas del calentador solar Heliocol adquieren un comportamiento similar. Por último, en el último gráfico (inciso d) es posible comparar las curvas de eficiencia obtenidas a partir del método gráfico junto con aquellas obtenidas de las certificaciones de cada calentador, contemplando la modificación realizada a la curva del calentador solar Heliocol. En este gráfico se puede apreciar que la similitud entre las curvas cuadráticas de eficiencia para el caso del calentador solar Heliocol resultaron ser más congruentes entre sí, a diferencia de lo ocurrido en el inciso *d* de la figura 4.1.

Teniendo estos resultados se decidió utilizar las curvas cuadráticas de eficiencia instantánea de ambos calentadores para implementarlas dentro del programa de simulación del calentamiento de agua de mar con tecnología termosolar. Para el caso del calentador solar Ecosun se escogió la curva proporcionada por Solar Rating and Certification Corporation, mientras que para el calentador solar Heliocol se optó por utilizar la curva certificada por Florida Solar Energy Center contemplando la modificación del coeficiente constante del término de segundo grado.

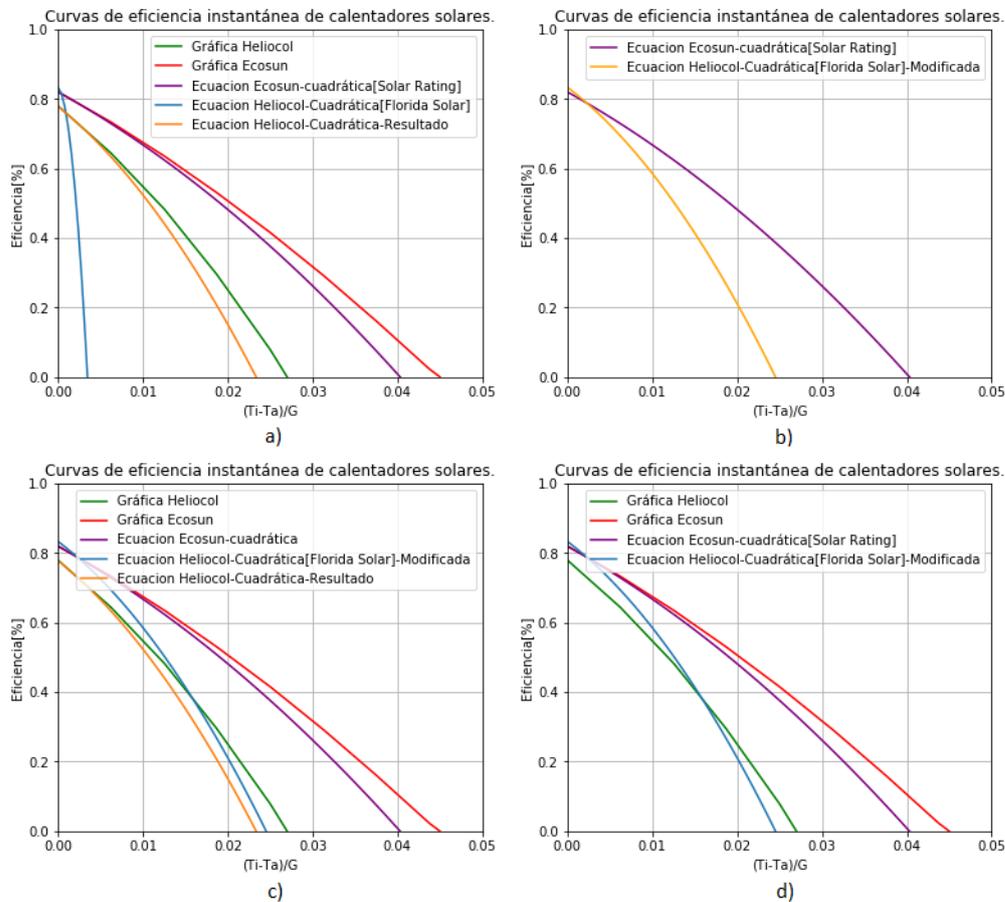


Figura 4.2: Comparación gráfica de las curvas cuadráticas de eficiencia instantánea de los calentadores solares planos Ecosun y Heliocol. a) Comparativa entre las curvas certificadas de los calentadores Ecosun y Heliocol, las curvas obtenidas por el método gráfico y la curva calculada para el calentador solar Heliocol. b) Comparación entre las curvas de eficiencia obtenidas de las certificaciones para los calentadores Ecosun y Heliocol, considerando la modificación propuesta para el calentador Heliocol. c) Comparación entre las curvas del método gráfico, la calculada para el calentador Heliocol y las curvas de eficiencia obtenidas de las certificaciones para los calentadores Ecosun y Heliocol, considerando la modificación para este último. d) Comparación entre las curvas obtenidas a partir del método gráfico y las ecuaciones cuadráticas del calentador Ecosun y Heliocol. Esta última con su modificación pertinente.

4.2. Clusterización de los datos oceanográficos.

En esta sección se muestran los resultados obtenidos a partir de los dos criterios de clasificación aplicados a los distintos archivos oceanográficos tratados en el presente trabajo. Cabe recalcar que de acuerdo con los resultados de las distintas clasificaciones, se optó por computar visualizaciones que ayudaran a la interpretación de la información clasificada permitiendo su comparación entre sí.

Como se mencionó durante este trabajo, la asignación de cada cluster, en la información de interés, resulta aleatoria en cada iteración del método de agrupamiento. Esto repercute en el orden de cada uno de los clusters ajustados. Para identificar mejor esto, se decidió asignar un color para cada número de cluster. Este código de colores se muestra en el cuadro 4.7. En todas las iteraciones del algoritmo de clusterización K-means realizadas en este trabajo fue contemplada esta clasificación.

Color	No. Cluster
Rojo	0
Verde	1
Morado	2

Cuadro 4.7: Asignación de colores para cada cluster.

En primer instancia se decidió empatar el archivo de temperatura superficial del mar del servidor HYCOM con el archivo de salinidad superficial del mar de la NOAA debido a que este trabajo inició contemplando estos mismos. Durante el proceso de unión se buscó emparejar los puntos geográficos disponibles dentro del mallado correspondiente a cada estudio, sin embargo, el resultado de emparejamiento repercutió en la pérdida de puntos sobre el mar cercanos a la costa con información oceanográfica debido a la gran diferencia de resolución espacial entre ambos estudios ($1/12^\circ$ y $1/4^\circ$). Es por ello que se decidió descargar datos de salinidad superficial del mar del servidor HYCOM para asegurar un mejor emparejamiento espacial. El resultado de este procedimiento resultó en un archivo de datos oceanográficos con la mejor resolución espacial ($1/12^\circ$), con una resolución temporal adecuada (datos diarios) dentro de una ventana temporal considerable (2013-2018). Posteriormente, con los datos del estudio regional climatológico del Pacífico nororiental de la NOAA se buscó comparar los resultados obtenidos a partir de la clusterización de datos, principalmente porque los archivos contenidos en este estudio se encuentran previamente trabajados y respaldados por la NOAA. La razón por la

cual no fue utilizada esta información oceanográfica se debe a que su resolución espacial es menor ($1/4^\circ$), su resolución temporal es mensual y su ventana temporal es de 1995-2004 y del 2005 al 2012.

En las secciones que se muestran a continuación se discuten los resultados del proceso de clusterización aplicado a los archivos que resultaron de los emparejamientos mencionados anteriormente y del estudio regional climatológico del Pacífico nororiental de la NOAA. De manera particular, en el segundo criterio de clusterización se contemplaron algunos archivos individuales de ambas variables oceanográficas.

4.2.1. Primer criterio de clusterización.

Este criterio fue aplicado, como se mencionó en la metodología, únicamente a los estudios que cuentan con datos de temperatura y salinidad superficial dentro del mismo archivo. Los gráficos realizados para facilitar el manejo e interpretación de los resultados de este criterio de clusterización fueron: Curva codo, Gráfico de Temperatura y Salinidad, Ubicación geográfica de los clusters e Histograma de frecuencia de cada uno de los clusters ajustados. Los resultados se muestran a continuación:

Curvas codo

En la figura 4.3 se puede apreciar que el número k de clusters óptimos por ajustar a cada archivo analizado, resultó ser 3. Esto se deduce, de acuerdo con lo estipulado en los fundamentos teóricos. Podemos percatarnos que el parámetro *score* calculado a partir del ajuste de 3 clusters resultó ser el cambio de pendiente descrito en la teoría como aquel número de clusters ajustados a partir del cual el parámetro *score* disminuye en una menor proporción para el caso de un mayor número de clusters ajustados. Debido a esto, fueron ajustados 3 clusters a los datos oceanográficos de archivo contemplado en esta sección. Por otro lado, en esta figura se logra apreciar en el inciso *d* sólo se ajustaron 6 clusters en total ya que se contempló el tiempo de cómputo e integridad del equipo utilizado en ese momento. A continuación, se muestran los histogramas de cada cluster ajustado a cada conjunto de datos.

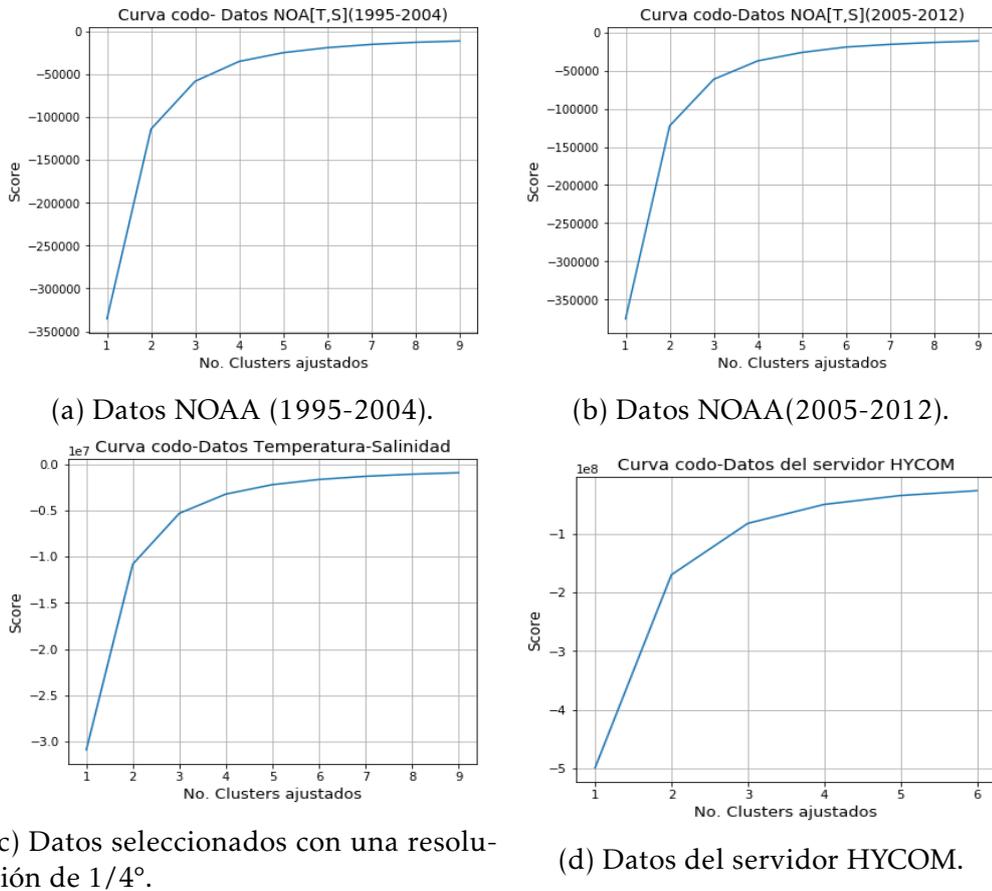


Figura 4.3: Curvas codo contemplando el ajuste desde 1 cluster hasta 9 o 6 clusters en cada archivo oceanográfico.

Histogramas

Los histogramas de frecuencia desplegados en las figuras A.1,A.2,A.3 y A.4, disponibles en la sección de apéndices de este trabajo, contienen cada uno de los tres clusteres ajustados a cada archivo oceanográfico. Cada figura está constituida por dos columnas, en donde se encuentran ordenados cada uno de los clusteres ajustados siguiendo un orden de menor a mayor contemplando los valores de temperatura o salinidad de cada cluster. Cada columna es independiente del orden adquirido en la otra columna ya que únicamente considera los valores de la variable oceanográfica que le corresponde. En la parte inferior de cada figura, se muestran, en un solo gráfico, los histogramas de cada cluster para cada variable oceanográfica.

Al comparar el agrupamiento obtenido en cada uno de los archivos, contemplando los valores de temperatura y salinidad, es posible apreciar

que en todos los archivos analizados existen similitudes en su clusterización independientemente de la resolución de los mismos. La mayor similitud entre todos los resultados obtenidos, radica en el agrupamiento obtenido tanto en los valores de temperatura como en los de salinidad. En primer lugar, todos los clusteres que resultaron de la clasificación de todos los archivos analizados sostienen grupos bien definidos en sus valores de temperatura, con intervalos prácticamente únicos. Esto se puede apreciar en todos los gráficos, inmersos en la parte inferior izquierda de cada figura que permiten la comparación entre los histogramas de temperatura de cada cluster. Lo anterior se puede corroborar mediante los valores mínimos y máximos de cada grupo de temperatura clasificado para cada conjunto de datos. Otra similitud entre todos los clusteres considerando los valores de temperatura, radica en que el valor de la varianza siempre resultó mayor en los clusteres con el rango de temperaturas más altas. Por otro lado, si consideramos los valores de salinidad para cada conjunto de clusteres obtenidos en el análisis de cada archivo, en todos los casos se cumple que existen intersecciones en el rango de valores de salinidad entre los tres grupos ajustados. De igual manera que en el caso anterior, es posible corroborar este fenómeno, al visualizar cada uno de los gráficos que muestran los histogramas de todos los clusteres ajustados en cada archivo analizado. Otra forma de comprobar lo anteriormente expuesto, es mediante los valores máximos y mínimos de salinidad de cada cluster obtenido en cada caso. Es imprescindible señalar que a través de los histogramas, disponibles en este procedimiento, es posible indicar que la temperatura del agua superficial del mar abarca un rango de valores mayor ($13^{\circ}C \leq T \leq 35^{\circ}C$) en comparación con aquel que es sustentado por los valores de salinidad superficial del mar ($33UPS \leq S \leq 36.5UPS$). En congruencia con lo anterior, es posible explicar la gran diferencia en magnitud entre los valores de varianza obtenidos para cada variable oceanográfica, ya que los valores obtenidos para la temperatura resultaron ser mucho mayores a los asociados a la salinidad superficial del mar. Por último, se llegó a identificar que la distribución de los datos tanto de los clusteres de temperatura como de salinidad mantienen gran similitud respecto a sus análogos en cada uno de los archivos analizados.

Gráficos de temperatura y salinidad.

En la figura 4.4 se encuentran los gráficos que permiten conocer la relación entre la temperatura y la salinidad superficial del mar para cada dato dentro de cada archivo oceanográfico. De manera adicional, este gráfico permite conocer el agrupamiento derivado de la clusterización de cada

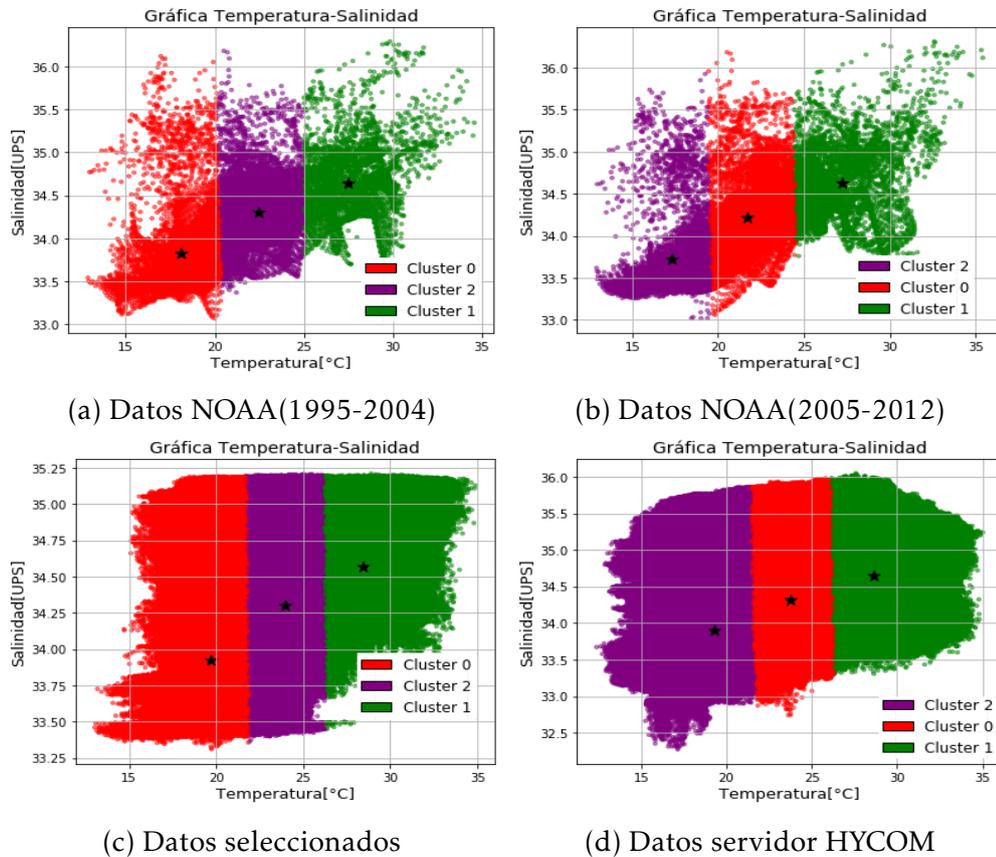


Figura 4.4: Gráfico de temperatura contra salinidad de cada conjunto de datos.

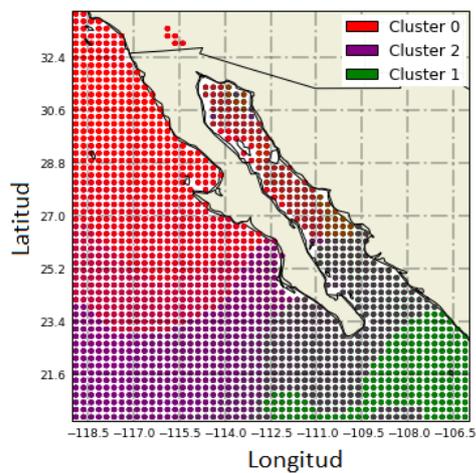
uno de los estudios analizados en este trabajo.

En esta figura podemos relacionar lo tratado con los resultados obtenidos en los histogramas de frecuencia de cada archivo oceanográfico. En primer instancia, se vuelve evidente que el agrupamiento obtenido en cada conjunto de datos presenta una clasificación prioritaria en la temperatura ($15-22^{\circ}\text{C}$, $23-26^{\circ}\text{C}$, $27-35^{\circ}\text{C}$) ya que cada grupo sostiene un rango de temperaturas determinado con un rango de valores de salinidad similares ($33-36\text{UPS}$). De esto último, podemos apreciar que el intervalo de salinidad de cada cluster se vuelve más estrecho al aumentar la magnitud de las temperaturas asociadas a cada grupo. Lo anterior puede ser relacionado con la ligera modificación en la media obtenida en cada cluster de salinidad para cada conjunto de datos. Por último, es a través de estos cuatro gráficos que se hace evidente la dispersión de algunos datos contenidos en los estudios regionales del pacífico nororiental de la NOAA

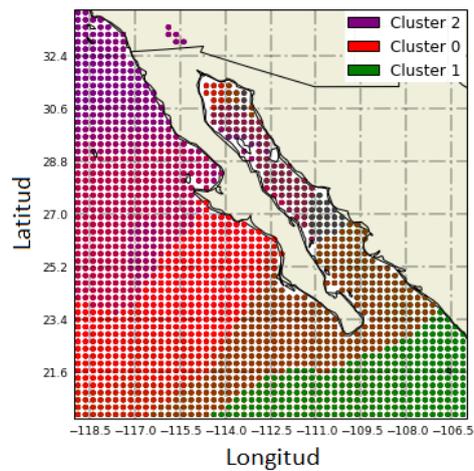
, además de que estos mismos datos no logran representar completamente la distribución de la información oceanográfica para esa región en comparación con lo obtenido en los otros dos estudios(ver gráficos 4.4c y 4.4d).

Distribución espacial.

Ubicación geográfica de los clusters Ubicación geográfica de los clusters



(a) Datos NOAA(1995-2004)



(b) Datos NOAA(2015-2012)

Figura 4.5: Ubicación de los clusters ajustados a los archivos de la NOAA implementando el primer criterio.

Teniendo en cuenta que los resultados de la clusterización de cada uno de los archivos trabajados, fueron clasificados principalmente en grupos de temperaturas, entonces podemos inferir que la distribución espacial de estos grupos debe de corresponder con la distribución de la temperatura superficial del mar en el noroeste de México. En las figuras 4.5 y 4.6 se pueden apreciar los de mapas que permiten conocer la distribución espacial de cada uno de los clusteres ajustados a cada uno de los archivos estudiados con el presente criterio. De manera general, es posible notar cierta congruencia en la distribución obtenida a partir de los distintos estudios, ya que aquellos clusteres con las temperaturas más frías se concentran en la esquina superior izquierda de cada mapa, los clusteres con las temperaturas intermedias se extienden en la parte central izquierda del mapa y por último aquellos clusteres con las temperaturas más altas se distribuyen en la parte inferior derecha del mapa. Esta distribución espacial de temperaturas, corresponde con lo que sucede en la realidad. Las aguas

frías que llegan a las costas del noroeste de México son transportadas por la corriente de California, estas aguas se recombinan con el agua de mar proveniente de las zonas tropicales del pacífico mexicano, mismas que se caracterizan por ser más cálidas. Por otro lado, los mapas mostrados en

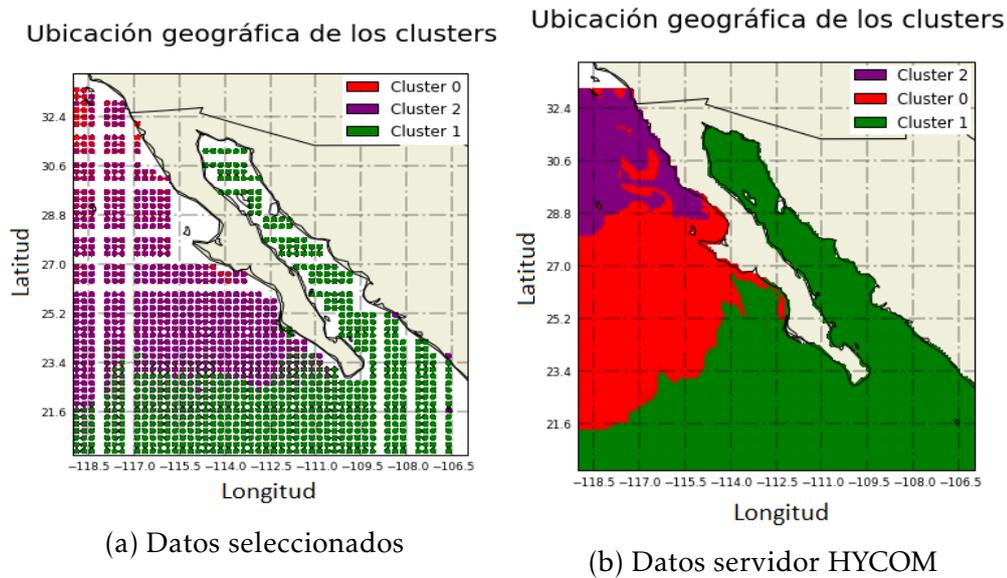


Figura 4.6: Ubicación de los clusters ajustados a los datos seleccionados y a los datos descargados del servidor HYCOM.

la figura 4.5 cuentan con una buena resolución cerca de la costa, sin embargo, la poca cantidad de datos contenidos en este estudio, respecto a los estudios mostrados en la figura 4.6, provocan una aglomeración de distintos clusteres en el Golfo de California, lo que provoca que visualmente se logren apreciar puntos con un color distinto al utilizado en la clasificación. En el caso de los mapas desplegados en la figura 4.6, es posible identificar que en el golfo de California y en la zona más cercana a la región tropical se encuentra definido el cluster de mayor temperatura, excepto por algunos puntos en el mapa 4.6a. Cabe señalar que en este último gráfico, el cluster de menor temperatura se encuentra definido por pocos puntos a diferencia de lo estipulado en los mapas de la figura 4.5. Además, es imprescindible señalar que este conjunto de datos oceanográficos cuenta con una mala resolución cerca de la costa y coordenadas faltantes sobre el mar. Finalmente, en el mapa 4.6b se muestra una distribución de clusteres similar a la ilustrada en el mapa 4.6a, con la enorme diferencia de ser un estudio con buena resolución tanto de datos espaciales como de punto cercanos a la costa. Una vez comparados los cuatro mapas, se puede infe-

rir que la distribución espacial de los clusteres más representativa de los datos oceanográficos del mar resulta ser la ilustrada en el mapa 4.6b. Ya que cuenta con una mayor cantidad de datos disponibles en comparación con los datos del estudio regional de la NOAA y resulta tener la mayor resolución espacial de todos los datos analizados. Además, el agrupamiento obtenido en estos datos sostiene grandes similitudes a las resultantes en el resto de conjunto de datos agrupados.

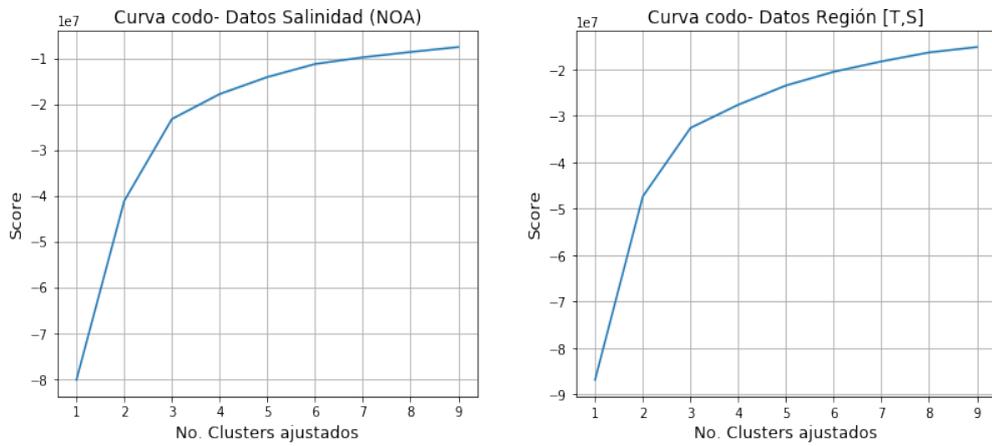
4.2.2. Segundo criterio de clusterización.

Como fue mencionado en la metodología, este criterio de clusterización contempla la posición geográfica de cada punto, así como las variables oceanográficas contenidas en cada archivo. En este criterio, fueron contemplados los siguientes archivos: Datos oceanográficos seleccionados para el noroeste de México, archivo de temperatura superficial del mar descargado del servidor HYCOM, archivo de salinidad superficial del mar descargado del servidor HYCOM, datos de salinidad superficial del mar del estudio mundial de la NOAA (contemplando únicamente el noroeste de México), archivo con los datos de temperatura y salinidad superficial del mar que resultó de la unión de los archivos descargados del servidor HYCOM y los dos archivos referentes al estudio regional climatológico del pacífico nororiental de la NOAA.

Al igual que en el criterio anterior, se elaboraron distintos medios gráficos que permiten la visualización de los resultados obtenidos, como son: Curvas codo, histogramas de frecuencia de los clusteres ajustados a cada archivo, gráficos de temperatura contra salinidad (sólo para aquellos a los que aplica) y mapas que ilustran la distribución espacial de los clusteres ajustados. Los resultados se muestran a continuación:

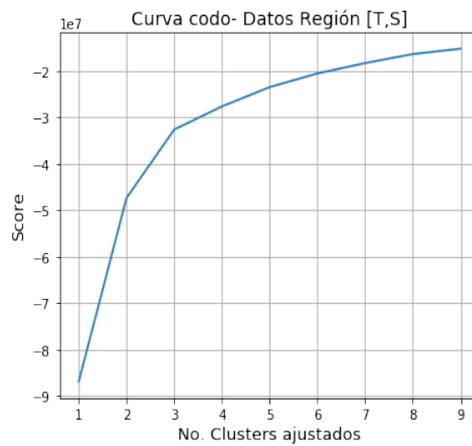
Curvas codo.

En la figuras 4.8,4.9 y 4.7 se muestran las curvas codo de cada archivo analizado con el segundo criterio. En los gráficos 4.9b,4.9a se ajustaron únicamente 6 clusteres ya que se contempló el tiempo de cómputo e integridad del equipo utilizado. De manera similar a lo ocurrido en el criterio anterior, el número k de clusteres óptimos por ajustar a cada archivo analizado resultó ser 3. A partir de esto, cada archivo fue agrupado en 3 clusteres.



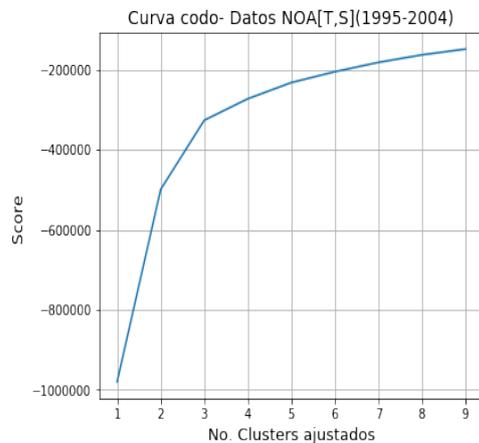
(a) Datos de salinidad mundial(NOAA).

(b) Datos seleccionados.

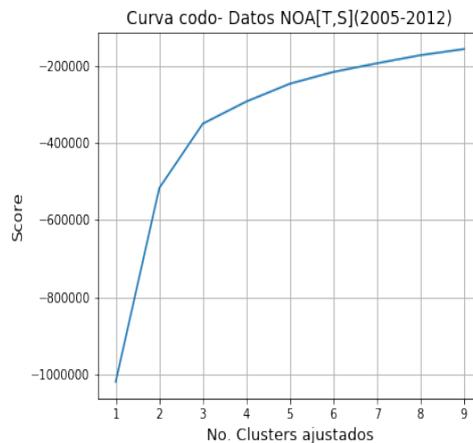


(c) Datos de temperatura y salinidad del servidor HYCOM.

Figura 4.7: Curvas codo contemplando el ajuste desde 1 cluster hasta 9 o 6 clusteres en cada archivo oceanográfico.

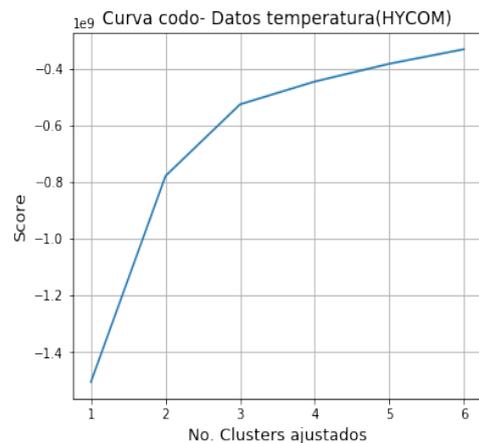


(a) Datos NOAA (1995-2004).

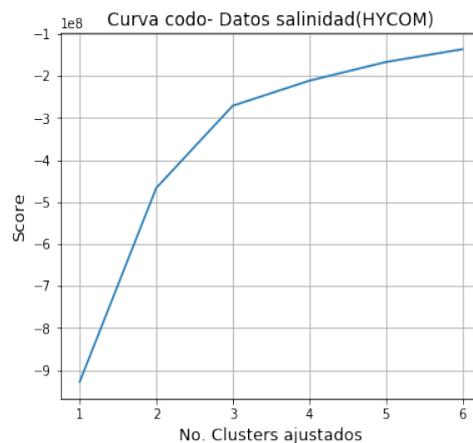


(b) Datos NOAA(2015-2004).

Figura 4.8: Curvas codo contemplando el ajuste desde 1 cluster hasta 9 clusters en cada archivo oceanográfico de la NOAA.



(a) Datos de temperatura HYCOM.



(b) Datos de salinidad HYCOM.

Figura 4.9: Curvas codo contemplando el ajuste desde 1 cluster hasta 6 clusters en cada archivo oceanográfico del servidor HYCOM.

A continuación se analizan los histogramas de cada uno de los clusters ajustados para cada uno de los archivos tratados con este criterio.

Histogramas de frecuencia.

En las figuras A.5-A.11, disponibles en el apéndice de este trabajo, se encuentran graficados los histogramas del conjunto de clusters ajusta-

dos a cada archivo analizado. De forma general, es posible denotar que el agrupamiento obtenido en la variable oceanográfica de salinidad superficial del mar, para aquellos archivos que cuentan con ella, resultaron tener prácticamente el mismo rango de valores que se obtuvieron en el primer criterio de clusterización ($33UPS \leq S \leq 36UPS$). Además, es posible recalcar que la distribución de los datos de salinidad asociados a cada cluster, mantienen una gran similitud con la distribución de los clusters obtenidos en el primer criterio. Lo anterior se corrobora al comparar los parámetros de tendencia central de cada cluster con los obtenidos en el criterio anterior. Por otro lado, al revisar la clasificación obtenida en la variable oceanográfica de temperatura superficial del mar, resulta evidente que el agrupamiento obtenido en los clusters del primer criterio es completamente diferente ($14^{\circ}C \leq T \leq 25^{\circ}C$, $18^{\circ}C \leq T \leq 28^{\circ}C$, $20^{\circ}C \leq T \leq 35^{\circ}C$). Lo anterior, se puede visualizar en el gráfico comparativo entre los clusters ajustados a los datos de temperatura de cada archivo oceanográfico. El agrupamiento general, en todos los archivos analizados con esta variable, sostienen intersecciones entre sus rangos de valores, lo que implica que el agrupamiento de los datos no tiene una discretización prioritaria en los valores de temperatura. Además, es posible inferir que al contemplar la posición geográfica de cada dato, los grupos obtenidos tienen una mejor distribución espacial. La similitud entre los datos clasificados en cada cluster obtenido se puede verificar al comparar sus parámetros de tendencia central. Esto resulta válido en ambas variables oceanográficas independientemente de la resolución de los estudios.

Gráficos de temperatura y salinidad.

En la figura 4.10 se pueden apreciar los gráficos comparativos entre los datos de temperatura y salinidad superficial para cada archivo analizado con ambas variables disponibles en su serie temporal. En estos gráficos se vuelve evidente la superposición de cada cluster obtenido con este criterio. En el caso de los gráficos 4.10c y 4.10d la intercalación de cada grupo se puede apreciar en mayor medida, gracias a que los centroides de cada cluster nos permiten inferir la ubicación de cada cluster. Además, gracias a los gráficos 4.10a y 4.10b es posible conceptualizar el agrupamiento de los datos, ya que aunque cuentan con pocos datos, la distribución de los clusters de estos archivos resultan ser similares a los obtenidos en los archivos con mayor resolución (ver histogramas de frecuencias A.6-A.11). Cabe señalar que la anteposición de los clusters, para estos dos archivos no es tan contundente comparada con los otros dos gráficos restantes. Debido a que, a través de estos gráficos, se vuelve evidente el hecho de que

cada cluster contiene un mayor rango de valores de temperaturas, lo que explica la intersección entre los distintos clusteres, el aumento en el valor de la desviación estándar de los datos de temperatura contenidos en cada cluster respecto a los valores de temperatura clasificados contemplando el primer criterio y que además, concuerda con la intuición de que al contemplar la ubicación geográfica dentro del proceso de clusterización, los distintos grupos mantendrán valores de temperatura similares.

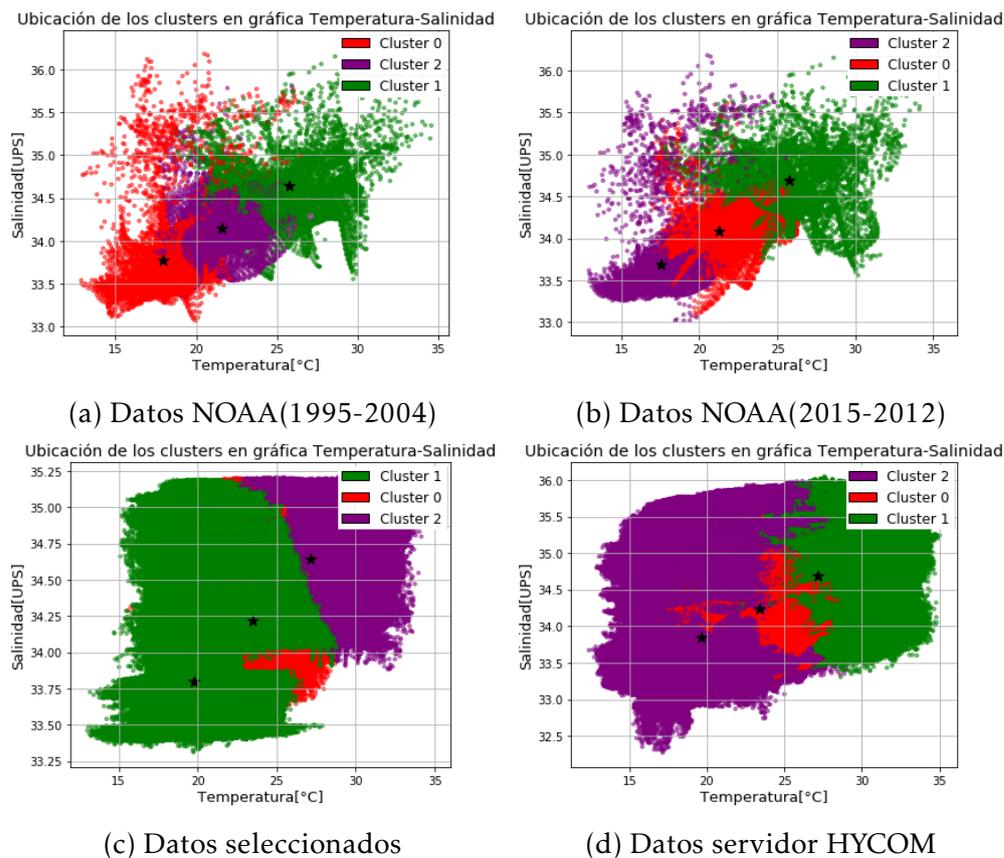
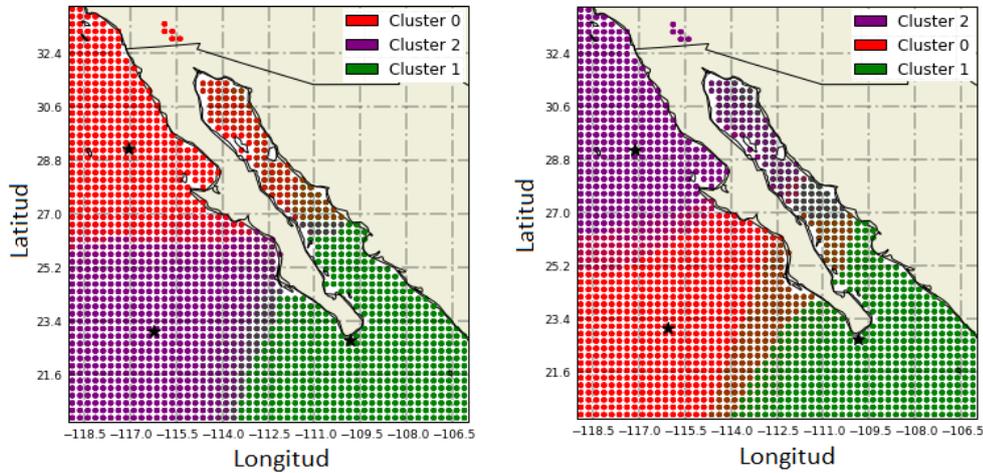


Figura 4.10: Gráfico de temperatura contra salinidad de cada conjunto de datos.

Distribución espacial.

En las figuras 4.11, 4.12 y 4.13 se ilustra la ubicación espacial de cada uno de los clusteres ajustados a cada archivo analizado. Con estas figuras, se puede resaltar la similitud de distribución de los clusteres obtenidos con el primer criterio y con el segundo criterio. La clasificación obtenida con el presente criterio tanto para los dos estudios regionales de la NOAA,

Ubicación geográfica de los clusters Ubicación geográfica de los clusters



(a) Datos NOAA(1995-2004)

(b) Datos NOAA(2015-2012)

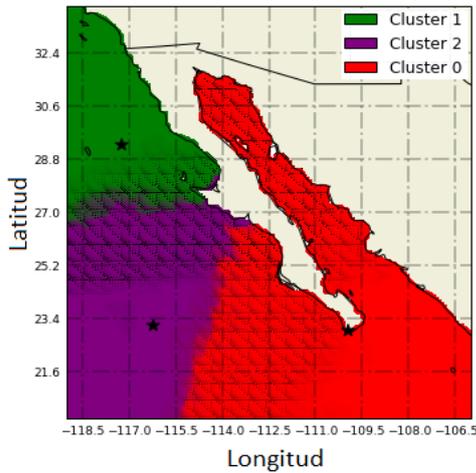
Figura 4.11: Ubicación de los clusteres ajustados a los archivos de la NOAA implementando el primer criterio.

como para los archivos oceanográficos que sólo cuentan con datos de salinidad superficial (figuras 4.11a,4.11b,4.12b y 4.13), sostienen la característica de contar con cierta sección del Golfo de California clusterizada. Aunado a esto, es preciso recalcar que los clusteres que se encuentran visualmente mejor delimitados corresponden a los estudios con una mayor cantidad de datos disponibles y aquellos archivos con una menor resolución espacial presentan la problemática de cierta sobreposición de algunos colores en los límites de cada grupo y en puntos cercanos a la costa.

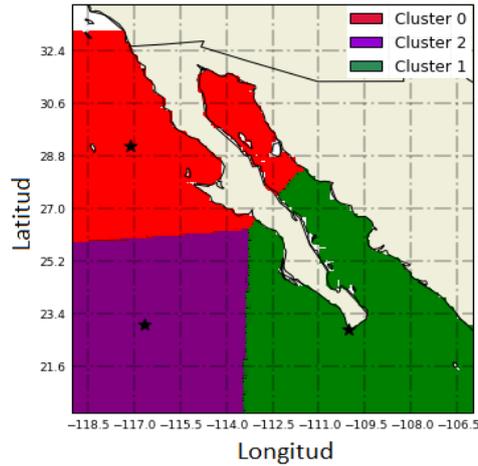
Por otro lado, si analizamos la distribución espacial de los cluster obtenidos para los datos de temperatura superficial de HYCOM, para los datos seleccionados referentes al noroeste de México y para los datos que resultaron de la unión de los archivos de temperatura y salinidad descargados del servidor HYCOM (figuras 4.12a,4.12c y 4.12d); esta distribución espacial mantiene una mayor similitud a la distribución espacial obtenida con el primer criterio en los archivos oceanográficos de temperatura superficial del mar y de los datos seleccionados(figura 4.6). En donde el Golfo de California forma parte del cluster asociado a los valores de temperatura más cálidos. Cabe resaltar que los datos de temperatura superficial del mar, descargados del servidor HYCOM, adquirieron la misma distribución espacial determinada para los archivos oceanográficos seleccionados y para los datos que resultaron de la unión de los archivos descargados

del servidor HYCOM. La distribución espacial de los datos anteriores resultó distinta de la adquirida por los datos de los estudios regionales de la NOAA(figura 4.11) a pesar de que contienen las variables oceanográficas de temperatura y salinidad superficial.

Ubicación geográfica de los clusters Ubicación geográfica de los clusters

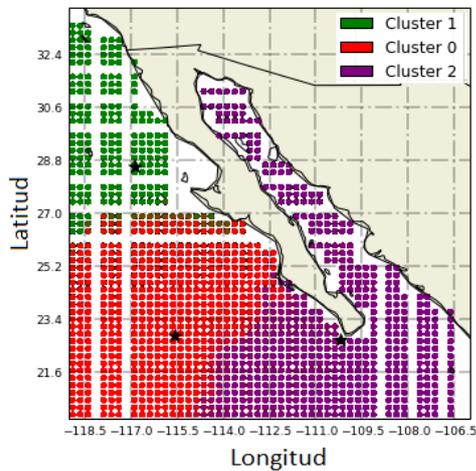


(a) Datos temperatura HYCOM

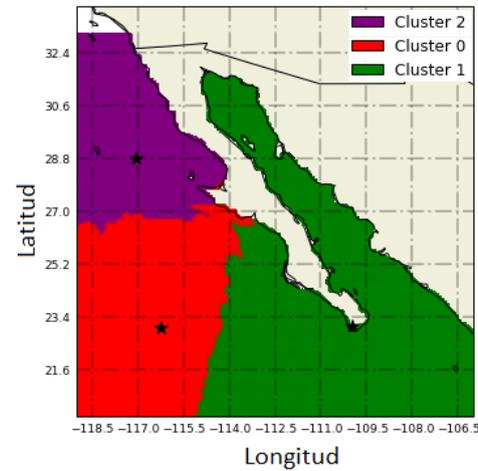


(b) Datos salinidad HYCOM

Ubicación geográfica de los clusters Ubicación geográfica de los clusters



(c) Datos seleccionados



(d) Datos unidos HYCOM

Figura 4.12: Ubicación de los clusteres ajustados a los datos seleccionados y a los datos descargados del servidor HYCOM.

Con estos resultados se optó por determinar que el mejor criterio para clasificar estos datos, resulta ser el segundo, debido a que al contemplar

la posición geográfica en el proceso de clusterización, cada grupo clasificado resguarda valores de temperatura más congruentes a lo sucedido en la realidad. Lo anterior es fundamentado en el hecho de que cada grupo adquiere rangos de temperaturas similares dado que la temperatura del mar resulta ser similar en regiones cercanas a lo largo del año. Esto se podría corroborar al contemplar el eje temporal dentro del criterio de clusterización. Además, este segundo criterio, logra rescatar el fenómeno de distribución de temperatura superficial del mar. Teniendo un grupo de menor, intermedias y mayores temperaturas.

Ubicación geográfica de los clusters

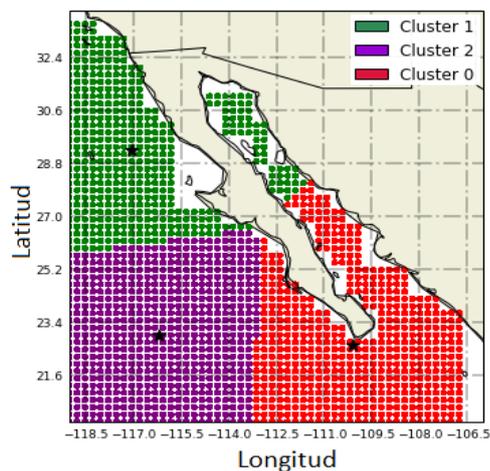


Figura 4.13: Ubicación de los clusters ajustados a los datos de salinidad superficial del mar del estudio mundial de la NOAA.

De los resultados anteriores, se decidió elegir el estudio que resulta de la unión de los datos de temperatura y salinidad superficial del mar descargados del servidor HYCOM para ser contemplado dentro de los cálculos de las propiedades de densidad y calor específico del agua de mar, y así poder utilizar el resultado de estos cálculos en el programa de simulación del calentamiento superficial del mar mediante el uso de calentadores solares planos.

4.3. Mapas del número de días al año de cada cluster.

El programa mencionado en la metodología referente al cálculo del número de días al año en que cada uno de los clusteres fue ejecutado para todos y cada uno de los datos disponibles en el presente trabajo con la finalidad de prevenir cualquier resultado obtenido en la sección anterior. Sin embargo, como fue mencionado en el resultado anterior, en este apartado únicamente se muestran los mapas que ilustran el número de días al año en los que cada uno de los clusteres se presenta para cada una de las coordenadas contenidas dentro de los datos que resultaron de la unión de los archivos de temperatura y salinidad superficial del mar descargados del servidor HYCOM. Por último, se le recuerda al lector que la serie temporal de los datos anteriormente mencionados se extiende desde el 21/Agosto/2013 hasta el 24/Noviembre/2018. A partir de lo anterior, se decidió omitir los mapas correspondientes a los años incompletos (2013 y 2018), ya que se consideró competente el realizar la comparación entre los distintos resultados considerando el mismo periodo de tiempo, es decir, un año completo. En las figuras 4.15, 4.16 y 4.14 se pueden apreciar los mapas de cada uno de los clusteres ajustados respecto a cada año completo dentro de la serie temporal del estudio en cuestión. El orden de las imágenes va de menor a mayor considerando la media de cada uno de los clusteres referentes a su valor de temperatura superficial del mar.

Con estos mapas, es posible identificar aquellas playas ubicadas en el noroeste de México que presentan un mismo cluster a lo largo de todo el año. Como es el caso de las costas ubicadas hacia el oeste del Estado de Baja California respecto al cluster 3, que corresponde al cluster de menores temperaturas. De igual manera, esto ocurre en las costas de Sinaloa, parte de las costas de Sonora y ciertas costas en el sur de Baja California Sur, referente al cluster 2, cuyos valores de temperaturas se caracterizan por ser los más cálidos dentro de este estudio. Sin embargo, si consideramos el cluster de temperaturas intermedias, sucede que no existe ninguna costa de nuestro territorio nacional que presenten este cluster a lo largo de todo el año. Otro caso similar a lo ocurrido con este cluster, se presenta en las costas de Baja California y Sonora correspondientes al Golfo de California, en donde podemos apreciar una clara intersección entre los clusteres de mayores y menores temperaturas. Con lo anterior queda, claro que en la parte norte de este golfo predomina el cluster de bajas temperaturas a lo largo del año, mientras que en su región sur predomina el cluster de mayores temperaturas.

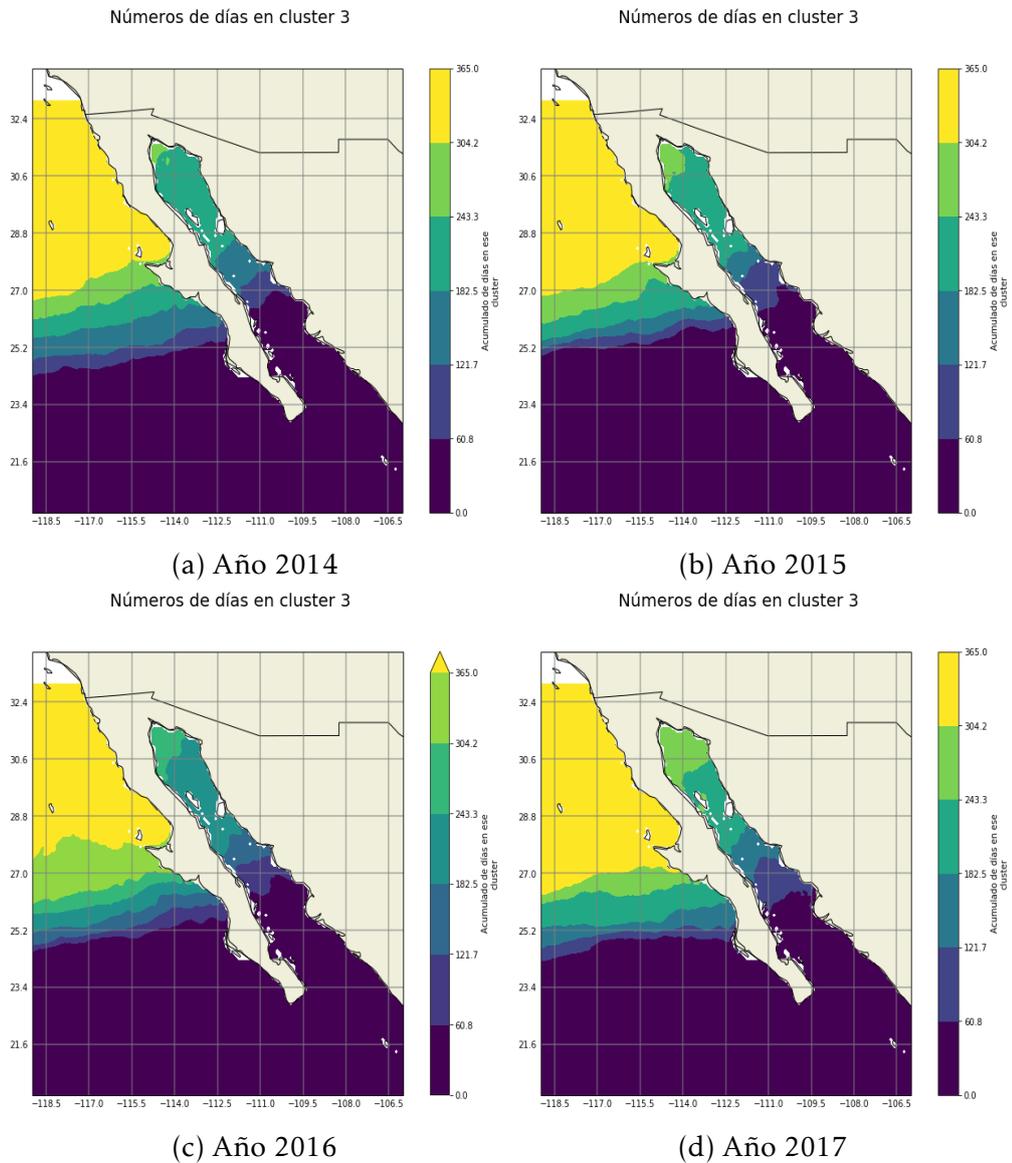


Figura 4.14: Mapas ilustrativos que permiten conocer el número de días en los que una coordenada dentro de la unión de los datos HYCOM presentan el cluster 3

Teniendo en cuenta lo ocurrido en el Golfo de California, es posible denotar que esta región al sostener una intersección de dos clusteres repercute en la superposición de los mismos en la visualización de su distribución espacial, discutida en la sección anterior, lo que limita la apreciación espacial de los clusteres. Cuestión que resulta falsa en la clusterización obtenida en los archivos que contienen como dato oceanográfico único a la

4.3. MAPAS DEL NÚMERO DE DÍAS AL AÑO DE CADA CLUSTER. 155

salinidad superficial del mar. Es por ello que al considerar lo enunciado anteriormente, para poder ubicar la extensión única de cada uno de los cluster obtenidos en este trabajo, resultaría más conveniente el representarlos en mapas individuales.

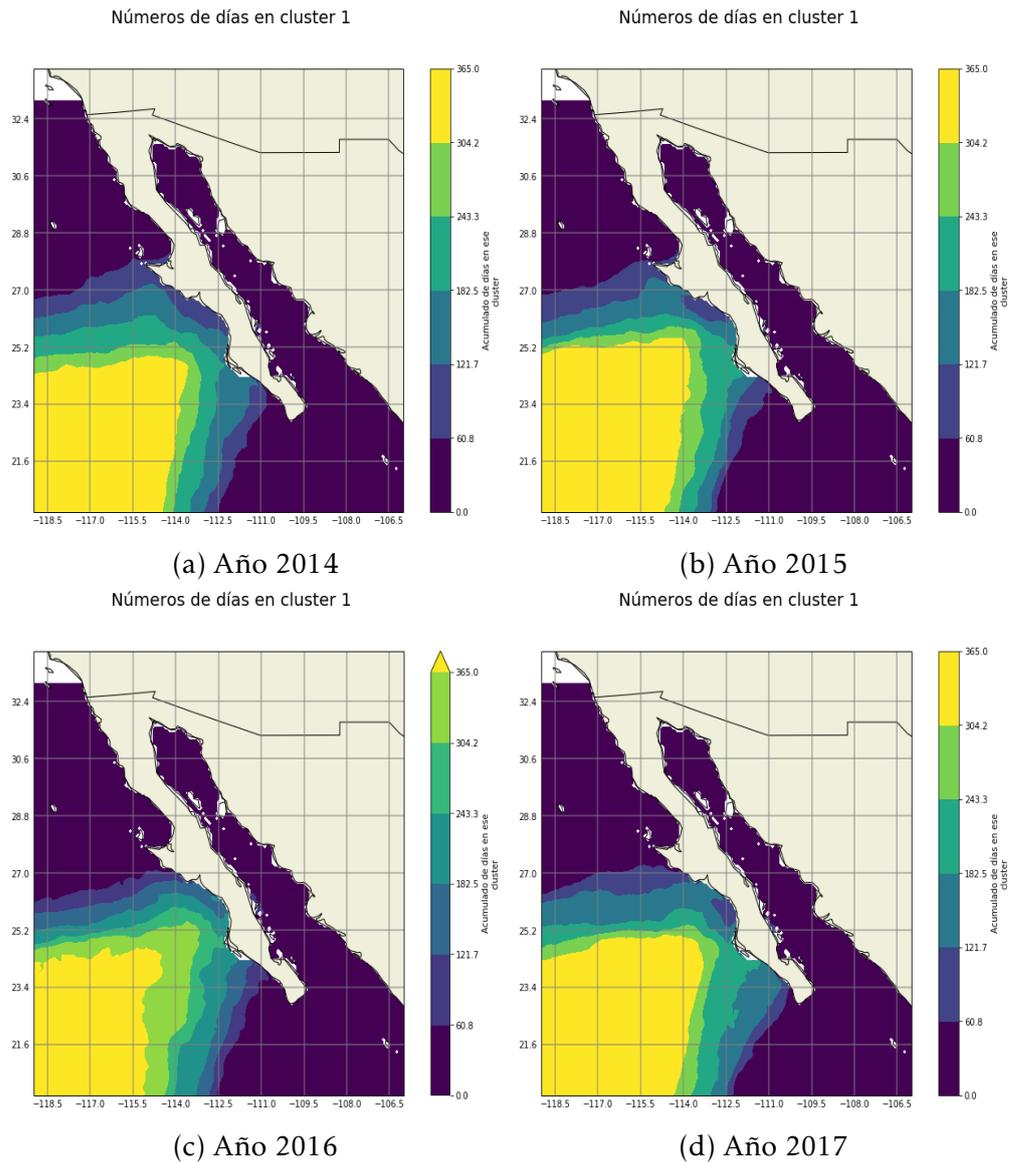


Figura 4.15: Mapas ilustrativos que permiten conocer el número de días en los que una coordenada dentro de la unión de los datos HYCOM presentan el cluster 1

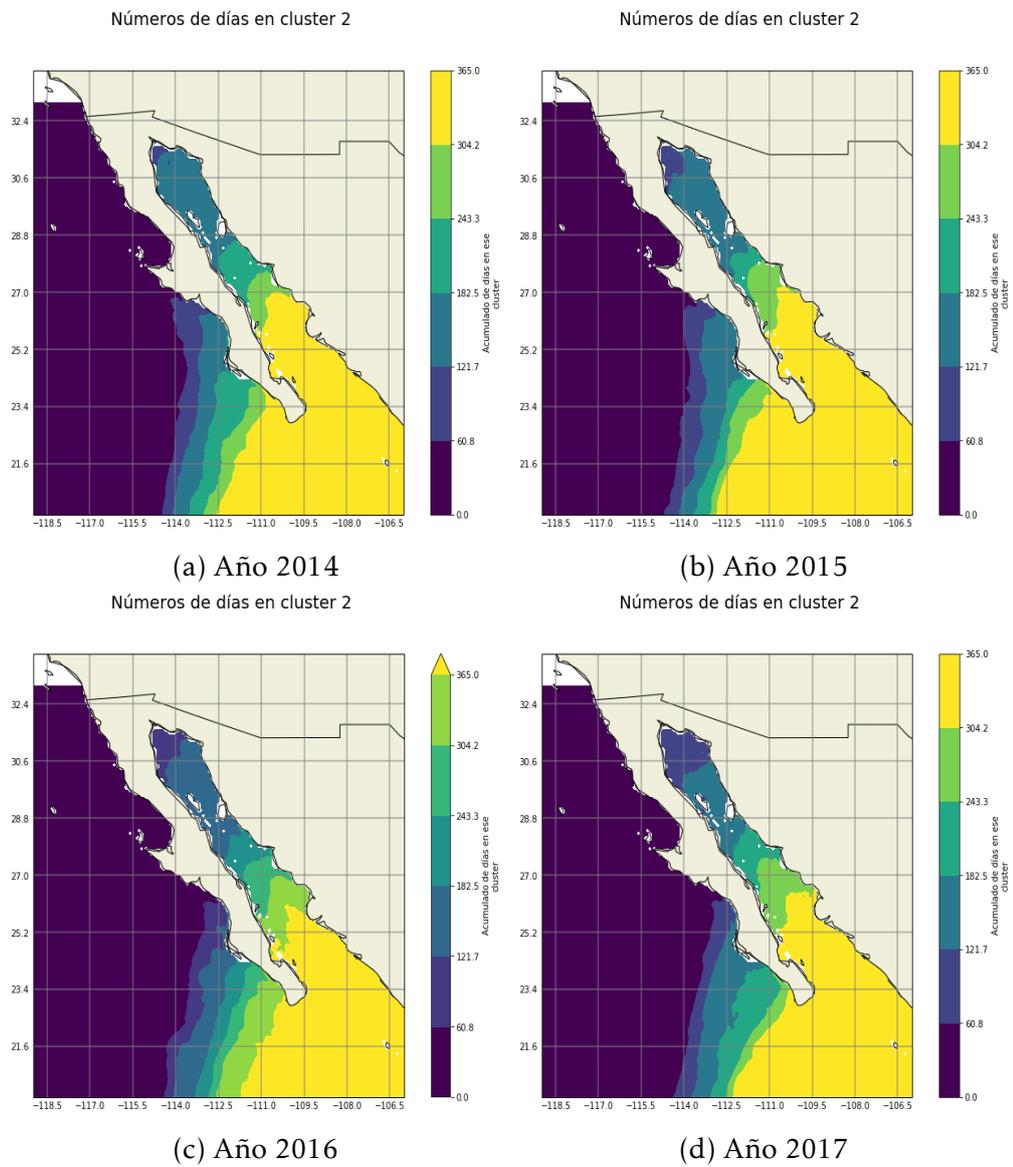


Figura 4.16: Mapas ilustrativos que permiten conocer el número de días en los que una coordenada dentro de la unión de los datos HYCOM presentan el cluster 2

4.4. Cálculo de propiedades termodinámicas del agua de mar.

Para lograr calcular los valores de densidad y calor específico del agua de mar para cada uno de los datos dentro de la serie temporal del archivo con los datos de temperatura y salinidad descargados del servidor HYCOM, fue necesario replicar la tabla de valores disponible en la referencia contenida en el apéndice A, así como los gráficos que en ella se muestran. Los resultados para cada propiedad se muestran a continuación:

4.4.1. Tablas de valores

°C	ppm						
	3000	3100	3200	3300	3400	3500	3600
10	1023.275	1024.034	1024.795	1025.555	1026.317	1027.078	1027.841
15	1022.094	1022.850	1023.606	1024.363	1025.121	1025.878	1026.636
20	1020.761	1021.513	1022.266	1023.019	1023.773	1024.527	1025.281
25	1019.276	1020.026	1020.775	1021.525	1022.275	1023.026	1023.777
30	1017.644	1018.390	1019.137	1019.884	1020.631	1021.378	1022.126

Cuadro 4.8: Valores de densidad del agua de mar contemplando distintos valores de temperatura y salinidad (ver figura B.2).

°C	ppm						
	3000	3100	3200	3300	3400	3500	3600
10	4.022	4.016	4.011	4.006	4.00	3.995	3.989
15	4.023	4.018	4.013	4.007	4.002	3.997	3.992
20	4.025	4.019	4.014	4.009	4.004	3.999	3.994
25	4.026	4.021	4.016	4.011	4.005	4.001	3.995
30	4.027	4.022	4.017	4.012	4.007	4.002	3.997

Cuadro 4.9: Valores del calor específico del agua de mar contemplando distintos valores de temperatura y salinidad (ver figura B.4).

4.4.2. Gráficos.

Variación de la densidad del agua de mar como función de la temperatura y salinidad

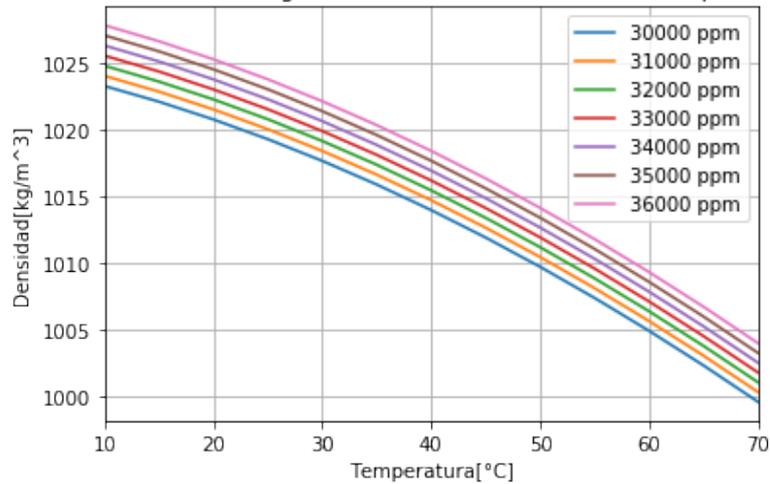


Figura 4.17: Cruvas de densidad del agua de mar calculadas(ver figura B.2).

Variación del calor específico del agua de mar en función de la salinidad y temperatura

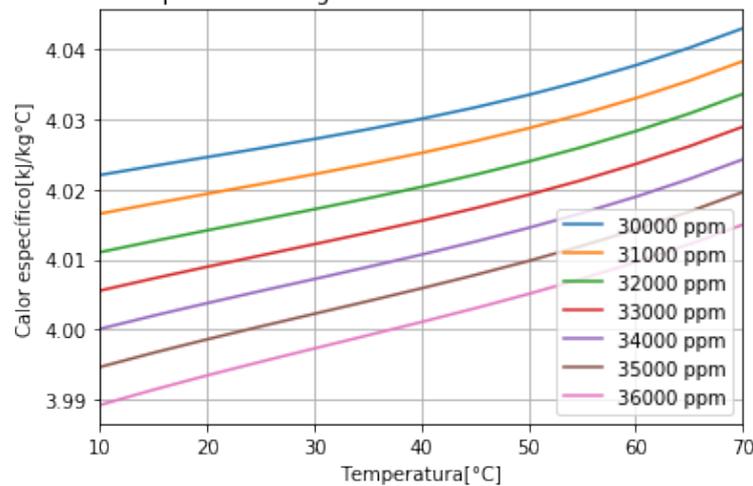


Figura 4.18: Cruvas del calor específico del agua de mar calculadas (ver figura B.3).

Una vez corroborados los resultados obtenidos a partir de las ecuaciones definidas en python para ambas propiedades, se procedió a calcular

4.5. SIMULACIÓN DEL CALENTAMIENTO DEL AGUA SUPERFICIAL DEL MAR CON CALENT

ambas propiedades para cada uno de los datos inmersos en el archivo HYCOM.

4.5. Simulación del calentamiento del agua superficial del mar con calentadores solares planos.

En esta sección son desplegados los resultados obtenidos de la simulación del calentamiento del agua superficial del mar de un arreglo en serie de 40 calentadores solares tanto de calentadores solares Ecosun como Heliocol instalados en cada una de las playas seleccionadas en este trabajo (ver cuadro 3.1). En primer instancia, se muestra un cuadro que contiene el resultado del criterio de selección de coordenadas más cercanas dentro del mallado de los datos oceanográficos (ver figura 3.2). Posteriormente, se muestran los histogramas del delta de temperatura entre el agua marina calentada a la salida de cada colector solar y el agua superficial del mar correspondientes al calentamiento de arreglos en serie que difieren en un total de 5 calentadores de sus respectivos sucesores hasta sumar el total de calentadores simulados. Cabe señalar que el delta de temperaturas desplegado en estos histogramas corresponden con aquellos instantes diurnos que cumplen con la condición de sostener un ángulo entre el vector normal a la superficie de cada calentador y el vector solar dentro de un intervalo de 0 a 90 grados. Posteriormente, se muestran un conjunto de gráficos que permiten conocer las funciones de probabilidad, de distintos arreglos en serie de calentadores solares, asociadas al número de horas al día en las que se cumple que el delta de temperatura de calentamiento es mayor o igual a 20°C . Este indicador permite conocer la cantidad de horas con probabilidad de tener un día con cierto intervalo de operación específico. Cabe recalcar que esta probabilidad no infiere que el delta de temperaturas se cumpla continuamente a lo largo de cada periodo de tiempo señalado. Estos gráficos fueron realizados para el total del estudio como para cada uno de los periodos anuales completos que estén disponibles dentro de la serie temporal de los datos. Además, en la sección “Tablas y gráficos de resultados de la simulación de calentadores solares en las playas de estudios” dentro del apéndice de este trabajo, se encuentran distintas tablas que contienen información complementaria a estos gráficos. En ellas se pueden conocer los valores de probabilidad de que el delta temperaturas se cumpla para el caso de cierto número de calentadores solares planos durante todo el estudio, así como para cada periodo anual

completo. Además, se pueden conocer el número de días en los que este delta de temperatura se cumple para los distintos rangos operativos alcanzados dentro de la simulación en cada una de las playas de estudio. Por último, se muestran dos figuras, la primera permite visualizar el recurso solar sobre la superficie de los calentadores solares y la segunda muestra el delta de temperaturas obtenido del calentamiento de ambos calentadores durante un día despejado y uno parcialmente nublado.

4.5.1. Cabo San Lucas, Baja California Sur.

Punto	Coordenadas más cercanas								
	Único	Cero	Uno	Dos	Tres	Cuatro	Cinco	Seis	Siete
Datos disponibles	0	0	0	0	1861	0	0	0	0

Cuadro 4.10: Cantidad de datos oceanográficos disponibles para cada uno de los puntos más cercanos a una coordenada sobre el mar cerca de Cabo San Lucas, Baja California Sur.

En el cuadro 4.10 se puede apreciar que el punto 3 de los puntos más cercanos (ver figura 3.2) a las coordenadas de los datos meteorológicos (ver cuadro 3.1) dentro del mallado de datos oceanográficos, fue contemplado para la simulación de los calentadores solares planos en Cabo San Lucas.

En la figura 4.19 se puede apreciar que los rangos adquiridos por el delta de temperatura aumenta en función del número de calentadores solares implementados tanto para el calentador Ecosun, como para el calentador Heliocol. En congruencia con lo anterior, si realizamos esta misma observación para los histogramas que se encuentran en la primer fila de esta figura, podemos percatarnos en que un arreglo de cinco calentadores interconectados en serie de ambos calentadores solares no satisfacen el delta de temperatura mínimo que requiere un sistema OTEC. Condición que se cumple con 10 o más calentadores solares de ambos modelos. Con esta figura nos podemos percatar que el delta temperaturas alcanzado por 10 o más calentadores mantienen intersecciones en los rangos acaparados por sus distribuciones, mismas que aumentan de manera directa en función del número de calentadores solares. Sin embargo, al visualizar los histogramas que se encuentran en la segunda fila de esta figura, encontramos una gran similitud en los intervalos de delta de temperatura. Esto permite resaltar que el aumento en la diferencia de temperatura del fluido superficial marino resulta ser significativamente menor a partir de 25 calentadores solares interconectados en serie para ambas marcas de calentadores.

4.5. SIMULACIÓN DEL CALENTAMIENTO DEL AGUA SUPERFICIAL DEL MAR CON CALENT.

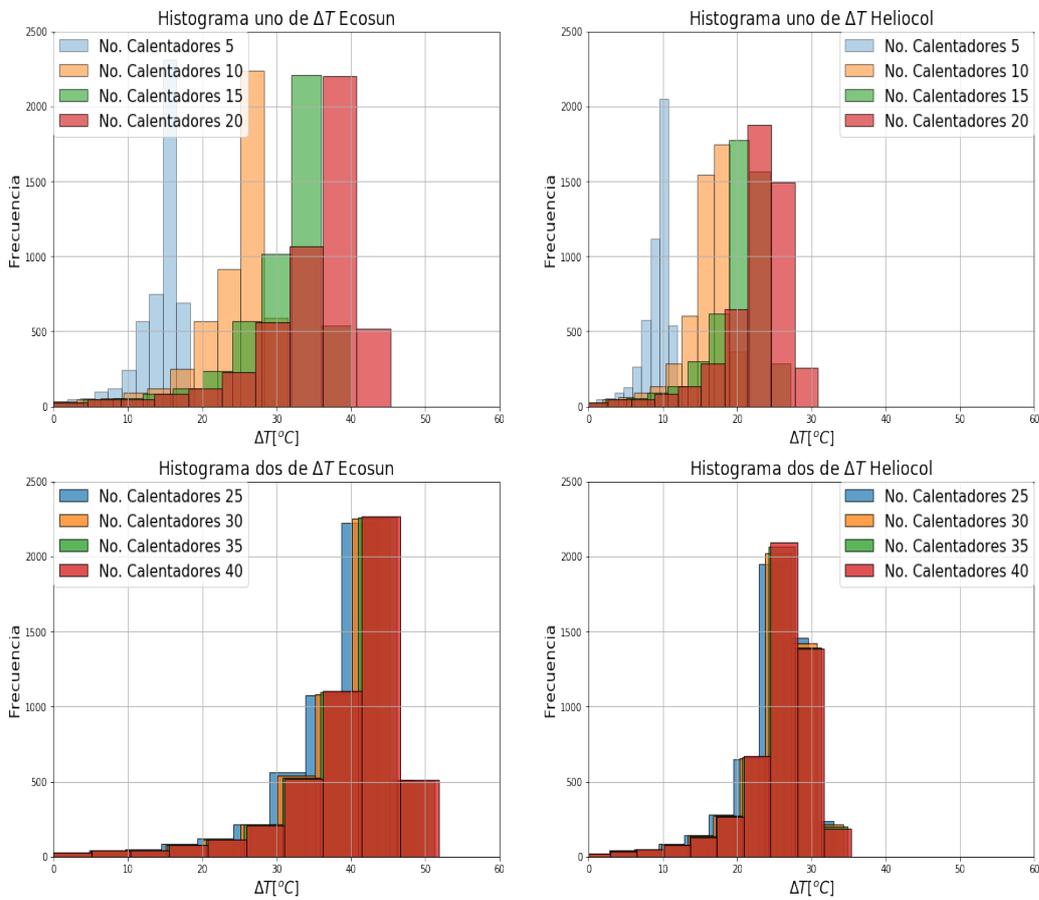


Figura 4.19: Histogramas del delta de temperaturas obtenidos a partir de 5 a 40 calentadores solares planos interconectados en serie en Cabo San Lucas, Baja California Sur.

Lo anterior, se cumple en mayor medida para el calentador Heliocol. Cuestión que respecto al modelo Ecosun, podemos denotar que este fenómeno se cumple en menor grado entre 25 y 30 calentadores solares.

Por otro lado, en la figura 4.20 podemos apreciar las funciones de probabilidad de que este sistema pueda contar con un día a lo largo de todo el estudio con un rango operativo determinado durante el cual se cumpla que existe un delta de temperatura mayor o igual a 20 °C en cada uno de los arreglos de calentadores solares desde 15 a 40 unidades interconectadas en serie. A esta figura le corresponde el cuadro C.1, mismo que se encuentra en la sección de apéndices. En este gráfico, podemos observar que las funciones de probabilidad correspondientes a los arreglos con un número mayor o igual a 30 calentadores solares interconectados en serie,

sostienen enormes similitudes en ambos modelos de calentadores. Esto se puede corroborar al comparar los valores de probabilidad de obtener el delta de temperatura deseado o mayor, así como el número de días al año para cada rango de operación asociados a estos mismos arreglos disponibles en el cuadro C.1. Por otro lado, se vuelve evidente que al aumentar el número de calentadores solares dentro del sistema se disminuye la probabilidad de operar un menor número de horas al día. Aunado a esto, en ambos calentadores solares se cumple que el número de unidades interconectadas en serie que logran el mayor rango de operación posible es 30, ya que aunque aumente el número de calentadores interconectados la función de probabilidad no sufre grandes modificaciones. Esto hace que el sistema que implementa calentadores solares Ecosun pueda operar un rango de 6 horas y media hasta 9 horas seguidas con un 85% de probabilidad del total del tiempo diurno contenido en esta simulación. Mientras que para un sistema que implemente calentadores solares Heliocol este sistema sostiene un rango operativo desde 3 horas y media a 7 horas con el 80% de probabilidad del total del tiempo diurno contenido en esta simulación.

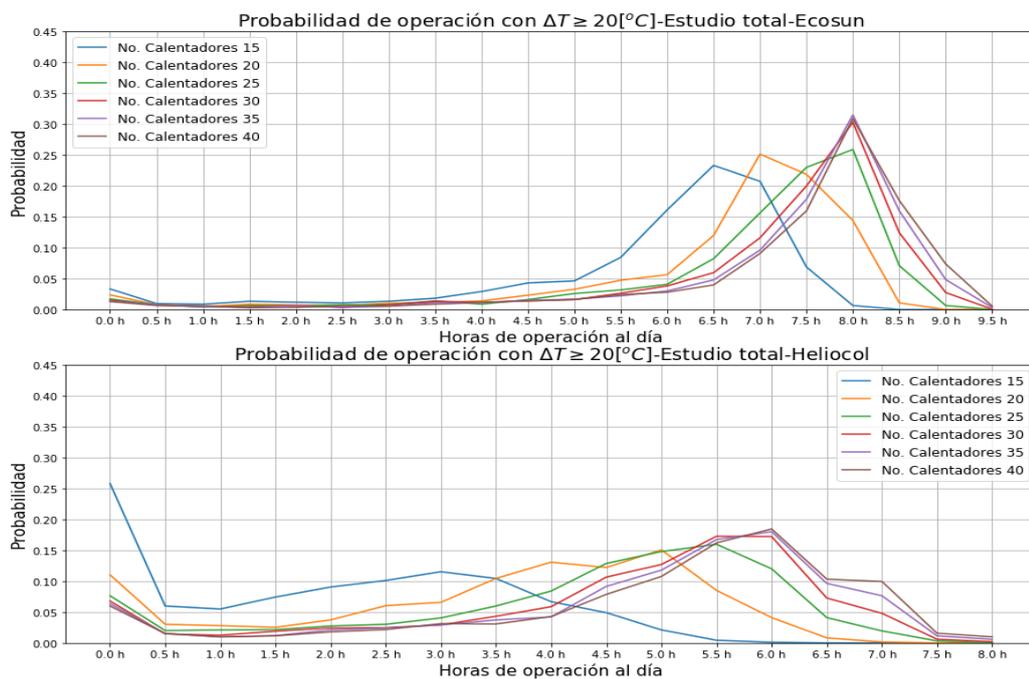


Figura 4.20: Funciones de probabilidad para distintos rangos de operación al día durante todo el estudio de arreglos en serie desde 15 hasta 40 calentadores solares Ecosun o Heliocol.

4.5. SIMULACIÓN DEL CALENTAMIENTO DEL AGUA SUPERFICIAL DEL MAR CON CALENT

Hay que recordar que los resultados mencionados anteriormente, corresponden al total de datos contenidos en la simulación. Sin embargo, se considera óptimo realizar este mismo análisis dentro de los periodos anuales contenidos en el eje temporal del estudio. Es por ello que en los cuadros C.2, C.3, C.4, C.5 y en las figuras C.1, C.2, C.3 y C.4 se encuentran contenidos los mismos resultados para cada año completo dentro de la simulación. En el cuadro 4.11 se encuentran reportados los valores del

Ecosun			
Año	Máx. probabilidad	No. de horas operativas más probable	Mayor intervalo operativo
2014	0.30	8 h	0-9.5 h
2015	0.30	8 h	0-9 h
2016	0.34	8 h	0-9 h
2017	0.43	8 h	0-9 h
Heliocol			
Año	Máx. probabilidad	No. de horas operativas más probable	Mayor intervalo operativo
2014	0.16	6 h	0-7.5 h
2015	0.16	5.5 h	0-8 h
2016	0.21	5.5 h	0-8 h
2017	0.26	6 h	0-8 h

Cuadro 4.11: Resultados característicos de los periodos anuales de la simulación.

intervalo operativo de número de horas disponibles durante cada periodo anual, así como su probabilidad asociada junto con el mayor intervalo operativo de cada año. Estos valores son desplegados para ambos calentadores simulados.

Con este cuadro es posible apreciar que para el calentador Ecosun, el número de horas operativas más probable fue el mismo durante todos los periodos anuales. Además, es preciso indicar que durante el 2014 ocurrió el mayor número de horas operativas de 9.5 horas al día, mientras que el resto de periodos anuales compartieron el mismo intervalo operacional. Cabe señalar que durante los años 2014 y 2015, se logra identificar las menores probabilidades asociadas al número de horas operativas más probables. Mientras que para los años 2016 y 2017 la probabilidad de obtener un día con la misma cantidad de horas fue mayor. Destacando en gran medida al año 2017.

Por su parte, para el calentador Heliocol también ocurrió que durante el periodo anual del 2014 se obtuvo el mayor número de horas operativas de todos los años completos. En comparación con lo ocurrido para el calentador Ecosun, el número de horas más probables no fue único. Durante el 2014 y 2017 se operó con mayor probabilidad durante 6 horas, mientras que para los años 2015 y 2016 este número de horas operacionales

Ecosun							
No. Calentadores	10	15	20	25	30	35	40
Radiación solar promedio (W/m^2)	884.68	811.01	777.39	759.56	748.82	741.90	737.55
Desviación estándar (W/m^2)	89.61	135.21	157.91	169.30	175.76	180.66	183.44
Heliocol							
No. Calentadores	10	15	20	25	30	35	40
Radiación solar promedio (W/m^2)	1053.38	944.98	894.99	867.86	852.41	843.34	838.01
Desviación estándar (W/m^2)	13.29	59.65	85.42	101.76	111.40	116.72	120.13

Cuadro 4.12: Valor promedio de radiación solar necesaria para obtener un delta de temperatura mayor o igual a $20^{\circ}C$ en función del número de calentadores solares planos Ecosun/Heliocol instalados en Cabo San Lucas, junto con sus valores de desviación estándar asociados.

fue de 5.5 horas. Valores que, en esencia no distan en gran medida uno del otro. Por otro lado, se identificó que los valores de máxima probabilidad asociada al número de horas más probable logran tener un máximo en el 2017, seguido por el año 2016; mientras que durante los años 2014 y 2015 resultaron tener un valor menor.

A partir de las inferencias observadas anteriormente, se puede identificar que en ambos calentadores solares el mayor rango operativo permaneció prácticamente constante, así como el número de horas al año más probable. Sin embargo, es notorio destacar que en ambos calentadores la probabilidad máxima de operar un determinado número de horas adquirió valores distintos en cada periodo anual y que a su vez resultaron tener el mismo orden de agrupamiento, siendo el año 2017 aquel en el que este sistema operó un mayor número de días al año durante el número de horas operativas más probable. Inferencia que para los años 2014 y 2015 resultaron tener el menor número de días al año para la misma cantidad de horas operativas de mayor probabilidad.

Lo anterior se puede relacionar con el recurso solar disponible sobre la superficie de cada calentador solar plano, ya que al visualizar el comportamiento del delta de temperatura alcanzado por cierto número de calentadores a lo largo de ciertos periodos diarios; se logró apreciar una estrecha relación entre el calentamiento de los calentadores y la radiación solar disponible sobre la superficie de los calentadores a lo largo del día. En la figura 4.19 se puede apreciar, el argumento expuesto anteriormente, en donde es posible comparar lo ocurrido durante un día despejado y durante otro relativamente nublado. Al visualizar lo anterior, se decidió realizar un histograma de los valores de radiación solar disponible sobre los calentadores solares durante cada periodo anual analizado. En la figura 4.22 se encuentran disponibles estos histogramas, mismos que muestran las fre-

4.5. SIMULACIÓN DEL CALENTAMIENTO DEL AGUA SUPERFICIAL DEL MAR CON CALENT

cuencias anuales de valores de radiación global mayores a 700 W/m^2 . Se optó por comparar estos histogramas a partir de este valor luego de filtrar los valores de radiación de cada número de calentadores para los cuales el delta de temperatura era igual o mayor a 20°C , tanto para el calentador Ecosun como para el calentador Heliocol a lo largo de toda la simulación realizada para este lugar. Acto seguido, se calculó el promedio y la desviación estándar de cada conjunto de valores de radiación para cada número de calentadores solares. Los resultados se muestran en el cuadro 4.12. A partir de él, podemos inferir que al aumentar la cantidad de calentadores solares, se requiere una menor cantidad de radiación solar para poder obtener el delta de temperatura deseado. Cuestión que resulta contraria para un número menor de calentadores solares interconectados en serie.

Por último, es posible notar que la radiación disponible durante los periodos anuales completos dentro de esta simulación obedecen el orden adquirido por las máximas probabilidades del número de horas más probables de operación reportadas en el cuadro 4.11 principalmente en valores mayores a 900 W/m^2 . Esto permite inferir que la probabilidad de ocurrir un día con cierto rango de horas operativas aumenta en relación al recurso solar disponible sobre la superficie de los calentadores solares planos.

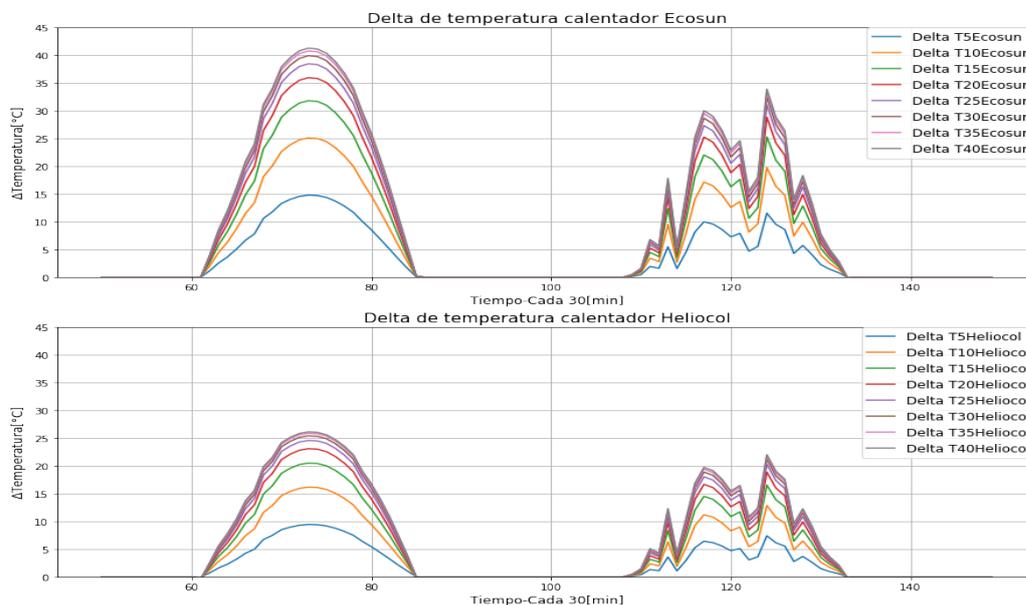


Figura 4.21: Delta de temperatura disponible a la salida de cada calentador considerando considerando dos días consecutivos, el primero con condiciones meteorológicas óptimas y el segundo con condiciones desfavorables en Cabo San Lucas, Baja California Sur.

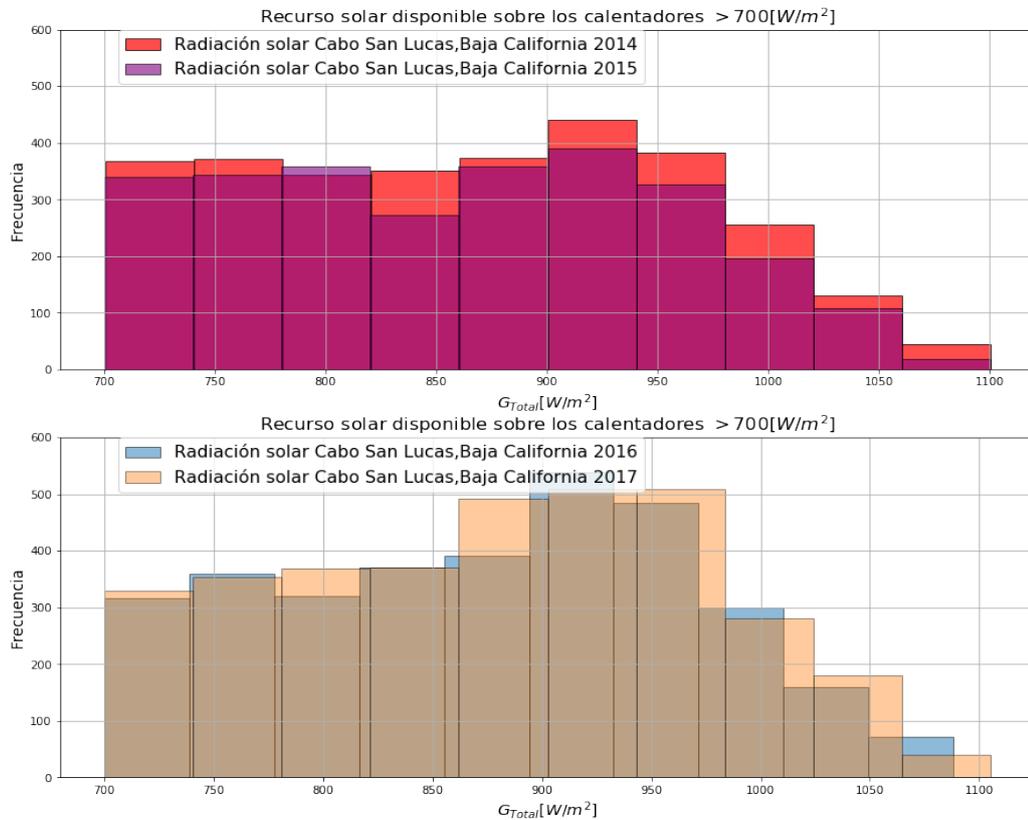


Figura 4.22: Recurso solar disponible sobre la superficie de los calentadores solares simulados en Cabo San Lucas, Baja California Sur durante los periodos anuales disponibles.

4.5.2. Bahía Asunción, Baja California Sur.

En el cuadro 4.13 es posible conocer que el punto más cercano a la ubicación de los datos meteorológicos de un punto sobre el mar cerca de Bahía Asunción (ver cuadro 3.1), Baja California Sur resultó ser el punto cero (ver figura 3.2) dentro de los puntos del mallado de los datos oceanográficos HYCOM.

Los histogramas de frecuencia del delta de temperatura derivado de la simulación de 40 calentadores solares planos en Bahía Asunción se encuentran desplegados en la figura 4.19, mismos que comparten una gran similitud con los histogramas mostrados en el caso de estudio anterior. Ya que 5 unidades de ambos calentadores no son suficientes para poder alcanzar el delta de temperaturas necesario de 20 °C. Requisito que se satisface con 10 o más unidades para el caso de ambos calentadores. Además,

4.5. SIMULACIÓN DEL CALENTAMIENTO DEL AGUA SUPERFICIAL DEL MAR CON CALENT

Punto	Coordenadas más cercanas								
	Único	Cero	Uno	Dos	Tres	Cuatro	Cinco	Seis	Siete
Datos disponibles	0	1861	0	0	0	0	0	0	0

Cuadro 4.13: Coordenadas más cercanas dentro del mallado de los datos oceanográficos del servidor HYCOM con disponibilidad de datos para un punto sobre el mar cerca de Bahía Asunción, Baja California Sur.

al incrementar el número de unidades interconectadas en serie, de igual manera, se cumple que el rango de la distribución de los deltas de temperaturas disponibles aumentan de manera directa. Cuestión que no resulta en un gran incremento en el rango de deltas de temperaturas a partir de 25 calentadores interconectados en serie. Argumentos que se cumplen en mayor medida para el calentador Heliocol y en menor medida para el calentador Ecosun.

En la figura 4.24 se encuentran disponibles las funciones de probabilidad de contar con cierta cantidad de horas operativas a lo largo de un día del total del tiempo contenido en la simulación realizada. Figura que está íntegramente relacionada con el cuadro C.6 disponible en el apéndice de este trabajo. A partir de estos resultados, podemos notar que el sistema de calentadores presenta grandes similitudes en las funciones de probabilidad y en el número de días al año para determinados rangos operativos a partir de 30 o más calentadores solares interconectados en serie. Además, es pertinente señalar que para el calentador solar Ecosun, la mayor probabilidad de obtener un día con un determinado número de horas operativas resultó ser un arreglo de 20 calentadores, sin embargo los valores máximos de probabilidad para arreglos mayores no resultan ser significativamente menores. Por otro lado, para el calentador Heliocol se puede denotar que a partir de 20 unidades interconectadas en serie, la probabilidad máxima resultó ser similar. Los dos argumentos anteriores permiten inferir que al aumentar el número de calentadores interconectados en serie, ocurre un aumento en el rango operativo sin existir un incremento o decremento significativo en la probabilidad del número de horas más probables. Por otro lado, al comparar los rangos operativos de estos resultados con el caso de estudio anterior nos podemos percatar de la existencia de una ligera diferencia de media hora entre los rangos operativos de ambos resultados generales. Aunado a esto, se puede apreciar en este gráfico que el número de calentadores interconectados en serie que obtiene un rango operativo mayor es el de 30 unidades. Aclarando que este rango resulta ser prácticamente el mismo que un arreglo con un mayor número de unidades interconectadas en serie de ambos calentadores. Partiendo de lo anterior, en el

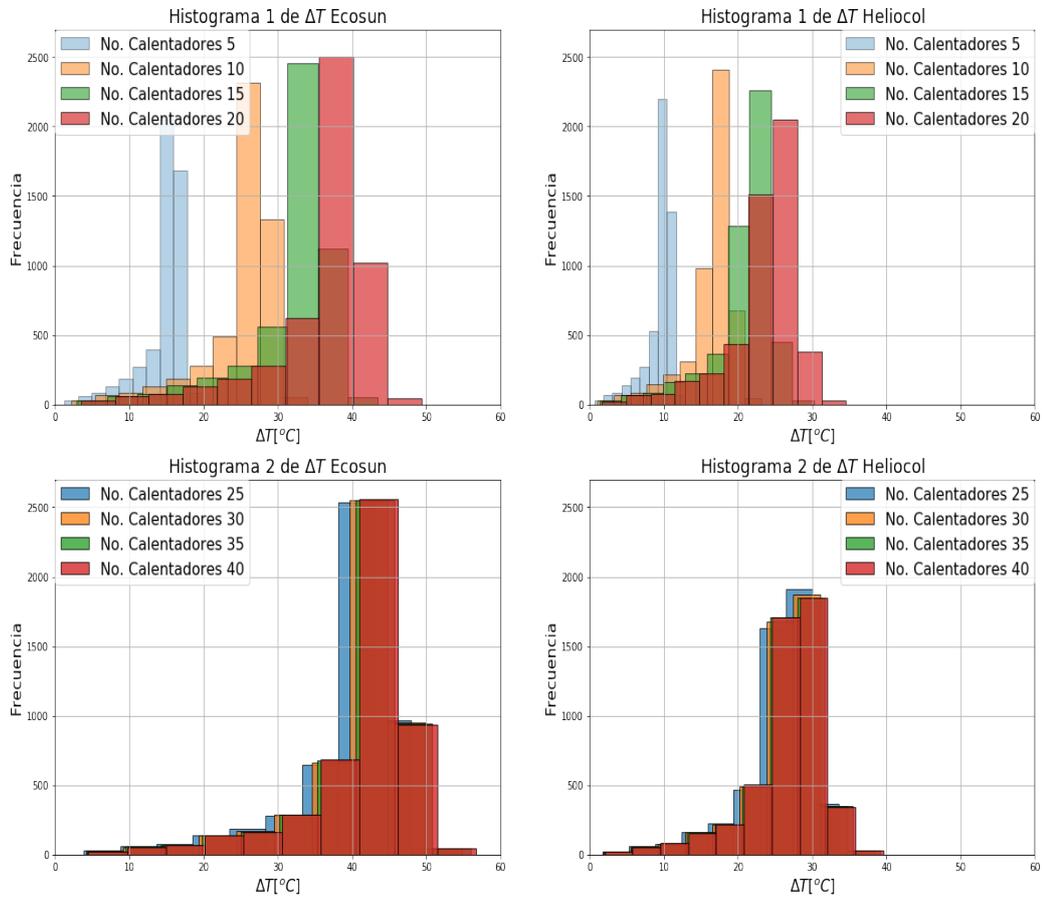


Figura 4.23: Histogramas del delta de temperaturas obtenidos a partir de 5 a 40 calentadores solares planos interconectados en serie en Bahía Asunción, Baja California Sur.

debido caso de implementar un total de 30 calentadores solares Ecosun, el sistema podría operar durante un rango operativo de 6 horas a 9 horas y media durante 85 % del tiempo diurno contenido en esta simulación. Mientras que de implementar 30 calentadores solares Heliocol se podría operar 80 % del tiempo diurno contenido en esta simulación dentro de un intervalo operativo de 3 horas y media a 8 horas.

De igual manera, como se realizó en el caso anterior, se procedió a analizar cada periodo anual completo dentro del eje temporal de la simulación en cuestión. Los resultados, se encuentran reportados en los cuadros C.7,C.8,C.9,C.10 y en las figuras C.5,C.6,C.7,C.8. Mismos que se encuentran en el apéndice de este trabajo. Además, se procedió a elaborar el mismo cuadro comparativo del caso anterior para los distintos periodos

4.5. SIMULACIÓN DEL CALENTAMIENTO DEL AGUA SUPERFICIAL DEL MAR CON CALENTADORES SOLARES

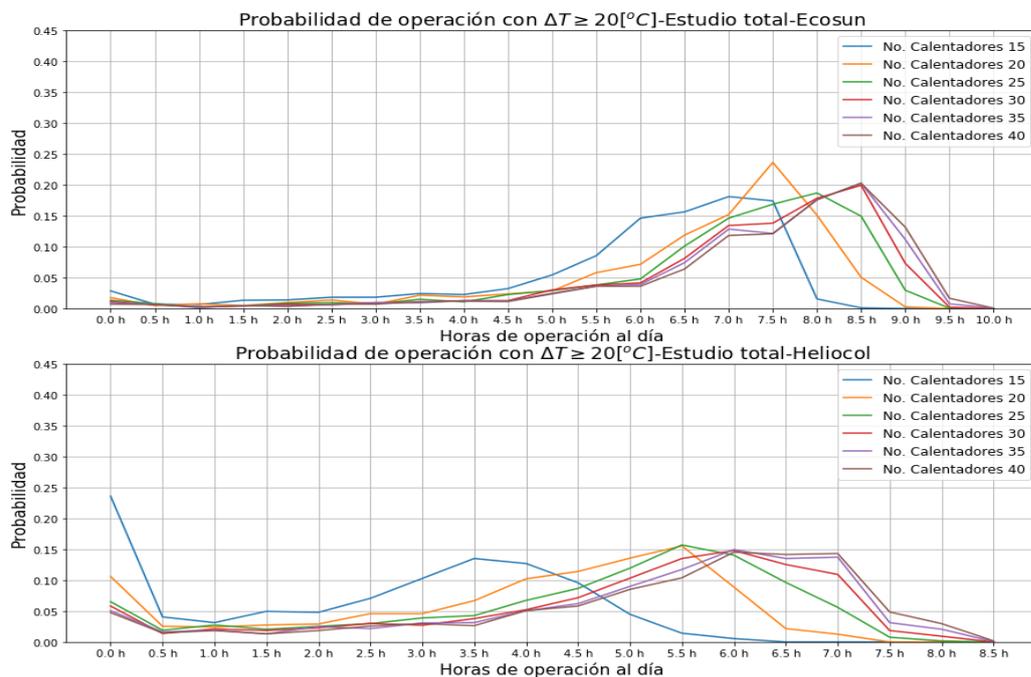


Figura 4.24: Funciones de probabilidad para distintos rangos de operación al día durante todo el estudio de arreglos en serie desde 15 hasta 40 calentadores solares Ecosun o Heliocol.

anuales(ver cuadro 4.14.). Con este cuadro, se puede inferir que para la simulación de calentadores Ecosun a lo largo del año 2014 ocurrió el mayor número de horas operativas durante un día de 10 horas, seguido por lo obtenido en los años 2017 y 2016 de 9.5 horas, mientras que durante el 2015 el mayor número de horas en operación fue de 9 horas. Cuestión que resultó ser equitativa en el número de horas operativas más probable. Sin embargo, al comparar los valores de máxima probabilidad del número de horas operativas más probable, nos podemos dar cuenta de que siguen un orden similar al obtenido en el caso anterior. En donde existió mayor probabilidad durante el año 2017, seguido por los años 2016,2014 y con el valor más bajo el año 2015. Aunque, a diferencia del caso anterior, la diferencia comprendida entre estos valores de probabilidad resultan ser menores que las reportadas en Cabo San Lucas.

En el caso del calentador Heliocol, también se cumple que durante el 2014 ocurrió el mayor intervalo operativo de 8.5 horas al día. Cuestión que resultó ser igual para el resto de periodos anuales con un máximo de 8 horas operacionales durante un día. En cuanto al número de horas operativas más probable, resultó que durante los periodos anuales del 2014,2016

Ecosun			
Año	Máx. probabilidad	No. de horas operativas más probable	Mayor intervalo operativo
2014	0.24	7.5 h	0-10 h
2015	0.23	7.5 h	0-9 h
2016	0.24	7.5 h	0-9.5 h
2017	0.26	7.5 h	0-9.5 h
Heliocol			
Año	Máx. probabilidad	No. de horas operativas más probable	Mayor intervalo operativo
2014	0.17	5.5 h	0-8.5 h
2015	0.18	6 h	0-8 h
2016	0.20	5.5 h	0-8 h
2017	0.19	5.5 h	0-8 h

Cuadro 4.14: Resultados característicos de los periodos anuales de la simulación en Bahía Asunción, Baja California Sur.

y 2017 la operación durante 5 horas y media fue la más probable, cosa que durante el 2015 no se cumplió, ya que el número de horas más probable resultó ser 6. Por último, nos podemos percatar que en los valores de máxima probabilidad, para este calentador no se presentó el orden reportado en el caso anterior, dado que al comparar lo ocurrido con los valores del calentador Ecosun se obtuvo el siguiente orden en orden descendente: 2016, 2017, 2015 y 2014. Mientras que para el calentador Heliocol resultó el siguiente orden: 2016, 2017, 2015 y 2014.

Ecosun							
No. Calentadores	10	15	20	25	30	35	40
Radiación solar promedio (W/m^2)	890.54	822.49	790.96	772.69	761.61	754.96	750.39
Desviación estándar (W/m^2)	94.71	141.98	163.91	177.41	185.70	189.76	193.44
Heliocol							
No. Calentadores	10	15	20	25	30	35	40
Radiación solar promedio (W/m^2)	1036.23	937.75	893.92	869.82	856.00	847.34	841.62
Desviación estándar (W/m^2)	38.00	72.73	99.48	116.21	126.69	132.58	135.82

Cuadro 4.15: Valor promedio de radiación solar necesaria para obtener un delta de temperatura mayor o igual a $20^{\circ}C$ en función del número de calentadores solares planos Ecosun/Heliocol instalados en Bahía Asunción, junto con sus valores de desviación estándar asociados.

Luego de realizar estas inferencias, se procedió a elaborar los histogramas de frecuencia de la radiación sobre la superficie de los calentadores solares (ver figura 4.25), así como el cuadro de radiación solar asociadas a un delta de temperatura de calentamiento mayor o igual a $20^{\circ}C$ para los distintos arreglos de ambos calentadores solares planos (ver cuadro 4.15). Con este cuadro se rectifica que un mayor número de calentadores solares requiere de una menor radiación solar para lograr el delta de temperatura

4.5. SIMULACIÓN DEL CALENTAMIENTO DEL AGUA SUPERFICIAL DEL MAR CON CALENT

deseado, argumento que es contrario para un menor número de calentadores. Con este cuadro, podemos determinar también que es necesario contar con un valor de radiación solar sobre la superficie de los calentadores solares mayor a 700 W/m^2 . Con los histogramas de frecuencia, es posible observar que no existen grandes diferencias entre los histogramas de los años 2014, 2016 y 2017, cuestión que fue distinta en el caso anterior. Además, es posible denotar que el año 2015 resulta ser ligeramente menor que los otros tres periodos anuales. Esto se cumple en mayor medida para valores mayores a 900 W/m^2 en ambas afirmaciones anteriores. Esto logra explicar las menores diferencias comprendidas entre los valores de máxima probabilidad asociados a cada periodo anual completo en ambos calentadores. Por otro lado, se pueden apreciar mayores diferencias entre los valores del calentador Ecosun y menores en los valores del calentador Heliocol. Para lograr explicar esto, se recurrió a observar los gráficos del delta de temperatura disponibles de ambos calentadores durante un día despejado y durante un día parcialmente nublado (ver figura 4.23). Con estas gráficas, se puede inferir que el calentador Heliocol en sus valores de delta de temperatura llega a registrar menores incrementos durante su operación. A partir de esto, se puede deducir que en el caso de ocurrir ligeras modificaciones en la magnitud del recurso solar que se irradia sobre sí, este calentador resulta registrar menores variaciones en comparación con lo que ocurre en el calentador Ecosun. Es por ello, que las diferencias entre los valores de probabilidad son mayores en este último calentador. Para visualizar mejor lo expuesto anteriormente, en la figura 4.23 se logra ilustrar el delta de temperatura derivado de la operación de los arreglos de ambos calentadores durante un día despejado y durante un día parcialmente nublado.

4.5.3. Rosarito, Baja California.

Punto	Coordenadas más cercanas								
	Único	Cero	Uno	Dos	Tres	Cuatro	Cinco	Seis	Siete
Datos disponibles	0	0	0	0	0	0	0	1861	1861

Cuadro 4.16: Coordenadas más cercanas dentro del mallado de los datos oceanográficos del servidor HYCOM con disponibilidad de datos para un punto sobre el mar cerca de Rosarito, Baja California.

En el cuadro 4.16 se encuentran los puntos más cercanos a la posición geográfica sobre el mar cercana a Rosarito, Baja California (ver cuadro

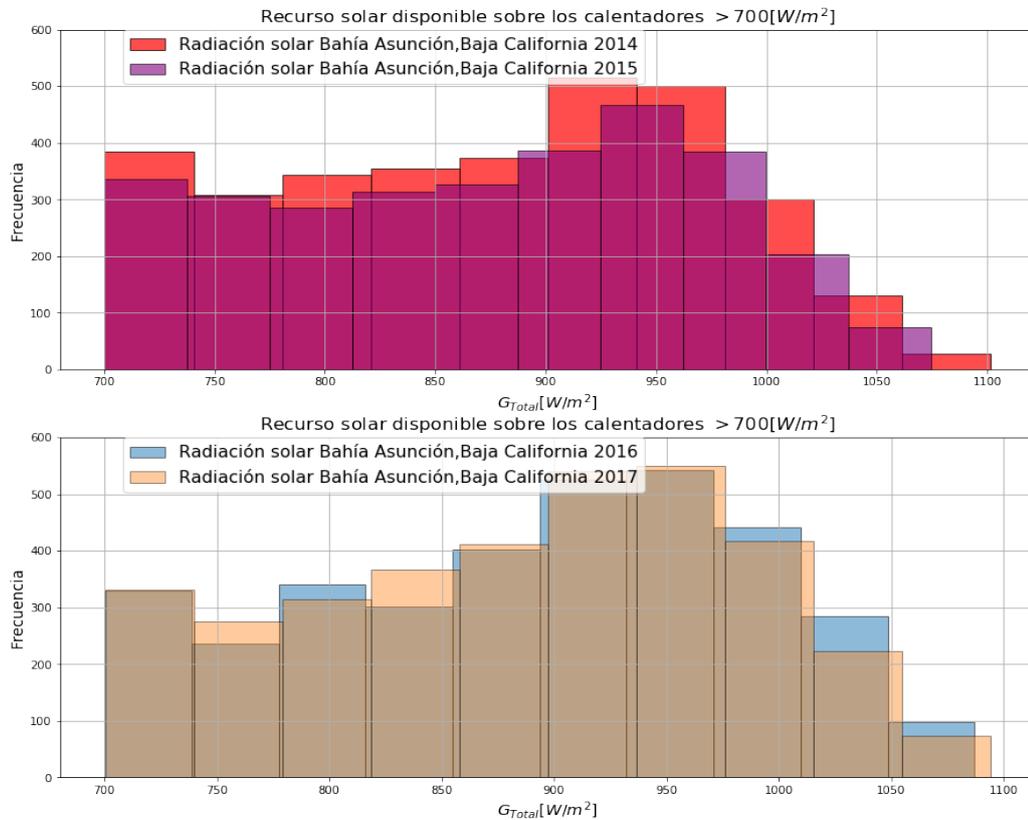


Figura 4.25: Recurso solar disponible sobre la superficie de los calentadores solares simulados en Bahía Asunción, Baja California Sur durante los periodos anuales disponibles.

3.1). A diferencia de los casos anteriores de estudio, para esta playa en específico se obtuvieron dos puntos dentro del mallado de datos HYCOM con información oceanográfica disponible. Es por ello que se decidió optar por analizar uno de los dos puntos disponibles, siendo el punto siete (ver figura 3.2) el elegido únicamente por decisión personal. En la figura 4.27 se pueden apreciar los histogramas del delta de temperaturas derivados de la operación de 40 calentadores solares planos Ecosun y Heliocol en Rosarito, Baja California. Es con estos histogramas de frecuencias que nos podemos percatar de la gran similitud que comprenden las distintas distribuciones del delta de temperaturas en este y los dos casos de estudio anteriores. Ya que es evidente denotar, que este fenómeno parece no depender del lugar de estudio. Lo que implica que este suceso esté relacionado con las limitaciones operativas de los calentadores solares planos. Explicado lo anterior, es conveniente indicar que, al igual que en los casos

4.5. SIMULACIÓN DEL CALENTAMIENTO DEL AGUA SUPERFICIAL DEL MAR CON CALENT

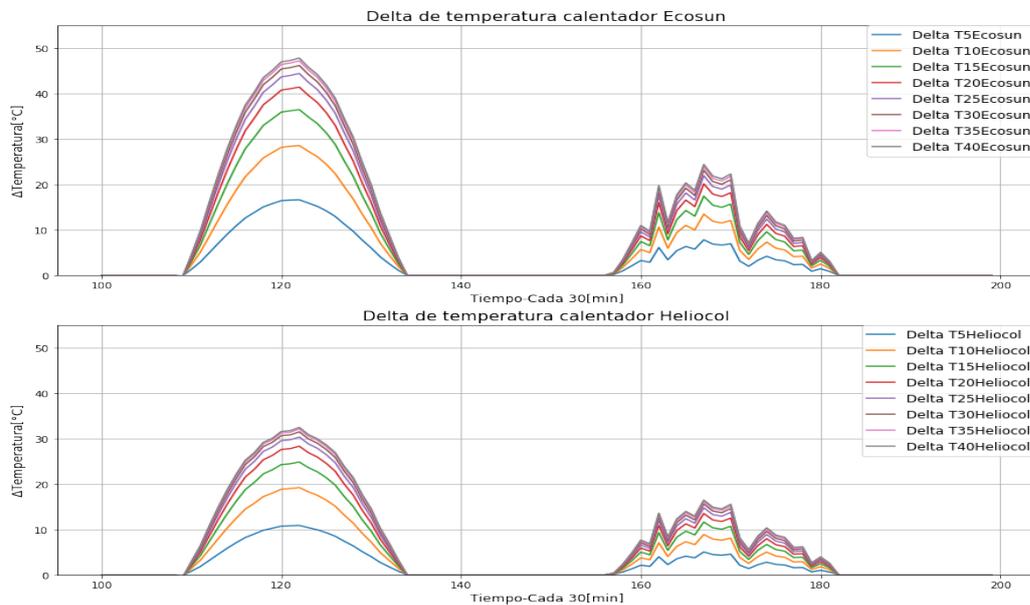


Figura 4.26: Delta de temperatura disponible a la salida de cada calentador considerando considerando dos días consecutivos, el primero con condiciones meteorológicas óptimas y el segundo con condiciones desfavorables en Bahía Asunción, Baja California Sur.

anteriores, el delta de temperaturas necesario de 20 °C requiere de 10 o más calentadores solares interconectados en serie tanto Ecosun como Heliocol. Además, a partir de 25 unidades el rango de valores de delata de temperatura acaparados por las distribuciones de un mayor número de unidades interconectadas no discrepa en gran mayor medida.

Al igual que en los casos anteriores, en la figura 4.28 y en el cuadro C.11, disponible en la sección de apéndices, se reportan los resultados obtenidos del calentamiento del agua de mar referente a la totalidad del estudio. Al analizar estos resultados, es posible determinar que la función de probabilidad y el número de días de los rangos operativos más probables son muy similares para un número igual o mayor de 25 calentadores solares. Además, al comparar los rangos operacionales de los resultados generales de cada caso de estudio anterior, nos podemos percatar de que el mayor rango operativo registrado se encuentra reportado en esta simulación, sin embargo, el número de horas operativas más probable no difiere respecto al reportado para Cabo San Lucas para el caso de ambos calentadores solares. Relacionado a esto, se puede apreciar una similitud entre los valores de máxima probabilidad asociada a cada rango operativo reportado en el caso de Bahía Asunción y los reportados en el caso general de

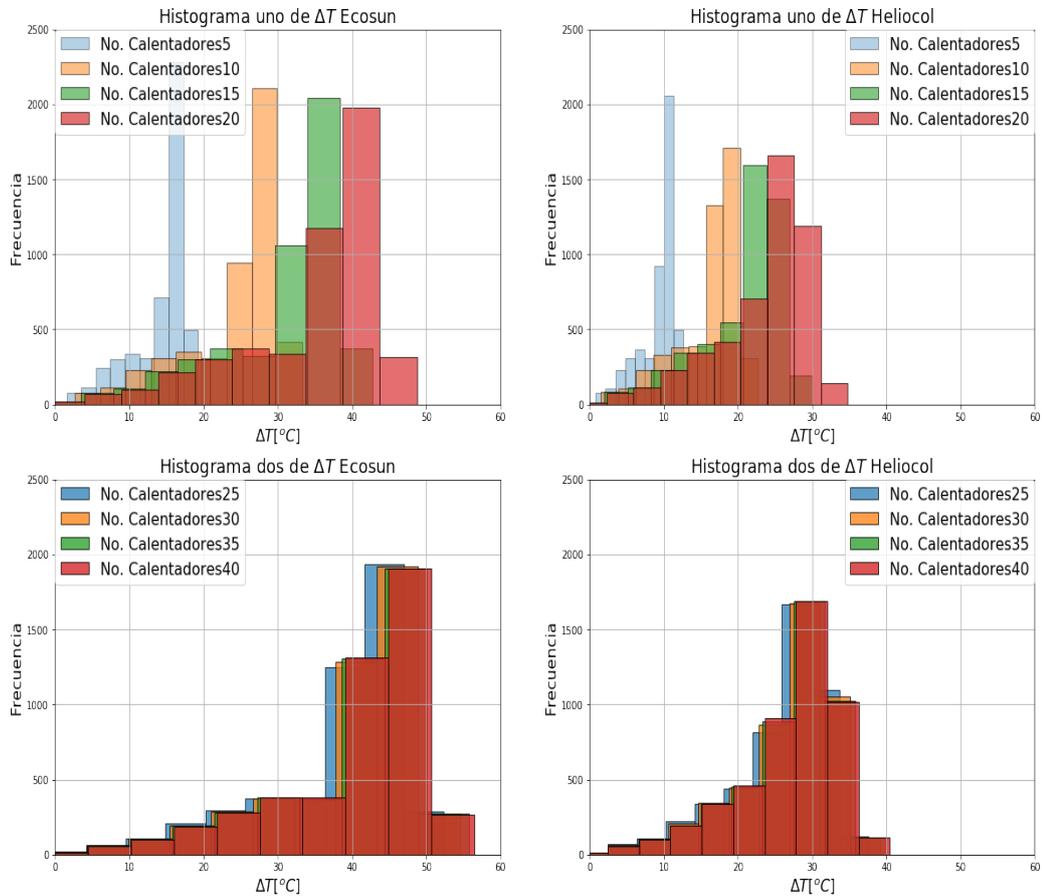


Figura 4.27: Histogramas del delta de temperaturas obtenidos a partir de 5 a 40 calentadores solares planos interconectados en serie en Rosarito, Baja California.

Rosarito. De lo anterior, podemos determinar que al considerar un sistema de 30 calentadores solares Ecosun instalados en este lugar de estudio, el sistema de calentamiento de agua superficial del mar lograría operar de 5 a 10 horas durante el 80% del tiempo diurno contenido en esta simulación, y a su vez, en el debido escenario de implementar calentadores solares Heliocol, el delta de temperaturas menor o igual a 20 $^{\circ}\text{C}$ estaría disponible de 3 a 9 horas durante el 80% del tiempo diurno disponible en este estudio.

En congruencia con los análisis anuales realizados en los casos de estudios anteriores, en el apéndice de este trabajo se encuentran los cuadros C.12, C.13, C.14, C.15 y las figuras C.9, C.10, C.11, C.12 en donde se describen los resultados obtenidos en el calentamiento del agua superficial

4.5. SIMULACIÓN DEL CALENTAMIENTO DEL AGUA SUPERFICIAL DEL MAR CON CALENTADORES

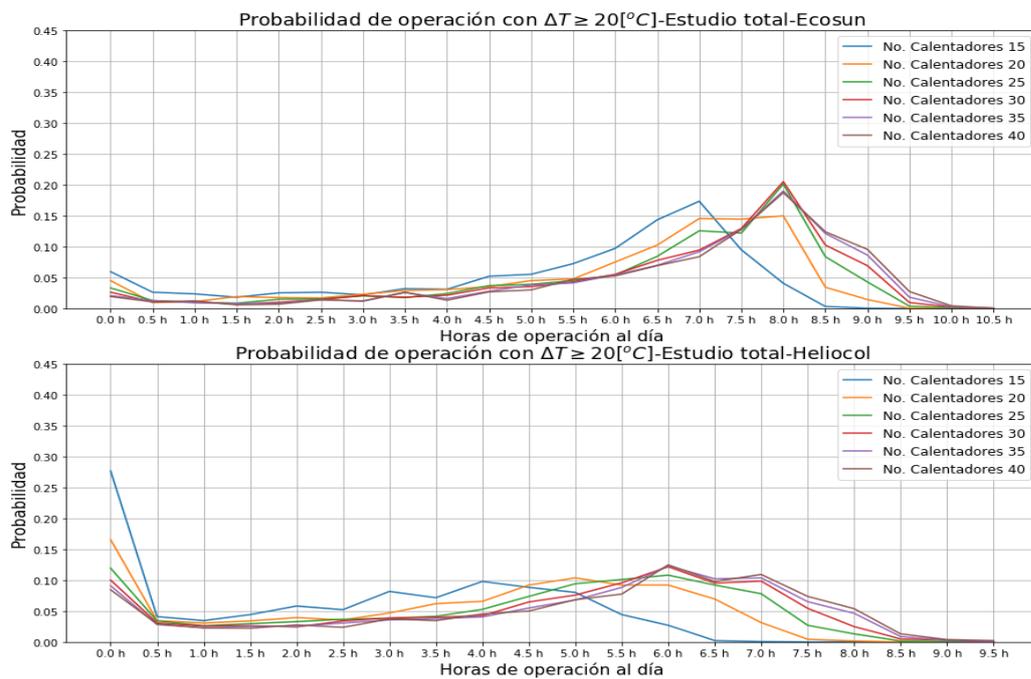


Figura 4.28: Funciones de probabilidad para distintos rangos de operación al día durante todo el estudio de arreglos en serie desde 15 hasta 40 calentadores solares Ecosun o Heliocol.

del mar con tecnología termosolar durante los años 2014, 2015, 2016 y 2017. A demás, en el cuadro 4.17 son desplegados el conjunto de valores reportados en las dos secciones anteriores.

Al analizar estos resultados para el calentador Ecosun, se puede resaltar que el periodo anual que registró el mayor número de horas operativas fue el 2017 con 10 horas y media, mientras que aquel que reportó menos fue el año 2015 con 9 horas y media. Por su parte, los años 2014 y 2016 compartieron el mismo intervalo operativo. En cuanto al número de horas operativas más probable, todos los periodos anuales compartieron el mismo valor. Sin embargo, esto no ocurrió en los valores de máxima probabilidad del número de horas operativas más probable debido a que este valor adquirió el siguiente orden en forma descendente: 2016, 2015 y 2017 con el mismo valor y en último el 2014.

En cuanto al calentador Heliocol, se puede apreciar que el mayor rango operativo resultó equivalente durante los años 2014, 2016 y 2017. Cuestión que indica que durante el 2015 se obtuvo el menor rango operativo de 9 horas y media. Esto no ocurre en el número de horas operativas más probables ya que en todos los años se cumple que este valor es el mismo.

Ecosun			
Año	Máx. probabilidad	No. de horas operativas más probables	Mayor intervalo operativo
2014	0.20	8 h	0-10 h
2015	0.21	8 h	0-9.5 h
2016	0.24	8 h	0-10 h
2017	0.21	8 h	0-10.5 h
Heliocol			
Año	Máx. probabilidad	No. de horas operativas más probables	Mayor intervalo operativo
2014	0.14	6 h	0-9.5 h
2015	0.15	6 h	0-8.5 h
2016	0.14	6 h	0-9.5 h
2017	0.11	6 h	0-9.5 h

Cuadro 4.17: Resultados característicos de los periodos anuales de la simulación en Rosarito, Baja California.

Por último, en cuanto al valor de máxima probabilidad del número de horas operativas más probable durante los años 2016 y 2014 se reporta el mismo valor, mismo que resulta ser el valor intermedio en comparación con los otros años. Esto hace que el año 2015 resultara con el mayor valor y el 2017 el menor.

En congruencia con el análisis realizado en las playas anteriores, en la figura 4.27 se pueden apreciar los histogramas de frecuencia de radiación sobre la superficie de los calentadores solares durante los periodos anuales de estudio. En el cuadro 4.18 se encuentran los valores de radiación promedio, con su desviación estándar correspondiente, para poder obtener el delta de temperatura de 20 °C asociado a cada número de calentadores solares interconectados en serie. Con ayuda de este cuadro se puede confirmar el argumento dictaminado anteriormente de que al aumentar la cantidad de calentadores solares planos interconectados en serie, es posible obtener el delta de temperatura de 20 °C con una menor cantidad de radiación solar sobre la superficie de los calentadores solares planos. Situación que ocurre de manera inversa con un menor número de unidades interconectadas en serie.

Por otro lado, con la figura 4.29 se puede reafirmar el orden adquirido en las máximas probabilidades del número de horas operativas más probable en cada periodo anual completo en esta simulación. Recordando que esto se cumple en mayor medida en los resultados del calentador Ecosun que en los resultados del calentador Heliocol. Para reformar este argumento, en la figura 4.27 se puede apreciar la interdependencia del delta de temperaturas durante un día despejado y durante un día nublado en Rosarito, Baja California de cada uno de los arreglos de calentadores solares, reafirmando que el incremento del delta de temperatura en el

4.5. SIMULACIÓN DEL CALENTAMIENTO DEL AGUA SUPERFICIAL DEL MAR CON CALENT

Ecosun							
No. Calentadores	10	15	20	25	30	35	40
Radiación solar promedio (W/m^2)	869.74	791.93	755.26	732.88	721.26	713.79	709.13
Desviación estándar (W/m^2)	103.65	157.59	181.52	194.39	201.36	205.67	208.85
Heliocol							
No. Calentadores	10	15	20	25	30	35	40
Radiación solar promedio (W/m^2)	992.64	909.30	862.59	834.25	816.47	805.41	798.73
Desviación estándar (W/m^2)	41.85	87.59	119.56	139.41	153.01	160.16	164.22

Cuadro 4.18: Valor promedio de radiación solar necesaria para obtener un delta de temperatura mayor o igual a 20 °C en función del número de calentadores solares planos Ecosun/Heliocol instalados en Rosarito, junto con sus valores de desviación estándar asociados.

arreglo de calentadores Ecosun resulta ser mayormente influencia que lo que ocurre con el arreglo de calentadores Heliocol. A partir de los resultados anteriores, se puede inferir que, de acuerdo con los histogramas del delta de temperatura correspondientes a cada caso de estudio, el delta de temperatura mayor o igual a 20 °C se logra alcanzar, en ambos calentadores, a partir de 10 unidades interconectadas en serie, independientemente del calentador solar utilizado. Sin embargo, es probable que para un menor número de calentadores solares Ecosun, este delta de temperaturas sea alcanzado.

Luego de analizar los resultados obtenidos en las tablas y gráficos de los resultados generales y de cada periodo anual contenidos en la simulación realizada. Es posible inferir que al aumentar el número de calentadores solares interconectados, se disminuye la cantidad de días de menor operación y se aumenta el número de días con un mayor número de horas operativas. Además, es posible resaltar que se logra identificar que el número de horas operativas más probable es similar en todos los casos de estudio. Ya que, para el calentador Ecosun este valor fue de 8 o 7.5 horas, mientras que para el calentador Heliocol fue de 5.5 o 6 horas. Aunado a esto, se logra identificar que a partir de 30 calentadores solares planos, los resultados obtenidos con un mayor número de unidades interconectadas en serie no difieren en mayor medida. Esto nos indica que, al interconectar un mayor número de unidades en serie la cantidad de días al año con determinado número de horas operativas no aumenta significativamente. Además, fue posible identificar, a través del análisis de resultados anuales, que el recurso solar disponible sobre la superficie de los calentadores solares planos tiene una íntegra relación con la probabilidad o cantidad de días con un determinado número de horas operativas. Esto se comprobó al relacionar los valores de probabilidad del número de horas operativas

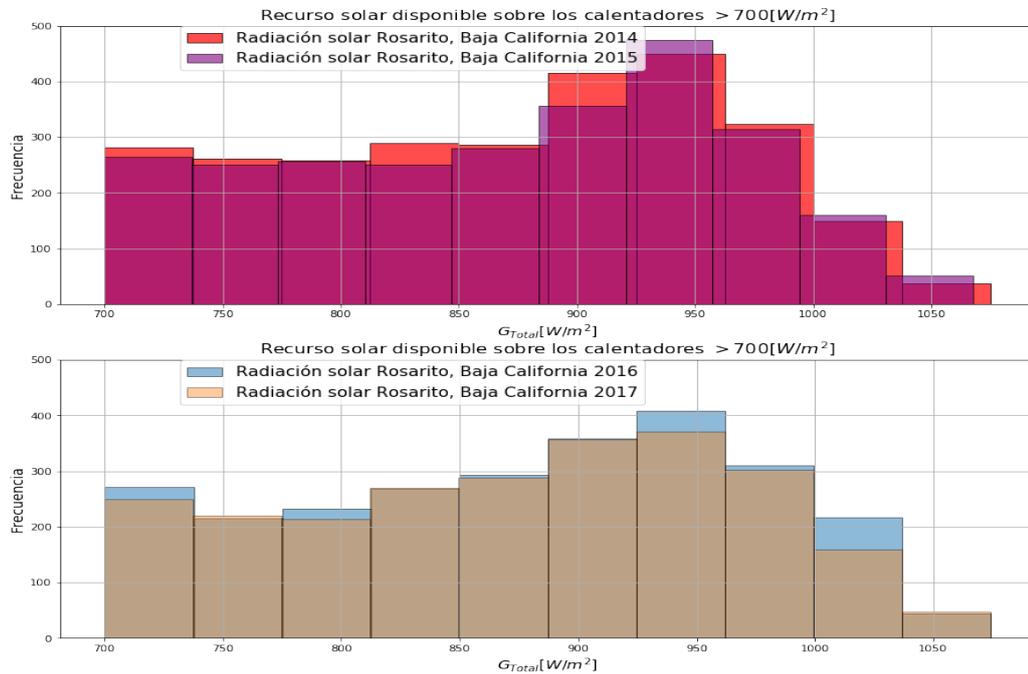


Figura 4.29: Recurso solar disponible sobre la superficie de los calentadores solares simulados en Rosarito, Baja California durante los periodos anuales disponibles.

más probable en cada periodo anual con los histogramas de frecuencia del recurso solar disponible durante cada año. Además, derivado del ejercicio anterior, se pudo identificar la estrecha relación que existe entre el calentamiento del agua superficial del mar con la radiación solar incidente sobre el calentador solar a lo largo del día. Siendo que, las curvas de calentamiento obtenidas a la salida de cada uno de los calentadores simulados comparten una gran similitud con las curvas de radiación global. A partir de esto, se puede inferir que al asistir un sistema OTEC con tecnología termosolar, el calentamiento obtenido durante el día solar dependerá de las condiciones meteorológicas locales a lo largo del periodo diurno solar. Finalmente, se logró identificar que el rango de horas probables durante las cuales se puede alcanzar un delta de temperatura mayor o igual a 20°C incrementa en función de una menor temperatura superficial del mar de menor valor. Provocando que para el cluster de temperaturas más cálidas(Cabo San Lucas) se reportara el menor rango de horas operativas, cuestión que resultó contraria en el cluster con temperaturas superficiales más frías (Rosarito).

4.5. SIMULACIÓN DEL CALENTAMIENTO DEL AGUA SUPERFICIAL DEL MAR CON CALENT

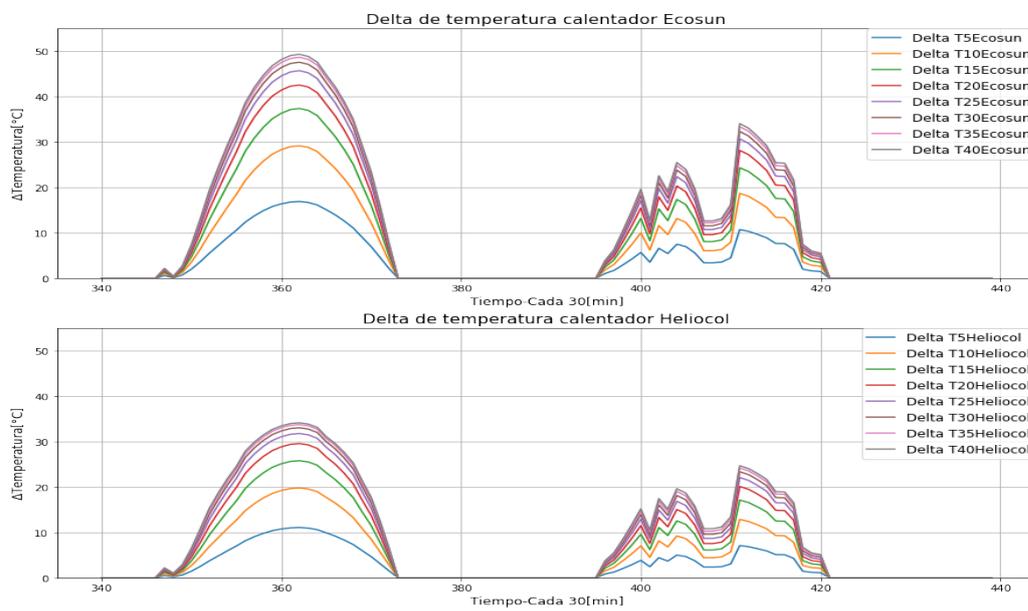


Figura 4.30: Delta de temperatura disponible a la salida de cada calentador considerando considerando dos días consecutivos, el primero con condiciones meteorológicas óptimas y el segundo con condiciones desfavorables en Rosarito, Baja California.

Capítulo 5

Conclusiones.

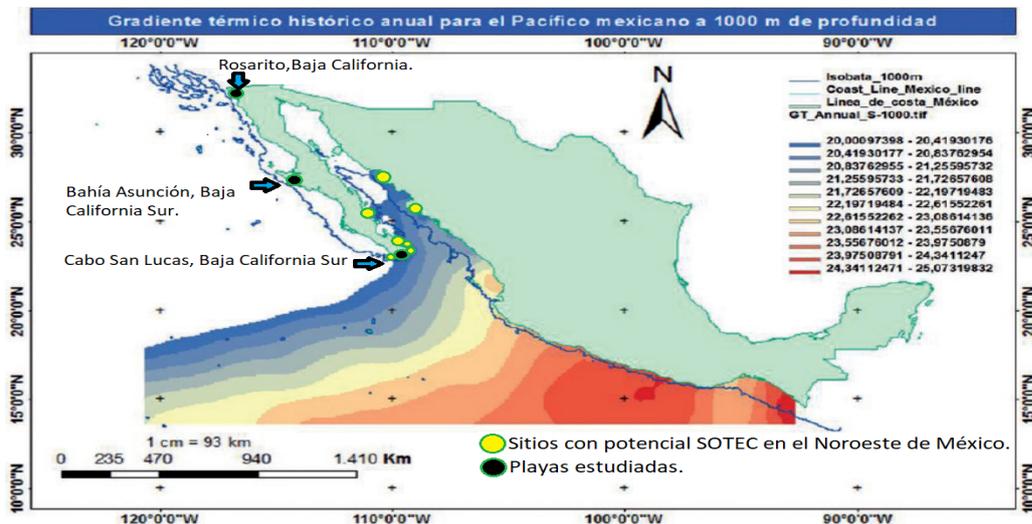


Figura 5.1: Playas estudiadas y sitios con potencial SOTEC en las costas del noroeste de México.

A partir de los resultados obtenidos en las tres simulaciones realizadas en este trabajo, se puede concluir que, en los tres casos de estudio se logró alcanzar el delta de temperatura e incluso más de lo requerido para la operación de un sistema OTEC, a partir del calentamiento del agua superficial del mar con calentadores solares planos. Razón por la cual, sería posible prescindir del bombeo de agua de bajas profundidades durante el calentamiento del agua superficial del mar. Además, se puede asegurar que el calentamiento del fluido superficial marino puede ocurrir en gran parte del año durante un mayor número de horas operativas al día, en el caso de considerar 30 calentadores solares planos Ecosun/Heliocol

interconectados en serie.

Es preciso recordar que en las playas de Rosarito y Bahía Asunción no existe el gradiente térmico natural necesario para la instalación de un sistema OTEC (ver figura 5.1), sin embargo, al considerar el calentamiento del agua superficial del mar con calentadores solares planos en ambos lugares de estudio, se vuelve posible la operación de un sistema OTEC, que no necesite el bombeo de agua fría de bajas profundidades, durante los periodos diurnos de cada año. Lo que permite inferir que para lograr la operación de un sistema no intermitente, sería necesario implementar otra fuente energética térmica que entre en operación durante aquellos momentos en los que este sistema no pueda operar (horario nocturno) o durante aquellos instantes de condiciones meteorológicas adversas durante el día que impidan la operación de la tecnología termosolar. Además, como se puede apreciar en la figura 5.1, tanto Rosarito como Bahía Asunción cuentan con la isobata de 1000 m de profundidad muy cerca, en comparación con otras costas ubicadas en el noroeste de México. Es por ello que podría ser implementado un sistema que utilice tanto agua superficial del mar, como agua proveniente de bajas profundidades o únicamente el agua superficial del mar para cumplir con el principio de operación que tiene un sistema OTEC. Contemplando estas alternativas, existiría la posibilidad de instalar esta tecnología en el resto de playas ubicadas en el noroeste de México. Dentro de las cuales, únicamente aquellas que tienen disponible la isobata cerca de la costa podrán considerar el bombeo de agua fría de mayor profundidad y tratar de recrear la operación de un sistema OTEC convencional. Mientras que, aquellas costas con batimetrías menores tendrían que bombear el agua fría de menores profundidades. Bombeo que podría evitarse al operar únicamente con el agua superficial del mar natural como sumidero y como fuente térmica otro volumen de agua superficial calentada.

Por otro lado, el caso de Cabo San Lucas resulta ser distinto a lo ocurrido en los dos lugares de estudio anteriormente mencionados, debido a que, en las costas ubicadas al sur de Baja California Sur existen las condiciones necesarias para instalar un sistema OTEC, de acuerdo con lo estipulado por el CEMIE-OCÉANO. Estas costas cuentan con el gradiente térmico natural mínimo requerido para la operación de un sistema OTEC junto con una isobata de 1000 m de profundidad muy cerca de la costa. Como consecuencia de lo enunciado anteriormente, se puede decir que las costas ubicadas al sur del Estado de Baja California Sur presentan las condiciones favorables para la instalación de un sistema SOTEC ya que cuenta con alto recurso solar y con las condiciones necesarias para la instalación de un sistema OTEC. Alternativa que, también cuenta con la posibilidad de

prescindir del bombeo de agua fría durante la operación de la tecnología termosolar o, de lo contrario, aumentar el rendimiento del sistema OTEC durante los periodos diurnos operativos.

De forma adicional, en la figura 5.1, también se pueden apreciar tres regiones que se encuentran cerca del centro del Golfo de California que fueron contempladas como sitios potenciales SOTEC, una ubicada en las costas de Sonora, otra en las costas de Sinaloa y por último una al este de Baja California Sur. Esto se hizo porque estas regiones cuentan con el mismo gradiente térmico natural que existe al sur de Baja California Sur, tienen alto recurso solar así como una isobata relativamente cercana a su línea de costa. Sin embargo, de acuerdo con los reportes del CEMIE-Océano referentes al recurso térmico oceánico, estas costas no fueron contempladas como sitios potenciales OTEC. Haciendo que, el motivo principal de señalar estas regiones se basa principalmente en la posibilidad de instalar un sistema SOTEC fuera de costa cercano a la isobata de 1000 m.

Por último, cabe señalar que el sistema termosolar simulado en este trabajo, únicamente considera el calentamiento del agua superficial del mar sin depósito térmico, por lo que, de considerar un sistema que contemple almacenamiento térmico, los resultados aquí expuestos serían más favorables para cada una de las costas estudiadas y regiones discutidas. Incluso, aun mejores en el debido caso de considerar un sistema de concentración solar con almacenamiento térmico. Lo anterior, significaría una mayor oportunidad para estas y otras costas dentro de nuestro territorio nacional e incluso para aquellos países con condiciones similares o desfavorables. Esto, nos ayuda a percatarnos de la gran oportunidad energética que tiene la humanidad de aprovechar los recursos renovables solares y marinos disponibles en nuestros entornos costeros. Sin olvidar, todo aquello que el mar ya nos ha dado.

Capítulo 6

Trabajo a futuro.



Figura 6.1: Simulador solar dentro de la cámara de envejecimiento de la planta solar.

Gracias al desarrollo de este trabajo, fue posible corroborar que un arreglo en serie de calentadores solares planos pueden proporcionar el delta de temperatura necesario para la operación de un sistema OTEC durante los periodos diurnos del día. Además, también se enunció que el número óptimo de unidades interconectadas en serie para ambos calentadores resultó ser 30. Sin embargo, conseguir tal número de calentadores solares de ambas marcas con fines únicamente académicos, resulta ser muy complicado. Es por esto, que se decidió optar únicamente por conseguir un calentador solar plano de cada marca, para recircular el fluido en su interior por lo menos 30 veces. Lo que sería equivalente al calenta-

miento de 30 unidades interconectadas en serie. Es por ello que se cotizó y compró un calentador solar Ecosun a la empresa Módulo Solar S.A. de C.V., cuestión que no pudo ser cierta para el calentador solar Heliocol, sin embargo, se optó por cotizar y comprar el calentador solar OKU a la empresa Sunergy Energías Renovables. Calentador solar hecho en Alemania que, de acuerdo con su fabricante, está diseñado incluso para operar con agua salada.

Con ambos calentadores solares, se pretende elaborar un sistema de circulación forzada que permita la recirculación del fluido al interior de ambos calentadores y que además, cuente con un termotanque que asegure el almacenamiento térmico. En el cual, se pretende instalar un conjunto de sensores que permitan la medición de las variables de temperatura del fluido a la entrada y salida de cada calentador solar, la temperatura ambiente, el flujo másico, humedad relativa del aire y potencia solar por unidad de superficie irradiada sobre cada calentador solar. Esta prueba, se pretende realizar con agua tomada directamente de la red, después con agua que cuente con determinada concentración de cloruro de sodio y finalmente con agua marina. En la actualidad, este sistema se encuentra en

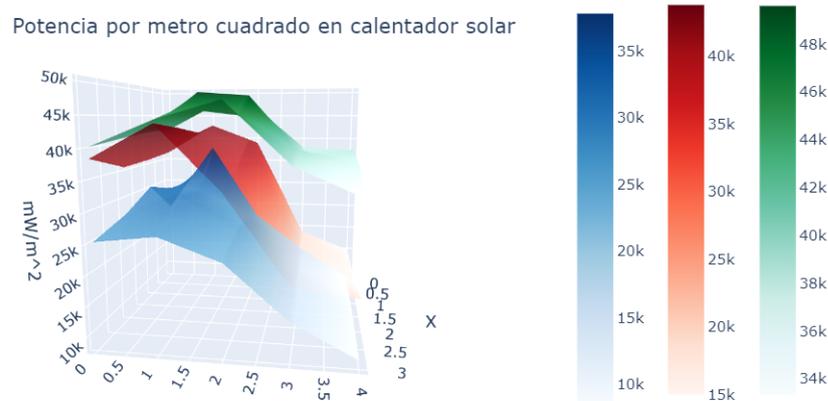


Figura 6.2: Superficies de potencia radiativa por unidad de superficie irradiada por el simulador solar sobre la superficie del calentador OKU.

desarrollo para el calentador solar OKU, mismo que está siendo elaborado en la planta solar de Ciudad Universitaria. En este lugar, se encuentra una cámara de envejecimiento, dentro de la cual, se decidieron realizar pruebas preliminares. Esta cámara, cuenta con una lámpara que está integrada por tres líneas de ocho focos (ver figura 6.1) de la marca OSRAM modelo Ultra Vitalux 300, mismos que permiten simular en cierta forma la luz del Sol. Sin embargo, los focos que componen esta lámpara, tienen



Figura 6.3: Prototipo cubierto durante las pruebas de radiometría sobre su superficie.

una mayor componente ultravioleta e infrarroja. Esto se pudo estipular al observar el espectro característico de estos focos y se pudo comprobar mediante la elaboración de un conjunto de pruebas radiométricas sobre la superficie del calentador solar con el uso de un radiómetro (ver figuras 6.2 y 6.3). Además, hasta el momento y con la ayuda de un estudiante que se encuentra realizando su maestría dentro de la planta solar, ha sido posible interconectar y programar en Arduino, cada uno de los sensores anteriormente mencionados (ver figuras 6.4). Con los cuales, se han logrado monitorear y guardar distintas pruebas del prototipo realizado para el calentador solar OKU. Hasta el momento, este prototipo, no cuenta con el sistema de bombeo que realice la recirculación, por lo que las pruebas realizadas, únicamente consideran el efecto termosifónico dentro del sistema.

En la figura 6.5 se puede apreciar un gráfico que muestra el delta de temperaturas alcanzado en la entrada y a la salida del calentador solar, así como el delta de temperatura sobre la superficie del calentador y en un punto inferior dentro del termotanque. La prueba mostrada en esta figura corresponde con un experimento de 7 horas y media de exposición del calentador solar bajo el simulador solar, el cual, contiene agua extraída de la red de agua de la planta solar.

Por otro lado, en la figura 6.6 se muestran los deltas de temperatura obtenidos en la misma prueba realizada para el mismo calentador solar OKU con la única diferencia de contener agua una concentración de 36 ppm de cloruro de sodio.

Cabe señalar, que este tipo de pruebas se han realizado al interior de

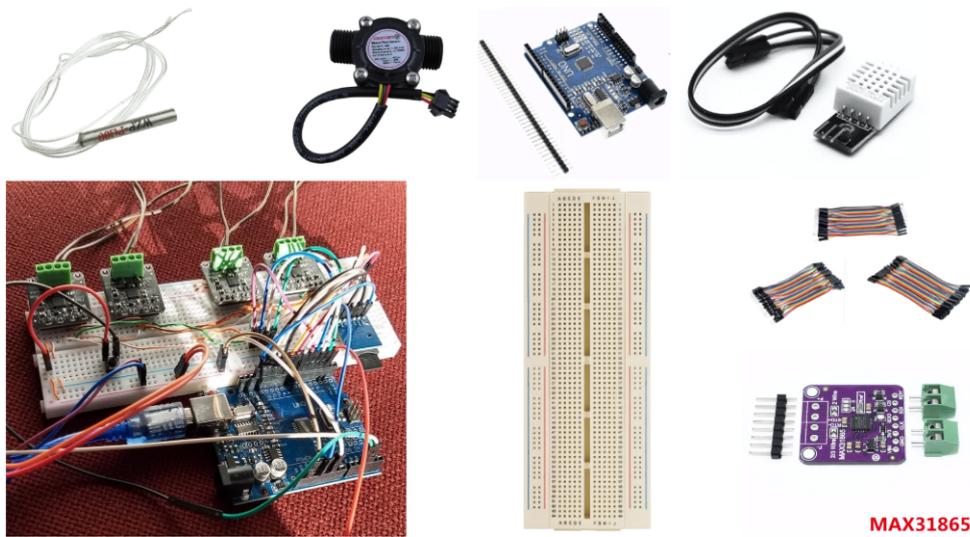


Figura 6.4: Sensores implementados en el prototipo experimental del sistema.

un cuarto dentro del cual se encuentra el simulador solar. Es por ello que se considera conveniente medir la temperatura ambiente. En la figura 6.7 se muestra un gráfico de una de las pruebas mostradas anteriormente. En esta figura, se puede apreciar que existe un incremento de temperatura bastante alto, lo que hasta el momento nos permite tener una gran idea de la ganancia energética que adquieren los alrededores.

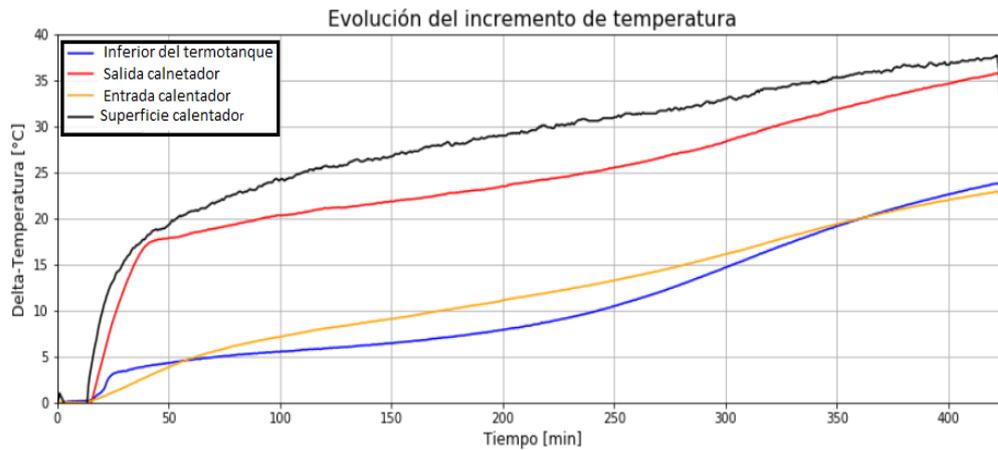


Figura 6.5: Delta de temperatura registrado a la entrada, salida del calentador en agua extraída de la red convencional.

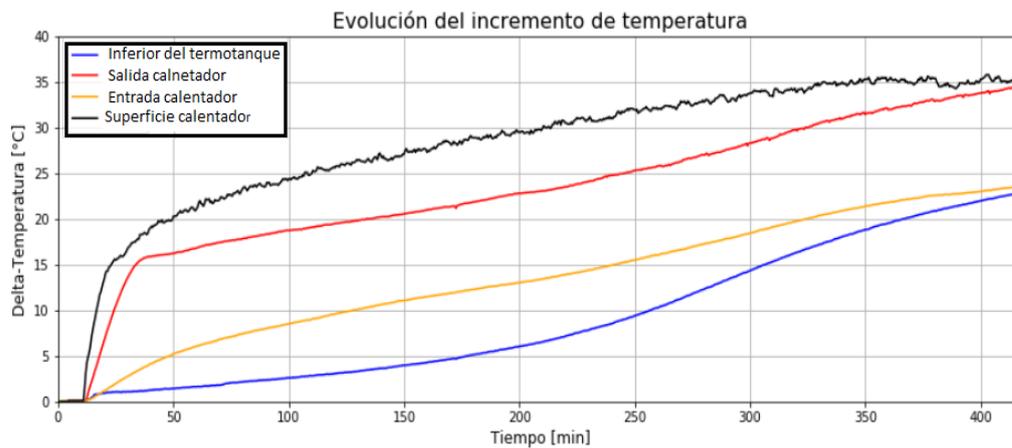


Figura 6.6: Delta de temperatura registrado a la entrada, salida del calentador en agua con cloruro de sodio.

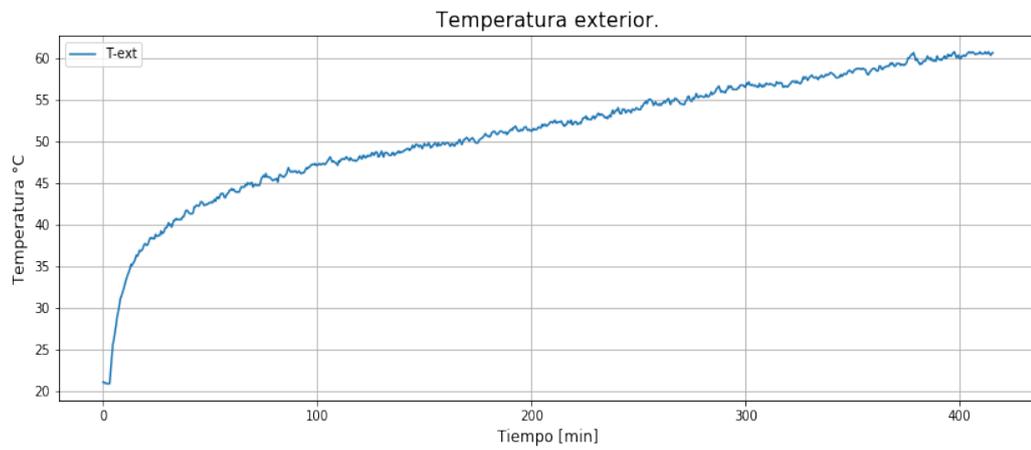


Figura 6.7: Monitoreo de la temperatura al interior de la cámara de prueba durante la prueba del calentamiento de agua extraída de la red de la planta solar.

Bibliografía

- [1] M. Mirtha, “Energía asequible y no contaminante,” [online] <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>, 2020, consultado: 13 Enero 2020.
- [2] C. Elena, Gómez Enrique, “El nexos agua y energía en el ciclo urbano del agua.” 2020.
- [3] SENER, “Reporte de avance de energías limpias,” Secretaría de Energía, Tech. Rep., 2018.
- [4] R. Evelia, “Diagnóstico del estado actual de los mares de México y su relación con el cambio climático a nivel de país, en particular su potencial para la mitigación de gases de efecto invernadero,” INECC-PNUD México, •, 2017, sexta Comunicación Nacional de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, 209 pp. México.
- [5] A. G. H. Erika Paola Garduño Ruiz, E. C. A. Yandy Rodríguez Cueto, Juan Francisco Bárcenas Graniel, Miguel Ángel Alatorre Mendieta, and V. M. R. M. y. R. S. C. Jessica Guadalupe Tobal Cupul, *Conversión de Energía Térmica Oceánica (otec) Estado del Arte*, 1st ed., G. J. y. F. A. Silva Rodolfo, Posada Gregorio, Ed. Campeche: CEMIE-OCÉANO, 2017. [Online]. Available: https://cemieoceanomx/downloads/libros/CEMIEOceano_{_}Gradiente_{_}Termico.pdf
- [6] SEMARNAT, “Mares mexicanos,” [online] <https://www.gob.mx/semarnat/es/articulos/mares-mexicanos?idiom=es>, consultado: 18 Enero 2020.
- [7] INEGI, “Pesca y acuicultura,” [online] <http://cuentame.inegi.org.mx/economia/primarias/pesca/default.aspx?tema=e>, consultado: 09/09/2020.

- [8] O. E. S. , “Una Visión Internacional para la Energía Oceánica 2017,” International Energy Agency, Lisbon, Portugal, Tech. Rep., 2017.
- [9] A. R. John, *Principles of Ocean Physics*, H. R. J. Dmowska Renata, Ed. San Diego, California: Academic Press, 1999, vol. 38, no. 1.
- [10] B. Marisela, “Estudio técnico y económico de una planta otec y sus usos secundarios en México.” Master’s thesis, Universidad Nacional Autónoma de México, 2016.
- [11] S. P. Neill, *Fundamentals of Ocean Renewable Energy Generating Electricity from the Sea.*, J. Hayton and Z. Raquel, Eds. London: Academic Press, Elsevier, 2018, no. June.
- [12] N. Khan, A. Kalair, N. Abas, and A. Haider, “Review of ocean tidal, wave and thermal energy technologies,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 72, no. October 2015, pp. 590–604, 2017. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.079>
- [13] M. T. García-Verdugo Andrés, Algarabide Cristian, Gil Guillermo, San José Miguel T., “La fuerza de Coriolis: mitos y evidencias,” *Boletín das ...*, no. 1, pp. 1–10, 2012. [Online]. Available: <http://www.encia.org/files/boletins/76/FQ{-}La{-}fuerza{-}de{-}Coriolis.pdf>
- [14] [online] <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3b/Gaspard-Gustave{-}de{-}Coriolis.jpg>, consultado: 21 Enero 2020.
- [15] U. U. de la República, “8. Circulación general de los océanos,” *Facultad de Ciencias*, 2010, consultado: 23 Enero 2020. [Online]. Available: <http://meteo.fisica.edu.uy/Materias/climatologia/teorico{-}climatologia{-}2010/Tema8Clima2010.pdf>
- [16] S. H. J. Talley Lynne D., Pickard L. George, Emery J. William, *Descriptive Physical Oceanography an introduction.*, 6th ed. Elsevier, 2011.
- [17] “Coeficiente de mareas,” [online] <https://tablademareas.com/mareas/coeficiente-marea>, consultado: 25 Enero 2020.
- [18] M. T. Ismael, “Línea estratégica: corrientes y mareas,” Centro Mexicano de Innovación en Energía-Océano, Tech. Rep., 2018.
- [19] W. E. Council, “World Energy Resources Marine Energy 2016,” WEC, Tech. Rep., 2016.

- [20] C. Beccario, "earth," [online] <https://earth.nullschool.net/>, 2020, consultado: 25 Enero 2020.
- [21] "Desembocadura de un río – qué es, cómo se forma y tipos," [online] <https://www.curiosfera.com/la-desembocadura-rio-tipos-caracteristicas/>, 2020, consultado: 12 Mayo 2020.
- [22] J. R. J. Roger H. Charlie, *Ocean Energies, Environmental, Economic and Technological aspects of alternative power sources.*, 1st ed. Amsterdam, The Netherlands.: ELSEVIER, 1993, vol. 56.
- [23] W. A. B. John A. Duffie, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4th ed. New Jersey: WILEY, 2013. [Online]. Available: <http://eu.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-0470873663.html>
- [24] D. Ignacio and S. Blanco, "Protocolo de Investigaci ´ on," *IER,UNAM*, 2012.
- [25] "Descargue mapas de recursos solares y datos gis para más de 180 países," [online] <https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/world>, consultado: 2 Febrero 2020.
- [26] Y. Cengel and M. Boles, *TERMODINÁMICA DE CENGEL 8va EDICION*, 8th ed., P. E. Roig Vázquez, Ed. Ciudad de México: Mc Graw Hill, 2014.
- [27] P. Dessne, L. Golmen, S. Banerjee, L. Duckers, and R. Blanchard, "Otec Matters," University of Borås, Suecia, Tech. Rep., 2015.
- [28] P. Ahmadi, I. Dincer, and M. A. Rosen, "Performance Assessment of a Novel Solar and Ocean Thermal Energy Conversion Based Multigeneration System for Coastal Areas," *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 137, no. 1, p. 011013, 2014. [Online]. Available: <http://solarenergyengineering.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?doi=10.1115/1.4028241>
- [29] H. Yuan, P. Zhou, and N. Mei, "Performance analysis of a solar-assisted OTEC cycle for power generation and fishery cold storage refrigeration," *Applied Thermal Engineering*, vol. 90, pp. 809–819, 2015. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.07.072>
- [30] S. Park, W. Chun, and N. Kim, "Simulated production of electric power and desalination using Solar-OTEC hybrid system," *International Journal of Energy Research*, vol. 41, no. 5, pp. 637–649, 2017.

- [31] Luis A. Vega, "Ocean Thermal Energy Conversion," *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*, no. August, pp. 7296–7328, 2012.
- [32] "Hawái inauguró la primera planta de energía térmica oceánica de los estados unidos." consultado: 4 Febrero 2020.
- [33] K. A. Finney, "Ocean Thermal Energy Conversion," *Guelph Engineering Journal*, vol. 1, no. 1, pp. 17–23, 2008.
- [34] N. J. Kim, K. C. Ng, and W. Chun, "Using the condenser effluent from a nuclear power plant for Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC)," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 36, no. 10, pp. 1008–1013, 2009. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2009.08.001>
- [35] 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. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.086>
- [36] S. Khanmohammadi, M. M. Baseri, P. Ahmadi, A. A. Al-Rashed, and M. Afrand, "Proposal of a novel integrated ocean thermal energy conversion system with flat plate solar collectors and thermoelectric generators: Energy, exergy and environmental analyses," *Journal of Cleaner Production*, vol. 256, p. 120600, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120600>
- [37] 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, p. 20, 2018. [Online]. Available: <http://www.mdpi.com/2077-1312/6/1/20>
- [38] "¿qué es machine learning? una definición," [online] <https://www.aprendemachinellearning.com/que-es-machine-learning/>, consultado: 7 Febrero 2020.
- [39] Y. Zhang, *New Advances in Machine Learning*. BoD–Books on Demand, 2010.
- [40] S. George, "The 5 clustering algorithms data scientists need to know," [online] <https://towardsdatascience.com/>

the-5-clustering-algorithms-data-scientists-need-to-know-a36d136ef68, consultado:10 Febrero 2020.

- [41] “K-means en python paso a paso,” [online] <https://www.aprendemachinelearning.com/k-means-en-python-paso-a-paso/>, consultado:10 Febrero 2020.
- [42] T. N. O. P. P. N. , “Hycom,” [online] <https://www.hycom.org/>, citado:19 Enero 2020.
- [43] N. C. F. E. I. , “World ocean database,” [online] <https://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOD/pr{ }wod.html>, consultado: 17 Enero 2020.
- [44] s. l. , “sklean.cluster.kmeans,” [online] <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.cluster.KMeans.html>, consultado:16 Enero 2020.
- [45] E.-D. H., “Appendix a-thermodynamic properties-sea water,” 1999.
- [46] C. N. d. M. , “Hora oficial,” [online] <https://www.cenam.mx/hora{ }oficial/Default.aspx>, consultado:20 Enero 2020.

Appendices

Apéndice A

Histogramas de criterios de clusterización.

200 APÉNDICE A. HISTOGRAMAS DE CRITERIOS DE CLUSTERIZACIÓN.

A.1. Primer criterio.

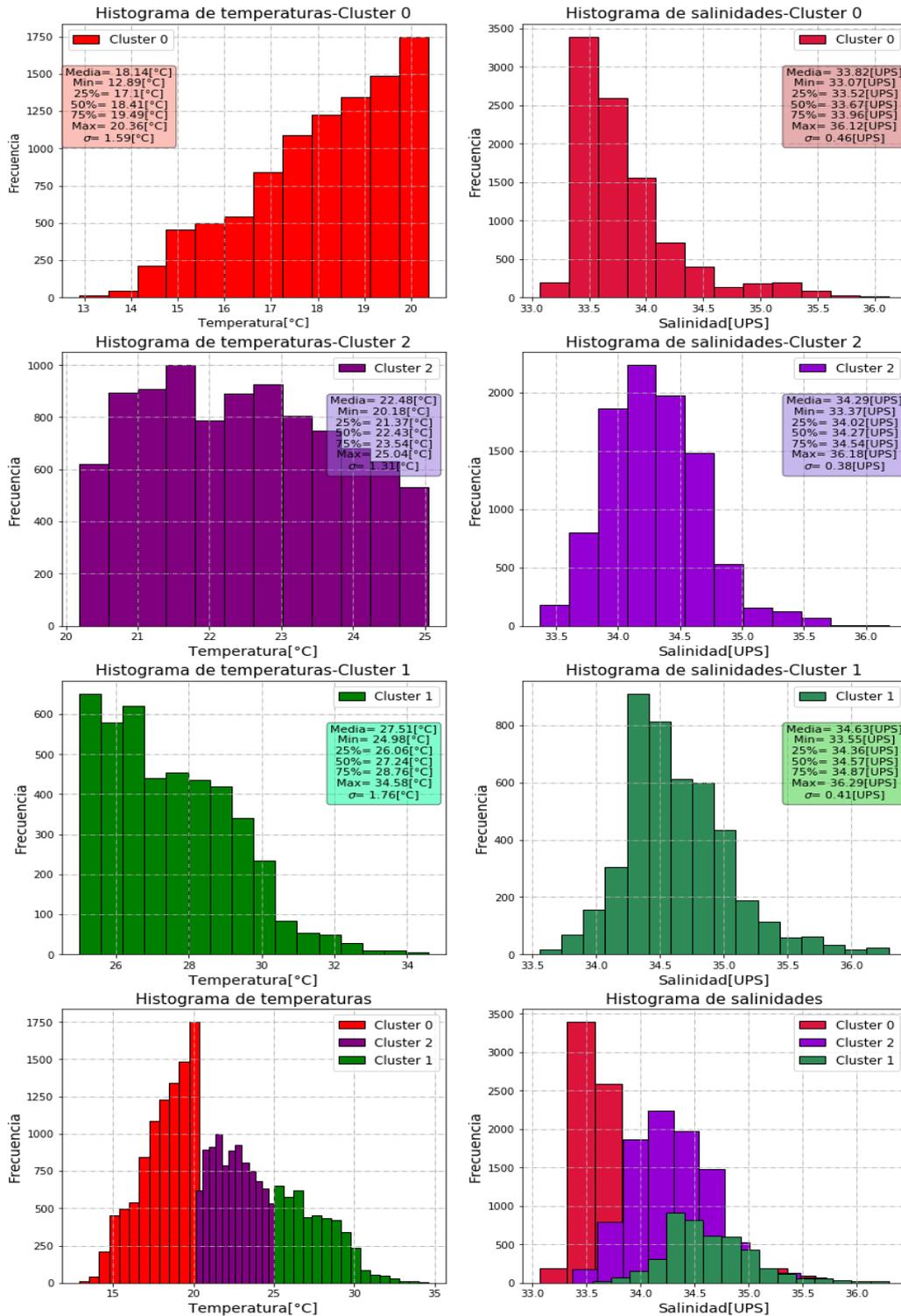


Figura A.1: Histogramas de cada cluster ajustado a los datos de temperatura y salinidad del estudio regional climatológico del pacífico nororiental de la NOAA (1995-2004).

202APÉNDICE A. HISTOGRAMAS DE CRITERIOS DE CLUSTERIZACIÓN.

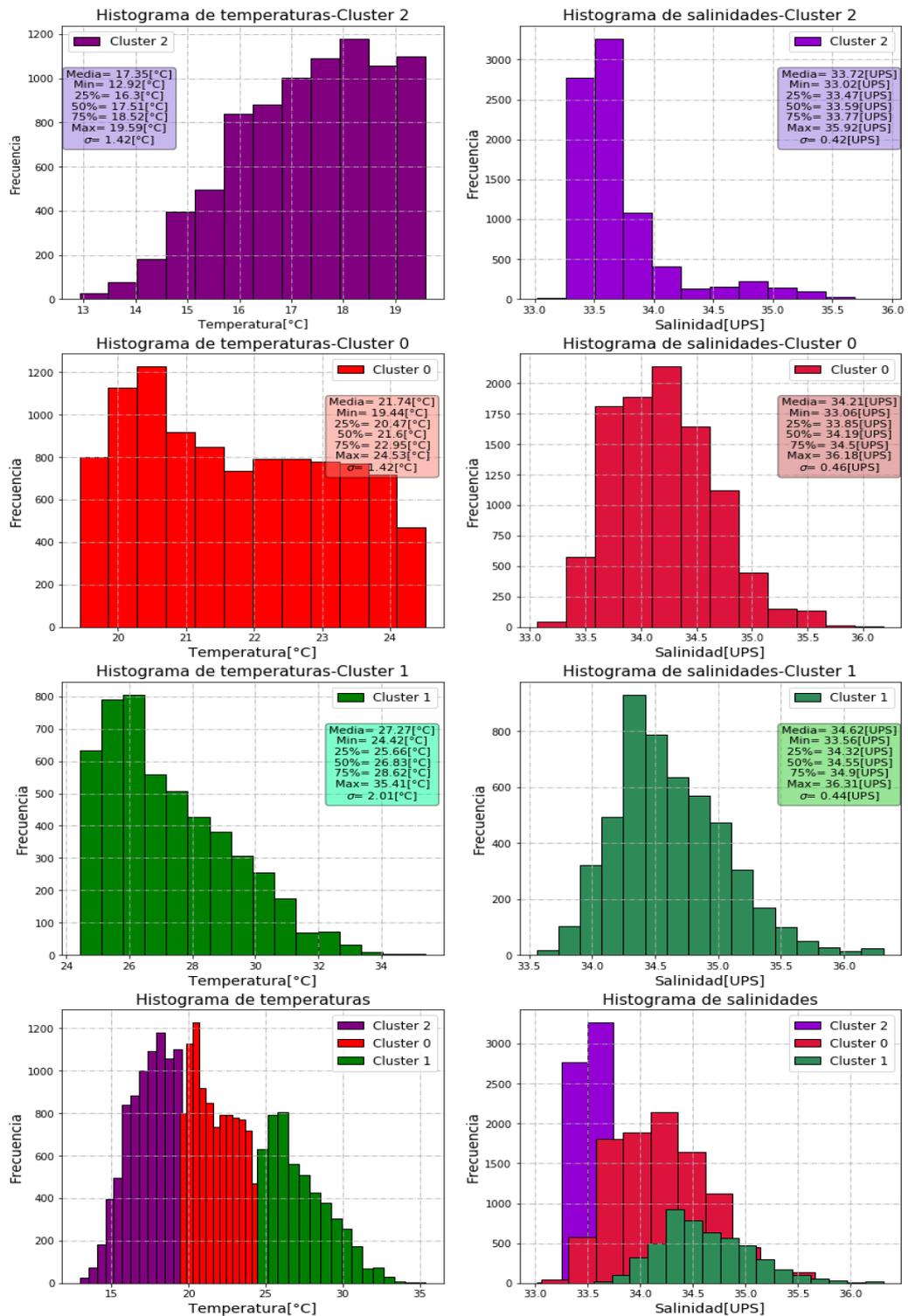


Figura A.2: Histogramas de cada cluster ajustado a los datos de temperatura y salinidad del estudio regional climatológico del pacífico nororiental de la NOAA (2005-2012).

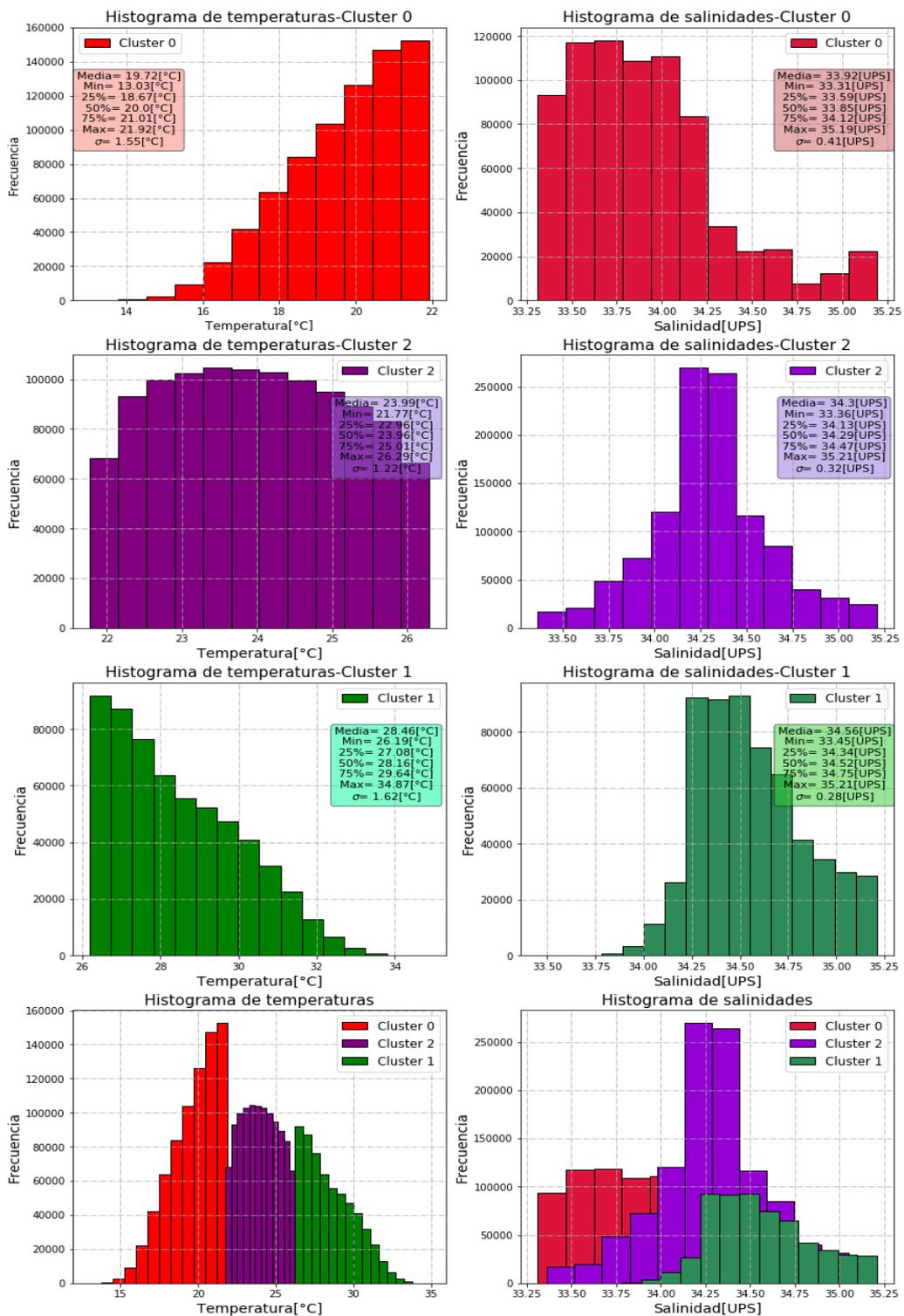


Figura A.3: Histogramas de cada cluster ajustado a los datos seleccionados para el noroeste de México.

204 APÉNDICE A. HISTOGRAMAS DE CRITERIOS DE CLUSTERIZACIÓN.

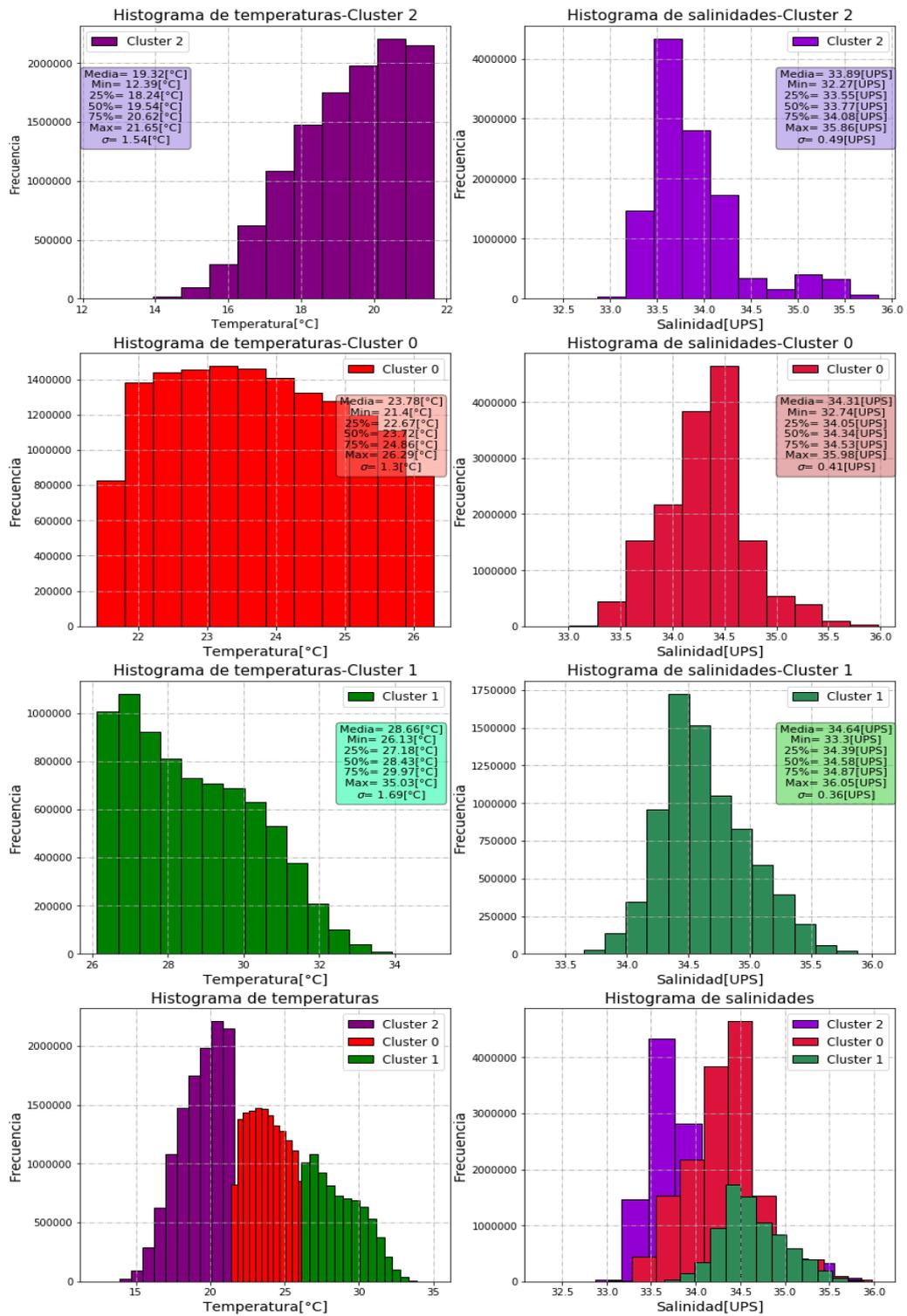


Figura A.4: Histogramas de cada cluster ajustado a los datos de temperatura y salinidad superficial del servicio HYCOM.

A.2. Segundo criterio.

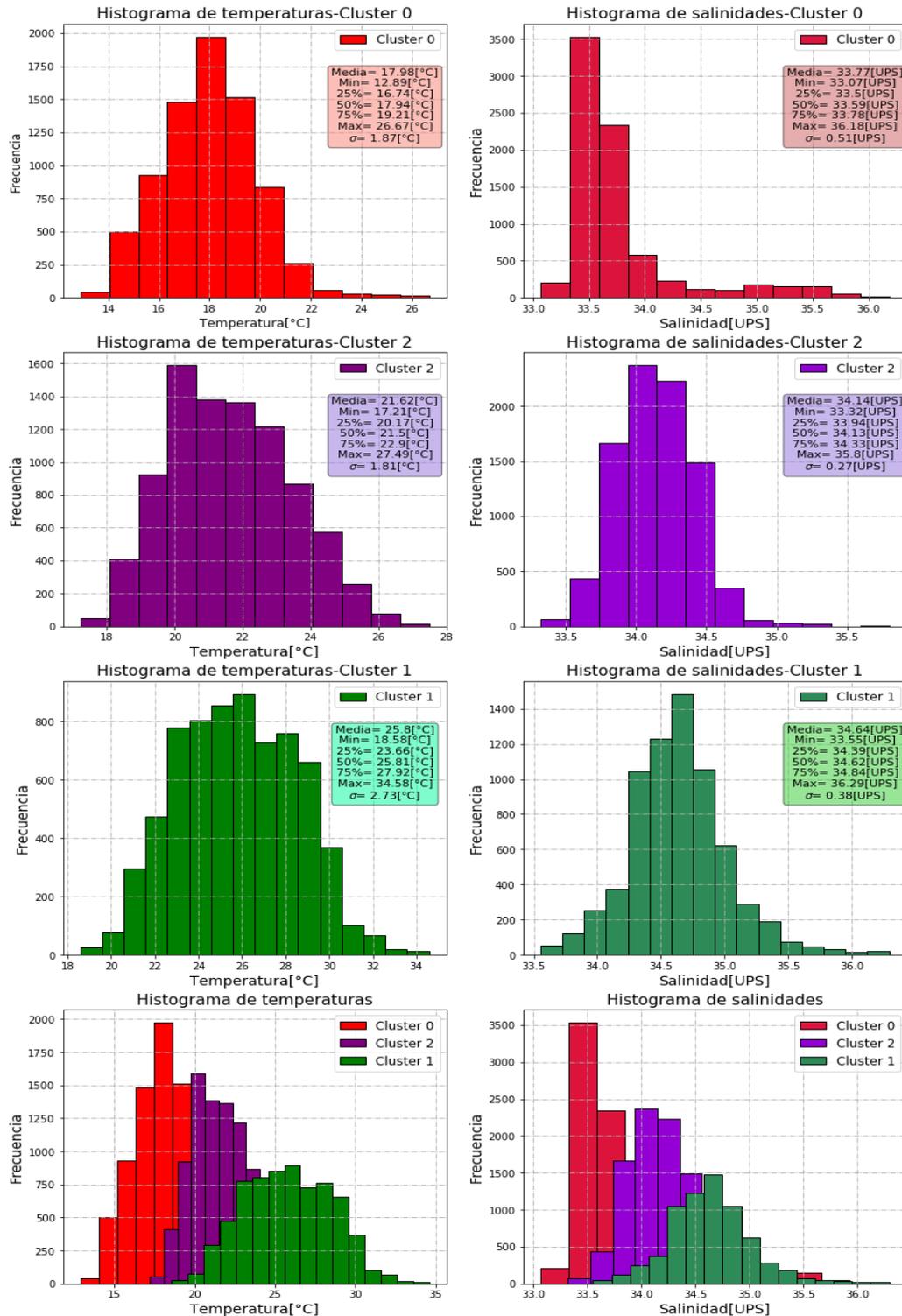


Figura A.5: Histogramas de cada cluster ajustado a los datos de temperatura y salinidad del estudio regional climatológico del pacífico nororiental de la NOAA (1995-2004).

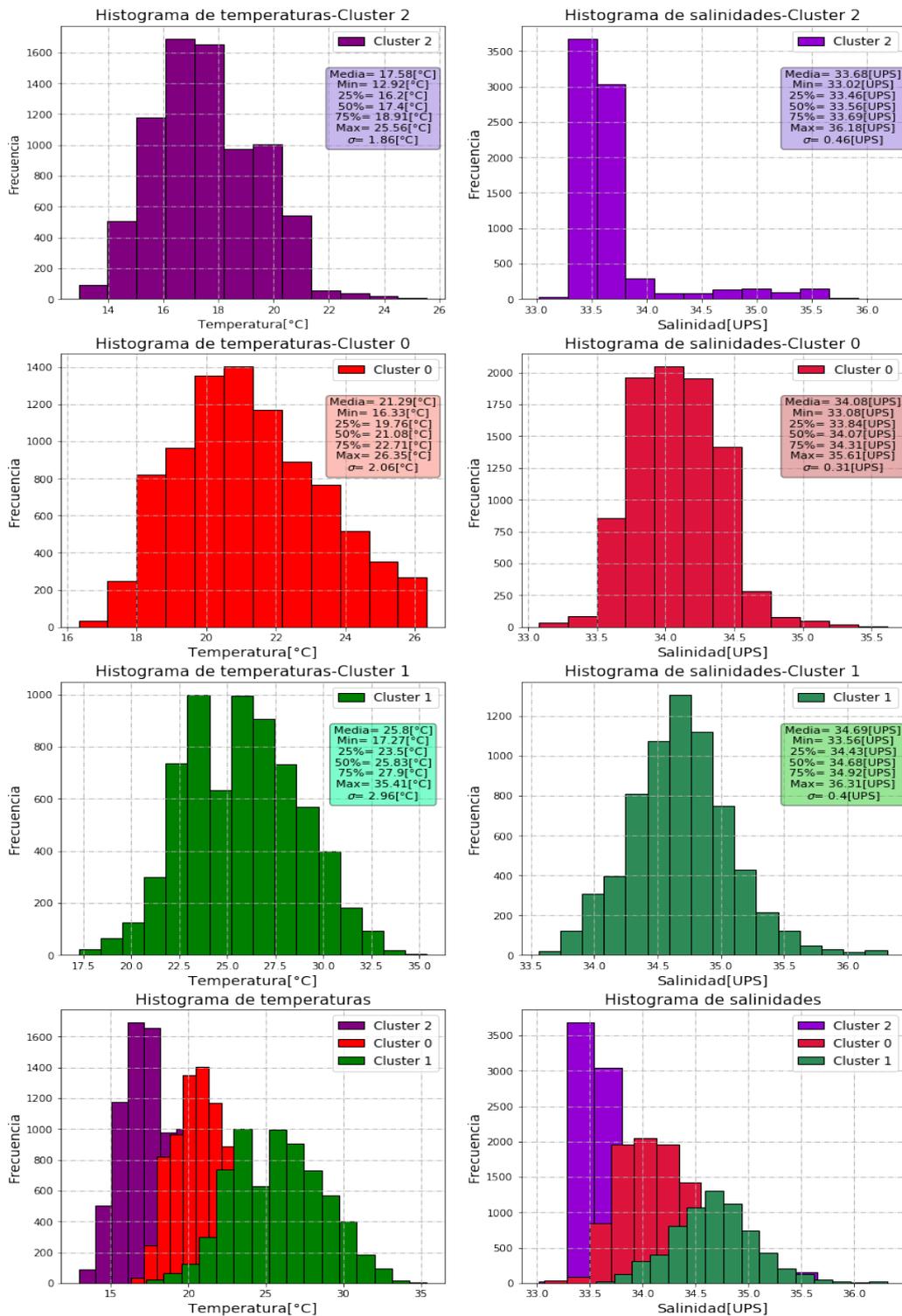


Figura A.6: Histogramas de cada cluster ajustado a los datos de temperatura y salinidad del estudio regional climatológico del pacífico nororiental de la NOAA (2005-2012).

208 APÉNDICE A. HISTOGRAMAS DE CRITERIOS DE CLUSTERIZACIÓN.

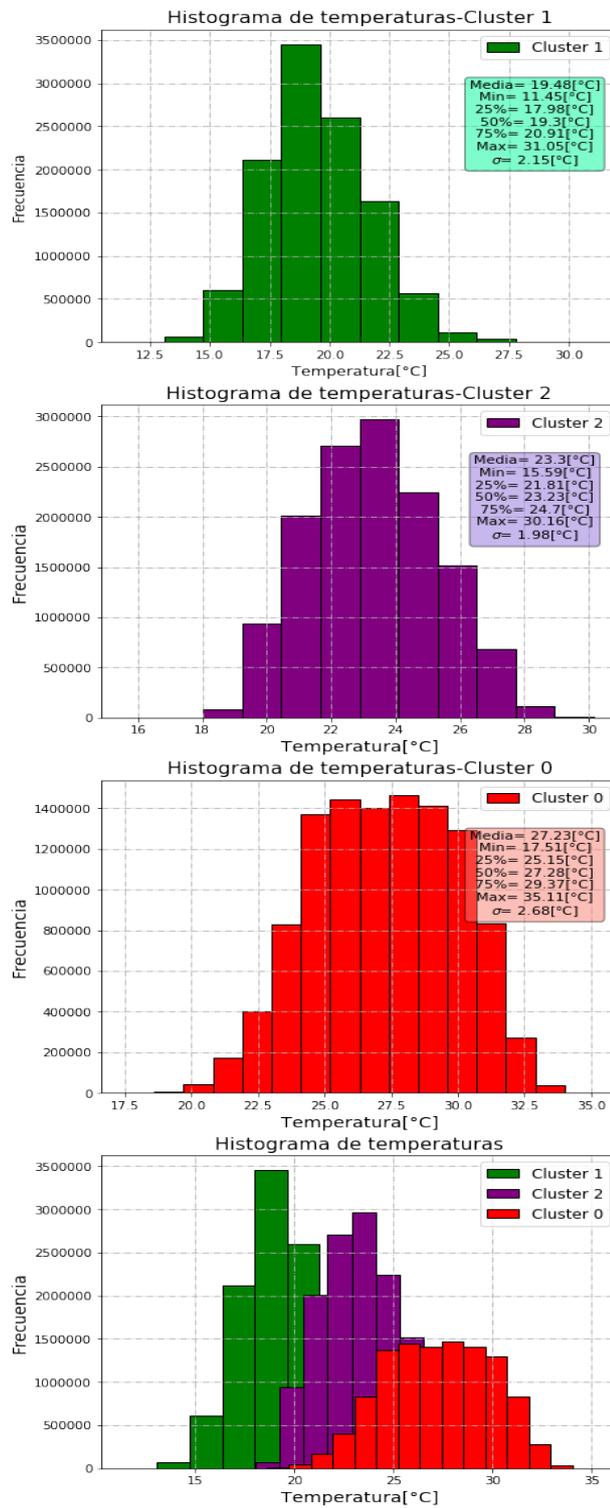


Figura A.7: Histogramas de cada cluster ajustado a los datos de temperatura superficial del mar obtenidos del servidor HYCOM.

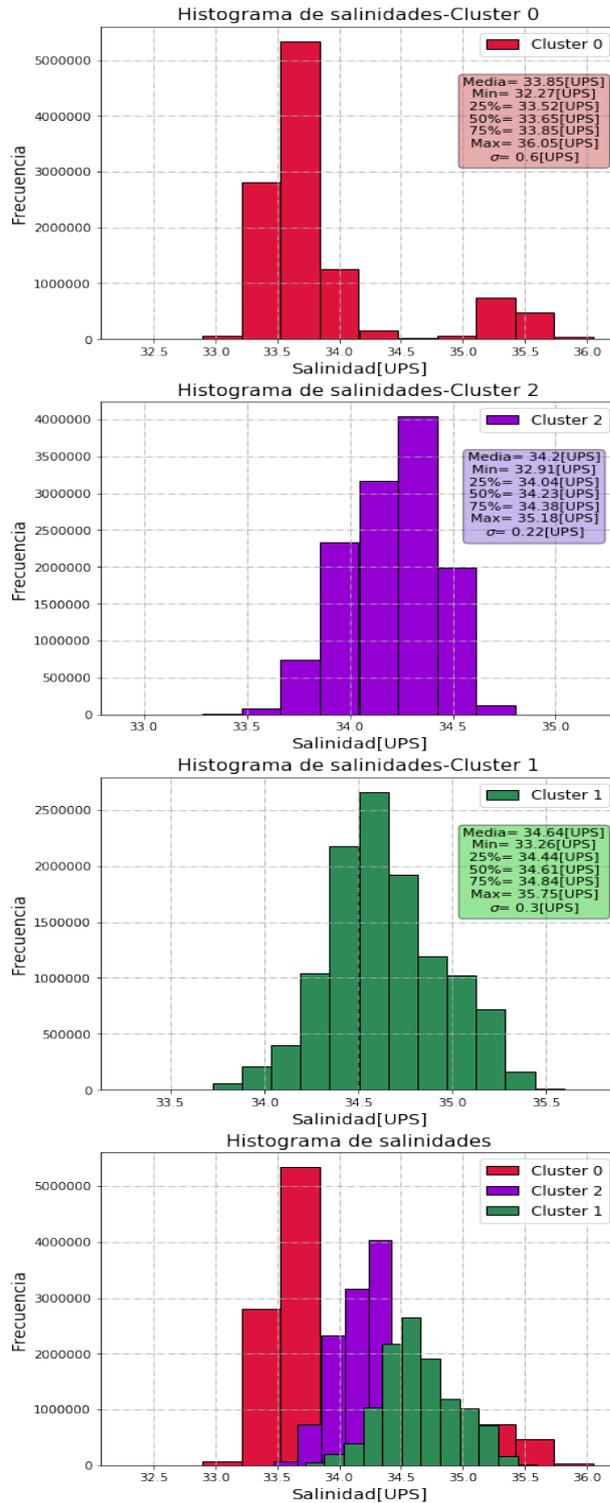


Figura A.8: Histogramas de cada cluster ajustado a los datos de salinidad superficial del mar obtenidos del servidor HYCOM.

210 APÉNDICE A. HISTOGRAMAS DE CRITERIOS DE CLUSTERIZACIÓN.

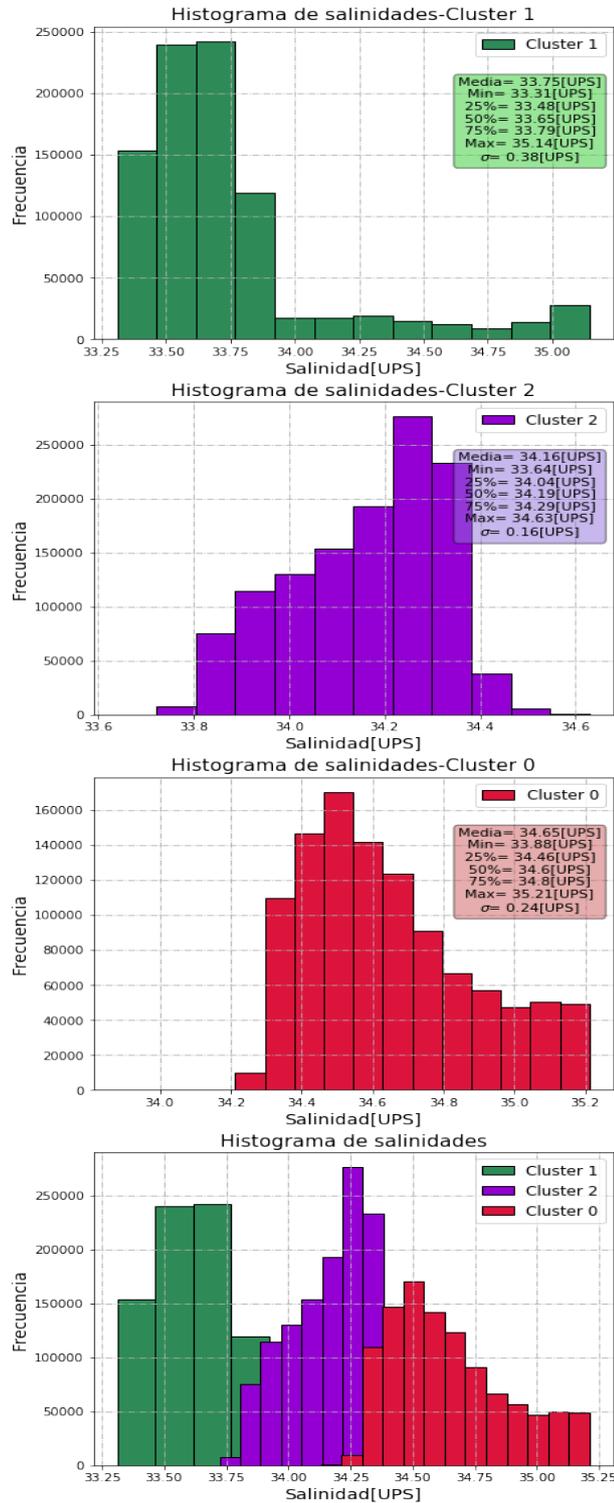


Figura A.9: Histogramas de cada cluster ajustado a los datos de salinidad del estudio mundial de la NOAA, analizando únicamente el noroeste de México.

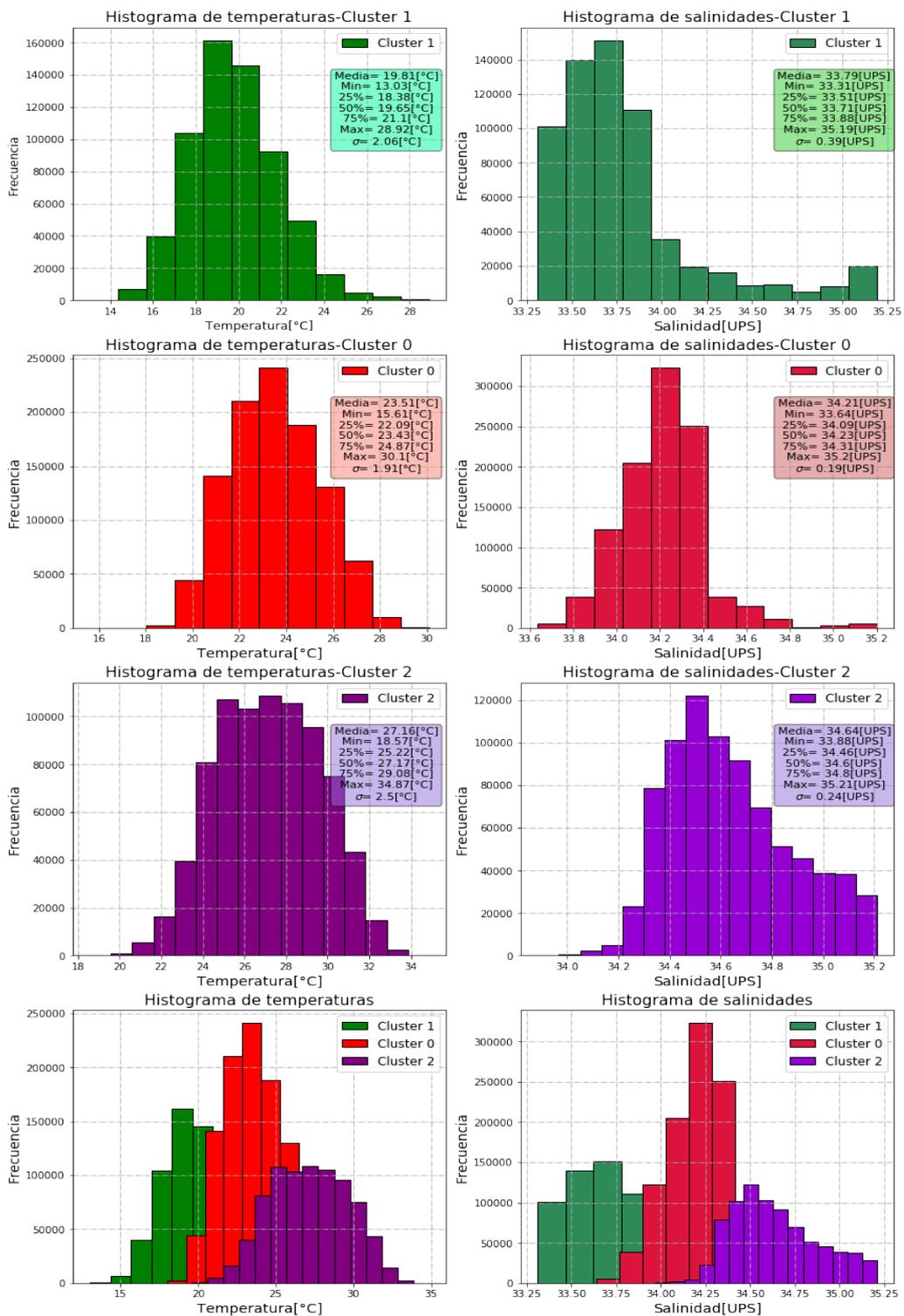


Figura A.10: Histogramas de cada cluster ajustado a los datos seleccionados para el noroeste de México.

212 APÉNDICE A. HISTOGRAMAS DE CRITERIOS DE CLUSTERIZACIÓN.

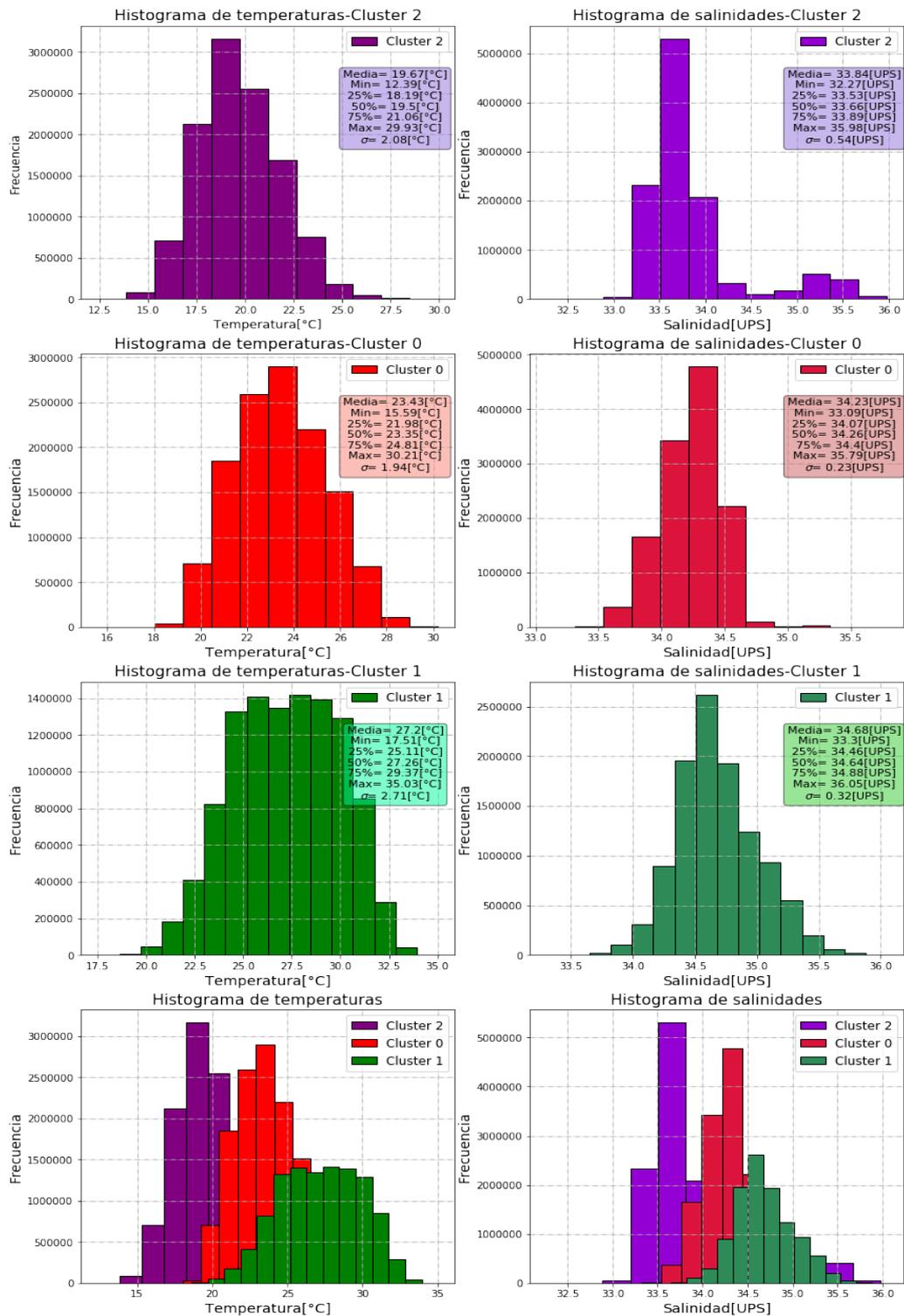


Figura A.11: Histogramas de cada cluster ajustado a los datos de temperatura y salinidad superficial del mar que resultaron de la unión de los dos estudios obtenidos del servidor HYCOM.

Apéndice B

Propiedades termodinámicas del agua de mar

B.1. Densidad.

La correlación de la densidad está dada por la siguiente fórmula [45]:

$$\rho = 10^3(A_1F_1 + A_2F_2 + A_3F_3 + A_4F_4) \quad (\text{B.1})$$

tal que:

$$B = \frac{\frac{2X}{1000} - 150}{150} \quad (\text{B.2})$$

$$G_1 = 0.5 \quad (\text{B.3})$$

$$G_2 = B \quad (\text{B.4})$$

$$G_3 = 2B^2 - 1 \quad (\text{B.5})$$

$$A_1 = 4.032219G_1 + 0.115313G_2 + 3.26 \times 10^{-4}G_3 \quad (\text{B.6})$$

$$A_2 = -0.108199G_1 + 1.571 \times 10^{-3}G_2 - 4.23 \times 10^{-4}G_3 \quad (\text{B.7})$$

$$A_3 = -0.012247G_1 + 1.74 \times 10^{-3}G_2 - 9 \times 10^{-6}G_3 \quad (\text{B.8})$$

$$A_4 = 6.92 \times 10^{-4}G_1 - 8.7 \times 10^{-4} \quad (\text{B.9})$$

$$A = \frac{2T - 200}{160} \quad (\text{B.10})$$

$$F_1 = 0.5, F_2 = A, F_3 = 2A^2 - 1, F_4 = 4A^3 - 3A \quad (\text{B.11})$$

En donde:

ρ es la densidad del agua de mar en (kg/m^3), X es la salinidad del agua expresada en partes por millón es decir cuántos gramos de sal por cada kilogramo de agua hay ($\text{mg}_{\text{sal}}/\text{L}_{\text{agua}}$) y T es la temperatura del agua de mar en $^{\circ}\text{C}$. Esta correlación es válida dentro del rango de valores de: $0 \leq X \leq 160000$ ppm y $10 \leq T \leq 180^{\circ}\text{C}$.

En la siguiente figura se muestra una tabla de valores de la variación de la densidad del agua de mar ((kg/m^3)) en función de la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y de la salinidad (ppm).

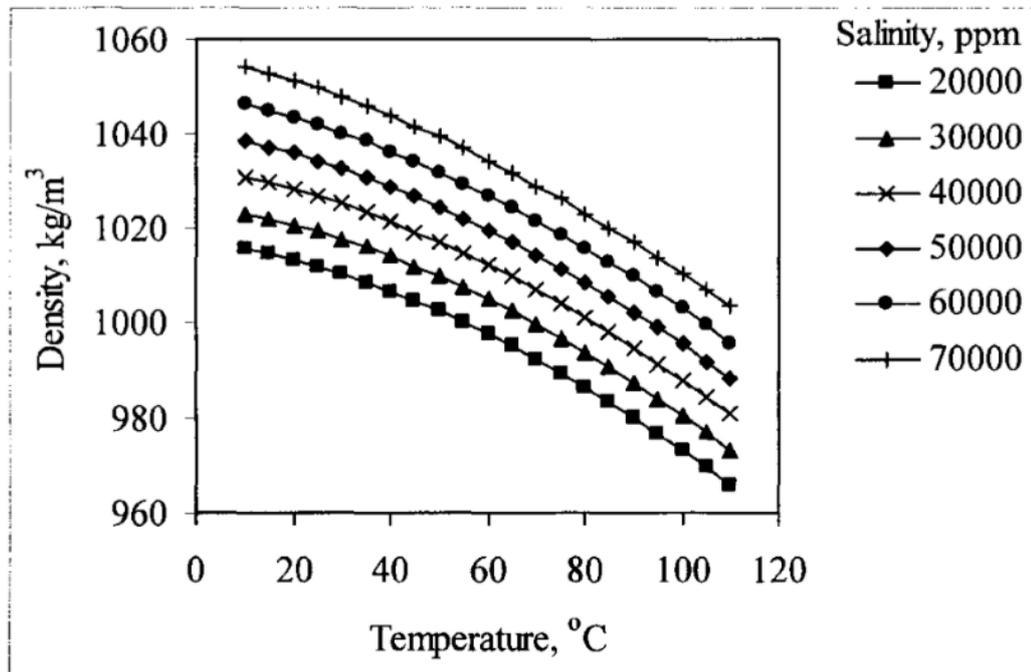


Figura B.1: Variación de la densidad del agua de mar en función de la temperatura y salinidad [45].

T (°C)	Salinity ppm						
	10000	20000	30000	40000	50000	60000	70000
10	1008	1015	1023	1031	1038	1046	1054
15	1007	1014	1022	1030	1037	1045	1053
20	1006	1013	1021	1028	1036	1044	1051
25	1004	1012	1019	1027	1034	1042	1050
30	1003	1010	1018	1025	1033	1040	1048
35	1001	1008	1016	1023	1031	1038	1046
40	999	1007	1014	1021	1029	1036	1044
45	997	1004	1012	1019	1027	1034	1042
50	995	1002	1010	1017	1024	1032	1039
55	993	999.9	1007	1015	1022	1029	1037
60	990	997.5	1005	1012	1020	1027	1034
65	988	994.9	1002	1010	1017	1024	1032
70	985	992.2	999.5	1007	1014	1022	1029
75	982	989.3	996.6	1004	1011	1019	1026
80	979	986.3	993.7	1001	1008	1016	1023
85	976	983.2	990.6	997.9	1005	1013	1020
90	973	980	987.4	994.7	1002	1010	1017
95	969	976.7	984	991.4	998.8	1006	1014
100	966	973.2	980.6	988	995.4	1003	1010
105	962	969.6	977	984.4	991.9	999.3	1007
110	958	965.9	973.3	980.8	988.3	995.7	1003

Figura B.2: Tabla de valores de la variación de la densidad en función de la temperatura y de la salinidad [45].

B.2. Calor específico.

Por otro lado, la correlación del calor específico a presión constante del agua de mar es la siguiente [45]:

$$C_p = (A + BT + CT^2 + DT^3) \quad (\text{B.12})$$

en donde los valores de A,B,C y D están en función del agua de mar de la siguiente forma:

$$A = 4206.8 - 6.6197s + 1.2288x10^{-2}s^2 \quad (\text{B.13})$$

$$B = -1.1262 + 5.4178X10^{-2}s - 2.2719X10^{-4}s^2 \quad (\text{B.14})$$

216 APÉNDICE B. PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DEL AGUA DE MAR

$$C = 1.2026 \times 10^{-2} - 5.3566 \times 10^{-4} s + 1.8906 \times 10^{-6} s^2 \quad (\text{B.15})$$

$$D = 6.8777 \times 10^{-7} + 1.517 \times 10^{-6} s - 4.4268 \times 10^{-9} s^2 \quad (\text{B.16})$$

En donde las unidades de cada parámetro son:

$C_p \rightarrow (\text{kJ}/(\text{kg}^\circ\text{C}))$, $T \rightarrow ^\circ\text{C}$ y s es la salinidad del agua expresada en $\text{UPS} \rightarrow (\text{g}/\text{kg})$.

La correlación anterior es válida para los rango de salinidad de $20000 \leq s \leq 160000$ ppm y temperatura $20 \leq T \leq 180^\circ\text{C}$

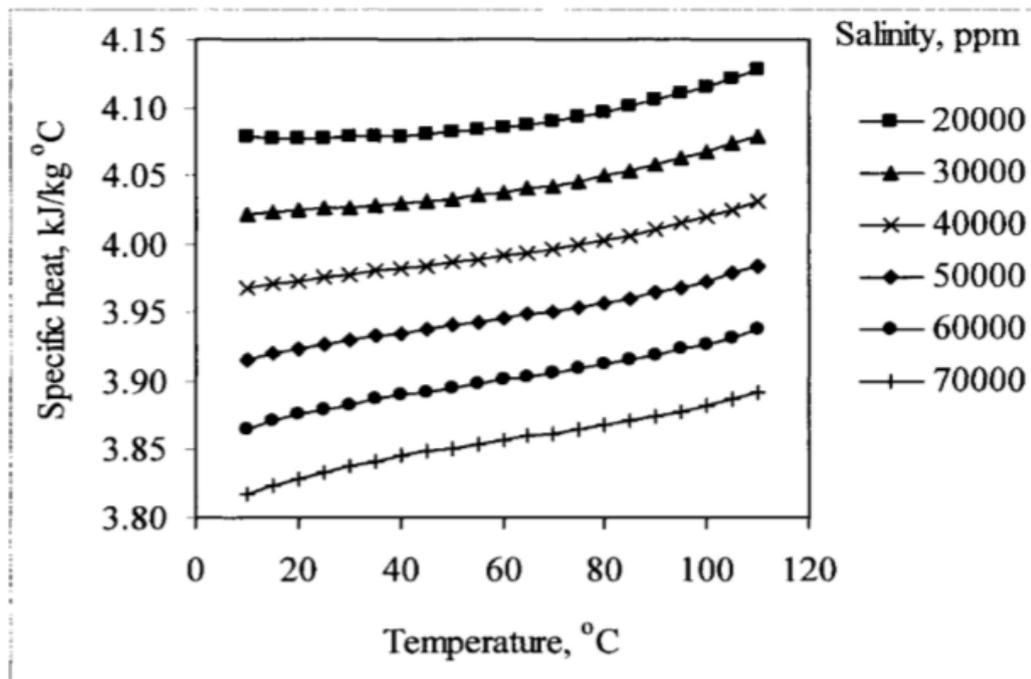


Figura B.3: Variación del calor específico del agua de mar en función de la temperatura y salinidad [45].

T (°C)	Salinity ppm						
	10000	20000	30000	40000	50000	60000	70000
10	4.14	4.078	4.022	3.968	3.916	3.866	3.818
15	4.13	4.078	4.023	3.971	3.92	3.871	3.824
20	4.13	4.078	4.025	3.973	3.923	3.875	3.829
25	4.13	4.078	4.026	3.976	3.927	3.879	3.834
30	4.13	4.078	4.027	3.978	3.93	3.883	3.838
35	4.13	4.078	4.029	3.98	3.933	3.887	3.842
40	4.13	4.079	4.03	3.982	3.935	3.89	3.845
45	4.13	4.08	4.032	3.984	3.938	3.893	3.849
50	4.13	4.082	4.033	3.986	3.94	3.895	3.851
55	4.13	4.083	4.035	3.989	3.943	3.898	3.854
60	4.13	4.085	4.038	3.991	3.945	3.901	3.857
65	4.14	4.087	4.04	3.994	3.948	3.903	3.86
70	4.14	4.09	4.043	3.997	3.951	3.906	3.862
75	4.14	4.093	4.046	4	3.954	3.909	3.865
80	4.15	4.097	4.05	4.003	3.957	3.912	3.868
85	4.15	4.101	4.053	4.007	3.961	3.915	3.871
90	4.15	4.105	4.058	4.011	3.964	3.919	3.874
95	4.16	4.11	4.062	4.015	3.969	3.923	3.878
100	4.17	4.116	4.068	4.02	3.973	3.927	3.882
105	4.17	4.122	4.073	4.025	3.978	3.932	3.887
110	4.18	4.129	4.08	4.031	3.984	3.937	3.892

Figura B.4: Tabla de valores de la variación del calor específico en función de la temperatura y de la salinidad [45].

Apéndice C

Tablas y gráficos de resultados de la simulación de calentadores solares en las playas de estudio.

C.1. Cabo San Lucas, Baja California Sur.

Estudio completo.																					
No. Calentadores	ΔT_{max} [°C]	Probabilidad $\Delta T \geq 20$ [°C]	Número de días con un $\Delta T \geq 20$ [°C] para distintos rangos operativos de un sistema SOTEC.																		
			0 h	0.5 h	1 h	1.5 h	2 h	2.5 h	3 h	3.5 h	4 h	4.5 h	5 h	5.5 h	6 h	6.5 h	7 h	7.5 h	8 h	8.5 h	9 h
Ecosun																					
5	18.354	0.000	1859	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	31.478	0.162	153	43	49	38	57	71	80	116	189	292	425	236	85	25	0	0	0	0	0
15	40.062	0.238	62	18	16	25	22	20	25	34	54	80	86	157	300	434	386	128	12	0	0
20	45.344	0.270	44	15	9	16	14	12	19	21	26	43	61	88	105	223	468	407	268	20	0
25	48.468	0.286	32	15	7	12	11	14	15	26	16	30	48	59	76	153	291	428	482	132	12
30	50.273	0.296	28	13	9	8	12	6	14	25	22	26	30	49	71	111	216	372	564	231	51
35	51.302	0.302	25	15	8	6	12	6	10	21	21	28	31	41	56	89	179	332	586	297	90
40	51.883	0.306	24	12	11	5	6	11	10	16	21	26	30	45	52	74	169	297	575	328	137
Heliocol																					
5	11.979	0.000	1859	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-
10	21.132	0.001	1831	7	5	12	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-
15	27.201	0.082	480	111	102	138	168	188	214	194	124	91	39	8	2	0	0	0	0	-	-
20	30.857	0.145	205	56	52	47	69	112	122	194	243	227	280	158	76	15	3	0	0	-	-
25	32.957	0.175	142	37	39	40	51	56	75	111	156	239	275	297	223	76	36	6	0	-	-
30	34.224	0.191	126	27	23	35	45	46	54	80	109	198	236	321	320	135	89	11	4	-	-
35	34.920	0.201	118	28	18	22	39	45	54	69	78	170	219	311	335	179	142	21	11	-	-
40	35.298	0.206	111	28	18	21	33	40	58	57	79	146	200	301	343	192	185	29	18	-	-

Cuadro C.1: Tabla de resultados de la simulación del calentamiento de agua superficial del mar de un arreglo de calentadores solares Ecosun/Heliocol interconectados en serie de 5 hasta 40 calentadores ubicados en Cabo San Lucas, Baja California Sur.

Año 2014																				
No. Calentadores	Probabilidad $\Delta T \geq 20[^\circ C]$	Número de días con un $\Delta T \geq 20[^\circ C]$ para distintos rangos operativos de un sistema SOTEC.																		
		0 h	0.5 h	1 h	1.5 h	2 h	2.5 h	3 h	3.5 h	4 h	4.5 h	5 h	5.5 h	6 h	6.5 h	7 h	7.5 h	8 h	8.5 h	9 h
Ecosun																				
5	0.000	365	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0.154	35	13	8	13	8	15	17	26	32	70	77	39	8	4	0	0	0	0	0
15	0.232	11	3	4	9	2	3	7	8	10	13	21	47	70	70	68	19	0	0	0
20	0.265	5	6	1	5	2	2	3	4	6	12	6	22	34	54	97	67	36	3	0
25	0.283	4	5	1	1	2	4	3	3	6	5	9	10	21	41	67	83	82	18	0
30	0.294	2	4	4	0	2	1	5	5	3	3	6	10	15	29	53	74	103	44	2
35	0.301	2	4	3	1	2	0	2	4	5	6	3	6	13	27	39	83	98	57	9
40	0.304	2	3	4	1	0	2	1	5	3	5	4	8	11	22	35	77	109	55	17
Heliocol																				
5	0.000	365	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-
10	0.000	362	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-
15	0.068	125	22	20	24	38	33	31	34	23	10	4	1	0	0	0	0	-	-	-
20	0.132	54	14	8	13	9	27	29	37	57	31	57	18	8	3	0	0	-	-	-
25	0.163	34	8	8	15	10	10	12	27	40	48	53	55	32	11	2	0	-	-	-
30	0.180	31	3	2	14	11	8	10	19	27	51	52	49	54	25	9	0	-	-	-
35	0.191	30	4	2	3	11	10	12	12	18	52	43	58	56	33	17	4	-	-	-
40	0.196	29	3	2	5	9	7	14	10	17	45	41	58	61	37	22	5	-	-	-

Cuadro C.2: Tabla de resultados de la simulación del calentamiento de agua superficial del mar durante el año 2014 de un arreglo de calentadores solares Ecosun/Heliocol interconectados en serie de 5 hasta 40 calentadores ubicados en Cabo San Lucas, Baja California Sur.

Año 2015																					
No. Calentadores	Probabilidad $\Delta T \geq 20[^\circ C]$	Número de días con un $\Delta T \geq 20[^\circ C]$ para distintos rangos operativos de un sistema SOTEC.																			
		0 h	0.5 h	1 h	1.5 h	2 h	2.5 h	3 h	3.5 h	4 h	4.5 h	5 h	5.5 h	6 h	6.5 h	7 h	7.5 h	8 h	8.5 h	9 h	9.5 h
Ecosun																					
5	0.000	365	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-
10	0.137	48	11	18	9	17	18	21	29	49	48	60	29	4	4	0	0	0	0	0	-
15	0.216	22	7	3	7	8	8	4	7	16	20	18	38	72	68	52	15	0	0	0	-
20	0.250	18	3	2	3	5	5	7	5	7	6	19	29	18	44	101	62	30	1	0	-
25	0.268	13	7	0	2	2	4	3	13	4	8	12	17	17	35	59	69	82	17	1	-
30	0.277	12	7	0	2	0	2	4	7	9	7	11	9	21	26	48	73	99	25	3	-
35	0.283	11	7	1	1	1	1	4	6	6	9	13	7	18	19	46	65	111	32	7	-
40	0.287	11	5	2	2	1	1	3	4	5	8	15	8	15	17	44	61	110	39	14	-
Heliocol																					
5	0.000	365	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-
10	0.000	364	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-
15	0.058	141	29	26	28	35	24	27	27	14	11	2	1	0	0	0	0	0	-	-	-
20	0.118	65	13	16	11	23	35	25	35	49	30	39	17	7	0	0	0	0	-	-	-
25	0.149	45	10	12	8	17	15	20	32	41	41	49	40	25	9	1	0	0	-	-	-
30	0.166	42	8	5	9	14	12	11	20	33	48	42	54	46	12	9	0	0	-	-	-
35	0.175	37	11	6	5	10	14	14	13	24	46	39	57	51	21	16	1	0	-	-	-
40	0.181	36	9	6	5	8	12	16	15	19	39	41	57	52	28	19	2	1	-	-	-

Cuadro C.3: Tabla de resultados de la simulación del calentamiento de agua superficial del mar durante el año 2015 de un arreglo de calentadores solares Ecosun/Heliocol interconectados en serie de 5 hasta 40 calentadores ubicados en Cabo San Lucas, Baja California Sur.

Año 2016																				
No. Calentadores	Probabilidad $\Delta T \geq 20[^\circ C]$	Número de días con un $\Delta T \geq 20[^\circ C]$ para distintos rangos operativos de un sistema SOTEC.																		
		0 h	0.5 h	1 h	1.5 h	2 h	2.5 h	3 h	3.5 h	4 h	4.5 h	5 h	5.5 h	6 h	6.5 h	7 h	7.5 h	8 h	8.5 h	9 h
Ecosun																				
5	0.000	365	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-
10	0.175	16	4	4	5	11	15	17	18	39	70	96	52	16	2	0	0	0	0	-
15	0.248	8	1	2	3	2	2	4	4	7	16	17	32	61	103	76	26	1	0	-
20	0.279	6	2	2	1	2	1	0	4	3	7	11	11	18	55	97	91	52	2	-
25	0.296	5	0	1	4	1	2	1	1	2	4	4	11	6	37	65	105	85	27	-
30	0.306	4	0	2	2	3	0	0	4	2	3	3	6	8	24	47	89	111	36	-
35	0.313	4	0	1	1	3	2	0	4	2	1	4	6	7	14	37	71	125	53	-
40	0.316	4	0	1	1	1	2	1	2	5	1	2	8	7	7	37	66	122	64	-
Heliocol																				
5	0.000	365	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-
10	0.000	363	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-
15	0.091	58	27	18	28	36	49	60	36	29	21	3	0	0	0	0	0	-	-	-
20	0.159	18	6	13	2	14	22	26	47	51	55	58	30	22	1	0	0	-	-	-
25	0.189	14	4	2	8	6	8	18	18	29	61	66	62	44	13	12	0	-	-	-
30	0.205	14	2	2	3	9	5	6	18	16	41	66	73	64	17	25	3	1	-	-
35	0.214	14	1	3	1	9	4	4	18	11	31	57	74	68	30	30	8	2	-	-
40	0.219	11	2	4	1	8	5	5	8	17	25	48	76	71	35	35	11	3	-	-

Cuadro C.4: Tabla de resultados de la simulación del calentamiento de agua superficial del mar durante el año 2016 de un arreglo de calentadores solares Ecosun/Heliocol interconectados en serie de 5 hasta 40 calentadores ubicados en Cabo San Lucas, Baja California Sur.

Año 2017																					
No. Calentadores	Probabilidad $\Delta T \geq 20[^\circ\text{C}]$	Número de días con un $\Delta T \geq 20[^\circ\text{C}]$ para distintos rangos operativos de un sistema SOTEC.																			
		0 h	0.5 h	1 h	1.5 h	2 h	2.5 h	3 h	3.5 h	4 h	4.5 h	5 h	5.5 h	6 h	6.5 h	7 h	7.5 h	8 h	8.5 h	9 h	9.5 h
Ecosun																					
5	0.000	365	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-
10	0.180	12	5	7	2	9	11	12	21	37	59	118	46	25	1	0	0	0	0	0	-
15	0.253	6	4	1	1	2	3	4	5	8	12	11	19	51	110	106	21	1	0	0	-
20	0.284	5	2	0	2	2	1	2	3	2	7	11	11	8	31	109	111	58	0	0	-
25	0.299	5	1	1	0	3	1	1	4	0	3	12	9	8	11	61	94	129	21	1	-
30	0.308	5	1	1	0	2	1	1	1	3	3	5	11	8	11	36	66	159	49	2	-
35	0.314	3	3	1	0	1	2	1	1	1	4	3	10	7	10	23	60	153	73	9	-
40	0.318	2	4	1	0	0	3	1	1	1	3	4	8	7	10	21	46	149	85	19	-
Heliocol																					
5	0.000	365	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-
10	0.001	360	2	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-
15	0.098	48	21	16	34	32	48	60	54	26	19	7	0	0	0	0	0	0	-	-	-
20	0.162	15	10	6	5	14	17	23	41	52	61	69	39	13	0	0	0	0	-	-	-
25	0.193	12	4	5	3	5	13	16	11	26	56	63	81	50	16	4	0	0	-	-	-
30	0.209	10	4	4	3	2	9	14	12	15	27	43	91	87	29	15	0	0	-	-	-
35	0.218	9	5	1	6	1	7	8	13	13	17	45	72	96	43	27	2	0	-	-	-
40	0.223	8	6	1	4	3	5	7	12	13	15	39	66	96	46	40	3	1	-	-	-

Cuadro C.5: Tabla de resultados de la simulación del calentamiento de agua superficial del mar durante el año 2017 de un arreglo de calentadores solares Ecosun/Heliocol interconectados en serie de 5 hasta 40 calentadores ubicados en Cabo San Lucas, Baja California Sur.

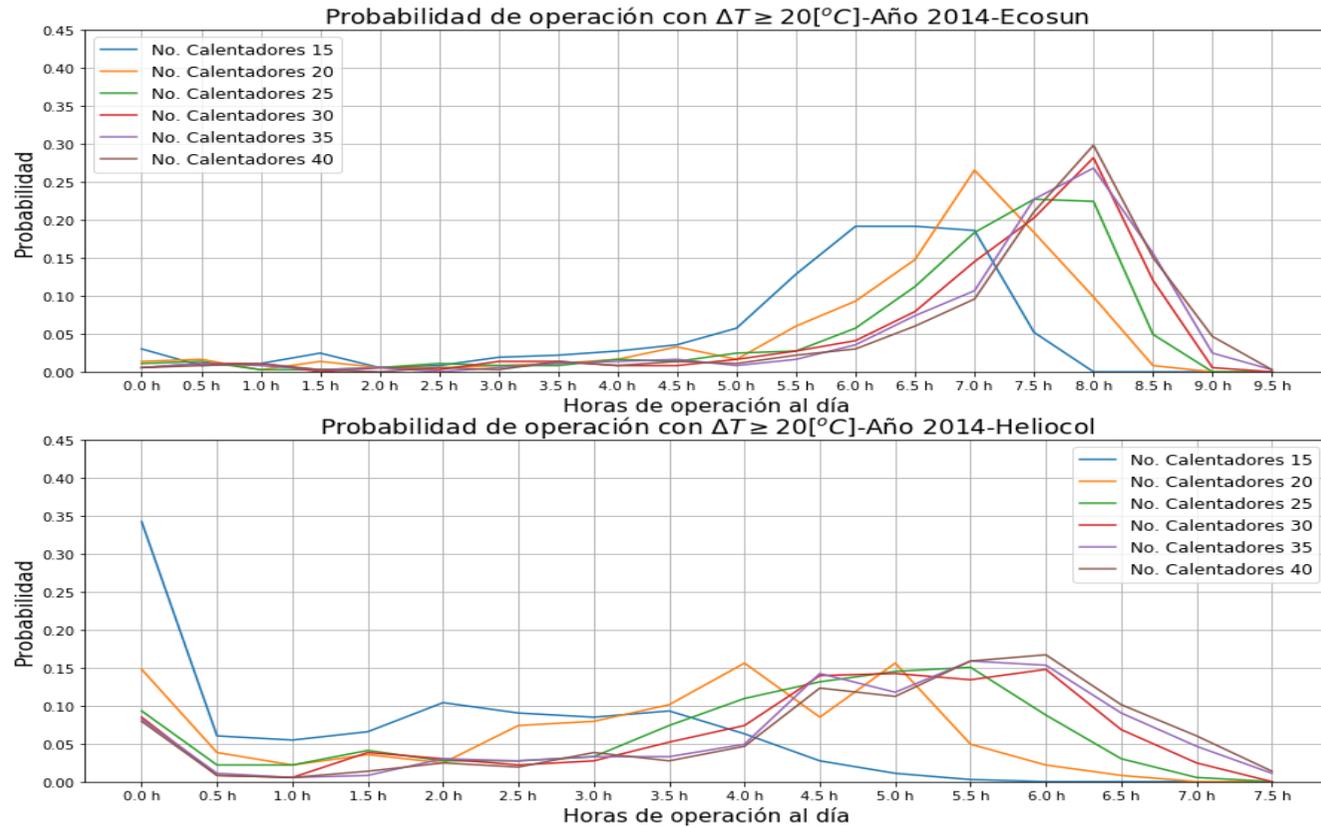


Figura C.1: Funciones de probabilidad para distintos rangos de operación al día durante el 2014 de arreglos en serie desde 15 hasta 40 calentadores solares Ecosun o Heliocol instalados en Cabo San Lucas, Baja California Sur.

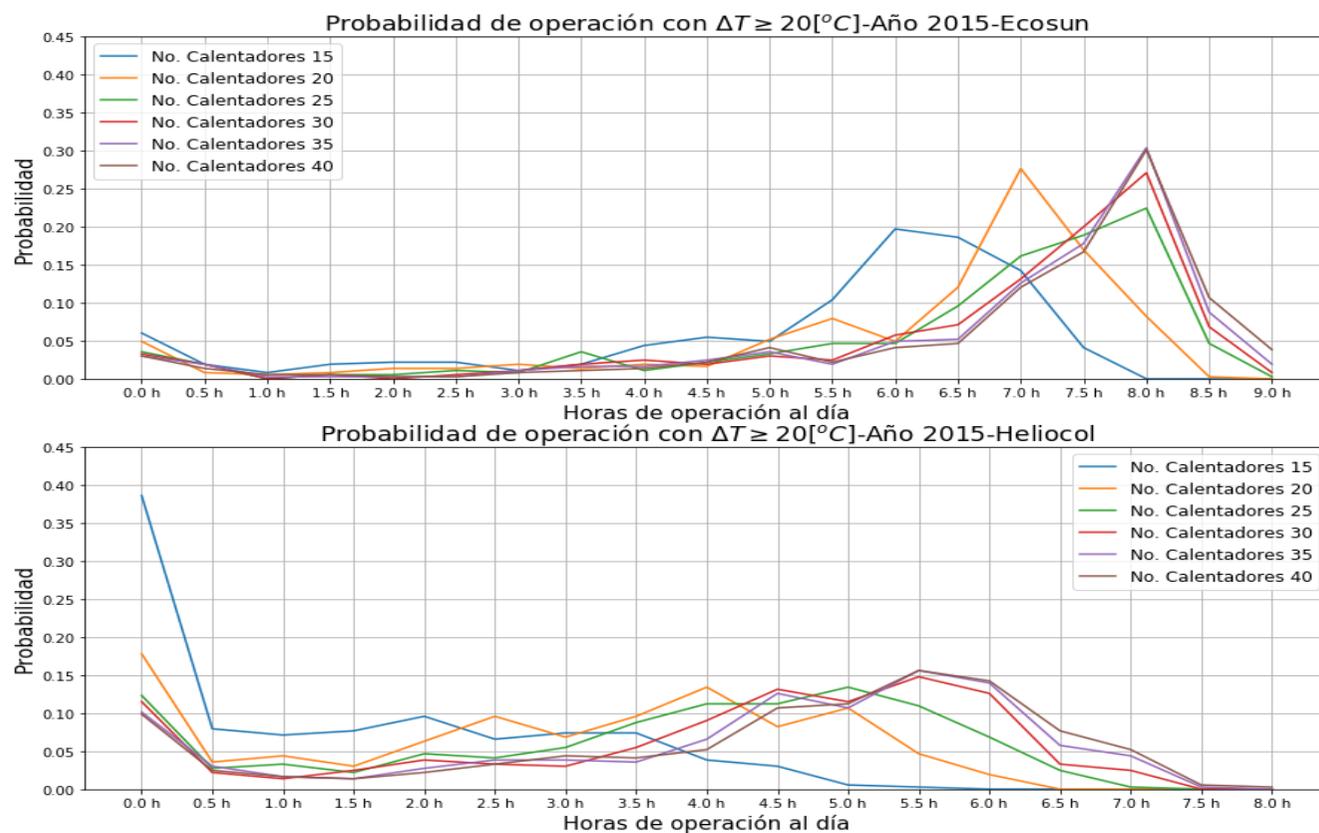


Figura C.2: Funciones de probabilidad para distintos rangos de operación al día durante el 2015 de arreglos en serie desde 15 hasta 40 calentadores solares Ecosun o Heliocol instalados en Cabo San Lucas, Baja California Sur.

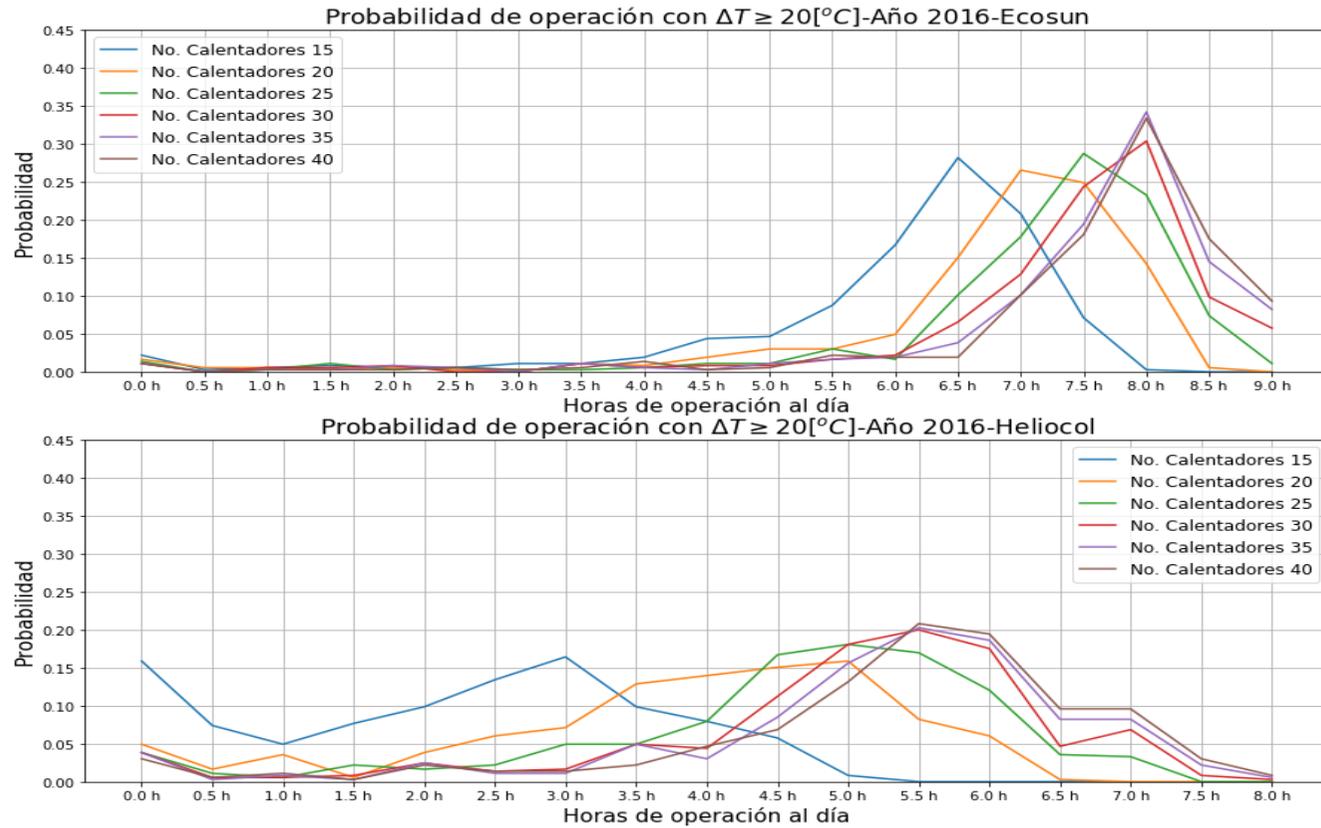


Figura C.3: Funciones de probabilidad para distintos rangos de operación al día durante el 2016 de arreglos en serie desde 15 hasta 40 calentadores solares Ecosun o Heliocol instalados en Cabo San Lucas, Baja California Sur.

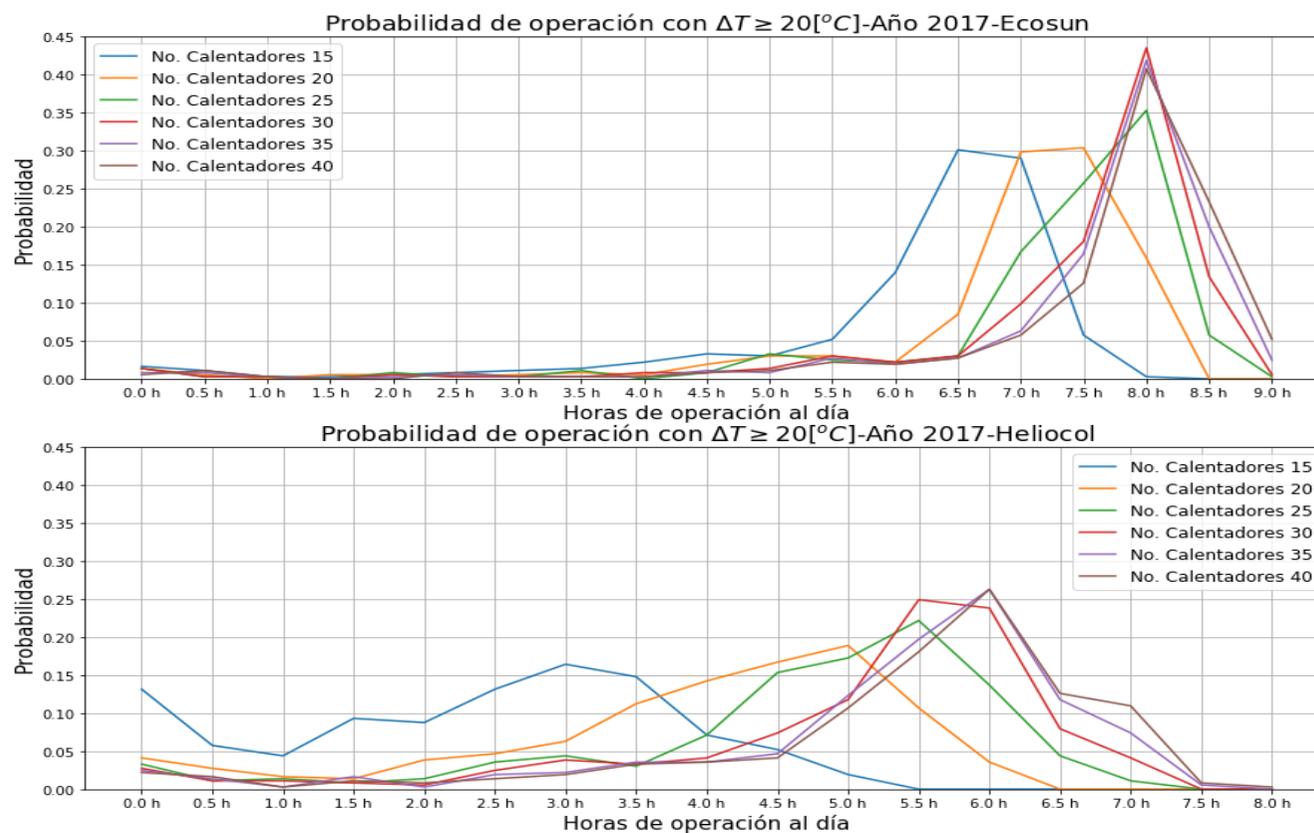


Figura C.4: Funciones de probabilidad para distintos rangos de operación al día durante el 2017 de arreglos en serie desde 15 hasta 40 calentadores solares Ecosun o Heliocol instalados en Cabo San Lucas, Baja California Sur.

C.2. Bahía Asunción, Baja California Sur.

Estudio completo																					
No. Calentadores	Probabilidad $\Delta T \geq 20[^\circ\text{C}]$	Número de días con un $\Delta T \geq 20[^\circ\text{C}]$ para distintos rangos operativos de un sistema SOTEC.																			
		0 h	0.5 h	1 h	1.5 h	2 h	2.5 h	3 h	3.5 h	4 h	4.5 h	5 h	5.5 h	6 h	6.5 h	7 h	7.5 h	8 h	8.5 h	9 h	9.5 h
Ecosun																					
5	0.000	1859	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0.175	117	40	44	37	47	52	75	107	172	208	304	489	118	46	3	0	0	0	0	0
15	0.243	53	13	12	25	26	34	34	45	42	60	101	159	272	291	337	324	29	2	0	0
20	0.272	33	9	14	9	18	26	13	40	35	44	53	108	133	221	283	440	281	94	5	0
25	0.288	25	15	3	8	16	18	14	28	20	42	54	71	89	188	272	314	348	278	55	1
30	0.297	21	11	5	7	13	12	18	19	24	24	56	71	77	151	250	257	332	371	136	4
35	0.303	17	13	2	9	9	11	18	17	24	23	46	67	72	138	239	226	327	378	208	14
40	0.307	13	12	5	9	6	13	13	21	22	21	44	67	67	119	220	225	328	377	245	31
Heliocol																					
5	0.000	1859	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-
10	0.002	1797	16	11	16	10	5	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-
15	0.102	439	75	58	92	89	131	191	251	236	178	83	26	10	0	0	0	0	0	-	-
20	0.160	197	47	45	51	54	85	85	124	190	212	252	289	165	40	23	0	0	0	-	-
25	0.188	121	35	51	38	47	55	72	79	125	161	222	292	261	179	104	14	3	0	-	-
30	0.202	108	25	39	34	42	56	50	70	97	133	192	251	275	233	203	34	17	0	-	-
35	0.211	94	30	35	24	46	40	57	58	94	115	167	218	278	251	255	58	38	1	-	-
40	0.216	88	27	34	24	34	48	55	49	94	108	158	193	270	263	266	90	55	3	-	-

Cuadro C.6: Tabla de resultados de la simulación del calentamiento de agua superficial del mar de un arreglo de calentadores solares Ecosun/Heliocol interconectados en serie de 5 hasta 40 calentadores ubicados en Bahía Asunción, Baja California Sur.

Año 2014																					
No. Calentadores	Probabilidad $\Delta T \geq 20[^\circ\text{C}]$	Número de días con un $\Delta T \geq 20[^\circ\text{C}]$ para distintos rangos operativos de un sistema SOTEC.																			
		0 h	0.5 h	1 h	1.5 h	2 h	2.5 h	3 h	3.5 h	4 h	4.5 h	5 h	5.5 h	6 h	6.5 h	7 h	7.5 h	8 h	8.5 h	9 h	9.5 h
Ecosun																					
5	0.000	365	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0.168	29	6	13	10	7	8	15	19	41	43	73	81	11	7	2	0	0	0	0	0
15	0.239	11	4	3	5	5	7	6	9	12	6	20	40	52	74	50	53	7	1	0	0
20	0.268	4	4	6	1	4	6	4	11	6	8	7	19	27	46	58	88	49	14	3	0
25	0.283	4	3	2	4	4	4	3	7	5	6	11	12	15	39	60	67	60	47	11	1
30	0.292	4	2	1	3	5	2	4	3	5	7	15	9	11	32	51	65	64	60	20	2
35	0.297	3	3	0	3	2	5	3	2	7	6	13	10	13	27	49	55	61	70	28	4
40	0.302	3	3	0	3	1	4	3	4	5	4	14	13	12	22	42	51	68	71	35	6
Heliocol																					
5	0.000	365	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-
10	0.002	351	8	2	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-
15	0.091	102	13	12	24	19	29	41	47	43	17	12	2	4	0	0	0	0	0	-	-
20	0.150	46	7	14	5	13	22	18	30	38	48	53	41	15	9	6	0	0	0	-	-
25	0.179	27	9	12	7	10	14	10	18	25	40	48	63	45	18	13	3	3	0	-	-
30	0.194	25	5	8	8	11	12	7	13	21	33	42	57	57	30	22	9	5	0	-	-
35	0.202	21	7	7	7	11	5	14	11	18	26	37	57	59	36	31	8	9	1	-	-
40	0.208	20	5	8	5	9	9	12	11	16	25	33	49	60	44	36	11	10	2	-	-

Cuadro C.7: Tabla de resultados de la simulación del calentamiento de agua superficial del mar durante el año 2014 de un arreglo de calentadores solares Ecosun/Heliocol interconectados en serie de 5 hasta 40 calentadores ubicados en Bahía Asunción, Baja California Sur.

Año 2015																								
No. Calentadores	Probabilidad $\Delta T \geq 20[^\circ C]$	Número de días con un $\Delta T \geq 20[^\circ C]$ para distintos rangos operativos de un sistema SOTEC.																						
		0 h	0.5 h	1 h	1.5 h	2 h	2.5 h	3 h	3.5 h	4 h	4.5 h	5 h	5.5 h	6 h	6.5 h	7 h	7.5 h	8 h	8.5 h	9 h	9.5 h	10 h		
Ecosun																								
5	0.000	365	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-		
10	0.155	36	8	17	7	14	16	18	23	39	37	53	87	8	2	0	0	0	0	0	0	-	-	
15	0.226	13	4	3	8	7	8	14	10	9	20	26	28	55	59	64	37	0	0	0	0	-	-	
20	0.257	9	2	3	2	5	5	6	6	13	13	14	31	29	40	57	85	40	5	0	-	-		
25	0.275	6	5	0	2	3	3	5	6	8	11	13	17	28	38	55	54	77	33	1	-	-		
30	0.285	5	4	1	2	3	3	3	4	8	7	11	18	21	34	58	43	73	58	9	-	-		
35	0.291	5	3	1	2	3	2	3	5	4	7	13	14	19	30	56	41	74	64	19	-	-		
40	0.295	4	2	2	3	1	3	3	4	5	7	9	18	16	30	45	47	68	68	30	-	-		
Heliocol																								
5	0.000	365	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	
10	0.001	360	1	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-
15	0.079	117	25	10	25	20	27	32	52	33	14	9	1	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	
20	0.134	61	15	13	13	12	15	24	28	40	40	48	35	19	2	0	0	0	0	0	-	-	-	
25	0.162	42	4	22	14	8	11	12	23	34	27	40	56	49	14	9	0	0	0	0	-	-	-	
30	0.176	38	3	11	19	12	11	13	12	21	30	35	50	59	27	23	1	0	0	0	-	-	-	
35	0.186	31	7	9	10	19	10	10	12	15	32	36	33	67	39	31	4	0	1	0	-	-	-	
40	0.192	28	7	9	9	11	18	12	7	17	30	35	30	60	47	40	3	2	2	0	-	-	-	

Cuadro C.8: Tabla de resultados de la simulación del calentamiento de agua superficial del mar durante el año 2015 de un arreglo de calentadores solares Ecosun/Heliocol interconectados en serie de 5 hasta 40 calentadores ubicados en Bahía Asunción, Baja California Sur.

Año 2016																						
No. Calentadores	Probabilidad $\Delta T \geq 20[^\circ\text{C}]$	Número de días con un $\Delta T \geq 20[^\circ\text{C}]$ para distintos rangos operativos de un sistema SOTEC.																				
		0 h	0.5 h	1 h	1.5 h	2 h	2.5 h	3 h	3.5 h	4 h	4.5 h	5 h	5.5 h	6 h	6.5 h	7 h	7.5 h	8 h	8.5 h	9 h	9.5 h	10 h
Ecosun																						
5	0.000	365	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-
10	0.185	12	8	5	6	6	10	13	26	31	36	69	108	26	9	0	0	0	0	0	0	-
15	0.251	7	1	2	5	4	7	5	7	2	10	21	40	53	50	72	74	5	0	0	0	-
20	0.277	6	1	0	1	3	6	1	6	7	6	8	19	32	42	67	89	54	17	0	0	-
25	0.294	3	3	1	1	1	3	2	7	0	10	5	11	18	51	44	69	60	58	18	0	-
30	0.303	3	0	2	1	2	3	2	4	2	5	8	11	14	32	51	53	61	82	29	0	-
35	0.309	2	1	1	1	1	3	4	2	3	4	5	12	12	28	46	55	59	82	42	2	-
40	0.312	2	0	2	1	0	4	2	3	4	4	5	11	11	19	48	52	68	74	51	4	-
Heliocol																						
5	0.000	365	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-
10	0.002	354	3	1	4	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-
15	0.112	67	15	7	15	21	17	50	53	62	36	16	4	2	0	0	0	0	-	-	-	-
20	0.168	28	9	6	9	11	22	10	27	28	48	52	73	33	4	5	0	0	-	-	-	-
25	0.196	13	8	4	5	13	12	22	16	15	32	37	73	57	36	19	3	0	-	-	-	-
30	0.210	12	5	6	1	6	16	14	13	21	25	36	46	58	62	36	5	3	-	-	-	-
35	0.218	11	6	6	1	4	13	15	11	24	18	27	42	62	55	56	5	9	-	-	-	-
40	0.223	10	6	7	1	4	9	14	9	29	14	26	38	54	64	55	13	12	-	-	-	-

Cuadro C.9: Tabla de resultados de la simulación del calentamiento de agua superficial del mar durante el año 2016 de un arreglo de calentadores solares Ecosun/Heliocol interconectados en serie de 5 hasta 40 calentadores ubicados en Bahía Asunción, Baja California Sur.

Año 2017																						
No. Calentadores	Probabilidad $\Delta T \geq 20[^\circ C]$	Número de días con un $\Delta T \geq 20[^\circ C]$ para distintos rangos operativos de un sistema SOTEC.																				
		0 h	0.5 h	1 h	1.5 h	2 h	2.5 h	3 h	3.5 h	4 h	4.5 h	5 h	5.5 h	6 h	6.5 h	7 h	7.5 h	8 h	8.5 h	9 h	9.5 h	10 h
Ecosun																						
5	0.000	365	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-
10	0.190	9	7	4	5	7	5	15	22	38	48	53	106	31	15	0	0	0	0	0	0	-
15	0.254	7	0	0	4	5	8	2	6	6	13	20	34	48	54	76	74	8	0	0	0	-
20	0.280	6	0	0	3	1	4	0	10	3	8	9	24	25	46	46	95	65	19	1	0	-
25	0.296	5	1	0	0	3	2	2	3	4	5	13	15	17	33	50	63	71	68	10	0	-
30	0.305	3	3	0	0	0	1	4	5	4	1	11	11	20	32	42	46	62	86	33	1	-
35	0.310	3	3	0	0	0	1	3	5	4	1	9	9	15	33	45	36	64	83	49	2	-
40	0.314	1	4	1	0	0	1	2	5	4	1	8	8	13	28	48	35	62	81	56	7	-
Heliocol																						
5	0.000	365	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-
10	0.004	346	1	3	8	3	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-
15	0.116	64	9	14	11	16	34	37	54	50	42	22	10	2	0	0	0	0	0	-	-	-
20	0.177	19	4	4	13	8	14	20	23	43	42	49	69	42	10	5	0	0	0	-	-	-
25	0.205	11	7	2	5	6	8	10	18	29	34	50	48	66	39	28	4	0	0	-	-	-
30	0.220	8	5	5	3	7	7	6	13	21	29	38	47	58	56	51	6	5	0	-	-	-
35	0.228	8	3	7	2	6	5	6	11	20	24	36	40	48	68	57	15	9	0	-	-	-
40	0.232	8	3	4	4	5	6	4	10	15	26	40	34	49	57	67	23	9	1	-	-	-

Cuadro C.10: Tabla de resultados de la simulación del calentamiento de agua superficial del mar durante el año 2017 de un arreglo de calentadores solares Ecosun/Heliocol interconectados en serie de 5 hasta 40 calentadores ubicados en Bahía Asunción, Baja California Sur.

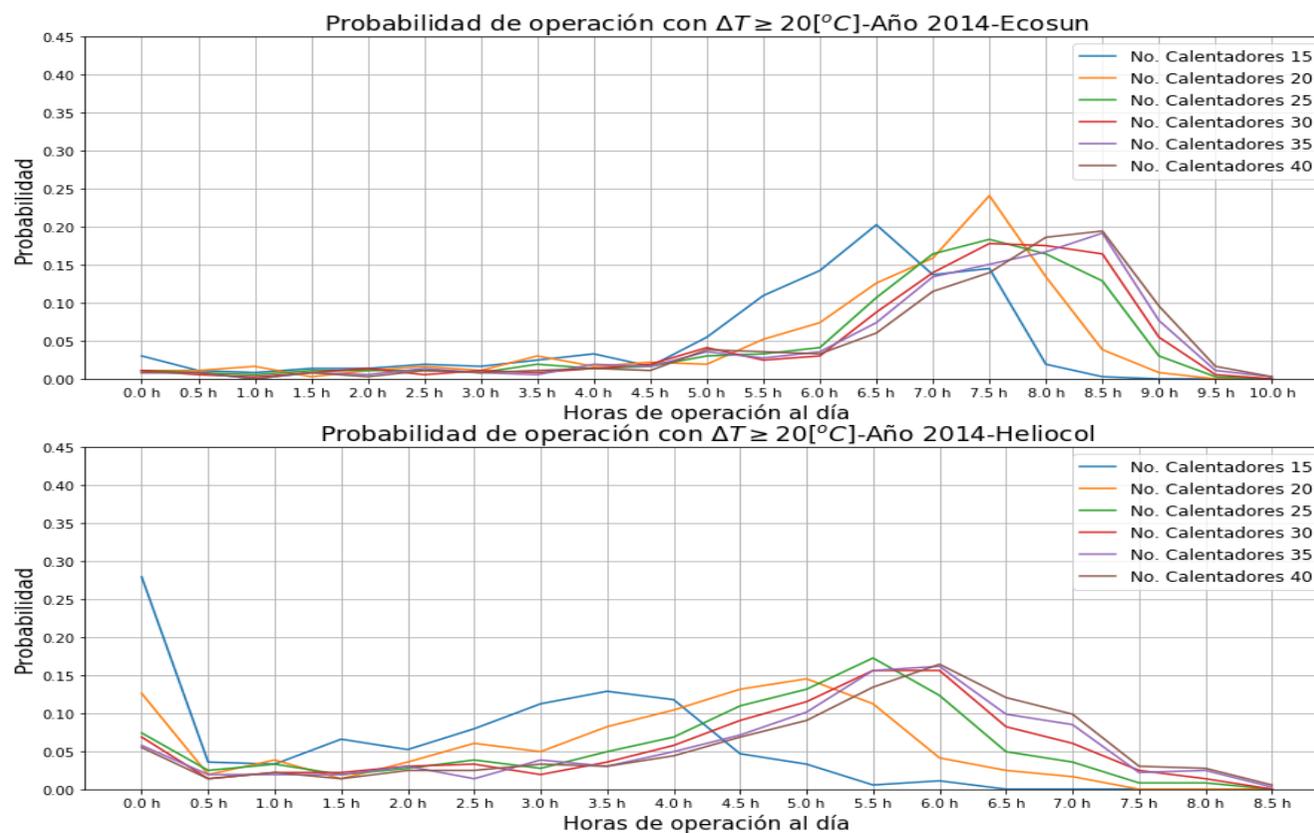


Figura C.5: Funciones de probabilidad para distintos rangos de operación al día durante el 2014 de arreglos en serie desde 15 hasta 40 calentadores solares Ecosun o Heliocol instalados en Bahía Asunción, Baja California Sur.

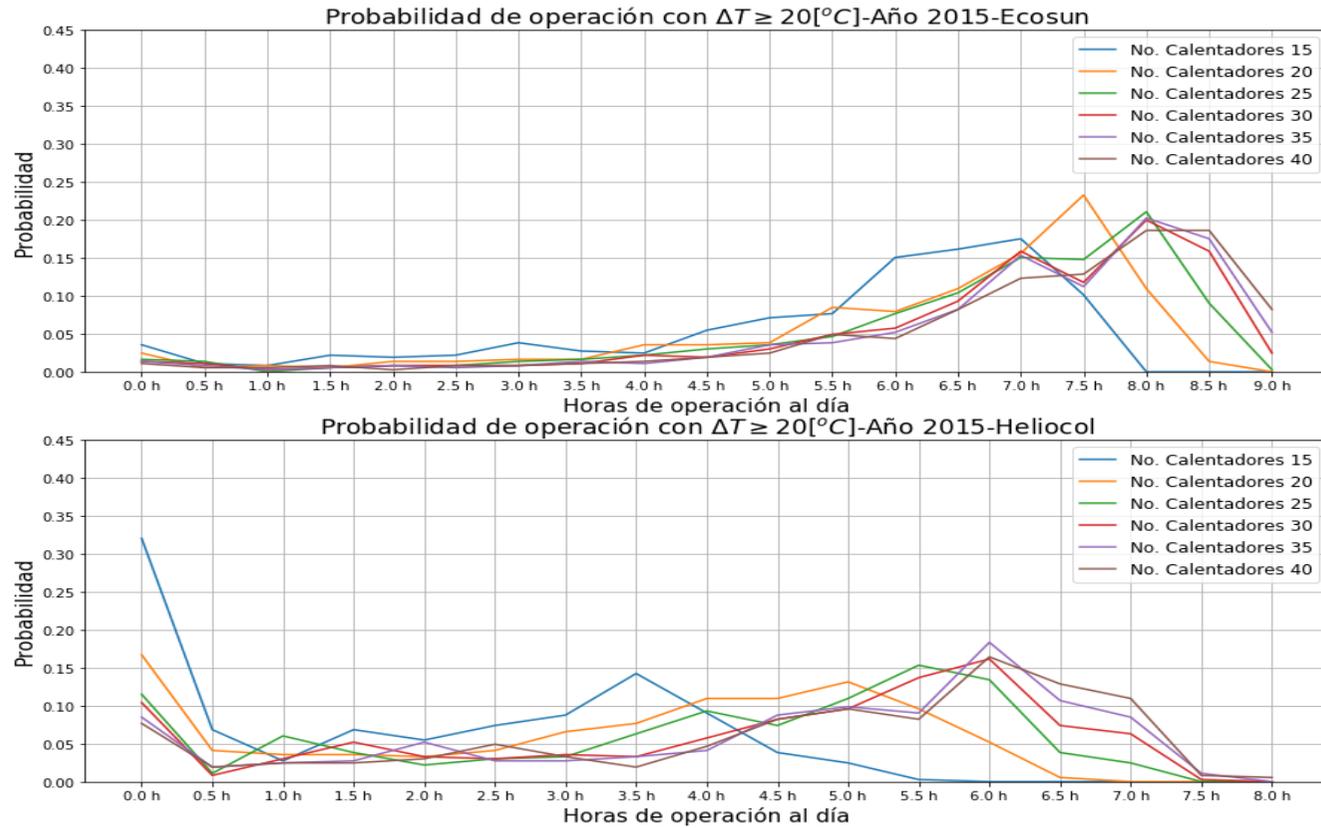


Figura C.6: Funciones de probabilidad para distintos rangos de operación al día durante el 2015 de arreglos en serie desde 15 hasta 40 calentadores solares Ecosun o Heliocol instalados en Bahía Asunción, Baja California Sur.

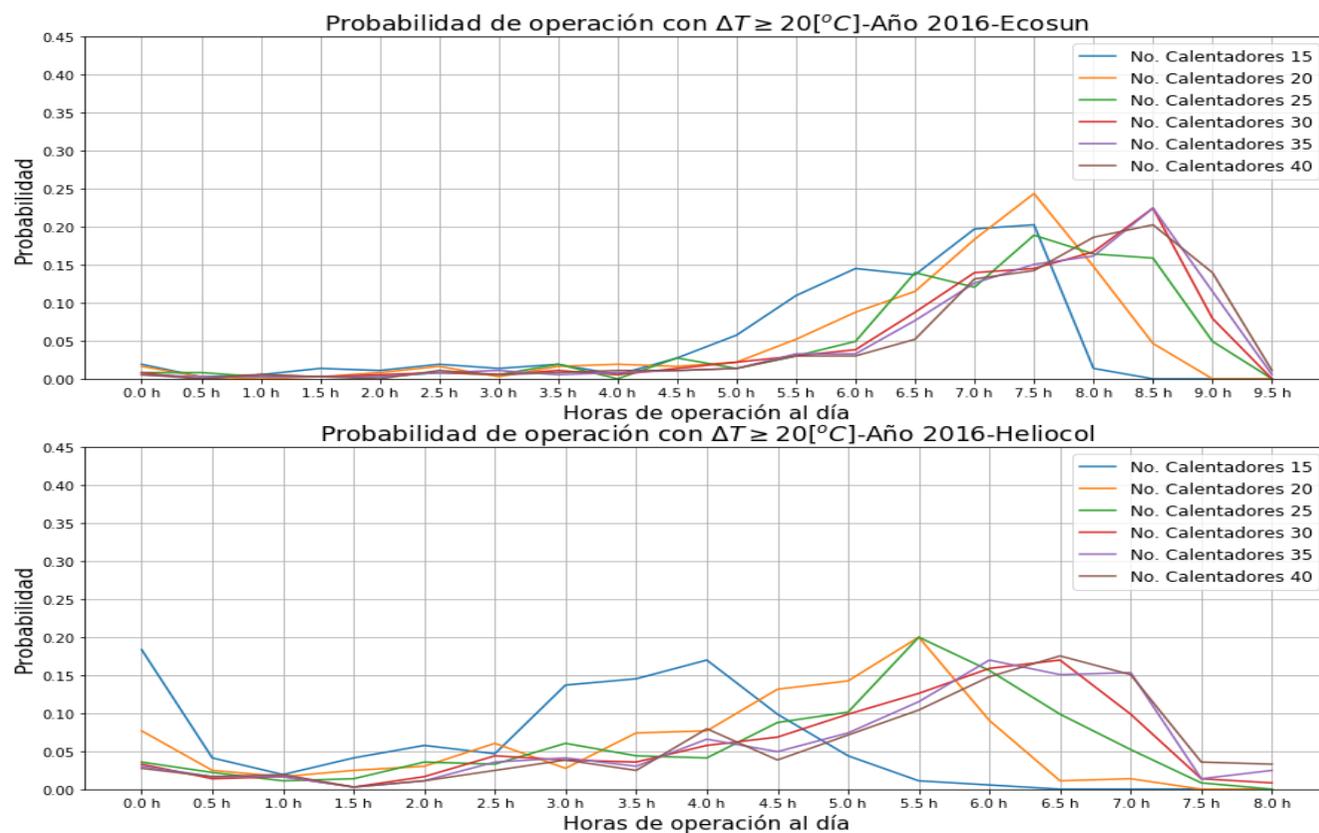


Figura C.7: Funciones de probabilidad para distintos rangos de operación al día durante el 2016 de arreglos en serie desde 15 hasta 40 calentadores solares Ecosun o Heliocol instalados en Bahía Asunción, Baja California Sur.

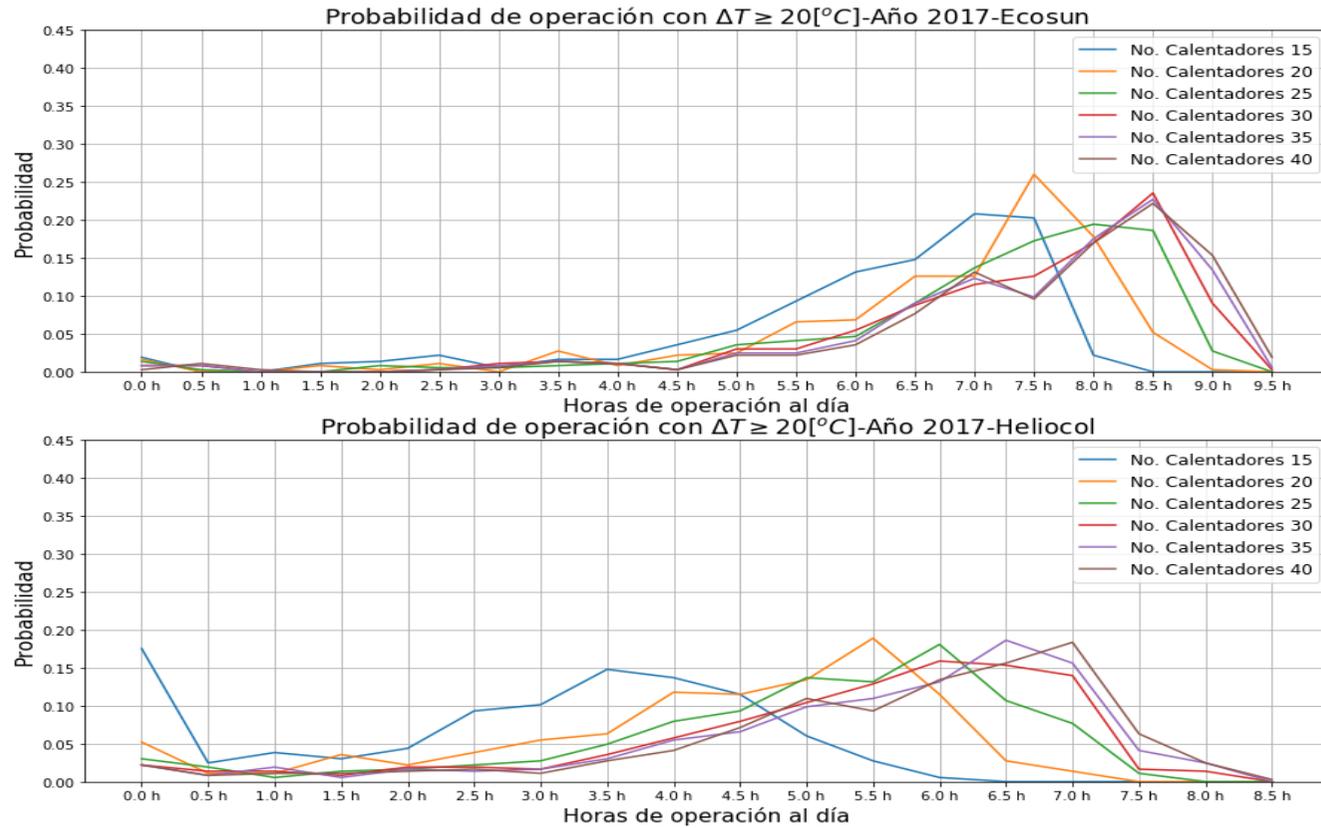


Figura C.8: Funciones de probabilidad para distintos rangos de operación al día durante el 2017 de arreglos en serie desde 15 hasta 40 calentadores solares Ecosun o Heliocol instalados en Bahía Asunción, Baja California Sur.

C.3. Rosarito, Baja California.

Estudio completo																						
No. Calentadores	Probabilidad $\Delta T \geq 20[^\circ C]$	Número de días con un $\Delta T \geq 20[^\circ C]$ para distintos rangos operativos de un sistema SOTEC.																				
		0 h	0.5 h	1 h	1.5 h	2 h	2.5 h	3 h	3.5 h	4 h	4.5 h	5 h	5.5 h	6 h	6.5 h	7 h	7.5 h	8 h	8.5 h	9 h	9.5 h	10 h
Ecosun																						
5	0.000	1859	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0.152	275	63	55	62	64	78	85	97	108	186	242	223	243	59	19	0	0	0	0	0	0
15	0.217	111	49	44	34	47	49	41	60	58	97	103	135	181	267	323	177	76	6	1	0	0
20	0.247	84	18	21	36	33	32	43	54	57	66	84	89	140	191	271	269	279	64	27	1	0
25	0.265	62	24	19	16	28	29	38	33	45	69	73	84	101	157	234	227	375	156	80	7	2
30	0.275	49	20	20	13	19	27	39	34	40	62	66	80	103	145	176	241	382	191	129	18	4
35	0.281	39	24	17	15	16	27	22	48	30	52	71	77	101	130	171	238	354	226	161	34	5
40	0.285	36	20	23	11	13	26	23	49	25	50	56	88	98	129	156	238	349	231	178	51	8
Heliocol																						
5	0.000	1859	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-
10	0.007	1653	28	52	37	45	25	16	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-
15	0.103	515	76	64	82	108	97	152	133	182	164	149	82	50	4	1	0	0	0	0	-	-
20	0.150	308	64	57	63	73	66	87	115	122	171	193	171	171	129	58	8	3	0	0	-	-
25	0.175	222	63	49	55	61	68	71	77	98	137	175	188	201	171	145	50	24	3	1	0	-
30	0.189	186	57	48	49	45	63	72	74	79	120	141	178	226	177	183	101	46	9	5	0	-
35	0.198	169	52	43	47	47	57	66	70	75	102	126	164	229	190	193	121	86	16	5	1	-
40	0.204	157	54	42	41	51	44	69	64	84	93	127	144	232	182	203	137	100	24	7	4	-

Cuadro C.11: Tabla de resultados de la simulación del calentamiento de agua superficial del mar de un arreglo de calentadores solares Ecosun/Heliocol interconectados en serie de 5 hasta 40 calentadores ubicados en Rosarito, Baja California.

Año 2014																						
No. Calentadores	Probabilidad $\Delta T \geq 20[^\circ C]$	Número de días con un $\Delta T \geq 20[^\circ C]$ para distintos rangos operativos de un sistema SOTEC.																				
		0 h	0.5 h	1 h	1.5 h	2 h	2.5 h	3 h	3.5 h	4 h	4.5 h	5 h	5.5 h	6 h	6.5 h	7 h	7.5 h	8 h	8.5 h	9 h	9.5 h	10 h
Ecosun																						
5	0.000	365	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-
10	0.155	53	11	14	12	10	18	10	19	14	42	52	43	45	13	9	0	0	0	0	0	-
15	0.221	20	7	12	4	8	4	10	14	15	19	23	28	32	48	59	41	20	1	0	0	-
20	0.251	12	3	2	5	11	3	9	8	9	18	22	22	30	35	45	62	51	10	8	0	-
25	0.271	8	5	2	0	6	6	9	4	6	13	19	23	20	33	43	40	74	33	19	2	-
30	0.280	8	2	3	1	3	5	7	9	2	8	21	21	20	31	28	56	71	34	31	4	-
35	0.286	8	1	3	2	2	5	3	9	5	5	18	21	25	28	24	52	66	47	32	8	-
40	0.289	7	1	4	0	2	6	3	9	4	5	14	23	23	27	28	51	64	47	35	11	-
Heliocol																						
5	0.000	365	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-
10	0.008	328	5	7	4	5	8	5	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-
15	0.104	102	19	6	18	16	21	32	36	24	27	16	14	1	1	0	0	0	0	0	0	-
20	0.150	60	12	15	15	16	8	15	19	24	28	50	33	27	24	15	3	1	0	0	0	-
25	0.175	43	5	13	17	14	18	14	12	13	30	28	41	37	35	27	9	8	1	0	0	-
30	0.189	37	7	10	8	10	20	20	13	11	19	33	27	52	32	29	21	13	2	1	0	-
35	0.198	34	8	11	4	7	14	24	16	12	17	24	29	43	42	28	27	19	5	1	0	-
40	0.203	29	11	12	4	6	11	23	16	16	11	30	25	41	40	35	25	21	6	2	1	-

Cuadro C.12: Tabla de resultados de la simulación del calentamiento de agua superficial del mar durante el año 2014 de un arreglo de calentadores solares Ecosun/Heliocol interconectados en serie de 5 hasta 40 calentadores ubicados en Rosarito, Baja California.

Año 2015																						
No. Calentadores	Probabilidad $\Delta T \geq 20[^\circ C]$	Número de días con un $\Delta T \geq 20[^\circ C]$ para distintos rangos operativos de un sistema SOTEC.																				
		0 h	0.5 h	1 h	1.5 h	2 h	2.5 h	3 h	3.5 h	4 h	4.5 h	5 h	5.5 h	6 h	6.5 h	7 h	7.5 h	8 h	8.5 h	9 h	9.5 h	10 h
Ecosun																						
5	0.000	365	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-
10	0.146	57	12	11	17	10	15	23	17	26	28	54	52	35	7	1	0	0	0	0	-	-
15	0.210	22	10	6	11	10	11	8	11	13	23	24	27	40	61	53	26	9	0	0	-	-
20	0.239	17	2	5	6	11	8	10	14	9	8	17	21	34	37	68	46	40	12	0	-	-
25	0.257	13	5	4	4	3	7	11	6	12	14	13	13	26	37	56	46	60	27	8	-	-
30	0.267	11	4	4	4	3	5	10	7	7	17	9	16	20	36	45	43	69	38	17	-	-
35	0.273	8	6	3	5	2	5	5	13	3	14	13	16	23	28	36	51	68	41	23	-	-
40	0.277	8	4	5	3	1	5	6	15	1	15	9	18	19	31	30	48	77	37	31	-	-
Heliocol																						
5	0.000	365	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-
10	0.004	342	3	8	7	2	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-
15	0.091	116	12	15	18	26	15	32	31	35	29	24	9	3	0	0	0	0	-	-	-	-
20	0.137	68	15	12	12	17	19	17	17	30	37	37	33	32	13	6	0	0	-	-	-	-
25	0.162	45	18	10	10	16	15	18	17	19	26	42	32	41	31	18	6	1	0	-	-	-
30	0.176	39	13	11	14	6	12	22	16	21	20	29	43	41	34	27	11	6	0	-	-	-
35	0.185	36	11	7	16	11	11	16	13	16	22	29	36	52	29	36	14	10	0	-	-	-
40	0.191	34	8	10	12	14	10	17	8	21	18	27	30	54	38	31	20	12	1	-	-	-

Cuadro C.13: Tabla de resultados de la simulación del calentamiento de agua superficial del mar durante el año 2015 de un arreglo de calentadores solares Ecosun/Heliocol interconectados en serie de 5 hasta 40 calentadores ubicados en Rosarito, Baja California.

Año 2016																						
No. Calentadores	Probabilidad $\Delta T \geq 20[^\circ C]$	Número de días con un $\Delta T \geq 20[^\circ C]$ para distintos rangos operativos de un sistema SOTEC.																				
		0 h	0.5 h	1 h	1.5 h	2 h	2.5 h	3 h	3.5 h	4 h	4.5 h	5 h	5.5 h	6 h	6.5 h	7 h	7.5 h	8 h	8.5 h	9 h	9.5 h	10 h
Ecosun																						
5	0.000	365	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-
10	0.148	55	20	7	13	15	14	13	22	18	38	50	38	50	11	1	0	0	0	0	0	-
15	0.216	15	15	9	6	13	10	10	11	13	16	16	24	39	53	72	31	9	3	0	0	-
20	0.247	11	9	4	11	1	10	7	9	13	19	14	13	19	45	51	55	59	11	4	0	-
25	0.265	11	4	4	4	6	8	6	6	8	19	14	13	14	30	49	45	86	27	9	1	-
30	0.274	10	3	4	1	4	5	10	9	8	15	11	15	14	26	38	47	88	35	17	3	-
35	0.281	9	3	3	3	2	4	5	15	7	10	14	13	13	24	38	44	83	36	34	3	-
40	0.284	9	3	2	4	1	3	7	10	9	8	14	15	13	24	32	49	78	39	36	6	-
Heliocol																						
5	0.000	365	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-
10	0.007	324	8	9	6	10	6	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-
15	0.101	107	12	17	10	20	22	29	25	32	35	33	14	9	0	0	0	0	0	0	0	-
20	0.147	63	14	6	15	17	10	17	25	27	32	42	28	36	22	9	1	1	0	0	0	-
25	0.172	44	20	10	5	10	13	13	14	26	22	36	36	41	40	24	6	4	1	0	0	-
30	0.187	30	19	15	9	7	12	10	15	13	27	27	33	47	40	39	13	5	3	1	0	-
35	0.196	28	16	9	16	9	11	6	13	16	22	20	28	50	42	46	18	11	2	2	0	-
40	0.202	27	16	7	13	11	7	11	12	14	22	21	25	47	38	49	26	13	3	2	1	-

Cuadro C.14: Tabla de resultados de la simulación del calentamiento de agua superficial del mar durante el año 2016 de un arreglo de calentadores solares Ecosun/Heliocol interconectados en serie de 5 hasta 40 calentadores ubicados en Rosarito, Baja California.

Año 2017																						
No. Calentadores	Probabilidad $\Delta T \geq 20[^\circ C]$	Número de días con un $\Delta T \geq 20[^\circ C]$ para distintos rangos operativos de un sistema SOTEC.																				
		0 h	0.5 h	1 h	1.5 h	2 h	2.5 h	3 h	3.5 h	4 h	4.5 h	5 h	5.5 h	6 h	6.5 h	7 h	7.5 h	8 h	8.5 h	9 h	9.5 h	10 h
Ecosun																						
5	0.000	365	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0.144	61	11	13	11	19	10	19	20	26	42	43	34	40	16	0	0	0	0	0	0	0
15	0.208	31	12	7	8	8	15	4	10	13	17	19	28	39	46	68	28	10	1	1	0	0
20	0.239	24	4	4	11	4	5	9	12	13	12	15	17	24	37	54	49	56	9	5	1	0
25	0.257	15	8	5	3	9	4	5	10	9	15	15	17	18	25	47	45	73	24	15	2	1
30	0.268	10	8	6	3	5	6	7	4	12	14	12	12	25	25	32	46	76	31	25	4	1
35	0.275	5	10	5	5	5	5	6	5	8	12	16	12	23	22	35	44	66	44	25	10	1
40	0.279	4	9	7	4	5	5	4	8	5	13	10	13	28	19	31	42	65	46	31	13	2
Heliocol																						
5	0.000	365	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-
10	0.008	322	4	10	12	9	5	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-
15	0.101	97	17	14	16	25	26	35	18	30	42	19	17	9	0	0	0	0	0	0	-	-
20	0.145	65	10	15	6	14	15	22	28	23	38	32	28	31	28	9	0	1	0	0	-	-
25	0.169	50	13	8	10	13	8	17	14	23	36	34	33	36	32	24	12	1	0	1	0	-
30	0.185	45	11	8	9	13	6	10	13	18	32	30	32	37	35	37	19	8	0	2	0	-
35	0.194	42	10	7	8	12	8	8	14	17	19	29	37	42	30	38	25	15	2	1	1	-
40	0.198	41	10	6	8	11	7	9	13	18	18	28	35	42	28	41	24	20	4	1	1	-

Cuadro C.15: Tabla de resultados de la simulación del calentamiento de agua superficial del mar durante el año 2017 de un arreglo de calentadores solares Ecosun/Heliocol interconectados en serie de 5 hasta 40 calentadores ubicados en Rosarito, Baja California.

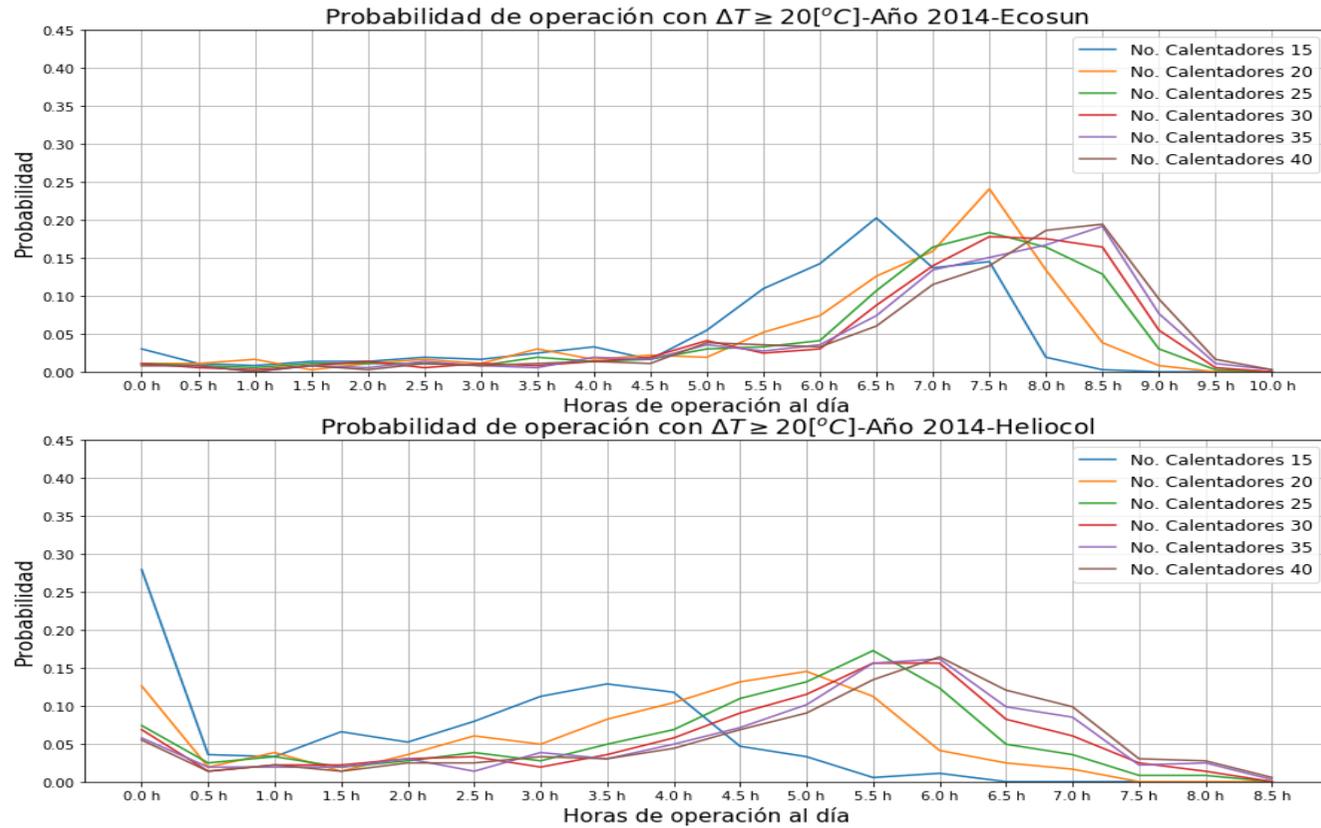


Figura C.9: Funciones de probabilidad para distintos rangos de operación al día durante el 2014 de arreglos en serie desde 15 hasta 40 calentadores solares Ecosun o Heliocol instalados en Rosarito, Baja California.

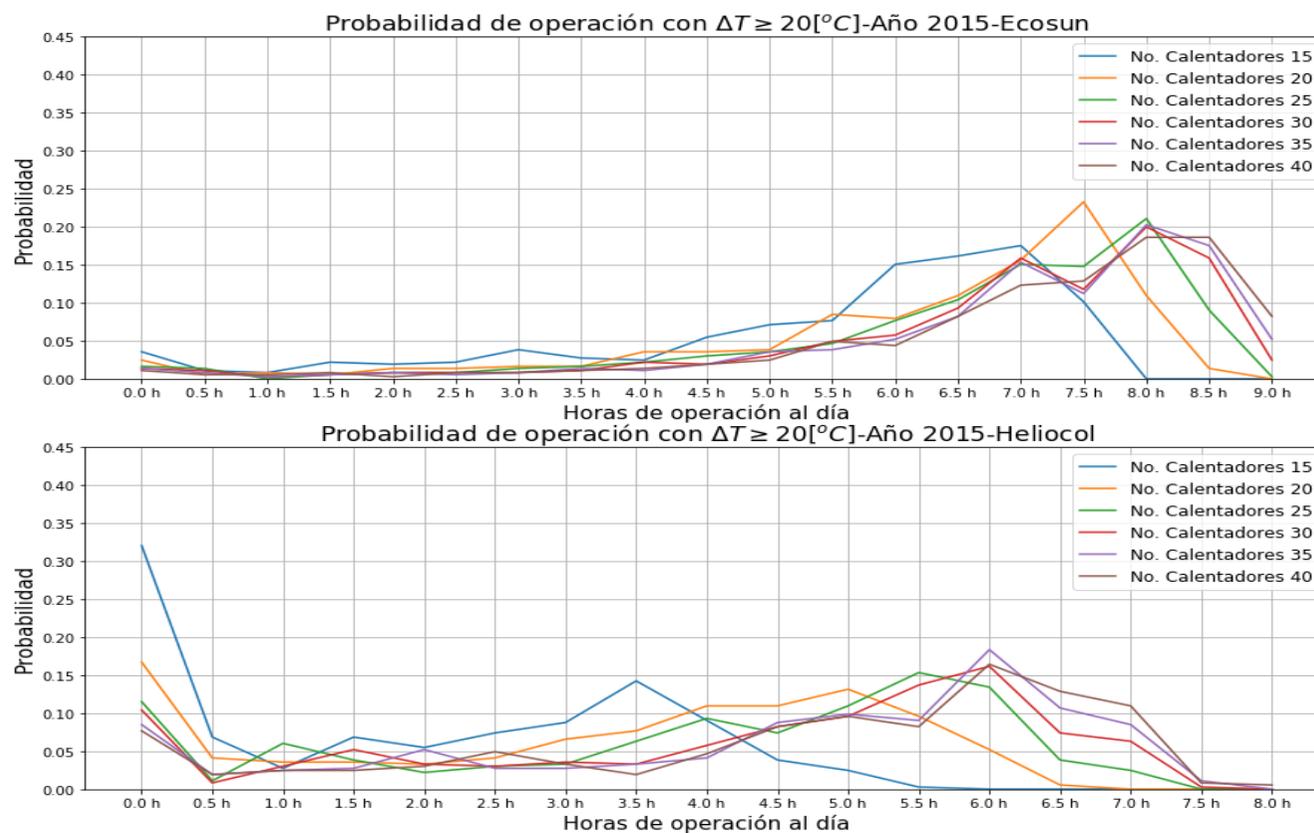


Figura C.10: Funciones de probabilidad para distintos rangos de operación al día durante el 2015 de arreglos en serie desde 15 hasta 40 calentadores solares Ecosun o Heliocol instalados en Rosarito, Baja California.

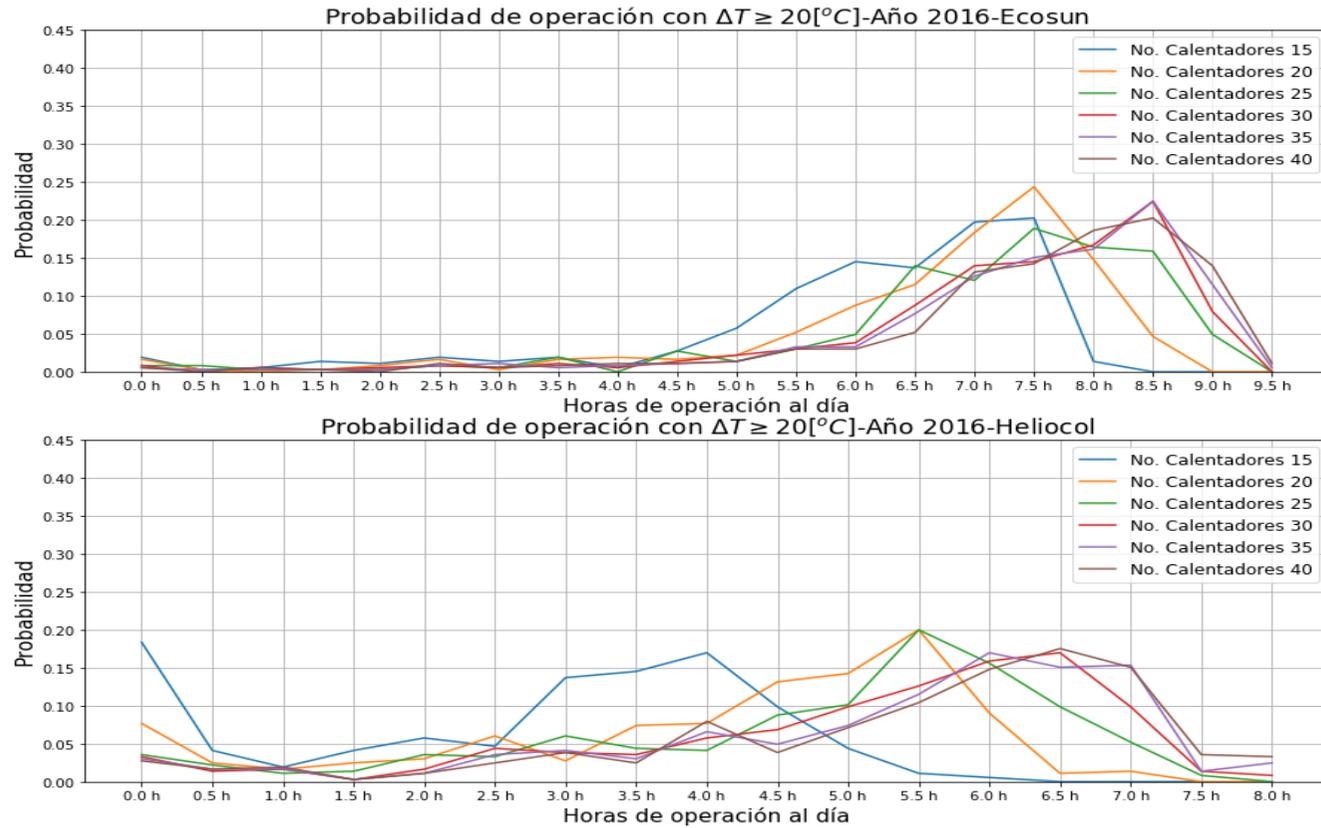


Figura C.11: Funciones de probabilidad para distintos rangos de operación al día durante el 2016 de arreglos en serie desde 15 hasta 40 calentadores solares Ecosun o Heliocol instalados en Rosarito, Baja California.

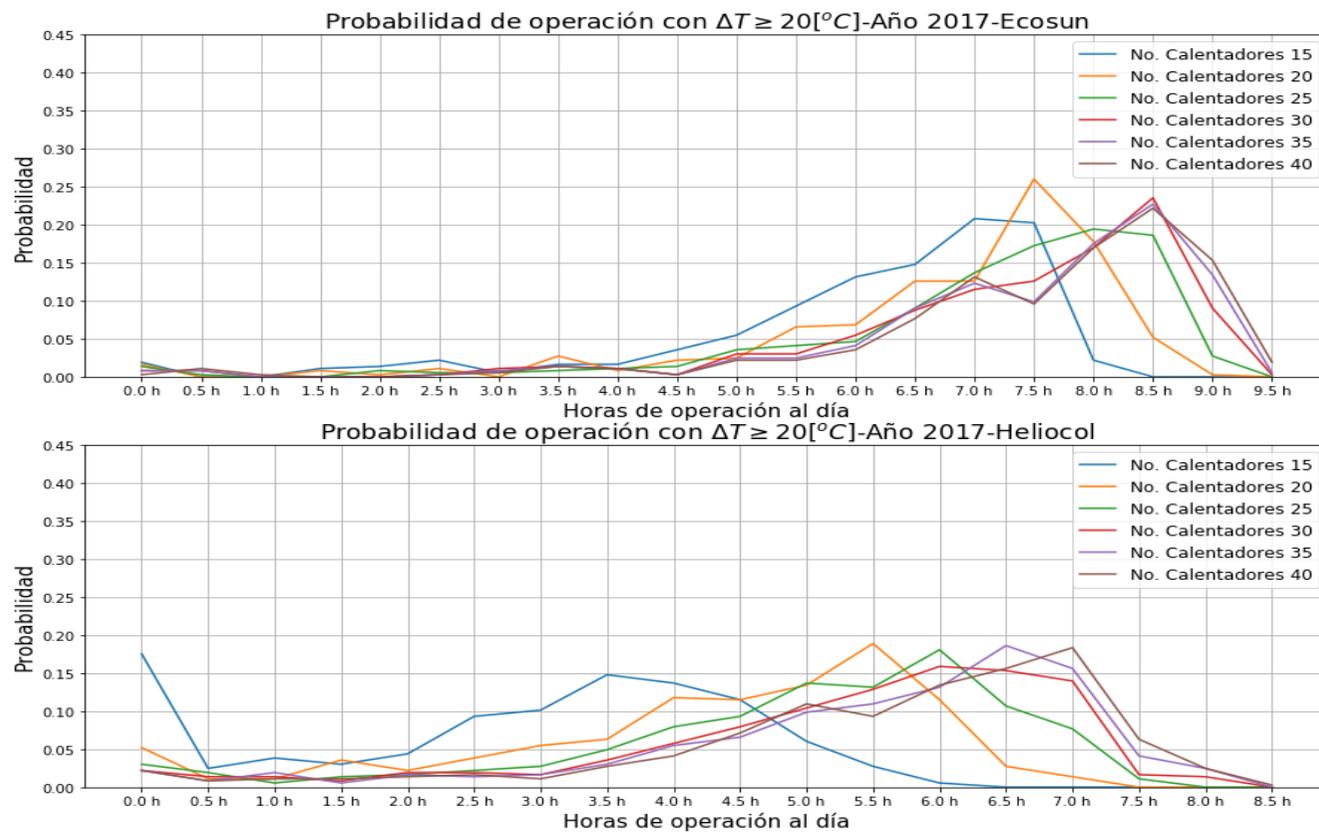


Figura C.12: Funciones de probabilidad para distintos rangos de operación al día durante el 2017 de arreglos en serie desde 15 hasta 40 calentadores solares Ecosun o Heliocol instalados en Rosarito, Baja California.