



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
ENERGÍA- PROCESOS Y USO EFICIENTE DE ENERGÍA

ESTUDIO TÉCNICO Y ECONÓMICO DE UNA PLANTA OTEC Y SUS USOS  
SECUNDARIOS EN MÉXICO

TESIS QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
MARISELA BERNAL FRANCISCO

TUTOR PRINCIPAL  
HÉCTOR MIGUEL AVIÑA JIMÉNEZ, INSTITUTO DE INGENIERÍA

MÉXICO, D.F. NOVIEMBRE 2016



**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Reinking Cejudo Arturo Guillermo

Secretario: Dr. Alatorre Mendieta Miguel A.

Vocal: Dr. Aviña Jiménez Héctor Miguel

1<sup>er</sup>. Suplente: Dr. Álvarez Watkins Pablo

2<sup>d o</sup>. Suplente: M. en I. Rodiles Amaro Fabiola

Ciudad Universitaria, Ciudad de México

**TUTOR DE TESIS:**

Dr. Aviña Jiménez Héctor Miguel

-----  
**FIRMA**









## Agradecimientos

---



## Dedicatoria

---



# Contenido

---

Agradecimientos .....	i
Dedicatoria.....	ii
Contenido .....	iii
Lista de figuras .....	vi
Lista de tablas .....	vii
Nomenclatura .....	viii
Unidades .....	x
Siglas .....	xi
Resumen .....	xiii
Abstract.....	xiv
Objetivos .....	xv
Objetivos Generales.....	xv
Objetivos Específicos .....	xv
Introducción .....	xvii
1. Estado del Arte .....	1
Introducción.....	1
1.1 Aprovechamiento de energía del océano .....	1
1.1.1 Mareas.....	2
1.1.2 Corrientes Marinas .....	3
1.1.3 Olas .....	4
1.1.4 Gradiente Salino .....	6
1.1.5 Gradiente térmico .....	7
1.2 Plantas OTEC .....	7
1.2.1 Tipos de ciclo OTEC. ....	8
1.2.2 Historia de la OTEC.....	12
1.2.3 Impacto ambiental.....	16
1.3 Usos secundarios de plantas OTEC.....	16
1.3.1 Aire acondicionado .....	17
1.3.2 Agua para consumo humano.....	18
1.3.3 Agricultura .....	18



1.3.4 Piscicultura.....	18
1.4 Factores a considerar para la instalación de una planta OTEC .....	19
1.4.1 Oceanográficas.....	19
1.4.2 Sociales y políticas.....	21
1.4.3 Económicas .....	21
Conclusión .....	22
2. Aspectos de ingeniería básica de las plantas OTEC .....	23
Introducción.....	23
2.1 Descripción termodinámica de los ciclos OTEC .....	23
2.1.1 Ciclo Abierto .....	23
2.1.2 Ciclo cerrado .....	24
2.1.3 Ciclo híbrido.....	25
2.2 Variación del fluido de trabajo .....	25
2.3 Comparación de eficiencia entre ciclos .....	30
2.3.1 Ciclo Abierto .....	30
2.3.2 Ciclo Cerrado .....	33
2.3.3 Ciclo Híbrido .....	35
2.4 Limitaciones técnicas.....	38
Conclusión .....	39
3. Análisis económico de una planta OTEC de 1MWe de ciclo abierto.....	40
Introducción.....	40
3.1 Metodología de la evaluación.....	40
3.1.1 Descripción técnica de la planta OTEC .....	40
3.1.2 Conceptos de evaluación financiera.....	43
3.2 Evaluación financiera .....	50
3.2.1 Flujo de caja.....	52
3.2.2. Tasa de riesgo .....	54
3.2.3 Resultados .....	55
3.3 Aspectos sociales .....	62
3.3.1 Generación eléctrica.....	63
3.3.2 Agua desalinizada .....	63



3.3.3 Aire Acondicionado .....	64
3.3.4 Certificados de energía limpia .....	64
Conclusión .....	65
4. Sustentabilidad y logística de las plantas OTEC.....	66
Introducción.....	66
4.1 Sustentabilidad .....	66
4.1.1 Panorama de la responsabilidad ambiental de México .....	69
4.2 Plataforma logística .....	71
4.3 Normas Ambientales aplicables al proyecto .....	73
Conclusión .....	75
5. Conclusiones y trabajo a futuro.....	76
Referencias .....	77
Portales y documentos de interés .....	82
I. Anexo de análisis térmico.....	83
II. Anexo de Análisis financiero.....	87



## Lista de figuras

---

Figura 1.1 Planta Mareomotriz en La Rance, Francia (Stock Footage. 2013) .....	2
Figura 1.2 Corrientes marinas superficiales. Azul: Corrientes frías, Rojas: Corriente cálida (Vista Al Mar, 2014) .....	3
Figura 1.3 dispositivo para aprovechar las corrientes marinas (Schirber M. 2008) .....	4
Figura 1.4 Dispositivos Pelamis, instalados en Portugal (TextosCientificos.com. 2009) .....	5
Figura 1.5 Principio de funcionamiento de planta de ósmosis (Sánchez Granado A. 2009) .....	6
Figura 1.6 Termoclina en distintas latitudes (Curso geografía del mar. 2010) .....	7
Figura 1.7 Diferencia de temperatura entre la superficie y 1000 [m] de profundidad (LATin. NE).....	8
Figura 1.8 Ciclo OTEC abierto (Grupo iiDEA. 2016).....	9
Figura 1.9 Ciclo OTEC cerrado (Grupo iiDEA. 2016).....	10
Figura 1.10 Ciclo híbrido de plantas OTEC (Grupo iiDEA. 2016) .....	11
Figura 1.11 Configuración de una planta en fuera de la costa (Subsea world news. 2015) .....	12
Figura 1.12 Planta min-OTEC (Vega, L.A. 1999) .....	13
Figura 1.13 Ciclo Uehara (Puyuelo, A., Ramos, C., Recio, A., Rodríguez, A. & Rodríguez, D. NE) .....	14
Figura 1.14 Usos secundarios de planta OTEC (OTEC Foundation. NE) .....	17
Figura 1.15 Ubicación geográfica de posibles localizaciones de plantas OTEC en México.....	20
Figura 2.1 Diagrama T-s del ciclo abierto de la plantas Mini-OTEC (Aviña, H. 2007).....	24
Figura 2.2 Diagrama T-s de un ciclo cerrado con fluido de trabajo amoniaco, de la planta Sagar Shakti (Aviña, H. 2007).....	24
Figura 2.3 Estados del ciclo abierto (Grupo iiDEA. 2016) .....	31
Figura 2.4 Estados del ciclo cerrado (Grupo iiDEA. 2016).....	33
Figura 2.5 Estados del ciclo Híbrido (Grupo iiDEA. 2016) .....	35
Figura 3.1 Polígono de áreas Naturales protegidas en la isla de Cozumel (Diario Oficial de la Federación. 2012) .....	41
Figura 3.2 Porcentaje de impuestos a pagar según porcentaje de apalancamiento (Rodiles, F. 2014) 43	
Figura 3.3 Obtención de Indicadores financieros. ....	51
Figura 3.4 VPN en los distintos escenarios. ....	58
Figura 3.5 VPN y TIR de planta OTEC y usos secundarios. ....	59
Figura 3.6 Distribución de costos de inversión de planta OTEC y usos secundarios .....	61
Figura 3.7 Distribución de gastos operativos y de administración de planta OTEC y usos secundarios ..	62
Figura 3.8 Distribución de ingresos por ventas de electricidad de planta OTEC y usos secundarios .....	62
Figura 4.1 Zona de sustentabilidad (Bio:Connection. 2013) .....	66
Figura 4.2 Evolución de generación por tecnologías convencionales y limpias (SENER. 2014).....	69
Figura 4.3 Acciones relacionadas al desarrollo sustentable en México.....	70
Figura 4.4 Proceso Logístico de plantas OTEC. ....	72
Figura 4.5 Multifuncionalidad de plantas OTEC (International Renewable Energy Agency. 2014) .....	73
Figura I.1 Diagrama de Moody.....	83



## Lista de tablas

Tabla 1-1 Comparación de costo de operación según el tipo de planta (Noriega. 2006) .....	21
Tabla 2-1 Clasificación de seguridad de los refrigerantes .....	26
Tabla 2-2 Propiedades de fluidos de trabajo (Air Liquide. NE, Infra Air Products. 1999, Linde. 2016, Engineering toolbox. NE, Greenhouse Gas Protocol. 2007, Yañez, G. 2015, Varios. 2016, Gas Servei, S.A. NE) .....	27
Tabla 2-3 Ponderación de las características a evaluar, sugeridas por el autor. ....	28
Tabla 2-4 Características de refrigerantes a evaluar. ....	28
Tabla 2-5 Ponderaciones de las características .....	29
Tabla 2-6 Matriz de decisión .....	29
Tabla 2-7 Datos para el cálculo de estados de los ciclos. ....	30
Tabla 2-8 Comparación de eficiencias de los ciclos OTEC .....	38
Tabla 3-1 Distribución de costos de inversión para plantas de 1 MWe. ....	41
Tabla 3-2 Calendario de inversiones.....	42
Tabla 3-3 Tasas de interés e inflación (Banco de México. 2016).....	43
Tabla 3-4 Algoritmo para calcular el flujo de caja .....	46
Tabla 3-5 Costos de referencia para plantas OTEC (Comisión Federal de Electricidad. 2014).....	46
Tabla 3-6 Costo de porteo para energías renovables (CRE. 2015) .....	47
Tabla 3-7 Características y costos de operación.....	51
Tabla 3-8 Flujo de caja sin financiamiento .....	53
Tabla 3-9 Flujo de caja con 50% de financiamiento .....	53
Tabla 3-10 Flujo de caja con 50% de financiamiento y usos secundarios .....	53
Tabla 3-11 Costos e ingresos de comercialización de agua potable.....	54
Tabla 3-12 Costos e ingresos de comercialización del aire acondicionado (Zavala, 2016). ....	54
Tabla 3-13 Calculo de $\beta$ para el proyecto (Reuters. 2016).....	54
Tabla 3-14 Resumen de Análisis financiero en distintos escenarios .....	55
Tabla 3-15 Indicadores financieros con costos de inversión variables.....	56
Tabla 3-16 Indicadores financieros con porcentaje de financiamiento variables .....	57
Tabla 3-17 Indicadores financieros con precio de electricidad variables.....	57
Tabla 3-18 Indicadores financieros con costos de operación y mantenimiento variables.....	58
Tabla 3-19 TIR de los distintos escenarios.....	60
Tabla 3-20 Costos de inversión de planta OTEC y usos secundarios .....	60
Tabla 3-21 Gastos operativos y de administración de planta OTEC y usos secundarios .....	61
Tabla 3-22 Ingresos por ventas de electricidad y usos secundarios, así como CEL's .....	61
Tabla 3-23 Población beneficiada por suministro de electricidad de planta OTEC.....	63
Tabla 3-24 Población Beneficiada con agua desalinizada por una planta OTEC (Vega. L.A. 1992) .....	63
Tabla 3-25 Resumen de beneficios de aire acondicionado (Vega. L.A. 1992) .....	64
Tabla I-1 Estados del ciclo abierto .....	84
Tabla I-2 Estados del ciclo cerrado .....	85
Tabla I-3 Estados del ciclo híbrido .....	86
Tabla II-1 Cálculo del rendimiento promedio del mercado y libre de riesgo. ....	87
Tabla II-2 Cálculo del Costo Promedio Ponderado de Capital. ....	87
Tabla II-3 Cálculo del Promedio ponderado del costo de capital propio.....	88



## Nomenclatura

---

~	Aproximadamente
pH	Potencial de Hidrógeno
T	Temperatura
P	Presión
l	Líquido
v	Vapor
$\Delta$	Delta
R	Refrigerante
k	Kilo
B	Be
$p_v$	Presión de saturación
W	Trabajo
Q	Calor
$\Delta H_{lg}$	Cambio de entalpía por cambio de fase
$\Delta T$	Cambio de temperatura
M	Peso molecular
h	Coefficiente de transferencia de calor por convección
k	Conductividad térmica
$\rho$	Densidad
$\theta$	Diámetro de la tubería
$\mu$	Viscosidad dinámica
$W_{TR}$	Trabajo real de la turbina
$\eta$	Eficiencia
$\dot{m}$	Flujo másico
h	Entalpía
$W_{BR}$	Trabajo real de la bomba
g	Gravedad
Q	Caudal másico
H	Carga de la bomba
$h_f$	Disipación de energía por fricción
z	Altura
$\gamma$	Peso específico
v	Velocidad
f	Coefficiente de fricción
L	Longitud de tubería
K	Coefficiente empírico de caída de presión en accesorios
Re	Número de Reynolds
$\epsilon r$	Rugosidad relativa
$\epsilon$	Coefficiente de rugosidad del material
$Q_C$	Calor del condensado
$Q_{AF}$	Calor del agua de enfriamiento
$Q_{EF}$	Calor del evaporador flash
$B_t$	Beneficios totales en el año t



$C_t$	Costos totales en el año t
$n$	Número de años del horizonte de la evaluación
$i$	Tasa de descuento
$t$	Año "t"
$I_0$	Inversión inicial
$\beta$	Apalancamiento financiero
$Cov$	Covarianza entre activos y el mercado
$R_i$	Rendimiento del activo
$R_m$	Rendimiento del mercado
$\sigma^2$	Varianza del mercado
$\beta_1$	Beta desapalancada
$\beta_2$	Beta apalancada
$\frac{D}{E}$	Relación deuda capital
$R_F$	Tasa sin riesgo
$\%CP$	Porcentaje del capital propio
$i_D$	Tasa de interés de la deuda
$\%D$	Porcentaje de la deuda
$i_{TIE*}$	Tasa de interés interbancaria con sobretasa
$i_{Infl}$	Tasa de inflación



## Unidades

\$	Pesos
USD\$	Dólares
kWe	Kilowatt eléctrico
MWe	Megawatt eléctrico
°C	Grados Celsius
K	Grado Kelvin
l	Litros
s	Segundos
ups	Unidades prácticas de salinidad
Bar	Bares
Pa	Pascales
%	Por ciento
m	Metro
s	Segundo
gr	Gramo
TR	Toneladas de refrigeración
ppm	Partes por millón
min	Minuto
kg	Kilogramo
We	Watt eléctricos
Wn	Watts netos
Wb	Watts brutos
W/mK	Watt por metro kelvin
kg/m <sup>3</sup>	Kilogramo por metro cúbico
Pa·s	Pascal por segundo
kg/s	Kilogramo por segundo
kJ/kg	Kilojoules por kilogramo
l/s	Litros por segundo
m <sup>3</sup> /s	Metro cúbico por segundo
m <sup>3</sup> /día	Metro cúbico por día
m <sup>3</sup> /min	Metro cúbico por minuto
kJ/kgK	Kilojoule por kilogramo Kelvin
g/mol	Gramo por mol
\$/kg	Pesos por kilogramo
m/s <sup>2</sup>	Metro por segundo cuadrado
kg/m <sup>2</sup> s <sup>2</sup>	Kilogramo por metro cuadrado segundo cuadrado
Wh	Watt·hora
\$/MW·año	Peso por Megawatt·año
\$/kWh	Peso por kilowatt·hora
mg/l	Miligramo por litro
\$/m <sup>3</sup>	Peso por metro cúbico
TonRef	Tonelada de Refrigeración
TonCO <sub>2</sub>	Tonelada de Dióxido de Carbono
\$/año	Peso al año



## Siglas

OTEC	Ocean Thermal Energy Conversion
NELHA	Natural Energy Laboratory oh Hawaii Authority
NIOT	National Institute of Ocean
OCEES	Ohio Center for Ecology & Evolutionary Studies
TISEC	Tidal is Stream Energy Conversion
WEC	Wave Energy Conversion
SIDS	Small Islands Developing States
a.C.	Antes de Cristo
GWP	Global Warming Potential
VPN	Valor Presente Neto
TIIE	Tasa Interna Interbancaria
TIR	Tasa Interna de Retorno
PRD	Periodo de Recuperación Descontado
ISR	Impuesto Sobre la Renta
LISR	Ley de Impuesto Sobre la Renta
PTU	Participación de los Trabajadores en las Utilidades
SAT	Servicios de Administración Tributaria
CAPM	Capital Asset Price Model
CETES	Certificados de la Tesorería
WACC	Weighted Average Capital Cost
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CEL	Certificados de Energía Limpia
GEI	Gases Efecto Invernadero
PRODESEN	Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional
PEMEX	Petróleos Mexicanos
ONU	Organización de las Naciones Unidas
OPEP	Organización de los Países Exportadores de Petróleo
COP	Conferencia de la Partes
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
NOM	Norma Oficial Mexicana
EIA	Estudio de Impacto Ambiental
LGEEPA	Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente
REIA	Reglamento de Estudio de Impacto Ambiental
RLGEEPA	Reglamento de Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente
ISO	International Organization for Standardization





## Resumen

---

Se realizó un estudio de una planta de generación eléctrica de 1 MWen que utiliza el gradiente térmico del océano (Plantas OTEC), se consideraron aspectos de ingeniería básica y aspectos económicos para evaluar si la implementación del proyecto es viable.

Se hizo una revisión del estado del arte de las plantas OTEC en el mundo y de los usos secundarios que se le puede dar a este tipo de plantas como pueden ser: sistemas de aire acondicionado, piscicultura, agricultura. Se describieron las características oceanográficas necesarias para su instalación y se indicaron los lugares en México dónde es viable su instalación: Bahía de Banderas, Cabo Corrientes, Los Cabos, Puerto Ángel, Costa de Michoacán y Cozumel.

Las plantas OTEC operan bajo tres diferentes configuraciones: ciclo abierto, cerrado e híbrido. El ciclo abierto ocupa como fluido de trabajo el agua de mar, mientras que el cerrado e híbrido ocupan como fluido de trabajo un fluido orgánico, para elegir el fluido orgánico que más conviene usar se realizó una matriz de decisiones, el fluido que más conviene utilizar es el propano. Una vez elegido el fluido de trabajo para cada uno de los ciclos, se calcularon los 3 ciclos para conocer su eficiencia y el total de agua desalinizada que ofrecerán para analizar económicamente el que más convenga.

Se eligió el ciclo abierto para analizarlo económicamente. Primero se hizo un análisis financiero, dónde se obtuvieron indicadores de rentabilidad del proyecto como valor presente neto, tasa interna de retorno y periodo de recuperación descontado, se consideraron diversos escenarios para el cálculo de los indicadores, los cuales dicen que el esquema que más conviene es contar con financiamiento y comercializar los usos secundarios.

Se mencionan aspectos de sustentabilidad que aplican en proyectos de generación eléctrica con energías renovables y de logística puesto que al producir diversos productos se buscaría que se comercialicen en tiempo y forma para darle un valor agregado a cada uno de los productos.



## Abstract

---

A study of a 1 MW OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion) power plant is discussed, covering areas related to Basic Engineering Design (BED) and Cost Engineering, estimating the conditions in which the implementation of the project is feasible.

A review of the state of the art of OTEC plants along with their secondary uses was conducted, including air conditioning systems, aquaculture and agriculture. Required oceanographic features for installation are described, indicating the places where its installation is viable: Bahía Banderas, Cabo Corrientes, Los Cabos, Puerto Ángel, pacific coastline of Michoacán and Cozumel.

OTEC plants operate under three different configurations: open, closed and hybrid cycle. The open cycle uses seawater as working fluid, while closed and hybrid cycles use an organic fluid. Using a decision matrix propane was selected as the best organic working fluid for the closed and hybrid cycles. Additionally, an energetic analysis of the three cycles was performed, focusing on their efficiency and recovery rate of desalinated water.

Based on the aforementioned technical analysis, an economic analysis of the open cycle was executed, starting with a financial analysis, including the evaluation of its profitability, net present value, internal rate of return and payback period. Various scenarios for the calculations of these indicators were considered, showing that financing the project and marketing the secondary uses is the best scheme.

Finally, given the nature of the generated products and their added value when they are marketed in a timely manner, sustainability aspects applied to the implementation of power generation with renewable energies, along with logistics and commercialization are covered.



# Objetivos

---

## Objetivos Generales

En este trabajo de tesis se pretenden analizar las ventajas que ofrece implementar los usos secundarios de las plantas OTEC.

El análisis será de tipo costo-beneficio para demostrar la rentabilidad que se puede llegar a tener con estas plantas y así, promover su uso y demostrar a posibles inversionistas ya sea del sector público o privado que son proyectos en los que vale la pena invertir puesto que además fomentan el desarrollo tecnológico.

## Objetivos Específicos

Se desglosarán los distintos aspectos que hay que analizar para demostrar la rentabilidad de la planta.

- Identificar la mejor posición geográfica para la construcción de una planta OTEC
- Se determinará el arreglo termodinámico que ofrezca la eficiencia más alta y el que conviene más comercializar.
- Demostrar la viabilidad económica planteando diversos escenarios de inversión y condiciones del mercado.
- Considerar algunos aspectos sustentables y de logística.
- Hacer notar la autosustentabilidad que estas plantas ofrecen.



Estudio técnico y económico de una planta OTEC y sus usos secundarios en México.





## Introducción

---

El crecimiento poblacional demanda una mayor cantidad de recursos: hídricos, alimenticios, energéticos, aire limpio, seguridad, justicia social; los dirigentes deben ocuparse por tener un abastecimiento seguro de estos recursos con la finalidad de conservar un nivel de vida adecuado.

El medio ambiente ha estado experimentando cambios drásticos que afectan al hombre en diferentes aspectos. Los cambios en la composición de la atmósfera, la contaminación de los suelos, la sobreexplotación de agua y combustibles fósiles han traído riesgos en cuanto a salud, situación económica, seguridad de vivienda y alimenticia.

El uso de energías renovables como son: la energía eólica, solar, biocombustibles, geotérmica, del océano, hidráulica, son un punto clave para disminuir las emisiones de gases efecto invernadero que hoy en día crecen de una manera acelerada. Se siguen investigando los diversos modos de poder aprovechar estas energías, innovando tecnologías, mejorando las ya existentes, se busca incrementar el uso de estas tecnologías para diversificar la matriz energética de los países y mejorar la calidad de vida de los habitantes.

Considerando que se tienen 361.2 millones de km<sup>2</sup> de superficie cubierta por mar, que equivale al 71% (Vyawahare, M.. 2015) de la superficie terrestre, la cual se encuentra en constante movimiento y recibe radiación solar en diferentes cantidades según la latitud, es una gran masa de energía que podría mover mecanismos acoplados a algún tipo de generador eléctrico.

En la actualidad existen muchas formas probadas de obtener energía eléctrica a partir de la energía del océano, sin embargo en México aún no se cuenta con ninguna planta que aplique estas tecnologías.

Este trabajo se enfocara en tratar de promover el uso del gradiente térmico del océano, ya sea para términos de estudio o comercialización, puesto que se puede aprovechar la vasta área de costa que tiene el territorio mexicano.

Las plantas OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion) son tecnología probada desde 1930 y no se le ha dado el impulso debido a su comercialización e investigación por una falta de interés en cambiar la tecnología para generar electricidad en carga base. Además del reto que implica el cambio de educación en cuanto a energía, de las costumbres y de dejar desarrollar nuevas tecnologías que no dependan del petróleo.

Dentro de los objetivos de la Estrategia Nacional de Energía están la diversificación de fuentes de energía, este proyecto abriría un nuevo rubro en la matriz energética, es una tecnología que reduce el impacto ambiental, provee seguridad energética y sustentabilidad ambiental. Y es una energía predecible y estable, lo que permite su uso continuo.





# 1. Estado del Arte

---

## Introducción

La energía que posee el océano se debe a factores como la atracción gravitacional del sol y la luna y la radiación solar que recibe La Tierra. La forma en que es recibida la radiación y la atmosfera que la acompaña crea fenómenos meteorológicos en el planeta que mantienen un equilibrio termodinámico.

Se recibe la máxima radiación solar en latitudes ecuatoriales y polares, el ozono se concentra en zonas ecuatoriales, evitando que el calor absorbido se escape a la estratosfera, por tanto se mantendrá un ambiente cálido, mientras que en los polos la ausencia de ozono deja que se escape el calor y se tengan ambientes fríos.

Estas mismas temperaturas las adoptarán las masas de agua y aire de cada zona, lo que ocasionara cierta circulación al querer llegar el equilibrio termodinámico, estas circulaciones darán lugar a las corrientes marinas, a los vientos que generan el oleaje y los gradientes térmicos.

En este capítulo se describirá la energía que posee el océano y las diversas formas que existen de aprovechar esta energía para la generación eléctrica, algunos medios son las olas, las mareas, las corrientes, el gradiente salino y el gradiente térmico.

Posteriormente se enfoca en el uso del gradiente térmico oceánico, refiriéndose a su historia, a sus diversas aplicaciones, a las varias configuraciones que se ocupan en los sistemas termodinámicos para su aprovechamiento. También se habla de los usos secundarios que pueden tener estas plantas como sistemas de aire acondicionado, producción de agua fría, implementación de piscicultura e invernaderos.

Finalmente se describen las condiciones geográficas y sociales que hacen factible su instalación.

### 1.1 Aprovechamiento de energía del océano

El océano cubre alrededor del 71% de la superficie terrestre y está dividido en 5 océanos: Atlántico, Pacífico, Índico, Ártico y Antártico. Es una masa que está en constante movimiento y recibiendo energía del sol, es por ello que es conveniente encontrar alguna forma de utilizar el potencial energético que posee este gran cuerpo de agua.

La radiación solar, la rotación de la tierra y la atracción gravitacional entre la tierra y la luna, provocan vientos, corrientes, mareas, oleaje, diferencias de temperatura en masas de agua y en la columna de agua, así como diferencias de salinidad. Cada uno de estos fenómenos se puede aprovechar para la generación eléctrica mediante el uso de diversas tecnologías, a continuación se describirán algunas de estas tecnologías y se dirá en qué lugares del mundo se han instalado estos dispositivos.

### 1.1.1 Mareas

Las mareas se definen como el incremento o decremento del nivel del agua de mar y son provocadas por la fuerza centrífuga de la tierra, por la atracción del sol y la luna, pero principalmente de la luna y del relieve del fondo del mar.

Las mareas tienen 4 etapas:

- El nivel de agua aumenta progresivamente
- El nivel de agua llega a su punto máximo
- El nivel del agua desciende progresivamente
- El nivel de agua llega a su nivel más bajo.

La Bajamar es cuando el nivel del agua de mar llega a su punto más bajo y el Pleamar cuando el nivel del agua de mar llega a su punto más alto.

Al aprovechamiento de las mareas se le conoce como energía mareomotriz o Rise & Fall. Se utiliza la diferencia de altura entre la Bajamar y Pleamar, pero para que sea factible su aprovechamiento se requiere que esta diferencia sea de al menos 5 [m]. Para su uso se construyen grandes diques, de más de 50 [m] de largo, cuando la marea está alta permiten que entre agua al dique a través de unos canales donde se encuentra una turbina, al pasar la corriente hace que se mueva la turbina que está acoplada a un generador, posteriormente cuando baja la marea y sale el agua del dique vuelve a pasar por los canales volviendo a hacer girar la turbina y vuelve a generar electricidad.



Figura 1.1 Planta Mareomotriz en La Rance, Francia (Stock Footage. 2013)

En 1967 se construyó una planta mareomotriz en La Rance, Francia (Figura 1.1), la planta tiene 24 turbinas reversibles de 10 [MW] cada una, teniendo una generación total de 240 [MW], aprovechan diferencias de alturas de 10 a 15 [m], el dique tiene de largo 750 [m] y 30 [m] de alto (Castillo I.. 2014). Se construyeron también plantas en Canadá y Gran Bretaña, que de momento ya no están en funcionamiento. En 2011 se construyó en Sihwa Lake, Corea del Sur que es la planta mareomotriz más grande del mundo, tiene 10 turbinas de 25.4 MW (Subdelmar. 2011).

## 1.1.2 Corrientes Marinas

Las corrientes marinas son grandes masas de agua que circulan a lo largo del planeta debido a la diferencia de temperatura que hay entre el ecuador y los polos y las diferencias de salinidad en distintas regiones marinas, la diferencia de temperatura se debe principalmente al ángulo de incidencia que tiene la radiación solar en el globo terráqueo. Estas corrientes son las responsables de regular la temperatura de la tierra y tienen un gran potencial energético asociado a su velocidad de movimiento y al caudal que poseen (Figura 1.2).

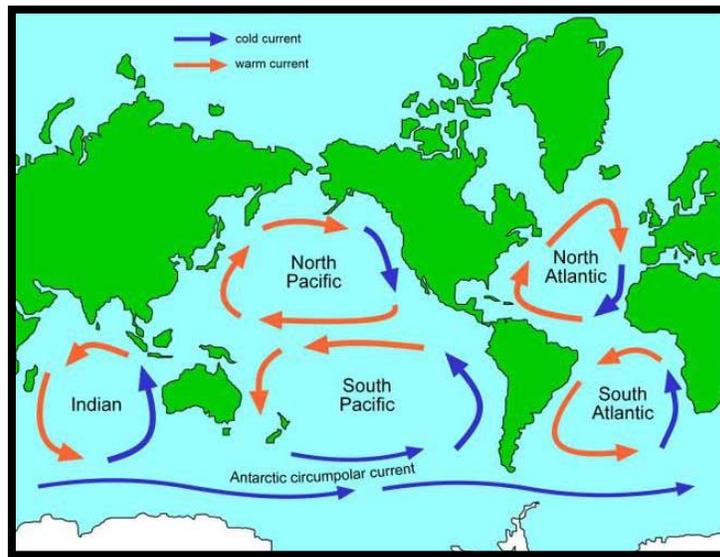


Figura 1.2 Corrientes marinas superficiales. Azul: Corrientes frías, Rojas: Corriente cálida (Vista Al Mar, 2014)

Las corrientes se clasifican en superficiales, profundas, costeras y de mareas. Las corrientes superficiales pueden tener temperaturas cálidas y se encuentran desde los trópicos hasta latitudes bajas, también hay temperaturas frías que se originan en los polos y fluyen hacia el ecuador. Las corrientes profundas son también conocidas como ríos submarinos y están presentes en profundidades de más de 100 [m], el movimiento es generado por la diferencia de temperatura y salinidad. Las corrientes costeras son las que se generan por el viento proveniente de la costa. Por su parte las corrientes de mareas están relacionadas con la Pleamar y Bajamar, puesto que el movimiento ascendente y descendiente repercute al movimiento horizontal, formando este tipo de corrientes.

Al aprovechamiento de las corrientes se les conoce como Conversión de Energía de Corriente de Marea TISEC (Tidal Stream Energy Conversion), se aprovecha la energía cinética contenida en las masas de agua mediante generadores de tipo hélice o paletas sumergidas (Figura 1.3), estos dispositivos pueden tener rotores horizontales o verticales, por tanto los generadores utilizados en este tipo de conversión de energía suelen ser de los más caros, llegando a ser sus costos de instalación y mantenimiento 10 veces más que los instalados en tierra (Grupo de Medio Ambiente y Energía de UPYD. 2009).

Se comenzó a usar esta tecnología en la década de los setentas durante la crisis de petróleo, la instalación se llevo a cabo en canales. Se tienen instalados prototipos de 1 [MW] en países como Irlanda, Escocia y Noruega, las corrientes marinas son fáciles de identificar y si se tienen velocidades entre 1 y 3 [m/s]

se puede considerar factible la instalación de un dispositivo que aproveche esta energía, además las corrientes son predecibles, lo que garantizaría que la selección correcta de estos dispositivos sería bien aprovechada, en México se podrían aprovechar las corrientes de California y la corriente cálida del Golfo de México en el canal de Cozumel (Fernández, J.. NE), sin embargo se complicaría su instalación aún en un futuro lejano porque las corrientes se mueven (Alatorre, 2016).

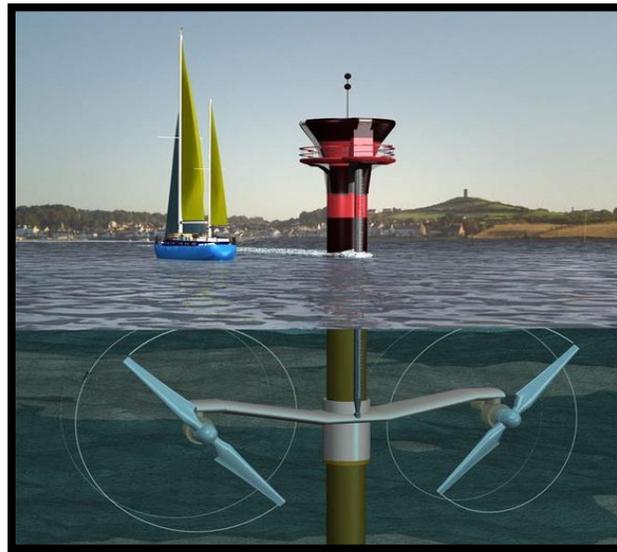


Figura 1.3 dispositivo para aprovechar las corrientes marinas (Schirber M.. 2008)

### 1.1.3 Olas

Las olas son generadas por la fricción del viento con la superficie del océano, según las características del viento y del ángulo de incidencia sobre la superficie serán la altura, periodo y dirección del oleaje. Las olas aumentan su tamaño en relación con la velocidad del viento, con la duración del viento y con la distancia barrida por el viento entre mar adentro y la costa.

Éste movimiento constante se puede utilizar para la generación eléctrica, a este tipo de energía se le denomina energía undimotriz o Conversión de Energía de las Olas, por sus siglas en Inglés, WEC (Wave Energy Conversion).

Hay dispositivos flotantes y fijos al fondo marino que se mueven según la amplitud de las olas. Los fijos pueden ser de tipo columna ascendente y descendente de agua, una presa que se llene con el oleaje, placas ancladas al fondo que oscilan según el oleaje. Los móviles o flotantes pueden ser de tipo Pelamis, que son estructuras largas articuladas, también están los dispositivos conocidos como Pato de Salter y boyas móviles.

El movimiento que perciben los distintos dispositivos, se conecta con diversos acoples a los generadores para poder generar electricidad.

En Edimburgo en 1970 se desarrollaron por primera vez prototipos para aprovechar esta energía, con un dispositivo denominado "Pato de Salter", la parte flotante del dispositivo sube y baja según el

movimiento de la ola. Escoceses y Noruegos fueron los primeros en aprovechar estas tecnologías, hoy día los vanguardistas en el uso de esta tecnología son los Portugueses.

En 1985 el funcionamiento de la estación de generación de Noruega consistía en un cilindro que contenía una columna de agua, al momento del paso de las olas éstas comprimían o descomprimían una columna de aire, la cual movía una turbina que estaba acoplada a un generador (González J.. 2009).

En 2005 la Ocean Power Delivery instaló un prototipo de 750 [kW] de Pelamis (Figura 1.4) con 120 [m] de largo y 3.5 [m] de diámetro, tiene 3 módulos de conversión de energía de 250 [kW], está instalada en Portugal pero es tecnología noruega, se pretendía proliferar el uso del dispositivo para que se genere un total de 20 [MW] (TextosCientificos.com. 2009), sin embargo acaban de cancelar los proyectos debido a la inviabilidad económica (Alatorre, M.A.. 2016).



Figura 1.4 Dispositivos Pelamis, instalados en Portugal (TextosCientificos.com. 2009)

En 2009 la empresa Iberdrola instaló en el mar de Cantabria 10 boyas flotantes que producen 1.5 MW, la tecnología costa de una boya anclada al suelo, ésta se mueve según el oleaje y están acoplados unos motores al mástil que transforman este movimiento en energía eléctrica.

También en 2009 se comenzó un proyecto de investigación en Brasil desarrollado por el programa de Investigación y Desarrollo de la Agencia Nacional de Energía Eléctrica (ANEEL), el sistema está compuesto por dos módulos con un dispositivo de flotación, una bomba y un brazo mecánico que capturan la energía en una cámara hiperbárica conectada a una turbina eléctrica de 50kW (OM, 2014), las primeras pruebas se llevaron a cabo en Junio de 2014 y duraron 10 minutos.

(OM, 2014)

En la actualidad un sistema de cilindro se encuentra ubicado en un acantilado en el norte de Europa, a éste sistema se le conoce como convertidor de Kvaerner (Ambientum. 2004), dónde al llegar la ola comprime una columna de aire, la cual mueve un cilindro de hormigón, el cilindro está conectado a un generador, generando 500 [kW].

### 1.1.4 Gradiente Salino

El gradiente salino es la diferencia de concentración de sal que tienen dos cuerpos de agua. Esta diferencia de concentraciones salinas hace que al estar en contacto ambos cuerpos de agua tiendan a equilibrar sus concentraciones, permeando el agua con baja salinidad hacia la de mucha salinidad (Figura 1.5). El agua de mar se considera de alta salinidad, posee hasta 35,000 [ppm], es decir de 30 a 35 gramos de sal por litro; mientras que el agua de un río tiene tan sólo 1000 [ppm], de 0 a 1 gramo de sales disueltas en un litro.

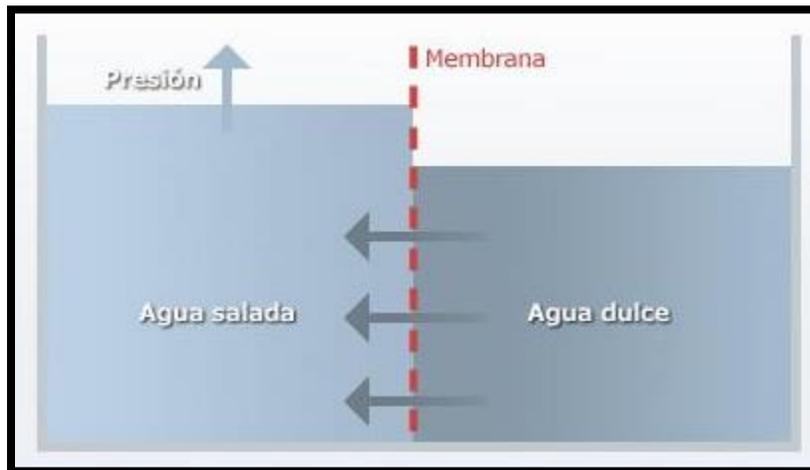


Figura 1.5 Principio de funcionamiento de planta de ósmosis (Sánchez Granado A., 2009)

Los gradientes salinos más importantes en la naturaleza se encuentran en las desembocaduras de los ríos, este cambio de concentración provocará un flujo de energía en forma de presión. Si se tiene una mayor diferencia de salinidad se tendrá una mayor presión.

Dicha presión se puede ocupar para mover una turbina acoplada a un generador y de esta manera aprovechar el gradiente salino.

Las primeras investigaciones formales en esta tecnología, también conocida como energía azul, datan de 1993 (EcoInventos, 2015), realizadas por una empresa noruega llamada Statkraft.

En el 2009 se construyó una planta piloto en Noruega, ubicada en una pequeña entrada del mar a 60 [km] de Oslo. En 2014 se instaló la primera planta comercial en Holanda, se pretende que esta ayude a mejorar los equipos y para el 2020 se logre escalar a plantas de 50 [MW].

Otra forma de aprovechar el gradiente es mediante un capacitor eléctrico, el cual se carga al estar sumergido en una solución electrolítica, en este caso el agua de mar, y se descarga en el agua dulce generando electricidad. En la Universidad de Utrecht de Países Bajos se realizan investigaciones para mejorar los capacitores, es decir que tengan una mayor superficie en un menor volumen. Aún falta realizar pruebas y mejoras para hacerlo un proyecto económicamente viable (López de Haro, M., 2014).

### 1.1.5 Gradiente térmico

El océano presenta distintas temperaturas superficiales dependiendo de su ubicación. Por ejemplo en zonas ecuatoriales se alcanzan temperaturas de 25 [°C] mientras que en zonas polares se tienen apenas 7 ° [C]. En cuanto al perfil de temperaturas en la profundidad de los océanos también varía según la latitud de la que se trate (Figura 1.6), conforme aumenta la profundidad y la radiación disminuye, la temperatura también disminuye.

La zona de 0 a 200 [m] de profundidad se le conoce como la zona epipelágica y la zona de 200 a 1000 [m] mesopelágica, hay otras zonas, pero para efectos de gradiente térmico sólo estas son las zonas de interés. Los cambios más bruscos de temperatura se presentan en la zona epipelágica, este cambio brusco de temperatura se define como termoclina. Se entiende por latitudes bajas de 30 °N a 30°S, latitudes medias de 30-60 °N y 30-60°S y latitudes altas de 60-90°N y 60-90 °S

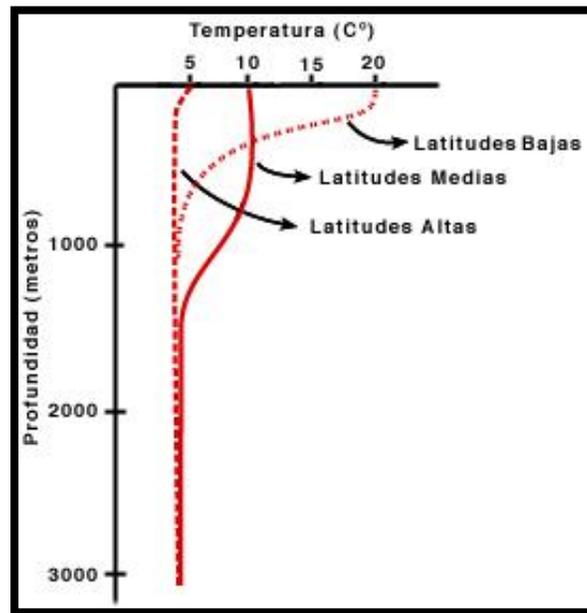


Figura 1.6 Termoclina en distintas latitudes (Curso geografía del mar. 2010)

A profundidades de 1 [km] se tienen temperaturas promedio de 4 [°C] y continúan disminuyendo linealmente hasta que en la máxima profundidad de 11 [km] se alcanzan los -2 [°C] (Cifuentes, J. & Frías, M.. 2010).

En latitudes bajas se presentan los mayores gradientes de temperatura en relación con la profundidad. En promedio en el mundo se tienen presentes gradientes de temperatura en esta zona y a 1 [km] de profundidad de 10-25 [°C] y el máximo registrado en aguas ecuatoriales de 28 [°C].

## 1.2 Plantas OTEC

Las plantas OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion), son plantas generadoras de electricidad que permiten aprovechar el gradiente térmico del océano. Es propicia de utilizarse en latitudes bajas, pues

es dónde se pueden encontrar los mayores gradientes térmicos debido a que se recibe la máxima radiación solar y el ozono y los demás gases efecto invernadero que se concentran en las zonas ecuatoriales evitan que el calor absorbido se escape a la estratosfera, por tanto se mantiene un ambiente cálido.

El gradiente se utiliza mediante ciclos Rankine con ciertas variaciones, estas variaciones permiten usar el agua tibia de mar como fuente de calor, ya sea para convertirse en vapor, o para evaporar algún otro fluido de trabajo, mientras que el agua fría se usa en el condensador. Las plantas OTEC pueden generar electricidad, desalar agua, producir hielo y al agua fría oceánica se le pueden dar usos secundarios como la piscicultura, generación de aire acondicionado e implementación de invernaderos. Al estar la energía requerida disponible las 24 horas del día podrían proporcionar electricidad de carga base y tener un factor de planta alto, alrededor del 90-95%.

Los pequeños estados insulares en desarrollo, SIDS (Small Islands Developing States) son los mejores candidatos para la instalación estas plantas, puesto que el combustible, el agua para consumo humano y los alimentos son caros y difícil de abastecerse, por ejemplo el combustible en Hawái cuesta un 70% más que en el resto de los Estados Unidos. Sin embargo en países que están en latitudes bajas y se tiene un gradiente térmico de 25 a 30 [°C] entre la superficie y 1000 [m] de profundidad, también se pueden implementar estas plantas, entre estos países esta México (Figura 1.7).

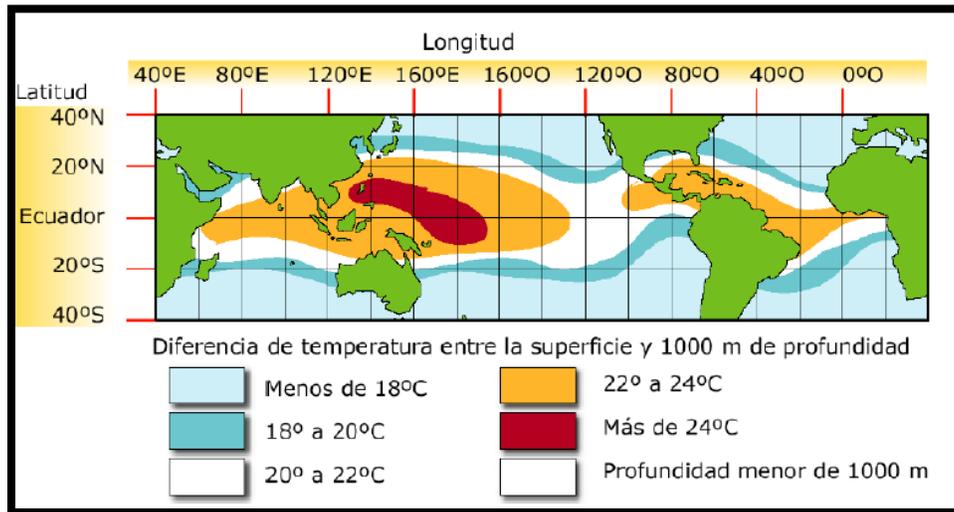


Figura 1.7 Diferencia de temperatura entre la superficie y 1000 [m] de profundidad (LATin. NE).

### 1.2.1 Tipos de ciclo OTEC.

Las plantas OTEC se pueden clasificar tanto por la configuración del ciclo bajo el que operan, como por su lugar de instalación. Por su configuración se encuentran las plantas de ciclo abierto, cerrado e híbrido y por su ubicación se encuentran en la costa o en alta mar.

## Ciclo Abierto

El ciclo abierto (Figura 1.8), también conocido como ciclo de Claude, usa el agua de mar como fluido de trabajo, el agua superficial del mar que de acuerdo a su latitud puede ser de 25 [°C] se dirige hacia una cámara que tiene una presión menor a la atmosférica, donde una fracción del agua se evapora, la mezcla se conduce a un separador que separará el vapor seco del agua líquida para enviar sólo el vapor a una turbina de baja presión con el fin de generar electricidad. Una vez que el vapor sale de la turbina es condensado con el agua fría del mar, tomada de profundidades de 700 a 1000 [m], este condensado es agua desalinizada que se le puede dar algún otro uso. Se tiene especial cuidado en el mantenimiento de la cámara para evitar fugas a la atmosfera y perder el nivel de presión que se desea.

El ciclo de Claude tiene ciertas características que lo hacen distinto a otros ciclos, por ejemplo en el evaporador en un ciclo abierto se usa un sistema de aspersion para que el agua tibia se evapore en una mayor proporción, a este método de evaporación se le llama evaporación flash, es decir disminuir súbitamente la presión para evaporar un fluido.

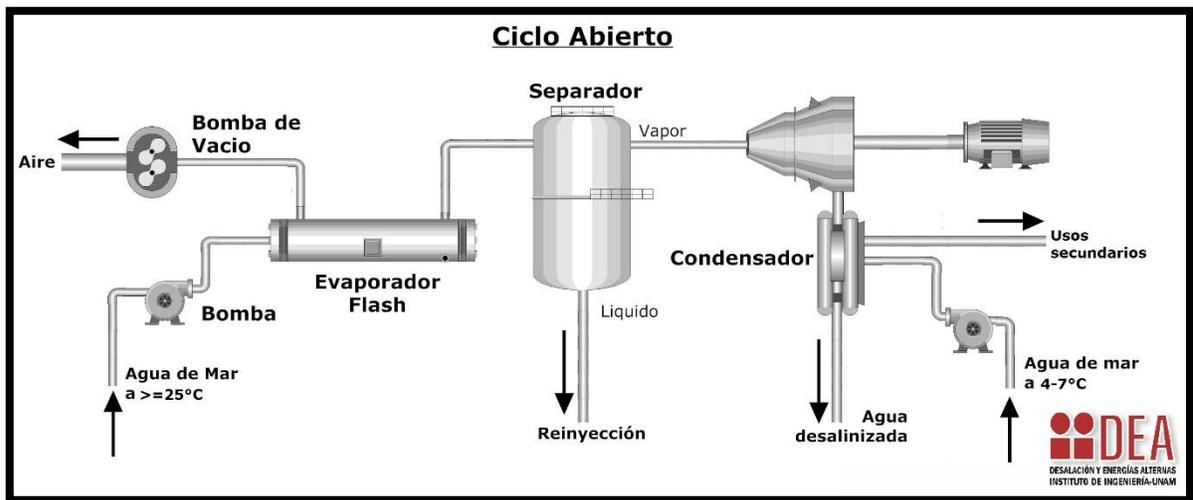


Figura 1.8 Ciclo OTEC abierto (Grupo iiDEA. 2016)

Éstos ciclos tienen ciertas ventajas, una es que el agua que se evapora en la cámara de vacío es agua desalinizada, la cual se puede recuperar en el condensador y ser usada por alguna comunidad cercana, el fluido de trabajo al ser agua desalinizada no representa algún daño ambiental. Por otro lado las desventajas que presentan es que el fluido de trabajo promueve la corrosión en los equipos, los flujos másicos son mayores que en los ciclos cerrados puesto que en los ciclos abiertos sólo el 0.5% del agua a 25 [°C] de mar se convierte en vapor utilizable (Finney, K.. 2008). También se alteran las propiedades del agua de descarga, ya que se quitan los gases no condensables, dióxido de carbono y nitrógeno, en la cámara de vacío y en la reinyección no se agregan estos elementos.

Extraer los gases no condensables es preciso para mantener la eficiencia del evaporador, puesto que su presencia en los evaporadores disminuye el coeficiente global de transferencia de calor.

## Ciclo Cerrado

Al ciclo cerrado (Figura 1.9) también se le conoce como ciclo de Anderson. La idea fue concebida por primera vez por el físico francés D'Arsonval.

Se cuenta con un fluido de trabajo diferente al agua de mar, el agua de mar a 25 [°C] es usada para ceder su calor al fluido de trabajo a través de intercambiadores de calor. Los fluidos de trabajo que se utilizan en este ciclo con fluidos orgánicos como el propano, butano, el freón, el amoníaco y diversos refrigerantes como R134a, R123, R152a, R32, entre otros.

Éstos ciclos operan bajo un ciclo Rankine simple, el agua tibia se bombea al intercambiador de calor, el fluido de trabajo ya está presurizado por efectos de la bomba dispuesta aguas arriba, al tener contacto indirecto con el agua de mar provocará que se sature el fluido de trabajo, el vapor es conducido a la turbina dónde se expandirá haciendo girar el rotor y generando electricidad, una vez que sale de la turbina se condensa y es bombeado a la mayor presión posible para volver a comenzar el ciclo. Por su parte el agua fría de mar es bombeada al condensador para condensar el fluido de trabajo y ser reinyectada o utilizada en usos secundarios.

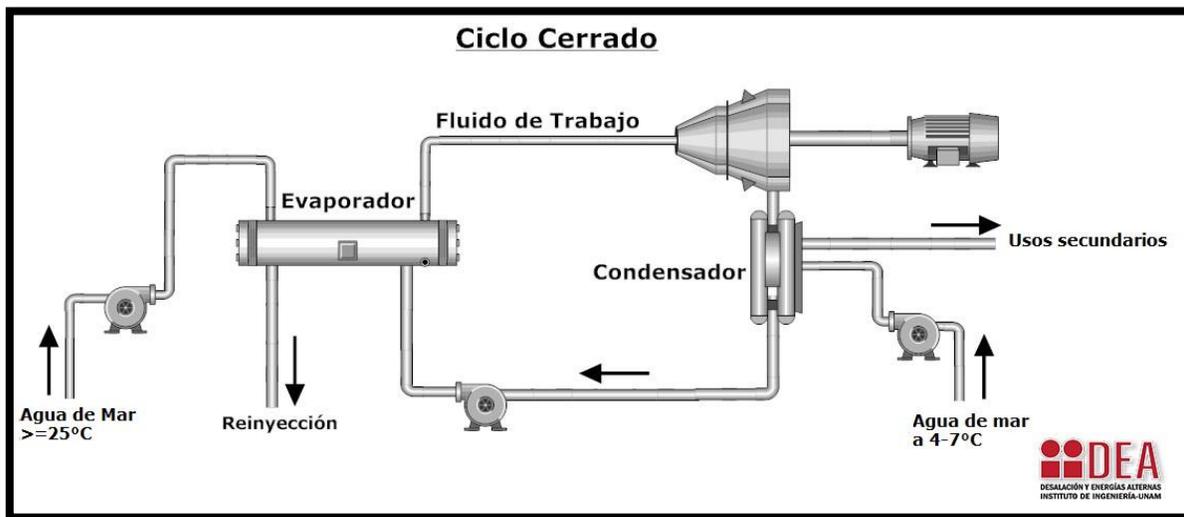


Figura 1.9 Ciclo OTEC cerrado (Grupo iiDEA. 2016)

Dentro de los ciclos cerrados destaca el *Ciclo Kalina* el cuál fue creado por el Centro Incorporado de Ohio de Ecología y Estudios Evolutivos, Inc. de OCEES (Incorporated Ohio Center for Ecology & Evolutionary Studies), en Estados Unidos, la variante que se presenta en este ciclo es el usar una mezcla amoníaco-agua.

Una de las ventajas que ofrece este ciclo es que el mantenimiento a equipos es mínimo, ya que no tienen contacto con el agua de mar, a excepción del evaporador y condensador. Además de que estas plantas tienen un menor tamaño que los ciclos abiertos.

## Ciclo Híbrido

Estas plantas generan electricidad y desalinizan agua. Es un ciclo que ofrece los beneficios de los ciclos abiertos y cerrados. El agua tibia de mar es evaporada en una cámara de vacío, el vapor obtenido en esta cámara es pasada a un intercambiador de calor, dónde se circulará el fluido de trabajo, generalmente será un fluido orgánico, el vapor de agua se condensará cediendo su calor al fluido de trabajo, éste se evaporará y de dirigirá a la turbina para expandirse y generar trabajo de flecha, posteriormente se condensará con el agua fría de mar. El vapor de agua condensado en el evaporador 2 es agua desalinizada que se puede acondicionar para el consumo humano. En la Figura 1.10 se observa la configuración de los equipos.

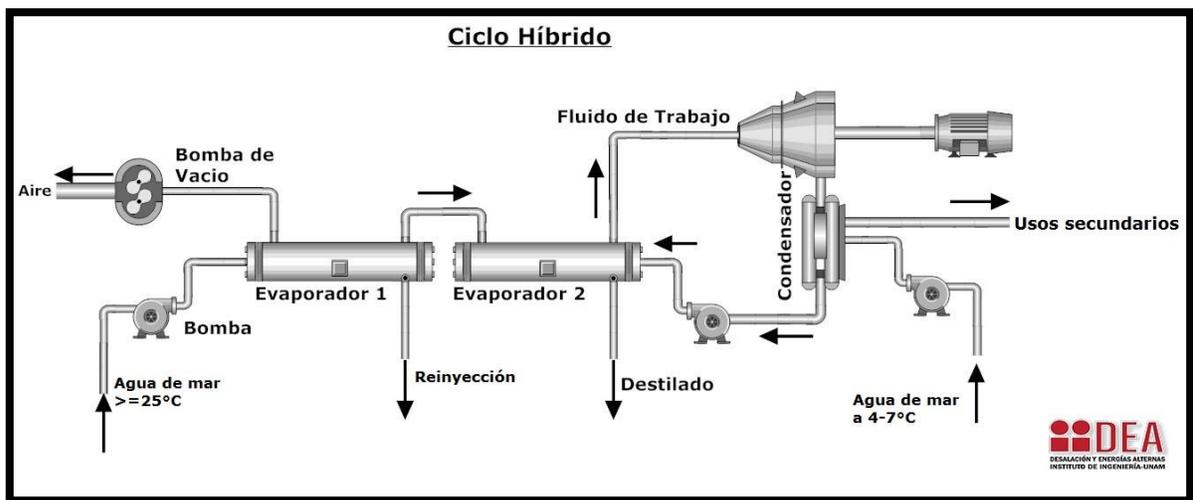


Figura 1.10 Ciclo híbrido de plantas OTEC (Grupo iIDEA. 2016)

Respecto a su clasificación por lugar de instalación se tienen los siguientes rubros.

## Sobre la costa

Estas plantas como su nombre lo dice se encuentran sobre la costa, que se traduce en Inglés “on-shore”, se encuentran sobre la costa o a unos cuantos kilómetros, la ubicación sobre la costa disminuye la probabilidad de daños por desastres naturales.

Una de las ventajas que ofrece este tipo de sistemas es que los productos primarios y secundarios de la planta se podrán transportar en camiones e incluso puede coincidir que la planta quede cerca de la población a la que van dirigidos los productos.

### *Fuera de la costa*

Estos sistemas se traducen al inglés “off-shore” (Figura 1.11), se encuentran en a unos kilómetros de la costa y están contruidos en grandes barcos o en plataformas de tipo petrolero, pueden estar ancladas al fondo marino o flotando.

La ventaja de estas plantas es que la tubería del agua fría tiene una menor distancia, pero las desventajas son mayores, ya que encarece el costo de los productos el hecho de que se tengan que transportar hasta la zona de comercialización, el material del cable para transportar la electricidad es muy costoso.

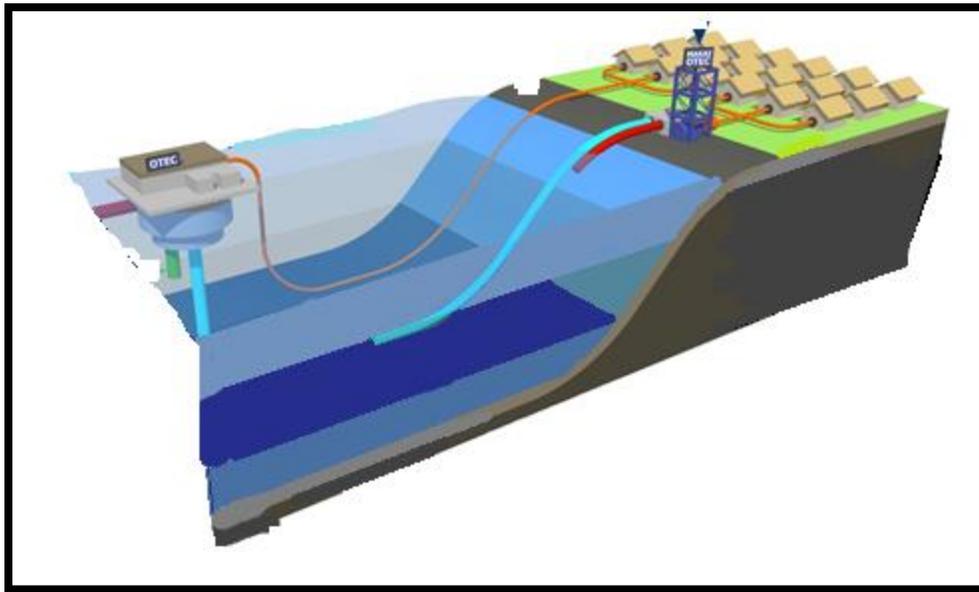


Figura 1.11 Configuración de una planta en fuera de la costa (Subsea world news. 2015)

### 1.2.2 Historia de la OTEC

La idea original de éstas plantas surge de un físico francés llamado Jacques-Arsène D'Arsonval en 1881. Su discípulo George Claude construyó la primer planta en Matanzas, Cuba en 1930, ésta planta tenía la capacidad de 22 [kW] de potencia bruta y fue destruida al poco tiempo debido a una tormenta. Después de 1930 Claude diseñó una planta OTEC flotante para producir hielo, la cual también fue destruida por una tormenta, esta planta operaba bajo el ciclo más sencillo de las plantas OTEC conocido como ciclo abierto.

En 1956, físicos franceses diseñaron una planta OTEC de 3 [MW], pero como al mismo tiempo se hallaron grandes cantidades de petróleo barato de extraer nunca se llevó a cabo la construcción de la planta, además de que los costos no eran competitivos.

En 1962 los hermanos Anderson dedicaron sus investigaciones a aumentar la eficiencia del ciclo abierto, como resultado inventaron y patentaron el ciclo cerrado en 1967. Algunas de sus modificaciones eran que tenían un fluido de trabajo diferente al agua de mar, que era agua salobre, sus proyecciones en cuanto a generación ofrecían un menor costo que el carbón o combustóleo. Sin embargo en esas épocas se le hizo poco caso al avance, debido a que se miraba al carbón y a la energía nuclear como las energías del futuro.

Desde 1970 Japón ha contribuido importantemente en el desarrollo de esta tecnología, en ese año, la Tokyo Electric Power Company inició las construcciones de una planta de ciclo cerrado de 100 [kW] en Nauru, isla del continente Oceanía, sin embargo la planta empezó a funcionar en Octubre de 1981 generando 120 [kW], 90 [kW] los usaba para usos propios y los 30 [kW] restantes se utilizaron en escuelas y lugares públicos. Esta generación fue la mayor generación con éste recurso energético registrado.



Figura 1.12 Planta min-OTEC (Vega, L.A.. 1999)

En 1974 Estados Unidos estableció el Laboratorio de Energía Natural en la Autoridad de Hawái (Natural Energy Laboratory on Hawaii Authority) NELHA en Kona, Hawái, un lugar ideal por la temperatura superficial del océano y por los altos costos de la energía eléctrica, en 1979 instaló una planta mini-OTEC (Figura 1.12) de ciclo cerrado de 15 [kWn] (P. Rafferty, J.. 2016), ésta planta estuvo funcionando sólo por 3 meses, pero se siguen realizando investigaciones.

En 1981 el Dr. Alexander Kalina, ingeniero ruso, trabajando en el Centro de Ohio Incorporado para la Ecología y Estudios Evolutivos (Incorporated Ohio Center for Ecology & Evolutionary Studies) Inc. de OCEES en Estados Unidos desarrolló una variante de los ciclos cerrados, utilizó como fluido de trabajo una mezcla amoniaco-agua con una relación 60%-40% respectivamente en peso, incrementando la eficiencia del ciclo. Esta mezcla ya no se usa en ciclos cerrados OTEC, pero se usa hoy día en plantas geotermoeléctricas de ciclo binario.

En 1982 compañías japonesas instalaron en Nauru una planta con capacidad de 35 [kWn] (P. Rafferty, J.. 2016), trabajaba bajo un ciclo cerrado, dejó de funcionar en 1983, alrededor del 90% de la energía era

consumida por la misma planta, el instituto que encabezó el proyecto fue el Instituto de investigación de energía del océano de Japón (Japan Institute for Ocean Energy Research).

De 1993 a 1997 NELHA instaló en Hawái en tierra firme una planta de tipo híbrido de ciclo abierto, con una capacidad instalada de 255 [kW] de potencia bruta y 103 [kW] de potencia neta, desalinizando 0.4 [l/s], utilizando un gradiente de temperatura de 26 [°C].

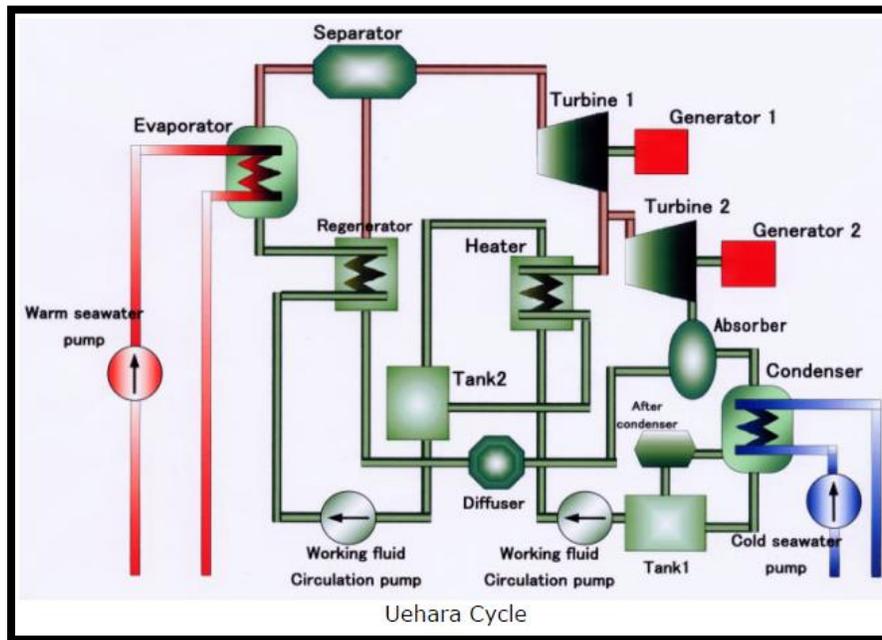


Figura 1.13 Ciclo Uehara (Puyuelo, A., Ramos, C., Recio, A., Rodríguez, A. & Rodríguez, D.. NE)

En 1994, la Universidad de Saga de Japón diseñó y construyó un modelo de planta de 4.5 [kW] que trabaja bajo el ciclo Uehara. El ciclo Uehara (Figura 1.13) es un ciclo cerrado con la configuración de sus elementos distinta, tiene regeneradores y calentadores y la turbina es de baja frecuencia, la inclusión de regeneradores y calentadores aumenta la eficiencia del ciclo, sus intercambiadores son de placas y el fluido de trabajo es amoníaco (Faizal, M. & Rafiuddin, M.. 2012). Éste ciclo fue conceptualizado por Haruo Uehara y Yasuyuki Ikegami, investigadores de la Universidad de Saga. Desde 1994 han hecho investigaciones de usos secundarios de estas plantas, el uso de agua fría, la fabricación de hielo, agricultura, piscicultura y aire acondicionado.

En 1999 la Universidad Saga (Saga University) y el Instituto Nacional del Océano (National Institute of Ocean) NIOT instalaron en un barco, llamado "Sagar Shakti", una planta flotante de 1 MW en Tuticorin, India, estuvo funcionando del 2000 al 2002, esta planta utilizaba un gradiente de temperatura de 22 [°C], se tuvieron fallas en las tuberías del agua fría, lo que causó que no se pudiera seguir operando, sin embargo el gobierno hindú sigue patrocinando la investigación.

En 2011, Ingeniería del Océano de Makai se ha dado a la tarea de diseñar intercambiadores de calor especiales para plantas OTEC que ayuden a aumentar el rendimiento del ciclo y la vida útil de los equipos.



En 2012 el Instituto Coreano de Investigación de Barcos e Ingeniería Oceánica, KRISO (Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering), junto con el Instituto Coreano de Ciencias Oceánicas y Tecnología, KIOST (Korea Institute of Ocean Science and Technology) diseñaron un ciclo cerrado de 20 [kW] que sirve como prototipo para una planta posterior de 1 [MW], el fluido de trabajo es el refrigerante R-32, en 2013 se terminó de instalar.

En 2013 la Universidad de Saga apoyada de varias industrias japonesas instalaron una planta OTEC en la isla de Kumejima, la instalación es para demostrar todos los cálculos y propuestas teóricas que se tenían de la misma, así como seguir investigando y realizando pruebas. Ésta planta está compuesta de dos unidades de 50 kW cada una. Cabe destacar que tienen visitas a la planta abiertas al público en general. En esta planta también se investigan los usos secundarios que se les puede dar a las plantas OTEC. Se pretende escalar la planta hasta 125 MW.

También en 2013 se planeaba estuviera instalada en Hawái una planta de 10 [MW] de ciclo cerrado en una plataforma flotante cercana a la costa, iba a requerir una inversión de 4.4 millones de dólares para su instalación, previamente en 2009 se invirtieron 12.2 millones de dólares para el diseño y exploración, los desarrolladores de esta planta son “Locked Martin” y “Naval Facility Engineering Command” (Kempener, R. & Neumann, F.. 2014).

En ese mismo año el 13 de Abril se firmó un acuerdo entre “Locked Martin” y “Beijing Based Reignwood Group” para desarrollar una planta de 10 [MW] que este en la costa Sur de China.

En 2014 se planeó instalar una planta de tipo flotante en Bellefontaine, Martinica con una capacidad de 10 [MW], esperando en el 2016 entre en operación, los desarrolladores del proyecto son DCNS Francia.

En 2015 se instaló en Hawái una planta de 100 kWn, trabaja en un ciclo cerrado, su fluido de trabajo es el amoníaco. Puede alimentar de electricidad a 120 casas (Vyawahare, M.. 2015).

Se tienen algunas otras proyecciones de la implementación de esta tecnología en las Bahamas, en Bora Bora y en Tetiaroa.

Actualmente en México se llevan a cabo algunos estudios y proyectos pilotos conducidos por la Comisión Federal de Electricidad, la Universidad Nacional Autónoma de México, el Instituto Politécnico Nacional y otras instituciones, con el fin de demostrar la viabilidad del empleo de la energía oceánica. El Instituto de Ciencias del Mar y Limnología se encuentra realizando estudios oceanográficos que incluyen perfiles de temperatura del océano, estudios de batimetría, geología del océano. Se han hecho tesis donde han determinado los lugares idóneos para instalar una planta OTEC, los lugares pueden ser la bahía de San Lucas en Baja California Sur, la bahía de Banderas en Puerto Vallarta, la costa de Oaxaca, la costa de Jalisco y Cozumel en Quintana Roo. Estos lugares presentan un adecuado gradiente de temperatura, no están en reservas naturales, la geografía del lecho marino permite la extracción de agua fría. Sin embargo aún no se tiene ningún prototipo de ésta tecnología.



### 1.2.3 Impacto ambiental

En cualquier tipo de proyectos se deben considerar los impactos ambientales, buenos o malos, que éstos traerán al entorno en que se tenga pensada su instalación.

El impacto ambiental de éstas plantas se pueden considerar primero los propios de cualquier construcción como es uso de transportes de carga para su construcción, el ruido que esta ocasionará, la construcción de caminos en dado caso que haya que construirlos debido a su ausencia.

Una vez instalada la planta y puesta en operación se pueden considerar varios aspectos:

- En el caso de las plantas híbridas y abiertas a la descarga de la salmuera se le debe de dar un tratamiento para evitar concentraciones salinas que puedan matar flora y fauna.
- Las descargas de agua fría y caliente en las plantas de ciclo abierto, cerrado e híbrido normalmente se hace a través de un solo tubo, procurando inyectarla a la profundidad en la que coincide la temperatura de descarga. Sin embargo al tener un alto contenido de nutrientes propicia el crecimiento de peces, alterando el ecosistema.
- En el caso de los ciclos cerrados el principal contaminante es el fluido de trabajo, puesto que se utilizan refrigerantes y hay que tener un manejo especial para evitar que se emitan a la atmosfera. Si se llegasen a dañar las tuberías, las fugas serían peligrosas para el personal que opere en la planta.
- En los evaporadores de los ciclos abiertos se tienen ciertas emisiones de gases no condensables al ambiente. Mientras que en los condensadores se tienen emisiones de dióxido de carbono, sin embargo estas emisiones corresponden a tan solo el 1% de una termoeléctrica convencional.
- El mantenimiento de las plantas también genera impacto ambiental, puesto que se usan grandes cantidades de agua y sustancias químicas para la limpieza y se generan sarros como residuo de la limpieza. Sin embargo haciendo una correcta selección de materiales en el diseño, los mantenimientos se pueden reducir.
- Al bombear grandes cantidades de agua de la superficie se arrastran huevos de peces que no sobreviven al paso de los intercambiadores de calor y tuberías.
- La descarga de las plantas puede ser muy grande, por ejemplo si se construyera una planta de 100 [MW] el agua de descarga sería equivalente al flujo del Río Colorado, 637 [m<sup>3</sup>/s] (Nowak, K. C.. 2012).

## 1.3 Usos secundarios de plantas OTEC

Se ha mencionado que el agua del océano a una profundidad de 1 [km] presenta temperaturas alrededor de los 4 [°C], pero presentan también otras características como son el poseer mayor salinidad y por tanto ser más densas, otras características registradas son que por ejemplo a 600 [m] de profundidad en

Keahole, Hawái hay 78 veces más nitrógeno y 15 veces más fósforo que en la superficie (IOC Brunn Memorial Lectures. 2003), se presentan mayores nutrientes y contiene una mayor cantidad de oxígeno.

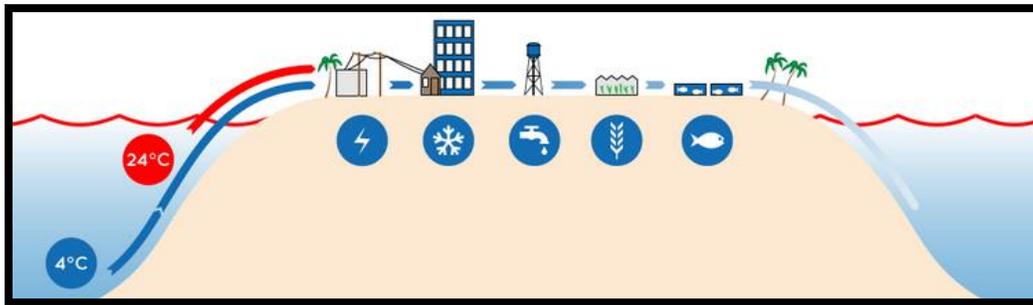


Figura 1.14 Usos secundarios de planta OTEC (OTEC Foundation. NE)

Estas características nos permiten aprovechar el agua fría después de condensar el fluido de trabajo, pues al bombear agua de las profundidades tendremos acceso a los nutrientes que en capas profundas se encuentran. Se puede aprovechar el agua en plantas cerradas, abiertas o híbridas para diversos usos como aire acondicionado, agua fría de consumo humano, agricultura y piscicultura (Figura 1.14).

### 1.3.1 Aire acondicionado

En las zonas costeras situadas entre los trópicos de Cáncer y Capricornio, por lo general la temperatura del ambiente es mayor a los 18 [°C] y se han alcanzado temperaturas de hasta 49.5 [°C] (Sánchez, D.. 2014). en Sonora, México.

En estas latitudes y con climas tan cálidos se usa alrededor del 40 % de la energía eléctrica para acondicionar espacios en este tipo de climas y mantener el confort de vacacionistas y habitantes.

El agua del fondo del mar que es bombeada para llevar a cabo la condensación en las plantas OTEC puede ser utilizada en sistemas de aire acondicionado. Se introduce a un sistema de refrigeración donde el agua fría circulará por intercambiadores de calor que enfriarán algún fluido de trabajo.

Por ejemplo, se ha calculado que para producir unas 5,800 [TR] (equivalente a 5,800 habitaciones), se debe circular 1 [m<sup>3</sup>/s] de agua fría de mar a una temperatura de 7 [°C], para bombear el agua del fondo del mar se requieren 360 [kWe], en comparación con un sistema convencional de refrigeración que requiere mínimo de 5,000 [kWe] para generar las mismas toneladas de refrigeración. El tiempo de recuperación se estima de 3 a 4 años (Vega L.A.. 1992).

En Cancún el hotel "Palace Resorts" actualmente usa agua de mar para su sistema de aire acondicionado acoplado a un chiller, el agua la toman de un pozo cercano al mar, el sistema refrigera 601 habitaciones desde 2006, ahorran un 62 % de energía eléctrica (Alfa Laval. NE).



### 1.3.2 Agua para consumo humano

En islas pobladas como: Papua Nueva Guinea, Somoa, Fiji, Cuba (Binger, A.. NE), se hace notar que la oferta y demanda de agua no coinciden. De acuerdo con estudios ambientales sobre cambio climático, se proyecta una disminución de precipitaciones en latitudes medias y subtropicales (Intergovernmental Panel on Climate Change. 2014), aunado al crecimiento poblacional se prevé un mayor desequilibrio entre oferta y demanda de agua, lo que hace importante el desarrollo de sistemas para desalinizar agua para consumo humano.

Con una planta OTEC de ciclo híbrido que genere 1 [MWe] se pueden producir 4500 [m<sup>3</sup>/día] de agua desalada, pudiendo usarse para el consumo de aproximadamente 20,000 personas, contar con seguridad en el suministro de agua potable es un importante aspecto para el desarrollo de cualquier sociedad.

El agua desalada de plantas OTEC es de buena calidad y los costos son competitivos, además el agua desalada se puede usar para riego de cultivos.

### 1.3.3 Agricultura

Las plantas OTEC ofrecen una gran ventaja para la diversificación de producción de alimentos y la seguridad alimentaria, puesto que se puede ocupar el agua desalinizada de plantas de ciclo abiertas o híbridos para regar o el agua fría para la implementación de invernaderos.

El uso de invernaderos permite sembrar ciertos vegetales y frutas en una zona en la que naturalmente no podrían cosecharse. Esta implementación reduce el uso de transportes para el abastecimiento de dichos alimentos, hablando de zonas costeras, pero en el caso de las pequeñas islas en desarrollo (SIDS) se podría omitir al 100 % el importar ciertos alimentos.

Para el caso de invernaderos se puede hacer circular el agua fría de mar a través de una red de tubería enterrada en la tierra que haga que la temperatura de cierto espacio disminuya. Mientras que el agua desalinizada se puede usar para riego.

### 1.3.4 Piscicultura

La piscicultura se refiere al cultivo de peces en un medio confinado, donde se pueden controlar las condiciones climáticas con el fin de mejorar la reproducción de los peces, se han cultivado peces desde los años 475 a.C. (Cifuentes, J. & Frías, M.. 2010). El potencial de la maricultura se demostró por primera vez en 1975 en St. Croix en las Islas Vírgenes de Estado Unidos. Se cultivaron Chaetoceros Curvisetus, que es un tipo de fitoplancton, extrapolando la información recabada se calculó que con una descarga



de una planta OTEC de  $4.5 \times 10^4$  [m<sup>3</sup>/min] se puede producir  $5.3 \times 10^7$  [kg] de fitoplancton al año. Éste fitoplancton serviría como alimento para otras especies mayores.

Una de las ventajas de practicar la piscicultura es que se puede aumentar la disponibilidad de alimento en caso de necesitarse, evitándose la posible extinción de ciertas especies debido a su sobreexplotación.

En Corea del Sur hay piscicultura industrial de peces de agua fría con agua obtenida a 600 m de profundidad (Alatorre, 2016).

## 1.4 Factores a considerar para la instalación de una planta OTEC

Para poder hacer factible la instalación de una planta OTEC se tienen que tener diversos factores en cuenta, el primero y más importante es tener demanda de la electricidad a generar y de los subproductos, pero también hay condiciones ambientales, oceanográficas y políticas necesarias para hacer factible la instalación de una planta OTEC.

### 1.4.1 Oceanográficas

La instalación de estas plantas es propicia en latitudes entre los trópicos, es decir de 23.5° N a 23.5° S (Figura 1.7) . Para la zona de interés se debe contar con cierta información que nos permitirá predecir el comportamiento de las aguas oceánicas una vez instalada una planta OTEC, algunos de los aspectos que se deben tomar en cuenta son:

- Aspectos meteorológicos: El tipo de clima de la región, saber si se producen “Nortes” y con qué frecuencia y la intensidad, ciclones, el comportamiento del viento, de la lluvia o tormentas tropicales.
- Hidrografía y masas de agua: Salida de agua de la plataforma continental, zonas termohalinas, termoclinas y los cambios que sufren conforme cambia el clima. Estudiar la intensidad y dirección de las masas de agua.
- Corrientes: El patrón de circulación que se forma según los vientos y a que profundidad se generan.
- Temperatura: Conocer el perfil de temperaturas en relación a la profundidad y dependiendo de la época del año.
- Salinidad: El contenido de sales disueltas
- Oceanografía biológica: Conocer la cantidad de oxígeno disuelto, el pH, dióxido de carbono total, la alcalinidad, la cantidad de nitritos, nitratos, silicatos, clorofila. Saber que especies habitan en la zona y saber qué efecto tendrá la descarga de la planta.
- Batimetría: El perfil de profundidad que se tiene en la zona y la inclinación del talud continental.

En trabajos de investigación realizados anteriormente en la UNAM se definieron algunos lugares para la instalación de una planta OTEC que cumplen con las características. Los lugares exactos son: Bahía de San Lucas en Los Cabos, Bahía de Banderas en Nayarit, Cabo Corriente en Jalisco, Puerto Ángel en Oaxaca, la costa de Michoacán y la zona del Caribe en la Península de Yucatán, cerca de la isla de Cozumel, en la Figura 1.15 se pueden ver los lugares indicados con una estrella y un círculo rojo.

De estas zonas se realizó un estudio por parte de investigadores del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM contemplando la dinámica oceanográfica, el esquema de huracanes y la batimetría, algunas de las conclusiones a las que llegó de cada uno de los lugares son las siguientes (García, A.. 2015):

- Bahía de Banderas, Nayarit: Está catalogada como área natural protegida y área prioritaria marítima.
- Cabo Corrientes, Jalisco: El territorio pertenece a la Reserva Selvática El Tuito y se realizan proyectos de conservación de fauna.
- Los Cabos, Baja California Sur: Es un área natural protegida, además de que se tiene un gradiente térmico adecuado solo en los meses de Mayo a Agosto.
- Puerto Ángel, Oaxaca: No es área natural protegida y cuenta con un gradiente adecuado a lo largo del año.
- Costa de Michoacán: Tiene una gran extensión de áreas naturales protegidas, tiene gradiente térmico adecuado durante todo el año.
- Cozumel, Quintana Roo: Hay grandes áreas naturales protegidas cerca, gradiente térmico adecuado.

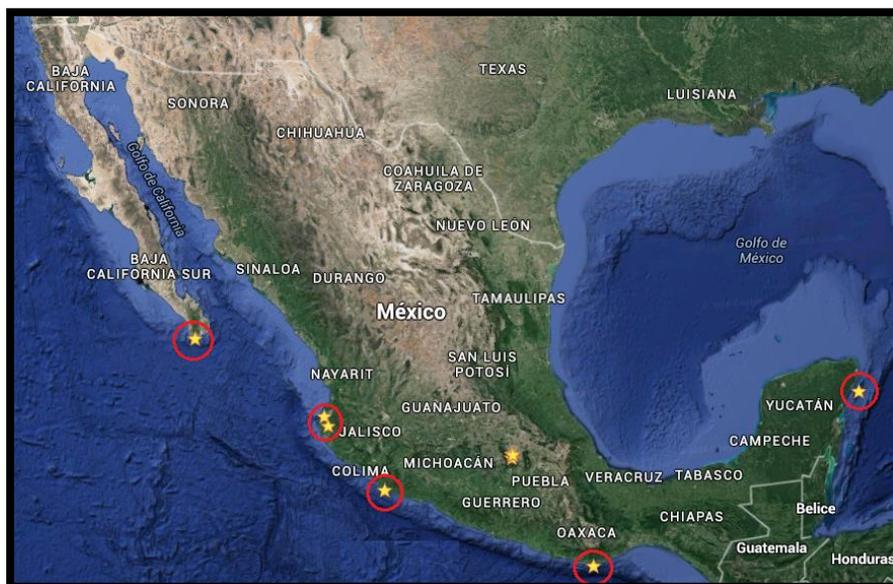


Figura 1.15 Ubicación geográfica de posibles localizaciones de plantas OTEC en México.



## 1.4.2 Sociales y políticas

Si se pretende proveer a una comunidad de energía eléctrica proveniente de una planta OTEC, se debe ver que la implementación de la planta tenga un buen grado de aceptación por parte de la sociedad. Se deben seguir todas las normas de construcción de las plantas, no dañar los ecosistemas circundantes a la obra, hay que asegurarse que no se estén invadiendo zonas protegidas.

El aspecto político también tiene un papel muy importante, puesto que si el gobierno en cuestión no tiene el mínimo interés en la incursión o expansión de las energías renovables difícilmente se logrará instalar una planta de este tipo.

## 1.4.3 Económicas

Según el energético empleado para la generación de electricidad variará el costo de generación de la misma, este costo dependerá del precio del energético, en caso de tratarse de combustibles fósiles, o de la tecnología que se use para su aprovechamiento. En la Tabla 1-1 tenemos en costo de operación de diversas tecnologías y podemos ver que a pesar de que la OTEC es una tecnología cara no es la más cara. Se puede competir con las termoeléctricas tienen el costo más bajo, las tecnologías renovables pueden disminuir sus costos vendiendo toneladas de dióxido de carbono no emitidas.

Tabla 1-1 Comparación de costo de operación según el tipo de planta (Noriega. 2006)

Tipo de Planta	Costo de operación [USD\$/MWh]
Nuclear	26-36
Carbón alta-eficiencia	44
Combinado	50
Biomasa	60
Biogás	65
Hidráulica	75
Eólica	85
OTEC	100
Fotovoltaica	150



## Conclusión

Después de analizar cada una de las formas en que la energía oceánica se puede aprovechar y el alto potencial que éste posee, considero que vale la pena seguir haciendo investigaciones en cada una de las modalidades de aprovechamiento para que en un futuro no muy lejano se pueda ir desplazando el uso de combustibles fósiles.

Las diversas configuraciones de las plantas OTEC les permiten adecuarse a distintas zonas y estas mismas configuraciones permiten jugar con los productos y subproductos que se deseen escoger.

Además estas plantas generan un gran interés debido a todos los usos secundarios que se le puede dar al agua fría, que pueden ayudar a compensar las bajas eficiencias operativas de la planta.

El considerar el acondicionamiento de espacios, generación de agua desalinizada y hielo, así como la producción de alimentos proporciona un valor agregado a estas plantas.

Es muy importante remarcar la independencia que estas plantas pueden brindar a una comunidad al dar seguridad alimenticia y abastecimiento de agua y electricidad.



## 2. Aspectos de ingeniería básica de las plantas OTEC

### Introducción

En este capítulo se incluirán algunos aspectos de ingeniería básica como son los diagramas de flujo de los procesos de generación, se describirán los procesos que se llevan a cabo en los ciclos abiertos, cerrados e híbridos y los balances de energía y masa.

Las plantas OTEC tienen una eficiencia de Carnot de alrededor del 8 % (Vega, L.A..1999), ésta eficiencia limitada por las temperaturas del agua caliente y fría del mar, sin embargo al considerar la eficiencia de los equipos, la eficiencia disminuirá. Las diferentes configuraciones de los ciclos tienen un impacto en la eficiencia, por tanto cada uno de los ciclos tienen una eficiencia distinta.

Se compararán los beneficios que ofrecen cada una de los ciclos, se realizará una matriz de decisión con diversos fluidos de trabajo para elegir el más adecuado y finalmente se hablará de las limitaciones técnicas de esta tecnología.

### 2.1 Descripción termodinámica de los ciclos OTEC

#### 2.1.1 Ciclo Abierto

Para los ciclos abiertos OTEC se tienen presiones de entrada del recurso caliente a 1 [Bar] y temperaturas entre 27 y 25 [°C], posteriormente se dirige el agua a un evaporador de tipo flash, estos evaporadores tienen la característica de evaporar el agua súbitamente debido a la disminución repentina de la presión, en este caso se manejan presiones de vacío, que son menores a la atmosférica, para que el agua a 26 [°C] se evapore se necesita 0.0336 [Bar] de presión, sin embargo la calidad a la salida del evaporador es muy baja, tan sólo del 5%, es decir sólo el 5% del agua tibia será conducida a la turbina, la mezcla que sale del evaporador se dirige a un separador para asegurarnos que estamos mandando vapor seco a la turbina.

Una vez que cede su energía el vapor se dirige a un condensador que estará operando a una presión de 0.017 [Bar] y el agua tibia ahora tendrá una temperatura de 15 [°C], el agua de refrigeración será tomada a un kilómetro de profundidad con una temperatura aproximada de 4 [°C] y se elevará a 8 [°C] una vez que condense el vapor, se puede dejar calentar hasta 10 [°C] para emplearse en usos secundarios. El condensado es agua desalinizada que puede aprovecharse. En la Figura 2.1 se puede apreciar en el diagrama de Mollier la trayectoria del ciclo.

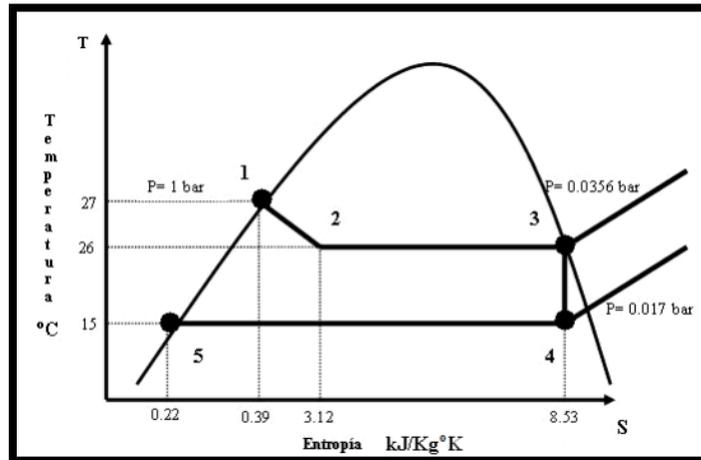


Figura 2.1 Diagrama T-s del ciclo abierto de la plantas Mini-OTEC (Aviña, H.. 2007)

### 2.1.2 Ciclo cerrado

En los ciclos cerrados interactúan 3 fluidos. El recurso caliente será el agua tibia del océano a 25 [°C] aproximadamente, se bombeará a un intercambiador de calor dónde cederá su energía al fluido de trabajo, la disminución de temperatura del agua tibia de mar estará limitada por la temperatura de evaporación del fluido de trabajo que estemos empleando. El fluido de trabajo se prefiere que sea un refrigerante puesto que tienen un menor punto de ebullición, una vez que se evapora en el evaporador pasará a la turbina, dónde cederá su energía y será conducido al condensador, para ser bombeado de nuevo al evaporador y reiniciar su ciclo. Por su parte el agua fría de mar servirá como sumidero para condensar el fluido de trabajo, de 4 [°C] que tiene a la entrada del condensador pasará a 8 [°C] una vez que salga del condensador. Si el fluido de trabajo es amoníaco la presión de evaporación será a 7 [Bar] y la condensación a 5 [Bar], entrando a la turbina con 21 [°C] y saldrá a 9 [°C]. (Figura 2.2)

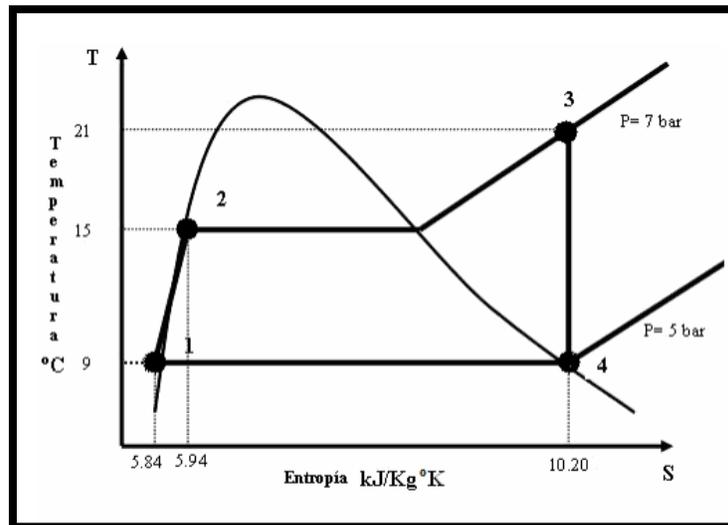


Figura 2.2 Diagrama T-s de un ciclo cerrado con fluido de trabajo amoníaco, de la planta Sagar Shakti (Aviña, H.. 2007).



### 2.1.3 Ciclo híbrido

Los ciclos híbridos como ya lo mencionamos son una combinación de los ciclos cerrados y abiertos, puesto que hay evaporación flash y además se emplea un fluido de trabajo, que también se prefiere sea un refrigerante. En este caso el agua de mar es conducida a dos intercambiadores, el primero será un evaporador flash, dónde se evaporara el 80% del agua de mar y el 20% será reinyectado, posteriormente el vapor de agua, que a su vez ya es agua desalinizada pasará a un segundo intercambiador dónde cederá su calor latente a un fluido de trabajo, el cual se evaporará para ser conducido a la turbina y posteriormente al condensador, será bombeado y reiniciará su ciclo, el agua desalinizada que se ha obtenido en el segundo intercambiador será un subproducto de la planta OTEC, de igual manera el agua bombeada de 1 km de profundidad servirá para condensar el fluido de trabajo.

## 2.2 Variación del fluido de trabajo

En este apartado se evaluarán diversos fluidos de trabajo que pueden operar en el ciclo cerrado e híbrido, la evaluación se realizará con el fin de elegir el fluido que presente las mejores características en cuanto a desempeño de la planta, seguridad y medioambientales. Se elegirá el mejor fluido mediante una matriz de decisión, la cual es una herramienta en la que se ponderan las características a evaluar.

Los aspectos que se deben considerar para elegir el fluido de trabajo más adecuado para una planta OTEC son los siguientes:

1. Presión de trabajo: La presión de trabajo es la presión a la cual se evaporará el fluido de trabajo en cuestión en el evaporador. Las presiones de trabajo se recomiendan que sean entre 700 y 1400 [kPa] a 27 [°C] (H. Avery, W. & Wu, C.. 1994).
2. Gasto másico: Se debe procurar el menor gasto másico por kilowatt producido, puesto que un menor gasto significa menores caídas de presión. Se tiene una relación gasto másico y potencia de la bomba directamente proporcional y el tamaño de la bomba está directamente ligado con el consumo de energía y el precio.
3. Coeficiente de transferencia de calor: Se recomienda que el fluido tenga un alto coeficiente para promover la transferencia de calor.
4. Salto entálpico: El cambio de entalpía según el cambio de presión a la entrada y salida de la turbina conviene sea el más alto posible, pues está directamente relacionado con el trabajo entregado por la turbina.
5. Estabilidad y compatibilidad química con los materiales comunes para la manufactura de equipos para plantas de potencia.
6. Seguridad en su uso: La seguridad de se refiere a la toxicidad y a la flamabilidad del gas. La toxicidad se divide en clase A y B, dependiendo del tiempo que una persona puede estar expuesta a cierto refrigerante, la clase A no presenta toxicidad en concentraciones de refrigerantes mayores o iguales a 400 ppm, mientras que la clasificación B presenta toxicidad en concentraciones iguales o menores a 399 ppm (Yañez, G.. 2010). La flamabilidad se refiere a que tanto un refrigerante propiciará la flama, se clasifican en clase 1, 2 y 3, la clase 1 no propaga el



fuego, el 2 presenta baja propagación y el 3 tiene una alta propagación. En la Tabla 2-1 se presenta la clasificación de los refrigerantes.

Tabla 2-1 Clasificación de seguridad de los refrigerantes

		Toxicidad		
			Baja toxicidad	Alta toxicidad
			A	B
Flamabilidad	No propaga la flama	1	A-1	B-1
	Baja propagación de flama	2	A-2	B-2
	Alta propagación de flama	3	A-3	B-3

7. Poder de calentamiento, GWP (Global Warming Potential): El GWP es un índice que mide la cantidad de energía que absorbe un gas por periodo de tiempo, el tiempo de referencia son 100 años (Environmental Protection Agency. NE). Se mide en relación al CO<sub>2</sub> el cuál es el gas que atrapa menos calor, se le da un valor de 1, de ahí los demás gases tienen un valor asignado, si un gas tiene un valor de 23 quiere decir que atrapa 23 veces más calor que el CO<sub>2</sub>.
8. Costo del refrigerante: El costo también es un rubro importante de considerar para su elección, dentro de este rubro se puede considerar el tiempo de reemplazo, si es de largo plazo o interino.

Los refrigerantes seleccionados para su evaluación son los siguientes:

- **R123:** Este refrigerante se usa en sistemas de aire acondicionado en equipos centrífugos de baja presión y para la limpieza para sistemas de refrigeración, bajo costo de operación en equipos nuevos, tiene un impacto ambiental muy bajo, sirve de reemplazo al R11, en el protocolo de Montreal se ha prohibido el uso del R11 debido a su alto impacto en la destrucción de la capa de ozono.
- **R290:** El R290 o propano se utiliza en sistemas de refrigeración y en bombas de calor. El volumen de carga para refrigerantes suele ser menor que con otros refrigerantes, tiene un impacto ambiental ultra bajo, una de sus desventajas es que es muy inflamable.
- **R600:** R600 o butano también se emplea en sistemas de aire acondicionado, se usa en solventes, spray para pelo, para calibrar analizadores de impurezas, analizadores de control medioambiental y de control de atmósferas de trabajo o de proceso en petroquímica.
- **R152a:** El R152a o difluoroetano se usa en aerosoles, es inflamable, tiene un impacto ambiental bajo.
- **R32:** el R32 o difluorometano es un gas ligeramente inflamable y también se usa para sistemas de aire acondicionado y bombas de calor, tiene un impacto ambiental moderado, las fugas no alteran su composición. El uso más común es en operaciones de grabado por plasma de capas de silicio.
- **R134:** El R134 o tetrafluoroetano es un fluidos refrigerantes que también se usa en propulsores de aerosoles y agente de espumado en poliestireno extruido



- **R410a:** Es una mezcla del R32 y R125, forman una mezcla casi azeotrópica. Se usa en sistemas de aire acondicionado y produce una presión de descarga 60% mayor a la del R22. Se recomienda su uso solo en equipos nuevos. Pueden operar en aplicaciones de baja temperatura.

En la Tabla 2-2 se presentan algunas propiedades de los refrigerantes de interés.

Tabla 2-2 Propiedades de fluidos de trabajo (Air Liquide, NE, Infra Air Products, 1999, Linde, 2016, Engineering toolbox, NE, Greenhouse Gas Protocol, 2007, Yañez, G. 2015, Varios, 2016, Gas Servei, S.A., NE)

Propiedades de fluido de trabajo para plantas OTEC							
	R123	R290 Propano	R600 Butano	R152a	R32	R134a	R410a
Fórmula	C <sub>2</sub> HF <sub>3</sub> Cl <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	F <sub>2</sub> HC-CH <sub>3</sub>	CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub> C-CH <sub>2</sub> F	R31/R125 50/50
Peso molecular [M] [g/mol]	152.9	44.096	58.122	66.05	52.02	102.03	72.6
Densidad (l) [kg/m <sup>3</sup> ]	1456.870251	580.88	601.26	899	1213.108883	1206	1349.687
Densidad (v) [kg/m <sup>3</sup> ]	6.49	2.417	2.7093	3.37	2.155	5.28	4.174
Calor latente de fusión (l) [kJ/kg]	228.1041326	79.917	80.193	157.1843091	116.0327221	31.6043	291.528
Calor latente de vaporización (v) [kJ/kg]	398.2615079	425.59	385.71	329.9	496.4501175	236.96	420.121
Viscosidad (l) [Pa·s]	4.04202E-04	9.00E-05	2.03E-04	2.97E-04	2.76E-04	3.79E-04	3.13E-04
Viscosidad (v) [Pa·s]	1.08383E-05	7.47E-06	6.77E-01	8.87E-06	9.26E-06	9.78E-06	9.89E-06
Conductividad térmica [W/mK]	9.3528E-03	1.5650E-01	1.4189E-02	9.2288E-03	8.5962E-03	8.2400E-02	2.5300E-02
Punto de fusión a 1.013 [Bar] [°C]	-107	-187.62	-159	-117	-137	-103	>-137
Punto de ebullición a 1.013 [Bar] [°C]	27.9	-42.11	-0.49	-25.8	-51.65	-26.55	52.7
Entalpía de cambio de fase [kJ/kg]	170.1573753	345.673	305.517	172.7156909	380.4173954	205.3557	128.593
Toxicidad [ppm]	9100	2500	800	No Establecido	36000	50000	1000

Una vez que se tienen propiedades físicas y de seguridad de los fluidos se procederá a realizar la matriz de decisiones, los aspectos de interés antes mencionados tendrán cierto porcentaje de peso sobre el 100%, los porcentajes quedarán distribuidos según se indica en la Tabla 2-3.

Para evaluar los fluidos se necesita entonces conocer su presión de vaporización a 25 [°C], porque se pretende evaporar los fluidos a esa temperatura, la seguridad en su manejo, el efecto ambiental que causa su uso, su costo, el flujo másico y su coeficiente de transferencia de calor.

Cuando se habla de tener el menor flujo másico para la operación de la planta se plantea un factor B que será inversamente proporcional al flujo másico, siendo B [kPa M kJ/kg]:

$$B = p_v * \Delta H_{lg} * M$$

Dónde:

$p_v$  = Presión de saturación a 1.01325 [Bar] en [kPa]

$\Delta H_{lg}$  = Cambio de entalpía por cambio de fase [kJ/kg]

M = Peso molecular [M]

El máximo valor de  $B$  corresponderá al mínimo flujo másico.

Tabla 2-3 Ponderación de las características a evaluar, sugeridas por el autor.

Total	100%
Presión de vapor a 25 [°C] [kPa]	25%
$B$ [kPa M kJ/kg]	20%
$h=cte*\theta$ [J <sup>4</sup> kg <sup>2</sup> /m <sup>9</sup> s <sup>4</sup> kg K]	20%
Clasificación de seguridad	15%
GWP	15%
Costo [\$/kg]	5%

El coeficiente de transferencia de calor por convección  $h$  se puede expresar mediante la siguiente relación:

$$h = \left( \frac{k^3 * \rho_l^2 * \Delta H_{lg}}{\theta * \mu_l * \Delta T} \right)^{1/4}$$

Dónde:

$k$  = Conductividad térmica [W/mK]

$\rho_l$  = Densidad de líquido [kg/m<sup>3</sup>]

$\theta$  = Diámetro de la tubería [m]

$\mu_l$  = Viscosidad dinámica del líquido [Pa·s]

Para cierta  $\Delta T$  y para cierto  $\theta$  se tiene la siguiente expresión:

$$h = constante * \theta$$

El máximo valor de diámetro se asociará una mínima área de transferencia de calor. Se buscará tener la constante mayor.

Tabla 2-4 Características de refrigerantes a evaluar.

	R123	R290 Propano	R600 Butano	R152a	R32	R134a	R410a
Presión de vapor a 25 [°C] [kPa]	90.1425	858.7	294.25	536	1380	570	1487
$B$ [kPa M kJ/kg]	2.35E+06	1.31E+07	5.23E+06	6.11E+06	2.73E+07	1.19E+07	1.39E+07
$h=cte*\theta$ [J <sup>4</sup> kg <sup>2</sup> /m <sup>9</sup> s <sup>4</sup> kg K]	5.200	47.210	6.275	4.383	5.993	25.773	10.496
Entalpía de cambio de fase [kJ/kg]	170.157	345.673	305.517	172.716	380.417	205.356	128.593
Clasificación de seguridad	B1	A3	A3	A2	A2	A2	A1
GWP	90	3	3	124	675	1225	1725
Costo [\$/kg]	85	42.5	85	93.5	76.5	128.01	132.15



Nótese que no se evalúa la entalpía de cambio de fase puesto que ya está implícita en el cálculo de la  $B$  y la  $h$ .

En la Tabla 2-4 se muestra los valores de los aspectos que se evaluarán de cada uno de los refrigerantes.

Una vez que se obtuvieron los valores de las propiedades se hizo una ponderación respecto a los límites inferior y superior de los refrigerantes (Tabla 2-5).

Tabla 2-5 Ponderaciones de las características

PONDERACIONES		
	Valor	%
Presión de vapor a 25 [°C] [kPa]	1487	25
	90.1425	0
$B$ [kPa M kJ/kg]	27,309,251.81	20
	2,345,243.07	0
$h=cfe*\theta$ [J <sup>4</sup> kg <sup>2</sup> /m <sup>9</sup> s <sup>4</sup> kg K]	47.210	20
	4.383	0
Clasificación de seguridad	A1	15
	A2,A3,B1,B2	7.5
	B3	0
GWP	3	15
	1725.00	0
Costo [\$/kg]	42.5	5
	132.15	0

Según los valores obtenidos por cada uno de los refrigerantes se les asigno cierto valor porcentual de acuerdo a la ponderación asignada. El refrigerante que se acercó más a las características deseadas obtuvo el mayor puntaje (Tabla 2-6).

Tabla 2-6 Matriz de decisión

	R123	R290 Propano	R600 Butano	R152a	R32	R134a	R410a
Presión de vapor a 25 [°C] [kPa]	0.0	13.8	3.7	8.0	23.1	8.6	25.0
$B$ [kPa M kJ/kg]	0.0	8.6	2.3	3.0	20.0	7.7	9.2
$h=cfe*\theta$ [J <sup>4</sup> kg <sup>2</sup> /m <sup>9</sup> s <sup>4</sup> kg K]	0.4	20.0	0.9	0.0	0.8	10.0	2.9
Seguridad	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	15.0
GWP	14.2	15.0	15.0	13.9	9.1	4.4	0.0
Costo [\$/kg]	2.6	5.0	2.6	2.2	3.1	0.2	0.0
Total [%]	24.8	69.9	32.0	34.6	63.6	38.4	52.1



El que obtuvo el mayor total fue el R290, es el refrigerante con mayor constante en el coeficiente convectivo, opera en las presiones deseadas y es poco agresivo con el medio ambiente. Aunque tiene un nivel de seguridad intermedio si se tiene un manejo adecuado no se tendrá peligro alguno durante su uso, además ya se emplea en sistemas de refrigeración, por tanto se tiene conocimiento de su correcto uso.

## 2.3 Comparación de eficiencia entre ciclos

En este apartado se calculan las tres configuraciones de los ciclos. Se realizan balances de energía y masa y se determinan los estados de los tres ciclos para determinar la eficiencia, el porcentaje de energía para usos propios y los flujos másicos, con la finalidad de determinar cuál es el que tiene la mejor operación y por tanto convendría más implementar.

Para los 3 ciclos se tomaron las consideraciones de la Tabla 2-7, las eficiencias son las características de los equipos, la velocidad para agua fría y caliente es la recomendada, así como el  $\Delta T$  para el agua fría de mar, en cuanto al coeficiente de rugosidad que es el corresponde al polietileno de alta densidad.

Tabla 2-7 Datos para el cálculo de estados de los ciclos.

Datos	
Gravedad [m/s <sup>2</sup> ]	9.81
$\Delta z$ tubo de agua fría [m]	1003
$\Delta z$ tubo de agua tibia [m]	23
Eficiencia de la bomba agua tibia	80%
Eficiencia del evaporador	80%
Eficiencia de la turbina	80%
Eficiencia del generador	95%
Eficiencia de la bomba de agua fría	80%
Velocidad de agua fría y caliente [m/s]	2
$\Delta T$ agua fría de mar [°C]	6.2
Coefficiente de Rugosidad "e" [m]	0.00025

### 2.3.1 Ciclo Abierto

En la Figura 2.3 se muestran los estados del ciclo abierto.

Se considera que el agua tibia de mar está a 25 [°C] y el agua fría a 4 [°C] y que tan solo el 5% del agua tibia de mar se convierte en vapor seco.

Las ecuaciones de balance de energía y masa son las siguientes:

El trabajo real de la turbina:

$$W_{TR} = \dot{m}_4(h_4 - h_{5r})$$

$$h_{5r} = h_4 - \eta_T(h_4 - h_{5s})$$

Dónde:

$W_{TR}$ = Trabajo real de la turbina [kW]

$\eta_T$ = Eficiencia de la turbina [%]

$\dot{m}_4$ = Flujo másico de la turbina [kg/s]

$h$ = Entalpía [kJ/kg]

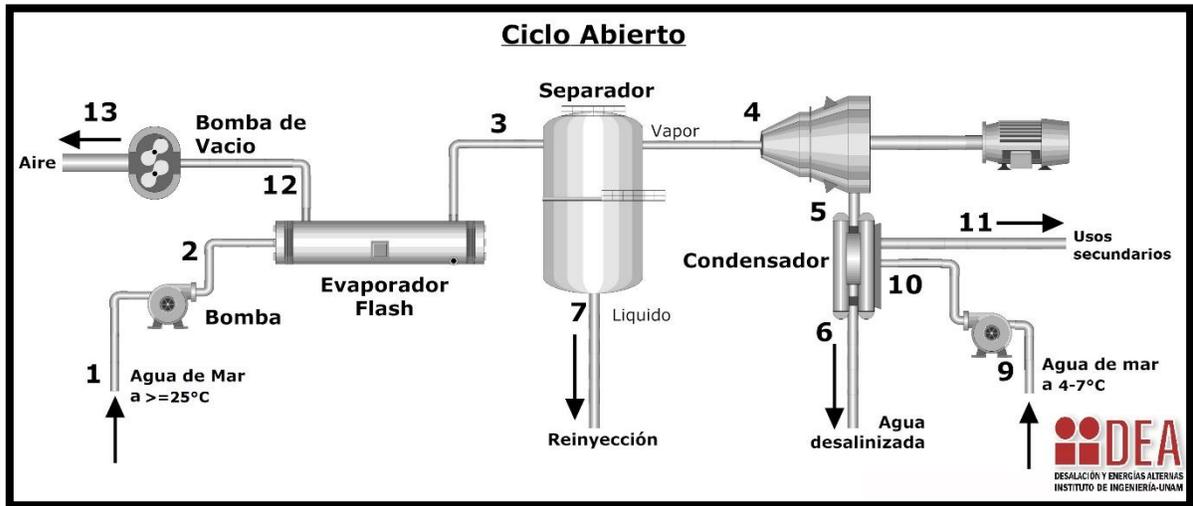


Figura 2.3 Estados del ciclo abierto (Grupo iiDEA. 2016)

Trabajo real de las bombas de agua fría y agua tibia de mar:

$$W_{BR} = \frac{\rho g Q H}{\eta_B}$$

Dónde:

$W_{BR}$ = Trabajo real de la bomba

$\rho$ = Densidad [kg/m<sup>3</sup>]

$g$ = Gravedad [m/s<sup>2</sup>]

$Q$ = Caudal másico [m<sup>3</sup>/s]

$H$ = Carga de la bomba [m]

$\eta_B$ = Eficiencia de la bomba [%]

$$H = h_f + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + z_2 - \frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + z_1$$



Dónde:

$h_f$  = Disipación de energía por fricción [m]

$z_2$  = Altura final [m]

$z_1$  = Altura inicial [m]

$\gamma$  = Peso específico [ $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}^2$ ]

$v_2$  = Velocidad final [m/s]

$v_1$  = Velocidad inicial [m/s]

$$h_f = f \left( \frac{L}{\theta} \right) \left( \frac{v^2}{2g} \right) + k \left( \frac{v^2}{2g} \right)$$

El primer término corresponde a la caída de presión en tuberías, mientras que el segundo término corresponde a la caída de presión en accesorios.

Dónde:

$f$  = Coeficiente de fricción

$L$  = Longitud de tubería [m]

$v$  = Velocidad media del fluido [m/s]

$K$  = Coeficiente empírico de caída de presión en accesorios

El coeficiente de fricción se obtiene del diagrama de Moody en función del número de Reynolds y de la rugosidad relativa.

$$f = f(Re, \varepsilon r)$$

$$Re = \frac{\theta v \rho}{\mu} \quad \varepsilon r = \frac{\varepsilon}{\theta}$$

Dónde:

$Re$  = Número de Reynolds

$\varepsilon r$  = Rugosidad relativa

$\varepsilon$  = Coeficiente de rugosidad del material [m]

Este balance aplica tanto para la bomba de agua fría como para la de agua caliente, al ser diferentes las propiedades del agua en los estados 1 y 9, y 2 y 11, el trabajo de las bombas será diferente.

En el caso del condensador:

$$Q_C = Q_{AF}$$

$$\dot{m}_5(h_5 - h_6) = \dot{m}_{10}(h_{11} - h_{10})$$

Dónde:

$Q_C$ = Calor del condensado [kW]

$Q_{AF}$ = Calor del agua de enfriamiento [kW]

$\dot{m}_5$ = Flujo másico del fluido de trabajo [kg/s]

$\dot{m}_{10}$ = Flujo másico del agua de enfriamiento [kg/s]

Para el evaporador flash:

$$Q_{EF} = \dot{m}_2(h_3 - h_2)$$

Dónde:

$Q_{EF}$ = Calor del evaporador flash [kW]

El balance de masa es el siguiente:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_3 = \dot{m}_4 + \dot{m}_7$$

$$\dot{m}_9 = \dot{m}_{10} = \dot{m}_{11}$$

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_5 = \dot{m}_6$$

$$\dot{m}_4 = 0.05 * \dot{m}_3$$

### 2.3.2 Ciclo Cerrado

En la Figura 2.4 se observan los estados del ciclo cerrado. Se considera que el agua tibia de mar está a 25 [°C] y el agua fría a 4 [°C], suponemos que a la salida de la turbina el fluido de trabajo es vapor sobrecalentado para evitar daños en la turbina, el fluido de trabajo es propano, el fluido se determinó a partir de la matriz de decisiones realizada en el anterior apartado.

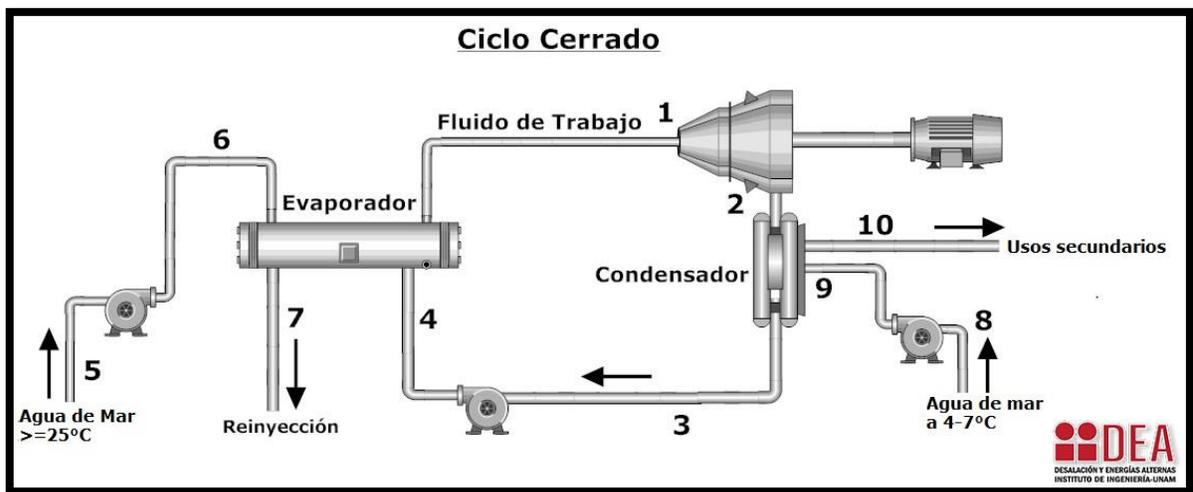


Figura 2.4 Estados del ciclo cerrado (Grupo iiDEA. 2016)



Las ecuaciones de balance de energía y masa son las siguientes:

El trabajo real de la turbina:

$$W_{TR} = \dot{m}_1(h_1 - h_{2r})$$
$$h_{2r} = h_1 - \eta_T(h_1 - h_{2s})$$

Dónde:

$W_{TR}$ = Trabajo real de la turbina [kW]

$\eta_T$ = Eficiencia de la turbina [%]

$\dot{m}_1$ = Flujo másico de la turbina [kg/s]

$h_r$ = Entalpía real [kJ/kg]

$h_s$ = Entalpía isentrópica [kJ/kg]

El trabajo real de la bomba del ciclo de potencia:

$$W_{BR} = \dot{m}_3(h_{4r} - h_3)$$
$$h_{4r} = \frac{(h_{4s} - h_3)}{\eta_B} + h_3$$

Dónde:

$W_{BR}$ = Trabajo real de la bomba [kW]

$\eta_B$ = Eficiencia de la bomba [%]

$\dot{m}_3$ = Flujo másico de la bomba [kg/s]

El trabajo de las bombas de agua fría y agua caliente se calcula igual que en el ciclo abierto.

Para el evaporador:

$$Q_E = Q_{FT}$$
$$\dot{m}_6(h_6 - h_7) = \dot{m}_4(h_1 - h_4)$$

Dónde:

$Q_E$ = Calor del evaporador [kW]

$Q_{FT}$ = Calor del fluido de trabajo [kW]

$\dot{m}_6$ = Flujo másico del agua tibia de mar [kg/s]

En el caso del condensador:

$$Q_C = Q_{AF}$$

$$\dot{m}_2(h_2 - h_3) = \dot{m}_9(h_{10} - h_9)$$

Dónde:

$Q_C$ = Calor del condensado [kW]

$Q_{AF}$ = Calor del agua de enfriamiento [kW]

$\dot{m}_2$ = Flujo másico del fluido de trabajo [kg/s]

$\dot{m}_9$ = Flujo másico del agua de enfriamiento [kg/s]

Nótese que se consideran sistemas con eficiencia térmica del 100%.

El balance de masa es el siguiente:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_3 = \dot{m}_4$$

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_6 = \dot{m}_7$$

$$\dot{m}_8 = \dot{m}_9 = \dot{m}_{10}$$

### 2.3.3 Ciclo Híbrido

En la Figura 2.5 se muestran los estados del ciclo híbrido. Para este ciclo se consideró el agua tibia de mar a 25 [°C] y el agua fría a 4 [°C], el fluido de trabajo también será propano. Se considera que el estado 5 es vapor seco, es decir con calidad 1. Se considera que en el evaporador 1 se evapora el 80% del agua de mar.

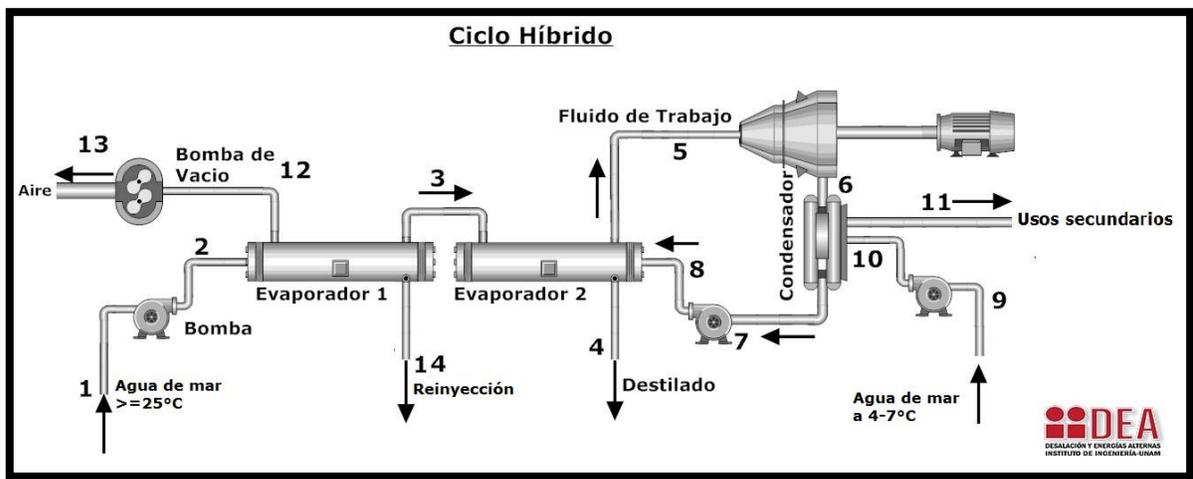


Figura 2.5 Estados del ciclo Híbrido (Grupo iiDEA. 2016)



Las ecuaciones de balance de energía y masa son las siguientes:

El trabajo real de la turbina:

$$W_{TR} = \dot{m}_5(h_5 - h_{6r})$$
$$h_{6r} = h_5 - \eta_T(h_5 - h_{6s})$$

Dónde:

$W_{TR}$ = Trabajo real de la turbina [kW]

$\eta_T$ = Eficiencia de la turbina [%]

$\dot{m}_5$ = Flujo másico de la turbina [kg/s]

$h_r$ = Entalpía real [kJ/kg]

$h_s$ = Entalpía isentrópica [kJ/kg]

El trabajo real de la bomba del ciclo de potencia:

$$W_{BR} = \dot{m}_7(h_{8r} - h_7)$$
$$h_{8r} = \frac{(h_{8s} - h_7)}{\eta_B} + h_7$$

Dónde:

$W_{BR}$ = Trabajo real de la bomba [kW]

$\eta_B$ = Eficiencia de la bomba [%]

$\dot{m}_7$ = Flujo másico de la bomba [kg/s]

El trabajo de las bombas de agua fría y agua caliente de mar se calcula igual que en el ciclo abierto.

Para el evaporador 2:

$$Q_{E2} = Q_{FT}$$
$$\dot{m}_3(h_3 - h_4) = \dot{m}_5(h_5 - h_8)$$

Dónde:

$Q_{E2}$ = Calor del evaporador [kW]

$Q_{FT}$ = Calor del fluido de trabajo [kW]

$\dot{m}_3$ = Flujo másico del vapor de agua tibia de mar [kg/s]



En el caso del condensador:

$$Q_C = Q_{AF}$$
$$\dot{m}_6(h_6 - h_7) = \dot{m}_9(h_{11} - h_{10})$$

Dónde:

$Q_C$ = Calor del condensado [kW]

$Q_{AF}$ = Calor del agua de enfriamiento [kW]

$\dot{m}_6$ = Flujo másico del fluido de trabajo [kg/s]

$\dot{m}_9$ = Flujo másico del agua de enfriamiento [kg/s]

Nótese que se consideran sistemas con eficiencia térmica del 100%.

El balance de masa es el siguiente:

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_6 = \dot{m}_7 = \dot{m}_8$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_3 + \dot{m}_{14}$$

$$\dot{m}_3 = 0.8(\dot{m}_2)$$

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4$$

$$\dot{m}_9 = \dot{m}_{10} = \dot{m}_{11}$$

El trabajo neto para los tres ciclos será:

$$W_n = W_{TR} - W_B$$

Y la eficiencia:

$$\eta = \frac{Q_E}{W_n}$$

Dónde:

$W_n$ = Trabajo neto [kW]

$W_{TR}$ = Trabajo real de la turbina [kW]

$W_B$ = Trabajo de las bombas, tanto de agua de mar como fluido de trabajo [kW]

$\eta$ = Eficiencia de primera ley [%]

$Q_E$ = Calor del evaporador [kW]

En la Tabla 2-8 se presentan algunos datos de interés de cada uno de los ciclos.



Se determinó que el ciclo más eficiente es el ciclo híbrido. Sin embargo este tipo de ciclos aún no se han construido ni probado. Por otro lado los ciclos abierto y cerrado tienen una eficiencia muy parecida, pero el ciclo abierto tiene la ventaja de proveer agua desalinizada.

Tabla 2-8 Comparación de eficiencias de los ciclos OTEC

	Ciclo Abierto	Ciclo cerrado R290	Ciclo Híbrido R290
<b>Wneto [kW]</b>	1,000.0	1,000.0	1,000.0
<b>Wbruto [kW]</b>	1,654.74	3,167.47	2,310.24
<b>% de usos propios</b>	39.57%	68.43%	56.71%
<b>Q necesario [kW]</b>	60,715.01	156,998.07	84,552.84
<b><math>\dot{m}</math> agua tibia [kg/s]</b>	24.90	14,813.85	43.29
<b><math>\dot{m}</math> fluido de trabajo [kg/s]</b>	NA	427.67	230.29
<b><math>\dot{m}</math> agua fría [kg/s]</b>	2,318.13	4,614.94	4,979.46
<b><math>\dot{m}</math> agua desalinizada [m<sup>3</sup>/día]</b>	35.85	NA	49.87
<b><math>\eta</math> del ciclo</b>	1.65%	0.64%	1.18%

## 2.4 Limitaciones técnicas

La principal limitación es la baja eficiencia que se tiene en estos ciclos, pues la eficiencia del ciclo no compite con centrales eléctricas convencionales. Sin embargo la alta disponibilidad del recurso permite tener un factor de planta alto.

Otra limitación es la potencia empleada en los usos propios de las plantas, esto debido a los grandes flujos másicos de agua fría y agua caliente necesaria para la generación, al necesitar tanta agua y recorrer grandes distancias en llegar a la planta se tienen grandes caídas de presión, por lo que las bombas de agua tibia y fría de mar consumen de un 20-30% de la energía generada. Como consecuente de los grandes flujos se necesita tubería de un gran diámetro, por tanto la planta más grande podría ser de 100 MW. Si se trata de un ciclo abierto en el que se trabaja con vapor de baja presión, el límite en el diseño de las turbinas es de 2.5 MW<sup>1</sup>.

Al manejarse tuberías tan grandes se presentan dificultades de diseño y desempeño, pero ya hay investigaciones al respecto por parte de Instituciones Estadounidenses que simulan la tubería en programas computacionales, además de que la fabricación es complicada, el transporte y la instalación.

Para el caso de las plantas OTEC off shore se necesitan cables submarinos para transportar la electricidad a tierra firme y se tiene que mantener la ubicación deseada del barco.

<sup>1</sup> Vega, L.A. (1999).



## Conclusión

Una vez que se conocen todos los estados de cada uno de los ciclos se puede determinar que ciclo es más eficiente, en este caso resultó ser el ciclo híbrido, sin embargo para continuar con este trabajo y que su finalidad es realizar una evaluación económica que promueva el interés de inversionistas públicos o privados de que este tipo de plantas es viable, al ser un tipo de planta que ya tiene por su naturaleza altos riesgos, se preferirá seleccionar el ciclo abierto, puesto que ya hay prototipos construidos y probados y las dificultades que se presenten durante su construcción y operación serán más fáciles de resolver.

A pesar de tener limitaciones técnicas que tiene y que son de gran importancia para el desarrollo de este tipo de plantas, se pretende que con el seguimiento a las investigaciones de este tipo de tecnología se logre aumentar la eficiencia de los ciclos para que compita con otras tecnologías de generación eléctrica.

Hay que resaltar que una planta de este tipo situada en una isla dónde el agua es vital y cara, los combustibles indispensables y caros se puede competir en el mercado con la instalación de una planta OTEC, puesto que la disponibilidad de agua fría y caliente es prácticamente permanente.



## 3. Análisis económico de una planta OTEC de 1MWe de ciclo abierto.

---

### Introducción

En este capítulo se realizará la evaluación financiera de la planta OTEC y se determinará su rentabilidad.

Se realizará una descripción técnica de la planta incluyendo su ubicación, los costos de inversión, operación y mantenimiento, para poder definir costos e ingresos de una manera más precisa.

Posteriormente se describen y se calculan indicadores importantes como el Valor Presente Neto, la Tasa Interna de Retorno, el Periodo de Recuperación Descontado, entre otros, que ayudan a optimizar la toma de decisiones para la realización de algún proyecto y saber si el proyecto es viable monetariamente hablando o no.

Los proyectos de generación eléctrica pueden tener un esquema de inversiones y costos de operación de forma que el costo sea el mínimo o ayude a que el VPN del proyecto aumente. Para calcular la tasa de interés se tomarán en cuenta los rendimientos corrientes del mercado mexicano y la tasa interbancaria. Se comparará un esquema sin financiamiento y con un financiamiento del 50 % para ver cómo varían los indicadores y ver en que esquema se recomienda la realización del proyecto.

### 3.1 Metodología de la evaluación

La ingeniería económica utiliza conceptos matemáticos para analizar, comparar y evaluar en términos monetarios los beneficios del proyecto, tomando en cuenta los costos del mismo. En este sentido, se empezará por describir la planta OTEC que se evaluará y conocer algunos conceptos de la ingeniería económica.

#### 3.1.1 Descripción técnica de la planta OTEC

Los puntos técnicos importantes a describir son:

- La ubicación del lugar: La ubicación de la planta se propone en la isla de Cozumel en el suroeste de la isla puesto que no es una área natural protegida (Figura 3.1), se propone la isla de Cozumel dado que es un escenario favorable para la planta OTEC, además se cuenta con las condiciones batimétricas requeridas.
- Aspectos técnicos: Se evaluará la factibilidad económica de una planta OTEC de ciclo abierto para poder tener como producto secundario el agua desalinizada.
- Costos de operación y mantenimiento: Son los costos directos e indirectos de mano de obra, administrativos, refacciones y equipo asociados con la operación y mantenimiento de centrales

generadoras. Los costos de operación y mantenimiento para la evaluación financiera se consideraran similares a los de tecnologías convencionales, se tomará el promedio de los costos de varias plantas en México. Hay costos fijos que son independientes de la energía que se produzca y hay costos que variarán según la energía generada, los costos variables suelen ser los servicios de agua y servicios de mantenimiento mayores.

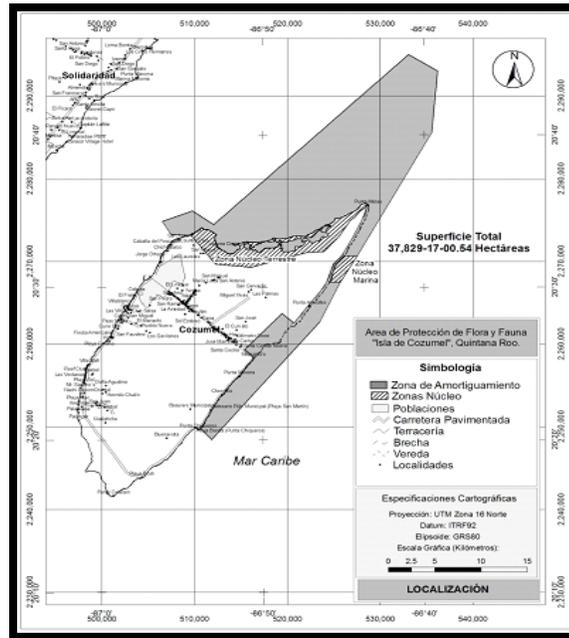


Figura 3.1 Polígono de áreas Naturales protegidas en la isla de Cozumel (Diario Oficial de la Federación. 2012)

Tabla 3-1 Distribución de costos de inversión para plantas de 1 MWe.

Concepto	Vega (2016)		Muralidharan (2016)		Vega (2010)		Muralidharan (2012)	
	Monto [ \$ ]		Monto [ \$ ]		Monto [ \$ ]		Monto [ \$ ]	
Intercambiadores de calor	\$ 239,991,206	26%	\$ 146,237,973	20%	\$ 201,318,016		\$ 131,900,400	
Turbina y generador	\$ 203,069,482	22%	\$ 73,118,987	10%	\$ 170,346,013		\$ 65,950,200	
Tubería y bombas de agua	\$ 119,995,603	13%	\$ 365,594,934	50%	\$ 100,659,008		\$ 329,751,000	
<b>Subtotal Maquinaria y equipo</b>	<b>\$ 563,056,292</b>		<b>\$ 584,951,894</b>		<b>\$ 472,323,037</b>		<b>\$ 527,601,600</b>	
Casa de Maquinas	\$ 239,991,206	26%	\$ 109,678,480	15%	\$ 201,318,016		\$ 98,925,300	
Otros	\$ 119,995,603	13%	\$ 36,559,493	5%	\$ 100,659,008		\$ 32,975,100	
<b>Subtotal Construcciones</b>	<b>\$ 359,986,810</b>		<b>\$ 146,237,973</b>		<b>\$ 301,977,023</b>		<b>\$ 131,900,400</b>	
<b>Total</b>	<b>\$ 923,043,102</b>		<b>\$ 731,189,867</b>		<b>\$ 774,300,060</b>		<b>\$ 659,502,000</b>	

- Costos de inversión: En cuanto a los costos de la inversión de la instalación de un ciclo OTEC va a variar dependiendo del tipo de planta que se trate, del tamaño, de la ubicación, así como por la complicación que conlleve su infraestructura, sin embargo hay que considerar que se obtienen ventajas en cuanto a costos mientras más se expanda el proyecto. Se tienen dos propuestas de costos para la inversión en la Tabla 3-1, dónde se observa que los costos en el 2010 son mayores



un 17%, esto se debe a que el desarrollo tecnológico disminuye el costo de dicha tecnología. Para el análisis se actualizarán los costos de inversión con el Índice Nacional de Precios al Consumidor (INPC) y se considerarán los costos más altos, para planear el peor escenario para la realización del proyecto. Se propondrá que la construcción de la planta se lleve a cabo en dos años.

- Esquema de inversiones: El esquema de inversiones es el calendario de inversiones que se sigue para construir la planta. Se propone que el programa de inversión sea según la Tabla 3-2.

Tabla 3-2 Calendario de inversiones.

Mes	Porcentaje de inversión
1	10%
2	-
3	-
4	10%
5	-
6	-
7	10%
8	-
9	-
10	-
11	10%
12	-
13	-
14	15%
15	-
16	-
17	15%
18	-
19	-
20	15%
21	-
22	-
23	15%
24	-
<b>TOTAL</b>	<b>100%</b>

- Esquema de financiamiento: Los financiamientos son muy comunes para poder desarrollar proyectos de gran envergadura como es la construcción de una planta eléctrica, hay que ser muy cuidadosos al elegir la entidad que financiará el proyecto y cómo se maneja la deuda que se contraiga, el concepto de apalancamiento financiero hace referencia a qué grado una empresa depende de la deuda y cómo maneja la deuda. Algunas ventajas de un buen manejo de deuda es que se puede hacer uso de la deuda para maximizar utilidades o si una empresa cuenta con apalancamiento (endeudamiento) pagará menos impuestos (Figura 3.2).

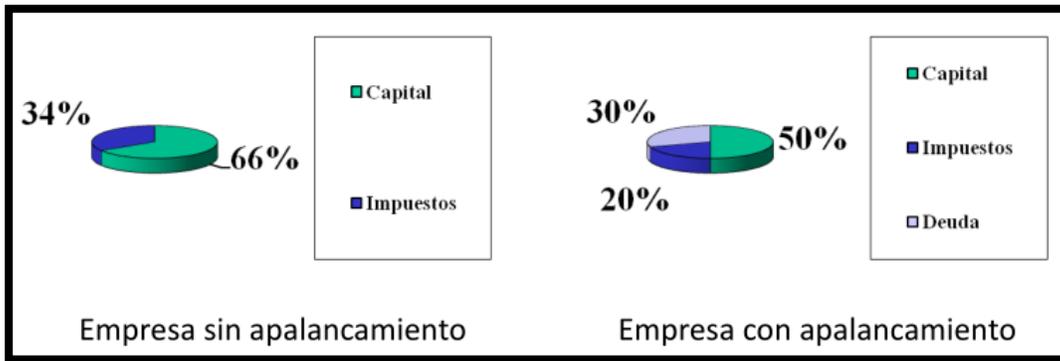


Figura 3.2 Porcentaje de impuestos a pagar según porcentaje de apalancamiento (Rodiles, F.. 2014)

Para este análisis se considerarán un caso con un 50 % de financiamiento en la inversión, la tasa de interés dependerá de la inflación y de la tasa de interés interbancaria (TIIE), así como una sobretasa, que para este caso será considerada del 4% (Tabla 3-3).

Tabla 3-3 Tasas de interés e inflación (Banco de México. 2016).

Impuestos, tasas de interés e inflación	
<b>TIIE prom</b>	4.43%
<b>TIIE prom. + Margen (4%)</b>	8.43%
<b>Inflación</b>	3.00%

- Marco legal: El marco legal que adoptaría el desarrollo de la planta OTEC sería de “Pequeña producción”, dónde la electricidad generada sería en su totalidad para la venta a CFE, no se podrán exceder los 30 [MW]. En el caso de producirse para autoconsumo se deben constituir cooperativas de consumo, copropiedades o asociaciones civiles y los proyectos no podrán exceder 1 [MW].
- Economía de escala: La economía de escala se refiere a que el costo nivelado de un bien no es directamente proporcional con su capacidad, es decir que al aumentar la producción de un producto se observa que los costos por kW instalado van disminuyendo. En las plantas OTEC sucede lo mismo, los costos varían según su tamaño y la ubicación de la instalación de acuerdo a la Figura 3.3.

### 3.1.2 Conceptos de evaluación financiera.

Existen dos métodos para llevar a cabo la evaluación de proyectos, considerando el valor del dinero en el tiempo o no. Siempre es mejor considerar el valor del dinero en el tiempo, puesto que el dinero se puede invertir en negocios que obtengan alguna ganancia o puede perderla debido a la inflación.

Para llevar a cabo la evaluación sin considerar el valor del dinero en el tiempo está el método del periodo de recuperación y el método de tasa de rendimiento contable, si se toma el valor del dinero en el tiempo se usa el método del valor presente neto y el método de la tasa interna de rendimiento.

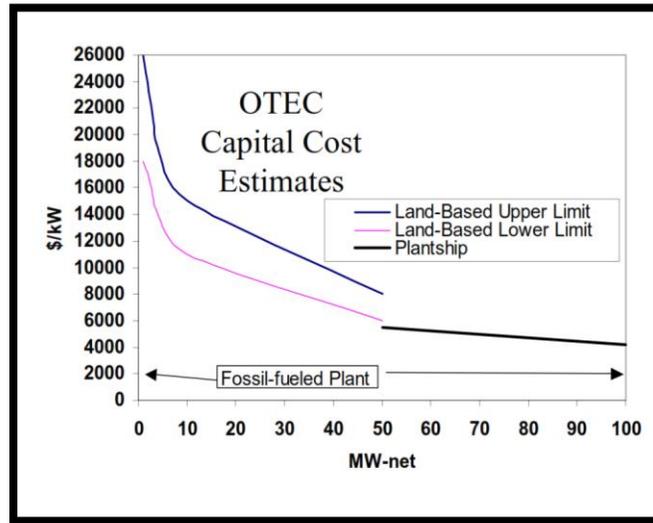


Figura 3.3 Principio de la economía de escala (Vega L.A.. 1992)

Hay que comenzar por definir lo que es la evaluación de proyectos y saber qué tipo de análisis existen.

La evaluación de proyectos se refiere al “proceso de identificar, cuantificar y valorar los costos y beneficios que se generen de este, en un determinado periodo de tiempo. Siendo su objetivo, determinar si la ejecución del proyecto es conveniente para quien lo lleve a cabo. De este proceso, la identificación de beneficios es el paso más importante, ya que a partir de ésta, se basa el análisis para decidir la conveniencia de llevar a cabo un proyecto.” (Meixueiro G., J. & Pérez C., M.A.. 2008).

Existen ciertos criterios de inversión que se miden para saber si el proyecto en el que se planea invertir es rentable o no y si es la mejor forma de inversión.

- **Valor Presente neto (VPN):** El valor presente neto de un proyecto de inversión no es otra cosa que su valor medido en dinero de hoy, o expresando esta idea de otra manera, es el equivalente en pesos actuales de todos los ingresos y egresos, presentes y futuros, que constituyen el proyecto.

Si una inversión genera valor para sus propietarios, vale la pena efectuarla. El valor presente neto en una medida de cuanto valor se crea o agrega hoy al efectuar una inversión.

El VPN se calcula con la siguiente fórmula:

$$VPN = -I_o + \sum_{t=0}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t}$$

Dónde:

$FC_t$ = Flujo de caja total en el año t

$I_o$ = Inversión inicial

$n$ = Número de años del horizonte de la evaluación



$i$ = Tasa de descuento

$t$ = El año en cuestión

Para obtener el Valor Presente Neto necesitamos los flujos de caja y la tasa bajo la cual rendirá el dinero.

- **Tasa Interna de Retorno (TIR):** Mide la rentabilidad promedio anual que genera el capital que permanece invertido en un proyecto. Es la tasa de descuento que iguala a cero el valor presente neto. Es propia del proyecto y dependerá de los flujos de caja.

Para un proyecto de inversión conviene que la TIR sea mayor que la tasa del mercado, porque el valor presente neto será mayor que cero. Si se trata de un proyecto de financiamiento conviene que la tasa del mercado sea mayor que cero porque tendrá un valor presente neto negativo el proyecto.

$$VPN = -I_0 + \sum_{t=0}^n \frac{FC_t}{(1 + TIR)^t} = 0$$

Dónde:

$TIR$ = Tasa Interna de Retorno

- **Periodo de recuperación descontado (PRD):** Es el plazo en el que se recuperará la inversión inicial con los flujos de caja futuros considerando el valor del dinero en el tiempo.

$$I_0 = \sum_{t=1}^{PRD} \frac{FC_t}{(1 + i)^t}$$

Dónde:

$I_0$ = Inversión inicial

$FC$ = Flujo de caja

Este indicador es muy claro para tomar decisiones de inversión, pero requiere un límite en el horizonte, el resultado se puede ver sesgado para proyectos a largo plazo de investigación y desarrollo.

Se definirán algunos conceptos necesarios para determinar el valor de los criterios a considerar para poder decidir si invertir en un proyecto o en otro.

- **Flujo de caja (FC):** El flujo de caja es la diferencia entre ingresos y costos de un periodo, los periodos suelen ser medidos en años, constituye un indicador importante de la liquidez de una empresa, además ayuda a evaluar la capacidad que tiene una empresa de cumplir con sus obligaciones y repartir utilidades. Es un estado financiero dinámico y acumulativo. El FC se calculó siguiendo el algoritmo de la Tabla 3-4.

Tabla 3-4 Algoritmo para calcular el flujo de caja

Flujo de caja	
+	Ingresos por ventas
-	Costos operativos y de mantenimiento
-	Gastos generales de administración
-	Depreciación
=	UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS
-	ISR
-	PTU
=	UTILIDAD DESP. DE IMPUESTOS
+	Depreciación
-	Inversiones netas
+/-	Cambios en el capital de trabajo
+	Valor de rescate
=	Flujo de caja libre

Los **ingresos por ventas** se refieren a los ingresos que hubo por la venta de la producción generada. El precio en México depende de la región y del tipo de uso que se le dé, ya sea industrial, comercial, domésticas, entre otras.

Tabla 3-5 Costos de referencia para plantas OTEC (Comisión Federal de Electricidad. 2014)

	Costos de operación y mantenimiento fijo [pesos/MW-año]	Costos de operación y mantenimiento variable [pesos/MWh-año]
Termoeléctrica convencional	\$ 359,276	\$ 27.72
Turbogas aeroderivada	\$ 272,336	\$ 40.57
Turbogas industrial gas	\$ 108,184	\$ 53.17
Turbogas aeroderivada diesel	\$ 268,191	\$ 41.20
Ciclo combinado gas	\$ 279,985	\$ 50.40
Combustión interna	\$ 772,178	\$ 100.04
Carboeléctrica	\$ 454,016	\$ 32.76
Nuclear	\$ 1,222,200	\$ 27.72
Geotermoeléctrica	\$ 1,341,623	\$ 0.63
Hidroeléctrica	\$ 290,657	\$ -
Eólica	\$ 312,102	\$ -
Solar fotovoltaica	\$ 258,300	\$ -

Los **costos operativos y de mantenimiento** pueden ser de tipo fijo y variable, en análisis hechos a las plantas OTEC por otros autores consideran precios similares a los de tecnologías convencionales, en este caso se consideraran los valores de referencia de la Tabla 3-5. Para los costos de operación y mantenimiento fijos se tomó un promedio de todas las tecnologías y para los costos variables se tomó la más alta de las tecnologías renovables que en este caso son las geotermoeléctricas. Otro costo operativo que se tomó en cuenta es el porteo, es lo que cobra



CFE por inyectar energía a sus líneas de transmisión, las tarifas varían dependiendo si es alta, media o baja tensión. Pero según la tecnología de la que se trate que está inyectando la energía es el costo, en el caso de las energías renovables CFE ha fijado los costos de la Tabla 3-6:

Tabla 3-6 Costo de porteo para energías renovables (CRE. 2015)

<b>Costo Transmisión de energía (Porteo)</b>	<b>0.03899</b>	<b>\$/kWh</b>	<b>Alta tensión</b>
	<b>0.03899</b>	<b>\$/kWh</b>	<b>Media tensión</b>
	<b>0.07799</b>	<b>\$/kWh</b>	<b>Baja tensión</b>

La **depreciación** es el valor que pierden las construcciones y la maquinaria debido al desgaste que genera su uso. El porcentaje bajo el cual se deprecian se menciona en la Ley de Impuesto Sobre la Renta (LISR). Se considera como una salida de efectivo puesto que esa salida corresponde a la reserva que se debe hacer para su eventual cambio. La construcción se depreciará un 5% cada año, mientras que la maquinaria y equipo para la generación de energía proveniente de fuentes renovables 100% cada año (Los impuestos. 2014).

La **participación de los trabajadores en las utilidades (PTU)** es un derecho que tienen los trabajadores de recibir una parte de las utilidades generadas por la empresa, estas utilidades se presentan conforme a la Declaración Anual que se presentan a las autoridades fiscales, que en este caso es el Servicio de Administración Tributaria (SAT). Por ley se deben repartir el 10% (Servicio de Administración Tributaria. 2016) de las utilidades después de impuestos.

El **impuesto sobre la renta (ISR)** es el impuesto que se genera cuando se ha obtenido un ingreso o utilidad, la cantidad base para pagar el impuesto sobre la renta es después de la repartición de utilidades, aplica para personas físicas y morales. El impuesto para personas morales con fines lucrativos es de 30% (Servicio de Administración Tributaria. 2014).

Las **inversiones netas**: Son aquellas que se usan directamente en la producción o a bienes de consumo, equivale a la acumulación de activos físicos. Es igual a la inversión bruta menos la depreciación.

El **capital de trabajo** es cierta cantidad monetaria de la que dispone cierta empresa para continuar con sus actividades programadas a corto plazo, esta cantidad debe cubrir gastos de materias primas, mano de obra, gastos operativos, entre otros. No se deben considerar gastos financieros, impuestos ni de utilidades para su cálculo. Se considerará un egreso cuando sea necesario un aumento del capital con respecto al periodo anterior, o bien, un ingreso, si para tal ciclo las necesidades fueron menores.

- **Tasa de descuento**: La tasa de descuento es la tasa a la cual rendirá el dinero invertido en el proyecto. Esta tasa depende del mercado en el que se encuentre y es por ello que hay que considerar para determinar la tasa de descuento el rendimiento libre de riesgo, el rendimiento del mercado, el riesgo de la inversión y la componente inflacionaria, para pronosticar la tasa lo más exacta posible.

La tasa de descuento permite traer los flujos de efectivo libre a valor presente y es una tasa que incorpora la rentabilidad deseada por el inversionista y por enlace, el riesgo que está dispuesto



a asumir al realizar dicha inversión. La tasa se encuentra en función de las fuentes de financiamiento para efectuar la inversión. Si se trata de capital propio la tasa se conoce como costo de capital o capital de riesgo (CAPM), si además de capital propio intervienen otras fuentes externas como por ejemplo deuda, (efecto de apalancamiento), la tasa empleada se conoce como WACC.

### **Apalancamiento financiero**

El apalancamiento financiero es una forma de medir el efecto que tiene sobre la rentabilidad de los capitales propios el endeudamiento. Es por ello que se dice apalancamiento, pues los fondos obtenidos de algún préstamo se utilizan para aumentar las posibilidades de inversión y maximizar las utilidades netas del proyecto.

Mientras mayor sea la deuda que se tiene se dice que es mayor el apalancamiento. La condición para que se produzca un apalancamiento amplificador en las utilidades netas es que la rentabilidad de las inversiones sea mayor que el interés de las deudas pues el tener un gran endeudamiento implica pagar una gran cantidad de intereses de la deuda, cosa que no conviene para el efecto de crear ganancias.

Es una relación entre capital propio y crédito utilizado en la operación financiera, y por lo general se mide en fracciones, por ejemplo un apalancamiento de  $\frac{1}{2}$  quiere decir que por cada peso invertido hay uno de deuda, una apalancamiento de  $\frac{1}{3}$  entonces es que por cada peso invertido, dos pesos son de deuda.

### **Tasas de riesgo del mercado**

El riesgo de un proyecto se define como la variabilidad de los flujos de caja reales respecto a los estimados. Mientras más grande sea esta variabilidad, mayor es el riesgo del proyecto. De esta forma, el riesgo se manifiesta en la variabilidad de los rendimientos del proyecto, puesto que se calculan sobre la proyección de los flujos de caja.

Existen dos tipos de riesgos, el específico que afecta a una compañía en particular y el sistémico que afecta todo el mercado en el que te encuentres, es decir empresas del mismo sector.

Los riesgos sistémicos o no diversificables se pueden medir, a esta medida se le conoce como Beta  $\beta$  y mide la respuesta de una valor a los movimientos el portafolio del mercado.

$$\beta = \frac{Cov(Ri, Rm)}{\sigma^2(Rm)}$$

Dónde:

*Cov*= Covarianza entre activos y el mercado

*Ri*= Rendimiento del activo

*Rm*= Rendimiento del portafolio del mercado

$\sigma^2$ = Varianza del mercado



Si  $\beta$  tiene valores negativos quiere decir que cuando la rentabilidad del mercado sube, la de la acción baja, y viceversa.

$\beta < 1$  Menos riesgo que el mercado

$\beta = 1$  Riesgo del mercado

$\beta > 1$  Más riesgo que el mercado

Algunas empresas publican en línea en páginas de economía el valor de su  $\beta$  apalancada, estos valores se pueden tomar como indicadores de la varianza del mercado y del rendimiento de los activos, lo ideal es que las  $\beta$  tengan un valor positivo menor que 1, así el riesgo no será mayor al del mercado.

Para poder desapalancar la  $\beta$  que se publica se usa la siguiente ecuación:

$$\beta_1 = \frac{\beta_2}{1 + (1 - ISR) \left(\frac{D}{E}\right)}$$

Dónde:

$\beta_2$ = Beta apalancada

$\beta_1$ = Beta desapalancada

*ISR*= Impuesto Sobre la Renta

$\frac{D}{E}$ = Relación deuda capital

### Costo de Capital

También conocido por sus siglas en inglés como CAPM (Capital Asset Price Model), se usa para determinar la tasa de rentabilidad teórica de un activo, se considera el riesgo diversificado del portafolio y se determina la rentabilidad y el riesgo de la cartera total. También considera la  $\beta$  del mercado, la rentabilidad esperada del mercado y la rentabilidad de un activo libre de riesgo. Se calcula con la siguiente fórmula:

$$CAPM = R_F + \beta(R_M - R_F)$$

Dónde:

*CAPM*= Rentabilidad esperada de un título

$R_F$ = Tasa sin riesgo

La tasa libre de riesgo se puede obtener de Certificados de la Tesorería (CETES) de la página del Banco de México en estadísticas de mercados financieros, mientras que la rentabilidad esperada del mercado dependerá de la estructura del mercado, de la volatilidad de la economía del país y de la estabilidad política, la información de la rentabilidad esperada del mercado también se encuentra en la página del Banco de México.



### Promedio ponderado del capital propio

Por sus siglas en inglés Weighted Average Cost of Capital (WACC), es el promedio del costo de la deuda y del capital propio, teniendo en cuenta la estructura de capital. Esta tasa se usa cuando el proyecto cuenta con financiamiento.

Se calcula con la siguiente expresión:

$$WACC = (CAMP * \%CP) + (i_D * \%D * (1 - ISR))$$

$$i_D = \frac{1 + i_{TIE*}}{1 + i_{Infl}} - 1$$

Dónde:

$\%CP$ = Porcentaje del capital propio

$i_D$ = Tasa de interés de la deuda

$\%D$ = Porcentaje de la deuda

$i_{TIE*}$ = Tasa de interés interbancaria con sobretasa

$i_{Infl}$ = Tasa de inflación

La tasa de interés de la deuda depende de la tasa interbancaria y de la inflación.

Una vez definidos los conceptos que se emplearán para llevar a cabo el análisis se procederá a presentar la evaluación financiera.

## 3.2 Evaluación financiera

Para llevar a cabo el análisis financiero de este proyecto se tomaran en consideración las proyecciones de flujos futuros de efectivo que son atribuibles al proyecto, asimismo se consideró un ciclo de vida de 20 años (Fondos Estructurales-FEDER. 2003) y se prevé que la operación continúe después de los 20 años. El horizonte temporal varía según el proyecto del que se trate, para proyectos de energía se pueden considerar como horizonte hasta 35 años, de esta forma, una vez determinados los flujos de efectivo, se aplica el descuento, es decir, se capitaliza a valor presente.

Para tener los flujos de caja se hicieron consideraciones conservadoras para elegir los costos de inversión, de porteo, de venta de luz eléctrica. Se consideraron los costos de inversión más altos que se tenían disponibles, para los ingresos por venta de energía eléctrica se consideraron el promedio de las tarifas domésticas impuestas por la CFE para la Zona Peninsular, los costos de operación y mantenimiento se consideraron similares a los de las energías renovables.

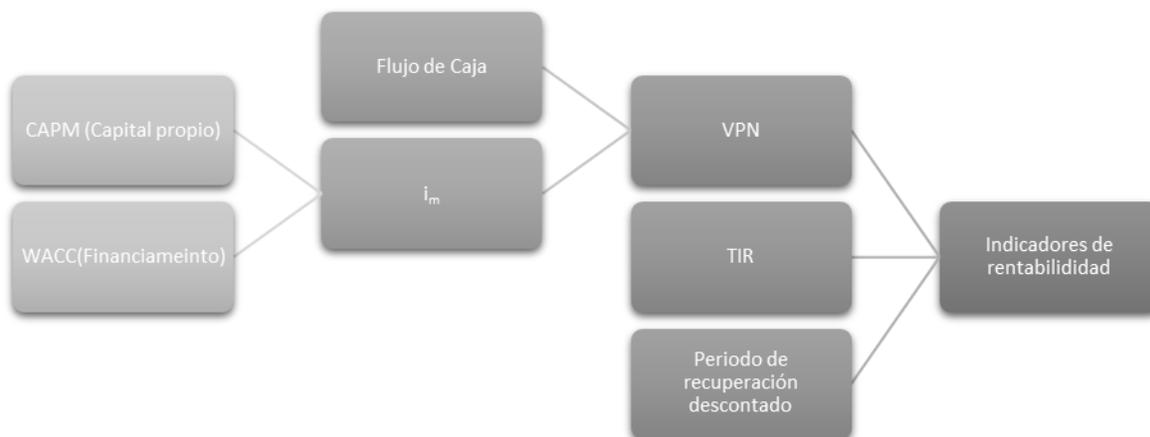


Figura 3.3 Obtención de Indicadores financieros.

Para poder conocer los indicadores necesarios para la toma de decisiones de realización de proyectos de inversión como: VPN, TIR y periodo de recuperación descontado, se requiere conocer los flujos de caja y la tasa de descuento. La tasa de descuento será diferente para cuando el proyecto tenga financiamiento o se lleve a cabo con capital propio (Figura 3.3).

Tabla 3-7 Características y costos de operación.

<b>Empresa eléctrica</b>		
<b>Capacidad instalada</b>	<b>1</b>	MWen
<b>Generación constantes durante el horizonte</b>	<b>7008</b>	MWh
<b>Generación máxima</b>	<b>8760</b>	MWh
<b>Periodo de construcción</b>	<b>24</b>	meses
<b>Periodo de operación para análisis</b>	<b>20</b>	años
<b>Factor de planta</b>	<b>80%</b>	
<b>OPERACIÓN</b>		
<b>Costo Operación y mantenimiento Fijo</b>	<b>\$533,558</b>	\$/MW-año
<b>Costo Operación y mantenimiento Variable</b>	<b>\$0.67</b>	\$/MWh-año
<b>Costo de Derecho de agua</b>	<b>\$0.0</b>	\$/kWh
<b>Costo Transmisión de energía (Porteo)</b>	<b>0.07878</b>	\$/kWh
<b>Tarifa de productores independientes en zona Peninsular</b>	<b>1,541.54</b>	[\$/MWh]
<b>Tipo de cambio</b>	<b>18.63</b>	\$/USD\$
<b>Porcentaje de financiamiento</b>	<b>50%</b>	
<b>Inversión<sup>2</sup></b>	<b>\$923,043,101.53</b>	

<sup>2</sup> Precios actualizados con INPC al 2016



Los datos de la central eléctrica a evaluar serán los siguientes:

Se generará 1 MWen, se considerará un factor de planta de 0.8, por tanto se tendrán 7008 horas de operación al año, se planea que se construya la central en 2 años y opere por más de 20 años (Tabla 3-7), aunque el análisis se hará para 20 años de horizonte.

Se consideran gastos de operación y mantenimiento similares a las plantas convencionales.

En las compañías de generación eléctrica se paga por el derecho de agua, pero como en nuestro caso es agua de mar, entra en la clasificación de que aguas con concentraciones mayores a 250 [mg/l] están exentas de pago (Sistema Nacional de Información del Agua. 2012).

Para el cálculo de los flujos de caja se plantearon tres escenarios:

1. Se considera que la inversión del proyecto se realiza sin financiamiento.
2. Se considera un financiamiento del 50% para la inversión.
3. Se considera un financiamiento del 50 % para la inversión y la comercialización de los usos secundarios.

En los tres casos se tomó el costo de porteo más alto, el costo de inversiones más alto, solo se tomará en cuenta el posible ingreso del agua desalinizada, puesto que es el más representativo en cuanto a volumen de producción y por tanto en impacto económico.

### 3.2.1 Flujo de caja

Los flujos de caja que se tuvieron en los tres casos son los siguientes:

- Para el caso de que el proyecto se realice sin financiamiento (Tabla 3-8):
- En el caso de que el proyecto tengo un financiamiento en la inversión del 50% (Tabla 3-9):
- En el caso que se cuente con un financiamiento del 50% y que se comercialicen el agua desalinizada, sistemas de aire acondicionado y los Certificados de Energía Limpia (Tabla 3-10):

Para la comercialización del agua potable se considera que una parte se comercializan 950 m<sup>3</sup>/día como agua de garrafón y se consideran los ingresos y egresos de la Tabla 3-11, mientras que la comercialización de los sistemas de aire acondicionado generan los ingresos y egresos de la Tabla 3-12.



Tabla 3-8 Flujo de caja sin financiamiento

ESCENARIO 1: Sin financiamiento	
Año	Flujo de Caja
1	-\$ 369,247.24
2	-\$ 554,946.37
1	\$ 9,712.60
2	\$ 9,712.60
3	\$ 9,712.60
4	\$ 9,712.60
5	\$ 9,712.60
6	\$ 9,712.60
7	\$ 9,712.60
8	\$ 9,712.60
9	\$ 9,712.60
10	\$ 9,712.60
11	\$ 9,712.60
12	\$ 9,712.60
13	\$ 9,712.60
14	\$ 9,712.60
15	\$ 9,712.60
16	\$ 9,712.60
17	\$ 9,712.60
18	\$ 9,712.60
19	\$ 9,712.60
20	\$ 102,213.56
n <sup>3</sup>	\$ 9,712.60

Tabla 3-9 Flujo de caja con 50% de financiamiento

ESCENARIO 2: Con financiamiento	
Año	Flujo de Caja
1	-\$ 369,247.24
2	-\$ 554,946.37
1	\$ 9,712.60
2	\$ 9,712.60
3	\$ 9,712.60
4	\$ 9,712.60
5	\$ 9,712.60
6	\$ 9,712.60
7	\$ 9,712.60
8	\$ 9,712.60
9	\$ 9,712.60
10	\$ 9,712.60
11	\$ 9,712.60
12	\$ 9,712.60
13	\$ 9,712.60
14	\$ 9,712.60
15	\$ 9,712.60
16	\$ 9,712.60
17	\$ 9,712.60
18	\$ 9,712.60
19	\$ 9,712.60
20	\$ 146,603.39
n	\$ 9,712.60

Tabla 3-10 Flujo de caja con 50% de financiamiento y usos secundarios

ESCENARIO 3 Usos secundarios con financiamiento	
Año	Flujo de Caja
1	-\$ 378,447.24
2	-\$ 708,209.87
1	\$ 74,166.89
2	\$ 128,658.71
3	\$ 407,040.83
4	\$ 542,091.38
5	\$ 473,783.19
6	\$ 481,664.90
7	\$ 481,664.90
8	\$ 481,664.90
9	\$ 481,664.90
10	\$ 481,664.90
11	\$ 481,664.90
12	\$ 481,664.90
13	\$ 481,664.90
14	\$ 481,664.90
15	\$ 481,664.90
16	\$ 481,664.90
17	\$ 481,664.90
18	\$ 481,664.90
19	\$ 481,664.90
20	\$ 7,270,319.08
n	\$ 481,664.90

En el caso que el proyecto cuenta con financiamiento y sin financiamiento se observa que los flujos de caja son iguales en ambos casos, a excepción del año 20 que considera el valor de rescate a perpetuidad.

$$\text{Valor de rescate a perpetuidad} = \frac{\text{Ingresos de año "n"}}{\text{Tasa de descuento}}$$

La tasa de descuento varía según si el proyecto cuenta con financiamiento o no, por tanto el valor de rescate será diferente en ambos casos. Mientras en el flujo de caja que considera los usos secundarios se observa que los ingresos son mucho mayores.

<sup>3</sup> El año "n" se considera como el valor a perpetuidad.

Tabla 3-11 Costos e ingresos de comercialización de agua potable.

Agua Potable		
<b>Inversión</b>	\$ 2,000,000	[ \$]
<b>Gastos operativos y administrativos</b>	\$ 112,480,000	\$/año
<b>Cantidad</b>	14,800,000	Garrafones/año
<b>Precio</b>	\$ 38	Garrafón
<b>Ingreso anual</b>	\$ 562,400,000	

Tabla 3-12 Costos e ingresos de comercialización del aire acondicionado (Zavala, 2016).

Sistema de aire acondicionado		
<b>Inversión</b>	\$ 21,000,000	\$
<b>Gastos operativos y administrativos</b>	\$ 27,013,500	\$/año
<b>Cantidad</b>	700,809	MWt/año
<b>Precio</b>	\$ 447.12	\$/MWt
<b>Ingreso anual</b>	\$ 313,346,033	\$/año

### 3.2.2. Tasa de riesgo

La tasa de riesgo será diferente en el caso que cuente con financiamiento o si no cuenta con financiamiento.

En el caso de que no se tiene financiamiento es necesario calcular el CAPM, para poder calcularla primero se debe conocer el valor de  $\beta$ .

Para calcular la  $\beta$  desapalancada del proyecto se hará un promedio del valor de la  $\beta$  desapalancada de otras empresas que también generan electricidad con energía renovable, las empresas de referencia son: GDF Suez S. A., ENEL BO, EDF, Iberdrola y Fenosa (Tabla 3-13). La resultante fue de 0.67.

Tabla 3-13 Cálculo de  $\beta$  para el proyecto (Reuters. 2016)

EMPRESA	Beta apalancada	D/E	ISR	Beta Desapalancada
GDF Suez S.A.	0.79	57.19%	0.3	<b>0.56</b>
ENEL.BO	0.01	23.06%	0.3	<b>0.01</b>
EDF	1.03	8.77%	0.3	<b>0.97</b>
IBERDROLA	0.97	4.51%	0.3	<b>0.94</b>
FENOSA	0.90	5.51%	0.3	<b>0.87</b>
OTEC 1MWe-czMX	0.7	17.02%	<b>PROMEDIO =</b>	<b>0.67</b>



Una vez que se conoce  $\beta$  se puede aplicar la siguiente fórmula:

$$CAPM = R_F + \beta(R_M - R_F)$$

Para calcular el riesgo promedio del mercado  $R_M$  se calculó el rendimiento de la bolsa en términos reales, considerando los datos de la bolsa mexicana de valores del 2002 al 2015. Obteniéndose un rendimiento promedio del mercado de 14.07% y un rendimiento libre de riesgo  $R_F$  de 3.26%, para más detalles ver el Anexo II (Tabla II.1 y Tabla II.2).

$$CAPM = 3.26\% + 0.67(14.07\% - 3.26\%) = 10.5\%$$

En el caso que se cuente con financiamiento se usará el WACC, de la fórmula:

$$WACC = (CAPM * \%CP) + (i_D * \%D * (1 - ISR))$$

Se sustituyen los valores correspondientes para obtener el WACC (Tabla II.3).

$$WACC = (10.5\% * 50\%) + (5.27\% * 50\% * (1 - 30\%)) = 7.17\%$$

$$i_D = \frac{1 + i_{TIE*}}{1 + i_{Infl}} - 1$$

$$i_D = \frac{1 + 8.43\%}{1 + 30\%} - 1 = 7.1\%$$

### 3.2.3 Resultados

Una vez obtenidos los flujos de caja y las tasas de riesgo se obtuvieron los indicadores financieros, teniendo los siguientes resultados (Tabla 3-14):

Tabla 3-14 Resumen de Análisis financiero en distintos escenarios

ESCENARIO BASE MAYOR PRECIO DE INVERSIÓN (miles de pesos)			
Escenario	VPN	TIR	PRD [años]
Sin financiamiento	-\$ 712,895.81	-7.32%	NA
Con financiamiento 50%	-\$ 707,274.33	-5.99%	NA
Financiamiento y agua desalinizada	\$ 4,429,735.73	28.27%	20

EL **escenario base** considerará una generación constante, un 50% de financiamiento, el mayor costo de inversión, precio de la electricidad en México al 2016 y costos de operación y mantenimiento típicos de centrales eléctricas en México. Se harán consideraciones conservadoras para obtener los indicadores del proyecto.

Como se puede observar bajo este escenario no es conveniente llevar a cabo el proyecto, puesto que los VPN son negativos. Se evaluarán algunos otros escenarios para identificar a que cambios es más susceptible el proyecto.

## Análisis de sensibilidad

Finalmente se realizó un análisis de sensibilidad para conocer las variables a las cuáles es más susceptible el VPN, TIR y el PRD. Las variables se eligieron considerando que serán las variables más probables a cambio en el escenario en el que se encontrará el proyecto.

Primero se varió el costo de inversión del proyecto, se consideraron los costos al 2010 que consideró Vega y los costos al 2012 que considero Muralidharan. Se actualizaron los costos al 2016 y se hizo una extrapolación lineal de la disminución que se tendría en la inversión al hacerla en este año. Los valores para la inversión que se tuvieron fueron los de la Tabla 3-1.

Una vez que se obtuvieron los costos de inversión se realizó el análisis financiero para cada uno de los casos y se obtuvieron los indicadores (Tabla 3-15). La tabla 3-15 se encuentra expresada en miles de pesos.

Tabla 3-15 Indicadores financieros con costos de inversión variables

COSTOS DE INVERSIÓN VARIABLES				
	Escenario	VPN	TIR	PRD [años]
<b>Costos del 2010<sup>4</sup></b>	<b>\$ 923,043</b>			
	Sin financiamiento	-\$ 712,896	-7.32%	NA <sup>5</sup>
	Con financiamiento 50%	-\$ 707,274	-5.99%	NA
	Financiamiento y usos secundarios	-\$ 509,307	0.05%	20
<b>Costos del 2012<sup>6</sup></b>	<b>\$ 731,190</b>			
	Sin financiamiento	-\$ 549,172	-6.00%	NA
	Con financiamiento 50%	-\$ 535,253	-4.69%	NA
	Financiamiento y usos secundarios	\$ 4,601,758	32.21%	14
<b>Costos al 2016<sup>7</sup></b>	<b>\$ 383,706</b>			
	Sin financiamiento	-\$ 252,636	-2.03%	NA
	Con financiamiento 50%	-\$ 223,688	-0.80%	NA
	Financiamiento y usos secundarios	\$ 4,913,322	44.65%	7

<sup>4</sup> Actualizados a precios del 2016 con el INPC

<sup>5</sup> Para todas las tablas cuando se indica NA en el periodo de recuperación quiere decir que sale del horizonte previsto para la realización del análisis, es decir No Aplica

<sup>6</sup> Actualizados a precios del 2016 con el INPC

<sup>7</sup> La inversión disminuye debido al avance tecnológico

Otra variable será el porcentaje de financiamiento en la inversión, se variará de 45 a 75%, el rango común para proyectos de energía y medio ambiente es del 20 al 75% (Tabla 3-16) (Unidad de Proyectos Sustentables y Cambio Climático. 2009). La tabla 3-16 se encuentra expresada en miles de pesos.

También se considera como variable el costo de venta de la electricidad, el costo base fue a Julio de 2016, en este año se prevén incremento de un 2-7% (Corona, S.. 2016) en tarifas domésticas y de un 12% (DomoSolutions. 2016) para tarifas domésticas de alto consumo, estos fueron los porcentajes de variación que se usaron para el análisis de sensibilidad (Tabla 3-17). La tabla 3-17 se encuentra expresada en miles de pesos.

Tabla 3-16 Indicadores financieros con porcentaje de financiamiento variables

FINANCIAMIENTO VARIABLE				
Escenario	VPN	TIR	PRD [años]	
<b>45%</b>				
Solo considerando la venta de electricidad	-\$ 709,447	-6.12%	NA	
Electricidad y usos secundarios	\$ 4,127,693	28.24%	20	
<b>55%</b>				
Solo considerando la venta de electricidad	-\$ 704,495	-5.85%	NA	
Electricidad y usos secundarios	\$ 4,763,498	28.31%	20	
<b>65%</b>				
Solo considerando la venta de electricidad	-\$ 696,692	-5.53%	NA	
Electricidad y usos secundarios	\$ 5,547,440	28.39%	20	
<b>75%</b>				
Solo considerando la venta de electricidad	-\$ 684,914	-5.17%	NA	
Electricidad y usos secundarios	\$ 6,535,393	28.50%	20	

Tabla 3-17 Indicadores financieros con precio de electricidad variables

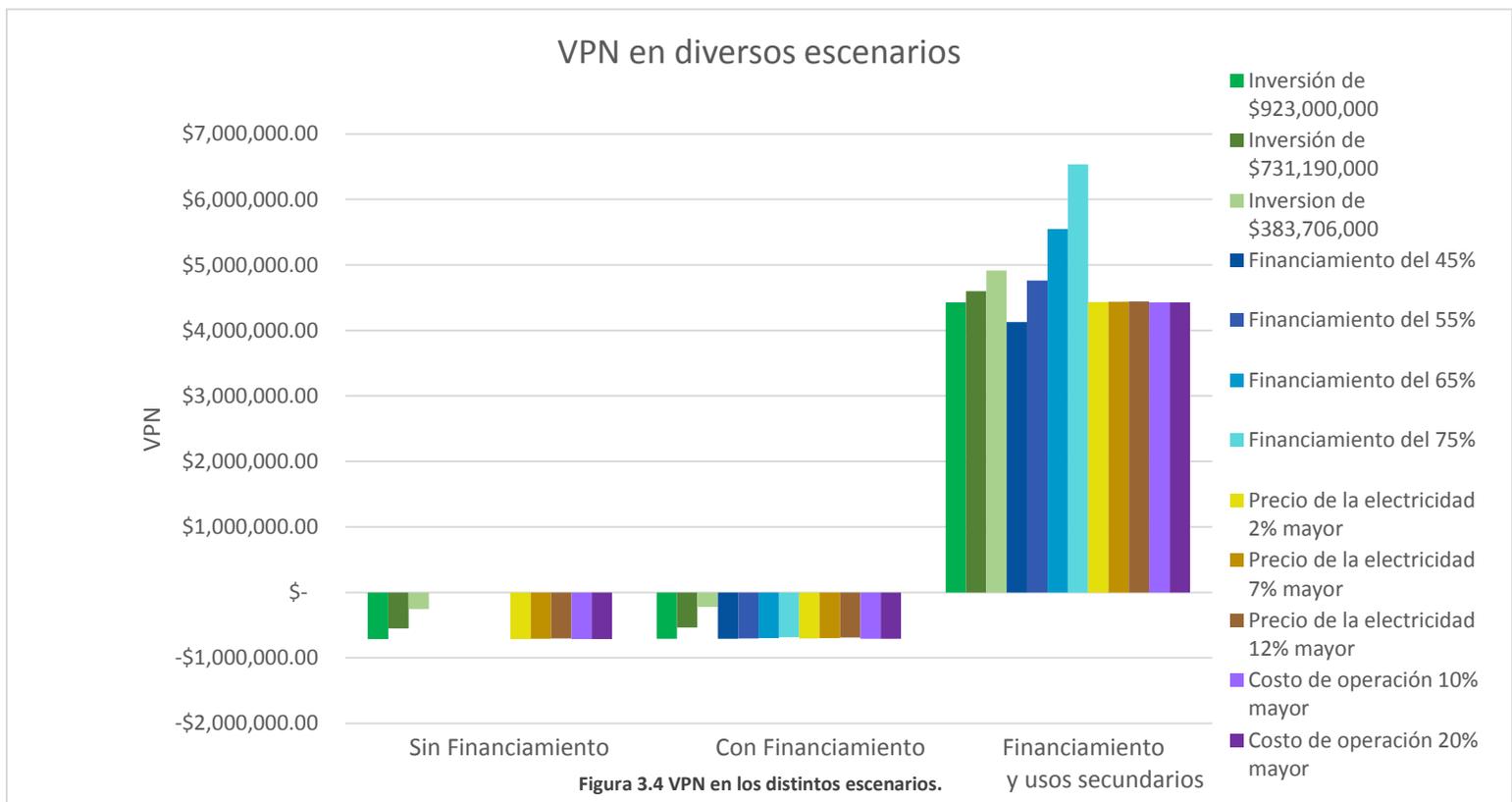
PRECIO DE LA ELECTRICIDAD				
	Escenario	VPN	TIR	PRD [años]
<b>2% más</b>	<b>1527.37 [\$/MWh]</b>			
	Sin financiamiento	-\$ 711,211	-7.20%	NA
	Con financiamiento 50%	-\$ 704,575	-5.87%	NA
	Financiamiento y usos secundarios	\$ 4,431,541	28.28%	20
<b>7% más</b>	<b>1649.45 [\$/MWh]</b>			
	Sin financiamiento	-\$ 706,997	-6.90%	NA
	Con financiamiento 50%	-\$ 697,825	-5.58%	NA
	Financiamiento y usos secundarios	\$ 4,436,056	28.31%	20
<b>12% más</b>	<b>1726.52 [\$/MWh]</b>			
	Sin financiamiento	-\$ 702,784	-6.61%	NA
	Con financiamiento 50%	-\$ 691,076	-5.30%	NA
	Financiamiento y usos secundarios	\$ 4,440,570	28.33%	20

Finalmente se variaron los costos de operación, para el mantenimiento fijo se consideró un promedio de las tecnologías convencionales y renovables, mientras que el costo variable se tomó el mayor de las energías renovables del COPAR 2012. Se varían considerando un 10% y un 20% de aumento (Tabla 3-18). La tabla 3-18 se encuentra expresada en miles de pesos.

Tabla 3-18 Indicadores financieros con costos de operación y mantenimiento variables

COSTO DE OPERACIÓN					
Escenario		VPN	TIR	PRD [años]	
<b>10% más</b>	<b>\$ 557,750.83</b>				
	Sin financiamiento	-\$ 713,333	-7.35%	NA	
	Con financiamiento 50%	-\$ 707,952	-6.02%	NA	
	Financiamiento y usos secundarios	\$ 4,429,268	28.27 %	20	
<b>20% más</b>	<b>\$ 608,455.45</b>				
	Sin financiamiento	-\$ 713,770	-7.38%	NA	
	Con financiamiento 50%	-\$ 708,630	-6.05%	NA	
	Financiamiento y usos secundarios	\$ 4,428,800	28.27 %	20	

Para poder ver de una manera más clara el comportamiento del VPN en los diferentes escenarios se realizó una gráfica donde se observan las variaciones del VPN en los distintos escenarios (Figura 3.4).



Se puede observar que el único escenario con VPN positivo es cuando se tiene financiamiento y se comercializan los usos secundarios, para este análisis se está considerando la venta de Certificados de Energía Limpia<sup>8</sup> (CEL'S), el agua potable, el agua desalinizada y el aire acondicionado. También para este escenario se tiene un PRD que está dentro del horizonte.

En la Figura 3.5 se graficó el VPN y la Tasa Interna de Retorno cuando se cuenta con financiamiento y usos secundarios en los diversos escenarios.

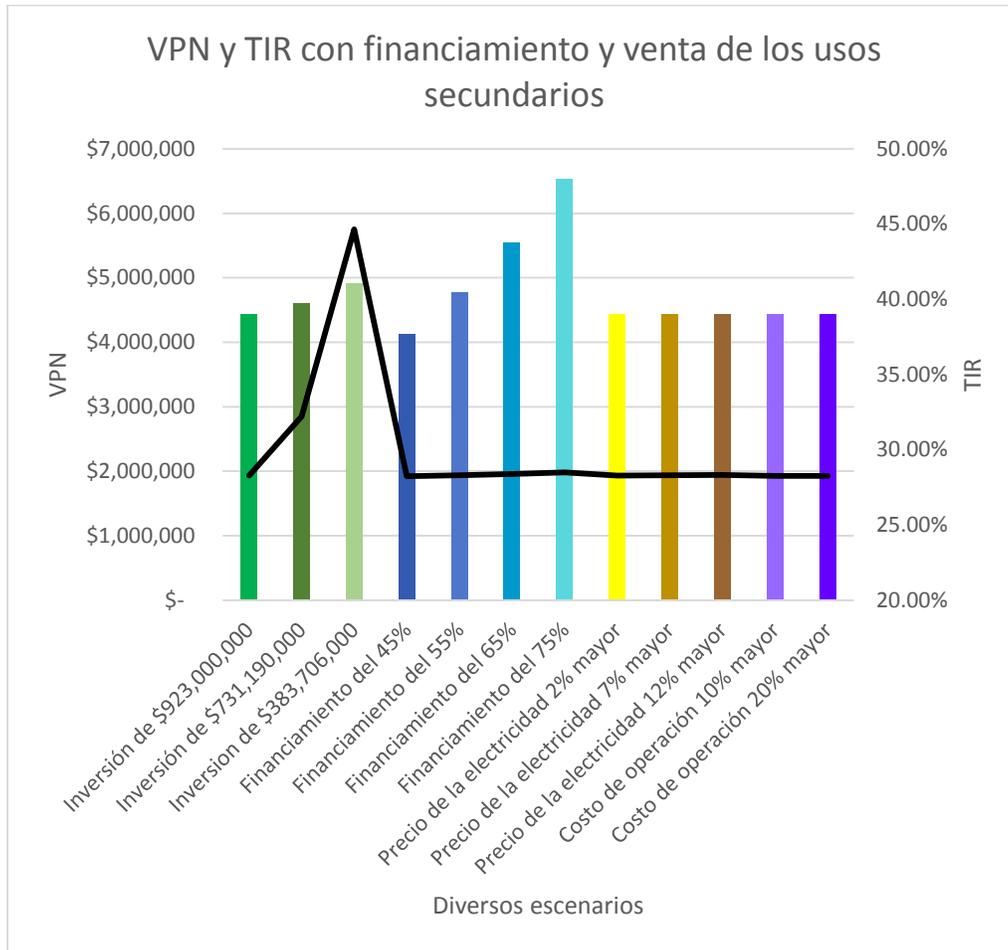


Figura 3.5 VPN y TIR de planta OTEC y usos secundarios.

Como se puede observar en la Figura 3.5 el VPN es más susceptible a cambios al porcentaje de financiamiento del proyecto y al costo de inversión. Las barras verdes corresponden al VPN teniendo diferentes costos de inversión, como se observa la inversión menor tendrá un mayor VPN. Las barras azules corresponden a la variación del porcentaje de financiamiento considerando los mayores costos de inversión, se obtiene un VPN mayor teniendo el mayor porcentaje de financiamiento. Las barras

<sup>8</sup> Certificados con los que se debe contar para el 2018, al menos el 5% de la energía consumida o producida debe venir de energías limpias.

amarillas corresponden al cambio de precio de la electricidad considerando los mayores costos de inversión, se observa que el VPN no tiene una variación significativa debido al cambio de precio. Las barras moradas corresponden a una variación de los costos de operación y mantenimiento totales de la planta considerando los mayores costos de inversión, tampoco representan un cambio significativo en el VPN. Se resume que conviene que se tenga el menor costo de inversión o el mayor financiamiento.

En cuanto a la TIR se calculó para los diversos escenarios, recordemos que para proyectos de inversión el criterio de la TIR, se recomienda que la tasa del mercado sea menor que la TIR, puesto que se tendrá un VPN mayor invirtiendo en el mercado. En este caso la tasa del mercado con préstamo será de un 7.10% y sin financiamiento un 10.50%. Si consideramos el criterio de la TIR, también el mejor escenario es el contar con financiamiento y comercializar usos secundarios, puesto que en todos los casos la TIR es mayor que la tasa del mercado (Tabla 3.19).

Tabla 3-19 TIR de los distintos escenarios

Escenario	VPN	TIR	PRD	Tasa de descuento del Mercado
<b>Inversión de \$923,000,000</b>	\$ 4,429,736	28.27%	20	7.10%
<b>Inversión de \$731,190,000</b>	\$ 4,601,758	32.21%	20	7.10%
<b>Inversión de \$383,706,000</b>	\$ 4,913,322	44.65%	20	7.10%
<b>Financiamiento del 45%</b>	\$ 4,127,693	28.24%	20	7.44%
<b>Financiamiento del 55%</b>	\$ 4,763,498	28.31%	20	6.75%
<b>Financiamiento del 65%</b>	\$ 5,547,440	28.39%	20	6.07%
<b>Financiamiento del 75%</b>	\$ 6,535,393	28.50%	20	5.39%
<b>Precio de la electricidad 2% mayor</b>	\$ 4,431,541	28.28%	20	7.10%
<b>Precio de la electricidad 7% mayor</b>	\$ 4,436,056	28.31%	20	7.10%
<b>Precio de la electricidad 12% mayor</b>	\$ 4,440,570	28.33%	20	7.10%
<b>Costo de operación 10% mayor</b>	\$ 4,429,268	28.27%	20	7.10%
<b>Costo de operación 20% mayor</b>	\$ 4,428,800	28.27%	20	7.10%

La distribución de inversiones, costos operativos e ingresos de las ventas de los productos de los usos secundarios y los CEL'S se presentan en las Tablas 3-20, 3-21 y 3-22.

Tabla 3-20 Costos de inversión de planta OTEC y usos secundarios

Inversión	
\$ 946,043,102	Planta OTEC
\$ 21,000,000	Sistema de aire acondicionado
\$ 2,000,000	Purificadora de agua
\$ -	Certificados de Energías Limpias
\$ -	Agua a línea de suministro

Tabla 3-21 Gastos operativos y de administración de planta OTEC y usos secundarios

Gastos operativos y de administración	
\$ 507,046	Planta OTEC
\$ 27,013,500	Sistema de aire acondicionado
\$ 112,480,000	Purificadora de agua
\$ -	Certificados de Energías Limpias
\$ -	Agua a línea de suministro

Tabla 3-22 Ingresos por ventas de electricidad y usos secundarios, así como CEL's

Ingresos por ventas	
\$ 10,803,112	Electricidad de Planta OTEC
\$ 313,346,033	Sistema de aire acondicionado
\$ 562,400,000	Purificadora de agua
\$ 5,457,368	Certificados de Energías Limpias
\$ 2,553,917.84	Agua a línea de suministro

Para visualizar la distribución de estos se presentan las Figuras 3.6, 3.7 y 3.8.

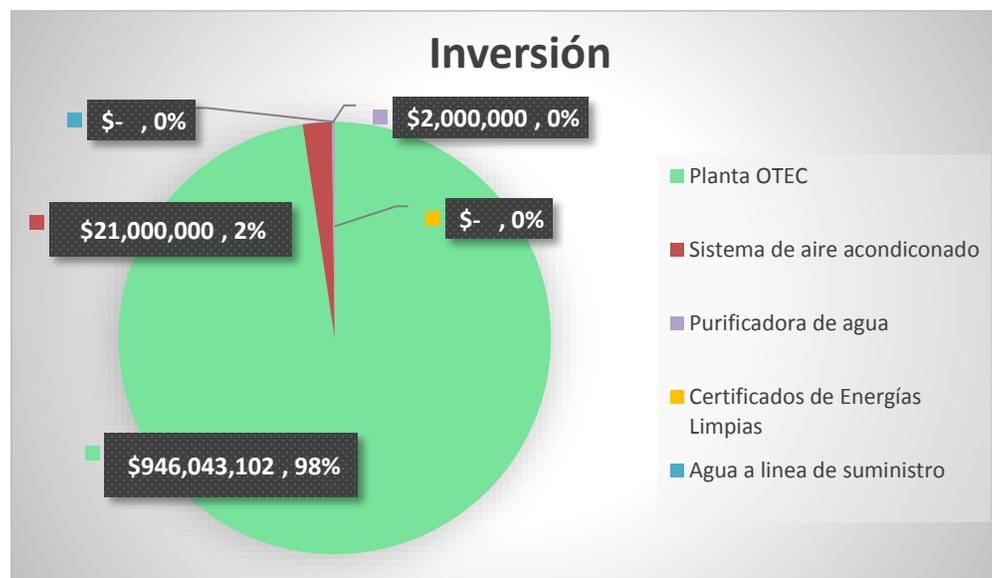


Figura 3.6 Distribución de costos de inversión de planta OTEC y usos secundarios



Figura 3.7 Distribución de gastos operativos y de administración de planta OTEC y usos secundarios

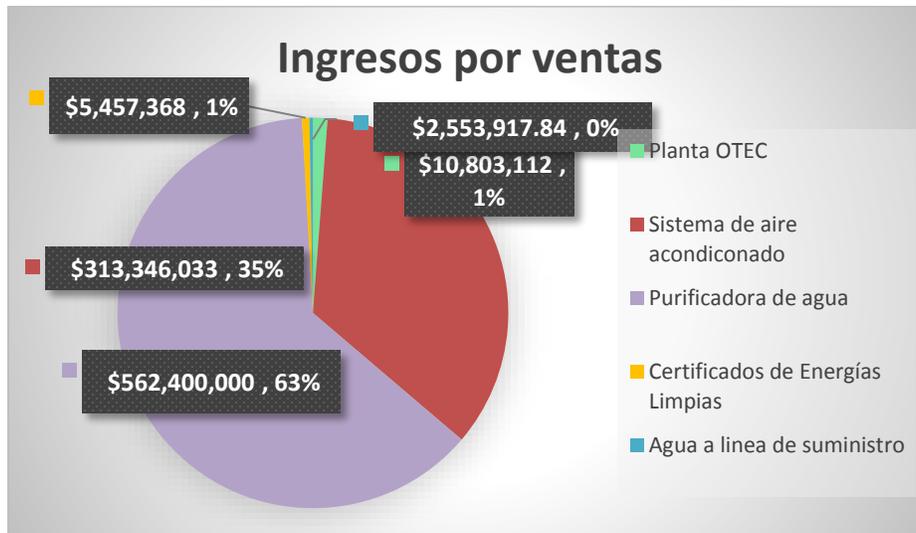


Figura 3.8 Distribución de ingresos por ventas de electricidad de planta OTEC y usos secundarios

### 3.3 Aspectos sociales

En cuanto a los aspectos sociales podemos incluir los beneficios sociales que se obtienen tanto de la generación eléctrica como de la comercialización de los productos secundarios de las plantas OTEC.

### 3.3.1 Generación eléctrica

La generación eléctrica es la energía secundaria es la que tiene una mayor tendencia de uso, por tanto conviene que la energía primaria con la que se creó sea renovable. Es importante mencionar por tanto el número de personas que pueden hacer uso de esta energía eléctrica. Si la planta tiene una producción de 1 MWe, la planta podría abastecer aproximadamente a 3900 personas (Tabla 3-23).

Tabla 3-23 Población beneficiada por suministro de electricidad de planta OTEC

Electricidad			
Configuración	Capacidad [MW]	GWH por año	Población beneficiada
Ciclo Abierto	1	8.76	3,900
	10	70	40,625
Ciclo Híbrido	50	336	195,000

El 21 % de la electricidad se pierde durante la distribución (Gobierno de la República. 2014), es por ello mejor generar cerca de dónde se va a usar la electricidad.

### 3.3.2 Agua desalinizada

Tener agua potable es vital para los seres humanos, es por ello que se debe tener seguridad de abastecimiento. En algunas zonas del país no se abastece el consumo humano de una manera óptima, esto puede ser porque el agua viene de muy lejos, es una zona muy aislada o no se cuenta con la cantidad suficiente todo el tiempo. Al ser considerada una necesidad básica y muy alta la producción de agua desalinizada en plantas OTEC, ayuda altamente en el flujo de caja, puesto que representa un ingreso importante.

Dependiendo de la configuración de la planta OTEC podemos tener agua desalinizada el distintas cantidades, en la Tabla3-24 se muestra además la población que sería beneficiada directamente con este subproducto.

Tabla 3-24 Población Beneficiada con agua desalinizada por una planta OTEC (Vega. L.A.. 1992)

Agua desalinizada				
Configuración	Capacidad [MW]	m3/día	Población beneficiada en países desarrollados	Población beneficiada en países en vías de desarrollo
Ciclo Abierto	1	2,150	1,000-2,000	5,000-10,000
	10	15,000	7,000-14,00	21,000- 42,000
Ciclo Híbrido	50	62,000	100,000	300,000

Los costos de producción del agua desalinizada a través de la tecnología OTEC pueden ser de 4.38 [\$/m<sup>3</sup>] mientras que los costos de grandes desalinizadoras son de 12.79-19.68 [\$/m<sup>3</sup>].

### 3.3.3 Aire Acondicionado

El aire acondicionado es un subproducto de gran importancia debido al alto consumo de electricidad empleado en sistemas de aire acondicionado convencionales. Además se puede implementar un sistema de aire acondicionado que funcione con agua fría del océano aún sin tener instalada una planta OTEC.

Por ejemplo en caso de solo tener tubería de succión de agua fría a 709.5 m de profundidad con un diámetro de 1.016 m se pueden obtener 5000 Ton de refrigeración, lo equivalente al consumo de una planta de 4 MW (Leraand, T. K. & Van Ryzin, J.C. NE).

Otro dato con el que se cuenta es el de la Tabla 3-25.

Tabla 3-25 Resumen de beneficios de aire acondicionado (Vega. L.A.. 1992)

Aire acondicionado				
Configuración	m3/s	T [°C]	TonRef	Habitaciones
Solo el sistema de aire acondicionado	1	7	5800	5800
Ciclo abierto	0.09	12	300	300

### 3.3.4 Certificados de energía limpia

Con el esquema de la nueva reforma energética (2013), la Ley de la Industria Eléctrica (LIE) y los compromisos que se tienen en cuanto a la reducción de emisiones, en el 2013 surgen los Certificado de Energía Limpia y en 2014 se dictaron los lineamientos para los éstos.

Los certificados corresponden a la generación eléctrica con energías limpias como son: Eólica, Radiación solar, Energía oceánica, Geotérmica, Hidroeléctrica, Nuclear, Bioenergía y Cogeneración eficiente (SENER, 2016). Entraran en vigor en el 2018, dónde el 5% de la generación eléctrica de los participantes en el mercado eléctrico mayorista tendrá que provenir de estas fuentes, para el 2019 subirá a un 5.9 %

El precio de venta de tales certificados se fija a través de una subasta que realiza el CENACE, el costo es de aproximadamente 44 dls/MWh y un MWh corresponde a un CEL.



## Conclusión

Las plantas OTEC representan una gran inversión de capital, se necesita también una gran experiencia operacional y de diseño, sin embargo la economía de escala hace más viable financieramente hablando invertir en plantas de gran tamaño. El desarrollo de las plantas OTEC por fases puede hacer más viable la implementación de estas plantas (Nihous, G. C. & Syed, M.A. 1996), puesto que se puede comenzar a implementar el uso de agua de mar fría por ejemplo aún antes de que comience a operar por completo la planta.

Para el desarrollo de este proyecto conviene minimizar los costos de inversión y conseguir el mayor porcentaje de financiamiento. El punto clave es la comercialización de los usos secundarios para que se puedan reportar indicadores financieros positivos y se pueda promover este tipo de tecnologías.

Cabe destacar que en este análisis no se monetiza el beneficio que se obtiene del uso de la electricidad, del confort que se obtiene por el uso del aire acondicionado ni el acceso al agua potable, si se incluyeran estos beneficios muy seguramente los indicadores financieros resultarían más atractivos para la inversión en estas tecnologías.

Es importante mencionar la diversificación de sus beneficios económicos al incorporar esta tecnología en cierta población, pues al tener una gran variedad de subproductos básicos para el desarrollo de una población se hace posible tener una comunidad autosustentable.

## 4. Sustentabilidad y logística de las plantas OTEC

### Introducción

El aspecto de la sustentabilidad en los proyectos es de suma importancia, pues desde 1992 los proyectos se deben llevar a cabo cuidando los recursos naturales pensando en la generaciones futuras, es por ello que se ha decidido incluir un capítulo enfocado a los aspectos sustentables de las plantas OTEC, tratando de maximizar los beneficios que una planta de este tipo ofrece, pues para poder colocar en el mercado los subproductos se deben tener en tiempo y forma para poder satisfacer las necesidades de cierta población, proveyendo seguridad del abastecimiento.

### 4.1 Sustentabilidad

El desarrollo sustentable es “*el desarrollo que satisface las necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones de satisfacer sus propias necesidades*” (UNESCO. 2012). Para lograr un desarrollo sustentable se asocia el cuidado de los recursos medioambientales, el diseño y desarrollo de tecnologías que permitan el uso de energías alternas, la educación de los individuos y el futuro de la sociedad (Figura 4.1). Este tipo de desarrollo también se liga con los aspectos económicos y políticos.



Figura 4.1 Zona de sustentabilidad (Bio:Connection. 2013)



El desarrollo de la energía sustentable se basa en los documentos de la Conferencia de las Naciones Unidas en Río de Janeiro 1992 y en el Protocolo de Kioto, dónde se comprometieron diversos países a realizar acciones a disminuir sus emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI) o a ayudar al desarrollo de proyectos que eviten o disminuyan estas emisiones

Para las plantas OTEC se describirán los puntos que pueden permitir que las plantas OTEC tengan un desarrollo sustentable.

- Social: En este rubro se destaca la longevidad de la primer implementación de las plantas OTEC, el primer prototipo se construyó en 1930, desde entonces se han llevado a cabo investigaciones en países como Estados Unidos, Corea del Sur, Japón, y se han instalado estas plantas en diversas partes del mundo. Cabe mencionar que los usos secundarios: agricultura, piscicultura, aire acondicionado, agua fría, hielo y desalación de agua representan variedad en el mercado de cierta población dónde se instale alguna planta OTEC.
- Ambiental: Esta es la parte quizá el punto más importante de las plantas OTEC, puesto que al utilizar energías renovables y evitar la quema de combustibles fósiles evita la emisión de GEI. Al usarse en sistemas de aire acondicionado se puede lograr hasta una reducción del 40 % en el consumo eléctrico (Krock, H.. 2008).
- Económica: En cuánto a beneficios económicos destacan los usos secundarios que se le puede dar a la planta, pues al tener más productos para su comercialización representa un mercado mayor movimiento en la zona de instalación.

Para llevar a cabo el proyecto se necesita contar con capital de distintos tipos, puesto que el monetario no es lo único que se necesita:

- Humano: Se necesitan especialistas para el monitoreo de la planta OTEC como Ingenieros, químicos, mecánicos, eléctricos. Con las mediciones constantes se podrán modelar mejor las plantas OTEC y se podrán diseñar más eficientes los equipos. También se necesita tener el conocimiento necesario para fabricar la tubería tan grande, desarrollar materiales que soporten la corrosión del agua de mar, que se desarrollen equipos más eficientes y mejoren la tecnología.
- Natural: Se deben tener las condiciones oceanográficas cerca de las costas, no deben ser zonas Áreas Naturales Protegidas, deben tener un gradiente térmico adecuado y un bajo índice de huracanes.
- Infraestructura: Si es una planta fuera de la costa se necesita una plataforma de tipo petrolero o un barco. Hay que considerar todo lo que implica construir una plataforma o un gran barco, Si será sobre la costa prever todo lo que se necesita para construir la planta, la infraestructura necesaria puede ser desde las válvulas hasta el camino que se necesita para que lleguen todos los materiales para su construcción.

Se necesita también cierta dinámica y sustentabilidad urbana y para lograrla se requieren tener condiciones física, morales, funcionales y tener beneficios que hagan posible su instalación.

- Física: Se debe tener alguna población disponible a la que se le puedan vender los productos obtenidos de la planta OTEC, para el caso del aire acondicionado se necesita tener alguna zona hotelera o cierta cantidad de habitantes que les interese tener aire acondicionado, se debe tener los gradientes de temperaturas necesarios para que las plantas OTEC operen, de preferencia



durante todo el años, pues así los costos de inversión se recuperarían en menos años. En cuanto a infraestructura eléctrica conviene instalar estas plantas en zonas desconectadas del sistema eléctrico, pues así al generar la electricidad en sitio se evitarían las pérdidas por la transportación de la energía, así como toda la infraestructura necesaria para poder llevarla a la zona en cuestión.

- Moral: Se deben conseguir todos los permisos de las autoridades competentes para poder llevar a cabo el proyecto de manera legal, en este caso serían permisos de SEMARNAT, SHCP, CONAGUA, entre otras, además de que al ser un proyecto renovable las actividades de operación estarían comprometidas con el medio ambiente.
- Funcional: El aire acondicionado que se produzca tiene un mercado dónde colocarse, así como la electricidad, los peces y lo que se coseche en caso de tener habilitados los usos secundarios de la planta.
- Beneficios: Hay beneficio tecnológico al estar probando sistemas de generación eléctrica nuevos en México, se incentiva el uso de la energía oceánica, se disminuyen GEI.

Los principios de desarrollo sustentable son aquellos se aplican ante la necesidad de armonizar el desarrollo de la energía de la humanidad. Estos principios se establecieron en la Convención Marco de las Naciones Unidas Río de Janeiro 1992, son 27 principios, algunos que se destacan y que aplican al proyecto son los siguientes:

- Convivir en armonía humanos y medio ambiente
- Erradicar la pobreza y reducir disparidades en el nivel de vida
- Conservación de los recursos no renovables
- Explotación de los recursos renovables
- Mejorar la eficiencia energética
- Ser justo en las reglas del manejo de la energía
- Promover el desarrollo económico
- Promover el desarrollo en el consumo responsable de la energía
- Pago de daños causados por el mal uso de la energía y los recursos
- Promoción y educación de nuevas fuentes de energía

Para poder lograr cumplir los principios de desarrollo sustentable en México se necesitaría:

- Conseguir permisos gubernamentales necesarios para la operación legal de la planta.
- Se buscaría financiamiento de grandes hoteles que estén interesados en comprar el aire acondicionado, el agua desalinizada y los alimentos, así como de empresas interesadas en comercializar o comprar la electricidad, se podría conseguir ayuda de Universidades de renombre que puedan estudiar el comportamiento de la planta.
- Ofrecer un VPN positivo, se contaría con un estudio de mercado, técnico y organizacional previos para saber qué tipo de peces, o de verduras o frutas se pueden y convienen comercializar en la zona para evitar el rezago de la producción, una vez que se cuente con un estudio de mercado y se sepa la producción necesaria se pueden diseñar los invernaderos y las tinas para la piscicultura.
- Cambio cultural al uso de las energías renovables.

Con todos los aspectos anteriormente descritos se dice que la OTEC es un proyectos sustentable y real para México.

Además de que se ha comprometido en varios acuerdos internacionales, se tiene un plan de desarrollo para la implementación de las energías renovables. Pretende reducir para el 2050 un 50% sus emisiones de GEI con relación a las emitidas en 2012 (INECC. 2011). En su programa de desarrollo del sistema eléctrico Nacional 2016-2030 (PRODESEN) presentan los planes que tienen para aumentar la capacidad instalada, tanto para energías renovables y limpias, como convencionales (Figura 4.2).

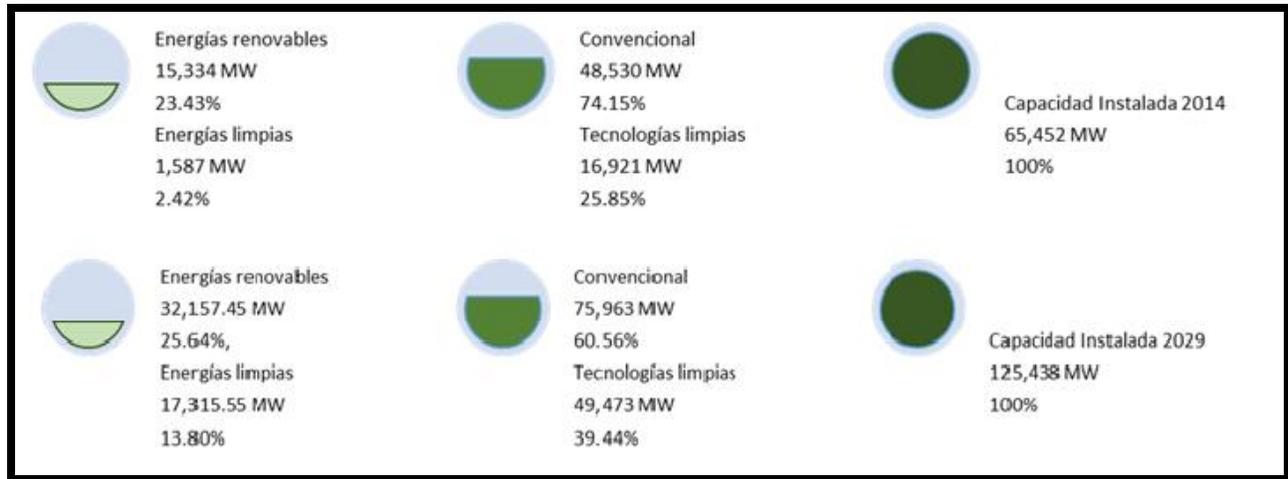


Figura 4.2 Evolución de generación por tecnologías convencionales y limpias (SENER. 2014)

México no tiene una política específica para la generación de energía eléctrica por medio de energía oceánica a gran escala o industrial, pero legalmente podría vender la electricidad a CFE como un particular según lo indica la reforma energética. La reforma se hizo por falta de tecnología para producir petróleo de recursos no convencionales, para la explotación de estos recursos se realizarán rondas para que Petróleos de México (PEMEX) decida cuáles yacimientos explotará y cuáles se van a licitar, así como para poder comprar electricidad producida por particulares. Con la reforma se pretende invertir en la red de transmisión para poder interconectar las zonas del país con potencial natural para el uso de las energías renovables.

#### 4.1.1 Panorama de la responsabilidad ambiental de México

México se ha querido involucrar en acuerdos ambientales mundiales, desde 1992, como muestra del desarrollo que el país tiene y del compromiso que se tiene con el medio ambiente. Ha desarrollado en ciertas medidas plantas que funcionan con energías renovables y que tienen un impacto directo en la disminución de emisiones, pero también ha ido manejando programas sociales, y modificando su legislación para permitir aprovechar los recursos renovables de una forma controlada.

En la Figura 4.3 se muestra un resumen de los acuerdos internacionales en los que ha participado México y acciones que ha realizado para demostrar su compromiso con el medio ambiente.

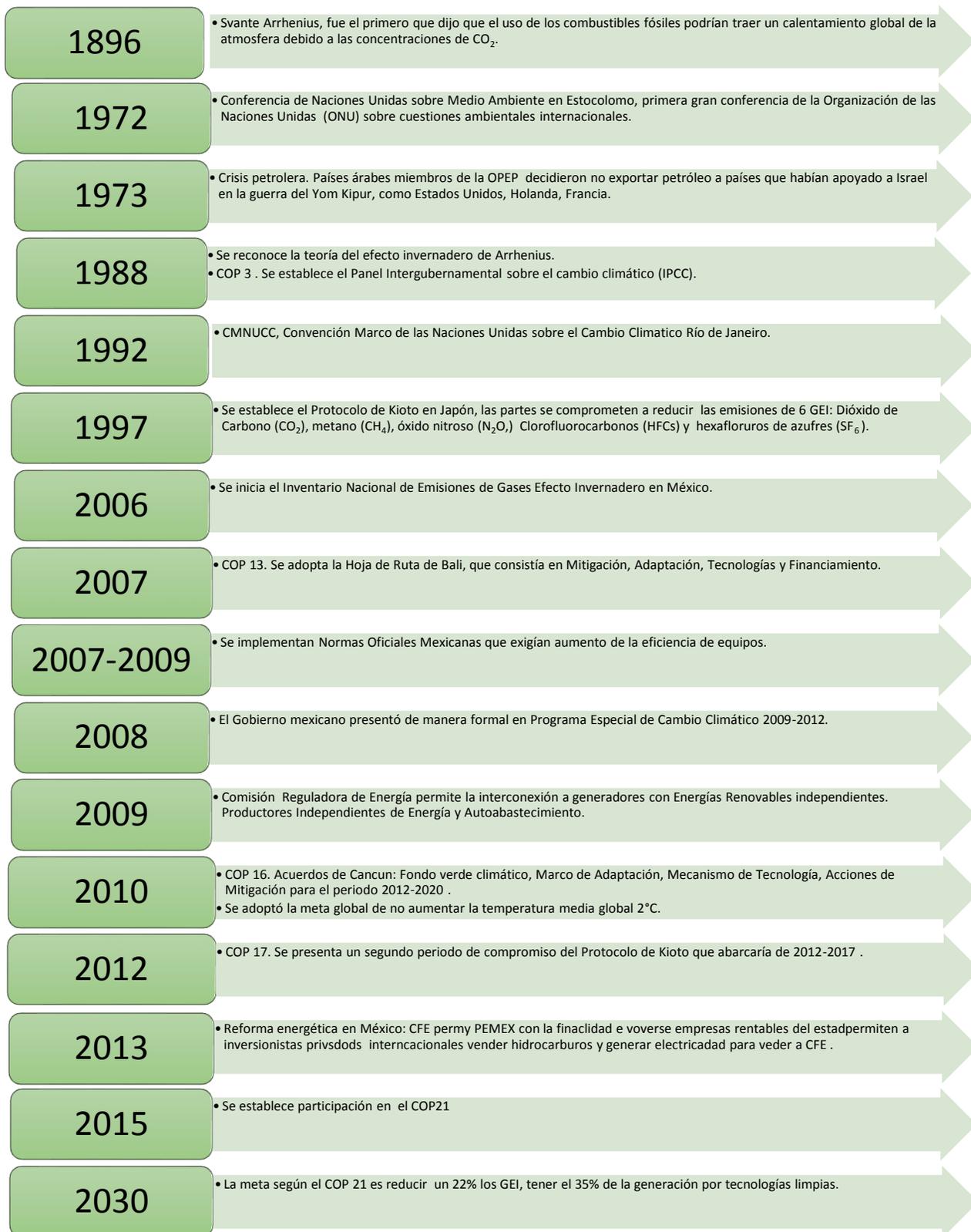


Figura 4.3 Acciones relacionadas al desarrollo sustentable en México.



## 4.2 Plataforma logística

La logística estudia el movimiento, es el proceso de proyectar, implementar y controlar un flujo de materia prima, productos e información, desde el punto de origen hasta el punto de consumo de una forma eficiente y lo más económica posible con el propósito de cumplir los requerimiento del cliente final. Aplica técnicas de control y gestión de flujos desde la fuente de generación hasta los puntos de consumo.

Algunas técnicas de control y de gestión mayormente implementadas son las siguientes:

- Manuales de objetivos y políticas: Facilitan el desarrollo de las funciones administrativas y operativas, mejorando la calidad y facilitando los procedimientos.
- Listado Maestro de Documentos y Registros: Generar, ordenar y conservar los registros.
- Manejar auditorías internas.
- Diagramas de proceso y flujo: Sirven para representar, explicar, analizar y mejorar un procedimiento.
- Gráficas de Gantt: Es un diagrama que usa gráficas de barras para ejemplificar las actividades que se estarán llevando en paralelo o que se harán una después de la otra, el objetivo de su implementación es controlar la realización simultanea de diversa tareas, así como pronosticar los tiempos que tomará cada una de las actividades programadas.
- Método de ruta crítica: Se dibuja un diagrama que conecte las diversas actividades a realizar definiendo costos y tiempos estimados en cada actividad, se identifica la trayectoria más larga, será la que defina la duración del proyecto y será la ruta crítica. Con el diagrama realizado se puede planear, supervisar y controlar el proyecto.

Aplicando las técnicas correctamente se puede colocar al menor costo de un producto en el lugar y tiempo dónde se demande.

La logística racionaliza la conducción de flujos de los productos.

Es muy importante esa zona puesto que se deben asegurar los subproductos en tiempo y forma para poder proveerlos a una población en específico, de otra manera no se podría confiar en el abastecimiento que podría dar la planta OTEC.

Sería considerando la producción de sólo cierto número de productos evitando su rezago o su escasez. Una logística integrada permite la distribución, producción y abastecimiento sincronizando ritmos y flujos.

Un sistema logístico proporciona el puente entre las áreas de producción y los mercados, separados en tiempo y distancia.

*“La plataforma logística es una infraestructura que aprovecha las roturas de carga de las cadenas de transporte y logística para concentrar actividades y funciones técnicas de valor añadido. Se trata de un conjunto de instalaciones (almacenes, patios, terminales de intercambio modal, edificios de oficinas, etc.), recursos humanos y materiales, sistemas de información y de gestión necesarios para llevar adelante operaciones de las cadenas de suministro o logística” (SCT y SE. 2013).*

Una plataforma logística integra el control de flujos físicos. Es una zona de actividad dónde los operadores y los usuarios administran mercancía y operaciones que agregan valor. Al final de vuelve una actividad económica que genera inversiones y empleos. Para lograr las plataformas logísticas se deben asumir el control de la logística, la infraestructura y el transporte. El transporte es la clave puesto que para tener los insumos y vender los productos producidos se necesita transporte carretero, ferroviario, marítimo y aéreo.

Las plataformas se clasifican por el cruce de variables, por el rango y por la complejidad.

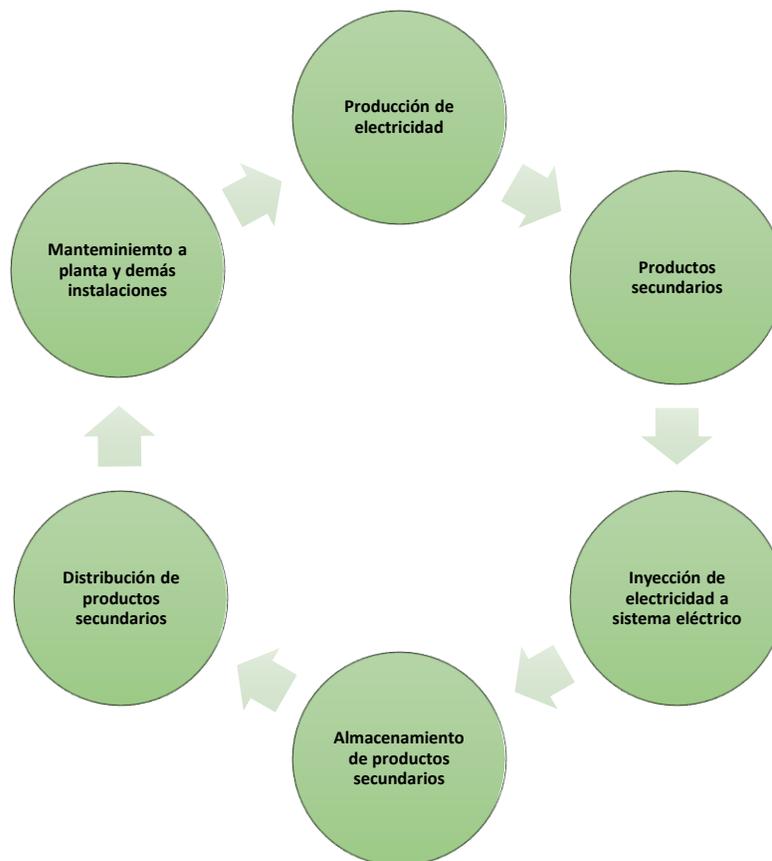


Figura 4.4 Proceso Logístico de plantas OTEC.

Por el cruce de variables se refiere a la combinación de áreas funcionales y por los modos de transporte que se presentan. Por el rango se debe a su radio de influencia, hay plataformas locales, metropolitanas, regionales, nacionales e internacionales. Por el nivel de complejidad se refiere a si la plataforma es gestionada por un solo responsable o varios.

Un proceso logístico es aquel que busca el mejor camino para producir y distribuir de la mejor manera los productos o servicios que se desean ofrecer. Se debe considerar dentro del proceso el traslado de los productos desde el punto de fabricación hasta su comercialización, se debe incluir el almacenamiento y los paros por mantenimiento.

El proceso logístico que se tendría en la plantas OTEC sería el de la Figura 4.4.

La importancia de mencionar que la planta OTEC podría funcionar como una plataforma logística a pequeña escala es importante debido a la diversificación de los productos que ofrece (Figura 4.5), ya que puede satisfacer varias necesidades básicas para cierto número de habitantes, pero se debe contar con los productos en tiempo y forma para proveer seguridad de abastecimiento.

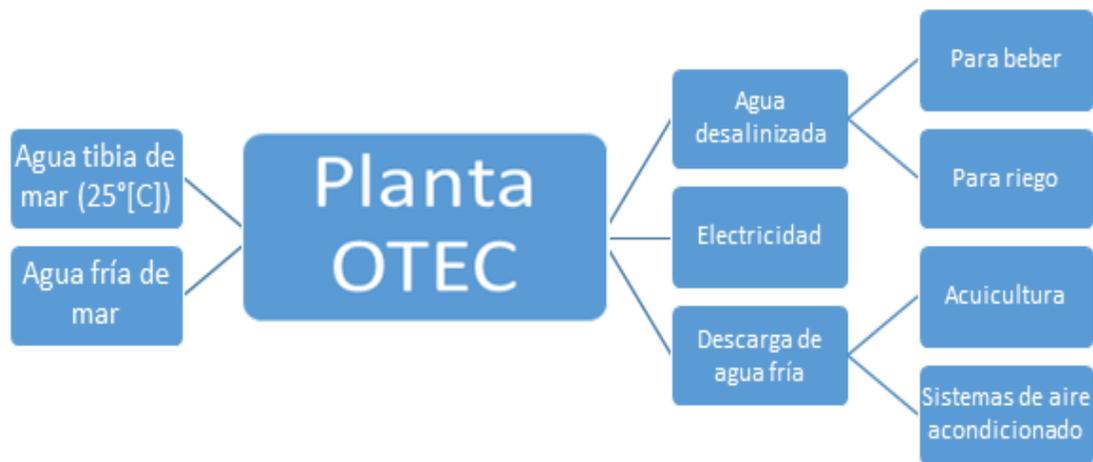


Figura 4.5 Multifuncionalidad de plantas OTEC (International Renewable Energy Agency. 2014)

### 4.3 Normas Ambientales aplicables al proyecto

Dentro del marco regulatorio de México hay diversas normas ambientales que se deben de cumplir para estar operando según los indiquen los reglamentos. En el caso de la planta OTEC se tendría que adecuar a la normativa que cumplen las centrales eléctricas que generan con energías renovables, tanto en aspectos legales con CFE como en aspectos ambientales antes la SEMARNAT, además de que cumplir con los reglamentos crea un proyecto responsable con el medio ambiente.

México cuenta con la Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) expide Normas Oficiales Mexicanas (NOM) del sector ambiental que se aplican al sector eléctrico y están referidas al control de niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera (humos, partículas suspendidas, bióxido de azufre y óxidos de nitrógeno), al agua y a la tierra, a la preservación y protección de la biodiversidad, al desarrollo sustentable, a la preservación, y restauración del suelo, agua y otros recursos naturales. Además, establecen la regulación por zonas y por capacidad del equipo de combustión en fuentes fijas que utilizan combustibles sólidos, líquidos o gaseosos. Los proyectos de generación eléctrica deben presentar ante la SEMARNAT estudios de Impacto Ambiental (EIA), hay leyes y regulaciones que se deben considerar en el EIA.

Los principales aspectos de energía eléctrica se basan en los artículos 25 al 28 y 134 de la Constitución Mexicana (González, M. & Ortega-Rubio, A.. 2008), dónde indica que el gobierno federal tiene el control de la generación y distribución de la electricidad por medio de la CFE. Después se encuentra la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), dónde indica que las centrales eléctricas deben contar con una autorización en materia ambiental y deben realizar un Reporte de



Estudios de Impacto Ambiental (REIA). Para tener establecidos los lineamientos a seguir por parte de las centrales eléctricas cuenta con su Reglamento (RLGEEPA) y las NOM en materia ambiental.

Cuando se desea construir o ampliar una central eléctrica se debe informar a la SEMARNAT del tipo de proyecto que se realizará y sus especificaciones mediante un informe preventivo, para que se corrobore que se cumplirá con lo establecido por la LGEEPA.

Existen tres zonas críticas definidas por la NOM, las cuales incluyen: las zonas metropolitanas de las ciudades de México, Guadalajara y Monterrey, las ciudades fronterizas y los corredores industriales.

Las principales NOM que determinan la normatividad ecológica en la industria eléctrica según la Secretaría de Energía en 2008 son:

- **NOM-001:** Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y cuerpos residuales.
- **NOM-081:** Establece lo límites máximos permisibles de emisión de ruido de las fuentes fijas y su método de medición.
- **NOM-113:** Establece las especificaciones de protección ambiental para la planeación, diseño, construcción, operación y mantenimiento de subestaciones eléctricas de potencia o de distribución que se pretendan ubicar en áreas urbanas, suburbanas, rurales, agropecuarias, industriales, de equipamiento urbano o de servicios turísticos.
- **NOM-114:** Establece las especificaciones de protección ambiental para la planeación, diseño, construcción, operación y mantenimiento de líneas de transmisión y de subtransmisión eléctrica y distribución que se pretendan ubicar en áreas urbanas, suburbanas, rurales, agropecuarias, industriales, de equipamiento urbano o de servicios turísticos.
- **NOM-156:** Establece el monitoreo y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire.

Para la planta OTEC también se considerará el cumplir la norma ISO 14001 porque promueve el desarrollo sustentable y es aplicable a cualquier organización.

- **Norma ISO 14001:** Es un enfoque plan de manejo ambiental adecuado y gestión ambiental que se basa en tres principios: Cumplimiento con normativa ambiental, prevención de la contaminación y la mejora continua del medio ambiente. Ayuda a reducir los costos al ayudar a la organización para un uso más eficiente de las materias primas.



## Conclusión

Implementar un proyecto sustentable mueve la economía del lugar al dar pie a la creación de empleos, aumenta el comercio en la zona, se mueve más dinero entre empresas y fomenta un crecimiento económico de la zona.

Creación de comunidades autosustentables, es posible porque se están considerando los factores, técnicos, económicos y sociales para la correcta implementación del uso de las nuevas tecnologías, garantizando la aceptación de la población de cambiar cierto tipos de hábitos o aumentar la eficiencia del uso de los recursos.

La logística y la organización van de la mano con la calidad, es por ello que para que las plantas OTEC logren funcionar como una plataforma logística debe aplicar las técnicas de gestión y calidad.

Al no haber normativa en México se tendría que ajustar a lo más parecido de los casos específicos que se pueda o crear nuevas leyes exclusivas de las plantas OTEC, fomentaría el empleo de abogados, así como muchos otros especialistas.



## 5. Conclusiones y trabajo a futuro

---

México tiene bastos recursos naturales para implementar diversas fuentes de energía renovable y procurarse su independencia energética. Una de ellas son las plantas OTEC, las cuales pueden operar en carga base para el sector eléctrico. México posee 11,122 km de costa (SEMARNAT. 2014) y ya se han ubicado 5 lugares que podrían albergar una planta OTEC.

Las plantas OTEC son tecnologías técnicamente viables, el fenómeno natural que aprovechan es predictivo y estable. Si se desarrollara esta tecnología en masa se abaratarían los costos permitiendo hacerla viable económicamente aún en pequeña escala.

Cada una de las configuraciones de los ciclos OTEC ofrecen diversas ventajas, de eficiencia o de subproductos, dependiendo de lo que se quiera obtener será el ciclo que hay que elegir para estudiar detalladamente para poder implementar en un futuro.

En el caso de este trabajo de tesis se eligió al ciclo abierto por la posibilidad de comercialización del agua desalinizada, dividiéndola en agua para inyectarse a la red de agua pública y agua potable. De la planta se obtendría 1,720 m<sup>3</sup>/día, para inyectarse a la red se dispondría de 1,142 m<sup>3</sup>/día y para consumo humano 950 m<sup>3</sup>/día. Se demostró, como lo indica el estado del arte de las plantas OTEC que la venta de agua es un factor clave para el análisis económico.

Considerando el ingreso por venta de Certificados de Energía Limpia y la implementación de sistemas de aire acondicionado que ocupen el agua fría de mar, el proyecto se vuelve viable económicamente. A pesar de que los costos de inversión se eleven por la implementación de los usos secundarios, de \$923,000,000 a \$946,043,101, resulta conveniente hacer dicha inversión. Con el fin de que puedan competir con otras tecnologías se busca ubicarlas en un mercado competente, como son las islas en desarrollo, poblaciones alejadas de la red eléctrica y de la red de agua potable.

La inclusión de este tipo de tecnologías depende totalmente de una población más consciente con el medio ambiente, pero no sólo que sea consciente sino que también actúe para hacer cumplir las metas que se han venido planteando para combatir el cambio climático desde 1997.

En cuanto al trabajo a futuro se tienen varios aspectos que se pretenden desarrollar:

Detallar la ingeniería básica y de detalle de toda la planta para poder estimar con mayor precisión los costos precios de inversión para una planta OTEC en México.

En este trabajo de tesis se realizó únicamente el análisis económico de una planta de ciclo abierto, pero sería conveniente realizar un estudio más detallado del ciclo cerrado y del ciclo híbrido. En incluir un análisis de sensibilidad técnico con diferentes variables como: gradiente térmico y refrigerante, para ver con qué gradiente conviene usar cuál refrigerante y análisis económico.

Otro aspecto a hacer en el futuro es obtener los costos de inversión y operación para implementar la piscicultura e invernaderos, así como conocer las cantidades que se producirían de los subproductos y los precios de venta, para incluir en el flujo de caja todos los rubros de usos secundarios.



## Referencias

---

1. Air Liquide. (NE). Enciclopedia de los gases. Junio 2016, de AirLiquide Sitio web: <http://encyclopedia.airliquide.com/encyclopedia.asp?GasID=85&CountryID=19&LanguageID=9>
2. Alfa Laval. (NE). A Mexican resort hotel stays cool thanks to heat exchanger technology. Junio 2016, de Alfa Laval Sitio web: <http://www.alfalaval.com/globalassets/documents/media/stories/exclusive-air-conditioning.pdf>
3. Ambientum. (2004). Aprovechamiento energético del océano. Mayo 2016, de Revista Ambientum Sitio web: [http://www.ambientum.com/revista/2004\\_01/OCEANO.htm](http://www.ambientum.com/revista/2004_01/OCEANO.htm)
4. Aviña, H. (2007). Factibilidad de instalar una planta OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion) en las costas de México (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.
5. Banco de México. (2016). Inflación. Julio 2016, de Banco de México Sitio web: <http://www.banxico.org.mx/dyn/portal-inflacion/index.htm>
6. Banco de México. (2016). Sistema de información económica. Julio 2016, de Banco de México Sitio web: <http://www.banxico.org.mx/SielInternet/consultarDirectorioInternetAction.do?accion=consultaCuadroAnalitico&idCuadro=CA54&or=7&locale=es>
7. Banco de México. (2016). Mercado de Valores (Tasas de Interés). Julio 2016, de Banco de México Sitio web: <http://www.banxico.org.mx/portal-mercado-valores/index.html>
8. Binger, A.. (NE). Potential and Future Prospects for Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) in Small Islands Developing States (SIDS). Saga University Institute of Ocean Energy. Saga, Japón.
9. Bio:Connection. (2013). Buscamos el equilibrio con los recursos del entorno. Julio 2016, de Bico Sitio web: <http://www.bico.com.mx/empresa/sustentabilidad/>
10. Castillo I. (2014). La ecológica y desastrosa Central Mareomotriz de La Rance. Mayo 2016, de Memento Mori! Sitio web: <http://ireneu.blogspot.mx/2014/07/la-ecologica-y-desastrosa-central.html>
11. Cifuentes, J. & Frías, M.. (2010). El Océano y sus recursos. Mayo 2016, de La ciencia para todos Sitio web: <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/17/htm/oceano.htm>
12. Comisión Federal de Electricidad. (2012). Costos y parámetros de referencia para la formulación de proyectos de inversión del sector eléctrico 2012. Edición 32. México.
13. Corona, S.. (2016). La subida de la gasolina y la luz amenaza con un repunte de la inflación en México. Agosto 2016, de El país Sitio web: [http://economia.elpais.com/economia/2016/07/05/actualidad/1467683379\\_970820.html](http://economia.elpais.com/economia/2016/07/05/actualidad/1467683379_970820.html)
14. Curso geografía del mar. (2010). Propiedades del agua de mar. Mayo 2016, de Curso geografía del mar Sitio web: [http://www7.uc.cl/sw\\_educ/geo\\_mar/html/h332.html](http://www7.uc.cl/sw_educ/geo_mar/html/h332.html)
15. DomoSolutions. (2016). Tarifa DAC la tarifa más cara de energía en México. Agosto 2016, de DomoSolutions Sitio web: <http://domosolutions.co/tarifa-dac/>
16. Diario Oficial de la Federación. (2012). Decreto por el que se declara área natural protegida, con el carácter de Área de protección de flora y fauna, la porción norte y la franja costera oriental, terrestres y marinas de la Isla de Cozumel, Municipio de Cozumel, Estado de Quintana Roo.. Julio 2016, de Secretaría de Gobernación Sitio web: [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5270007&fecha=25/09/2012](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5270007&fecha=25/09/2012)



17. EcolInventos. (2015). Descubre que es la energía azul y su gran potencial. Mayo 2016, de EcolInventos Sitio web: <http://ecoinventos.com/energia-azul/>
18. Engineering toolbox. (NE). Refrigerants-Environmental Properties. Junio 2016, de The Engineering Toolbox Sitio web: [http://www.engineeringtoolbox.com/refrigerants-properties-d\\_145.html](http://www.engineeringtoolbox.com/refrigerants-properties-d_145.html)
19. Environmental Protection Agency. (NE). Understanding Global Warming Potentials. Junio 2016, de United States Environmental Protection Agency Sitio web: <https://www3.epa.gov/climatechange/ghgemissions/gwps.html>
20. Faizal, M. & Rafiuddin, M. (24 Octubre 2012). Experimental studies on a closed cycle demonstration OTEC plant working on small temperature difference . Renewable energy, 51, 234-240. Junio 2016, De ScienceDirect Base de datos
21. Fernández L., J. (NE). Corrientes oceánicas en el continente americano. Junio 2016, de Hispanoteca Sitio web: <http://hispanoteca.eu/Landeskunde-LA/Mapas/Corrientes%20oce%C3%A1nicas.htm>
22. Finney, K.. (2008). Ocean Thermal Energy Conversion. Junio 2016, de University of Guelph Sitio web: [http://www.soe.uoguelph.ca/webfiles/gej/articles/gej\\_001-017-023\\_finney\\_ocean\\_thermal\\_energy.pdf](http://www.soe.uoguelph.ca/webfiles/gej/articles/gej_001-017-023_finney_ocean_thermal_energy.pdf)
23. Fondos Estructurales-FEDER. (2003). Fondo de Cohesión e ISPA. Guía del análisis costes-beneficios de los proyectos de inversión. p.26
24. García, A.(2015). Posibles Efectos Oceanográficos por la operación de una planta OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion) en la zona de Puerto Ángel, Oaxaca, México (Tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.
25. Gas Servei, S.A.. (NE). Clasificación de los gases refrigerantes por grupos de seguridad. Junio 2016, de Gas Servei, S.A. Sitio web: [http://ww2.educarchile.cl/UserFiles/Planificaciones/1/43322\\_179223\\_Gases%20refrigerantes.pdf](http://ww2.educarchile.cl/UserFiles/Planificaciones/1/43322_179223_Gases%20refrigerantes.pdf)
26. Gerdes J. (2014). Oceans of Energy. Mayo 2016, de Ensia Sitio web: <http://ensia.com/features/oceans-of-energy/>
27. Gobierno de la República. (2014). Reforma Energética. Julio 2016, de Gobierno de la República Sitio web: <http://cdn.reformaenergetica.gob.mx/explicacion.pdf>
28. González J. (2009). Energía undimotriz: EL aprovechamiento de la fuerza de las olas. Mayo 2016, de Fieras de la Ingeniería Sitio web: <http://www.fierasdelaingenieria.com/energia-undimotriz-el-aprovechamiento-de-la-fuerza-de-las-olas/>
29. González, M. & Ortega-Rubio, A.. (Mayo-Agosto 2008). Legislación ambiental aplicada en la evaluación del impacto ambiental del sector eléctrico mexicano. Boletín Mexicano de Derecho Comparado, 122, 1147-1178. Julio 2016, De www.juridicas.unam.mx Base de datos
30. Greenhouse Gas Protocol. (2007). Global Warming Potentials. Junio 2016, de Greenhouse Gas Protocol Sitio web: <http://www.ghgprotocol.org/files/ghgp/tools/Global-Warming-Potential-Values.pdf>
31. Grupo de Medio Ambiente y Energía de UPYD. (2009). La energía de los océanos. Mayo 2016, de Grupo de Medio Ambiente y Energía de UPYD Sitio web: <https://www.upyd.es/fckupload/file/medio%20ambiente/energia%20oceanos.pdf>
32. H. Avery, W. & Wu, C. (1994). Closed-cycle OTEC systems. En Renewable energy from the ocean. A guide to OTEC(90-209). New York: Oxford.
33. Infra Air Products. (1999). HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD (HDS) n BUTANO – C4H10 (GAS LICUADO). Junio 2016, de Infra Air Products Sitio web: <http://www.infra.com.mx/wp-content/uploads/2013/09/butano>
34. INECC. (2011). Programas para mitigar el cambio climático. Julio 2016, de INECC Sitio web: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/615/mitigar.pdf>



35. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). Climate Change 2014 Synthesis Report. Junio 2016, de Intergovernmental Panel on Climate Change Sitio web: [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5\\_SYR\\_FINAL\\_All\\_Topics.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_FINAL_All_Topics.pdf)
36. International Renewable Energy Agency. (2014). OCEAN THERMAL ENERGY CONVERSION TECHNOLOGY BRIEF. Julio 2016, de International Renewable Energy Agency Sitio web: [http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/Ocean\\_Thermal\\_Energy\\_V4\\_web.pdf](http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/Ocean_Thermal_Energy_V4_web.pdf)
37. IOC Brunn Memorial Lectures (2003). Energy from the Sea: the Potential and Realities of Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC), Patrick Takahashi. *IOC technical Series 66*, UNESCO 2003 (English Only)
38. Kempener, R. & Neumann, F.. (2014). Ocean Thermal Energy Conversion, Technology Brief. Mayo 2016, de IRENA Sitio web: [http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/Ocean\\_Thermal\\_Energy\\_V4\\_web.pdf](http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/Ocean_Thermal_Energy_V4_web.pdf)
39. Krock, H.. (2008). OTEC Ocean thermal power. Julio 2016, de Ocean Engineering & Energy Systems Sitio web: <https://www.youtube.com/watch?v=W9f4UIKuUPE>
40. LATIn. (NE). Introducción al estudio de fuentes renovables de energía. Junio 2016, de LATIn Sitio web: <http://escritura.proyectolatin.org/introduccion-al-estudio-de-fuentes-renovables-de-energia/71-mareomotriz/>
41. Leraand, T. K. & Van Ryzin, J.C. (NE). Air Conditioning with deep seawater: A cost-effective alternative for west beach, Oahu, Hawaii. Abril 2016, de Makai Ocean Engineering, Inc. Sitio web: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=528579>
42. Linde. (2016). Industrial Gases. Junio 2016, de Linde Sitio web: [http://www.linde-gas.com/en/products\\_and\\_supply/refrigerants/hfc\\_refrigerants/r32/index.html](http://www.linde-gas.com/en/products_and_supply/refrigerants/hfc_refrigerants/r32/index.html)
43. López de Haro M. (2014). Energía azul. Mayo 2016, de Academia de Ciencias de Morelos, A.C. Sitio web: <http://www.acmor.org.mx/?q=content/energ%C3%ADa-azu>
44. Los impuestos. (2014). Porcentaje de depreciación fiscal ¿Cómo se calcula?. Julio 2016, de Los Impuestos Sitio web: <http://losimpuestos.com.mx/porcentaje-de-depreciacion-fiscal/>
45. Meixueiro G., J. & Pérez C., M.A.. (2008). Metodología general para la evaluación de proyectos. Julio 2016, de Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos Sitio web: [http://www.cepep.gob.mx/work/models/CEPEP/metodologias/documentos/metodologia\\_general.pdf](http://www.cepep.gob.mx/work/models/CEPEP/metodologias/documentos/metodologia_general.pdf)
46. Moreno F., C.. (NE). Guía Práctica para calcular los beneficios que aportan los proyectos de energía eólica. Julio 2016, de CUBASOLAR Sitio web: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Energia/Energia33/HTML/articulo07.htm>
47. Murcia, J., Díaz, F., Medellín, V., Alirio, J., Santana, L., González, M., Oñate, G. & Baca, C.. (2009). Proyectos, formulación y proyectos de evaluación. México: Alfaomega.
48. Nihous, G. C. & Syed, M.A. (1996). A financing strategy for small OTEC plants. Pergamon. Honolulu, U.S.A.
49. Noriega Giral. (2006). [diapositivas de PowerPoint] Recuperado de clase de Diagnósticos Energéticos, UNAM-FI.
50. Nowak, K. C. (April 2, 2012). "Stochastic Streamflow Simulation at Interdecadal Time Scales and Implications to Water Resources Management in the Colorado River Basin" (PDF). Center for Advanced Decision Support for Water and Environmental Systems. University of Colorado. p. 114. Retrieved July 11, 2013.
51. OM. (Febrero de 2014). Marine Renewable Energy. Obtenido de <http://www.energias-renovables-marinas.com/energia-undimotriz/primera-generacion-de-energia-con-olas-del-mar-en-brasil-1707573>
52. OTEC Foundation. (NE). What is OTEC. Junio 2016, de Otec News Sitio web: <http://www.otecnews.org/what-is-otec>
53. P. Rafferty, J.. (2016). Ocean thermal energy conversion (OTEC). MAyo 2016, de Encyclopededia Británica Sitio web: <http://global.britannica.com/technology/ocean-thermal-energy-conversion>



54. Puyuelo, A., Ramos, C., Recio, A., Rodríguez, A. & Rodríguez, D.. (NE). Energía térmico oceánica. Mayo 2016, de Química-IngenieríaEnergía Sitio web: <https://quimica-ingenieriaenergia.wikispaces.com/ENERG%C3%8DA+T%C3%89RMICA+OCE%C3%81NICA#5>
55. Reuters. (2016). Stocks. Julio 2016, de Reuters Sitio web: <http://www.reuters.com/finance/stocks/>
56. Rodiles, F. (2014) . [diapositivas de PowerPoint] Recuperado de clase de Evaluación de Proyectos Energéticos. UNAM-FI.
57. Sánchez, D.. (2014). Hermosilla alcanza casi los 50 grados; rompe récord en el mundo. Mayo 2016, de Excelsior Sitio web: <http://www.excelsior.com.mx/nacional/2014/06/03/963120>
58. Sánchez Granado A. (2009). Nueva fuente de energía limpia: electricidad por ósmosis. Mayo 2016, de DW Sitio web: <http://www.dw.com/es/nueva-fuente-de-energ%C3%ADa-limpia-electricidad-por-%C3%B3smosis/a-4929176>
59. SEMARNAT. (2014). Costas de México. Agosto 2016, de SEMARNAT Sitio web: <http://www.semarnat.gob.mx/temas/gestion-ambiental/zona-federal/costas-de-mexico>
60. Schirber M. (2008). How tides could power the future. Mayo 2016, de Livescience Sitio web: <http://www.livescience.com/2706-tides-power-future.html>
61. SCT y SE. (2013). Definición de un sistema nacional de plataformas logísticas y plan e implementación. Julio 2016, de Secretaría de Comunicaciones y Transportes y Secretaría de Economía Sitio web: <http://www.elogistica.economia.gob.mx/swb/work/models/elogistica/Resource/12/1/images/ResEjecProyectoSNPLM%C3%83%C2%A9xico.pdf>
62. SENER. (2014). Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacioanl 2016-2030. Julio 2016, de Secretaría de Energía Sitio web: [http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/102166/PRODESEN\\_2016-2030\\_1.pdf](http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/102166/PRODESEN_2016-2030_1.pdf)
63. Servicio de Administración Tributaria. (2014). Ley del impuesto sobre la renta (ISR). Julio 2016, de Secretaría de Hacienda y Crédito Público Sitio web: [http://www.sat.gob.mx/fichas\\_tematicas/reforma\\_fiscal/Paginas/ley\\_impuesto\\_renta.aspx](http://www.sat.gob.mx/fichas_tematicas/reforma_fiscal/Paginas/ley_impuesto_renta.aspx)
64. Servicio de Administración Tributaria. (2016). Cómo se determina el reparto de utilidades en el Régimen de Incorporación Fiscal. Julio 2016, de Secretaría de Hacienda y Crédito Público Sitio web: [http://www.sat.gob.mx/repartodeutilidades/Paginas/documentos/Ejemplo\\_Determinacion\\_PT\\_U-RIF.pdf](http://www.sat.gob.mx/repartodeutilidades/Paginas/documentos/Ejemplo_Determinacion_PT_U-RIF.pdf)
65. Sistema Nacional de Información del Agua. (2012). Derechos por explotación uso o aprovechamiento de aguas nacionales, según zonas de disponibilidad, 2011 (centavos por metro cúbico). Julio 2016, de Comisión Nacional del Agua Sitio web: <http://www.conagua.gob.mx/atlas/usosdelagua37.html>
66. Stock Footage (2013). Energía mareomotriz, Rance. Mayo 2016, de Framepool Sitio Web: <http://footage.framepool.com/es/shot/406879456-highlights1513-usine-maremotrice-de-la-rance-rance-bretagne-energia-hidraulica>
67. Subdelmar. (2011). La Planta mareomotriz más grande del mundo esta en Corea del Sur. Mayo 2016, de Subdelmar Sitio web: <http://www.subdelmar.com/noticias/73-cambio-climatico-y-energias-renovables/260-la-planta-mareomotriz-mas-grande-del-mundo-esta-en-corea-del-sur#>
68. Subsea world news. (2015). Makai starts up OTEC plant. Mayo 2016, de Subsea world news Sitio web: <http://subseaworldnews.com/2015/08/24/makai-starts-up-otec-plant>
69. TextosCientificos.com. (2009). Dispositivos de generación de energía a través de las olas. Mayo 2016, de TextosCientificos.com Sitio web: <http://www.textoscientificos.com/energia/dispositivos-generacion-energia-olas>



70. UNESCO. (2012). Educación para el desarrollo sostenible. Julio 2016, de Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura Sitio web: <http://unesdoc.unesco.org/images/0021/002167/216756s.pdf>
71. Unidad de Proyectos Sustentables y Cambio Climático. (2009). Financiamiento a proyectos de energía y medio ambiente. Julio 2016, de Nafin Sitio web: [http://www.iie.org.mx/proyectorfotovoltaico/DESCARGAS/2DO\\_COLOQUIO\\_INTERNACIONAL/29\\_SEPTIEMBRE\\_2009/01\\_MECANISMOS\\_DE\\_FINANCIAMIENTO/02\\_MECANISMOS\\_DE\\_FINANCIAMIENTO\\_EN\\_NAFIN\\_PARA\\_PROYEC\\_DE\\_ER\\_x\\_Enrique%20Nieto/ENI\\_Financiamiento\\_a\\_proyectos\\_Energia.pdf](http://www.iie.org.mx/proyectorfotovoltaico/DESCARGAS/2DO_COLOQUIO_INTERNACIONAL/29_SEPTIEMBRE_2009/01_MECANISMOS_DE_FINANCIAMIENTO/02_MECANISMOS_DE_FINANCIAMIENTO_EN_NAFIN_PARA_PROYEC_DE_ER_x_Enrique%20Nieto/ENI_Financiamiento_a_proyectos_Energia.pdf)
72. Varios. (2016). Hidrocarburos y derivados. Junio 2016, de Alibaba.com Sitio web: <https://spanish.alibaba.com>
73. Vega L.A. (1992), "Economics of Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC)" in R.J. Seymour, ed. Ocean Energy Recovery: The State of the Art, American Society of Civil Engineers, New York. [The OTEC capital costs and related costs of electricity and water production are presented]
74. Vega, L.A.. (1999). OTEC overview. Mayo 2016, de OTEC News Sitio web: <http://www.otecnews.org/portal/otec-articles/ocean-thermal-energy-conversion-otec-by-l-a-vega-ph-d/#economic>
75. Vista al mar. (6 de Julio de 2014). Vista al mar. Obtenido de <https://www.vistaalmar.es/medio-ambiente/contaminacion/4084-99-plastico-tiramos-ocrano-desaparecido-misteriosamente.html>
76. Vyawahare, M.. (2015). Hawaii first to harness deep-ocean temperatures for power. Agosto 2016, de Scientific American Sitio web: <http://www.scientificamerican.com/article/hawaii-first-to-harness-deep-ocean-temperatures-for-power/>
77. WordPress. (2015). Corrientes Oceánicas. Mayo 2016, de GeoEnciclopedia Sitio web: <http://www.geoenciclopedia.com/corrientes-oceanicas/>
78. Yañez, G. (2010). El Standard 34 de ASHRAE. Junio 2016, de Mundo HVAC&R Sitio web: <https://www.mundohvacr.com.mx/mundo/2008/01/el-standard-34-de-ashrae-nomenclatura-de-los-gases-refrigerantes/>
79. Yañez, G. (2015). Refrigerantes y Refrigeración. Junio 2016, de Gruporefrigerantes Sitio web: <http://www.gruporefrigerantes.tips/>
80. Zavala, J. (2016), Diseño de un sistema de A/C a partir de agua marina de una planta OTEC de 1MWe (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.



## Portales y documentos de interés

---

1. <http://www.cre.gob.mx/>
2. <http://sie.energia.gob.mx/>
3. Secretaría de Energía. (2014). Estrategia Nacional de Energía 2014-2028. Julio 2016, de Secretaría de Energía Sitio web:  
<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/214/ENE.pdf>
4. Congreso de la Unión. (2013). Ley para el aprovechamiento de energías renovables y el financiamiento de la transición energética. Julio 2016, de Comisión Federal de Electricidad Sitio web:  
[http://www.cfe.gob.mx/ConoceCFE/1\\_AcercadeCFE/MarcoLegalNormativo/Lists/Leyes1/Attachments/40/Leyaprovenergiasrenovables14102014.pdf](http://www.cfe.gob.mx/ConoceCFE/1_AcercadeCFE/MarcoLegalNormativo/Lists/Leyes1/Attachments/40/Leyaprovenergiasrenovables14102014.pdf)
5. Datos de batimetría: <https://maps.ngdc.noaa.gov/viewers/bathymetry/>

# I. Anexo de análisis térmico

## Diagrama de Moody

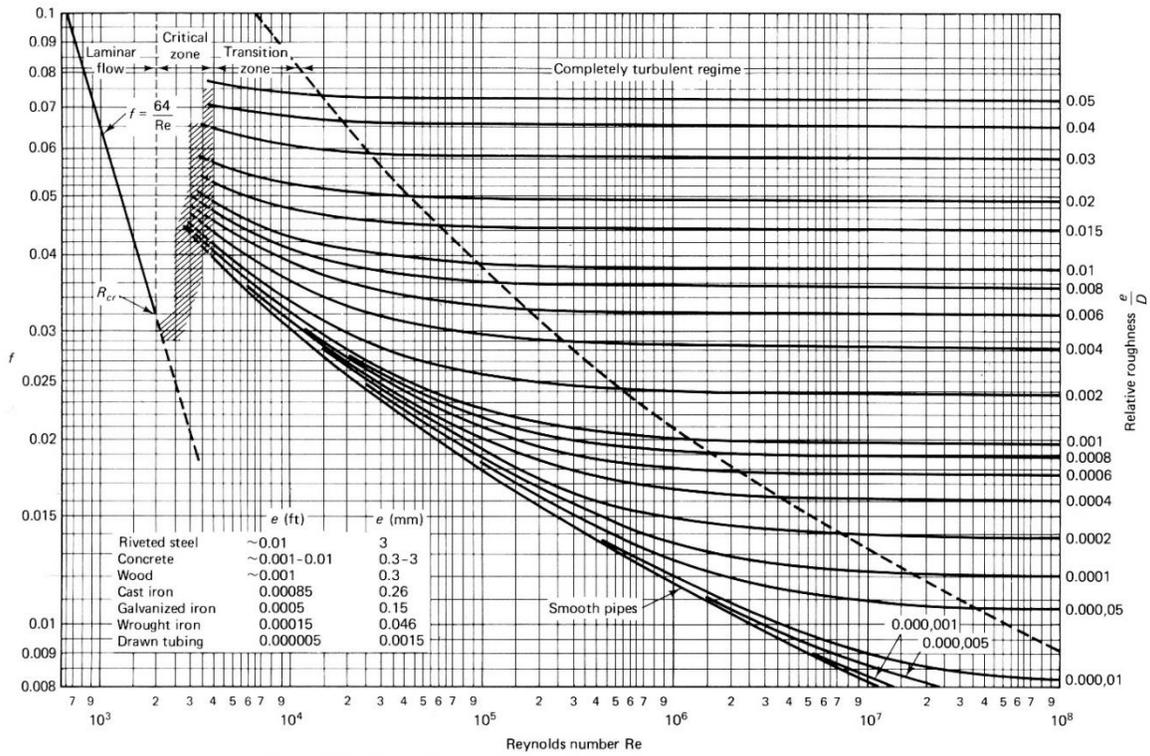


Figura I.1 Diagrama de Moody<sup>9</sup>

<sup>9</sup> Moody, I. ASME, Vol 66, 1944.





A continuación se presentan todos los estados para el ciclo cerrado.

	Fuente de calor										Sumidero									
	Fluido de trabajo					Fluido de calor					8A					9s				
Referencia	1	2s	2	3	4s	4r	5	5A	6s	6	7	8	8A	9s	9	10				
T [°C]	25	11.9	11.9	11.9	12.03059377	12.0701952	25	25	25.00110805	25.00110805	22.5	4	4	4	4	12				
P [Mpa]	0.881390978	0.671524336	0.671524336	0.67152434	0.881390978	0.88139098	0.296937058	0.069782227	0.13	0.13	0.101325	10.176195	0.0496033	0.1625	0.1625	0.101325				
slc [kJ/kgK]				1.10726089	1.107260894	1.10726089	0.367149145	0.367207761	0.367207781	0.367275303	0.331896544	0.06110279	0.06110278	0.06110279	0.061297254	0.18060545				
spas [kJ/kgK]																				
smexa [kJ/kgK]			2.36020482																	
h [kJ/kg]			2.388307818																	
h [kJ/kg]			597.6702985	230.314594	230.7243554	230.826786	105.1012467	104.8909101	104.9513062	104.9714383	94.46541472	16.8131984	16.8620478	16.9748913	17.0287858	50.4094049				
hmezcla [kJ/kg]																				
m [kg/s]			431.714847	431.714845	431.7148447	431.714845	15084.98461	15084.98461	15084.98461	15084.98461	15084.98461	4658.59858	4658.59858	4658.59858	4658.59858	4658.59858				
m [m³/día]			37.300.16	37.300.16	37.300.16	37.300.16	1.303.342.67	1.303.342.67	1.303.342.67	1.303.342.67	1.303.342.67	402.502.92	402.502.92	402.502.92	402.502.92	402.502.92				
Co [kJ/kgK]			1.974584205	2.5688253	2.5688253	2.5688253	4.180748465	4.109833974	4.181231438	4.181231465	4.182504285	4.20794681	4.20773087	4.20773087	4.207199758	4.19251886				
Density [kg/m³]	997.0476368		14.52750244	512.006883	512.006883	512.288918	997.003519	1011.90594	997.0632881	997.050526	997.6596885	1027	999.949304	1000.00514	1000.005128	999.453054				
v [Viscosidad cinemática [m²/s]																				
v [Viscosidad dinámica [kg/m·s]																				
Calidad			#Superheated vapor	0								0				0.00123412				

Q [kW]	158483.2036			155506.892												155506.892
W [kW]			3107.436984		176.9001136	221.125142										709.0067904

Datos  
Suposiciones  
Lo que varía

Wneto [kW] 1000.000  
Eficiencia térmica 0.63%

Tabla 1-2 Estados del ciclo cerrado

Datos



A continuación se presentan todos los estados para el ciclo híbrido.

Referencia	Fuente de calor														Fluido de trabajo								Sumidero				
	1	1A	2s	2	3	4	14	5	6s	6	7	8s	8	9	9A	10s	10	11									
T [°C]	25	25	25.0009197	25.0040417	25.0040417	25.0040417	25.0040417	22	11.9	12.02193	11.9	12.0305938	12.0491951	4	4.00000597	4.010613373	8										
P [Mpa]	0.101325	0.28694575	0.00540256	0.05540256	0.00317069	0.00317069	0.101325	0.88139098	0.67152434	0.67152434	0.67152434	0.88139098	0.88139098	10.176195	0.04945782	0.231325	0.101325										
slq [kJ/kgK]	0.367199642	0.36722497	0.36722439	0.36722439	0.36728817	0.36728165	0.36726632				1.10726989			0.06110278	0.06110278	0.061266833	0.12133371										
spe [kJ/kgK]					8.55656062			2.35291575																			
smezal [kJ/kgK]								2.35291575	2.36171395																		
h [kJ/kg]	104.829222	104.83129	104.88144	104.89494		104.846124	104.937019				230.314594	230.724855	230.769884	16.81319368	16.8618463	17.0437135	33.6265894										
hmezcla [kJ/kg]					2546.51272			597.92038																			
hmezcla [kJ/kg]								565.388511	587.896465																		
m [kg/s]	43.2864358	43.2864358	43.2864358	43.2864358	34.6291487	34.6291487	8.65728716	230.289742	230.289742	230.289742	230.289742	230.289742	230.289742	4879.464575	4879.46457	4879.464575	4879.46457										
Cp [kJ/kgK]	4.18159557	4.18159309	4.18144773	4.18144644	1.91182824	4.18159789	4.18131333	1.97458421	1.85534286	2.5888253	2.5888253	2.5888253	2.58876461	4.2073177	4.20692867	4.206901202	4.19905643										
Densidad [kg/m3]	997.0476368	997.003352	997.026683	997.025882	0.02308006	997.002316	997.0466	19.0629889	14.5174015	512.006893	512.328348	512.302336	1027	999.949204	1000.03918	1000.039174	999.802981										
v [Viscosidad cinemática [m2/s]																											
μ [Viscosidad dinámica [kg/ms]					0.00088895																						
Calidad					1	0	0	1			0																
Q [KW]						84552.8355		84552.8355			82347.4416						82347.4416										
W [KW]											2310.24259		104.84874				1140.043478										

Datos  
Suposiciones  
Lo que varía

Wneto [KW] 1000.00  
Eficiencia térmica 1.18%

Tabla I-3 Estados del ciclo híbrido

## II. Anexo de Análisis financiero

Tabla II-1 Cálculo del rendimiento promedio del mercado y libre de riesgo.<sup>10</sup>

MERCADO DE VALORES				INFLACIÓN			RENDIMIEN TOS BOLSA REALES	RENDIMIEN TOS LIBRES (CETES CORRIENTE)	RENDIMIEN TOS LIBRES (CETES REALES)
Año	Fecha	IPC	%Rendimiento	FECHA	INPC PROMEDIO ANUAL	Inflación			
1	31/12/2002	6127.09		Dic 2002	70.9619			6.98%	6.98%
2	31/12/2003	8795.28	43.55%	Dic 2003	73.7837	3.98%	38.06%	6.98%	2.89%
3	31/12/2004	12917.88	46.87%	Dic 2004	75.6443	2.52%	43.26%	6.98%	4.35%
4	30/12/2005	17802.71	37.81%	Dic 2005	78.6611	3.99%	32.53%	6.98%	2.88%
5	29/12/2006	26448.32	48.56%	Dic 2006	81.5160	3.63%	43.36%	6.98%	3.23%
6	31/12/2007	29536.83	11.68%	Dic. 2007	84.7496	3.97%	7.42%	6.98%	2.90%
7	31/12/2008	22380.32	-24.23%	Dic 2008	89.0930	5.12%	-27.92%	6.98%	1.76%
8	31/12/2009	32120.47	43.52%	Dic 2009	93.8126	5.30%	36.30%	6.98%	1.60%
9	31/12/2010	38550.79	20.02%	Dic 2010	97.7122	4.16%	15.23%	6.98%	2.71%
10	31/12/2011	37077.52	-3.82%	Dic 2011	100.8902	3.25%	-6.85%	6.98%	3.61%
11	31/12/2012	43705.83	17.88%	Dic 2012	104.5750	3.65%	13.72%	6.98%	3.21%
12	31/12/2013	42727.09	-2.24%	Dic 2013	109.848	5.04%	-6.93%	6.98%	1.84%
13	31/12/2014	43112.29	0.90%	Dic 2014	114.88975	4.59%	-3.53%	6.98%	2.29%
14	31/12/2015	42997.23	-0.27%	Dic 2015	116.663583	1.54%	-1.78%	6.98%	5.35%

Rendimiento promedio del mercado = 14.07%

Rendimiento libre de riesgo (CETES) promedio s = 3.26%

Tabla II-2 Cálculo del Costo Promedio Ponderado de Capital.

Tasa Libre de Riesgo:	3.26%					
Rendimiento de Mercado:	14.07%					
Beta:	0.67					
CAPM	=	(R <sub>f</sub> )	+	b	x	(R <sub>m</sub> -R <sub>f</sub> )
CAPM	=	3.26%	+	0.67	x	10.81%
CAPM	=	10.50 %	TASA DE DESCUENTO REAL			

<sup>10</sup> Banco de México. (2016).



Tabla II-3 Cálculo del Promedio ponderado del costo de capital propio.

<b>WACC</b>	<b>Capital propio:</b>	<b>50.00%</b>
	Deuda:	50.00%
	CAPM Tasa de interés de Costo de capital propio	10.50%
	Tasa de interés (costo de la deuda)	5.27%
	ISR	30%
	<b>WACC =</b>	<b>7.10%</b>