



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**FACTIBILIDAD DE INSTALAR UNA PLANTA OTEC  
(CONVERSIÓN DE LA ENERGÍA TÉRMICA DEL OCÉANO)  
EN LAS COSTAS DE MÉXICO**

**T E S I S**

**P A R A O B T E N E R E L G R A D O D E :**

**I N G E N I E R O M E C Á N I C O**

**P R E S E N T A :**

**HÉCTOR MIGUEL AVIÑA JIMÉNEZ**

**DIRECTOR DE TESIS: DR. MIGUEL ANGEL ALATORRE MENDIETA**

**MÉXICO, D.F.**

**SEPTIEMBRE-2007**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## **DEDICATORIAS**

### **A DIOS:**

Por otorgarme a mis padres, ellos son los ángeles que vigilan mi vida, me guían cuando se oscurece el camino, me alientan a seguir de pie cuando he tropezado, me comprenden y escuchan cuando necesito desahogarme, me enseñan a valorar y a aceptar las cosas de la vida, me motivan a realizar mis sueños y lo mas importante, que me aman y me entregan su amor a cada instante.

Por permitirme tener una familia que siempre cree en mí, que esta conmigo poniendo ese granito de arena para formarme como persona y ayudándome a librar los obstáculos que encuentro en mi camino.

Por todas esas coincidencias a lo largo de mi vida que me hicieron conocer a personas que le dieron rumbo a mi vida, me ayudaron a progresar como persona y profesionista y compartieron conmigo las aventuras de la vida.

Por otorgarme la oportunidad de progresar dejándome estar en esta institución creadora de profesionistas, hogar de conocimientos y cultura.

Por todos esas caídas que me hicieron valorar lo maravilloso de la vida.

Por esto y por todas esas cosas que me faltan por descubrir para comprender el misterio del amor.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres: Virginia Jiménez y Miguel Ángel Aviña; Por darme las herramientas necesarias para lograr terminar esta etapa de mi vida.

A mis Primos y Tíos; Por ayudarme en el transcurso de mis estudios, cada uno aportando de diferentes maneras para conseguir un solo resultado.

A mi Abuelito Trino; Por abrirme su casa y facilitarme en muy buena medida mis años en la universidad.

A mis amigos del escuadrón por vivir conmigo esa época tan bella de la vida en donde se van generando las verdaderas amistades.

A mis compañeros de la facultad porque solamente alguien que esta en las mismas circunstancias sabe el valor de terminar la carrera de Ingeniería.

A mis compañeros del proyecto Impulsa; por los consejos y ayuda, especialmente al Dr. Gerardo Hiriart por todo ese apoyo en la tesis.

A mi casa la UNAM y mi espacio que es la facultad de Ingeniería en donde me formé profesionalmente y humanamente.

A mi amigo, maestro y guía Didier Leurent; el cual le dio un giro a mi vida haciéndome conocer que lo mas importante de todo ser humano siempre esta con nosotros “DIOS” y que la fuerza del corazón es el amor.

A mi amigo Abraham Hernández; por todos esos momentos que estuvo a mi lado apoyándome y alentándome en las situaciones malas, y alegrándose aun mas que yo en todos esos momentos de felicidad.

A mi amigo y maestro Miguel Alatorre; por ser esa persona tan humilde y sabia que necesitaba en este especial momento de mi vida, por todos esos valiosos consejos, por demostrarme que el ejemplo arrastra mas que las palabras, por ese entusiasmo que contagia para realizar las cosas cotidianas de la vida y por no perder el objetivo primordial de la vida que es “ser feliz”.

A todas esas personas que en el trascurso de la realización de la tesis aportaron su granito de arena para que este proyecto diera su primer paso, (Omar Celis, mi ti Paco, la familia Palacios, Ing. Luis E. Noriega, etc.)

Al Instituto de Ciencias del Mar y Limnología por permitirnos experimentar en sus instalaciones.

A mis Sinodales; Dr. Miguel Ángel Alatorre Mendieta, MI. Esteban Barrios, Dr. William Vicente, M.I. Enrique Bernal y el Dr. Rodrigo Rincón.

Y a mi futura esposa Janeth Chávez por haber soportado a un tesista. “Y lo que le falta”.

<b>CONTENIDO</b>	<b>Página</b>
<b>DEDICATORIAS.....</b>	<b>I</b>
<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>II</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>III</b>
<b>CONTENIDO.....</b>	<b>IV</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>VI</b>
<b>LISTA DE TABLAS.....</b>	<b>VIII</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>II. ANTECEDENTES DEL CONCEPTO OTEC Y DE LA ESTRUCTURA TÉRMICA DEL MAR.....</b>	<b>2</b>
2.1 Concepto OTEC.....	2
2.1.1 Origen de la fuente de energía.....	2
2.1.2 Explicación general del concepto OTEC.....	4
2.2 Historia de la OTEC.....	7
2.3 Ubicación de las centrales OTEC.....	9
<b>III. COMO FUNCIONA UNA PLANTA OTEC.....</b>	<b>12</b>
3.1 Componentes de la OTEC.....	12
3.1.1 Evaporadores y condensadores (intercambiadores de calor).....	12
3.1.2 Turbina.....	13
3.2 Ciclos OTEC.....	14
3.2.1 Ciclo abierto.....	14
3.2.2 Ciclo cerrado.....	19
3.2.3 Ciclo híbrido.....	24
3.5 Costos.....	25
<b>IV. ASPECTOS IMPORTANTES DEL OCÉANO PARA UNA PLANTA OTEC.....</b>	<b>28</b>
4.1 Características del agua dulce y salada.....	28
4.1.1 Principales propiedades físicas del agua de mar.....	30
4.2 Datos generales del océano.....	33
4.3 Dinámica del mar.....	35
4.4 Estructura térmica del mar.....	38
4.4.1 La distribución de temperatura en el mar.....	41
4.5 El mar visto como una maquina térmica.....	45
4.6 Oceanografía de los mares mexicanos.....	46
4.6.1 Pacífico tropical mexicano.....	46
4.6.2 Golfo de Baja California.....	48
4.6.3 Golfo de México y Caribe mexicano.....	52

4.6.3.1 Golfo de México.....	52
4.6.3.2 Caribe mexicano.....	52
4.7 Lugares apropiados para las plantas OTEC.....	55
<b>V.    DISCUSIÓN.....</b>	<b>57</b>
5.1 Cuales el mejor de los ciclos en general.....	57
5.2 Análisis de Costos.....	58
5.3 Ventajas y desventajas en general de OTEC.....	60
5.3.1 Desventajas.....	60
5.3.2 Ventajas.....	60
5.3.3 Otras ventajas.....	61
5.3.3.1 Productos secundarios.....	61
5.3.3.2 Producción del agua dulce.....	61
5.3.3.3 Aire acondicionado del agua fría.....	62
5.3.3.4 Acuicultura.....	62
5.3.3.5 Agricultura.....	63
5.3.3.6 Producción de hidrogeno.....	63
5.3.3.7 Otros.....	63
5.4 Análisis de lugares.....	63
5.4.1 Sitio 1.....	64
5.4.2 Sitio 2.....	66
5.4.3 Sitio 3.....	68
5.5 Porque podría ser viable una OTEC con varios subproductos.....	70
<b>VI.    CONCLUSIONES.....</b>	<b>71</b>
<b>VII.   REFERENCIAS.....</b>	<b>73</b>

## LISTA DE FIGURAS

## Página

Figura 2.1 Termoclina.....	3
Figura 2.2 Zonas del mundo térmicamente favorables para instalar una planta OTEC....	4
Figura 2.3 Esquema de una central termoeléctrica convencional.....	5
Figura 2.4 Diagrama T-S (temperatura-entropía) de un ciclo ranking simple.....	5
Figura 2.5 Esquema de una planta OTEC.....	6
Figura 2.6 Planta OTEC instalada por G. Claude (La tunisie).....	7
Figura 2.7 Planta miniOTEC en Hawaii.....	8
Figura 2.8 Vista aérea de la planta experimental OTEC en Hawaii.....	8
Figura 2.9 Barco Sagar Shakthi utilizado como planta OTEC en la India.....	9
Figura 2.10 Planta OTEC cercana a la costa .....	10
Figura 2.11 Esquema de una planta OTEC ubicada mar adentro.....	11
Figura 3.1 Diseño de un condensador de dos etapas diseñado por NREL.....	13
Figura 3.2 Diagrama T-S de un ciclo abierto en una planta OTEC.....	15
Figura 3.3 Esquema de un ciclo abierto OTEC.....	15
Figura 3.4 Diagrama T-S del ciclo Rankine simple experimental ICMyL.....	18
Figura 3.5 Diagrama T-S de un ciclo cerrado en una planta OTEC .....	19
Figura 3.6 Esquema de un ciclo cerrado OTEC.....	20
Figura 3.7 Esquema del ciclo Kalina <sup>17</sup> .....	21
Figura 3.8 Ciclo-Cerrado del proyecto a nivel Laboratorio OTEC ICMyL UNAM.....	23
Figura 3.9 Diagrama T-S del un ciclo cerrado OTEC experimentado el ICMyL.....	24
Figura 3.10 Esquema de un ciclo hibrido OTEC.....	25
Figura 3.11 Costo estimado de capital en dólares por KW.....	25
Figura 3.12 Planta propuesta por la compañía Sea Solar Power en el 2002.....	27
Figura 4.1 Variación de la densidad del agua de mar en función de s, t y p.....	30
Figura 4.2 Variación del calor específico en función de temperatura y salinidad.....	31
Figura 4.3 El océano mundial representado mediante una proyección ramificada.....	33
Figura 4.4 Principales corrientes de superficie de los océanos.....	37
Figura 4.5 Corrientes de superficie y profundidad de los océanos.....	38
Figura 4.6 Ejemplos de la distribución vertical de la temperatura en la capa superior del mar.....	42
Figura 4.7 Zonas de divergencia (ascensión de aguas).....	43
Figura 4.8 Un ejemplo simplificado de la variación anual de la temperatura en la capa superior de la zona templada de los océanos.....	44
Figura 4.9 El mar y la OTEC visto como máquina térmica.....	46
Figura 4.10 Batimetría del pacífico tropical mexicano.....	47
Figura 4.11 Variación anual de la temperatura (°C) superficial.....	47
Figura 4.12 Secciones batimétricas a través del golfo de California.....	49
Figura 4.13 Secciones longitudinales generalizadas desde el golfo superior.....	50
Figura 4.14 Temperaturas superficiales en el Golfo de California, comportamiento estacional.....	51
Figura 4.15 Rasgos batimétricos y topográficos del golfo de México.....	52
Figura 4.16 Rasgos Batimétricos y topográficos del mar Caribe.....	53
Figura 4.17 Distribución vertical de temperatura en diferentes condiciones.....	54
Figura 4.18 Lugares del pacífico mexicano que reúnen los requisitos para la instalación de una planta OTEC.....	55
Figura 4.19 Lugares del golfo de Baja California que reúnen los requisitos para la instalación de una planta OTEC.....	55

Figura 4.20 Lugares del mar caribe mexicano que reúnen los requisitos para la instalación de una planta OTEC.....	56
Figura 5.1 Comparación de los costos operativos de los diferentes tipos de generación de energía contra la OTEC.....	58
Figura 5.2 Distribución del costo de una planta OTEC .....	59
Figura 5.3 Planta OTEC con usos de los co-productos.....	61
Figura 5.4 Análisis del lugar propuesto (punto 1) para la planta OTEC en las costas mexicanas referido a la batimetría.....	64
Figura 5.5 Termoclina de la bahía de San Lucas.....	65
Figura 5.6 Ciudad cercana (Punto 1) y lugares en donde se propone la instalación de un aplanta OTEC con base en tierra.....	65
Figura 5.7 Análisis del lugar propuesto (punto 2) para la planta OTEC en las costas mexicanas referido a la batimetría.....	66
Figura 5.8 Termoclina de la bahía de Banderas.....	67
Figura 5.9 Ciudad cercana (Punto 2) y lugares en donde se propone la instalación de un aplanta OTEC con base en tierra.....	67
Figura 5.10 Análisis del lugar propuesto (punto 3) para la planta OTEC en las costas mexicanas referido a la batimetría.....	68
Figura 5.11 Termoclina del mar Caribe frente a isla Mujeres.....	69
Figura 5.12 Ciudad cercana (Punto 3) y lugares en donde se propone la instalación de un aplanta OTEC con base en tierra.....	69

## LISTA DE TABLAS

## Página

Tabla 3.1 Características de la planta MINI-OTEC de ciclo abierto en Hawai de NELHA.....	16
Tabla 3.2 Datos del experimento demostrativo para el vacío.....	18
Tabla 3.3 Características de una central OTEC experimental flotante de 1 MW de ciclo cerrado.....	20
Tabla 3.4 Tabla del la propuesta de una planta por el costo de los combustibles fósiles.....	26
Tabla 3.5 Costo estimado para una planta de 10 MW de ciclo cerrado en plataforma flotante.....	26
Tabla 4.1 Profundidad, área y volumen de los océanos.....	35
Tabla 4.2 Mínimos y máximos promedio de temperatura y salinidad para tres estaciones mareográficas del Pacífico Tropical Mexicano.....	48

## **RESUMEN**

El término OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion) es el nombre que se aplica a una máquina térmica que utiliza la energía térmica almacenada en los océanos. En 1881 el físico Francés D'Arsonval fue quien concibió originalmente la idea de generar energía eléctrica con el gradiente de temperatura que se presenta en la columna de agua entre el agua superficial y el agua de las profundidades del mar, a aproximadamente 700 m. Este gradiente solo se presenta en los mares tropicales es por ello que en las costas de México, debido a su posición geográfica, existen las condiciones óptimas para desarrollar la OTEC. Con el paso del tiempo se ha puesto a prueba este concepto. En cuanto al costo en el siglo XX una planta OTEC no fue competitiva con plantas termoeléctricas por lo que solo se construyeron plantas experimentales. En el siglo XXI la mayoría de los países del mundo le han dado importancia a las energías renovables, por los altos precios del petróleo, el abatimiento de los pozos petroleros y los efectos en el cambio climático debido a la quema de hidrocarburos. Por estas razones se vuelve a pensar en este tipo de energía, Estados Unidos y Japón, actualmente, son los más avanzados en el tema y ya han construido prototipos de Plantas OTEC cada uno sacando buenos beneficios y experimentando el concepto. Por ello, este estudio tiene como finalidad adentrar a los futuros ingenieros a conocer el concepto OTEC, para avanzar en la línea de investigación de aprovechamiento de energía limpia en México y así desarrollar nueva tecnología y ser uno de los países pioneros en este tipo de energía renovable.

## **OBJETIVO:**

Analizar la factibilidad de instalar una planta OTEC en las costas mexicanas, considerando:

- a) El funcionamiento de una planta OTEC con los diferentes ciclos.
- b) La batimetría, los posibles lugares de instalación en las costas tomando en consideración las aplicaciones, costos de operación, etc.

## I. INTRODUCCIÓN

México necesita incorporarse a los nuevos cambios que se están dando en todo el mundo principalmente en la actividad energética en el siglo XXI, concretamente las energías renovables que son alternativas a los combustibles fósiles.

El mundo actual está siendo testigo de un cambio histórico en cuanto a fuentes de energía, esto debido al probable agotamiento del petróleo y el problema climático que se hace mayor cada día. Hay diferentes enfoques, unos se alarman y lo sienten inminente y devastador, otros lo toman con calma y lo ven lento y sin consecuencias pero hay otros que ya ven las oportunidades que puede dar este cambio en el mundo, en el sistema energético y en específico la apertura mundial de las energías renovables. El cambio ya empezó y como siempre los países de primer mundo son los iniciadores del cambio energético y se han enfocado en promover el uso de la energía renovable y la disminución del uso de los combustibles fósiles y sus derivados. Sin embargo, cada vez se hace más evidente la necesidad de cada país, de cada individuo, de contribuir a la limpieza del ambiente global y de la calidad de vida de la población futura.

Es así que en México, como en todo el mundo, más allá de los convenios internacionales para enfrentar el cambio climático global, la emisión de gases de efecto invernadero y demás problemas ecológicos asociados a la energía tradicional, se tiene la necesidad o mejor dicho, la oportunidad de investigar, desarrollar y adoptar tecnologías que permitan aplicar fuentes renovables para tener un mejor futuro energético en el país. La fuente principal de energía renovable es el sol que dado su tiempo de vida de 5 000 millones de años para las escalas de tiempo humano se puede considerar inagotable. La energía solar tiene diferentes modalidades: radiación solar, los vientos generados por gradientes de temperatura, biomasa, oleaje, etc. Y además de ser “inagotable” y lo más importante, que es limpia (con algunas consideraciones) para el ambiente y para las generaciones futuras.

Este trabajo se enfoca en la energía del mar, mas específicamente, en la energía de una planta OTEC (conversión de la energía térmica del mar) en donde se aprovecha el gradiente térmico y se utilizan sus beneficios y aplicaciones.

## **II. ANTECEDENTES**

En este capítulo se habla de la experimentación del concepto, la fuente de energía y las ubicaciones de las plantas OTEC.

### **2.1 CONCEPTO OTEC**

Para entender el concepto, primero se debe identificar la fuente de energía de este sistema.

#### **2.1.1 Origen de la fuente de energía**

La primera y principal fuente de energía en la tierra procede del Sol. Las radiaciones que inciden sobre la superficie de la Tierra están formadas por ondas de pequeña longitud (de  $0.39 \mu$  a  $2.5 \mu$ ), que en parte son absorbidas por el ozono en la estratosfera y gran parte por las nubes, que la reflejan nuevamente al espacio en un 34% (albedo). El 66% de la energía restante es absorbida por la superficie terrestre. Sin embargo, existe un equilibrio anual entre la energía absorbida por la Tierra y la que ésta emite de nuevo al espacio; si no fuera así, la Tierra sufriría un incremento continuo de temperatura, que se estima en  $1.5 \text{ }^\circ\text{C}$  diarios. En la actualidad, un 71% de la superficie de la Tierra está cubierta de agua, y un porcentaje muy elevado (97.7%) de esta agua se encuentra en el mar ( $361.2$  millones de  $\text{km}^2$ ). Por tanto, una gran parte de la radiación solar absorbida por la superficie terrestre se lleva a cabo en el mar.

Los mares y los océanos son inmensos colectores solares de los cuales se puede extraer energía de orígenes diversos como son:

- Producidas por la radiación solar incidente sobre los océanos, en determinadas condiciones atmosféricas, da lugar a los gradientes térmicos oceánicos (diferencia de temperaturas) a bajas latitudes.
- El oleaje y las corrientes marinas.
- La influencia gravitacional de la luna y el sol sobre las masas oceánicas provocando las mareas.

El agua es un compuesto químico muy particular en cuanto a su comportamiento térmico. Comparada con todas las otras sustancias conocidas, tiene un calor específico más alto, es decir, la cantidad de calor necesario para elevar un grado su temperatura es más elevada. Por tanto, se calienta y se enfría más lentamente que la tierra. Sin embargo, en la tierra la radiación solar se queda casi toda en la superficie, mientras que en el agua del mar la radiación solar penetra, alcanzando generalmente una profundidad promedio de cien metros. La penetración de esta radiación depende principalmente de la turbidez, es decir, de la cantidad de materia sólida que se encuentra en suspensión. Todo lo anterior hace que el mar sea el colector solar y el sistema de almacenamiento de energía más grande del mundo. Además, la gran inercia térmica de los océanos permite que la temperatura sea más estable en ellos y menos marcados sus cambios, en el transcurso del día y de las cuatro estaciones del año, que en los continentes. La radiación solar decrece exponencialmente con la profundidad, por lo que la temperatura disminuye. Por tanto, puede decirse, de forma muy simple, que la distribución vertical de temperaturas en el océano abierto consiste en dos capas separadas por una interfase.

Una capa superior de agua relativamente caliente, con una temperatura uniforme; esa capa puede extenderse de los 20 a los 200 metros de profundidad, dependiendo de las condiciones locales. Debajo de esta franja existe una zona limítrofe, denominada termoclina (Fig. 2.1), que se caracteriza por un descenso brusco de la temperatura.

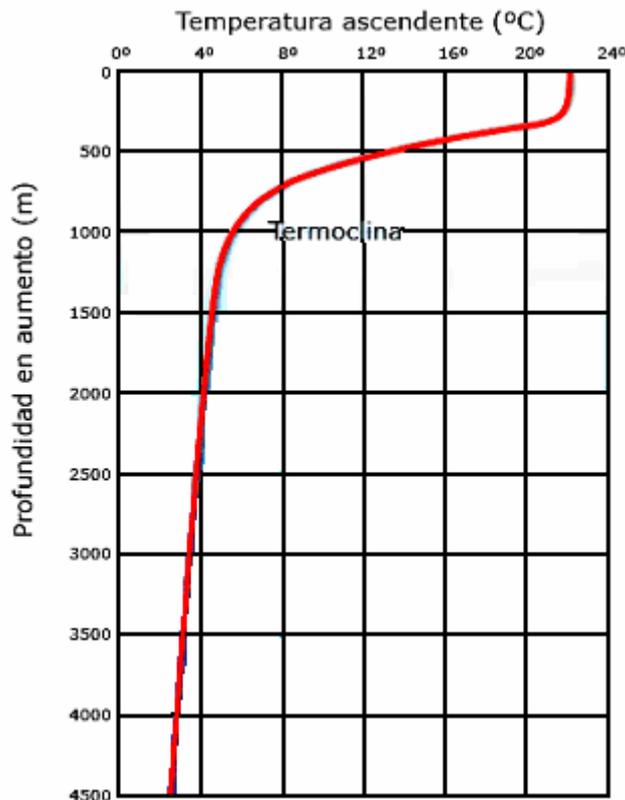


Figura 2.1 Termoclina <sup>[15]</sup>.

Esta franja, que puede considerarse comprendida desde la superficie hasta los 200m, divide a las aguas superficiales, menos densas y menos salinas, de las aguas de las profundidades, más frías, densas y salinas. La temperatura de la capa inferior decrece progresivamente hasta alcanzar valores de alrededor de 4°C a 1km de profundidad. En general, cuando en los océanos se alcanzan profundidades de 1 500 metros o mayores, la temperatura del agua puede ser menor de 4°C, en cualquier parte del mundo, independientemente de la temperatura superficial. En las profundidades de los abismos, a 11 kilómetros de la superficie, la temperatura es de -3.4 °C <sup>[2]</sup>, levemente superior al punto de congelación del agua salada del mar a estas profundidades. La diferencia de temperaturas entre la capa superior (caliente) y la capa inferior (fría) se encuentra en el intervalo de 10°C a 25°C, hallándose diferencias más elevadas en las aguas ecuatoriales.

La radiación solar produce un gran calentamiento de las superficies marinas ecuatoriales, las cuales llegan a alcanzar temperaturas de aproximadamente 28°C. Esto da lugar a que el agua almacene una importante cantidad de energía calorífica, puesto que, aunque esta temperatura es relativamente baja, las cantidades de agua involucradas son enormes, y el calor absorbido por un cuerpo es directamente proporcional a su masa y al incremento de temperatura al que se le somete. Para el aprovechamiento de la energía en una planta OTEC se requiere que el gradiente térmico sea de al menos 20°C. Por tanto, las zonas térmicamente favorables se encuentran en las regiones ecuatoriales y tropicales.

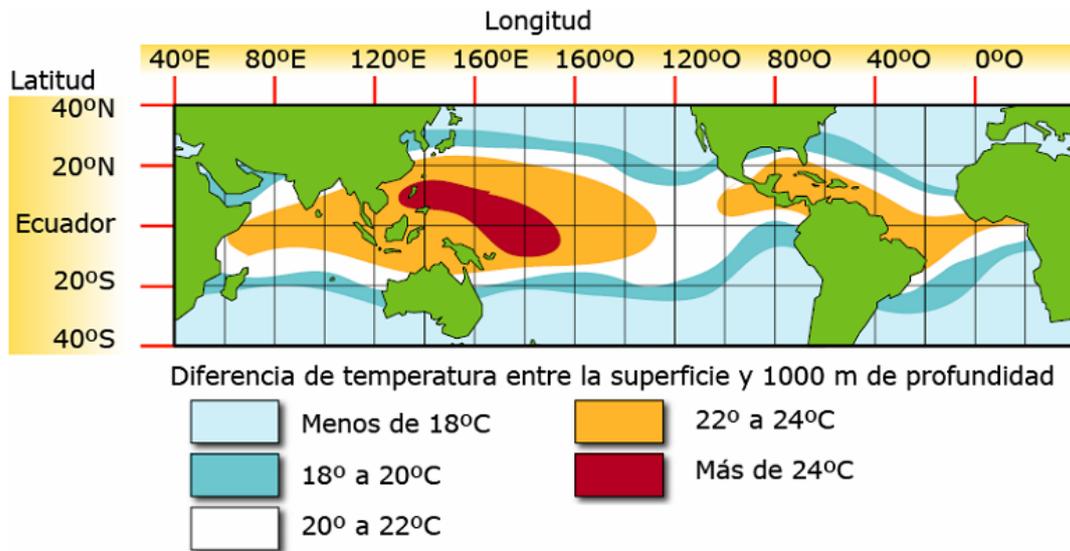


Figura 2.2 Gradiente de temperatura entre la superficie del mar y 1 000 metros de profundidad.<sup>[15]</sup>  
(Las zonas de más de 20°C, son las óptimas para las plantas OTEC)

Se estima que, en un año, la energía solar absorbida por todos los océanos es de al menos 4 000 veces la energía que actualmente consume la humanidad. Este gradiente térmico oceánico supone una importante fuente de energía y casi inagotable la cual puede ser aprovechada con la técnica OTEC.

Se necesitaría solo un 1% de la energía renovable que podría producir un sistema OTEC, con un rendimiento del 3%, para satisfacer todas nuestras necesidades energéticas actuales.

### 2.1.2 Explicación general del concepto OTEC

El aprovechamiento de los gradientes térmicos de las aguas oceánicas se lleva a cabo en las denominadas plantas OTEC. En estas plantas se transforma la energía térmica en energía eléctrica utilizando un ciclo termodinámico denominado “*ciclo Rankine*”. En este ciclo se emplea calor para evaporar un líquido, que posteriormente se utiliza en el accionamiento de una turbina, la cual se acopla a un generador eléctrico para producir energía eléctrica.

Como las diferencia de temperaturas en el evaporador y el condensador son bajas, se debe escoger un fluido de trabajo cuya presión de vapor sea bastante grande a esas temperaturas; por ejemplo, el propano ( $C_3H_8$ ) tiene una presión de vapor de alrededor de 5.5 atm a 5°C y un valor aproximado de 9.5 atm a 25°C, el amoniaco tiene a las temperaturas citadas, presiones de vapor de 5.2 atm y 10.3 atm respectivamente; existen otros fluidos con características térmicas similares.

El agua tibia de la superficie del océano se succiona hacia un intercambiador de calor o evaporador, en donde se evapora el fluido de trabajo del ciclo Rankine; el vapor pasa por una turbina que acciona un generador eléctrico y penetra en el condensador.

El agua fría que se bombea de las profundidades del océano mediante una tubería telescópica, se emplea para enfriar el fluido de trabajo que, al condensarse y volver al estado líquido, se bombea al evaporador y se inicia así un nuevo ciclo.

Además de las condiciones impuestas en la presión de vapor del fluido, una planta OTEC requiere unas enormes dimensiones de los sistemas de circulación de las corrientes templada y fría; hay que hacer notar que el agua fría se bombea desde profundidades entre 600 a 900 metros.

Esta máquina térmica, cualitativamente operaría de forma idéntica a una central térmica convencional.

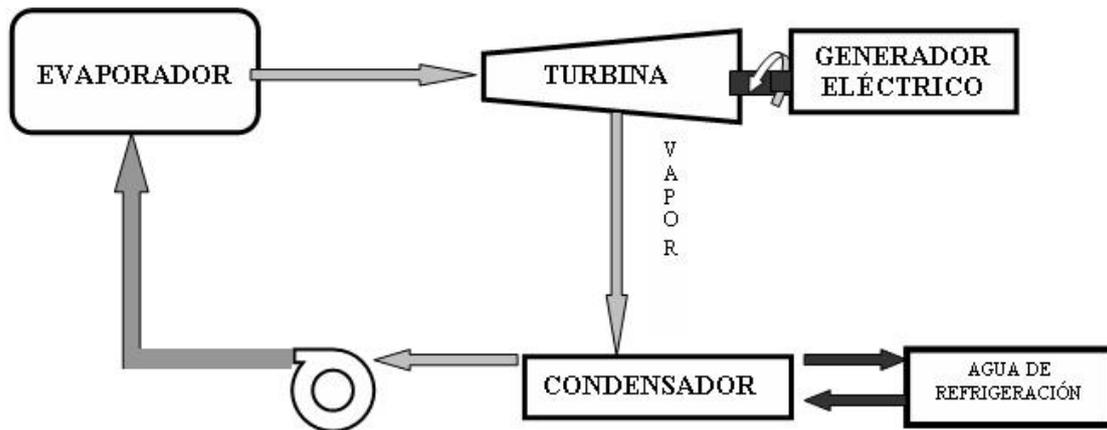


Figura 2.3 Esquema de una central termoeléctrica convencional.

En forma mas detallada un ciclo ranking en un proceso ideal trabajaría como se muestra en la fig. 2.4.

1-2. Proceso de bombeo adiabático y reversible.

2-3. Transferencia de calor al fluido de trabajo en una caldera a presión constante.

3-4. Expansión adiabática y reversible del fluido en la turbina.

4-5. Transferencia de calor desde el fluido de trabajo a presión constante en el condensador.

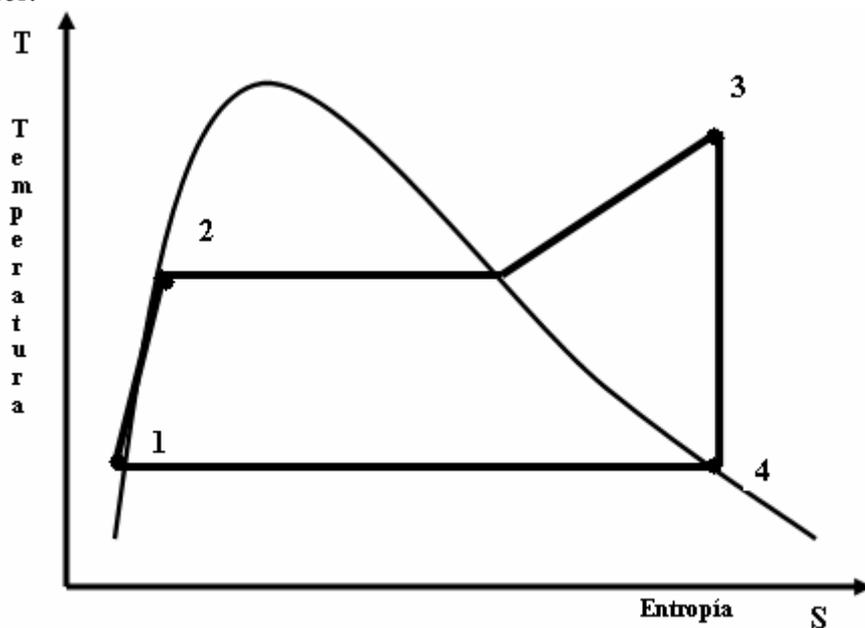


Figura 2.4 Diagrama T-S (temperatura-entropía) de un ciclo ranking simple.

Esto es, el agua caliente de la capa superior oceánica actúa como fuente de calor, mientras el agua extraída de las profundidades actúa como refrigerante. Sin embargo, hay que señalar que, cuantitativamente, las diferencias entre ambos tipos de instalaciones son importantes. Los rendimientos de las plantas OTEC son muy bajos, comparadas con las centrales térmicas convencionales, debido a que los gradientes térmicos también lo son.

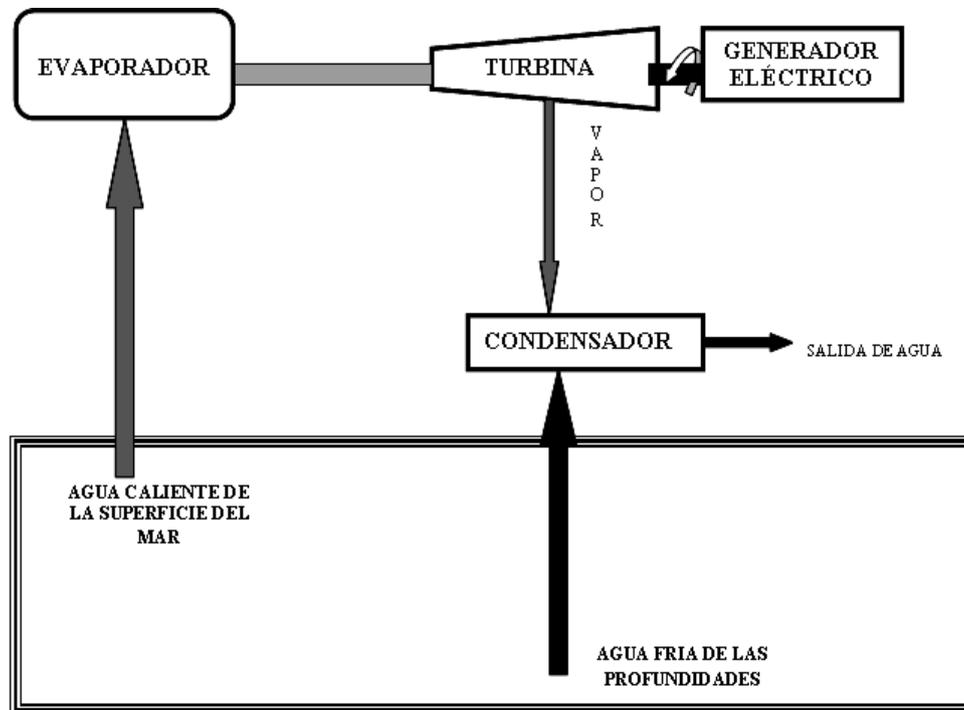


Figura 2.5 Esquema de una planta OTEC.

Para calcular el rendimiento de una planta OTEC se considera lo siguiente:

Si  $T_2$  y  $T_1$  son las temperaturas en grados centígrados del agua caliente y fría, respectivamente, el rendimiento teórico máximo obtenible en el ciclo se obtiene de la expresión siguiente:

$$\mu = (T_2 - T_1) / (T_2 + 273)$$

Donde:

$\mu$  = Rendimiento de la planta.

$T_1$  = Temperatura del agua de mar a una profundidad cercana a los 1 000 metros en °C.

$T_2$  = Temperatura de el agua de la superficie del mar en °C.

En el supuesto de utilizar un emplazamiento de condiciones muy favorables ( $T_2 = 30$  °C y  $T_1 = 4$  °C), se obtiene un rendimiento  $\mu$ , en porcentaje, de solo el 8.6%. Los rendimientos globales de estas instalaciones serán apreciablemente más bajos (entre el 2% y el 3%), no solo porque en general los gradientes térmicos suelen ser inferiores al considerado, sino por que hay que incluir los rendimientos de los distintos componentes de la instalación (evaporadores, condensadores, bombas, turbinas, generadores, etc.). Aunque también hay que decir que la gran diferencia de eficiencias entre las centrales termoeléctricas convencionales y las de energías renovables en este caso una planta OTEC, es que la fuente de energía es gratuita y ahí se compensa la desproporción en las eficiencias, además de otras ventajas climáticas que son de suma importancia.

## 2.2 Historia de la OTEC

En 1881, Jacques Arsene D'Arsonval, un físico francés, propuso el aprovechamiento del calor relativo ( $24^{\circ}\text{C}$  a  $30^{\circ}\text{C}$ ) de la superficie del agua de los océanos tropicales para vaporizar amoníaco presurizado a través de un intercambiador de calor (es decir, un evaporador) y usar el vapor resultante para accionar una turbina acoplada a un generador. El agua fría del océano transportada a la superficie desde 800m a 1 000m de profundidad, con un rango de temperaturas de  $8^{\circ}\text{C}$  a  $4^{\circ}\text{C}$ , condensaría el vapor de amoníaco a través de otro intercambiador de calor (es decir, un condensador). Su idea se basaba en el ciclo termodinámico Rankine usado para estudiar las plantas de potencia térmicas. Debido a que el amoníaco circula en un circuito cerrado, este concepto ha sido denominado OTEC de ciclo cerrado.

Cuarenta años después de D'Arsonval, Georges Claude, alumno de D'Arsonval, propuso, el 22 de noviembre de 1926, a la Academia Francesa de las Ciencias, el uso del agua del océano como fluido de trabajo. En el ciclo de Claude el agua de la superficie es evaporada súbitamente en una cámara de vacío. El vapor a baja presión resultante se utiliza para accionar una turbina acoplada a un generador y la relativamente más fría y profunda agua de mar se usa para condensar el vapor después que ha pasado a través de la turbina. Este ciclo puede, por consiguiente, ser configurado para producir agua desalinizada así como electricidad. Al ciclo de Claude también se le conoce como OTEC de ciclo abierto, ya que el fluido de trabajo fluye a través de todo el sistema. Claude demostró este ciclo en 1930 en Matanzas, Cuba, con una pequeña planta de 22kW, ubicada en tierra, haciendo uso de un condensador de contacto directo. La planta no logró alcanzar una producción neta de potencia debido a la mala selección del sitio debida al mal clima (es decir, el recurso térmico) y un mala combinación de los sistemas de potencia y agua de mar. Sin embargo, la planta funcionó durante once días, hasta que la conducción de agua fría fue destruida por una tempestad.

Posteriormente, Claude diseñó una planta flotante de 2.2MW para producir 2 000 toneladas de hielo para la ciudad de Río de Janeiro. Claude, en 1933, montó su planta en un barco mercante ("La Tunisie"), fondeado a 100 km. de la costa. Desafortunadamente, fracasó en sus numerosos intentos de instalar la larga tubería vertical requerida para transportar el agua de las profundidades del océano al barco y abandonó su empresa en 1935<sup>[5]</sup>.

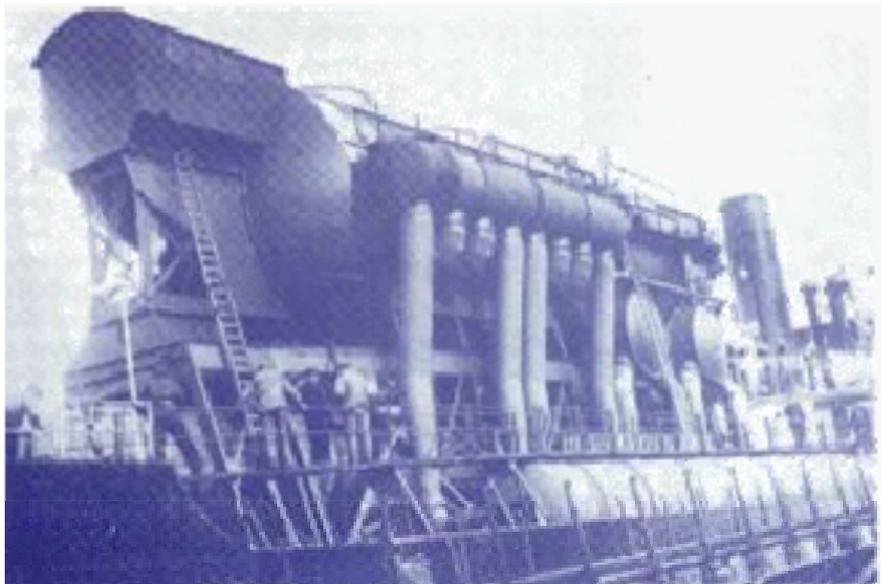


Figura 2.6 Planta OTEC instalada por G. Claude (La tunisie)<sup>[5]</sup>.

En 1979 NELHA<sup>[24]</sup> montó en una barcaza, una pequeña planta de ciclo abierto, denominada Mini-OTEC, en la costa occidental de Hawai, que produjo 50kW de potencia bruta, con una producción neta de 18kW.



Figura 2.7 Planta miniOTEC en Hawai <sup>[24]</sup>.

Posteriormente, en 1982, unas plantas instaladas en tierra firme por un consorcio de compañías japonesas, con una potencia bruta de 100kW, funcionó en la isla de Nauru (Estados Unidos). Estas plantas operaron unos pocos meses. Sin embargo, eran demasiado pequeñas para extrapolar los resultados a sistemas comerciales de mayor tamaño. El siguiente paso, llevado a cabo por NELHA<sup>[24]</sup> con el propósito de obtener experiencia en cuestiones relacionadas con la operación de las plantas OTEC, fue la instalación, en Hawaii, de una pequeña planta experimental en tierra. Esta planta fue diseñada y puesta en funcionamiento de 1993 a 1997.



Figura 2.8 Vista aérea de la planta experimental OTEC en Hawai <sup>[24]</sup>.

La turbina-generador fue diseñada para generar 210kW, con un agua superficial a la temperatura de 26°C y un agua fría de 6°C. Una pequeña fracción (10%) del vapor producido se desviaba a la superficie de un condensador para la producción de agua desalinizada. La planta experimental operó con éxito durante 1993 a 1997.

La proporción más alta, como producto secundario de producción, fue de 255 kW (brutos) con una potencia neta correspondiente de 103 kW y 0.4 l·s<sup>-1</sup> de agua desalinizada.

En 1999 se iniciaron los estudios, por parte de la Universidad de Saga (Japón) y NIOT (India), para la instalación de una planta OTEC experimental de 1MW de potencia bruta en la India. La planta fue instalada en el año 2000 en un barco, de nombre Sagar Shakthi, fondeado a 35Km de Tiruchendur, en el sureste de la India. La planta fue diseñada para operar con un gradiente térmico de 22°C, extrayendo agua fría (7°C) desde 1 000 m. de profundidad mediante una tubería de 0.88 m de diámetro. La planta estuvo en funcionamiento en el periodo 2000-2002 <sup>[23]</sup>.



Figura 2.9 Barco Sagar Shakthi utilizado como planta OTEC en la India <sup>[23 y 25]</sup>

### 2.3 Ubicación de las centrales OTEC

Con respecto a la ubicación de las plantas OTEC comerciales hay que señalar que éstas deben instalarse en un entorno que sea bastante estable para lograr una eficiente operación del sistema. Para lograrlo, las plantas se construyen en:

- Tierra firme, o zona cercana a la costa
- Plantas montadas en plataformas.
- Instalaciones flotantes o ancladas en profundas aguas oceánicas.

Las instalaciones situadas en tierra y las cercanas a la costa ofrecen tres ventajas principales sobre las localizadas en aguas profundas. Las plantas construidas en o cerca de la tierra no requieren sofisticados amarres, largos cables para transportar la energía generada, o el importante mantenimiento asociado con los entornos de mar abierto.

Pueden ser instaladas en áreas protegidas de tal manera que están relativamente resguardadas de las tormentas.

La electricidad, el agua desalinizada, y el agua fría, rica en nutrientes, pueden ser transportadas desde las instalaciones cercanas a la costa vía puentes o carreteras. Para evitar la zona turbulenta de las olas así como para tener más próximo el acceso a los recursos de agua fría, las plantas OTEC pueden ser montadas en la plataforma continental.



Figura 2.10 Planta OTEC instalada en la costa <sup>[24]</sup>

Las instalaciones OTEC flotantes pueden ser diseñadas para funcionar mar adentro. Aunque potencialmente son preferidas para los sistemas con una gran capacidad de potencia, las instalaciones flotantes presentan diversas dificultades. Este tipo de plantas son más difíciles de estabilizar, y la dificultad de anclarlas en aguas profundas puede crear problemas con el suministro de energía. Los cables conectados a las plataformas flotantes son más susceptibles de ser dañados, especialmente durante las tormentas. Además, los cables en profundidades mayores de 1 000 metros son difíciles de mantener y reparar. Las plantas flotantes necesitan una base estable para su funcionamiento. Las tormentas y los mares embravecidos pueden romper la tubería, verticalmente suspendida, de extracción de agua fría e interrumpir la toma de agua caliente también. Para prevenir estos problemas, las tuberías pueden ser fabricadas de material relativamente flexible (polietileno por ejemplo) <sup>[27]</sup>.

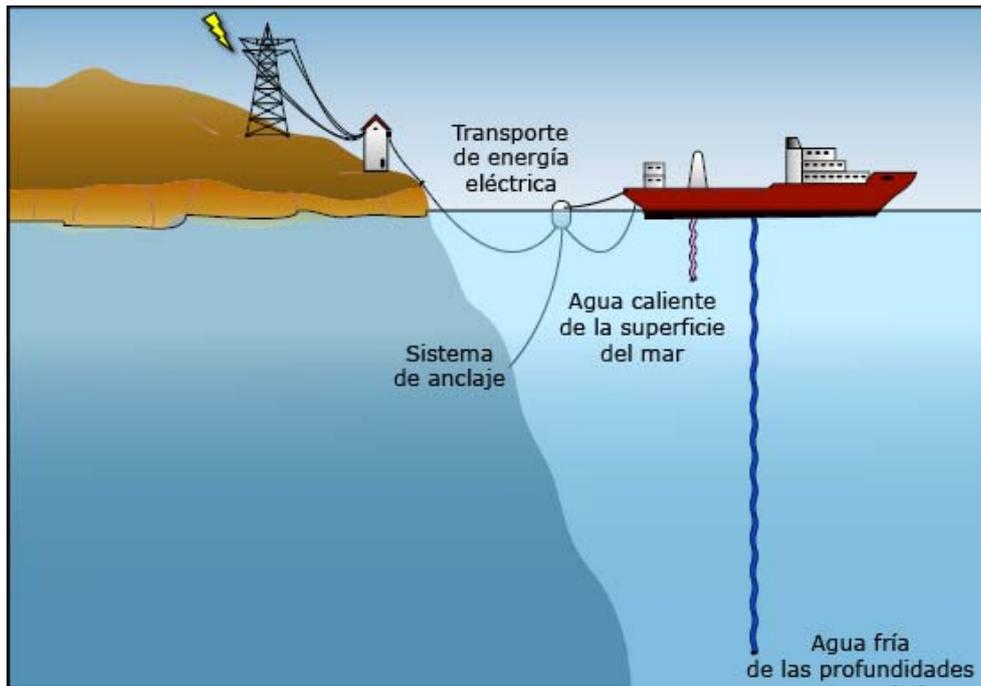


Figura 2.11 Esquema de una planta OTEC ubicada mar adentro <sup>[23]</sup>.

Para que una planta flotante pueda ser conectada a los cables de transporte de energía, necesita permanecer relativamente inmóvil. El amarre es un método aceptable, pero las tecnologías habituales de amarre están limitadas a profundidades de alrededor de 200 metros. Incluso en profundidades pequeñas, el coste del amarre puede hacer prohibitivo aventurarse comercialmente en estas empresas.

### **III. COMO FUNCIONA UNA PLANTA OTEC**

En este capítulo se habla de los componentes y los ciclos conocidos hasta hoy en día con los que se puede trabajar un planta OTEC.

#### **3.1 Componentes de la OTEC**

Independientemente del tipo de ciclo utilizado en las plantas OTEC, los componentes fundamentales de todas ellas son los siguientes:

##### **3.1.1 Evaporadores y condensadores (intercambiadores de calor).**

Los intercambiadores de calor constituyen una parte importante del funcionamiento y del coste de los sistemas de ciclo cerrado. El titanio fue el material original elegido para fabricar los intercambiadores de calor de ciclo cerrado debido a su resistencia a la corrosión. Sin embargo, es una opción muy cara para plantas que usan grandes intercambiadores de calor. Las aleaciones de cobre-níquel, que se usan para proteger plataformas y tuberías de agua fría, no son compatibles con el amoníaco, el fluido de trabajo más habitual. Una alternativa válida para estos materiales puede ser el aluminio. Los ensayos realizados con este material han indicado que pueden durar hasta 20 años en agua de mar. Los evaporadores súbitos utilizados en los sistemas de ciclo abierto incluyen los de flujo en canal abierto, los de películas descendentes, y los de chorros descendentes. Estos evaporadores convencionales normalmente operan entre un 70% y un 80% del funcionamiento termodinámico máximo, con pérdidas hidráulicas aceptables.

El Laboratorio Nacional de Energías Renovables de EEUU (NREL), ha dirigido el desarrollo de un evaporador vertical que puede operar hasta el 90% del límite termodinámico. En los sistemas de ciclo abierto, después que el vapor pasa a través de las turbinas, puede ser condensado en condensadores de contacto directo o en condensadores de superficie.

Los condensadores de contacto directo no tienen la pared sólida interpuesta de los condensadores de superficie, por tanto, proporcionan una condensación más efectiva. NREL diseñó un condensador de dos etapas donde el agua fría se distribuye a través de dos vasos de extremos abiertos rellenos de un material de protección disponible comercialmente. Alrededor del 80% del vapor se condensa cuando fluye a través del primer vaso en la misma dirección del agua del mar fría. El vapor restante es enviado a la parte inferior del segundo vaso y fluye a través de él en dirección opuesta al agua del mar. En la parte superior del segundo vaso, un sistema de bombas de vacío extraen los gases no condensables (inertes) con el vapor no condensado <sup>[23]</sup>.

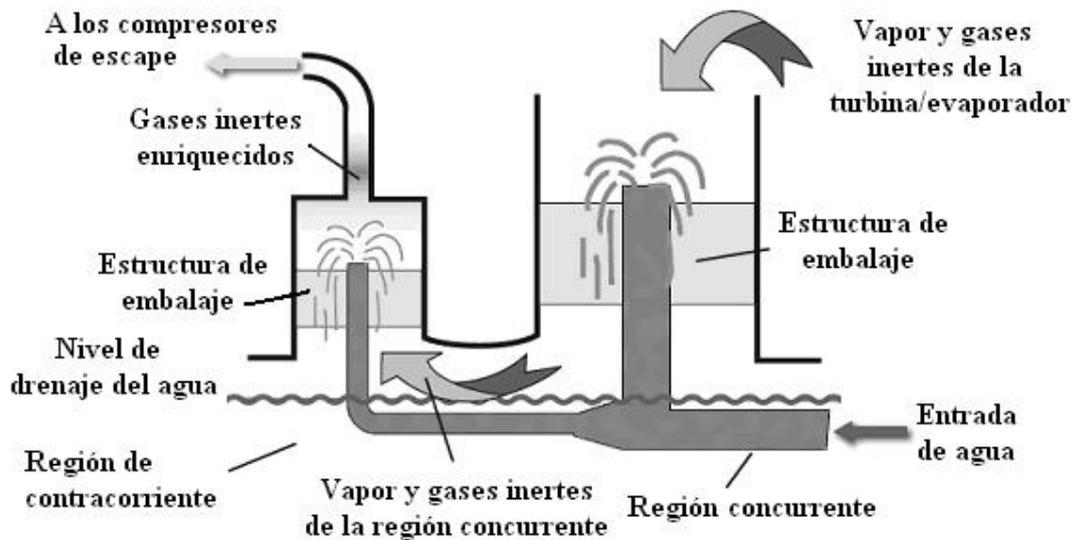


Figura 3.1 Diseño de un condensador de dos etapas diseñado por NELHA <sup>[24]</sup>.

Los condensadores de superficie mantienen el agua fría del mar, separada del vapor usado durante la condensación. Mediante un contacto directo, los condensadores producen agua desalinizada que esta relativamente libre de impurezas del mar. Los condensadores de superficie usados por las plantas OTEC son similares a los usados en plantas de potencia convencionales; sin embargo, estos condensadores de superficie deben operar a más bajas presiones y con más altas cantidades de gases no condensables en el vapor. El vapor de los sistemas de ciclo abierto contiene gases no condensables que pueden interferir con la producción de potencia. Estos gases –oxígeno, nitrógeno, y dióxido de carbono- son liberados por el agua del mar cuando se le somete a bajas presiones en el vacío. El aire también entra en la cámara de vacío del ciclo abierto por infiltraciones, aunque adecuadas técnicas de construcción pueden reducir la proporción de aire infiltrado a niveles muy bajos. Si estos gases no son retirados desde la cámara de vacío, pueden interferir en la condensación al cubrir las superficies de los condensadores; pueden incluso acumularse tanto que pueden parar la evaporación. Un compresor puede retirar estos gases no condensables. La potencia máxima requerida para accionar el compresor se estima en un 10% de la potencia bruta generada por el sistema. Una vez que las gotitas de agua son retiradas, el vapor puede fluir a través de las grandes turbinas de baja presión, entrando a una presión de alrededor 2.4KPa.

### 3.1.2 Turbina.

Estas turbinas deben ser capaces de manejar el gran flujo de vapor necesario para producir una importante cantidad de energía eléctrica. Estudios realizados por la compañía Westinghouse Electric Corporation concluyeron que para producir 100MW netos de potencia eléctrica, la turbina más económica y fiable será aquella que opere a baja velocidad (200rpm) y tenga un diámetro de aproximadamente 44 metros. Sin embargo, esta turbina requiere de un mayor desarrollo. Actualmente se dispone de las turbinas multietapas usadas en las plantas nucleares o de carbón. Las etapas de baja presión de estas turbinas generalmente operan en condiciones cercanas a las que se necesitan en una planta OTEC de ciclo abierto. El rotor que compone la ultima etapa (que generalmente tiene 5 metros de diámetro), junto con un estator modificado, puede producir alrededor de 2.5MW de electricidad (bruta).

Las plantas mayores requerirían de diversas turbinas operando en paralelo o importantes avances en la tecnología de turbinas que permitieran el uso de rotores más grandes <sup>[24]</sup>.

## 3.2 Ciclos OTEC

Se han experimentado tres ciclos para las plantas OTEC.

### 3.2.1 Sistemas de ciclo abierto

En el sistema de ciclo abierto, denominado también ciclo de Claude, se usa el agua caliente de la superficie del océano como fluido de trabajo para accionar la turbina. El agua caliente se vaporiza súbitamente en un evaporador en el que previamente se ha extraído el aire, con una bomba de vacío. Al disminuir la presión en el evaporador por falta de aire, también disminuye la temperatura de ebullición del agua de mar, por lo que ésta hierve a la temperatura en que se encuentra en la superficie del mar. En el evaporador se obtiene una mezcla de vapor y agua líquida a la presión de saturación correspondiente a la temperatura del agua (0.0356 bares para una temperatura del agua de mar de 27°C). El vapor separado del agua líquida pasa a través de una turbina de expansión, accionándola, y seguidamente se dirige a un condensador, en el que se obtiene de nuevo agua líquida saturada a una presión y temperatura aproximadas de 0.017 bares y 15°C, respectivamente. El condensador, de los denominados de contacto directo, utiliza el agua fría del mar como fluido refrigerante. El agua líquida procedente del evaporador y del condensador se retorna al mar. El proceso se repite con continuos suministros de agua caliente y fría.

Además de los dispositivos mencionados, una instalación de este tipo requiere de equipos para eliminar los gases disueltos en el agua del mar, los cuales no son condensables. Las súbitas evaporaciones en las salidas de un evaporador dan lugar a que gotitas de agua de mar pasen al vapor. Si no son eliminadas, estas gotas pueden causar erosión y grietas en las palas de las turbinas <sup>[27]</sup>.

Haciendo pasar el vapor a través de eliminadores de neblina comerciales, típicos de muchos procesos industriales, se puede eliminar una cantidad suficiente de estas gotas de agua. El rendimiento de este sistema es muy bajo, sobre un 7%. Ello se debe a la baja temperatura de la fuente de calor y la poca diferencia de temperatura entre el fuente fría y caliente. Además, es preciso consumir energía para bombear el agua fría de las profundidades del mar para condensar el vapor y para accionar la bomba de vacío del evaporador. Se estima que entre un 20% a un 30% de la potencia eléctrica generada se consume en las operaciones de bombeo. Además, hay que señalar que las bajas presiones del vapor de trabajo implica la necesidad de diseñar turbinas específicas, de gran tamaño, lo que dificulta el desarrollo de este tipo de sistemas <sup>[23]</sup>.

En la fig. 3.2 se muestra un diagrama Temperatura vs Entropía (T-S) para un ciclo abierto OTEC convencional en el cual se tienen los procesos antes explicados, estos son:

- 1-2 Con ayuda de una cámara de vacío se reduce la presión para poder alcanzar el punto de ebullición a la temperatura de entrada del agua.
- 2-3 Un porcentaje del agua salada se evapora a presión constante disminuida.
- 3-4 El vapor Expansión adiabática y reversible del fluido en la turbina.
- 4-5 Transferencia de calor desde el fluido de trabajo a presión constante en el condensador.

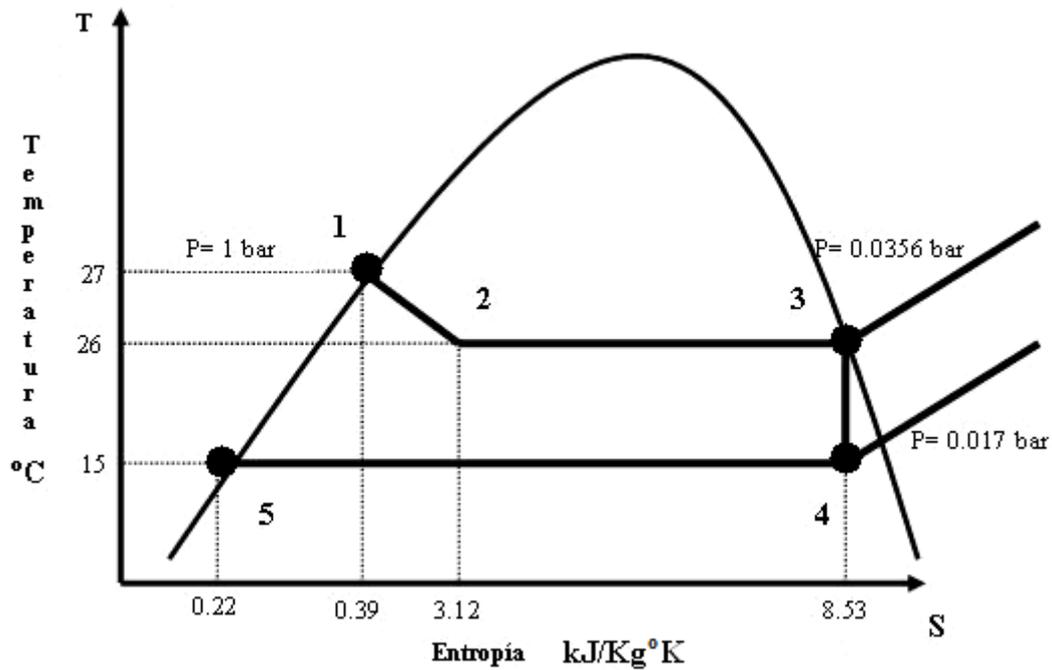


Figura 3.2 Diagrama T-S de un ciclo abierto en una planta OTEC, la P es Presión (Los datos son de la planta MINI-OTEC) <sup>[23]</sup>

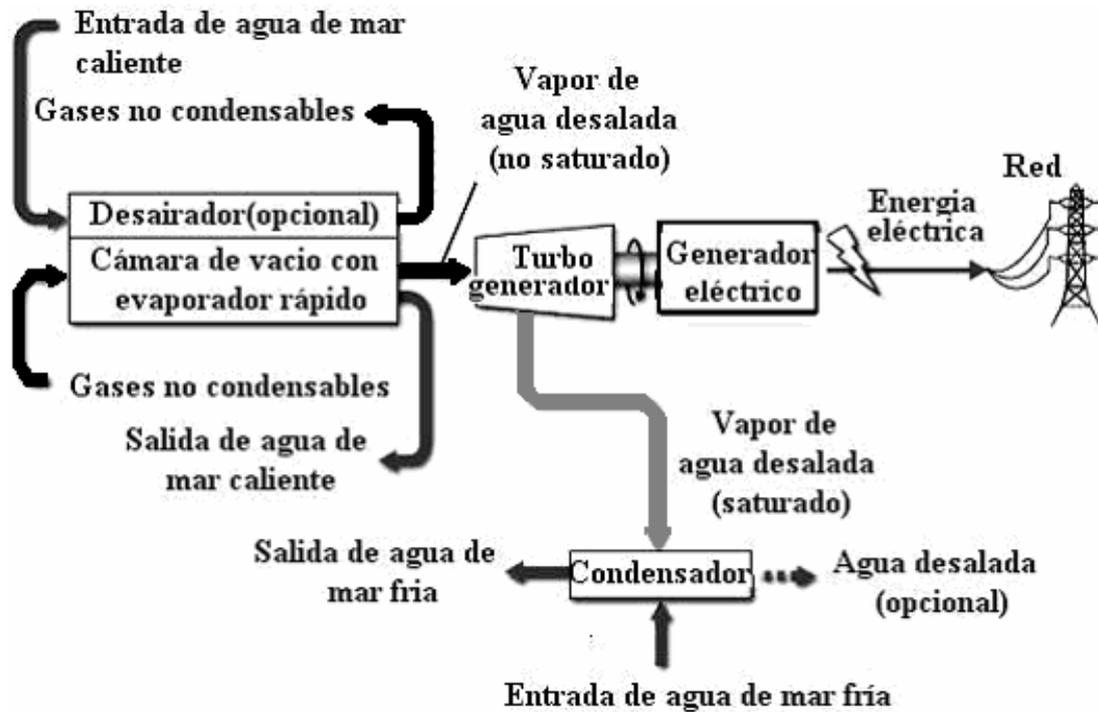


Figura 3.3 Esquema de un ciclo abierto OTEC <sup>[7]</sup>.

Como ya se mencionó en el capítulo 2.3 en Estados Unidos, de 1993 a 1997 NELHA puso en funcionamiento una planta OTEC de ciclo abierto en Hawái, la cual tuvo las siguientes características técnicas.

Potencia bruta nominal	210 kW	Gasto del agua fría	0.410 m <sup>3</sup> /s
Potencia bruta máxima	255 kW	Gasto del agua caliente	0.606 m <sup>3</sup> /s
Potencia neta máxima	103 kW	Profundidad de la tub. del agua fría	823 m
Bombas de agua	200 kW	Diámetro de la tub. del agua fría	1.02 m
Temperatura del agua caliente	26 °C	Velocidad de rotación de la turbina	1800 t/min
Temperatura del agua fría	6 °C	Tasa de condensación de vapor	10 %
Agua dulce producida	0.4 l/s	Diámetro de la turbina	3.05 m

Tabla 3.1 Características de la planta MINI-OTEC de ciclo abierto en Hawaii de NELHA <sup>[14 y 24]</sup>.

### Experimentación propia.

Para entender mejor el concepto OTEC se hicieron algunos experimentos para simular los ciclos abierto y cerrado OTEC a nivel laboratorio, el lugar donde se elaboraron los experimentos fue el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM.

Lo primero que se hizo fue realizar un ciclo Rankine simple, con la finalidad de entender las bases del concepto OTEC.

Se ocupó una olla express de 4 litros funcionando como caldera, se utilizó una miniturbina de 0.5 W, para los condensadores se ocuparon condensadores químicos de vidrio, uno de espiral y otro de burbuja.

El experimento se realizó con tres litros de agua salada, la olla se puso a calentar en una parrilla eléctrica hasta que el agua alcanzara su punto de ebullición, la parte superior de la olla tenía una salida de vapor de un diámetro pequeño de 0.003 m, conectada a la miniturbina en donde el vapor de agua destilada hacía girar las alabes y estas estaban en una flecha conectada mediante un engrane a un motor de 12 V que hacía las funciones de un generador, este suministró hasta 1 W de potencia. Después de que el vapor pasaba por la miniturbina, se tenía una salida hacia unos condensadores químicos por los cuales circulaba agua a 22 °C. Finalmente el agua condensada se vertía en un recipiente

Datos del experimento.

- |  |                         |                           |
|--|-------------------------|---------------------------|
| 1.- Agua salada en la olla de aproximadamente 35 ups;  | T <sub>1</sub> = 22 °C  | P <sub>1</sub> = 0.77 bar |
| 2.- Entrada de vapor a la miniturbina;                 | T <sub>2</sub> = 120 °C | P <sub>2</sub> = 1.30 bar |
| 3.- Salida de la miniturbina y entrada al condensador; |                         | P <sub>3</sub> = 0.77 bar |
| 4.- Salida del agua del condensador;                   | T <sub>4</sub> = 70 °C  | P <sub>4</sub> = 0.77 bar |

Cálculos del experimento.

Entalpías.

De tablas <sup>[17]</sup> obtenemos h<sub>1</sub> y h<sub>2</sub>:

$$h_{1\text{tablas}} = 92.092 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{2\text{tablas}} = 2713.48 \text{ kJ/kg}$$

Para la h<sub>3</sub> necesitamos saber la calidad del vapor, por lo que como consideramos una entropía constante de 2 a 3.

$$s_3 = s_2 = 7.3483 \text{ kJ/kg K}$$

$$s_3 = (s_f + x s_{fg})_{0.77 \text{ bar}}$$

de tablas:

$$s_f = 1.2124 \text{ kJ/kg K} \quad \text{y} \quad s_{fg} = 7.45715 \text{ kJ/kg K}$$

$$\text{por lo tanto: } 7.3483 = 1.2124 + x * 7.45715$$

despejando x obtenemos  $x = 0.8228$  en porcentaje  $x = 82.28 \%$

$$h_3 = (h_f + xh_{fg})_{0.77 \text{ bar}} \quad h_3 = 384.18 + 0.8228 * 2278.7 = 2259 \text{ kJ/kg}$$

y por ultimo;

$$h_{4\text{tablas}} = 293 \text{ kJ/kg}$$

Calor suministrado;

$$q_{\text{sum}} = h_2 - h_1 = 2713.48 - 92.092 = 2621.4 \text{ kJ/kg}$$

Trabajo de la miniturbina

$$w_{T \text{ salida}} = h_2 - h_3 = 2713.48 - 2259 = 454.48 \text{ kJ/kg}$$

Eficiencia térmica;

$\eta_t = w_{\text{neto de salida}} / q_{\text{sum}}$  ; para obtener el calor neto de salida se le tendría que restar el trabajo de la bomba a la turbina pero como no utilizamos la bomba ya que solo es experimental no lo considera para este calculo. Por lo tanto queda de la siguiente manera;

$$\eta_t = w_{T \text{ salida}} / q_{\text{sum}} = 454.48 / 2621.4 = 0.1733 \text{ en porcentaje,}$$

$$\eta_t = 17.33 \%$$

donde

T es temperatura

P la presión

h la entalpía

s la entropía

x la calidad

q el calor por unidad de masa

w el trabajo

$\eta_t$  la eficiencia térmica

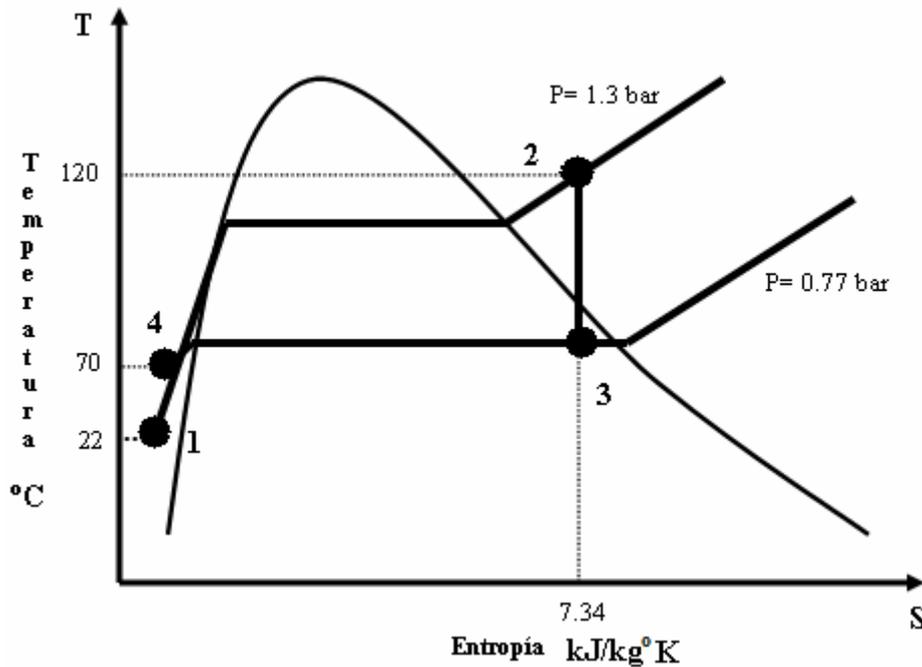


Figura 3.4 Diagrama T-S del ciclo Rankine simple experimental ICMYL.

En el caso del ciclo abierto OTEC lo que se necesita es una cámara de vacío para poder reducir el punto de ebullición del agua de mar. La bomba de vacío que se utilizó en los experimento de laboratorio era de 1/3 de HP (W) de potencia, que permitió practicar la disminución del punto de ebullición en el agua. Se intento hacer vacío en la olla express de un litro pero debido a que no estaba totalmente hermética y que la potencia de la bomba no alcanzaba para realizar un vacío mayor se opto por realizar solo el experimento de vacío en un kitasato de 600 ml, este solo seria demostrativo, de como se disminuye el punto de ebullición al quitar el aire en el recipiente (Por lo que el ciclo abierto OTEC no se podía llevar acabo con los instrumentos que se tenían para la experimentación) Este experimento también nos ayudo a darnos cuenta de cuanto aire podía quitar la bomba de vacío y su eficiencia.

El experimento consistía en lo siguiente:

Se ponía a diferentes volúmenes de agua al kitasato, se realizaba el vacío, después se calentaba el agua en el kitasato hasta que alcanzara el punto de ebullición.

Volumen agua (ml)	Volumen aire ( $m^3 \times 10^{-6}$ )	Temperatura de ebullición ( $^{\circ}C$ )	Presión de saturación (bar)
550	50	44	0.091512
500	100	53	0.131274
400	200	60	0.1994
300	300	70	0.3119
200	400	92	0.77

Tabla 3.2 Datos del experimento demostrativo para el vacío.

Como ya se mencionó este experimento fue solo demostrativo, dio una idea de que tan difícil es realizar el vacío.

### 3.2.2 Sistemas de ciclo cerrado.

En el sistema de ciclo cerrado, denominado también ciclo de Anderson, el calor se transfiere desde el agua caliente procedente de la superficie del mar a un fluido de trabajo de bajo punto de ebullición (tales como el propano, freón o el amoniaco) para evaporarlo a presiones más adecuadas (aproximadamente 7 bares). El vapor expandido se dirige a la turbina acoplada al generador que produce electricidad. El agua fría del mar pasa a través de un condensador que contiene el fluido de trabajo vaporizado transformándolo en líquido, que es reciclado a través del sistema. Los sistemas de ciclo cerrado presentan la ventaja, respecto a los sistemas de ciclo abierto, de necesitar turbinas más pequeñas. Ello se debe a que la presión y el volumen específico del fluido de trabajo son más elevados. Sin embargo, hay que señalar que las superficies de transferencia de calor en el evaporador y el condensador son más grandes debido al bajo rendimiento del sistema <sup>[24]</sup>.

En la fig. 3.5 se muestra un diagrama T-S, de un ciclo cerrado OTEC convencional mostrando los siguientes procesos:

- 1-2. Proceso de bombeo adiabático y reversible.
- 2-3. Transferencia de calor al fluido de trabajo en una caldera a presión constante.
- 3-4. Expansión adiabática y reversible del fluido en la turbina.
- 4-5. Transferencia de calor desde el fluido de trabajo a presión constante en el condensador.

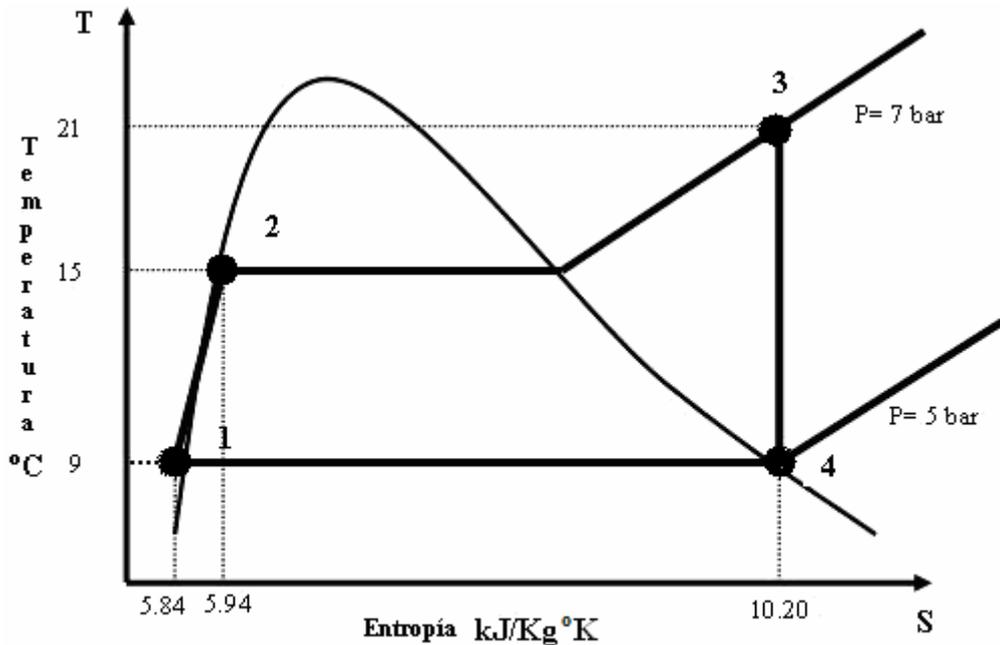


Figura 3.5 Diagrama T-S de un ciclo cerrado en una planta OTEC usando como fluido de trabajo amoniaco <sup>[25]</sup>.  
(Los datos son de la planta Sagar Shakti)

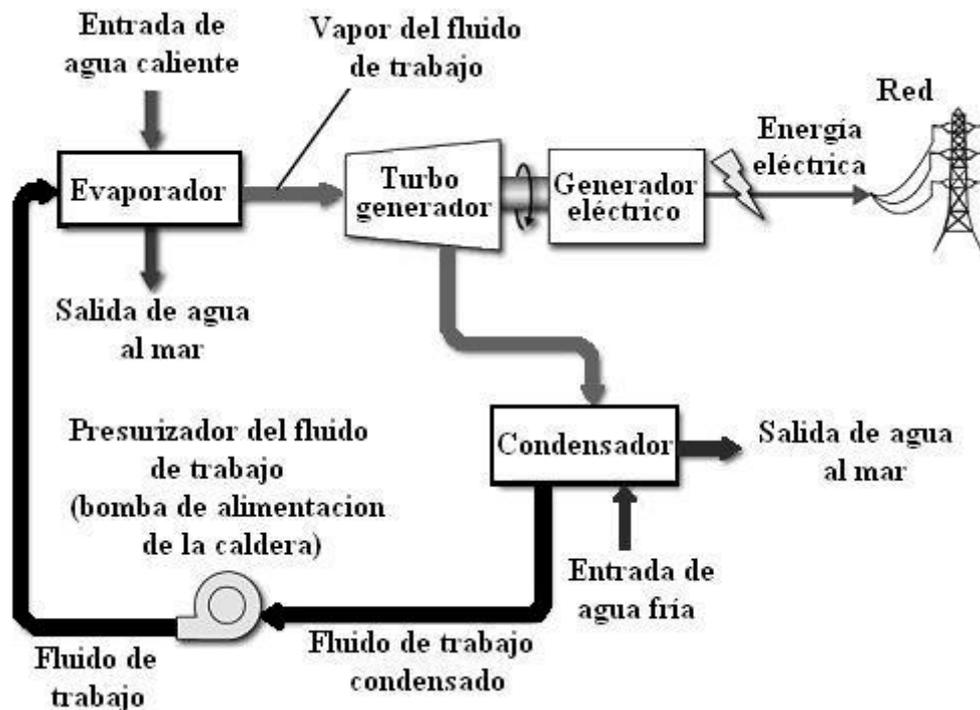


Figura 3.6 Esquema de un ciclo cerrado OTEC <sup>[7]</sup>.

De las centrales OTEC de ciclo cerrado, la que se puso en funcionamiento es una planta piloto con una energía bruta de 1 MW, esta planta fue embarcada en las costas de la india en Sagar Shakti del 2000 al 2002, este es un proyecto Japonés y de la India.

Concretamente las características técnicas son las siguientes:

Potencia bruta	1 MW	Longitud de la tub. agua fría	1000 m
Potencia neta	493 kW	Diámetro int. de la tub. agua fría	0.88 m
Bomba del agua fría	297 kW	Superficie de evaporación	3924 m <sup>2</sup>
Bomba del agua caliente	192 kW	Superficie de condensación	3610 m <sup>2</sup>
Bomba del fluido de trabajo	18 kW	Gasto de agua fría	1.49 m <sup>3</sup> /s
Temperatura del agua caliente	29 °C	Gasto de agua caliente	2.10 m <sup>3</sup> /s
Temperatura del agua fría	7 °C	Función de evaluación	15.2 m <sup>2</sup> /kW

Tabla 3.3 Características de una central OTEC experimental flotante de 1 MW de ciclo cerrado <sup>[14 y 24]</sup>.

Debido a que en el ciclo cerrado OTEC se pueden cambiar los fluidos de trabajo, se ha buscado además de los fluidos de bajo punto de ebullición, mezclar algunos fluidos de trabajo para dar mayor eficiencia al sistema. Exergy, Inc. de OCEES en E.U. creó un nuevo ciclo denominado ciclo Kalina.

El ciclo Kalina es un ciclo modificado del ciclo Rankine con una eficiencia mayor, la cual es el resultado de cambiar las características del líquido de trabajo (en este caso el amoníaco) por una mezcla de amoníaco y agua, lo que conocemos del ciclo Rankine es lo tradicional, que sería trabajar con un líquido de trabajo puro, en este caso el agua o el amoníaco.

El ciclo Kalina explota específicamente la variable de la temperatura, al hervir el fluido, y las temperaturas de condensación de un líquido de funcionamiento variable, es decir, de la mezcla del amoníaco y del agua este puede ser siguiendo la línea del punto de ebullición entre las mezclas para encontrar la idónea.

Comparando con un ciclo convencional Ranking, el agua fría extraída de las profundidades del mar para condensar el amoníaco/agua no tiene que ser tan fría y así con el ciclo Kalina se pueden ganar algunos grados que se reflejan en una tubería menos profunda y por lo tanto un costo menor en la operación. Generalmente, para los usos de OTEC y las temperaturas del sistema, la mezcla que se utiliza es un 60% de amoníaco y un 40% de agua (por peso) entra en el evaporador de la contracorriente donde es calentada por el agua de mar superficial (caliente).

El vapor calentado (la mezcla líquida) viaja al separador en donde el vapor del amoníaco de la alta calidad va a la turbina. El líquido “magro” caliente del separador drena a través del recuperador y calienta una cantidad entrante de 60/40 del líquido de funcionamiento de la mezcla.

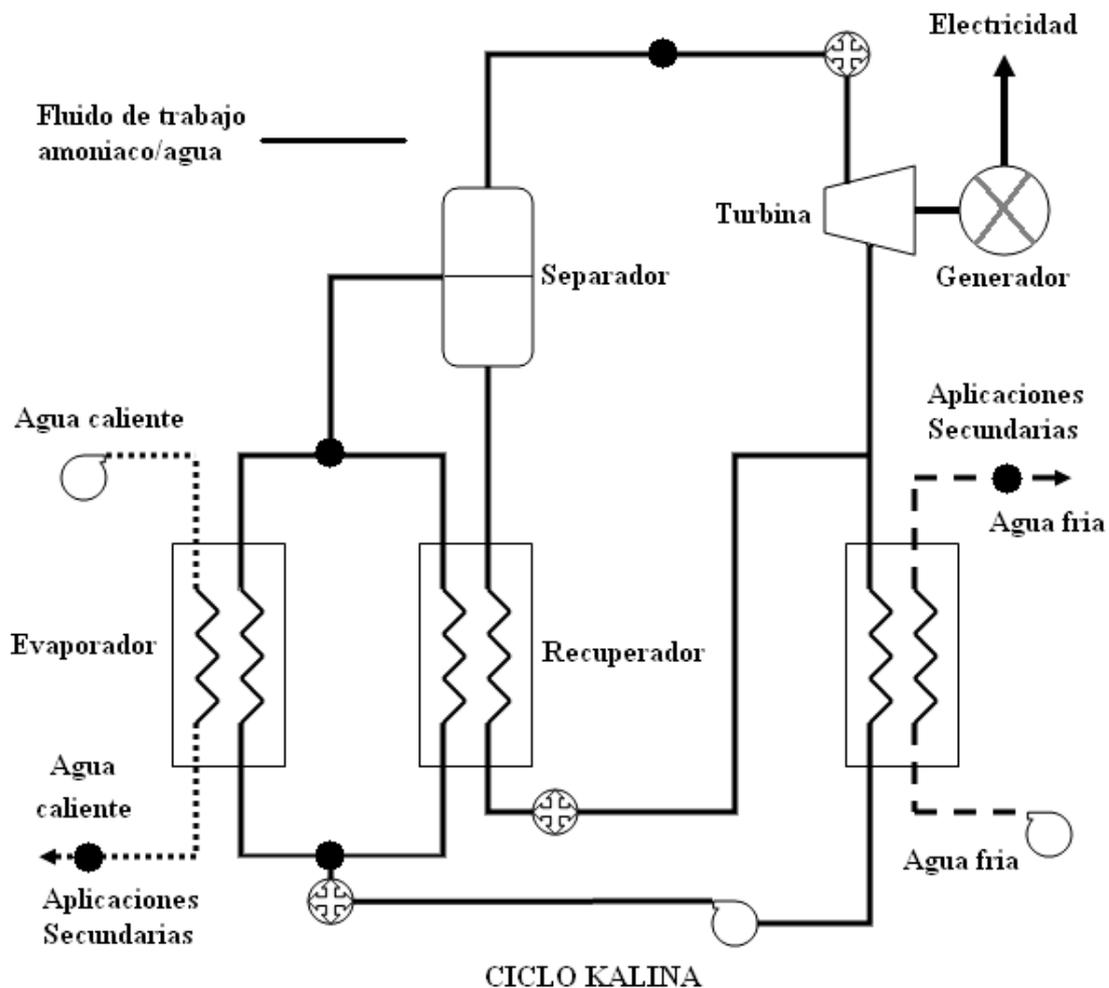


Figura 3.7 Esquema del ciclo Kalina <sup>[24]</sup>

El vapor del amoníaco de la alta calidad del separador entra en una turbina del amoníaco del flujo radial y se expande para crear la energía mecánica que entonces se convierte en energía eléctrica vía el sistema de generador unido. El diseño de tales sistemas de la turbina y del generador del amoníaco es establecido con las eficiencias del sistema que acercan al 85% o mayor para los usos de OTEC.

### **Experimentación propia.**

El concepto del ciclo cerrado OTEC, como ya se mencionó en el capítulo II, es un ciclo ranking simple, lo que cambia es el fluido de trabajo, por lo que para un experimento a nivel laboratorio del ciclo cerrado OTEC se trabajó con un fluido que estuviera al alcance y con un punto de ebullición mas bajo que el del agua, este fue el alcohol etílico. El pequeño prototipo que se hizo en el laboratorio fue con aparatos improvisados, ya que solo son para entender el concepto.

Como fuente de calor se ocupó una olla grande de aproximadamente 20 litros en el cual se calentó agua hasta los 90 °C (simulando el agua de mar caliente en la superficie) para que a su vez este le transmitiera calor a una olla express de 4 litros, está se tenia sumergida en el agua caliente de la olla y en el interior había alcohol, casi herméticamente (Figura 3.8 A).

El calor trasferido a la olla express hacia que el alcohol se evaporara y conforme pasaba el tiempo la presión aumentaba en el interior de la olla express,

Para el siguiente paso se utilizo una pequeña turbina de 0.5 W en la cual se pusieron varios ventiladores en una pequeña flecha dentro de un tubo de acero, parcialmente sellado (esto es muy importante ya que el sello en la pequeña turbina limitaba a usar un fluido de trabajo que no fuera tóxico, ya que se tenían algunas fugas), la flecha estaba conectada a un pequeño motor que hacia la veces de un generador (Figura 3.8 B).

El fluido, una vez alcanzada una presión de 2 a 3 bar, se pasaba al la turbina a través de un tubo muy pequeño, para aumentar la velocidad de salida y este chocaba con las aspas de los ventiladores para que estos, al girar, movieran la flecha para que el motor hiciera la función de generador y se obtenía alrededor de 10 volts de salida.

Después para el siguiente paso, que es condensar el alcohol, se ocuparon condensadores químicos de vidrio, por los que circulaba agua a 22°C, la cual se hacia fluir por el interior de los condensadores con la ayuda de unas bombas para fuentes, el agua de alimentación para el condensador se tenia en pequeños recipientes simulando el agua del fondo del mar (Figura 3.8 D).

El alcohol condensado se almacenaba en un recipiente (se tenia que esperar ha que la olla hubiera liberado todo el vapor y la presión disminuyera para poder introducir el alcohol caliente de nuevo) estos se podía hacer con la ayuda de una bomba de ½ caballo de potencia con la cual se podía conducir el fluido a un presión de 1 bar. (figura 3.8 C). Con esto se completaba el pequeño ciclo cerrado OTEC a nivel laboratorio.



A



B



C



D

Figura 3.8 Ciclo-Cerrado del proyecto a nivel Laboratorio OTEC ICMyL UNAM\*

---

\* A: Olla grande con agua caliente simulando el agua caliente de la superficie del mar y la olla express como intercambiador de calor.

B: Pequeña turbina de experimentación a nivel laboratorio.

C: Bomba con la cual se podía alimentar el alcohol a la olla express después del proceso de condensado.

D: Condensadores químicos (frente) y alimentadores de agua de enfriamiento (atrás) para los condensadores simulando el agua fría de las profundidades del mar.

En la figura 3.9 se muestra un diagrama T-S del ciclo cerrado OTEC a nivel laboratorio con el cual se pudo comprender mejor el concepto del ciclo cerrado OTEC.

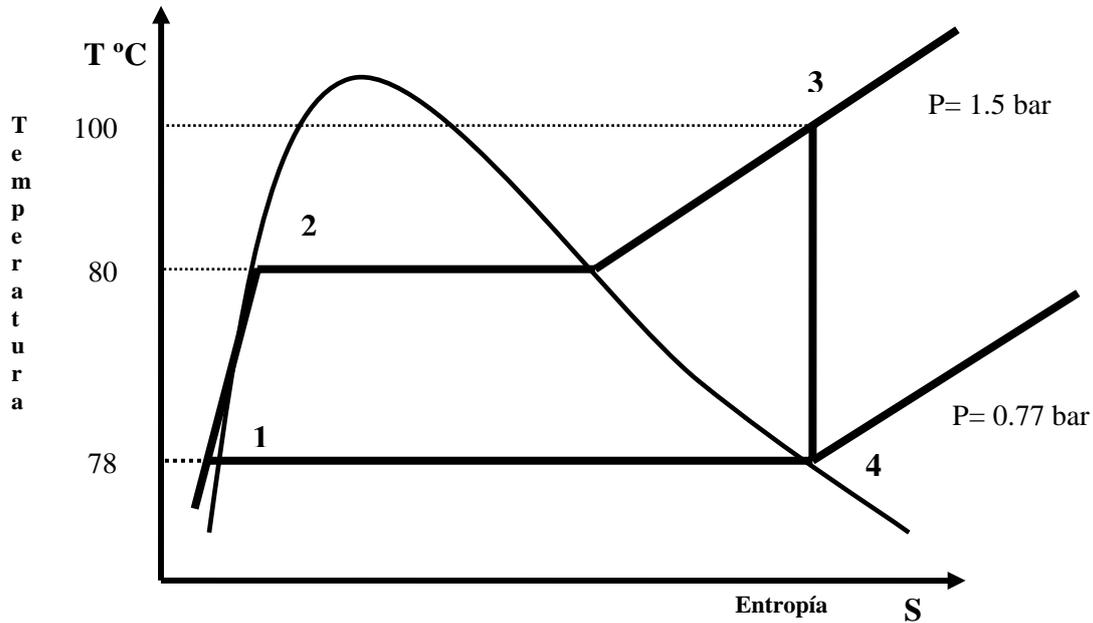


Figura 3.9 Diagrama T-S del un ciclo cerrado OTEC experimentado el ICMYL.

La figura muestra el ciclo ranking simple utilizando como fluido de trabajo el alcohol. Donde P es presión.

### 3.2.4 Sistemas de ciclo híbrido

Los sistemas híbridos combinan las características de los sistemas de ciclo abierto y de ciclo cerrado como medio de optimizar su funcionamiento. Con estos sistemas híbridos se genera electricidad y agua desalinizada. En un sistema híbrido, el agua caliente del mar entra en un evaporador donde es súbitamente evaporada, de forma similar a lo que ocurre en un proceso de evaporación de ciclo abierto. El calor del vapor obtenido se utiliza para vaporizar el fluido de trabajo, de bajo punto de ebullición, que circula en un ciclo cerrado. El fluido vaporizado acciona una turbina que produce electricidad. El vapor obtenido del agua de mar se condensa dentro de intercambiador de calor proporcionando agua desalinizada, que puede ser utilizada para consumo humano, agrícola etc.

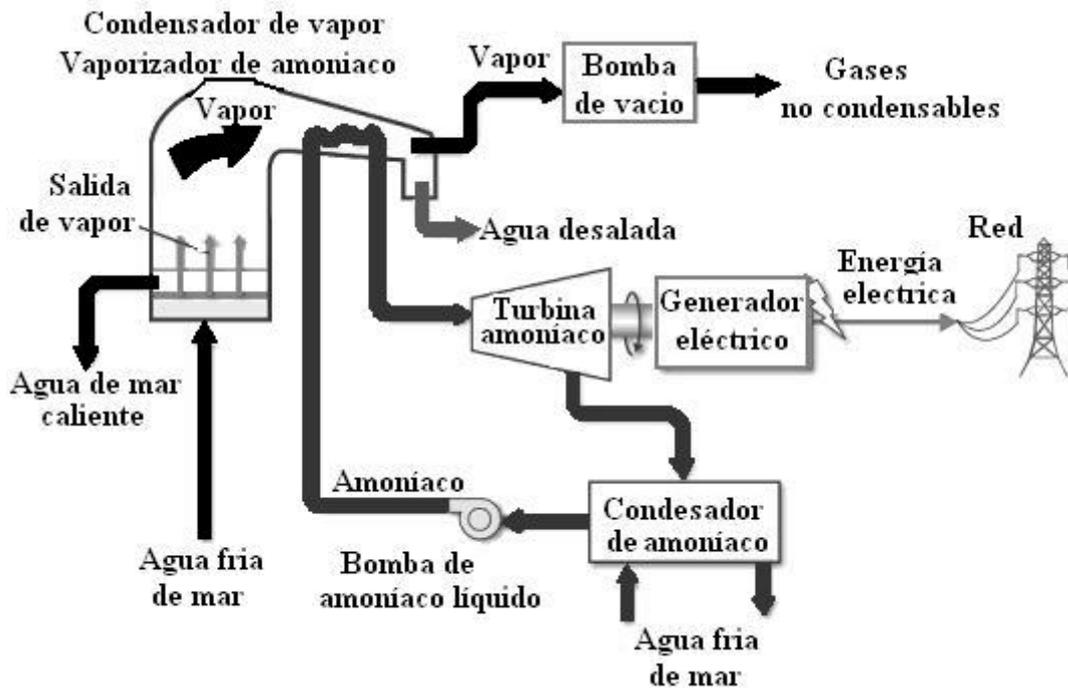


Figura 3.10 Esquema de un ciclo híbrido OTEC [7]

### 3.3 Costos

Costo de aproximado de las plantas OTEC

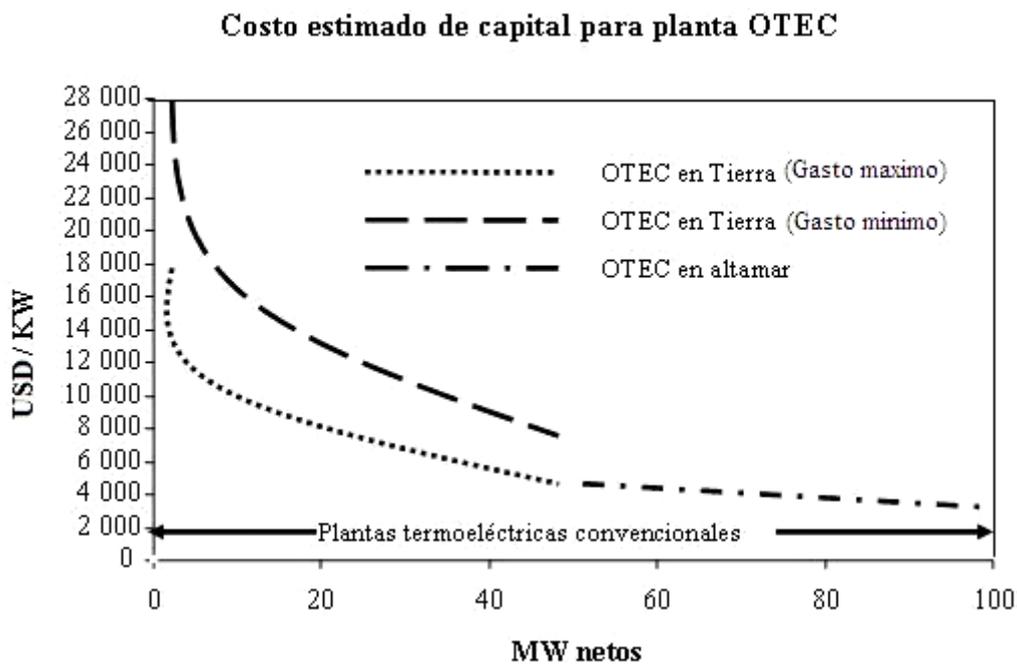


Figura 3.11 Costo estimado de capital en dólares por KW [12]

Año 1999

<b>TAMAÑO NOMINAL KW</b>	<b>TIPO DE PLANTA OTEC</b>	<b>ESCENARIO</b>	<b>SITIOS POTENCIALES</b>
1	Base en tierra OTEC-Ciclo Abierto Con desalinizadora	Diesel: 45 USD el barril Agua Dulce: 1.6 USD/m <sup>3</sup>	En pequeñas islas y ciudades cercanas a la costa.
10	Base en tierra OTEC-Ciclo Abierto Con desalinizadora	Petróleo: 30 USD el barril Agua Dulce: 0.9 USD/m <sup>3</sup>	Océano pacífico (en la costas de Estados Unidos) y otras pequeñas islas
50	Base en tierra OTEC-Ciclo Híbrido	50 USD barril 0.4 USD/m <sup>3</sup> ó 30 USD barril 0.8 USD/m <sup>3</sup>	Hawai, Puerto Rico, y las costas del Golfo de México del lado de Estados Unidos
50	Base en tierra OTEC- Ciclo Cerrado	40 USD barril	Numerosos sitios
100	Planta en barco OTEC-Ciclo Cerrado	20 USD barril	Numerosos sitios

Tabla 3.4 Tabla del la propuesta de una planta por el costo de los combustibles fósiles (Solo de los Estados Unidos) <sup>[12]</sup>.

<b>DISTANCIA APROXIMADA Km</b>	<b>COSTO DEL CAPITAL USD/KW</b>	<b>COE USD/KWh</b>
10	4 200	0.07
50	5 000	0.08
100	6 000	0.10
200	8 100	0.13
300	10 200	0.17
400	12 300	0.22

Tabla 3.5 Costo estimado para una planta de 10 MW de ciclo cerrado en barco <sup>[12]</sup>.

## Propuesta de una planta OTEC de 100 MW <sup>[29]</sup>

Planta OTEC de ciclo híbrido de 100mw en un barco en altamar diseño hecho por Phil Kopsiske (4 Febrero 2002)

Referencias: SSP's OTEC Revisión y propuesta de U.S. Navy, 1996, and SSP's sitio web.

Producción: 100 MW Planta OTEC en barco (altamar).

Costo: \$250 000 000 USD

Año del costo: 2002

Salida 1: 100 MW eléctricos

Salida 2: 120,000 m<sup>3</sup> de agua dulce por día.

Salida 3: Nutrientes del fondo del mar para utilizarlos en la acuicultura.

Entrada 1: 227 m<sup>3</sup>/s de agua de la superficie del mar a 27 °C.

Entrada 2: 142 m<sup>3</sup>/s de agua de las profundidades del mar a 4.4 °C.

Size: 152 m de largo, 47 m de ancho, 61 m de alto, 25 400 tons.

Diseño: J. Hilbert Anderson

Compañía: Sea Solar Power International

Sitio web: <http://www.seasolarpower.com>

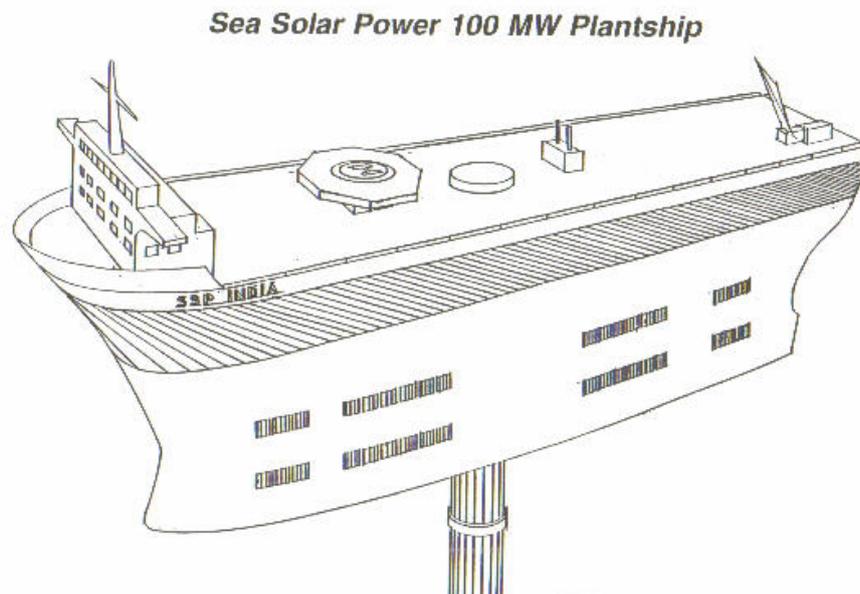


Figura 3.12 Planta propuesta por la compañía Sea Solar Power en el 2002\*

---

\* Los datos corresponden al año 2002 <sup>[29]</sup>

## IV. ASPECTOS IMPORTANTES DEL OCÉANO PARA UNA PLANTA OTEC

### 4.1 Características del agua dulce y salada

El agua de mar esta constituida por 96.5% de agua pura y de 3.5% de sales constituido por un gran número de compuestos químicos.

En todos los procesos que tienen lugar en el mar esta presente el agua de una manera u otra, siendo necesario conocerla a fondo, teniendo en cuenta sus características físicas y químicas.

La descripción clásica del agua tiene una composición muy sencilla. Una molécula de agua consta de: dos átomos de hidrogeno y un átomo de oxigeno. El comportamiento físico que representa el agua difiere en muchos aspectos de lo que se observa en otros líquidos y se ha descubierto que la causa de ese comportamiento peculiar reside en la forma como se organizan las moléculas básicas. Por ejemplo, el agua pura posee la rara propiedad de ser más densa en su estado líquido que en el estado sólido y es quizás la única sustancia que alcanza su máxima densidad a algunos centígrados por encima de su punto de congelación.

Los elementos que constituyen la molécula básica del agua (oxígeno e hidrógeno) poseen por si mismos algunas cualidades excepcionales y ambos son muy reactivos. El oxígeno es el moderador más importante de la energía química: es el agente principal e indispensable en la respiración de la mayor parte de los organismos vivos, entra en la combustión de hidrocarburos y otras materias combustibles. Por su parte, el hidrógeno es el más sencillo entre los elementos químicos: Consta de un protón y de una sola capa exterior con un electrón en lugar de dos, que es la capacidad de la capa. El átomo de hidrógeno puede conectarse con otros átomos no solamente por medio de atracciones electrostáticas entre su protón y un electrón perteneciente a otro átomo vecino. De este modo, en la molécula de agua, los dos átomos de hidrogeno conectados con cada átomo de oxígeno puede ligarse también a otros átomos de oxigeno de otras moléculas de agua, en virtud de las fuerzas electrostáticas no equilibradas.

Actualmente se desconoce en detalle la constitución de las aglomeraciones; no obstante, la teoría aceptada, por explicar mejor aunque de modo incompleto el comportamiento peculiar del agua, plantea la existencia de macromoléculas o polímeros que forman estructuras "huecas", ocupando así un volumen mayor que el mismo número de moléculas dispuestas del modo más compacto posible. Cuanto mayor sea el número moléculas agrupadas en polímeros, tanto mayor será el espacio "vacío" y el volumen total que ocupa la materia.

La proporción de moléculas agrupadas en polímeros depende principalmente de la temperatura del agua, aumentando al disminuir la temperatura. Vemos que el proceso de polimerización del agua tiende a aumentar su volumen cuando la temperatura disminuye; por otra parte, el enfriamiento causa la contracción de la materia. Estos dos procesos, polimerización y contracción, se contraponen y al llegar a la temperatura de 3.98°C el efecto de los dos es de igual magnitud, pero de sentido opuesto. Por encima de esa temperatura la expansión térmica excede a la contracción producida por la reducción de la proporción de polímeros y por debajo de ese punto, la situación es a la inversa. Por eso el agua alcanza su mínimo de volumen específico a 3.98°C, o sea su máxima densidad. La expansión continúa hasta 0°C, que es el punto de congelación del agua pura, y llegando al mismo las moléculas de agua se organizan en una estructura rígida de forma hexagonal, conectándose unas con otras por medio de los átomos de hidrógeno y dando por resultado la formación del hielo, al mismo tiempo que aumenta

el volumen alrededor del 9%, en relación con el agua en estado líquido a la temperatura de 0°C. Así el hielo flota sobre el agua, puesto que su densidad a 0 °C es de 0.9168 g·cm<sup>-3</sup>, mientras que la del agua líquida a la misma temperatura es de 0.9999 g·cm<sup>-3</sup>. Los polímeros en el agua líquida constituyen partículas más grandes y pesadas que las moléculas individuales, razón por la cual el agua bajo muchos aspectos se comporta como una sustancia compuesta de moléculas de mayor tamaño que las que la propia agua, resultando que el agua se congela a 0°C y hierve a 100 °C, a nivel del mar, no obstante que esos puntos debían ser alrededor de -150°C y -80°C respectivamente, fenómeno que presentaría si el agua se hallara en estado monomolecular, comportándose entonces como sus parientes más cercanos entre los compuestos químicos.

La agrupación en polímeros da lugar a un comportamiento anómalo del agua en lo relacionado con otras características físicas, como son: el calor específico, la tensión superficial, el índice de refracción de la luz y la viscosidad, etc. Se presume también que la polimerización puede tener ciertos efectos fisiológicos.

Las propiedades físicas del agua de mar son determinadas en primer lugar por su estado, en lo referente a los tres siguientes factores: salinidad(s), temperatura (t) y presión (p).

### **Salinidad.**

La salinidad del agua de mar se define tradicionalmente como sigue: “La cantidad total, en gramos, de material disuelto que contiene un kilogramo de agua de mar, cuando todos los carbonatos han sido convertidos en óxidos; el bromo y el yodo sustituidos por cloro y toda la materia orgánica completamente oxidada”. La materia disuelta en el agua de mar se compone en su mayoría de iones de los metales ligeros, sodio, magnesio, calcio y potasio, ligados con los iones cloruro, sulfato e hidrogenocarbonatos, constituyendo estos compuestos el 99.7% de la salinidad, en tanto que el 0.3% restante corresponde a un gran número de otras sustancias disueltas en el agua.

La variación de la salinidad en el mar es desde 1 ups\* a 40 ups\* y la salinidad promedio del océano mundial es de 35 ups\*, aproximadamente. El 98% del océano tiene agua con salinidad entre 33 y 36 ups\*.

### **Temperatura.**

La determinación de la temperatura en el mar se hace mediante termómetros especiales de mercurio o de resistencia eléctrica. En el océano mundial se encuentran valores de la temperatura que varían entre -2 y 30°C aproximadamente.

### **Presión.**

A pesar de que su influencia es pequeña, comparada con la de la salinidad y la temperatura, hay que tenerla en cuenta, pues alcanza valores muy elevados en las mayores profundidades de los océanos. La presión se define como: fuerza por unidad de área. Al aumentar la profundidad en el océano la presión también va aumentando, por cada 10 m la presión aumenta 1 atm aproximadamente.

---

\* ups: significa unidades prácticas de salinidad, que equivale a partes por mil y se mide indirectamente por la conductividad eléctrica.

## 4.1.1 Principales propiedades físicas del agua de mar.

### Densidad ( $\rho$ )

En oceanografía se emplea también el término peso específico y se le define como: la relación entre la densidad del agua de mar a una temperatura determinada y la densidad del agua pura a 4°C. Por definición, la densidad del “agua pura” a 4°C es un gramo por centímetro cúbico y por esa razón el peso específico y la densidad tienen el mismo valor numérico, pero hay que considerar que la densidad tiene la dimensión masa por volumen, mientras que el peso específico es adimensional.

La densidad del agua de mar depende de las tres variables antes mencionadas s, t y p.

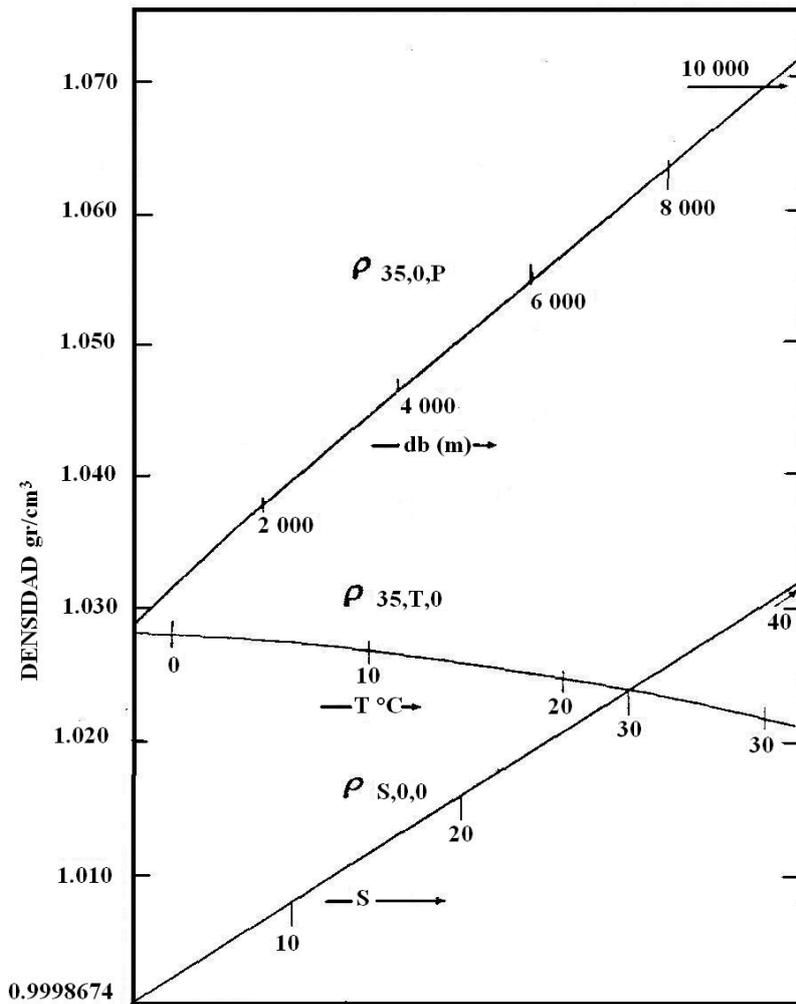


Figura 4.1 Variación de la densidad del agua de mar en función de s, t y p [2].

La densidad del agua superficial de los mares tiene una importancia porque implica el hundimiento de grandes masas de agua (circulación termohalina).

### Compresibilidad

La compresibilidad del agua aumenta cuando la temperatura disminuye, este hecho es una de las peculiaridades del comportamiento físico del agua, pues en el caso de otras sustancias la compresibilidad disminuye con la temperatura. La causa es la polimerización del agua.

La compresibilidad del agua de mar es pequeña comparada con la de otros líquidos. Sin embargo la reducción del agua de mar por la presión atmosférica resulta que el nivel de los océanos se halla ceca de 60 metros más bajo de los que sería si el agua fuera absolutamente incompresible.

### Calor específico

La capacidad calorífica del agua es la más elevada entre todos los sólidos y líquidos que se conocen, con la sola excepción del amoníaco ( $\text{NH}_3$ ). La capacidad calorífica del agua es cerca de 10 veces mayor que la del cobre y 5 veces mayor que la de la roca cristalina. Esta propiedad única del agua es de suma importancia, tanto para las condiciones biológicas como para las climáticas, puesto que la absorción del calor por el agua evita las variaciones bruscas y los valores extremos de la temperatura en el ambiente terrestre. El calor específico del agua de mar es ligeramente inferior al del agua pura a la misma temperatura.

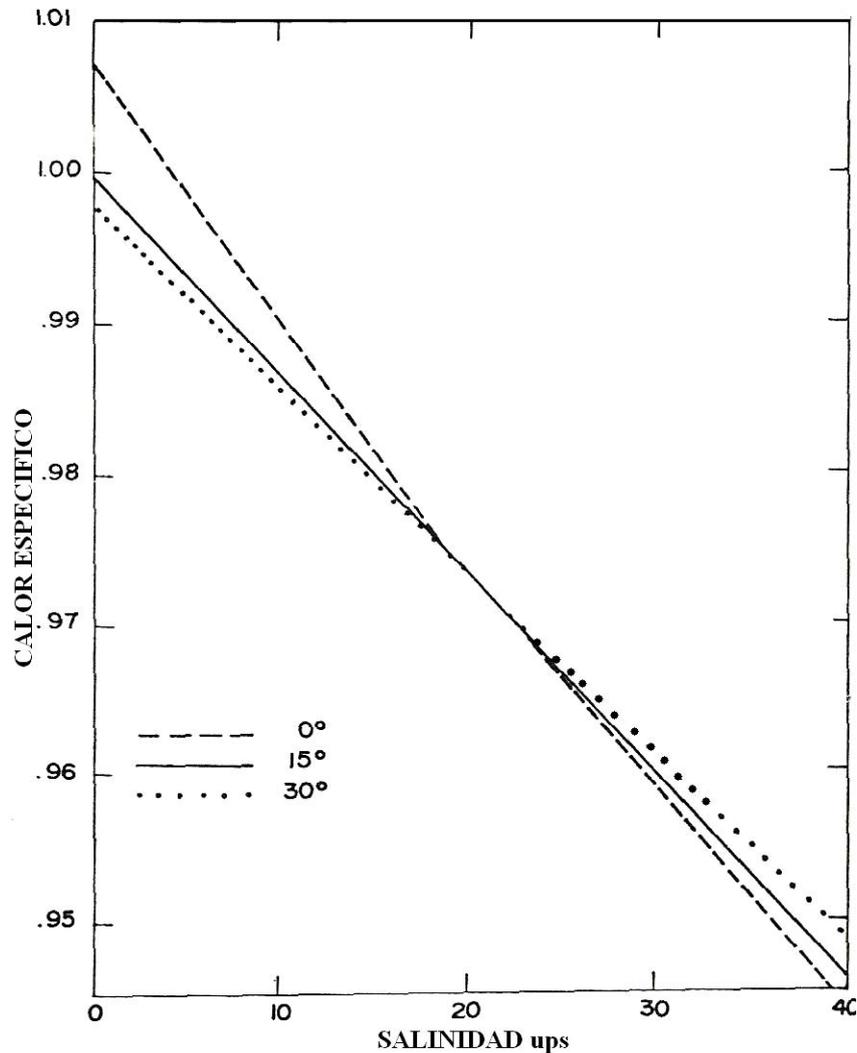


Figura 4.2 Variación del calor específico en función de temperatura y salinidad [2].

## **Calor latente evaporación y de fusión**

Dentro del régimen de temperatura y presión que existe en el ambiente terrestre, el agua puede hallarse en tres estados físicos: el sólido, líquido y gaseoso. Para pasar de uno de estos estados al otro, es necesario aumentar o disminuir la energía interna. En el estado sólido las moléculas están organizadas en estructura rígida, es decir, manteniendo una relación geométrica fija entre sí. Si aumentamos la energía interna, la distancia entre las moléculas aumenta lo suficiente para romper la estructura rígida y en este instante el agua pasa al estado líquido. A este proceso se le denomina fusión.

Suministrando más calor, el agua en su estado líquido eleva su temperatura, lo que equivale a decir que la velocidad promedio de sus moléculas va aumentando, las que se encuentran en la superficie del líquido y que tienen la mayor velocidad empiezan a saltar fuera de la misma. Mientras que la mayoría de las moléculas son atraídas de regreso hacia la superficie por las fuerzas de cohesión o empujadas de regreso al chocar con otras moléculas libres, algunas tienen la velocidad suficiente para vencer las fuerzas de atracción y la probabilidad de no encontrarse con una molécula más fuerte en el camino, pasando de este modo del estado líquido al estado gaseoso. Este es el proceso de evaporación.

Para pasar del estado líquido al gaseoso, la molécula tiene que trabajar contra dos tipos de fuerzas: la cohesión, que tiende a traerla de regreso hacia la superficie y la presión externa, o sea, la suma de los choques con las moléculas libres, la empujan en el mismo sentido.

La energía necesaria para transformar un gramo de materia del estado líquido al gaseoso, se denomina calor latente de evaporación.

El calor latente de evaporación del agua es el más elevado entre todas las sustancias conocidas. Este hecho es muy importante para el intercambio de energía entre el mar y la atmósfera. El calor latente de evaporación del agua de mar difiere de un modo insignificante del valor establecido para el agua pura.

En el caso del calor latente de fusión del agua de mar se modifica debido al efecto que ejerce la salinidad sobre la formación de hielo.

La salinidad reduce el punto de congelación o sea, la temperatura bajo la cual una cantidad ínfima de cristales de hielo puro se mantienen en equilibrio con la solución. A medida que los cristales se van formando, la parte líquida aumenta su salinidad, bajando el aun más el punto de congelación. De este modo se forma una mezcla que consiste en cristales de hielo puro y de agua salada. Si se retira más calor, los cristales de hielo formado en el mar, van desplazándose poco a poco hacia abajo y uniéndose el agua subyacente, aumentando su salinidad. Por esta razón al pasar el tiempo, el hielo marino se queda prácticamente sin sal, un hecho aprovechado muchas veces por los viajeros en las regiones polares para la obtención de agua potable. Ese mecanismo también ha sido tomado como la base para uno de los métodos de desalinización artificial del mar.

## **Difusión y conducción térmica**

El movimiento de las moléculas en el seno del líquido tiende a uniformar sus características físicas y químicas. En el caso de sustancias disueltas, ese fenómeno se denomina difusión y, en lo que se refiere a la temperatura, conducción térmica. La difusión es, por tanto, el proceso por el cual se desplazan sustancias disueltas desde una porción donde la concentración es alta, hacia otra vecina donde el mismo factor tiene un valor más bajo.

El coeficiente de difusión molecular para agua de salinidad 35 ups es de alrededor de  $1.5 \times 10^{-6} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ . Y por eso el transporte de salinidad por difusión molecular transcurre muy lentamente en el mar y serian necesarios periodos muy largos para eliminar la diferencia de salinidad entre una porción y otra adyacente si pudiera lograrse únicamente mediante este proceso.

En el caso de la conducción térmica, el coeficiente molecular es alrededor de  $1.35 \times 10^{-3} \text{ cal s}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , para agua de mar con salinidad de 35 ups y temperatura de  $20^\circ\text{C}$ .

## 4.2 Datos generales del océano

La ciencia marina también se interesa por el estudio del lecho marino, de los litorales, de la relación del océano con la atmósfera, así como de la flora y la fauna marinas.

Entre los 510.1 millones de  $\text{km}^2$  que construye las superficie del globo terrestre, 361.2 millones (el 71%), están cubiertos por el mar. Uno de los aspectos fundamentales del mar es su distribución continua sobre la tierra, con la excepción insignificante del mar Caspio (ubicado en el suroeste de Asia) y de algunos pequeños mares aislados, el agua de mar forma un solo cuerpo cuyo volumen total es de 1 400 millones de  $\text{km}^3$ . Desde el punto de vista oceanográfico, el océano mundial consta de tres ramas principales que se extienden hacia el norte a partir del océano circumpolar ártico. Estas ramas representan los tres grandes océano: el Atlántico, el Indico y el Pacífico <sup>[10]</sup>.

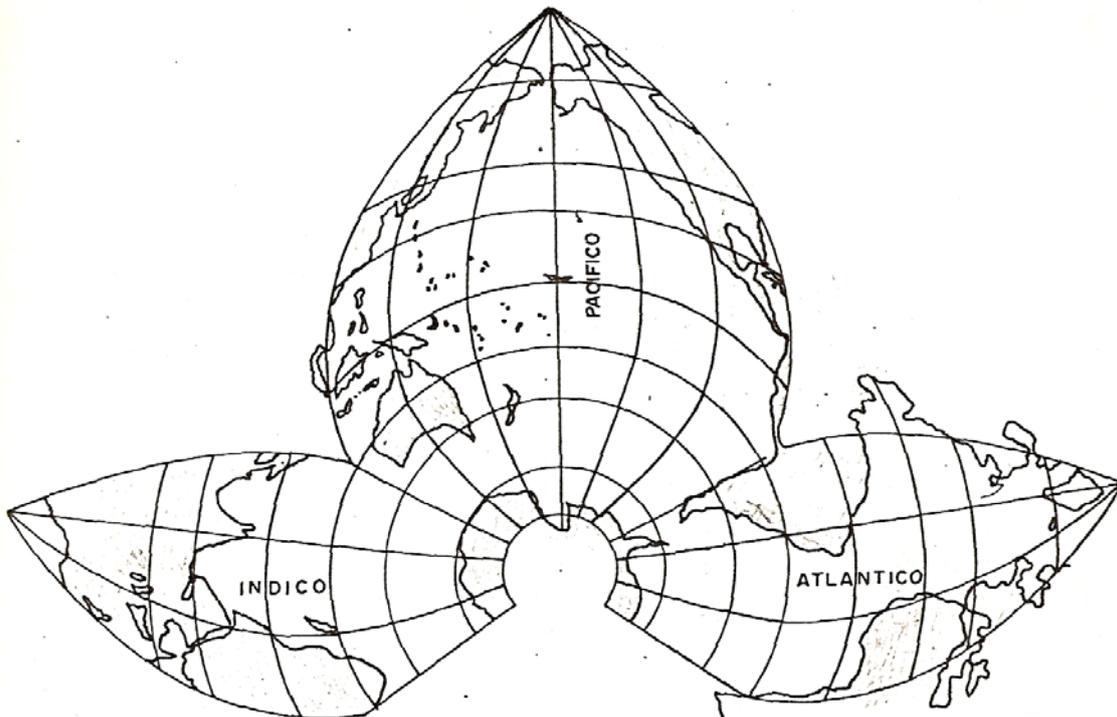


Figura 4.3 El océano mundial representado mediante una proyección ramificada.

### El océano Pacífico

El océano Pacífico fue bautizado así por el navegante portugués Fernando de Magallanes en 1520. El océano Pacífico es la mayor masa de agua del planeta, cubre aproximadamente un tercio de la superficie de la Tierra y contiene más de la mitad de las aguas libres de la hidrosfera. Limita al este con los continentes norte y sudamericano. Al norte limita con el mar de Bering, al oeste con Asia, el archipiélago

malayo y Australia, al sur con el océano Austral. En el sudeste, el Pacífico y el Atlántico están divididos por el paralelo 68 a través del estrecho de Drake. La línea de separación entre el Pacífico y el Índico en la parte sudoccidental no está fijada oficialmente. El ecuador divide el Pacífico en una región marítima al norte y otra al sur. Las plataformas continentales marinas situadas frente a las costas de California, Alaska, China e Indonesia disponen de grandes yacimientos de petróleo. Algunas partes del fondo oceánico tal es el caso del mar patrimonial de México en el océano Pacífico, están cubiertas por nódulos de manganeso, que son concreciones formadas por óxidos de hierro y manganeso (a veces también contienen cobre, cobalto y níquel) y que tienen el tamaño del puño de la mano. Además, del Pacífico se extraen diversos minerales, así como grava y arena para la construcción.

## **El Océano Atlántico**

El Océano Atlántico es el segundo mayor océano del mundo. Cubre una extensa cuenca oceánica en forma de S en dirección norte-sur, y las corrientes ecuatoriales que lo atraviesan en torno al paralelo 8° de latitud norte lo dividen en dos: el Atlántico Norte y el Atlántico Sur. El Atlántico limita al oeste con Norteamérica y Sudamérica, al este con África y Europa. El Atlántico se comunica con el Pacífico a través del océano Ártico en el norte y del estrecho de Drake en el sur. En el sudoeste, el meridiano a 20° de longitud oeste representa la línea de separación entre el Atlántico y el océano Índico.

En términos de edad geológica, el Atlántico es el más joven de los grandes océanos. Según los conocimientos actuales, el Atlántico comenzó a formarse hace unos 150 millones de años, cuando el antiguo supercontinente denominado Pangea se fragmentó, dando lugar a la formación de grandes mares entre las placas continentales que se alejaban entre sí, separadas por las dorsales oceánicas.

## **Océano Índico**

Después del Pacífico y el Atlántico, el océano Índico es la tercera mayor masa de agua de la Tierra. El océano Índico limita al norte con la costa meridional de Asia y al oeste con la península arábiga y África. La frontera oriental la forman la península malaya, las islas de la Sonda y Australia, mientras que al sur limita con el océano Austral. La línea formada por el meridiano de 20° de longitud este constituye el límite entre el océano Índico y el Atlántico al sur del continente africano, mientras que el 147 grados de longitud este separa el Índico del Pacífico al sur de Australia. El límite septentrional del océano Índico alcanza los 30 grados de latitud norte en el Golfo Pérsico. En el océano Índico tiene lugar la confluencia de las placas continentales africana, india y antártica. A lo largo de este punto de unión triple en forma de Y transcurren las diversas cordilleras submarinas del sistema de dorsales oceánicas: la dorsal india central se extiende desde el borde de la plataforma continental, cerca del mar Arábigo, hacia el sur y desemboca en la dorsal india suroccidental y en la dorsal india suroriental; por su parte, la denominada dorsal "noventa este" está situada al este de la dorsal central. Las grandes cuencas formadas por este sistema de dorsales están, a su vez, divididas en subcuencas menores por otras cordilleras submarinas.

Los océanos en su extensión en la tierra tienen diferentes profundidades, por ejemplo; el 1% de la superficie terrestre está cubierta por aguas con profundidades superiores a 6 000 metros, mientras que cerca del 50 % tiene una profundidad entre 3 000 y 6 000 metros, correspondiente a las extensas cuencas oceánicas. Las profundidades entre 0 y

3 000 metros ocupan el 16% y dentro de este intervalo el 7.5% corresponde a la profundidad de 0 a 200 metros, el área de las plataformas continentales.

La tabla 4.1 nos muestra las principales características de los océanos.

Océano	Profundidad promedio (m)	Área (km <sup>2</sup> ) x 10 <sup>6</sup>	Volumen (km <sup>3</sup> ) x 10 <sup>6</sup>	Superficie ocupada en los océanos. (%)	Superficie ocupada en la tierra. (%)
Pacífico	3940	181.3	714.4	50.1	35.6
Atlántico	3575	94.3	337.2	26	18.5
Indico	3840	74.1	284.6	20.5	14.5
Ártico	1117	12.3	13.7	3.4	2.4
Todos	3729	362	1349.9	100	71.0

Tabla 4.1 Profundidad, área y volumen de los océanos <sup>[10 y 16]</sup>.

### 4.3 Dinámica del mar

Las corrientes marinas y su representación.

Se emplea la expresión de corriente para indicar el desplazamiento hacia una determinada dirección de las aguas en el seno del mar, en función del tiempo.

Para entender mejor el concepto de las corrientes marinas en el planeta tierra se tiene que definir el concepto de la fuerza de Coriolis.

#### Fuerza de Coriolis

A causa de la forma de la Tierra, la velocidad de rotación de un punto sobre la superficie de la Tierra, depende del grado de latitud. Sobre el Ecuador la velocidad cerca de 1 670 km/hora, en los polos a 0 km/hora. Si se mueve un punto del Ecuador en dirección norte o sur, la velocidad de rotación mantiene (más allá de los desgastes de fricción) su mínima latitud. Aumentando la distancia del Ecuador, entonces la velocidad de rotación marchará a delante respecto a la Tierra. Por el contrario si un cuerpo que se mueve de norte a sur en dirección hacia el Ecuador, la Tierra en creciente (frente al cuerpo) marchará adelante. Este efecto de declinación se denomina según el ingeniero francés, “efecto Coriolis”. Sobre el hemisferio norte, el efecto Coriolis actúa siempre con una declinación hacia la derecha con respecto a la dirección de salida, y en el hemisferio sur siempre actúa una declinación hacia la izquierda.

El efecto del viento traslada la masa de agua en rápidas corrientes. De acuerdo a la velocidad y duración del viento, una corriente pura actúa hasta profundidades diferentes: con vientos fuertes de 4 hasta 60m, con huracanes hasta menos de 100m de profundidad. El viento medido en la profundidad del océano actúa entonces como corrientes superficiales. Pero una vez que las masas de agua se ponen en movimiento, actúan sobre ellas diferentes y complicadas influencias, fricciones internas y externas, la declinación de la forma del suelo, la forma de la orilla y precisamente como consecuencia de la rotación de la Tierra, el efecto Coriolis.

Cuando el viento roza sobre la superficie de las aguas aparecen partículas de agua en oposición a la fuerza de fricción. Además en la rotación de la Tierra actúa el efecto Coriolis, que desvía la dirección del movimiento de las partículas hacia la derecha en el hemisferio norte, en el hemisferio sur por el contrario hacia la izquierda. La dirección de

la corriente de la superficie del agua impulsada por el viento, tendrá por esta causa una inclinación de 45° hacia la derecha, y en el hemisferio sur hacia la izquierda. Aumentando la profundidad de la corriente, se refuerza el efecto de desviación, mientras que simultáneamente disminuye la velocidad de la misma. En uno de los fuertes vientos dependientes de la profundidad, circula el agua en dirección contraria al viento. Visto que sobre la totalidad de las columnas de agua hasta en esta profundidad, el transporte de agua tiene lugar (llevando la denominación del danés físico de mar Transporte-Eckman), a 90° en dirección viento, en el hemisferio norte hacia la derecha, y al sur del Ecuador se dirige hacia la izquierda. Es decir que la dirección de la corriente del agua no sigue la dirección de las olas producidas por el viento, como puede parecer a primera vista.

La determinación del movimiento de las aguas de los océanos es difícil y a la Oceanografía moderna le ha llevado años investigar este problema, sin embargo gracias a las investigaciones realizadas en los recientes años se pueden hacer algunos mapas de las principales corrientes en el océano.

### **Corrientes en la superficie**

Bajo la influencia de la energía solar, la rotación de la Tierra, y la hora solar-lunar, las aguas de los océanos están en constante movimiento. Las grandes corrientes mueven enormes masas de aguas sobre grandes distancias y proporcionan un interrumpido intercambio entre las aguas cálidas de los trópicos y las aguas frías de los polos. Solamente los tres metros más superficiales del agua oceánica contienen tanto calor como la totalidad de la atmósfera.

Vientos constantes y fuertes trasladan las masas de agua en corrientes rápidas. En casi cada océano predominan sobre ambos hemisferios ciclos cerrados. Un movimiento en dirección este, a altas latitudes a ambos lados del Ecuador (viento del oeste o poniente), se encuentran en su mayoría corrientes en dirección oeste, cerca del Ecuador, en la zona del viento alisio, en frente. En la parte oriental del continente predominan corrientes cálidas en dirección a los polos, mientras sobre la costa occidental del continente las masas de agua son expulsadas de la costa y sustituidas por el ascenso de aguas frías de las profundidades.

El efecto de las corrientes marítimas sobre las condiciones de vida en la Tierra son inmensas: Sin la corriente del Golfo, las zonas del noroeste de Europa se asemejarían aproximadamente al clima subártico del Labrador. Con la ascensión de las aguas de las profundidades llegan sustancias alimenticias a la superficie, las cuales estimulan y promueven el crecimiento del plancton y de esta manera el aumento de peces en la costa occidental del continente.

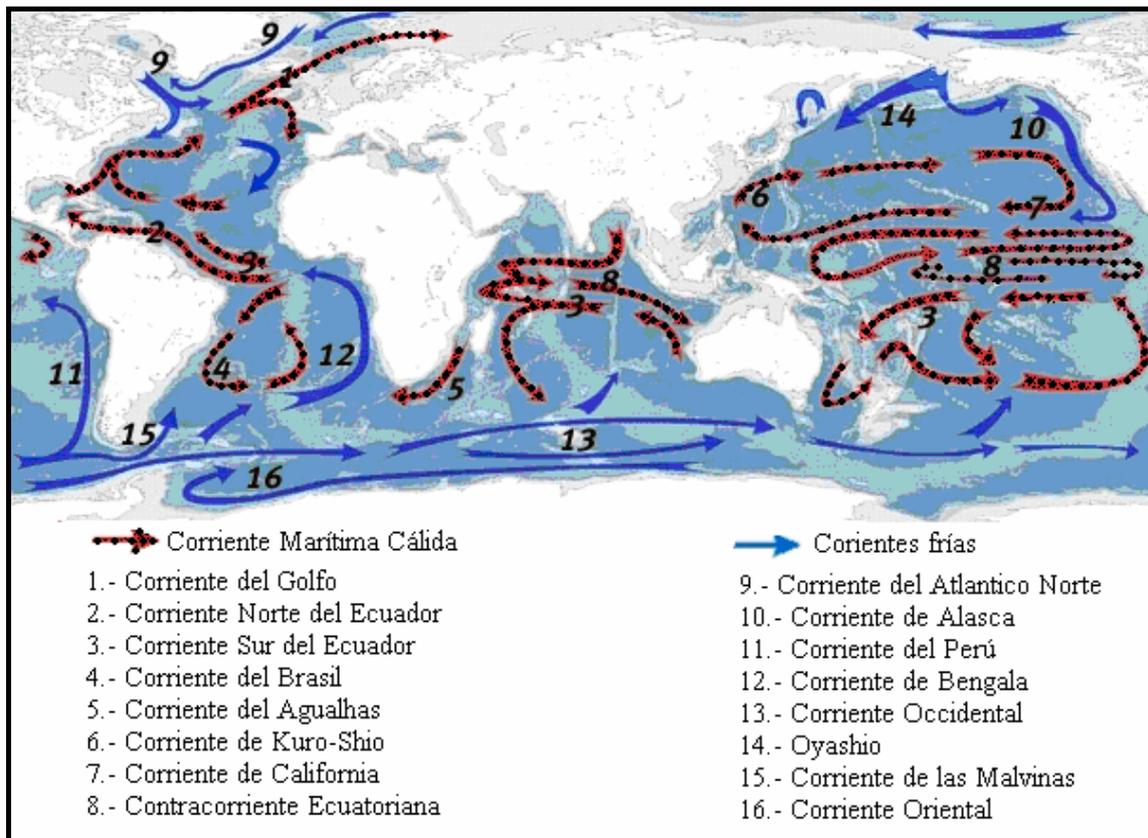


Figura 4.4 Principales corrientes de superficie de los océanos <sup>[16]</sup>.

### Corrientes en la profundidad

Como gigantescas cintas transportadoras, las grandes corrientes marítimas atraviesan los océanos por diferentes pisos. Además la llamada circulación termohalina hace avanzar las corrientes profundas: las aguas saladas y frías son más pesadas que las cálidas, y se hunden en la profundidad. De la succión dejada por la corriente hundida lentamente fluyen a continuación masas de agua cálida, que se enfrían y siguen la misma dirección.

La bomba más grande de éste tipo trabaja en el norte del Atlántico. La corriente del Golfo mueve quinientas veces más agua que el Amazonas. La corriente del Golfo forma parte del sistema de corrientes universales. Es calentada por el sol caribeño, luego fluye hacia el norte a lo largo de las costas americanas hasta las aguas polares. Los vientos árticos entre Groenlandia y Noruega, enfrían las masas de agua, de alta salinidad, provenientes de los trópicos, hasta casi su punto álgido.

Por el alto contenido en sal, el agua se vuelve tan pesada que se hunde en la profundidad; en invierno se hunden aproximadamente 17 millones de metros cúbicos por segundo, y así es que la corriente lleva 20 veces más agua que los ríos en la Tierra. Las aguas frías comienzan su recorrido por el globo al cabo de dos hasta tres kilómetros de profundidad: hacia el sur a través de la cuenca occidental del Atlántico, hasta la corriente del círculo polar antártico, y desde allí hasta los océanos Índico y Pacífico. En las áreas de flotación, aproximadamente por delante de la costa peruana o californiana sale nuevamente el agua de mar sumergida después de cientos de años.

Por un lado mientras los vientos remueven, empujan rápidamente y por todas partes el agua de la superficie del Océano, por otro lado la corriente del Golfo alcanza hasta 9km/hora, en cambio las aguas profundas, se mueven sólo muy lentamente, como

máximo hasta 0,36km/hora. Sólo un ciclo de agua de mar a lo largo de las cintas transportadoras globales tarda también aproximadamente 1000 años.

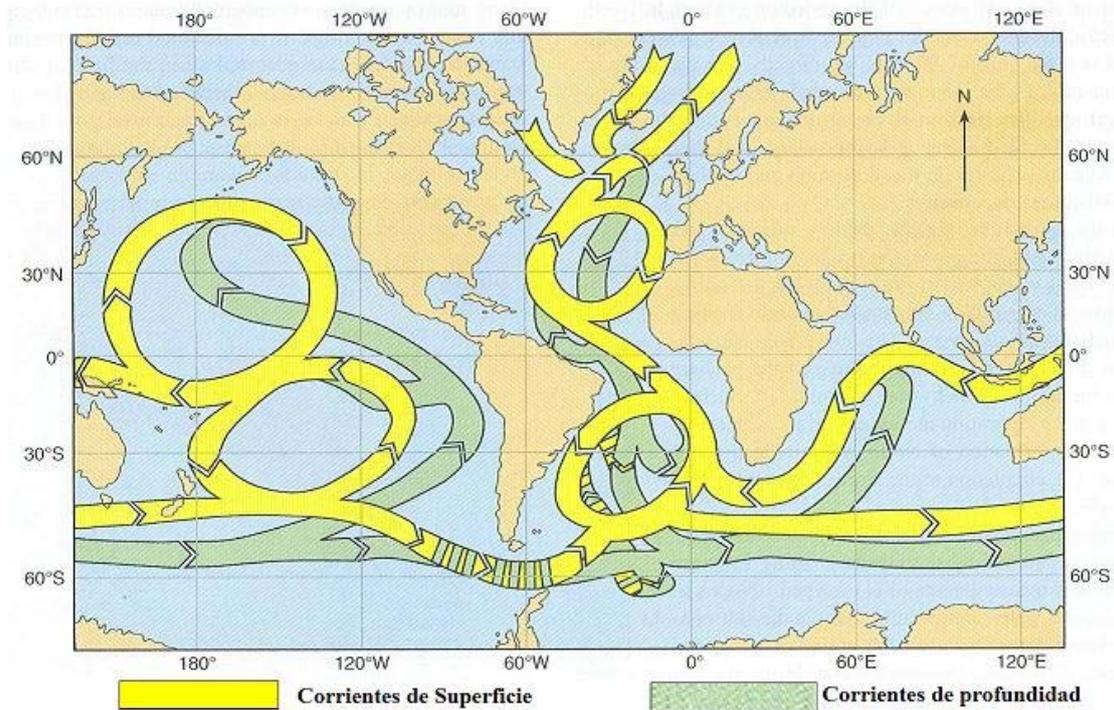


Figura 4.5 Corrientes de superficie y profundidad de los océanos <sup>[10]</sup>.

#### 4.4 Estructura térmica del mar

En el mar hay un intercambio continuo a través de sus fronteras por ello es importante mencionarlas. Las fronteras del mar según su naturaleza, se dividen en tres clases:

- 1) La superficie libre que linda con la atmósfera, llamada sencillamente la superficie del mar.
- 2) La superficie fija que linda con la parte sumergida de la corteza terrestre, o sea, el fondo del mar.
- 3) El borde que linda al mismo tiempo con la atmósfera, con la tierra emergida y la tierra sumergida, o sea, la orilla.

Es a través de estas fronteras que el mar intercambia materia y energía con los medios adyacentes. Los procesos que ocurren en las fronteras producen las condiciones primarias que, a su vez, establecen las características y el movimiento de las aguas en el mar.

El océano mundial constituye uno de los agentes fundamentales del sistema termodinámico de nuestro planeta. En tal sentido su función es la de almacenar y redistribuir la energía de radiación proveniente del sol. Esta energía hace a la máquina funcionar en sus minúsculos detalles físicos, químicos y biológicos para tarde o temprano, regresar al espacio cósmico en forma de radiación.

#### Radiación

La fuente primitiva de la energía radiante es la radiación solar. La radiación que llega hacia la tierra desde el sol se denomina radiación de onda corta, puesto que la longitud

de onda se halla entre los límites de  $0.39 \mu$  y  $2.5 \mu$ . En comparación, la radiación térmica emitida por todos los objetos, bajo la temperatura terrestre, la llamamos radiación de onda larga, siendo su longitud de onda entre  $5 \mu$  y  $20 \mu$ .

La cantidad de energía radiante emitida por el sol y que alcanza el límite exterior de la atmósfera está muy cerca de  $0.14 \text{ Wcm}^{-2}$ . Este número se denomina la constante solar de radiación.

La radiación interceptada por el globo terrestre corresponde a la cantidad que incide sobre un disco con el área  $\pi R^2$ , donde  $R$  es el radio de la tierra. En una vuelta completa, la superficie esférica del globo, cuya área total es  $4\pi R^2$  recibe la radiación interceptada. En consecuencia, una unidad de área sobre el límite superior de la atmósfera recibe, como promedio, la cuarta parte de la radiación interceptada. Al atravesar la atmósfera, la radiación solar sufre una absorción selectiva por los distintos gases que componen el aire.

La parte más corta del espectro solar, es decir, la luz ultravioleta y la violeta, es absorbida por el oxígeno ( $O_2$ ) y por el ozono ( $O_3$ ). En el otro lado del espectro, con longitud de onda por encima de  $1 \text{ m}$ , la radiación solar sufre una absorción por el vapor de agua en la atmósfera. Además de la absorción, la radiación solar en su camino a través de la atmósfera sufre una dispersión causada en parte por las moléculas del aire y en parte por partículas en suspensión tales como polvo, humo, pequeñas gotas de agua, etc. La dispersión por las moléculas afecta principalmente las ondas cortas de la luz solar, lo que produce el color azul del cielo despejado, de un modo semejante a lo que sucede en el mar.

La radiación de onda corta que alcanza la superficie de la tierra es en parte absorbida por esta, pero una porción variable es remitida hacia el espacio por las áreas cubiertas de nieve, los desiertos amarillos, los campos y por el mismo mar azul. Esta proporción, junto con la luz emitida por las nubes y el aire, constituyen lo que llamamos el albedo de la tierra. En términos aproximados, se puede decir que el albedo es la luz que hace a nuestro planeta visible en el espacio. Cuando un astronauta observa a la tierra y aprecia toda su exuberancia de colores desde el espacio exterior, o nosotros la vemos a través de la foto y de la televisión, estamos observando el albedo del planeta Tierra.

La radiación de onda larga emitida por la superficie de la tierra es absorbida por el vapor de agua y también por el anhídrido carbónico ( $CO_2$ ), así como por el ozono ( $O_3$ ). La influencia de cada uno de estos factores varía según la longitud de onda de la radiación.

En un período de un año, la cantidad de energía que alcanza la tierra desde el espacio exterior tiene que ser aproximadamente igual a la energía que la tierra emite al espacio durante el mismo lapso. La tierra emite la mayor parte de la energía en forma de radiación térmica y, según la ley de Stefan-Boltzman ( $E_b = \sigma T^4$  y la  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{oK}^{-4}$ ), la intensidad de la radiación térmica de un cuerpo es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta. Por esta razón la superficie terrestre, incluyendo el océano y la atmósfera, debe mantener un valor promedio de temperatura que corresponda al equilibrio de radiación con el espacio exterior. Si las condiciones de radiación se alteran, la temperatura del emisor se adaptará a las nuevas condiciones para restaurar el equilibrio. Ese mecanismo lo llamamos, el efecto de invernadero, por su semejanza con lo que sucede dentro de una casa hecha de vidrio: la radiación de onda corta que atraviesa los cristales es absorbida por la tierra y las plantas dentro de la casa, resultando en un aumento de la temperatura que, a su vez, aumenta la radiación térmica. Los vidrios del invernadero juegan, el papel de la atmósfera terrestre y de su transparencia a la radiación térmica dependerá la proporción que alcance el espacio exterior.

En el caso de la atmósfera, el anhídrido carbónico constituye un factor limitante para la radiación térmica hacia el espacio. A este respecto, se puede especular que un aumento de ese gas en la atmósfera resultaría en un aumento de la temperatura sobre la tierra para restaurar el equilibrio de radiación.

La humanidad utiliza los hidrocarburos fósiles como combustible, produciendo a su vez  $\text{CO}_2$  en cantidades suficientes para aumentar su concentración en la atmósfera lo que resulta en un aumento de la temperatura en el equilibrio de radiación. Sin embargo, en vista del equilibrio de concentración de  $\text{CO}_2$  entre el océano y la atmósfera, se cree que el agua de mar absorberá una buena parte del exceso, evitando de este modo alteraciones climáticas de mayor trascendencia. Si se excede a la capacidad de absorción de  $\text{CO}_2$  por el mar, la temperatura de atmósfera aumentará que es lo que se conoce como calentamiento global.

La cantidad de radiación solar que alcanza un determinado punto de la superficie del mar en un día, depende de varios factores, tales como: la latitud del lugar, la estación del año, la humedad y la nubosidad de la atmósfera. Además, la superficie del mar recibe radiación emitida por la propia atmósfera, principalmente del vapor de agua y de las nubes. También la superficie del mar emite radiación térmica, hacia la atmósfera.

Anteriormente se mencionó que la radiación, al penetrar en el mar, sufre absorción selectiva, de manera que mientras mayor sea la longitud de onda, más intensa es su absorción. De esta circunstancia resulta que la radiación con longitud de onda por encima de 1 a 2 micrones sufre una transformación total en el primer centímetro por debajo de la superficie, independientemente de la transparencia del agua. Por otro lado, la transformación de la energía de radiación más corta depende de la transparencia del agua.

Solamente el 10% de la energía total de radiación que penetra en la superficie de las aguas oceánicas medias alcanza 10 m de profundidad, lo que significa que el 90% de la energía se transforma en calor en ese intervalo. En las aguas de mar turbias la transformación es aún más intensa.

Puesto que el fondo del mar está desprovisto de fuentes primarias de radiación, el intercambio de esta forma de energía a través de la frontera fondo-mar, es nula, bajo condiciones normales. Si bien tanto el agua como la superficie del fondo emiten radiación uno contra el otro, de acuerdo con los principios de la radiación térmica, el balance tiene que desaparecer debido a la pequeñísima diferencia de temperatura en la zona de contacto entre los dos medios, siendo, por supuesto, aún menor su cuarta potencia.

Por regla general, el fondo del mar se halla fuera del alcance de la radiación solar. Sin embargo, existen ciertas áreas de aguas relativamente claras y de baja profundidad donde una determinada porción de la radiación solar puede penetrar hasta el fondo, formando una fuente secundaria de radiación calor sensible, y que puede ser reflejada y absorbida por la superficie de contacto entre los dos medios.

Una parte de la energía que alcanza el fondo es absorbida en la superficie de contacto y conducida al agua en forma de calor sensible. Según la naturaleza del fondo, una parte mayor o menor es reflejada hacia la columna de agua, sufriendo la absorción hasta que eventualmente una pequeña porción entra en la atmósfera de nuevo.

Por otra parte, la reflexión y absorción en profundidades inferiores, o sea, en la faja de la orilla, pueden ejercer un efecto local apreciable. Cuando la columna de agua mantiene alta estabilidad la superficie, las aguas cerca del fondo pueden conservar su temperatura elevada

En las regiones polares de la tierra, donde grandes cantidades de hielo entran, el mar pierde también calor por descongelación. En la orilla la energía mecánica de las olas de la marea y de las corrientes se transforma en calor a través de la fricción en una escala mucho más intensa que en la frontera mar-atmósfera.

En la frontera fondo-mar ocurre un transporte de calor sensible desde el fondo hacia el mar. Se ha constatado que en las regiones profundas de los océanos, ese transporte es alrededor de  $0.12 \text{ cal/cm}^2/\text{día}$ , pero en regiones volcánicas del fondo este transporte puede ser mucho mayor. En áreas de poca profundidad donde la variación térmica del mar alcanza el fondo hay un transporte de calor sensible del mar para el fondo cuando, el agua es más caliente y viceversa, pero el balance anual tiene que ser a favor del mar puesto que el interior de la tierra es más caliente que su superficie. La energía mecánica del mar se transforma en calor por efecto de la fricción creada cuando el agua se mueve sobre el fondo. Esa transformación es muy pequeña en las cuencas profundas del océano, mientras que en las áreas de menor profundidad, donde el agua se mueve con mayor velocidad, esa transformación es importante. Eso es sobre todo cierto en el caso de las corrientes creadas por la marea porque en este caso el fondo sirve de freno que constantemente transforma la energía producida por fuerzas generadoras de la marea evitando así oscilaciones excesivas del nivel del mar. Por otro lado el calor que resulta de esta transformación es de poca importancia para el balance térmico del océano.

#### **4.4.1 La distribución de temperatura en el mar.**

Los factores que determinan el estado térmico en el mar son dos tipos distintos: 1) transferencia de energía a través de las fronteras y 2) transferencia por corrientes, conducción y mezcla en el seno del mar.

Los factores que se relacionan con la radiación solar producen, por absorción selectiva de la radiación, la temperatura más elevada en la superficie. Ese factor tiende, por lo tanto, a crear un gradiente vertical negativo de temperatura. Por otra parte, los procesos que transfieren energía, desde mar hacia la atmósfera (evaporación, radiación térmica y otros) reducen la temperatura de la superficie, dando, origen a un gradiente vertical positivo.

La distribución horizontal de la temperatura en la superficie de los océanos coincide, en líneas generales, con el balance energético entre el mar y la atmósfera en cada latitud, aunque, debido a la circulación horizontal de las aguas en la zona tropical de los océanos, el lado occidental tiene una temperatura más elevada que el lado oriental, al mismo tiempo que la cantidad de agua de temperatura elevada es también mayor. Al norte de la zona tropical la situación se invierte generalmente y el lado occidental es frío mientras que el lado oriental es cálido.

Por debajo de la superficie el estado térmico del agua solo es determinado por la mezcla y el movimiento y como éste es principalmente horizontal, ya que la columna vertical es generalmente estable, se dificulta la mezcla en dicho sentido predominando, pues, el transporte horizontal del calor sobre el vertical. Por esta razón existe en las zonas tropicales y sub-tropicales una capa de agua caliente reposando sobre aguas frías e isotérmicas originadas en altas latitudes.

En la capa superficial del mar se aprecia la influencia de la mezcla vertical y por ello dicha capa presenta las mayores variaciones, tanto en espacio como en tiempo.

En el capítulo 1 se presentó la distribución de temperaturas, pero solo en un caso, por ello ahora se presentaran algunos ejemplos de la distribución vertical de la temperatura, analizando brevemente sus causas.

Se considera una curva que representa la distribución vertical de la temperatura en un determinado lugar (Fig. 4.6-A). En los primeros 100 metros la temperatura es uniforme; es la capa isotérmica o capa mezclada. Entre los 100 y los 150 m la curva señala un gradiente positivo bastante marcado, lo que representa la capa de transición térmica o termoclina. Por debajo de los 150 m el gradiente es menos intenso. Si el calentamiento de la superficie predomina sobre el enfriamiento y la mezcla vertical, la temperatura superficial irá en aumento con relación a la de los niveles inferiores y el resultado será como el que se muestra en la fig. 4.6-B. El viento, por ser uno de los factores que provocan la mezcla forzada en la capa superficial, determina una nueva capa isotérmica cuyo espesor está en función directa de su fuerza y duración (Fig. 4.6-C).

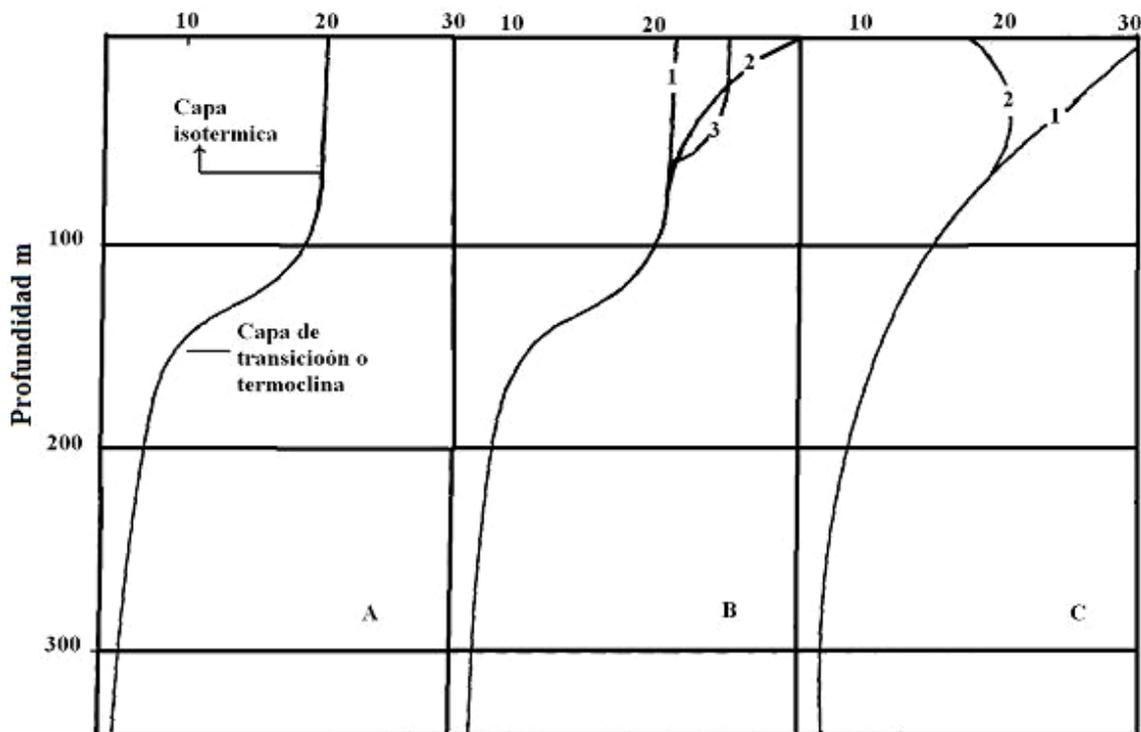


Figura 4.6 Ejemplos de la distribución vertical de la temperatura en la capa superior del mar<sup>[2]</sup>.

A: Un estrato isotérmico yace sobre una capa de transición

B: Modificaciones cerca de la superficie, causadas por: 1 a 2 calentamiento; 2 a 3 mezcla por acción mecánica (viento y/u olas)

C: Rama 1 - la termoclina alcanza la superficie a consecuencia de un calentamiento.

Rama 2 - la pérdida de calor a través de la superficie ha producido un enfriamiento en el estrato superficial.

En regiones donde el viento varía, ocurren periodos sucesivos de mezcla intensa y menos intensa y si eso coincide con la época de calentamiento de la superficie (primavera y verano), la curva vertical tendrá forma de escalera, representando capas isotérmicas separadas por estratos de transición (termoclinas). Los saltos superiores recién producidos serán normalmente los más marcados, mientras que los más profundos se suavizan paulatinamente por la conducción térmica, siempre presente en grado mayor o menor.

La profundidad de la capa isotérmica producida por el viento depende también de la estabilidad de la columna, ya que mientras más estable sea la columna más se dificulta su mezcla vertical.

Cuando la mezcla se produce únicamente por la acción mecánica del viento y de las olas, el calor en la capa mezclada permanece constante, de lo que resulta que el área en la gráfica permanece constante, como señalan las curvas B y C de la figura 4.6.

Otro factor que altera la distribución térmica en la capa superficial y que produce un gradiente negativo en los primeros metros es el enfriamiento. Si la estabilidad de la columna es grande, la reducción de la temperatura por enfriamiento tiene que aumentar la densidad en la superficie lo suficiente para provocar la circulación vertical (en ese proceso también influye la salinidad).

Cuando dos masas de agua diferentes fluyen en dirección opuestas en la frontera común se produce una distribución vertical bastante compleja. En general, el análisis de la curva vertical de temperatura en la capa superficial en este caso es bastante difícil y exige un conocimiento detallado de las masas de agua en la región de las corrientes, así como de las condiciones anteriores a la observación, en lo referente a las condiciones del viento y la mezcla vertical, el balance energético superficial, etc. Puesto que todos estos factores están presentes en un grado mayor o menor, la distribución que observamos es el resultado de su interacción.

En regiones de divergencia, la termoclina suele encontrarse a una profundidad relativamente pequeña, mientras que en áreas de convergencia se encuentra a una profundidad mayor (fig. 4.7).

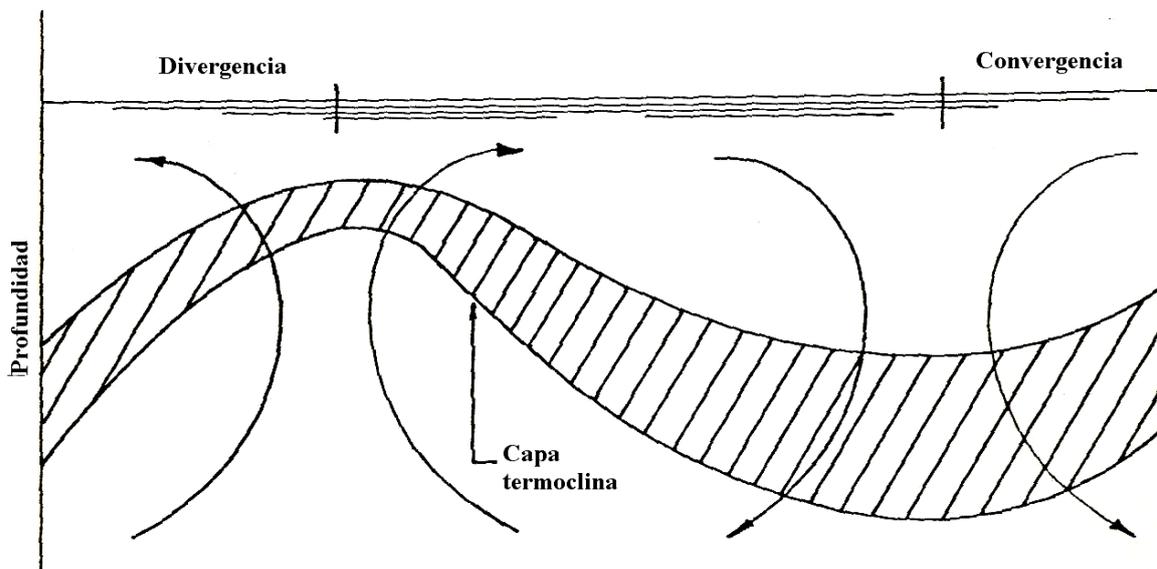


Figura 4.7 En zonas de divergencia horizontal (ascensión de aguas) <sup>[2]</sup>.

La termoclina suele situarse en profundidad menor y ser más intensa que en las zonas de convergencia (descenso de aguas) donde la misma se encuentra a una profundidad mayor teniendo además una intensidad menos acentuada.

Generalmente la capa de termoclina es más delgada y mejor definida (gradiente más fuerte) en las áreas de divergencia que en las de convergencia.

En las latitudes bajas, la termoclina se encuentra entre 10-20 metros bajo la superficie en el lado oriental y entre 100-200 m en el lado occidental de los océanos porque las corrientes ecuatoriales transportan el agua hacia el occidente y esta se calienta en el trayecto. En dirección meridional (norte-sur) la termoclina se halla a menor profundidad

cerca del Ecuador, debido a que el transporte de Ekman producido por los vientos alisios lleva el agua hacia el norte en el hemisferio norte y hacia el sur en el hemisferio sur, creando de este modo una divergencia en la zona ecuatorial.

En las zonas de latitudes bajas, la temperatura de la capa superficial de los océanos sufre una variación estacional relativamente pequeña (1 a 4°C), excepto en las áreas de escasa profundidad. También en estas regiones cercanas a la orilla, la temperatura en la superficie, por la absorción de radiación solar, sufre una variación diaria de varios grados. En las latitudes más altas, la capa superficial se calienta en la primavera y en el verano, formándose una termoclina bastante marcada por lo general, que alcanza hasta la superficie durante los periodos de calma. Durante el otoño, cuando la superficie pierde más calor que el que gana a través de la frontera con la atmósfera, la temperatura de la superficie desciende y, si no hay convección, se forma un gradiente vertical negativo superficial. Al continuar el proceso de enfriamiento, se produce una estabilidad negativa dando origen a la circulación vertical. Por debajo de la capa superficial la curva anual de la temperatura sufre un retraso con relación a la de la superficie, es decir, que la época del máximo y del mínimo de temperatura ocurren cada vez más tarde, a medida que la profundidad aumenta (fig. 4.8).

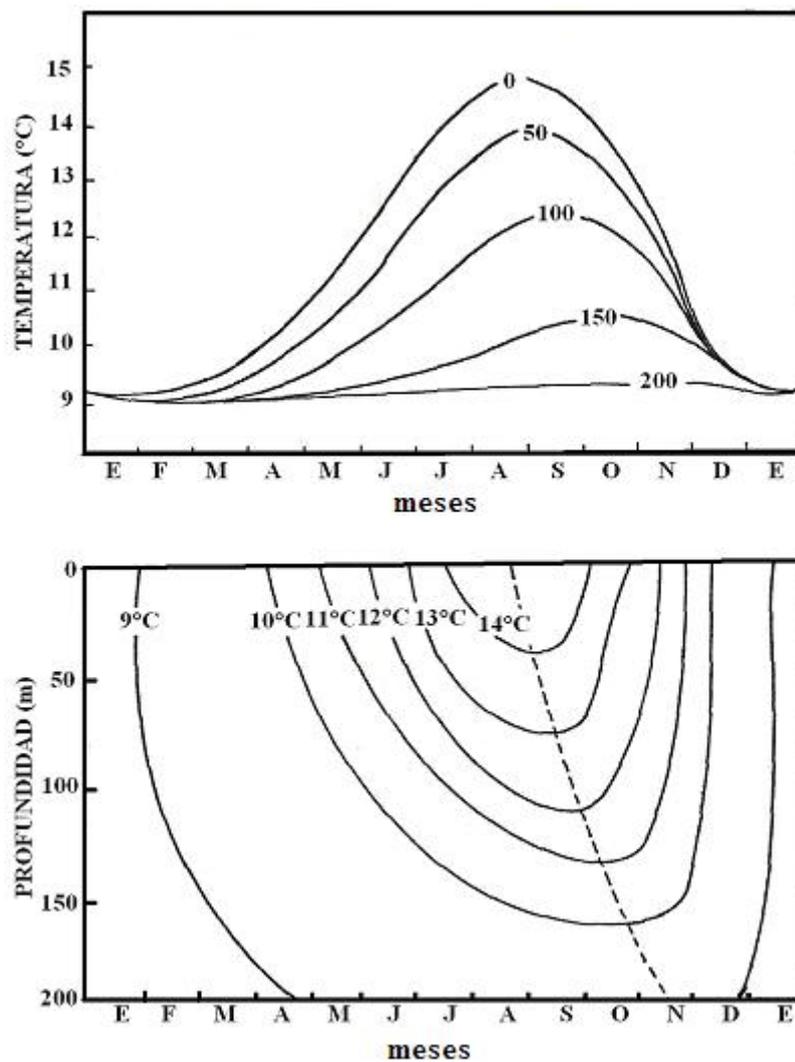


Figura 4.8 Un ejemplo simplificado de la variación anual de la temperatura en la capa superior de la zona templada de los océanos <sup>[2]</sup>.

La grafica superior representa la curva anual de temperatura en las profundidades 0, 50, 100, 150 y 200 metros. La grafica inferior, basada en las curvas anuales, representa una isopleta de la temperatura en función del tiempo y de la profundidad. La línea quebrada señala la época de temperatura máxima en las distintas profundidades, poniendo en evidencia el retraso y la propagación de la onda de calor a través de la capa superior.

Al mismo tiempo la amplitud de la curva disminuye hasta llegar a una profundidad donde la temperatura permanece prácticamente constante durante todo el año. El mecanismo se puede comparar a una onda térmica que se propagara desde la superficie hacia abajo, disminuyendo su amplitud a lo largo de su recorrido.

En áreas del océano donde ocurren cambios estacionales en las corrientes o en el movimiento vertical de las aguas (surgencias o hundimientos) los efectos del transporte calórico desde la superficie, por conducción y convección (circulación vertical), quedan enmascarados por los efectos de advección. En tales condiciones, a una determinada profundidad el ciclo térmico se invierte con relación al de la superficie, o sea que la época de máxima en la superficie coincide con la de la mínima temperatura en esa profundidad y viceversa.

#### **4.5 El mar visto como una máquina térmica**

Para ver al mar como una maquina térmica, primero se define que es una maquina térmica.

Una maquina térmica es un dispositivo especial que pude convertir el calor en trabajo.

Para que se pueda hablar de que el mar es una maquina térmica, este debe de cumplir con ciertas características.

- a) Recibe calor de una fuente de alta temperatura (energía solar).
- b) Convierte parte de este calor en trabajo. (movimiento)
- c) Liberan el calor de desecho remanente en un sumidero de baja temperatura (atmósfera).
- d) Opera en un ciclo.

Dos de estas características como ya se ha mencionado en los capítulos anteriores se encuentran en el mar por la propia acción natural, estas son las fuente y el sumidero. Otra forma puede ser un medio artificial. Y para completar la maquina térmica se necesita de un mecanismo que ayude a aprovechar estas características que tiene el mar. Uno de los muchos mecanismos que ayudan a convertir el mar en una maquina térmica es la OTEC ya que aprovecha el calor del océano para convertirlo en trabajo y el sumidero para completar el ciclo.

Ya se menciona en el capitulo 3 como funciona la OTEC y como convierte la energía que tiene el océano en forma de calor en trabajo mecánico.

Con la ayuda de la OTEC ya se puede ver al océano como una maquina térmica y aprovechar estas características naturales.

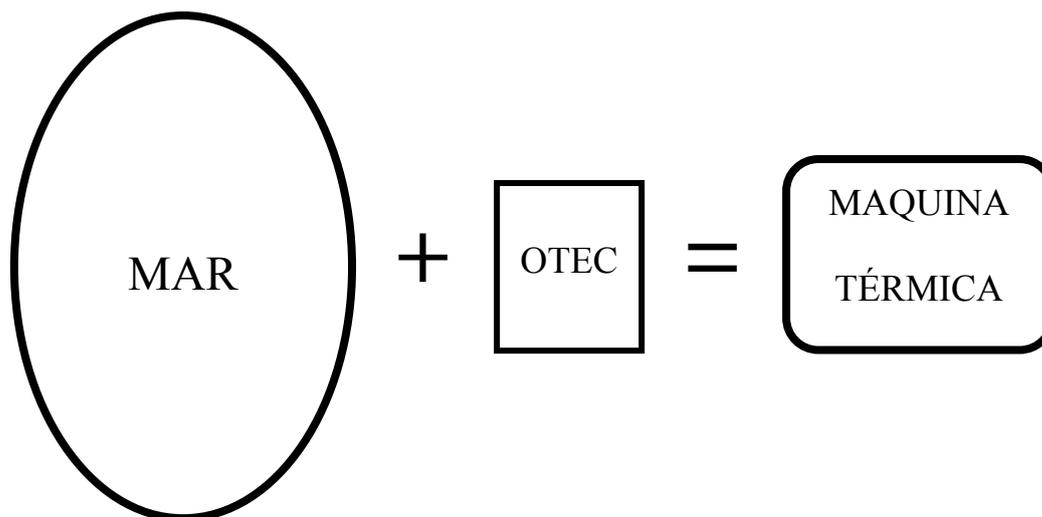


Figura 4.9 El mar y la OTEC visto como maquina térmica.

## 4.6 Oceanografía de los mares mexicanos

A continuación se describen aspectos importantes de los mares mexicanos que tienen relevancia para el enfoque de la OTEC.

### 4.6.1 Pacífico tropical mexicano

El Pacífico es el más grande y profundo de los océanos, cubre más de 166 millones de km<sup>2</sup> y tiene una profundidad promedio de 4 188 m. El litoral mexicano en el océano Pacífico mide 4 054 km de longitud, dentro de los cuales el 42% corresponde al Pacífico Tropical Mexicano.

#### Batimetría

Al examinar la batimetría del Pacífico mexicano se muestra lo siguiente:

- Que la plataforma continental limitada por la isóbata de 200 m es pequeña.
- Que la región pelágica limitada por las isóbatas de 200 a 300 m es también de corta área, indicio de que el declive submarino es muy profundo.
- Que la región abisal con profundidades de más de 3 000 m ocupa una amplia extensión.
- Que las profundidades de más de 4 000 m se agrupan formando fosas frente del litoral (Fig. 4.10).

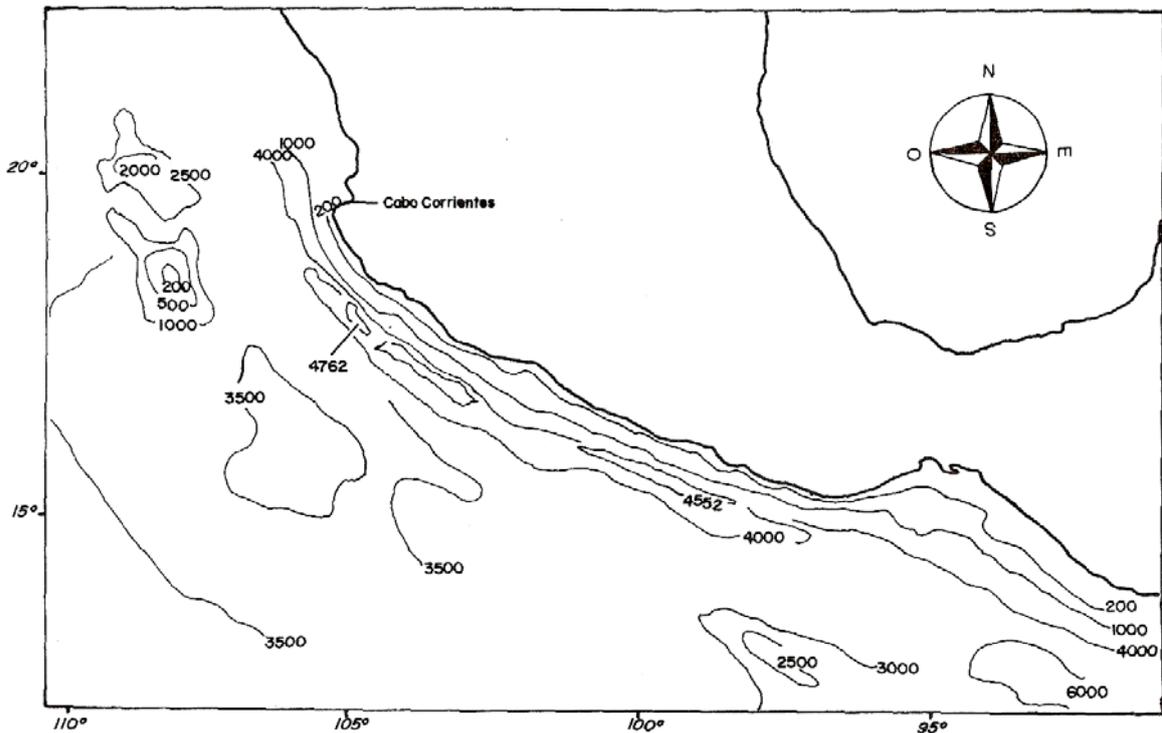


Figura 4.10 Batimetría del pacífico tropical mexicano [6].

### Temperatura

La estructura térmica del Pacífico Tropical Este se caracteriza por una capa de mezcla donde la temperatura es casi constante; una termoclina con un cambio térmico muy fuerte y una capa subsuperficial donde decrece pero con intervalos mucho menores que en la termoclina. La variación anual de la temperatura superficial fluctúa entre 26 y 28°C. La intrusión de Agua Superficial subtropical propicia cambios anuales de 5°C o más en el área cercana a Cabo Corrientes, mientras que en el Golfo de Tehuantepec oscilan entre 3 y 4°C (Fig. 4.11).

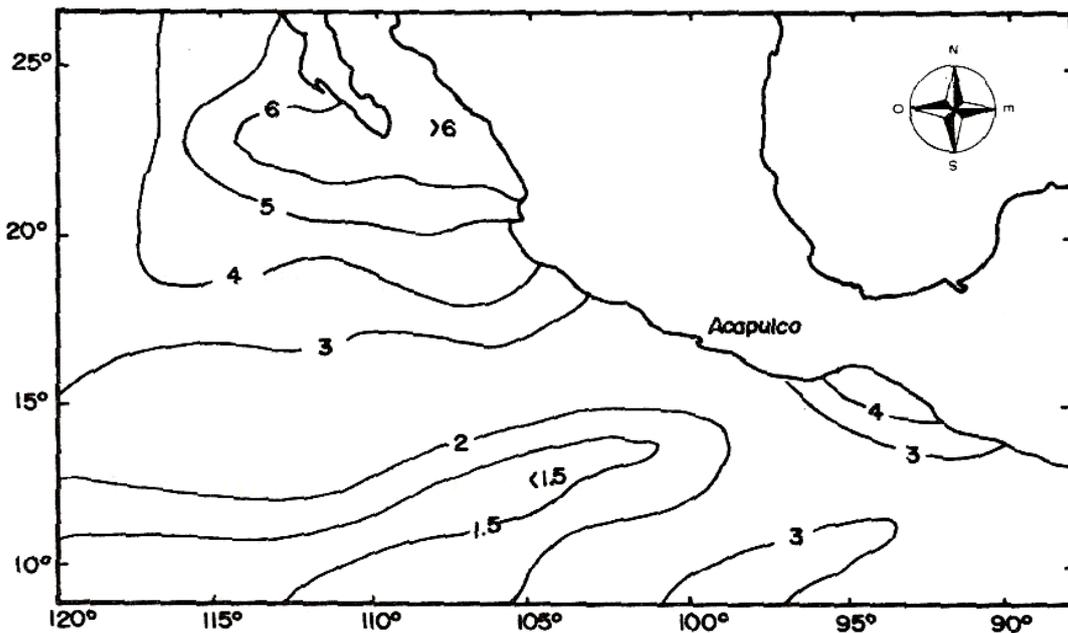


Figura 4.11 Variación anual de la temperatura (°C) superficial [6].

En las costas de Guerrero la temperatura superficial en febrero es de 28°C y de 15°C a 100 m de profundidad; en abril varía de 28.5°C en superficie a 14°C a los 100 m. La termoclina es patente entre los primeros 10 a 20 m, con poca variación con respecto a la profundidad (aproximadamente de 0.17 °C/m). La salinidad se eleva de un mes a otro y con la profundidad de 34 ups en superficie a 34.7 ups a los 100 m y de 34.4 ups (superficie) a 34.9 ups (100 m), para febrero y abril respectivamente.

	Temperatura (°C)		Salinidad (ups)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Manzanillo, Colima	23	30	32	35.5
Acapulco, Guerrero	25	30	32.4	34.7
Salina Cruz, Oaxaca	23	29.5	33	34.9

Tabla 4.2 Mínimos y máximos promedio de temperatura y salinidad para 3 estaciones mareográficas del Pacífico Tropical Mexicano <sup>[6]</sup>.

#### 4.6.2 Golfo de baja California

La topografía y batimetría actual del golfo, es el resultado de la dinámica estructural realizada durante aproximadamente 12 millones de años a través de una serie de procesos geológicos que se han acelerado los últimos 4.5 millones de años.

Los rasos topográficos más profundos que se observan en esta provincia pertenecen a la cuenca de Delfín y Salsipuedes. El límite superior de la primera está dado por la isobata de 180 m, haciéndose mas profunda hacia el sur hasta los 720 m en el centro de la Cuenca Delfin, la cual es una estructura alargada que corre paralela a la península. Esta cuenca se prolonga a través del cala de Ballenas hacia la Cuenca de Salsipuedes, solo separados por el umbral de 540 m de profundidad entre la isla Ángel de la guarda y las paredes del talud peninsular. La cuenca Salsipuedes, hasta 1 450 m, es la mayor profundidad registrada para la provincia del Norte.

La plataforma entre la bahía San Francisquito y el sur de Santa Rosalía, prácticamente no existe y el talud se inicia a los 40 m alcanzando hasta 750 m, a 12 km de la costa. Al sur de Santa Rosalía el talud presenta una elevación notable que asciende desde los 1 300 m hasta los 260 m y es paralela a la costa en 810 km aproximadamente, hasta desaparecer en la porción Sur de la cuenca, como se observa en la fig. 4.12.

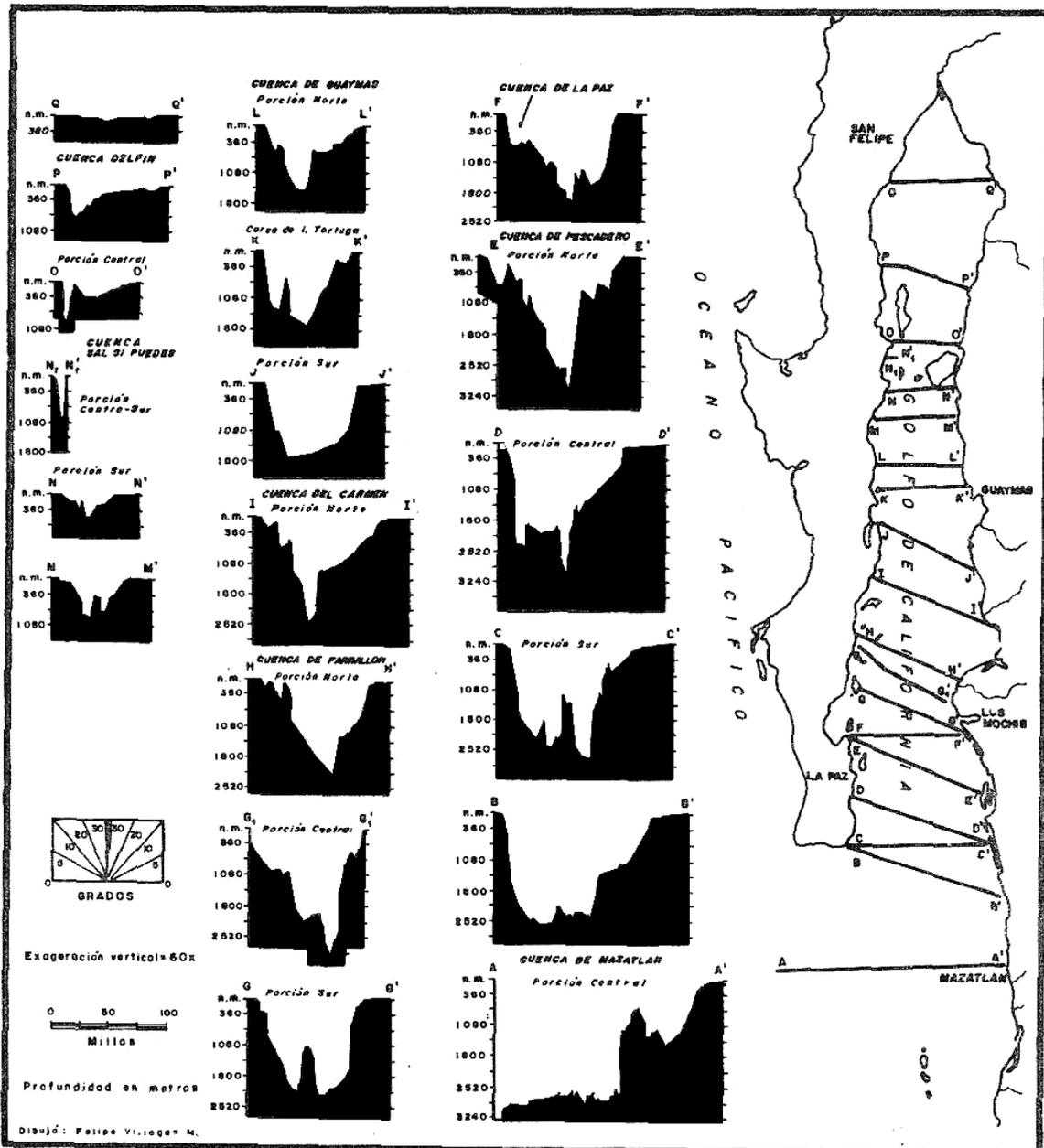


Figura 4.12 Secciones batimétricas a través del golfo de California. Estos perfiles tienen una exageración de 60x <sup>[6]</sup>.

### Temperatura.

El efecto de la bomba termodinámica del Océano Pacífico sobre el clima del Golfo de California se ve reducido por la presencia en la Península de California de una cadena de montañas de 1 a 3 km de alto, de aquí que el clima del golfo sea más continental que oceánico, hecho que contribuye a los intervalos tan variables, tanto diurnos como anuales que aquí se suceden. El gradiente de temperatura media mensual es muy grande y va desde los 9°C cerca de Cabo Corrientes, hasta 22°C en la boca del Río Colorado. Las temperaturas superficiales más bajas son persistentemente encontradas en el canal de Ballenas, donde la mezcla de mareas es muy fuerte <sup>[6]</sup>. Durante los meses de octubre a junio las temperaturas en la Entrada del Golfo son más altas que en el Golfo Superior (Fig. 4.13).

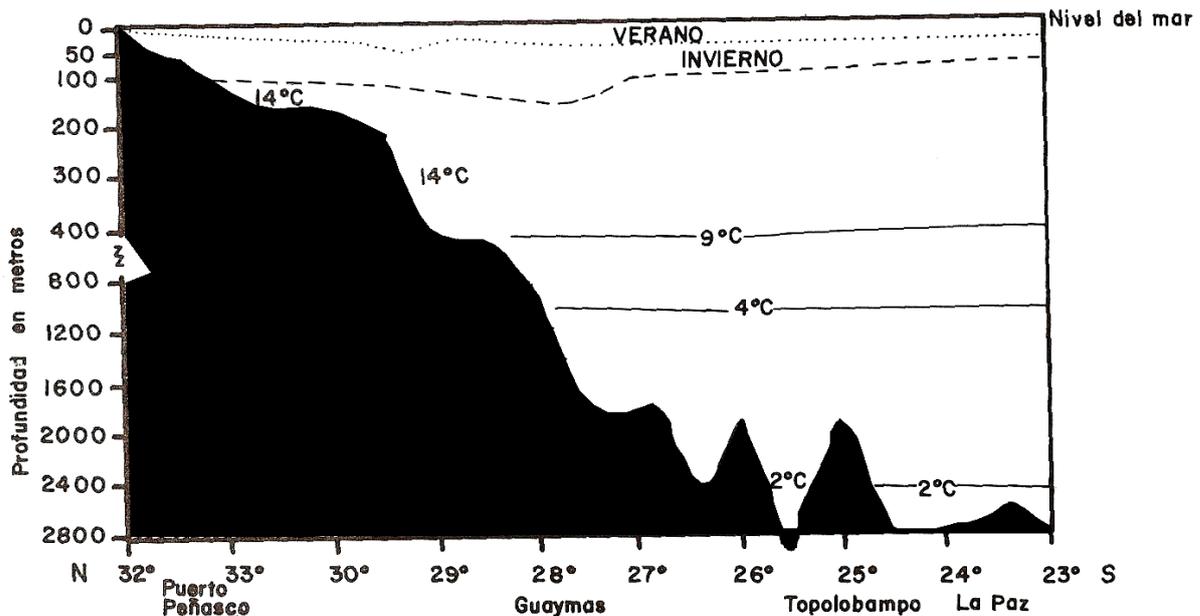


Figura 4.13 Secciones longitudinales generalizadas desde el golfo superior a la entrada del golfo que muestra las termoclinas de verano e invierno y las medidas promedio de la temperatura de fondo. [6]

Desde diciembre a mayo las isotermas corren en su mayor parte, de Este al Oeste hasta el Sur del paralelo 28 °N; cerca de la Isla Angel de la Guarda cambian de dirección hacia el Norte y se vuelven paralelas a la costa<sup>[13]</sup> (Fig. 4.12). Esto puede ser debido a los vientos que soplan del Noroeste, lo que produce que las temperaturas en la costa Este sean más bajas. Al inicio de junio y extendiéndose hasta septiembre las isotermas corren paralelas al golfo a lo largo del eje longitudinal, ocasionando que las aguas más calientes estén en las costas de Sonora y Sinaloa, observándose surgencias en Baja California. Se asocia también al efecto de los vientos que soplan del Sureste. En octubre sucede una situación muy particular cambiando de sentido la dirección de las isotermas con respecto a los meses anteriores, sobre todo la, Entrada del Golfo y el Golfo Inferior, donde existen altas temperaturas en las costas de Baja California y afloramientos en las costas Orientales.

En la parte superior del golfo se presentan grandes variaciones espaciales y estacionales de temperatura, siendo más fuertes a lo largo de la península y principalmente, en la desembocadura del Río Colorado, donde se han registrado valores menores a 10°C en el invierno y mayores a 32°C durante el verano, mientras que en las costas de Sonora la gama es ligeramente menor, 12°C y 30°C, respectivamente.

Durante el otoño la temperatura superficial disminuye del Sureste al Noreste, con registros máximos promedio de 22°C y mínimos de 20°C .

La distribución superficial de la temperatura indica que la circulación neta, sin considerar flujo y refluo de las mareas, es rotatoria en el sentido contrario a las manecillas del reloj <sup>[13]</sup>.

Durante invierno las temperaturas superficiales disminuyen en general de Este a Oeste, los mínimos registros se presentan en el Oeste de la Isla Montague con 13.2°C. En primavera la distribución de la temperatura es muy heterogénea con una tendencia al incremento, aunque a finales de ésta y hasta verano, la temperatura señala un patrón que disminuye desde el Noroeste al Sureste, condición contraria a otoño, donde durante esta temporada existen los máximos registros de temperatura, 32.25°C .

Esta zona tiene fuerte influencia por el clima de los desiertos que la rodean, son áreas de agua somera, por lo que los cambios atmosféricos afectan mucho más a estas aguas que aquellas ubicadas en el Sur, donde la profundidad es mayor. El patrón general de inversión que experimenta el gradiente de temperatura es: aumentos hacia el Noroeste en verano, y disminuciones hacia la misma dirección durante otoño.

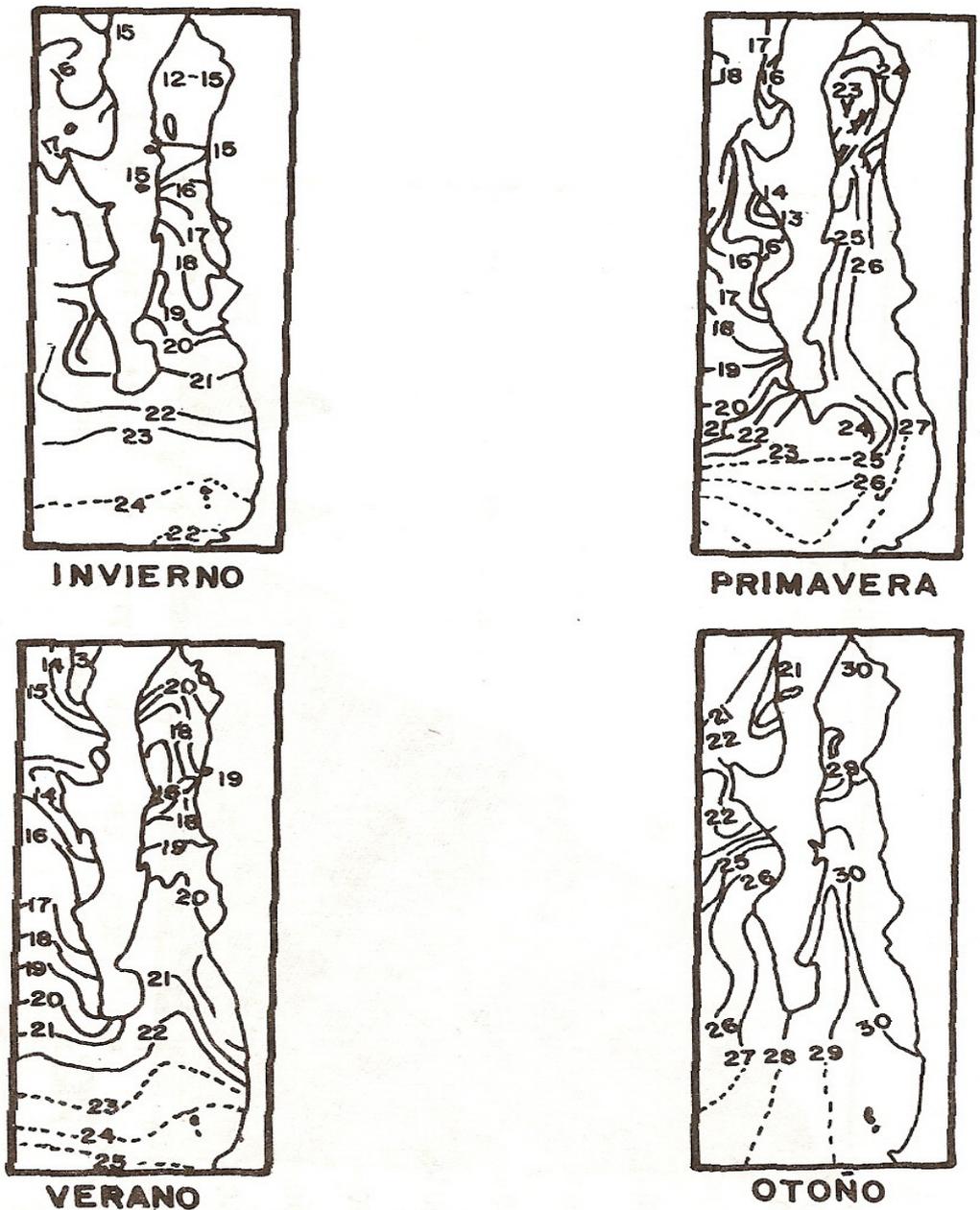


Figura 4.14 Temperaturas superficiales en el Golfo de California, comportamiento estacional [6].

### 4.6.3 Golfo de México y caribe mexicano

#### 4.6.3.1 Golfo de México

El golfo de México es una cuenca aislada del mar caribe por un umbral con profundidad aproximada de 2 500 m. Se extiende en una área total de 1 768 000 km con regiones muy profundas mayores a 3 400 m.

En su porción norte, el golfo de México pertenece a la zona económica de Estados Unidos, donde la plataforma continental está ampliamente desarrollada, sobre todo en la península de Florida. Sin embargo dentro del territorio mexicano es muy estrecha, con la notable excepción de la península de Yucatán.

Batimetría.

A continuación se presenta un mapa del golfo de México (figura 4.15) con rasgos batimétricos y topográficos, los números en las líneas significan las profundidades en metros.

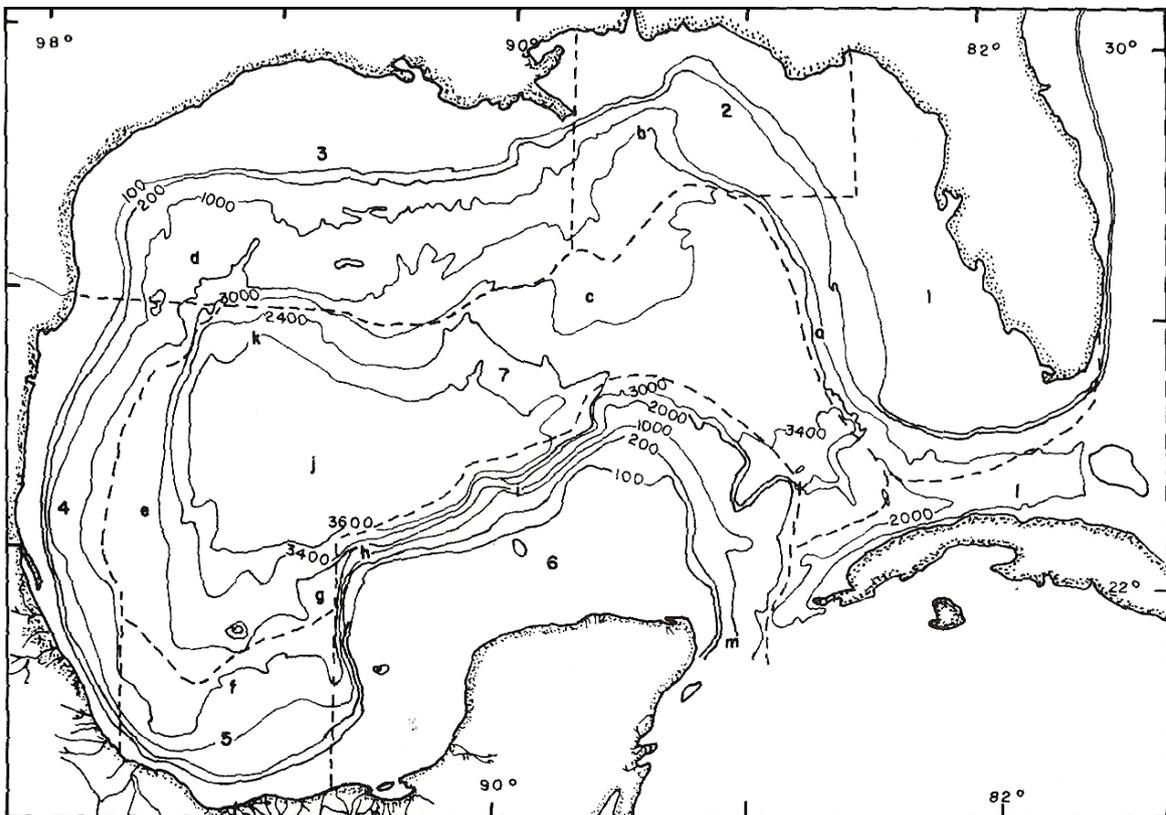


Figura 4.15 Rasgos batimétricos y topográficos del golfo de México [6].

#### 4.6.3.2 Caribe mexicano

El mar caribe se extiende en una área total de 2 640 000 km y una profundidad media superior a la del golfo de México de 4 000 m.

## Batimetría

La plataforma continental del caribe mexicano es muy estrecha, con solo 20 km frente a Cancún y gradualmente se atenúa hacia el sur, y en puerto Morelos prácticamente desaparece, confundiéndose con la ladera del talud continental que alcanza una rápida profundidad de 400 m, a los cuales el talud se interrumpe con un par de elevaciones alargadas que constituyen la isla de Cozumel y el banco flecha Smith de 17 m de profundidad. Al oriente de estas formaciones, el talud aumenta bruscamente su pendiente hasta llegar a los 1 000 m donde nuevamente ésta disminuye dando lugar a montañas ovaladas de 405 y 262 m de altura limitadas por escarpes que se extienden hacia la Planicie Abisal de Yucatán (Fig. 4.16).

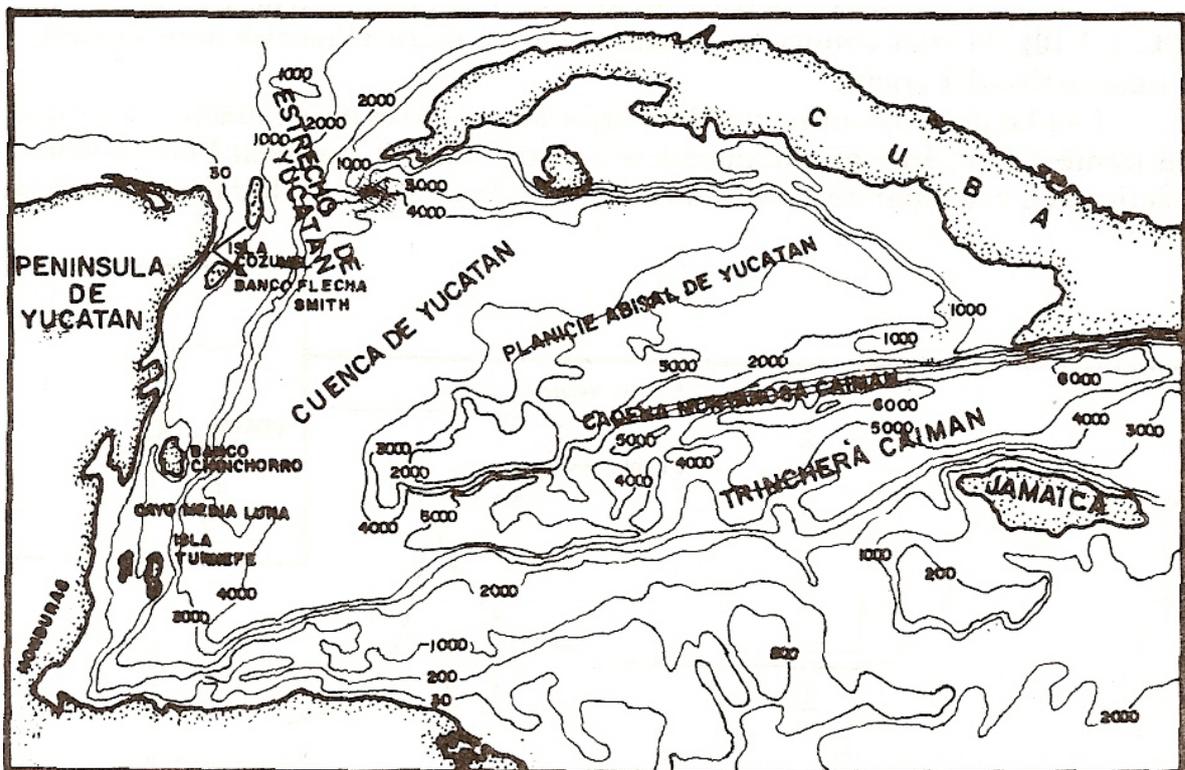


Figura 4.16 Rasgos Batimétricos y topográficos del mar Caribe [6].

Al sur de Puerto Morelos la plataforma continental continúa muy atenuada y es hasta Belice donde se amplía con 25 km. El talud muestra otros grandes bancos como el Chinchorro que se limita por pequeñas islas, como la Isla Turnsfre y Cayo Media Luna, en Guatemala. El talud es muy estrecho y sus elevaciones y depresiones se delimitan por escarpes, uno en el paralelo 19 que tiene su base a 4 400 m de profundidad y otro en el paralelo 18 que alcanza los 3 700 m.

Al noreste de la península sobre la parte oriental de la plataforma, se extiende entre 200 y 2 000 m en una ladera poco inclinada que remata con un escarpe que va hasta los 3000 m de profundidad. Dentro de la plataforma, al 24 ° norte y el 86 ° oeste se localiza una depresión ovalada de 3 500 m de profundidad y otra de 3219 m (S.P.P., INEGI, 1983).

En dirección sur el talud continental en el extremo occidental de la Isla de Cuba, está disectado por cinco grandes cañones submarinos paralelos entre sí y dirigidos hacia la Planicie Abisal de Yucatán, misma que se localiza hacia el sur y se delimita por la isobata de 3 500 m con una extensión aproximada de 3 500 km.

Los taludes de la Península de Yucatán y Cuba se aproximan entre sí en una depresión estrecha que se conoce como Canal de Yucatán y se observa, por su menor profundidad como una divisoria entre las cuencas del Golfo de México y Mar Caribe.

Al sur de la Planicie de Yucatán surge la Cadena Montañosa Caimán, que se constituye de bancos de menos de 200 m de profundidad y se extiende en un área de 4 000 m dirección noreste.

### Temperatura del Golfo de México y el mar Caribe.

Las aguas provenientes del canal de Yucatán y que constituyen a la corriente de Lazo presentan una termoclina profunda, aproximadamente a 200 m durante la primavera y el verano, épocas durante las cuales las aguas cálidas superficiales de la corriente favorecen dicha situación; sin embargo, conforme la época de nortes se acerca, la temperatura superficial de las aguas caribeñas se abate, siendo menor la diferencia entre éstas y las capas subsuperficiales, lo cual provoca que la termoclina durante el invierno sea ligeramente más somera. En términos generales, la localización de la termoclina dentro del flujo de Lazo, siempre se comporta menos profunda hacia el Estrecho de Florida como respuesta a los efectos que sobre el flujo tiene la topografía y batimetría de la zona.

En el oeste del Golfo de México la termoclina es poco profunda, mostrándose en ocasiones, por arriba de los 50 m (Fig. 4.17). En el litoral de Tamaulipas durante julio, la termoclina es aún más somera, entre los 20 m a 50 m de profundidad.

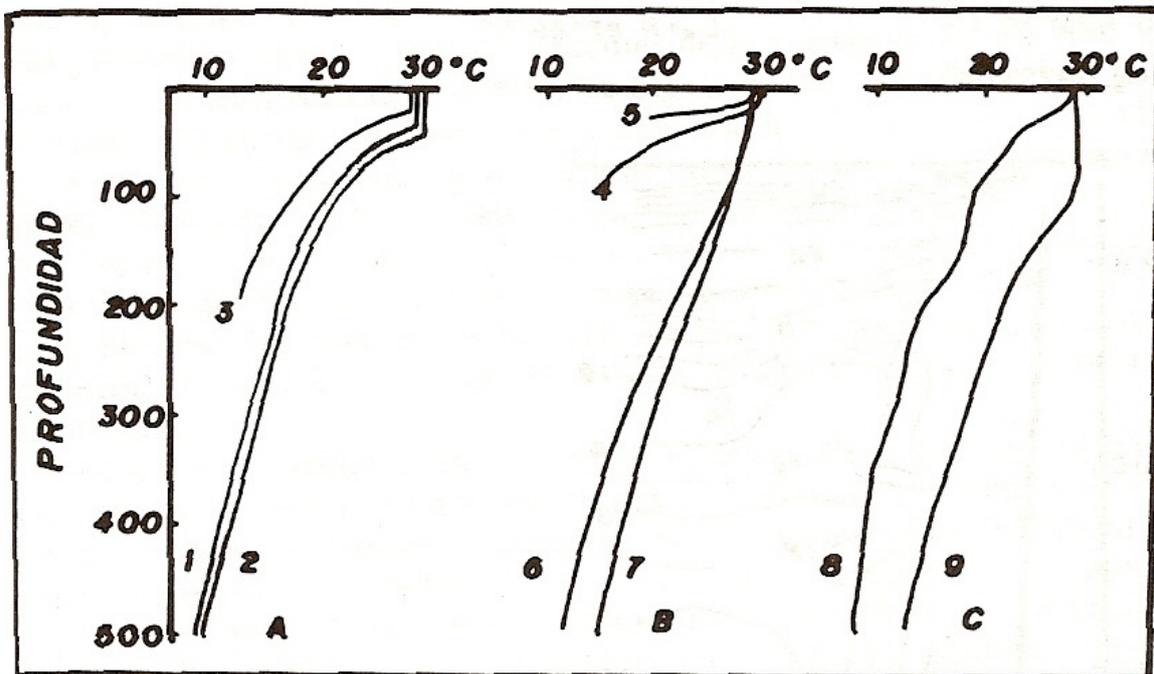


Figura 4.17 Distribución vertical de temperatura en diferentes condiciones A y B- Golfo de México: 1,2 usual; 3-afloresamiento o surgencia, 4,5 – en plataforma continental; 6,7 – hundimiento. C; en mar caribe, 8- hundimiento <sup>[6]</sup>.

## 4.7 Lugares apropiados para las plantas OTEC

El pacífico tropical mexicano ofrece una gran extensión de lugares apropiados para la OTEC, la batimetría de 1 000 m necesaria para la instalación de las plantas OTEC se da en toda la costa del pacifico desde la costas de Oaxaca ( $15^{\circ}40'$  N,  $96^{\circ}15'$  W) hasta las costas de Jalisco ( $20^{\circ}40'$  N,  $105^{\circ}17'$  W) en cuestión de temperatura hay un promedio de  $26^{\circ}\text{C}$  anuales en estas regiones alcanzando como mínimo  $23^{\circ}\text{C}$  con una termoclina alcanzada a los 100 m aproximadamente. La temperatura en la superficie tiene una variación de 3 a  $4^{\circ}\text{C}$  por lo que la temperatura es realmente propicia para la OTEC. La isobata de 1 000 m a lo largo del pacifico mexicano se encuentra a diferentes distancias de cada costa por lo que se tiene que hacer un estudio mas afondo de cual seria el sitio ideal y con mas rentabilidad.

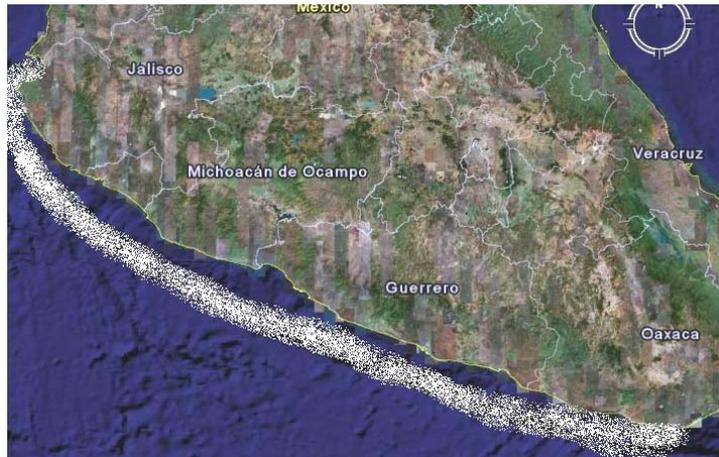


Figura 4.18 Lugares del pacífico mexicano que reúnen los requisitos para la instalación de una planta OTEC <sup>[21]</sup>.

En el caso del golfo de Baja California se tiene que las temperaturas óptimas para la instalación de una planta OTEC, por la batimetría y la temperatura promedio que se maneja alrededor del año solo se dan en el sur de la península desde el punto ( $24^{\circ}19'$  N,  $110^{\circ}14'$  W) hasta ( $23^{\circ}$  N  $110^{\circ}06'$  W), esto debido a que la parte que da al pacifico de la península de Baja California es enfriada por la corriente de Alaska.



Figura 4.19 Lugares del golfo de Baja California que reúnen los requisitos para la instalación de una planta OTEC <sup>[21]</sup>.

Para el Golfo de México, las temperaturas necesarias para OTEC son factibles pero la batimetría del Golfo de México no ayuda a la instalación de una planta OTEC debido a que las profundidades de 1 000 m se alcanzan muy lejos de la costa, por ello en el golfo de México no se podría instalar una OTEC, solo se podría si se hiciera una OTEC flotante y que sirviera para generar energía para un producto secundario.

En el mar Caribe la zona de la península de Yucatán es muy estable en su temperatura de superficie y la profundidad de 1 000 m se alcanza no muy lejos de la costa la isla de Cozumel sería idónea de acuerdo a las características térmicas y batimétricas, desde el punto (18° 15' N, 87°47' W) hasta (20°24' N, 86°37' W).



Figura 4.20 Lugares del mar caribe mexicano que reúnen los requisitos para la instalación de una planta OTEC <sup>[21]</sup>.

## V. DISCUSIÓN

### 5.1 Cuales el mejor de los ciclos en general

Ya se han descrito los ciclos OTEC; cerrado, abierto e híbrido. Para poder definir cual de los ciclos es el mejor, se deben poner ciertas prioridades.

Los dos ciclos ocupan los mismos instrumentos (turbinas de vapor, intercambiadores de calor, bombas, tuberías grandes, etc.). Lo que hace la diferencia entre los dos ciclos es el fluido de trabajo que se ocupa en cada ciclo.

En cuestión de energía eléctrica el ciclo cerrado seria la mejor opción ya que puede manejar turbinas de menor tamaño esto debido a que el porcentaje de vapor en el ciclo abierto solo es un porcentaje alrededor del 10% del agua salada que se evapora en la cámara de vacío.

Para calcular cuanto porcentaje de vapor que se obtiene en la evaporación flash se ocupan la siguiente formula.

$$\% \text{ evaporación flash} = [(h_e - h_s) / h_{fgs}] * 100$$

Las presiones típicas en un ciclo abierto OTEC son:

$$P_e = 1 \text{ bar}$$

$$P_s = 0.033 \text{ bar}$$

De tablas <sup>17</sup> obtenemos los siguientes datos:

$$h_e = 417.47 \text{ kJ/kg}$$

$$h_s = 109.67 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{fgs} = 2439.89 \text{ kJ/kg}$$

Utilizando la formula obtenemos:

$$\% \text{ evaporación flash} = [(417.47 - 109.67) / 2439.89] * 100$$

$$\% \text{ evaporación flash} = 12.62$$

donde

$P_e$  es presión de entrada

$P_s$  es presión de salida

$h_e$  entalpía del liquido saturado a la presión de entrada ( $P_e$ )

$h_s$  entalpía del líquido saturado a la presión de vacío ( $P_s$ )

$h_{fgs}$  entalpía de vaporización a la presión de vacío ( $P_s$ )

El vapor de agua que se obtiene, es un porcentaje muy bajo por lo cual surgen varios problemas, uno de ellos es la cantidad de agua que se necesita bombear y la superficie del condensador para poder realizar una condensación adecuada con el gradiente de temperatura que se da en las plantas OTEC. Se alcanza más porcentaje de flujo de vapor en el ciclo cerrado y se pueden cambiar los fluidos de trabajo o como en el caso del ciclo Kalina se pueden hacer ciertas mezclas de sustancias para aumentar la eficiencia

del sistema. El ciclo híbrido tiene la ventaja de producir energía eléctrica con el ciclo cerrado y producir agua desalinizada con el ciclo abierto.

Por otro lado el ciclo abierto tiene la indudable ventaja del agua destilada, o sea, la desalinización del agua de mar.

En estos momentos la ventaja que tiene el ciclo abierto de la desalinización es la que le da el punto extra, ya que el vital líquido es cada vez más escaso en muchas partes del mundo. Por ello a pesar de que la energía eléctrica otorgada por el ciclo abierto sea menor que en el caso del ciclo cerrado, el mejor ciclo OTEC, para estos momentos, es el ciclo abierto.

## 5.2 Análisis de costos

Los altos costos de OTEC, son los que han frenado la posible incursión de este tipo de generación de energía en el mundo, analizando los costos de operación de las diferentes plantas notamos que la OTEC esta lejos de ser competitiva con las generadoras usuales.

En la tabla de costos referente con la distancia a la costa, nos dan ciertos costos de operación, el recomendado por Vega en el estudio de OTEC es que la planta se encuentre a 100 km de la costa y el costo de operación seria de 100 dólares por MWh.

En el 2005 se hizo un estudio en Bruselas de los costos operativos en las energías renovables más conocidas <sup>[1]</sup> donde nos indican los siguientes costos operativos (generación de energía menor a 12 MW):

Para los sistemas fotovoltaicos se tienen 150 USD/MWh, Hidráulicos (pequeña escala) de 60 a 75 USD/MWh, Biomasa de 49 a 60 USD/MWh, Biogás de 55 a 60 USD/MWh y para las Eólicas se tiene 85 USD/MWh (para los primeros 5 años), 65 USD/MWh hasta los diez años.

La mejor opción en cuanto al costo de operación no esta en las energías renovables, las centrales nucleares tienen el menor costo operativo. Se estima un costo de 26 a 36 USD/MWh en reactores de la cuarta generación, las plantas de carbón de alta eficiencia 44 USD/MWh y 50 USD/MWh en las plantas de ciclo combinado <sup>[13]</sup>.

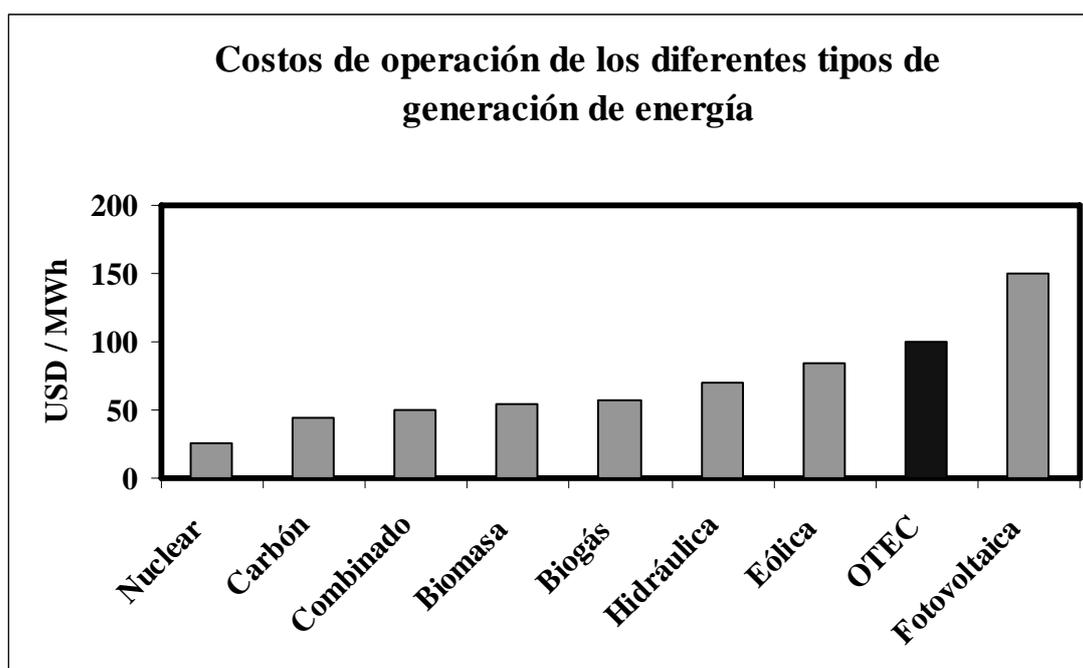


Figura 5.1 Comparación de los costos operativos de los diferentes tipos de generación de energía contra la OTEC <sup>[13]</sup>.

Esta comparación de costos nos da una idea de que en estos momentos los costos de la OTEC son muy altos para la generación de energía.

En la figura 5.2 se muestra la distribución del costo de una planta OTEC y se observa que en las bombas y tuberías es el mayor costo esto debido a la gran cantidad de agua de mar que debe ser suministrada al sistema para que sea eficiente, es muy difícil disminuir este costo ya que es necesaria tanta agua y el gradiente de temperaturas no puede disminuir ya que sería ineficiente. Pero en las tuberías sí se podría hacer una disminución en los costos, se han hecho muchos estudios para disminuir los costos de la OTEC, Occes y Nisymco Inc. han propuesto utilizar aleaciones de aluminio para los intercambiadores de calor, los cuales tienen un costo mucho menor que los que se utilizan hoy en día de titanio <sup>[4 y 27]</sup>. NELHA ha estado experimentando con tuberías más baratas, hechas de polietileno de alta densidad, este material es rígido y flexible siendo ideal para el tipo de tubería de OTEC, que está completamente sumergida en el agua de mar <sup>[24]</sup>. Y esta flexibilidad permite una instalación más rápida y fácil que la que se manejaba anteriormente.

#### Distribución del costo de una planta OTEC de ciclo cerrado de 5 MW

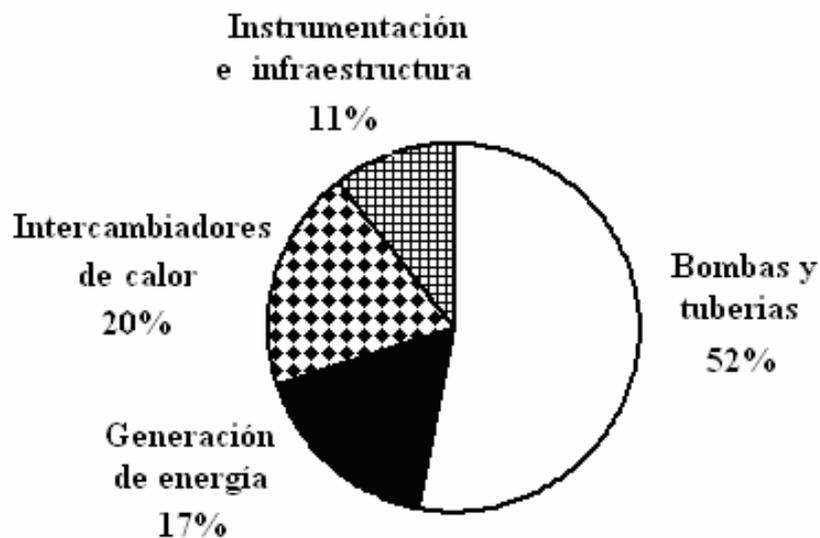


Figura 5.2 Distribución del costo de una planta OTEC <sup>[4]</sup>

Sin duda los costos de OTEC dependen de cuánto aumentarán los precios de los combustibles fósiles y el agua dulce.

La compañía Sea Solar Power a fines de Junio de 2004 anunció un proyecto para la instalación de una planta OTEC de 10 MW y 11 000 m<sup>3</sup> al día de agua dulce, el costo en el año 2004 fue de 120 millones de dólares, para concluir la instalación a principios del año 2008 <sup>[29]</sup>.

## **5.3 Ventajas y desventajas en general de OTEC**

### **5.3.1 Desventajas**

Las plantas OTEC producen electricidad actualmente a un costo superior al que se obtiene mediante el empleo de combustibles fósiles. Los costos de la electricidad podrían reducirse significativamente si la planta operase sin importantes revisiones en 30 años o más, pero no se disponen de datos sobre los ciclos de vida de estas plantas.

Las plantas OTEC deben instalarse donde existan diferencias de temperatura a lo largo del año de 20 °C. Las profundidades del océano deben estar disponibles muy cerca de la costa para economizar las operaciones.

Aunque se han realizado numerosos ensayos de plantas OTEC de pequeña escala, se precisa de la construcción de una planta piloto o de una demostración de tamaño comercial para obtener una mayor información de su viabilidad.

La construcción de plantas OTEC y la colocación de tuberías en las aguas costeras pueden causar un daño localizado a los arrecifes y ecosistemas marinos cercanos.

Son necesarios algunos desarrollos adicionales de componentes claves para que las futuras plantas OTEC tengan éxito (Por ejemplo, que las tuberías para extracción del agua de las profundidades marinas sean menos costosas; construcción de turbinas de menor presión y condensadores más apropiados para los sistemas de ciclo abierto, etc.)

### **5.3.2 Ventajas**

Las plantas OTEC usan fuentes naturales de energía, que son abundantes, limpias y renovables. El agua caliente de las superficies y el agua fría de las profundidades de los océanos reemplazan a los combustibles fósiles para generar electricidad.

Plantas OTEC adecuadamente diseñadas producen poco o nada de dióxido de carbono u otras sustancias químicas contaminantes que contribuyen a la lluvia ácida o al calentamiento global (el “efecto invernadero”).

Los sistemas OTEC pueden producir agua potable y electricidad. Esto constituye una ventaja significativa en islas donde el agua potable escasea.

Hay suficiente energía solar almacenada en las capas calientes superficiales del agua de los mares tropicales para cubrir la mayor parte de las actuales necesidades energéticas de la humanidad.

El empleo de plantas OTEC como fuente de electricidad ayudará a reducir la dependencia de los combustibles fósiles importados.

El agua fría del mar procedente de los procesos OTEC puede tener diversos usos adicionales, incluyendo acondicionamiento de aire de edificios, alimentación de peces, crustáceos, algas marinas y otras plantas marinas que encuentran en estas aguas profundas muchos nutrientes.

### 5.3.3 Otras ventajas

#### 5.3.3.1 Productos secundarios

Una de las innovaciones y de las ventajas principales en la generación de energía de OTEC es la ventaja que genera los co-productos, que mejoran perceptiblemente la viabilidad económica de este sistema bajo condiciones económicas favorables actuales (las tarifas relativamente de bajo interés y altos costes de combustible). Los co-productos potenciales para las comunidades tropicales que se podrían aprovechar de la OTEC, son; energía limpia, el agua dulce pura, el aire acondicionado de la agua fría, la acuicultura, la agricultura, el hidrógeno, etc. Todos estos co-productos son viables y se pueden integrar utilizando tecnologías ya probadas.

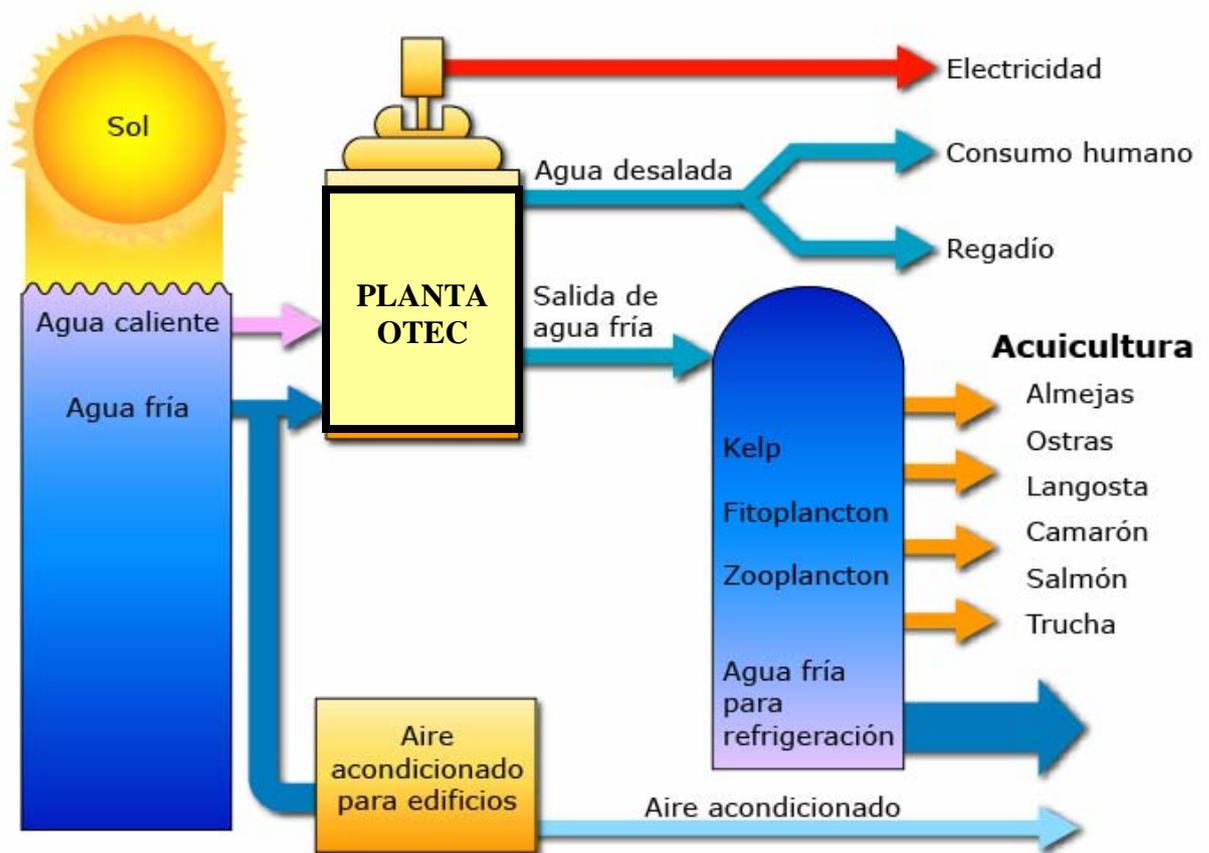


Figura 5.1 Planta OTEC con usos de los co-productos <sup>[22]</sup>.

En la actualidad no se ha puesto en práctica una evaluación de la viabilidad económica de la tecnología OTEC usando los co-productos, solamente se han hecho en el aspecto de la energía que produciría la OTEC. Sin añadir las ventajas sociales y ambientales.

#### 5.3.3.2 Producción del agua dulce

La co-producción de cantidades grandes de agua dulce es una de las ventajas principales del proceso de OTEC. Hasta 2.6 millones de litros por día se podrían producir de agua dulce, por MW (megawatt) de capacidad bruta instalada de la energía eléctrica. El agua

dulce es el resultado del agua de mar caliente evaporada (de la superficie) usada como el líquido de trabajo, en un proceso de ciclo abierto OTEC. La evaporación ocurre porque el agua de mar caliente se expone a un vacío parcial, que baja su punto de ebullición a una baja temperatura (23 °C aproximadamente) obteniendo vapor de baja presión. En el ciclo abierto este vapor se hace pasar por una turbina de baja presión (que accione un generador para producir electricidad) y después el agua dulce líquida es condensada al transferir calor al agua de mar fría a través de un intercambiador de calor. El agua dulce entonces se bombea hacia fuera para su mejor aprovechamiento.

### **5.3.3.3 Aire acondicionado del agua fría**

El agua de mar fría obtenida de la profundidad puede proporcionar grandes cantidades de aire acondicionado incluso después que haya pasado a través de la planta OTEC.

Como regla general se puede decir que por cada MW generado de energía bruta en una planta OTEC se puede producir 10 MW de aire acondicionado extra. En una zona costera en donde se puede instalar una planta OTEC los pobladores cercanos tienen las siguientes ventajas:

La comunidad está suficientemente cerca de una fuente del agua de mar fría, la demanda total del aire acondicionado es grande, el coste de energía local son altas, la utilización del aire acondicionado es grande (para la mayoría de la gente en la zonas costeras), la distribución terrestre no son extensas (de fácil acceso a la carga del aire acondicionado). Bajo estas circunstancias, los ahorros de la energía pueden ser del 90%.

### **5.3.3.4 Acuicultura**

El agua de mar de las profundidades que se extrae en una planta OTEC tiene muchas aplicaciones secundarias muy importantes, para la acuicultura tiene tres ventajas principales, las cuales son:

- Frío; la baja temperatura constante del mar profundo no sólo permite la cultura de los organismos valiosos de la agua fría en las zonas tropicales, también proporciona (cuando está mezclado con el agua superficial o al calentarse con el sol tropical) medios exactos del control de la temperatura, confiable y rentable sobre la gama de temperaturas completas de 6°C a 25°C.
- Alimento; (rico en nutrientes) el mar profundo se enriquece con nitrógeno disuelto, fósforo, carbón, y otros productos químicos que sean esenciales para el crecimiento vegetal en el océano.
- Puro; puesto que hay vida muy pequeña en las profundidades del mar, de la cual se bombea el agua, el mar profundo tiene muy pocos patógenos o células viables de las plantas. Esto permite la cultura libre de enfermedades, de organismos sensibles y la producción de las culturas puras de las plantas sin interferencia de la especie competente.

### **5.3.3.5 Agricultura**

Otra aplicación secundaria para el agua de mar bombeada de las profundidades del mar; es para la agricultura ya que estas aguas se pueden utilizar para enfriar el suelo (indirectamente). Y esto ayuda a que las raíces de las cosechas se mantengan frías. Las temperaturas que se producen son bajas alrededor de los 10°C. Esto da lugar a temperaturas en la superficie del suelo entre 25 y 30°C, aproximadamente. Esto está debajo del punto de condensación en la mayoría de las regiones tropicales y la humedad es condensada en la superficie del suelo. A medida que el agua continúa refrescándose, penetra a través del suelo hasta que alcanza el punto más frío de la zona de la raíz. Mientras que el agua emigra a través del suelo, acumula los minerales y los alimentos. El calor del sol (como de 37°C en regiones tropicales) calienta la flor y la fruta y el calor difunde abajo del vástago a la raíz. El gradiente termal que resulta lleva los alimentos encima del vástago en una tarifa proporcional a la diferencia de la temperatura entre la raíz (10°C) y la fruta (37°C). Y esto da un mejor resultado en las cosechas de las zonas cercanas a las costas tropicales.

### **5.3.3.6 Producción de hidrogeno**

La energía obtenida en una planta OTEC es suficiente para poder producir hidrogeno y licuarlo, por medio de la electrolisis, esta combinación nos da varias ventajas ya que la OTEC puede trabajar todo el año y todo el día y la producción de hidrogeno seria continua.

### **5.3.3.7 Otros**

Se han buscado muchas otras aplicaciones para una planta OTEC entre las que destacan; la producción de hielo, la obtención de minerales como el litio y el uranio, la propuesta de poner la energía a disposición de las plataformas militares en la marina, la utilización de la energía obtenida para producir o manufacturar el aluminio, para la producción de amoniaco, etc.

## **5.4 Análisis de lugares**

En el capítulo 4.7 ya se mencionaron los lugares donde la batimetría y la temperatura cubren las necesidades para la instalación de una planta OTEC, en los lugares mencionados se consideraba que las plantas pueden ser instaladas en altamar, pero debido a que México esta en constante peligro de huracanes alrededor de las costas, las plantas que son mas aptas, son las plantas en tierra, por ello después de un análisis de batimetría, temperatura y población cercana al punto estudiado, se ha decidido proponer los siguientes puntos:

### 5.4.1 Sitio 1

El sitio 1 se localiza en el sur de la península de Baja California en la bahía de San Lucas (22°52'N, 109°54'W).

#### Batimetría.

La profundidad de 1 000 m se alcanza aproximadamente a los 2 km de la costa y los 700 m a aproximadamente 1.5 km.

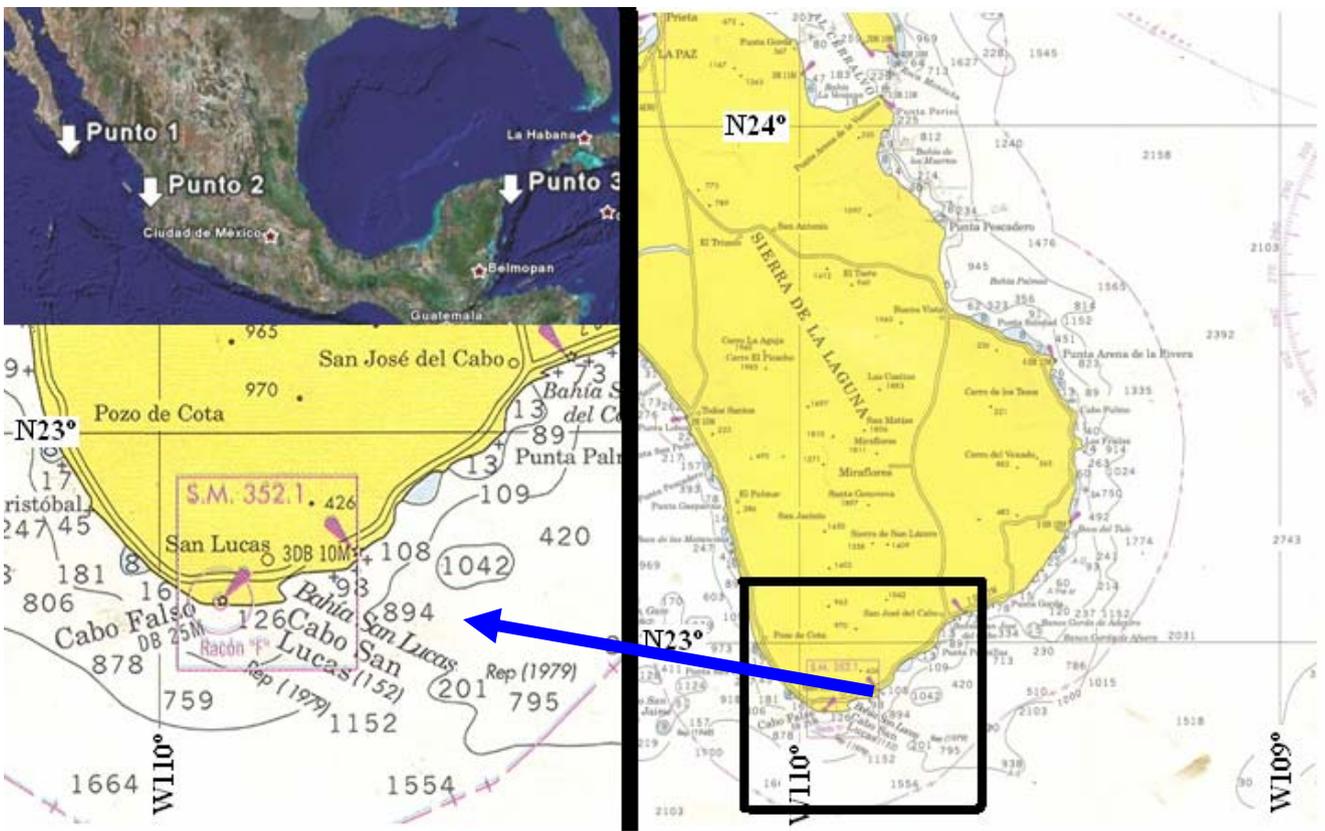


Figura 5.4 Análisis del lugar propuesto (punto 1) para la planta OTEC en las costas mexicanas referido a la batimetría [21 y 32].

#### Temperatura

La termoclina en la bahía de San Lucas como se muestra en la fig. 5.5 alcanza los 5°C aproximadamente a los 700 m lo cual es favorable para el gradiente térmico. La toma de datos del ICMYL fue en invierno, por lo cual la temperatura superficial mostrada es la mínima que se tiene en estas costas.

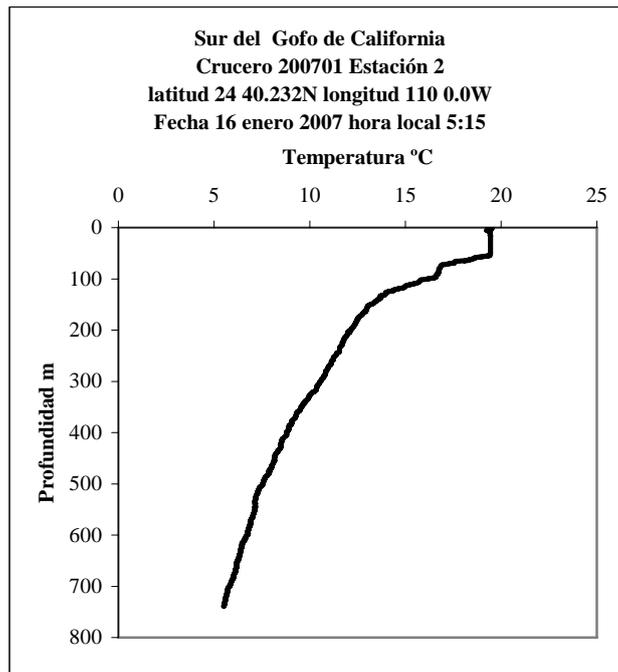


Figura 5.5 Termoclina de la bahía de San Lucas\* .

### Población cercana

La población más cercana y que se podría beneficiar es Cabo San Lucas, ya que la instalación de una planta OTEC tiene que estar cerca de una ciudad para minimizar costos de transporte para los productos OTEC.



Figura 5.6 Ciudad cercana (Punto 1) y lugares en donde se propone la instalación de una planta OTEC con base en tierra<sup>[21]</sup>.

\* Estos datos para la termoclina fueron obtenidos por el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología en el crucero PROCEAM 1. Estación 15 latitud 20°34'5'' longitud 105° 34'11'', profundidad 1 300 m, fecha 28 mayo 2004 hora local 8:43, con el equipo CTD Niel Brown.

## 5.4.2 Sitio 2

El sitio 2 se localiza en las costas de Puerto Vallarta Jalisco en Bahía de Banderas (20°34'N, 105°14'W).

### Batimetría

La profundidad de 1 000 m se alcanza aproximadamente a los 2.3 km de la costa y los 700 m a aproximadamente 1.8 km.

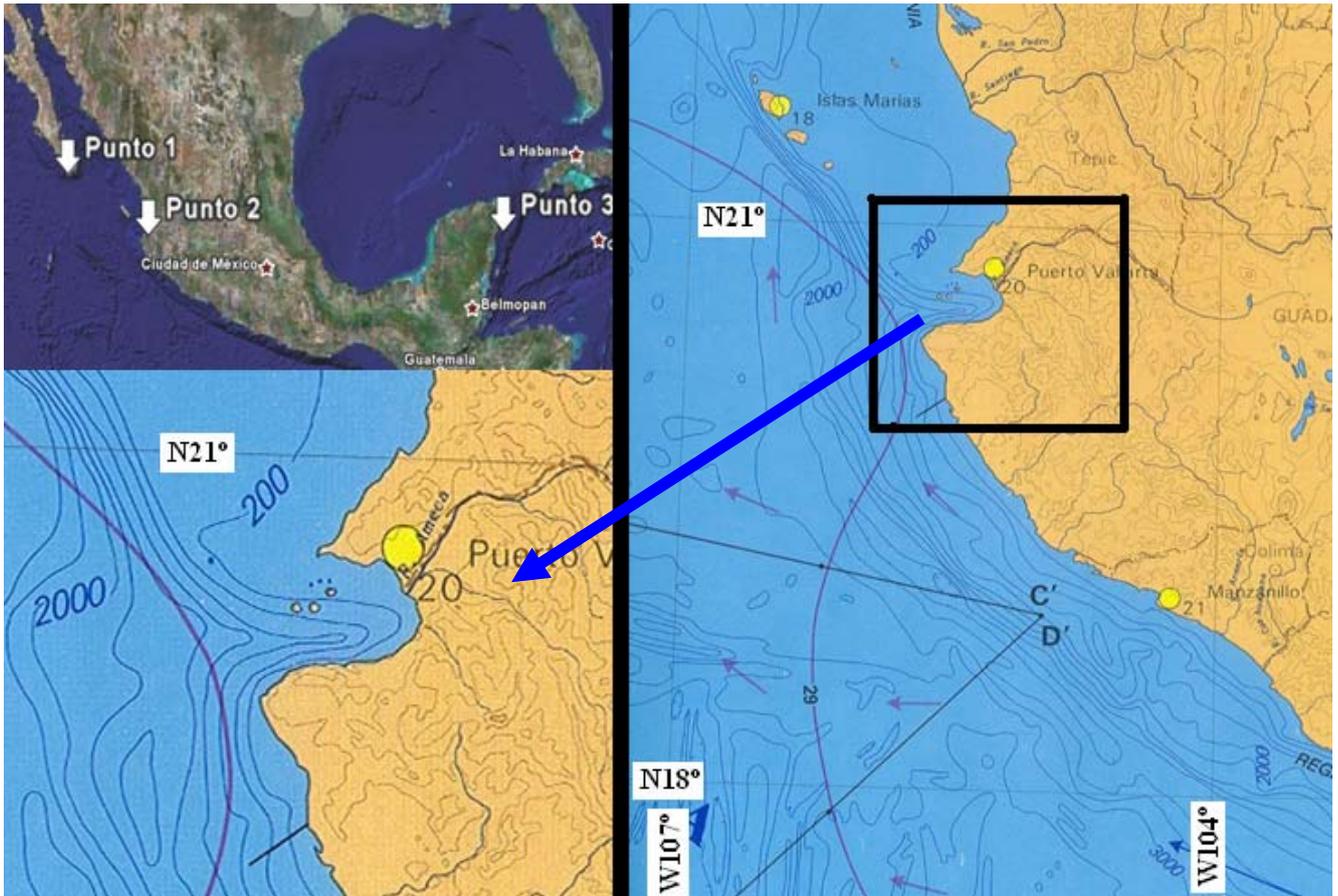


Figura 5.7 Análisis del lugar propuesto (punto 2) para la planta OTEC en las costas mexicanas referido a la batimetría [21 y 33].

### Temperatura

En la bahía de Banderas se tiene una temperatura superficial promedio al año de 26°C, la termoclina que se muestra en la fig. 5.8 indica una temperatura superficial muy favorable la posible instalación de una planta.

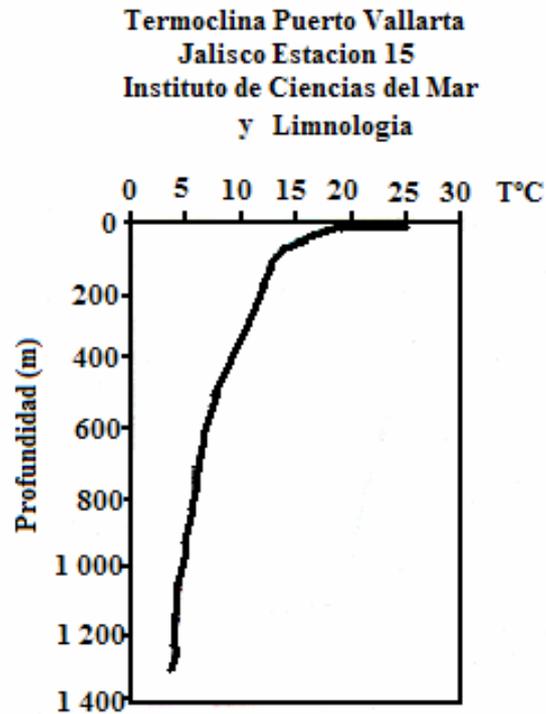


Figura 5.8 Termoclina de la bahía de Banderas <sup>[6]</sup>.

### Población cercana

Puerto Vallarta es una gran zona hotelera por lo cual, la OTEC, con su subproducto de aire acondicionado obtenido del agua fría de las profundidades del mar, podría alimentar a la ciudad de energía y aire acondicionado.



Figura 5.9 Ciudad cercana (Punto 2) y lugares en donde se propone la instalación de un planta OTEC con base en tierra <sup>[21]</sup>.

### 5.4.3 Sitio 3

El sitio 3 se localiza en el este de la isla de Cozumel Quintana Roo (20°17'N, 86°57'W).

#### Batimetría.

Los 1 000 m de profundidad se alcanzan aproximadamente a los 3 km de la costa y los 700 m a aproximadamente 2 km.

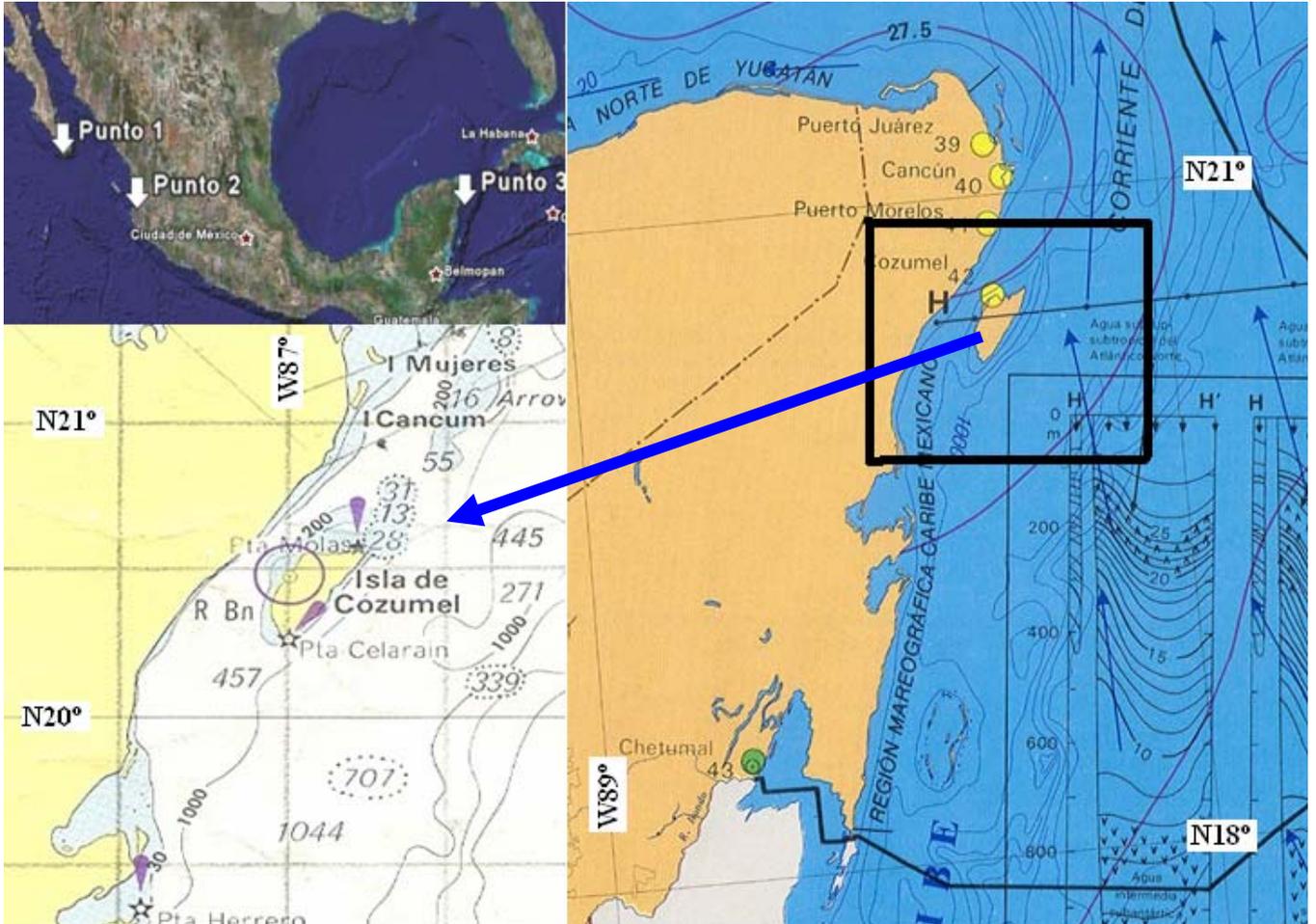


Figura 5.10 Análisis del lugar propuesto (punto 3) para la planta OTEC en las costas mexicanas referido a la batimetría <sup>[21 y 31]</sup>.

#### Temperatura

La temperatura promedio de las costas de la isla de Cozumel es de aproximadamente 27°C, la ventaja del mar Caribe son sus aguas calidas que producen un buen gradiente de temperatura, la termoclina se muestra en la fig.5.11.

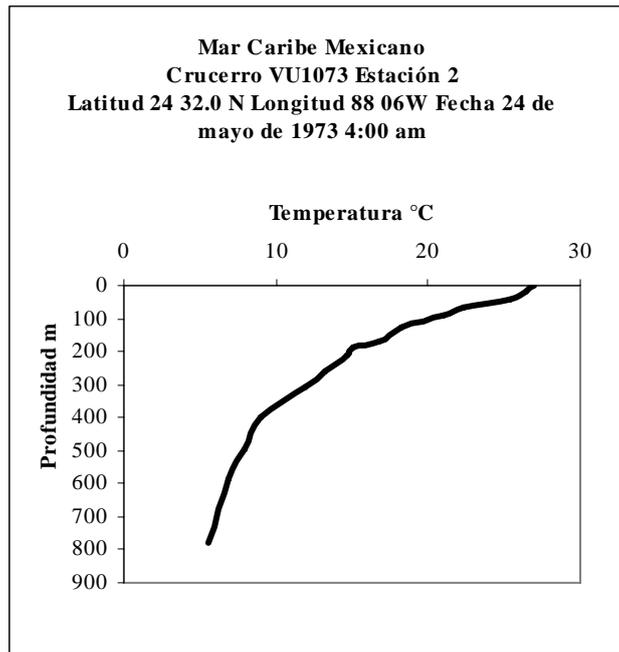


Figura 5.11 Termoclina del mar Caribe frente a isla Mujeres\* .

### Población cercana

La población más cercana al punto 3 es Cozumel, pero esta planta podría alimentar de energía a playa del Carmen Quintana Roo y de otros productos secundarios, ya que la distancia es considerablemente corta para la transportación de estos productos.

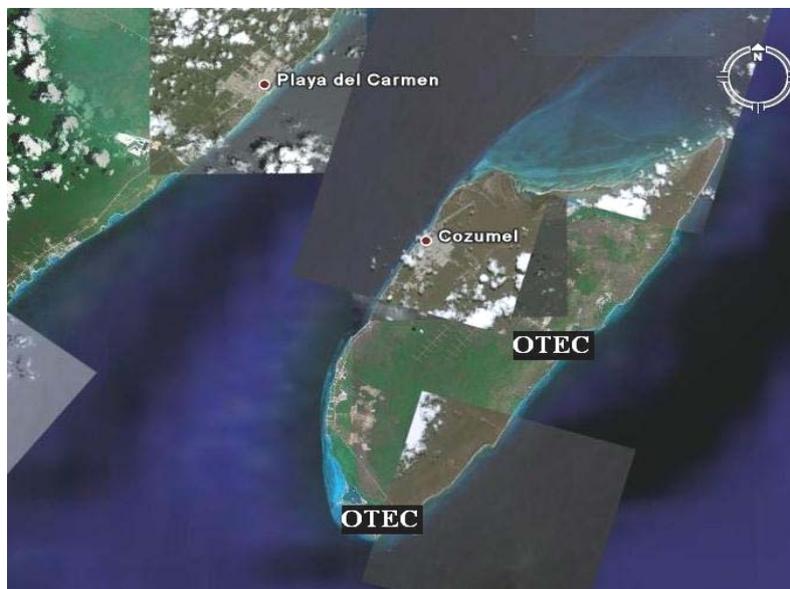


Figura 5.12 Ciudad cercana (Punto 3) y lugares en donde se propone la instalación de un aplanta OTEC con base en tierra<sup>[21]</sup>.

\* Los datos fueron tomados por el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología en el mar Caribe frente a isla Mujeres a bordo del Crucero vu1073 latitud 24°32' longitud 88°06'W fecha 24 mayo 1973 hora 4:00 hora local, con el equipo cala de botellas Cansen.

## 5.5 Porque podría ser viable una OTEC con varios subproductos

En estos momentos la OTEC no es una viable generadora de energía debido a muchos factores antes mencionados, pero si se obtuvieran mas productos en la OTEC, aparte de la energía, está empezaría a competir con las plantas de uso común utilizadas hoy en día. La desalinización es un producto que OTEC puede obtener como subproducto, pero existen varias formas para obtener el agua destilada del agua de mar, como; la MED, Osmosis inversa y evaporación Flash. La OTEC como se sabe ocupa la evaporación flash aunque no es la mas eficiente, debido a su bajo porcentaje de agua destilada que se obtiene al realizar la disminución de presión. Ahora analizando la OTEC por el gradiente de temperaturas hay un método que ocupa también agua de mar como agua de alimentación para el evaporador y el condensador, el método de generación de vapor destilado por ventilas hidrotermales utiliza el agua que sale de estas a altas temperaturas como fuente de calor, y esta puede estar a unas profundidades de 300 m y con una temperatura de 200 °C <sup>[10]</sup>, lo malo de las ventilas hidrotermales es que son producto de la naturaleza y no se tiene una seguridad de cuanto tiempo tienen de vida.

Por lo cual al revisar las diferentes formas de desalar agua y generar energía, la ventaja que una planta OTEC tiene sobre el resto es que al extraer agua de mar fría de las profundidades es un recurso que los demás métodos mencionados no tienen, ya que esta agua después de haber sido ocupada en la planta OTEC puede servir como fuente de alimentación para los subproductos OTEC, como los mencionados anteriormente.

Las costas mexicanas donde se podría ocupar el agua fría como sistema de refrigeración son las que presentan un batimetría de 1 000 m cerca de la costa, y en cada unos de los diferentes puntos de los mares mexicanos que tienen estas características se podría realizar estudios socioeconómicos para determinar que tan rentable seria utilizar estos subproductos, Los precios de operación de una planta OTEC disminuirán con todos estos subproductos.

## VI. CONCLUSIONES

### GENERAL

#### Actualidad

- Las plantas OTEC aun no son competitivas (aunque en un futuro a mediano plazo lo serán) para la generación de energía eléctrica. Aunque por sus productos secundarios si son competitivos.
- Los elementos de estas plantas que necesitan ser perfeccionados para abatir costos y aumentar la efectividad son; los intercambiadores de calor y la tubería al punto profundo.

#### Factibilidad

- La factibilidad de la OTEC va de la mano con los beneficios extras que se pueden obtener del agua fría de las profundidades.
- En algunos pocos años este tipo de sistemas de energía renovable y desalación será rentable debido al aumento de los precios en los hidrocarburos y el agua dulce.

### APLICACIONES EN MÉXICO

#### Ciclos

- El mejor ciclo para las costas mexicanas es el ciclo abierto ya que se genera agua desalinizada como producto secundario que es muy importante.

#### Tipo de planta

- Las plantas con base en tierra, son las más factibles en las costas mexicanas, las plantas montadas en plataformas o barcos son vulnerables a los huracanes que son frecuentes en los mares mexicanos.

#### Lugares

- Unos de los sitios que pueden ser adecuados en las costas mexicanas para la instalación de este tipo de dispositivo y que se presentan en esta tesis son:
  - En el sur de la península de Baja California en Bahía de San Lucas (22°52'N, 109°54'W).
  - En las costas de Puerto Vallarta Jalisco en Bahía de Banderas (20°34'N, 105°14'W).

- En el este de la isla de Cozumel Quintana Roo ( $20^{\circ}17'N$ ,  $86^{\circ}57'W$ ).

Siguiente paso

- Un estudio más preciso de los lugares propuestos.
- Instalación de una planta experimental OTEC en las costas mexicanas.

## VII. REFERENCIAS

1. Commission of the European community, mai 2004. COM (2004) 366 final.
2. Emilsson I. Elementos de oceanografía física. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. UNAM. Notas de clase (no publicadas).
3. E Hay, Nisymco Inc, 1992. Design for a Modest Cost Small OTEC plant using Fully Welded Aluminium Heat Exchangers. Montreal Canada.
4. Fernández Díez, Pedro. Energía Maremotriz. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética. Universidad de Cantabria España.
5. G. Claude, 1930. Power from the tropical seas. Mechanical Engineering, 52.
6. Guadalupe de la Lanza Espino, 1991. Oceanografía de mares mexicanos. Compilación AGT Editor S.A.
7. Instituto de ciencias del mar y limnología ICMYL UNAM, 2007. Miguel Angel Alatorre, Investigador.
8. Instituto de Ingeniería, UNAM, 2006 proyecto IMPULSA “Desalación de agua de mar con energías renovables”.
9. Jim Wenzel and al., revu en décembre 2003. 2002 Survey : Ocean Energy Commercialization. Etude réalisée pour Practical Ocean Energy Management System, Inc.
10. Keith A. Sverdrup, Alyn C. Duxbury, Alison B. Duxbury, 2005. An Intoduction to “The world’s Oceans”, eighth edition.
11. Kenneth Wark, Donald E. Richards, 2001. Termodinámica, sexta edición. Mc Graw Hill.
12. Luis Vega, hiver 2001. Ocean Thermal Energy Conversion OTEC (III). Article IOA Newsleter, Vol 12, N°4.
13. Noriega Giral, 2006. Plantas Termoeléctricas. Facultad de Ingeniería. UNAM. Notas de clase (no publicadas).
14. Philippe Marchand, 1984. L Energie Thermique des Mers. Réf. : EUR 9895 FR Rapport rédigé pour la CCE
15. Quetel y Christian Souchon, 2004. Libro “Energía”. Universidad de Valencia España. Richard.
16. S. M. Smith, 1996. Hynpsometry of Ocean Basin Provinces. Journal of Geophysical Research, 771(18): 4305-25

17. Secretaría de Energía SENER. Fuentes renovables de energía “Hacia una Estrategia Mexicana para el Desarrollo Sustentable en un Mundo en Transición” noviembre 2006 México.
18. Thomas H. Daniel, 1999 NELHA Scientific/Technical Director. A Brief History of OTEC Research at NELHA.
19. W.L. Owens and L.C. Trimble, 1980. Mini-OTEC operational results, 7th Ocean Energy Conference, Washington D.C.
20. William H. Avery (post. sept. 2003). The influence of recent low interest rates on the estimated prices of OTEC fuels. John Hopkins University

## **INTERNET**

21. Google Heart 2007. <http://www.google.com/>
22. IOA, International OTEC/DOWA Association. <http://ioa.erl.itri.org.tw/> (indisponible mai 2004)
23. IOES, Institute of Ocean Energy, Saga University, Japon. <http://133.49.118.31/english/ioes/>
24. NELHA, Natural Energy Laboratory of Hawaii Authority, USA. <http://www.nelha.org/>
25. NIOT, National Institute of Ocean Technology, Inde. <http://www.niot.res.in/>
26. NREL, National Renewable Energy Laboratory, USA. <http://www.nrel.gov/>
27. IOES, Institute of Ocean Energy, Saga University, Japon. <http://133.49.118.31/english/ioes/>
28. PITCHR, Pacific International Center for High Technology Research, USA. <http://www.pichtr.org/>
29. SSP, Sea Solar Power, International, USA. <http://www.seasolarpower.com/>
30. Xenosys Inc. <http://www.xenosys.com/>

## **Cartas Náuticas**

31. Defense Mapping Agency. North Atlactic Ocean, West Indies. Estados Unidos, 1980.

32. Secretaria de Marina Mexicana, Dirección General de Investigación y Desarrollo. Costa Oeste. Punta San Pablo a Mazatlán y parte sur del Golfo de Baja California. México 1992.
33. Secretaria de Marina Mexicana. Dirección General de Oceanografía Naval. Costa Oeste. Puerto Vallarta. México 1976.

## **Mapas**

34. Instituto de Geografía de la UNAM. Oceanografía Física 1. Masas de agua y mareas de los mares Mexicanos. Abril de 1992.