



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE  
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



*Optimización de Redes de Distribución de Agua y Energía en Regiones  
Aisladas: Un enfoque multiobjetivo que incorpora tecnologías de  
conversión de energía térmica oceánica*

**TESIS**

PARA OPTENER EL GRADO DE  
*DOCTOR EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA*

PRESENTA

M.C. Arturo Alejandro Rojas Punzo

DIRECTOR:

Dr. Fabricio Nápoles Rivera

FEBRERO DE 2024

MORELIA, MICHOACÁN DE OCAMPO, MÉXICO

# ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE GENERAL</b> .....	i
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	iii
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	iv
<b>RESUMEN</b> .....	v
<b>ABSTRACT</b> .....	vii
<b>NOMENCLATURA</b> .....	ix
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	xiii
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1. <i>Generalidades</i> .....	1
1.2. <i>Justificación</i> .....	7
1.3. <i>Planteamiento del problema</i> .....	7
1.4. <i>Hipótesis</i> .....	9
1.5. <i>Objetivo General</i> .....	10
1.6. <i>Objetivos Particulares</i> .....	10
<b>2. MARCO TEÓRICO</b> .....	11
2.1. <i>Antecedentes</i> .....	11
2.2. <i>Plantas de Conversión de Energía Térmica Oceánica</i> .....	12
2.3. <i>Descripción termodinámica de los ciclos OTEC</i> .....	16
2.4. <i>Energía renovable y sistemas OTEC en regiones aisladas</i> .....	17
<b>3. METODOLOGÍA</b> .....	23
3.1. <i>Etapas del trabajo</i> .....	23
3.2. <i>Modelo Matemático</i> .....	24
3.3. <i>Caso de Estudio</i> .....	33
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	37
4.1. <i>Análisis del conjunto de soluciones individuales con respecto a la maximización del beneficio total</i> .....	39
4.2. <i>Evaluación de instalaciones de energías renovables: un análisis comparativo</i> .....	41
4.3. <i>Solución propuesta bajo suposición equilibrada</i> .....	42
<b>5. CONCLUSIONES</b> .....	45
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	48



---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Red de distribución de agua y energía considerando nuevas plantas OC-OTEC y centrales eléctricas de doble propósito.....	8
Figura 2. Representación de una planta OTEC.....	12
Figura 3. Diagrama de una planta OTEC de ciclo abierto.....	13
Figura 4. Diagrama de una planta OTEC de ciclo cerrado.....	14
Figura 5. Diagrama de una planta OTEC de ciclo híbrido.....	15
Figura 6. Diagrama T-S del ciclo abierto de una planta OTEC.....	16
Figura 7. Diagrama T-S de un ciclo cerrado de una planta OTEC.....	17
Figura 8. Mapa de la Polinesia Francesa.....	18
Figura 9. Análisis del gradiente de temperatura promedio global entre la superficie y las aguas profundas del océano a 1000 m de profundidad por parte de la <i>Sea Education Associatio (SEA)</i> .....	20
Figura 10. Datos SEA CTD para temperatura versus profundidad tomados de cuatro cruceros diferentes dentro de 5 a 10 millas náuticas de Papeete, Tahití.....	21
Figura 11. Frente Pareto para el caso de estudio.....	38
Figura 12. Red de distribución óptima de la solución seleccionada para el caso de estudio.....	44

---

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Producción y consumo anual de energía eléctrica en la Polinesia Francesa.....	18
Tabla 2. Fuentes de obtención de energía eléctrica en la Polinesia Francesa .....	19
Tabla 3. Producción máxima de energía.....	34
Tabla 4. Rendimiento máximo de agua .....	34
Tabla 5. Población de la Polinesia Francesa .....	35
Tabla 6. Demanda de agua y energía por usuario .....	35
Tabla 7. Soluciones óptimas para el frente Pareto .....	38
Tabla 8. Minimización de la función ambiental según la tecnología renovable instalada.....	42
Tabla 9. Producción de energía propuesta .....	43
Tabla 10. Producción de agua propuesta .....	43

## RESUMEN

*Optimización de Redes de Distribución de Agua y Energía en Regiones Aisladas:  
Un enfoque multiobjetivo que incorpora tecnologías  
de conversión de energía térmica oceánica*

M.C. Arturo Alejandro Rojas Punzo

Dirigida por: Dr. Fabricio Nápoles Rivera

En regiones caracterizadas por la escasez de recursos y una elevada susceptibilidad al cambio climático y la degradación ambiental, como los territorios insulares y los archipiélagos, la urgente necesidad de desarrollar tecnologías sostenibles para la gestión de agua y energía se erige como una medida estratégica para mitigar la escasez de recursos y atenuar el impacto antropogénico sobre el medio ambiente. El presente trabajo de tesis propone un exhaustivo análisis de optimización multiobjetivo que integra la instalación de una Planta de Conversión de Energía Térmica Oceánica de Ciclo Abierto (*OC-OTEC*, por sus siglas en inglés) en la red de distribución de agua y energía de zonas aisladas. La metodología de optimización contempla tres objetivos interconectados: la viabilidad económica, cuantificada mediante la rentabilidad anual; la sostenibilidad ambiental, manifestada en la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> y el uso de recursos hídricos subterráneos; y el impacto social, particularmente en lo concerniente a la generación de empleo. Los resultados obtenidos revelan el impacto positivo de la integración de la planta *OC-OTEC* en la infraestructura de distribución, logrando una configuración óptima que armoniza eficazmente consideraciones económicas, ambientales y sociales. En última instancia, el modelo propuesto se aplica al estudio de caso de Tahití, ubicado en la Polinesia Francesa, como ejemplo representativo de una región aislada.

**Palabras clave:** Optimización multiobjetivo, *OTEC*, Conversión de Energía Térmica Oceánica de Ciclo Abierto, red de distribución de agua y energía, regiones aisladas.



## ABSTRACT

*Optimization of Distribution Networks for Water and Energy in Isolated Regions:  
A Multi-Objective Approach Incorporating  
Ocean Thermal Energy Conversion Technologies*

BSc. Arturo Alejandro Rojas Punzo

Supervisor: Dr. Fabricio Nápoles Rivera

In regions characterized by resource scarcity and heightened susceptibility to climate change and environmental degradation, such as island territories and archipelagos, the pressing need to develop sustainable technologies for water and energy management emerges as a strategic measure to mitigate resource scarcity and alleviate anthropogenic impact on the environment. This thesis work proposes a comprehensive multi-objective optimization analysis that integrates the installation of an Open-Cycle Ocean Thermal Energy Conversion (OC-OTEC) Plant into the water and energy distribution network of isolated areas. The optimization methodology considers three interconnected objectives: economic viability, quantified through annual profitability; environmental sustainability, manifested in the reduction of CO<sub>2</sub> emissions and the use of groundwater resources; and social impact, particularly concerning job creation. The results reveal the positive impact of integrating the OC-OTEC plant into the distribution infrastructure, achieving an optimal configuration that effectively harmonizes economic, environmental, and social considerations. Ultimately, the proposed model is applied to the case study of Tahiti, located in French Polynesia, as a representative example of an isolated region.

**Key words:** multi-objective optimization, Open Cycle OTEC, water and energy distribution network, isolated regions.



## NOMENCLATURA

### Acrónimos

AP	Ganancia anual
DP	Planta de energía de doble propósito
EF	Función ambiental
OC	Ciclo abierto
OF	Función objetivo
OTEC	Conversión de energía térmica oceánica
TAC	Costo total anual

### Subíndices

$g$	Ubicación de los usuarios agrícolas
$l$	Diferentes fuentes de energía
$m$	Diferentes fuentes de agua
$p$	Ubicación de los tanques de almacenamiento de agua existentes
$q$	Posible ubicación de nuevos tanques de almacenamiento de agua
$r$	Ubicación de los usuarios domésticos
$t$	Tiempo de distribución en años

### Variables

$h^{agr}$	Caudal interno de la central de distribución agrícola
$h^{dom}$	Caudal interno de la central de distribución doméstica
$\Theta^{d,max}$	Capacidad máxima de la nueva planta DP
$\Theta^{d,min}$	Capacidad mínima de la nueva planta DP
$\Theta^{o,max}$	Nueva capacidad máxima de la planta OC-OTEC
$\Theta^{o,min}$	Capacidad mínima de la nueva planta OC-OTEC
$\Theta^{sto,max}$	Nuevos tanques de almacenamiento de capacidad máxima
$\Theta^{sto,min}$	Capacidad mínima de los nuevos tanques de almacenamiento
$E^{agr}$	Demanda energética de los usuarios agrícolas
$E^{dom}$	Demanda energética de los usuarios domésticos
$E_{prod}$	Energía producida por cada fuente
$S^{max}$	Volumen máximo de agua en tanques de almacenamiento
$T_{energy}$	Energía total generada
$T_{water}$	Agua total obtenida
$W_{obtained}$	Agua obtenida por cada fuente
$W^{sp}$	Envío de agua a los tanques de almacenamiento existentes
$W^{spg}$	Envío de agua desde los tanques de almacenamiento existentes a los usuarios agrícolas

$W^{spr}$	Envío de agua desde los tanques de almacenamiento existentes a los usuarios domésticos
$W^{sq}$	Envío de agua a nuevos tanques de almacenamiento
$W^{sqg}$	Envío de agua desde nuevos tanques de almacenamiento a usuarios agrícolas
$W^{sqr}$	Envío de agua desde nuevos tanques de almacenamiento a usuarios domésticos
$W^{stop}$	Volumen de agua en tanques de almacenamiento existentes
$W^{stoq}$	Volumen de agua en nuevos tanques de almacenamiento
$SW$	Caudal de agua de mar consumida por planta
$AWD$	Demanda hídrica de los usuarios agrícolas
$DWD$	Demanda hídrica de los usuarios domésticos
$Emm$	Emisiones de CO <sub>2</sub> por fuente
$GEP$	Eficiencia en la conversión de energía
$IC^d$	Coste de instalación de la nueva planta DP
$IC^o$	Coste de instalación de la nueva planta OC-OTEC
$IC^{sto}$	Costo de instalación de nuevos tanques de almacenamiento
$Naw$	Uso normalizado del agua del acuífero
$Nem$	Emisiones normalizadas de CO <sub>2</sub>
$OC^d$	Costo de operación de la nueva planta de DP
$OC^o$	Costo de operación de la nueva planta OC-OTEC
$SW^{dmax}$	Volumen máximo de agua de mar en la planta de DP
$SW^{omax}$	Volumen máximo de agua de mar en la planta OC-OTEC
$StoC$	Costo de almacenamiento
$TW^{agr}$	Efluente de la central de distribución agrícola
$TW^{agrc}$	Afluente de la central de distribución agrícola
$TW^{dom}$	Efluente de la central de distribución doméstica
$TW^{domc}$	Afluente de la estación central doméstica
$TER$	Necesidades energéticas de la nueva planta de DP
$TIC$	Coste total de instalación de las nuevas centrales eléctricas
$TOC^{de}$	Coste de operación de las plantas desalinizadoras
$TOC$	Costo total de operación de las nuevas centrales eléctricas
$TPiC$	Costo total de tuberías de nuevas plantas y tanques de almacenamiento
$TPuC$	Costo total de bombeo
$b$	Salmuera rechazada por planta

### Variables binarias

$y^d$	Existencia de una nueva planta de DP
$y^{desal,stoq}$	Existencia de tubería de plantas desalinizadoras a nuevos tanques de almacenamiento
$y^{dp,agr}$	Existencia de tubería de la planta DP a la estación agrícola
$y^{dp,dom}$	Existencia de tubería de la planta de DP a la estación doméstica

---

$y^{dp,stop}$	Existencia de tubería de la planta de DP a tanques de almacenamiento existentes
$y^{dp,stoq}$	Existencia de tubería de planta DP a nuevos tanques de almacenamiento
$y^o$	Existencia de una nueva planta OC-OTEC
$y^{ot,agr}$	Existencia de tubería de la planta OC-OTEC a la estación agrícola
$y^{ot,dom}$	Existencia de tubería de la planta OC-OTEC a la estación doméstica
$y^{ot,stop}$	Existencia de tubería de la planta OC-OTEC a tanques de almacenamiento existentes
$y^{ot,stoq}$	Existencia de tubería de planta OC-OTEC a nuevos tanques de almacenamiento
$y^{sto}$	Existencia de nuevos tanques de almacenamiento
$y^{stoq,agr}$	Existencia de tubería entre nuevos tanques de almacenamiento y los usuarios agrícolas
$y^{stoq,dom}$	Existencia de tubería entre nuevos tanques de almacenamiento y los usuarios domésticos

**Símbolos griegos**

$\alpha$	Factor de escalamiento económico
$\beta$	Tasa de rechazo



## **AGRADECIMIENTOS**

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Generalidades

A lo largo del último siglo, hemos presenciado un marcado aumento en el consumo global de agua y energía, fenómeno impulsado en gran medida por el crecimiento demográfico y la explotación de los recursos naturales. Sin embargo, este crecimiento exponencial ha acarreado consigo importantes costos económicos y ambientales, como ha sido resaltado por (Barbier, 2021). Como resultado, la búsqueda y aplicación de tecnologías y estrategias para hacer frente a estos desafíos interrelacionados se han convertido en una prioridad imperante. Este hecho ha llevado a la comunidad científica a concentrar sus esfuerzos en el análisis y optimización de soluciones alternativas basadas en recursos renovables, con el propósito de garantizar un suministro confiable de agua y energía, accesible y seguro (Panagopoulos, 2021).

En este contexto, es esencial comprender que el acceso al agua y a la energía desempeña un papel fundamental como indicador del desarrollo económico y social, tal como han resaltado (Sarkodie & Strezov, 2019). En lo concerniente a la energía, la electricidad adquiere un papel crítico en la gestión y operación de los recursos hídricos, dado que resulta esencial en todas las fases de su cadena de suministro. Del mismo modo, un suministro constante y confiable de agua es de vital importancia para la infraestructura energética.

La ingeniería de procesos ha explorado sistemas de distribución de agua y energía, así como diversos desafíos medioambientales, haciendo uso de técnicas como modelado y simulación, optimización de procesos, teoría de control e inteligencia artificial. Existen numerosos ejemplos, como el trabajo de (Yue et al., 2021), estableció un marco de modelado innovador para abordar de manera sostenible la interconexión entre energía, agua y alimentos (*EWFN*) en la agricultura, o el estudio de (Tavakkoli et al., 2020), que introdujo un enfoque de programación lineal para analizar las mejores prácticas en la gestión de aguas residuales procedentes de la extracción de *shale gas* en la región de Marcellus en Pensilvania, con un énfasis particular en la destilación por membrana como técnica de tratamiento. Además, (Liu et al., 2021), presentaron un novedoso enfoque que incorpora los efectos socio-ecológicos de la infraestructura de control de escorrentía en un marco de evaluación integral, teniendo en cuenta funciones de control e inversiones de capital. Por otro

lado, el estudio de (Lin et al., 2022), se centró en el desarrollo de un marco de optimización híbrida *UNISON*, destinado a minimizar los riesgos potenciales en el tratamiento de aguas residuales con peróxido de hidrógeno, considerando la incertidumbre en la previsión de la demanda de tratamiento de aguas residuales. Finalmente, (Huang & Koroteev, 2021), propuso un marco de Analítica Predictiva impulsado por el Aprendizaje Automatizado (*MLDPAF*) para mejorar las actividades de gestión de residuos, en particular, el reciclaje de energía y materiales.

Adicionalmente, desde esta perspectiva, se han explorado diversas estrategias como soluciones viables para un suministro confiable de agua y energía. Entre estas estrategias se encuentran las plantas de poder de doble propósito (*dual purpose power desalination plant*), que combinan la desalinización del agua de mar con la generación de energía, así como el sistema de Conversión de Energía Térmica Oceánica (*OTEC*) basado en el gradiente térmico de las aguas oceánicas. Este último sistema representa una alternativa prometedora gracias a sus ventajas en comparación con otros métodos similares (Kim, 2022)

Como se mencionó previamente, la tecnología *OTEC* capitaliza la capacidad de los océanos para funcionar como inmensos recolectores solares, ya que retienen alrededor del 15% de la energía solar en forma de energía térmica. Esto los convierte en una fuente de energía sostenible e inagotable (Garduño-Ruiz et al., 2021). Para aprovechar esta fuente de energía, el sistema *OTEC* utiliza un ciclo Rankine modificado, que aprovecha el gradiente térmico existente entre la superficie del océano y sus aguas profundas, situadas a unos 1000 metros de profundidad, para generar agua desalinizada y electricidad de forma simultánea y continua. Sin embargo, es importante destacar que este gradiente térmico entre la superficie y las aguas profundas debe ser de al menos 20°C para lograr la máxima eficiencia (Pattnaik et al., 2022)

Existen tres ciclos diferentes de sistemas *OTEC*: el ciclo cerrado, que genera energía a través de la evaporación y condensación de un fluido de trabajo utilizando corrientes de agua tomadas del océano; el ciclo abierto, que utiliza directamente la corriente de agua cálida del océano para producir energía eléctrica, y presenta la ventaja adicional de generar agua desalinizada; y el ciclo híbrido, que emplea otras formas de energía renovable como fuentes auxiliares.

Es importante destacar que, en comparación con otras fuentes de energía renovable, la investigación y desarrollo de sistemas *OTEC* aún se encuentran en sus primeras etapas. No

obstante, estos sistemas energéticos poseen un alto potencial, ya que los recursos marinos ofrecen una fuente sostenible de energía renovable y la posibilidad de producir agua desalinizada.

En esta línea de investigación, se han realizado diversos estudios con el objetivo de identificar las condiciones óptimas de operación de los sistemas *OTEC*, como se ilustra en las investigaciones de (Hernández-Romero et al., 2020; 2022). Además, se han abordado cuestiones relacionadas con las especificaciones de diseño y la implementación de equipos auxiliares para mejorar la eficiencia del ciclo termodinámico (Herrera et al., 2021; Kim et al., 2016). De manera similar, la elección de una ubicación geográfica adecuada para la implementación efectiva de los sistemas *OTEC* ha sido un tema de considerable interés. Por ejemplo, (Ahaotu et al., 2018), (Bin Nadeem et al., 2022) y (Lopez et al., 2022) han investigado la viabilidad de la tecnología *OTEC* en las costas de diversos países de tamaño mediano. No obstante, una región particularmente prometedora para la aplicación de la tecnología *OTEC* son los pequeños estados insulares en desarrollo del Pacífico. Estas naciones archipelágicas, con extensiones de tierra limitadas y extensas zonas económicas exclusivas en el océano, ofrecen condiciones óptimas para el funcionamiento eficiente de los sistemas *OTEC* debido a su ubicación geográfica. Además, su aislamiento geográfico resulta en largas distancias de transporte, lo que incrementa los costos de importación de combustibles fósiles. Por tanto, el desarrollo y la implementación de esta fuente de energía renovable podrían contribuir significativamente a la economía azul (Herrera et al., 2022). En lo que concierne a la evaluación económica, se han propuesto diversos métodos para garantizar la viabilidad económica de los sistemas *OTEC* en función de las variadas condiciones de fuentes de calor y contextos económicos en las islas del Pacífico. Estos análisis consideran la capacidad y el tipo de plantas de energía (Seungtaek et al., 2020). Además, es crucial tener en cuenta que los países y territorios insulares del Pacífico, especialmente los atolones de baja altitud desempeñan un papel importante en la evaluación de indicadores de impacto ambiental, como el aumento del nivel del mar, patrones de lluvia y temperaturas promedio del suelo (Kim et al., 2021).

En este sentido, la tecnología de *OTEC*, en particular el Ciclo Abierto de Conversión de Energía Térmica Oceánica (*OC-OTEC*), se presenta como una alternativa prometedora gracias a sus características singulares. A diferencia de los sistemas de ciclo cerrado, el *OC-OTEC* no requiere de un fluido de trabajo o refrigerante para transferir calor desde las aguas superficiales cálidas hasta las aguas frías en profundidad (Abbas et al., 2022). Adicionalmente, la integración de una

planta *OC-OTEC* puede contribuir a la mitigación de los impactos ambientales asociados a la producción de energía, como la contaminación del aire y las emisiones de gases de efecto invernadero (Paredes et al., 2019). Esto puede desempeñar un papel fundamental en la lucha contra el cambio climático y la promoción del desarrollo sostenible. Además, el diseño elimina la necesidad de utilizar refrigerantes costosos y potencialmente perjudiciales para el medio ambiente. Por otro lado, la implementación de esta tecnología puede reducir la dependencia de los combustibles fósiles importados, que están sujetos a fluctuaciones de precios e interrupciones en el suministro (Brecha et al., 2021). Finalmente, en cuanto a los beneficios sociales, es importante destacar que esta tecnología también puede producir agua potable como subproducto, lo que constituye una valiosa solución para abordar los problemas de escasez de agua en estas regiones aisladas (Ma et al., 2022)

Es esencial resaltar que la incorporación de plantas *OC-OTEC* en las redes de distribución de áreas aisladas presenta una oportunidad significativa para mejorar el acceso a fuentes alternativas de agua y energía. En este contexto, la ingeniería de sistemas de procesos desempeña un papel fundamental en asegurar la implementación exitosa de estos sistemas. Mediante la optimización de diseño y operación, la ingeniería de procesos puede contribuir a aumentar la eficiencia y la confiabilidad de la producción de energía y agua, al mismo tiempo que se minimiza el impacto ambiental del sistema. Además, la integración de plantas *OC-OTEC* en las redes de distribución a través de la ingeniería de procesos puede ser un factor clave para estimular el desarrollo económico local y fomentar la independencia y la resiliencia energética en las comunidades aisladas.

La ingeniería de procesos efectiva en la integración de plantas *OC-OTEC* en redes de distribución implica una cuidadosa consideración de diversos factores, que incluyen el entorno local, la disponibilidad de recursos y las necesidades de la comunidad. Esto abarca desde el desarrollo de procedimientos de operación y mantenimiento sostenibles, hasta la implementación de sistemas de seguridad y sensores, y la optimización de la producción de energía y agua para cubrir las necesidades específicas de la región aislada. Al garantizar una distribución segura y confiable de energía y agua desde la planta *OC-OTEC* hasta la comunidad, la ingeniería de procesos también puede contribuir a la mejora general del acceso a la energía y al agua en comunidades aisladas.

En resumen, la integración de plantas *OC-OTEC* en redes de distribución mediante una ingeniería de procesos efectiva representa una oportunidad significativa para mejorar la implementación de

fuentes alternativas de agua y energía en regiones aisladas. Al optimizar la producción de energía y agua, reducir el impacto ambiental, mejorar el acceso a la energía y al agua, y estimular el desarrollo económico local, la ingeniería de procesos juega un papel fundamental en la promoción de soluciones sostenibles de energía y agua para comunidades aisladas.

En esta tesis, se presenta un enfoque de optimización multiobjetivo y multiperiodo con el propósito de obtener una política de producción para el sistema propuesto, considerando diversas tecnologías para suministrar agua y energía a usuarios domésticos y agrícolas. El modelo resultante, formulado como un problema de Programación No Lineal Entera Mixta (*MINLP*), se basa en la superestructura propuesta. Este modelo incorpora variables binarias que permiten activar o desactivar el uso de tecnologías específicas para el suministro de agua o energía. El desafío radica en determinar la viabilidad de integrar tecnologías innovadoras, como los sistemas *OC-OTEC*, en la infraestructura existente de agua y energía en una región aislada, para satisfacer las demandas proyectadas en el futuro, teniendo en cuenta consideraciones económicas, ambientales y sociales. Por lo tanto, este trabajo se enfoca en los siguientes aspectos:

- Evaluación económica: Se basa en la rentabilidad de toda la red, considerando ingresos por la venta de recursos hídricos y energéticos, así como los costos operativos e de instalación.
- Enfoque ambiental: Permite evaluar cada tecnología propuesta, incluyendo la planta *OC-OTEC*, en función de las emisiones generadas por la cantidad de electricidad utilizada. También incluye un análisis del consumo de agua, medido a través del uso de agua de los acuíferos.
- Enfoque social: Considera las oportunidades de empleo creadas por las nuevas tecnologías en función de la energía producida por estas tecnologías.

Finalmente, el problema se aborda como una optimización multiobjetivo, que busca maximizar la ganancia total anual (*AP*) y minimizar el impacto ambiental, representado por las emisiones equivalentes de  $\text{CO}_2$  y el uso de agua de acuíferos como una función ambiental (*EF*). Al mismo tiempo, se busca maximizar los empleos creados por la instalación de estas tecnologías (*JOBS*). El objetivo es proporcionar un marco de toma de decisiones que se adapte a múltiples tomadores de decisiones. En este caso, cada uno de los objetivos mencionados puede ponderarse para determinar las soluciones óptimas. Gracias a todo lo anterior, este trabajo proporciona una forma de facilitar

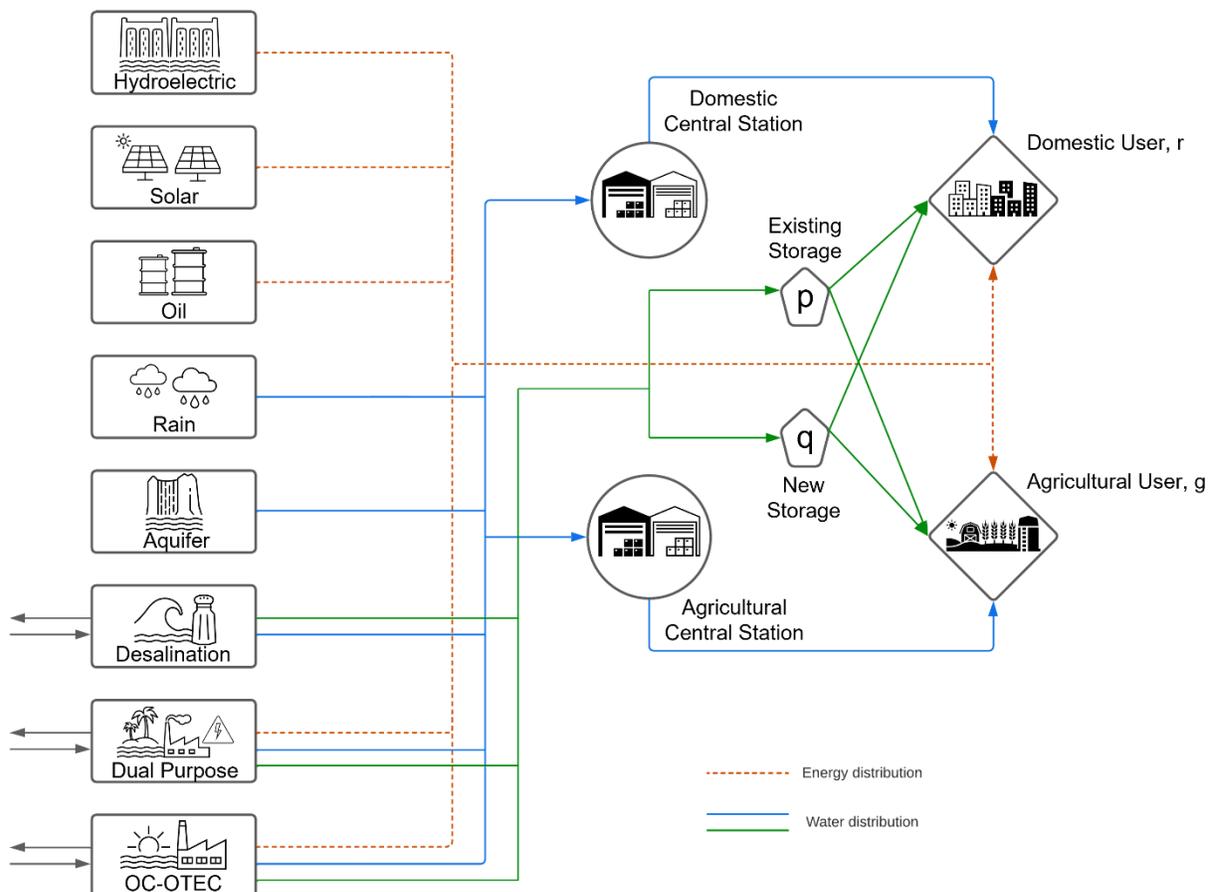
y mejorar la toma de decisiones asociada a la integración de diferentes tecnologías en lugares aislados para suministrar energía y agua.

## 1.2. *Justificación*

El presente estudio de tesis se enfoca en abordar la creciente problemática ambiental asociada a la generación de energía a partir de hidrocarburos y combustibles fósiles, reconociendo la urgente necesidad de buscar alternativas sostenibles. Para ello, se propone investigar el potencial de los sistemas de conversión de energía térmica oceánica de ciclo abierto, con un énfasis particular en la integración de estas tecnologías tanto en la red de distribución de agua como de energía. La isla de Tahití, en la Polinesia Francesa, se selecciona como caso de estudio debido a su aislamiento geográfico y elevada dependencia de combustibles no renovables, destacando la importancia de gestionar de manera sostenible tanto la energía como el recurso hídrico en entornos insulares. Se llevará a cabo un análisis exhaustivo de la viabilidad técnica, económica y ambiental de la implementación de un sistema OTEC, con el objetivo de ofrecer soluciones parciales a los desafíos energéticos y ambientales, al reducir la dependencia de combustibles fósiles y mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero, al tiempo que promueve prácticas responsables en la gestión del agua. Además, los resultados de esta investigación sentarán las bases para la adopción de tecnologías limpias y sostenibles en otras regiones geográficas similares, contribuyendo así a un enfoque más integral y respetuoso con el medio ambiente a nivel global.

## 1.3. *Planteamiento del problema*

El problema radica en la integración de tecnologías innovadoras en la infraestructura actual de agua y energía en una región aislada para satisfacer las demandas proyectadas en el futuro, teniendo en cuenta consideraciones económicas, ambientales y sociales. Por lo tanto, la evaluación incluye fuentes actuales de agua y energía, como plantas hidroeléctricas, plantas de energía fotovoltaica, plantas de energía de combustibles fósiles, acuíferos, sistemas de recolección de agua de lluvia y plantas de desalinización. Además, se introducen nuevas fuentes, como la planta *OC-OTEC* y la planta de desalinización y energía de doble propósito (*DP*).



**Figura 1. Red de distribución de agua y energía considerando nuevas plantas OC-OTEC y centrales eléctricas de doble propósito**

La Figura 1 muestra la superestructura del enunciado del problema. La red está diseñada para incorporar diversos sistemas de producción de energía existentes, como plantas hidroeléctricas, solares y de combustibles fósiles (petróleo), y diferentes fuentes de agua, incluyendo la recolección de agua de lluvia, acuíferos y plantas de desalinización. Además, la red considera la posible integración de dos nuevas plantas, *OC-OTEC* y de doble propósito, para mejorar la producción de energía y la recolección de agua. La incorporación de la planta de doble propósito en la red se utiliza como comparación, ya que estas plantas se utilizan principalmente a nivel internacional para estos casos. Además, para garantizar la distribución eficiente de servicios, la red incorpora estaciones de distribución central para cada uso considerado, a saber, doméstico y agrícola. Asimismo, la red tiene en cuenta los sistemas de tanques de almacenamiento existentes y la posible instalación de nuevos para aumentar la capacidad de almacenamiento.

El agua desalinizada de la planta *OC-OTEC* puede utilizarse para fines domésticos y municipales, requiriendo un tratamiento básico, como filtración y desinfección, para cumplir con las normas de agua potable. Para aplicaciones agrícolas e de irrigación, pueden ser necesarios pasos adicionales de tratamiento, como remineralización y ajuste de pH, para adaptarse a los requisitos específicos de los cultivos (Martínez-Alvarez et al., 2017).

Estas aplicaciones ofrecen posibles beneficios económicos, sociales y ambientales, pero se requieren estudios adicionales para evaluar la sostenibilidad a largo plazo y las implicaciones sociales de la implementación de sistemas de agua desalinizada en regiones costeras como Tahití.

#### 1.4. *Hipótesis*

La implementación de sistemas de conversión de energía térmica oceánica de ciclo abierto (*OC-OTEC*) en la red de distribución de agua y energía de la isla de Tahití permitirá aprovechar eficientemente el gradiente de temperatura en la zona pelágica del océano para generar energía eléctrica y obtener agua desalinizada de manera sostenible y económicamente viable. Mediante un enfoque multiobjetivo, la integración óptima de los sistemas *OC-OTEC* en la red existente demostrará su capacidad para reducir la dependencia de combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero en la región aislada, contribuyendo así a una solución parcial a la problemática energética y ambiental que enfrenta Tahití. Los resultados de este estudio proporcionarán una base sólida para la replicación de esta tecnología en otras regiones aisladas, fomentando la adopción de prácticas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente en el ámbito global.

### 1.5. *Objetivo General*

Proponer una red de distribución de electricidad y agua desalinizada implementando un sistema OC-OTEC a partir del desarrollo, simulación y optimización de un modelo matemático, considerando aspectos técnicos, económicos y ambientales teniendo como caso de estudio la isla de Tahití de la Polinesia Francesa.

### 1.6. *Objetivos Particulares*

- I. Diseñar una superestructura representativa de la red de distribución de agua y energía en la isla de Tahití, que incluya la integración del sistema OC-OTEC para la generación de electricidad y obtención de agua desalinizada.
- II. Desarrollar un modelo matemático basado en la superestructura propuesta, que permita simular el comportamiento y la operación del sistema OC-OTEC dentro del contexto de la red de distribución.
- III. Realizar simulaciones de la red de distribución propuesta en el caso de estudio de la Polinesia Francesa, evaluando su rendimiento técnico, su viabilidad económica y su impacto ambiental.
- IV. Optimizar el modelo matemático considerando objetivos sociales, ambientales y económicos, con el fin de obtener una configuración óptima para la red de distribución que maximice la eficiencia energética, minimice los costos operativos y reduzca la huella ambiental.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes

En los últimos años, ha surgido un creciente interés en la incorporación de plantas *OC-OTEC* en regiones aisladas, como islas remotas, plataformas en alta mar o comunidades costeras con acceso limitado a fuentes de energía convencionales. La integración de la tecnología *OC-OTEC* en estas áreas ofrece varias ventajas significativas, que incluyen la generación sostenible de energía, la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y la posibilidad de desalinización del agua, entre otros beneficios adicionales (Seungtaek et al., 2020).

Numerosos estudios se han centrado en el diseño y la optimización del rendimiento de las plantas *OC-OTEC*. Por ejemplo, los investigadores han explorado la influencia de parámetros clave, como los gradientes de temperatura del agua de mar, la selección del fluido de trabajo, el diseño del intercambiador de calor y la eficiencia del sistema (Herrera et al., 2021; Robinson & Engelmann, 2023). A través de la aplicación de modelado, simulación y estudios experimentales, estas investigaciones han proporcionado valiosos conocimientos sobre los aspectos técnicos relacionados con el diseño y la mejora del rendimiento de las plantas *OC-OTEC* (Geng & Gao, 2023; Hernández-Romero et al., 2022).

Además, la integración de plantas *OC-OTEC* en regiones aisladas plantea desafíos y oportunidades únicas. Una de las ventajas clave es el potencial para la generación autónoma de energía y la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles. Por lo tanto, diversos estudios han evaluado la viabilidad económica y la factibilidad de integrar *OC-OTEC* con los sistemas de energía existentes en islas o plataformas en alta mar. Estas investigaciones consideran factores como los perfiles de demanda de energía, el equilibrio de carga, las opciones de almacenamiento de energía y las estrategias de integración en la red (Costa et al., 2022; Zereshkian & Mansoury, 2021).

Aunado a la generación de electricidad, las plantas *OC-OTEC* ofrecen beneficios adicionales cuando se integran en regiones aisladas. Una ventaja destacada es la capacidad de desalinizar agua de mar, lo que puede abordar los problemas de escasez de agua en las zonas costeras. Los investigadores han analizado los aspectos técnicos y económicos de la combinación de plantas

*OC-OTEC* con tecnologías de desalinización, como la ósmosis inversa, la destilación de múltiple efecto o sistemas híbridos (Liponi et al., 2022).

## 2.2. Plantas de Conversión de Energía Térmica Oceánica

La distribución vertical de la temperatura en el océano abierto se puede describir de manera simplista como consistente en dos capas separadas por una interfaz. La capa superior es calentada por el sol y mezclada a profundidades de aproximadamente 100 m por el movimiento de las olas. la capa inferior consiste en agua más fría formada en latitudes altas. La interfaz o la termoclina a veces está marcada por un cambio brusco de temperatura, pero más a menudo el cambio es gradual. La diferencia de temperatura entre las capas superior (cálida) e inferior (fría) varía de 10 a 25° C, y los valores más altos se encuentran en las aguas ecuatoriales. Esto implica que hay dos depósitos enormes que proporcionan la fuente de calor y el dissipador de calor necesarios para un motor térmico.

Una aplicación práctica se encuentra en un sistema diseñado para transformar la energía térmica en electricidad. esto se conoce como *OTEC* (*Ocean Thermal Energy Conversion*) cuya representación gráfica se muestra en la Figura 2.

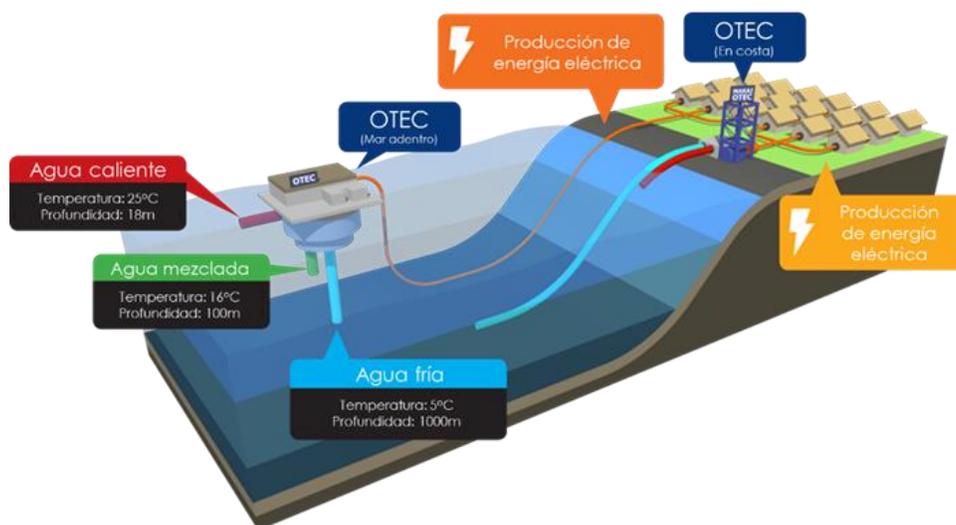
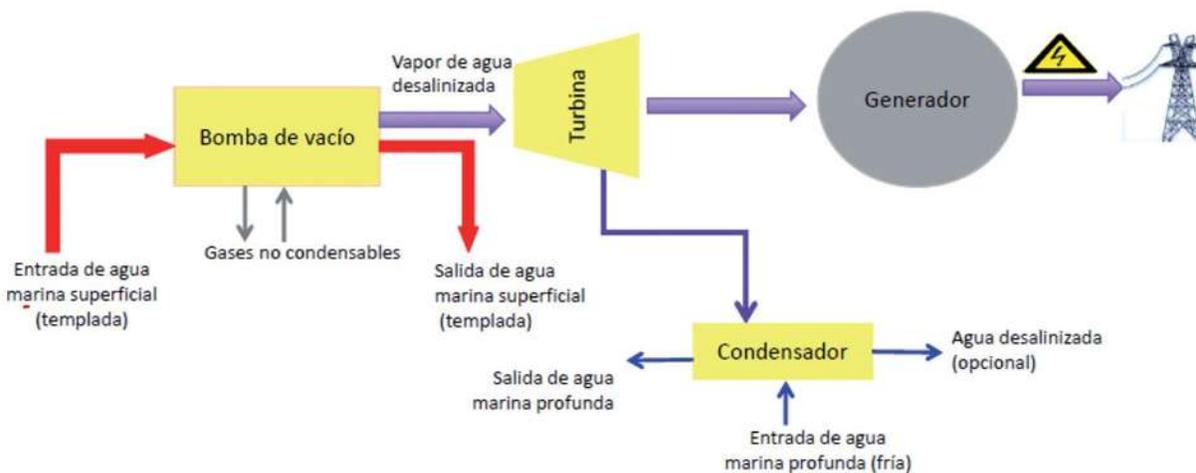


Figura 2. Representación de una planta OTEC

Una central *OTEC* representa un sistema de generación de energía que aprovecha el gradiente térmico presente en los océanos. Las ubicaciones óptimas para su implementación se encuentran en regiones tropicales, donde se registra una diferencia de temperatura de

aproximadamente 20°C entre la superficie y una profundidad de 1 km. Este sistema se basa en un ciclo Rankine adaptado y presenta tres variantes principales:

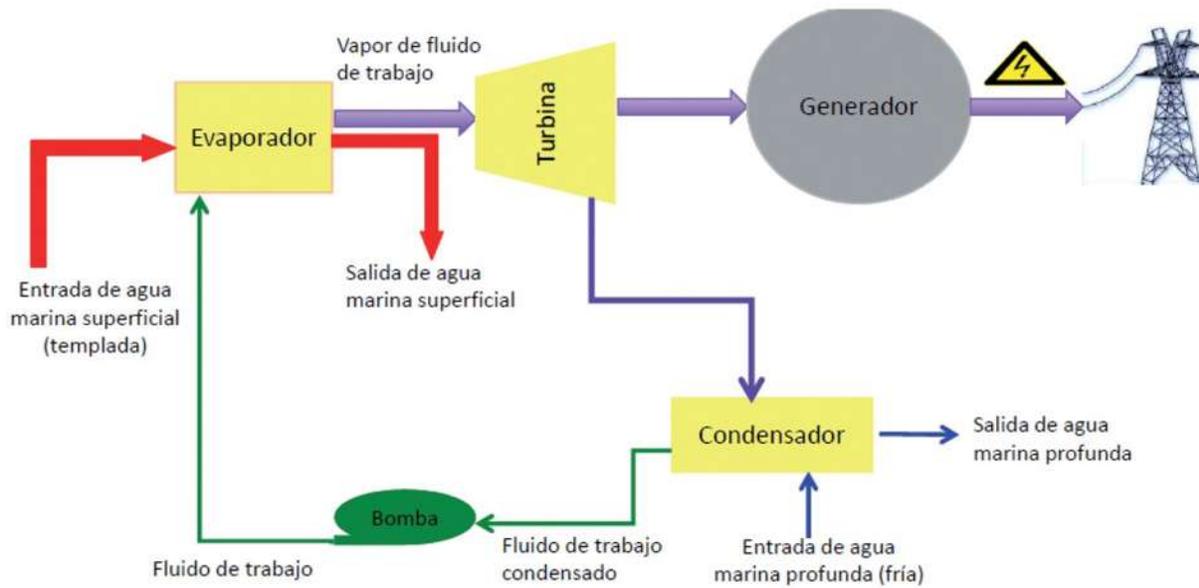
**Ciclo Abierto.** El ciclo abierto, también conocido como ciclo de Claude, es un proceso que se inicia con la captación de agua tibia del océano. Esta agua se introduce en un sistema de evaporación donde se produce la separación del vapor y el líquido. El vapor resultante, de alta presión y temperatura, es dirigido hacia una turbina para aprovechar su energía cinética, generando así trabajo mecánico que impulsa un generador eléctrico. Posteriormente, el vapor seco se enfría y se condensa utilizando agua de mar fría. La diferencia de temperaturas entre la superficie del mar y las profundidades es crucial para el rendimiento de este ciclo, ya que cuanto mayor sea esta diferencia, mayor será la eficiencia del sistema. La eficiencia típica de estos ciclos puede alcanzar alrededor del 8% para diferencias de temperatura entre 4°C y 25°C. (Figura 3).



**Figura 3. Diagrama de una planta OTEC de ciclo abierto (Garduño-Ruiz et al., 2017)**

**Ciclo cerrado.** El ciclo cerrado, también denominado ciclo de Anderson, opera de manera diferente al ciclo abierto. En lugar de usar agua de mar directamente como medio de transferencia de calor, se emplea un fluido de trabajo alternativo, como propano, freón o amoníaco. El agua de mar caliente se utiliza en un intercambiador de calor para evaporar este fluido, creando vapor de alta presión que mueve la turbina. Una vez que el vapor ha cedido su energía cinética a la turbina, se condensa utilizando agua de mar fría y se bombea de regreso al sistema. La principal ventaja de este ciclo es que los componentes principales del ciclo (excepto los intercambiadores de calor) no

están en contacto directo con el agua de mar, lo que reduce significativamente los problemas de corrosión y mantenimiento asociados con la exposición al agua salada. (Figura 4).



**Figura 4. Diagrama de una planta OTEC de ciclo cerrado (Garduño-Ruiz et al., 2017)**

Ciclo híbrido. El ciclo híbrido combina aspectos de los ciclos abierto y cerrado para maximizar la eficiencia y la utilidad de la planta OTEC. En este ciclo, el agua tibia del océano se utiliza para evaporar un fluido de trabajo en un evaporador primario. El vapor resultante se dirige a un segundo evaporador, donde transfiere su calor latente a otro fluido de trabajo que impulsa una turbina para generar electricidad. El vapor de agua se condensa en un intercambiador de calor, produciendo agua desalinizada que puede ser utilizada para consumo humano, agrícola u otros fines industriales. Este enfoque híbrido permite aprovechar simultáneamente la generación de energía y la desalinización del agua, ofreciendo una solución más versátil y completa para las aplicaciones de energía oceánica (Figura 5).

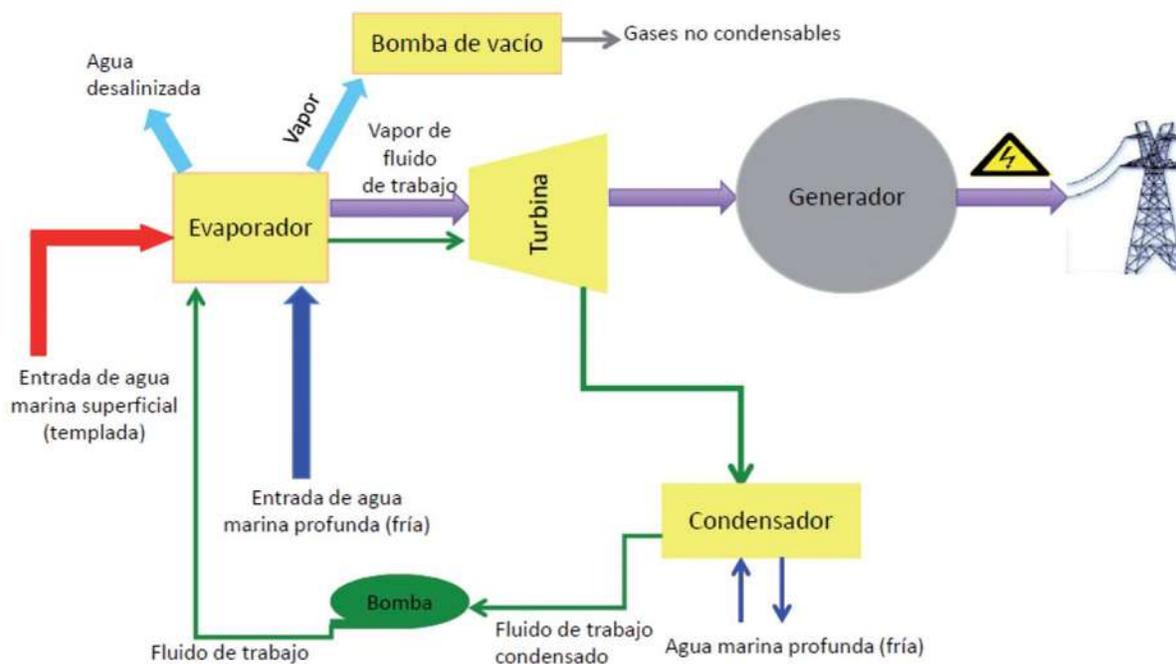


Figura 5. Diagrama de una planta OTEC de ciclo híbrido (Garduño-Ruiz et al., 2017)

Las plantas *OTEC* tienen la capacidad de desempeñar múltiples funciones además de la generación eléctrica. Pueden desalar agua, producir hielo y aprovechar el agua fría del océano para diversos fines como la piscicultura, la generación de aire acondicionado y la implementación de invernaderos. Al contar con una fuente de energía disponible las 24 horas del día, estas plantas pueden proporcionar electricidad de carga base y mantener un alto factor de planta, estimado en alrededor del 90% al 95%.

Es crucial destacar que, durante su funcionamiento, las plantas *OTEC* generan salmuera como subproducto. Esta salmuera contiene sales concentradas y otras sustancias que requieren un tratamiento adecuado antes de su descarga para mitigar los posibles impactos ambientales negativos. Existen diversas técnicas de tratamiento disponibles para abordar la gestión de la salmuera. Uno de los enfoques consiste en diluir y mezclar la salmuera con grandes volúmenes de agua, lo que ayuda a reducir tanto la salinidad como la concentración de contaminantes.

Otra opción viable implica el uso de lagunas de evaporación, donde el agua se evapora, dejando las sales concentradas para su posterior manejo. Las tecnologías de filtración por membrana, como la ósmosis inversa, pueden ser efectivas para eliminar las sales disueltas y las impurezas. Además, métodos avanzados de tratamiento, como el intercambio iónico y la precipitación química, pueden eliminar selectivamente contaminantes específicos.

La selección del método de tratamiento más apropiado debe basarse en consideraciones como las características particulares de la salmuera, la disponibilidad de recursos y los requisitos regulatorios. El objetivo principal es asegurar una gestión segura y sostenible de la descarga de salmuera, minimizando así cualquier impacto adverso en el medio ambiente.

### 2.3. Descripción termodinámica de los ciclos OTEC

En los ciclos abiertos de OTEC, el recurso caliente, a una presión de entrada de 1 Bar y temperaturas entre 27°C y 25°C, se canaliza hacia un evaporador tipo flash. Estos evaporadores tienen la particularidad de inducir la evaporación del agua de forma súbita debido a una disminución repentina de la presión. Aquí, se manejan presiones de vacío, inferiores a la atmosférica; por ejemplo, para lograr la evaporación del agua a 26°C se requieren 0.0336 Bar de presión. Sin embargo, la calidad del agua a la salida del evaporador es baja, apenas alcanzando el 5%; es decir, solo el 5% del agua tibia se dirige hacia la turbina. La mezcla que sale del evaporador se somete a un proceso de separación para garantizar que solo vapor seco sea enviado a la turbina.

Una vez que el vapor cede su energía en la turbina, se dirige hacia un condensador operando a una presión de 0.017 Bar. El agua tibia, ahora a 15°C, se enfría utilizando agua de refrigeración tomada a unos 1000 metros de profundidad, con una temperatura inicial de aproximadamente 4°C, elevándola a 8°C una vez que condensa el vapor. Esta agua de refrigeración puede ser calentada hasta 10°C para usos secundarios. El condensado resultante es agua desalinizada, lista para ser utilizada. El diagrama de Mollier en la Figura 6 ilustra la trayectoria del ciclo.

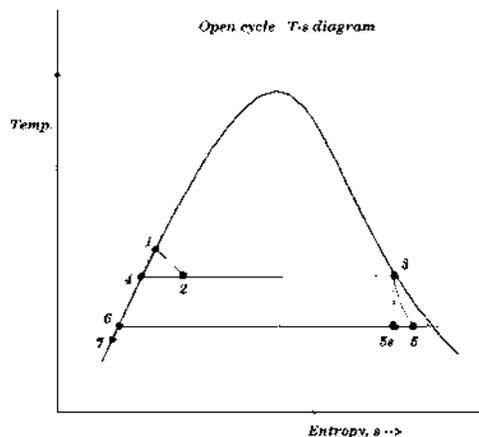


Figura 6. Diagrama T-S del ciclo abierto de una planta OTEC

Por otro lado, en los ciclos cerrados de OTEC, intervienen tres fluidos. El recurso caliente, el agua tibia del océano a unos  $25^{\circ}\text{C}$ , se bombea hacia un intercambiador de calor donde transfiere su energía al fluido de trabajo. La temperatura de disminución del agua tibia del mar está limitada por la temperatura de evaporación del fluido de trabajo seleccionado. Se prefiere que el fluido de trabajo sea un refrigerante debido a su menor punto de ebullición. Una vez evaporado en el evaporador, el fluido de trabajo pasa a través de la turbina, donde cede su energía, y luego se dirige al condensador antes de ser bombeado de nuevo al evaporador para reiniciar el ciclo.

El agua fría del mar se utiliza para condensar el fluido de trabajo. Si el fluido de trabajo es amoníaco, la presión de evaporación es de 7 Bar y la de condensación es de 5 Bar. El fluido entra a la turbina a  $21^{\circ}\text{C}$  y sale a  $9^{\circ}\text{C}$ . Esto se detalla en la Figura 7.

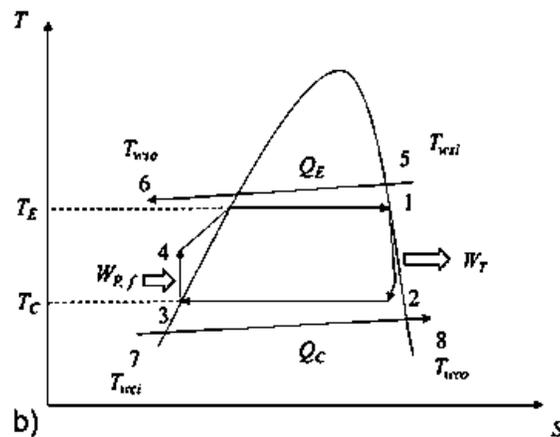


Figura 7. Diagrama T-S de un ciclo cerrado de una planta OTEC (Li et al., 2018)

#### 2.4. Energía renovable y sistemas OTEC en regiones aisladas

Las pequeñas islas en el Océano Pacífico están amenazadas por el cambio climático. El aumento del calor está provocando el derretimiento del hielo y la expansión térmica de los océanos, lo que provoca el aumento en el nivel del mar. A medida que el calentamiento global incrementa, aumenta la energía en la atmósfera, lo que lleva a tormentas que son más frecuentes e intensas, las cuales pueden causar daños costosos, pérdidas de vidas humanas, riesgos para la salud y una disminución general de la vitalidad de un país. Estas amenazas son especialmente evidentes para las islas pequeñas que no tienen acceso a tantos recursos. Las islas bajas están particularmente en riesgo de perder un porcentaje significativo de tierra debido al aumento del nivel del mar. A medida que continúa la combustión de combustibles fósiles, la atmósfera atraparé más calor e intensificará

estos efectos. Un aumento en el uso de las energías renovables puede contribuir a mitigar algunos de estos efectos, así como reducir el costo de importación del combustible fósil de islas pequeñas del Pacífico como las de la Polinesia Francesa (Weir, 2018).

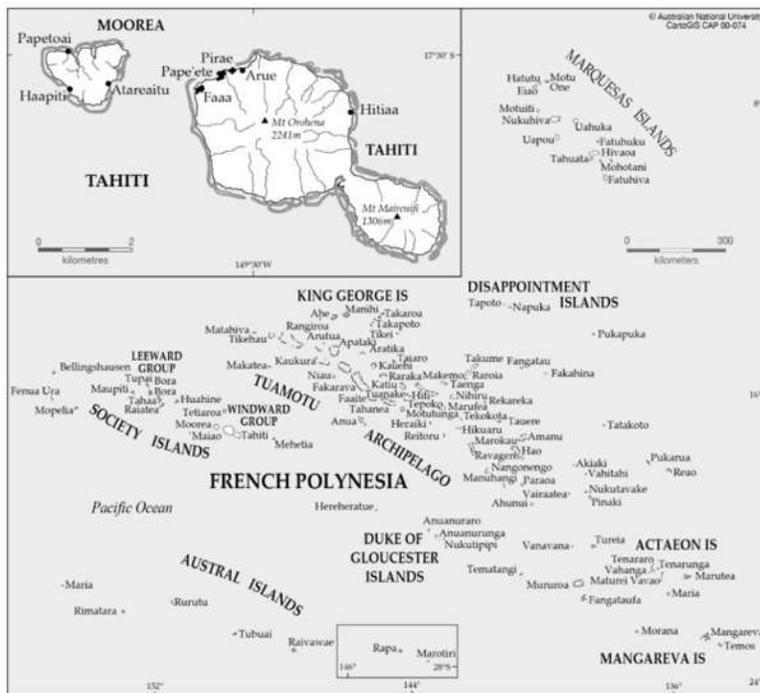


Figura 8. Mapa de la Polinesia Francesa

La Polinesia Francesa (Figura 8) es una colectividad de ultramar o país de la República Francesa que se compone de cinco archipiélagos: Islas de la Sociedad, Islas Marquesas, Archipiélago Tuamotu, Islas Australes e Islas Gamber. En total la Polinesia Francesa está compuesta por 118 islas y atolones de los cuales 67 están habitados. La Polinesia Francesa (282,530 habitantes), cuyo producto interno bruto per cápita es el segundo más alto entre las islas del Pacífico, también está por encima del promedio en su consumo de electricidad per cápita, siendo 2411 (kWh) (Stephens, 2018).

Tabla 1. Producción y consumo anual de energía eléctrica en la Polinesia Francesa

Energía Eléctrica	Total
Consumo	629.9 m kWh
Producción	677.3 m kWh

Tahití es la más famosa y poblada de las islas, ubicada en el archipiélago de las islas de la Sociedad, con Papeete, la capital. La isla de Tahití es un candidato adecuado para la aplicación de tecnologías de energía renovable existentes y en desarrollo. Actualmente, la economía energética de Tahití depende de la importación de petróleo por barco. Esto es costoso debido a las largas distancias entre las fuentes de combustibles fósiles y Tahití, además de aumentar los riesgos ambientales. Alrededor del 70% del uso de electricidad de Tahití proviene de combustibles fósiles, como se muestra en la Tabla 2.

**Tabla 2. Fuentes de obtención de energía eléctrica en la Polinesia Francesa**

<b>Fuente de energía</b>	<b>Total</b>	<b>Porcentaje</b>	<b>per cápita</b>
Combustibles Fósiles	1.55 bn kWh	70%	5522.87 kWh
Energía Nuclear	0 kWh	0%	0 kWh
Energía Hidráulica	421.09 m kWh	19%	1499.06 kWh
Energía Renovable*	243.79 m kWh	11%	867.88 kWh
Capacidad Total de producción	2.22 bn kWh	100%	7889.81 kWh
Producción Total Real	677.3 m kWh	30.6%	2411.14 kWh

Sería beneficioso para Tahití invertir en energía sustentable que sea viable para las generaciones futuras y no presente riesgos económicos o ambientales. Los sistemas *OTEC* son una posible fuente de energía debido a que Tahití, por su ubicación geográfica, recibe más luz solar directa que las latitudes más altas por lo que la superficie del océano cerca de Tahití se calienta constantemente y el gradiente de temperatura resultante entre las aguas superficiales y profundas es de entre 22 y 24 °C durante todo el año, como se muestra en la Figura 9.

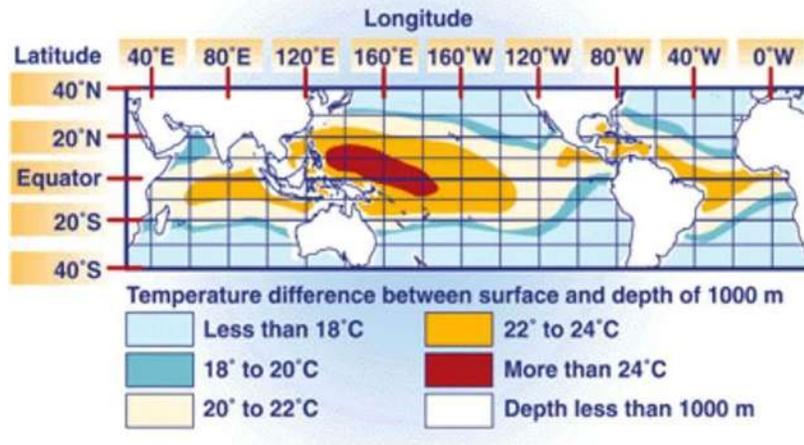
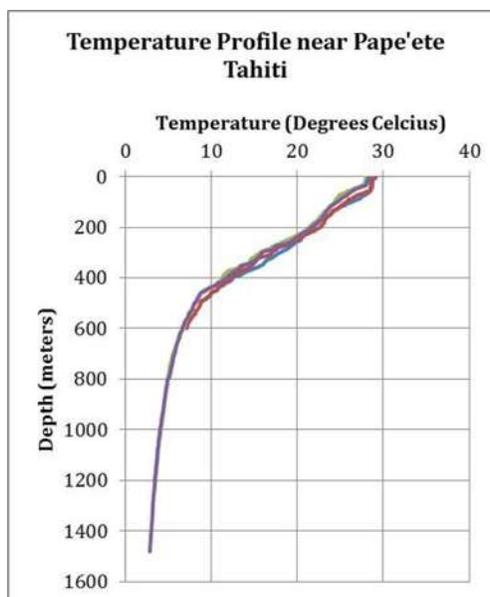


Figura 9. Análisis del gradiente de temperatura promedio global entre la superficie y las aguas profundas del océano a 1000 m de profundidad por parte de la *Sea Education Association (SEA)* (Garduño-Ruiz et al., 2017)

Para la instalación de una planta OTEC es necesario un diferencial de temperatura mínimo de 20 grados Celsius y acceso a redes eléctricas (Yamada et al., 2009). Además, los estudios de viabilidad de OTEC muestran la presencia de un diferencial de temperatura constante para impulsar la planta de energía. Cabe mencionar que los cruceros de investigación de la *Sea Education Association (SEA)* han recopilado datos sobre el perfil de temperatura de la columna de agua cerca de Papeete, Tahití (Figura 2.9) durante varios años. A 1000 metros las temperaturas rondan los 4 °C, mientras que las temperaturas superficiales rondan los 28 °C. Esto indica que el recurso necesario para OTEC está presente.



**Figura 10. Datos SEA CTD para temperatura versus profundidad tomados de cuatro cruceros diferentes dentro de 5 a 10 millas náuticas de Papeete, Tahití**

Por otra parte, un sistema *OTEC* de sistema abierto contribuiría a la demanda de agua, esto como se sabe es de gran importancia ya que la Asamblea General de las Naciones Unidas del derecho humano al agua y al saneamiento reconoció el derecho de todo ser humano a tener acceso a agua suficiente para uso personal y doméstico, es decir entre 50 y 100 litros de agua por persona por día, lo que para el caso de estudio en Tahití (178 133 habitantes) se debe contemplar que existe una demanda diaria de agua de entre 8,906,650 y 17,813,300 litros.



### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. *Etapas del trabajo*

Durante el desarrollo del trabajo de tesis se llevaron a cabo las siguientes etapas:

- Etapa 1- Investigación bibliográfica y de información.

Se realizó una exhaustiva investigación bibliográfica sobre los sistemas OTEC y las tecnologías de distribución de agua y energía en regiones aisladas. Se recopiló información relevante sobre el funcionamiento de los sistemas OTEC, sus variables clave y las consideraciones técnicas, económicas y ambientales para su implementación.

- Etapa 2- Generar una superestructura.

Basándonos en la información recopilada, se diseñó una superestructura gráfica que representó de manera integral la red de distribución de agua y energía en la isla de Tahití, considerando la inclusión del sistema OTEC. Se exploraron diferentes configuraciones para evaluar diversas opciones y escenarios.

- Etapa 3.- Proponer un modelo matemático.

Se desarrolló un modelo matemático detallado que representó la red de distribución de agua y energía, integrando el sistema OTEC en el proceso. Se consideraron variables como la producción de energía, la distribución de agua, la existencia de tanques de almacenamiento adicionales y la planta OC-OTEC con la desalinizadora de doble propósito. Además, se definieron las funciones objetivo y las restricciones necesarias para la optimización.

- Etapa 4.- Codificación del modelo.

El modelo matemático propuesto se codificó en la plataforma de optimización GAMS para su resolución. Se llevaron a cabo iteraciones y ajustes en el código para asegurar la adecuada representación de la red de distribución y del sistema OC-OTEC.

- Etapa 5.- Análisis de resultados.

Tras resolver el modelo con GAMS, se obtuvieron resultados significativos que permitieron interpretar y analizar el comportamiento del sistema propuesto. Se evaluaron diferentes escenarios y se tomaron decisiones informadas para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de la red de distribución.

- Etapa 6.- Optimización multiobjetivo.

Se realizó una optimización multiobjetivo con el fin de identificar la configuración óptima para la red de distribución, que maximizara la eficiencia energética, minimizara los costos operativos y redujera el impacto ambiental. Se tomaron en cuenta criterios técnicos, económicos y ambientales para evaluar las soluciones encontradas y se encontró una configuración que ofreció un equilibrio adecuado entre los objetivos establecidos.

### 3.2. Modelo Matemático

Los aspectos de masa, energéticos y económicos de la red de distribución de agua y energía pueden utilizarse para describirla. El modelo matemático se construye basado en la superestructura representada en la Figura 1. Se hacen un seguimiento de las demandas de agua y electricidad para usuarios domésticos ( $r$ ) y agrícolas ( $g$ ); las demandas de agua pueden ser satisfechas por diversas fuentes de agua ( $m$ ), como el contenido volumétrico de agua en los acuíferos existentes en la región, las plantas de desalinización existentes y la captación de agua de lluvia. En este caso, el modelo considera la ubicación de los tanques de almacenamiento existentes ( $p$ ) y la posibilidad de instalar nuevos tanques de almacenamiento ( $q$ ). De manera similar, las demandas de electricidad pueden ser cubiertas por fuentes de energía ( $l$ ) como plantas de energía hidroeléctrica, solar y de combustibles fósiles existentes. Por otro lado, se incluyen propuestas para nuevas plantas de poder de doble propósito y *OC-OTEC* como contribuyentes para satisfacer la demanda de energía y agua. Además, el modelo se divide en períodos de tiempo ( $t$ ). Teniendo en cuenta todo lo anterior, el modelo propuesto incluye relaciones lineales, no lineales y lógicas que se describen a continuación.

#### 3.2.1 Distribución de energía y agua

La energía total generada ( $T_{energy_t}$ ) es la suma de la energía eléctrica producida por las plantas de energía solar, hidroeléctrica y de petróleo existentes, así como las nuevas plantas OC-OTEC y de desalinización de doble propósito ( $E_{prod_{l,t}}$ ):

$$T_{energy_t} = \sum_l E_{prod_{l,t}}, \quad \forall l \in L, \forall t \in T \quad (1)$$

Asimismo, la cantidad total de energía eléctrica producida se determina por las necesidades de electricidad de los usuarios domésticos ( $E_{r,t}^{dom}$ ) y agrícolas ( $E_{g,t}^{agr}$ ):

$$E_{prod_{l,t}} = \sum_r E_{l,r,t}^{dom} + \sum_g E_{l,g,t}^{agr}, \quad \forall t \in T \quad (2)$$

Ahora bien, la cantidad de energía eléctrica generada en las nuevas plantas OC-OTEC y de doble propósito es el resultado de su capacidad, que puede expresarse como el flujo de agua de mar ( $SW$ ) multiplicado por el parámetro GEP, que denota la cantidad de energía lograda por unidad de caudal de agua de mar entrante:

$$E_{prod_{DP,t}} = SW_t^{dp} \cdot GEP^{dp}, \quad \forall t \in T \quad (3)$$

$$E_{prod_{OTEC,t}} = SW_t^{ot} \cdot GEP^{ot}, \quad \forall t \in T \quad (4)$$

$T_{water_t}$  es la suma del agua extraída de los acuíferos existentes, las plantas de desalinización y la recogida de agua de lluvia, así como las nuevas plantas de doble propósito y OC-OTEC ( $W_{obtained_{m,t}}$ ):

$$T_{water_t} = \sum_m W_{obtained_{m,t}}, \quad \forall m \in M, \forall t \in T \quad (5)$$

La cantidad total de agua obtenida puede expresarse como la suma del agua que ingresa a las estaciones de distribución central para uso doméstico ( $TW_{r,t}^{dom}$ ) y agrícola ( $TW_{g,t}^{agr}$ ), más el agua enviada a los tanques de almacenamiento existentes ( $W_{p,t}^{sp}$ ) y nuevos ( $W_{q,t}^{sq}$ ):

$$T_{water_t} = \sum_r TW_{r,t}^{domc} + \sum_g TW_{g,t}^{agrc} + \sum_p W_{p,t}^{sp} + \sum_q W_{q,t}^{sq}, \quad \forall t \in T \quad (6)$$

Las ecuaciones 7-9 se utilizan para estimar la cantidad de agua obtenida en las nuevas plantas de doble propósito y OC-OTEC propuestas, y pueden expresarse como el flujo de agua de mar multiplicado por un factor beta ( $\beta$ ), que representa la relación de flujo de salmuera a agua de mar:

$$W_{\text{obtained}_{\text{DP},t}} = SW_t^{\text{dp}} \cdot (1 - \beta), \quad \forall t \in T \quad (7)$$

$$W_{\text{obtained}_{\text{OTEC},t}} = SW_t^{\text{ot}} \cdot (1 - \beta), \quad \forall t \in T \quad (8)$$

$$W_{\text{obtained}_{\text{Desal},t}} = SW_t^{\text{de}} \cdot (1 - \beta), \quad \forall t \in T \quad (9)$$

El agua total recibida en cada estación de distribución se obtiene de las plantas de desalinización establecidas, la planta *OTEC*, la nueva planta de desalinización, los tanques de recogida de agua de lluvia y los acuíferos. De igual manera, toda el agua que ingresa a las estación central se envía a los usuarios correspondientes.

Para estaciones domésticas:

$$\sum_m TW_{m,t}^{\text{domc}} = h_t^{\text{dom}}, \quad \forall t \in T, t \neq 1 \quad (10)$$

$$h_t^{\text{dom}} = \sum_r TW_{r,t}^{\text{dom}}, \quad \forall t \in T, t \neq 1 \quad (11)$$

Para estaciones agrícolas:

$$\sum_m TW_{m,t}^{\text{agrc}} = h_t^{\text{agr}}, \quad \forall t \in T, t \neq 1 \quad (12)$$

$$\sum_m TW_{m,t}^{\text{agrc}} = h_t^{\text{agr}}, \quad \forall t \in T, t \neq 1 \quad (13)$$

Las demandas de agua pueden satisfacerse de acuerdo a las siguientes ecuaciones por el volumen de agua en cada estación central más el agua en los tanques de almacenamiento nuevos y existentes:

$$DWD_{r,t} = TW_{r,t}^{\text{dom}} + \sum_p W_{p,r,t}^{\text{spr}} + \sum_q W_{q,r,t}^{\text{sqr}}, \quad \forall r \in R, \forall t \in T, t \neq 1 \quad (14)$$

$$AWD_{g,t} = TW_{g,t}^{\text{agr}} + \sum_p W_{p,g,t}^{\text{sqa}} + \sum_q W_{q,g,t}^{\text{sqa}}, \quad \forall g \in G, \forall t \in T, t \neq 1 \quad (15)$$

El volumen total de agua en los tanques de almacenamiento existentes en cualquier momento dado ( $W_{p,t}^{\text{stop}} - W_{p,t-1}^{\text{stop}}$ ) es equivalente al total de agua obtenida de todas las fuentes de agua ( $W_{m,p,t}^{\text{sp}}$ ) menos el agua enviada a las estaciones domésticas ( $W_{p,r,t}^{\text{spr}}$ ) y a las estaciones agrícolas ( $W_{p,g,t}^{\text{sqa}}$ ):

$$W_{p,t}^{\text{stop}} - W_{p,t-1}^{\text{stop}} = \quad (16)$$

$$W_{m,p,t}^{sp} = \left[ \sum_p W_{p,r,t}^{spr} + \sum_p W_{p,g,t}^{spa} \right], \quad \forall p \in P, \forall t \in T, t \neq 1$$

El volumen total de agua en los nuevos tanques de almacenamiento en un momento dado ( $W_{q,t}^{stoq} - W_{q,t-1}^{stoq}$ ) es equivalente al total de agua obtenida de todas las fuentes de agua ( $W_{m,q,t}^{sq}$ ) menos el agua enviada a las estaciones domésticas ( $W_{q,r,t}^{sqr}$ ) y a las estaciones agrícolas ( $W_{q,g,t}^{sqa}$ ):

$$W_{q,t}^{stoq} - W_{q,t-1}^{stoq} = W_{m,q,t}^{sq} - \left[ \sum_q W_{q,r,t}^{sqr} + \sum_q W_{q,g,t}^{sqa} \right], \quad \forall q \in Q, \forall t \in T, t \neq 1 \quad (17)$$

La salmuera rechazada se puede determinar multiplicando el agua de mar total por el factor  $\beta$ :

$$b_t^{dp} = \beta \cdot SW_t^{dp}, \quad \forall t \in T \quad (18)$$

$$b_t^{ot} = \beta \cdot SW_t^{ot}, \quad \forall t \in T \quad (19)$$

$$b_t^{de} = \beta \cdot SW_t^{de}, \quad \forall t \in T \quad (20)$$

### 3.2.2 Existencia de nuevos tanques de almacenamiento.

La implementación de nuevos tanques de almacenamiento se determina mediante el uso de variables binarias ( $y_q^{sto}$ ), que indican si es necesario un tanque (si la variable binaria es igual a uno) o no (si la variable binaria es igual a cero). Además, la presencia del tanque está sujeta a restricciones impuestas por sus capacidades máxima ( $\Theta_q^{sto,max}$ ) y mínima ( $\Theta_q^{sto,min}$ ), así como el volumen máximo total de agua en los tanques de almacenamiento ( $S_q^{max}$ ) para el período de tiempo determinado:

$$y_q^{sto} \cdot \Theta_q^{sto,min} \leq S_q^{max} \leq y_q^{sto} \cdot \Theta_q^{sto,max} \quad (21)$$

El costo de instalación relacionado ( $IC_q^{sto}$ ) se determina por el costo fijo del tanque ( $Z_1$ ), el costo variable unitario ( $Z_2$ ), y un factor utilizado para anualizar la inversión ( $k_F$ ), así como la capacidad máxima para los tanques de almacenamiento con un factor de escala económica ( $\alpha$ ):

$$IC_q^{sto} = k_F [Z_1 \cdot y_q^{sto} + Z_2 (S_q^{max})^\alpha], \quad \forall q \in Q \quad (22)$$

donde  $S_q^{max}$  es mayor que la cantidad de agua en el tanque de almacenamiento ( $S_{q,t}^N$ ) en un momento específico  $t$ .

$$W_{q,t}^{sto} \leq S_q^{max}, \quad \forall q \in Q, \forall t \in T \quad (23)$$

Además, es posible determinar el costo de almacenamiento ( $StoC$ ) utilizando el costo de instalación y un factor utilizado para tener en cuenta el tiempo de funcionamiento por año ( $H_Y$ ):

$$StoC = H_Y \sum_q IC_q^{sto} \quad (24)$$

### 3.2.3 Existencia de nuevas plantas OC-OTEC y de doble propósito.

La existencia de nuevas plantas OC-OTEC y de desalación de energía de doble propósito se determina mediante la utilización de variables binarias ( $y^o, y^d$ ), que dictan si es necesario tener una planta (si la variable binaria es igual a uno) o no (si la variable binaria es igual a cero). Además, la presencia de una nueva planta está sujeta a restricciones impuestas por su capacidad máxima ( $\Theta^{omax}, \Theta^{dmax}$ ) y mínima ( $\Theta^{omin}, \Theta^{dmin}$ ), así como el volumen máximo de agua de mar en cada nueva planta ( $SW^{omax}, SW^{dmax}$ ) para el período determinado:

$$y^o \cdot \Theta^{omin} \leq SW^{omax} \leq y^o \cdot \Theta^{omax} \quad (25)$$

$$y^d \cdot \Theta^{dmin} \leq SW^{dmax} \leq y^d \cdot \Theta^{dmax} \quad (26)$$

El costo de instalación relacionado ( $IC^o, IC^d$ ) se determina mediante el costo fijo de la planta ( $Z_3^o, Z_3^d$ ), el costo variable unitario ( $Z_4^o, Z_4^d$ ), y un factor utilizado para anualizar la inversión ( $k_F$ ), junto con la capacidad máxima de agua de mar con un factor de escala económico:

$$IC^o = k_F [Z_3^o \cdot y^o + Z_4^o (SW^{omax})^\alpha] \quad (27)$$

$$IC^d = k_F [Z_3^d \cdot y^d + Z_4^d (SW^{dmax})^\alpha] \quad (28)$$

El costo de operación relacionado ( $OC^o, OC^d$ ) se determina utilizando el costo de operación unitario de la planta ( $Z_5^o, Z_5^d$ ), el total de agua de mar extraída ( $SW_t^{ot}, SW_{u,t}^{in,N}$ ), y el factor de recuperación ( $1 - \beta$ ), junto con el factor utilizado para calcular el tiempo de operación por año:

$$OC_t^o = H_Y [Z_5^o (1 - \beta) SW_t^{ot}], \quad \forall t \in T \quad (29)$$

$$OC_t^d = H_Y [Z_5^d (1 - \beta) SW_t^{dp}], \quad \forall t \in T \quad (30)$$

donde  $SW^{omax}$  and  $SW^{dmax}$  son mayores que cualquier posible cantidad de agua en una planta de energía ( $SW_t^{ot}, SW_t^{dp}$ ) durante cualquier período de tiempo  $t$ .

$$SW_t^{ot} \leq SW^{omax}, \quad \forall t \in T \quad (31)$$

$$SW_t^{dp} \leq SW^{dmax}, \quad \forall t \in T \quad (32)$$

En cuanto a las plantas desalinizadoras existentes, el costo de operación es una función de la cantidad total de agua de mar extraída ( $SW_t^{de}$ ) multiplicada por la recuperación total ( $1 - \beta$ ) y el costo unitario de operación ( $Z_6$ ):

$$OC_t^{de} = H_Y [Z_6 (1 - \beta) SW_t^{de}], \quad \forall t \in T \quad (33)$$

El costo total de instalación de las nuevas plantas de energía se puede calcular de la siguiente manera:

$$TIC = IC^o + IC^d \quad (34)$$

De igual manera, el costo operativo total de las nuevas plantas de energía se puede calcular utilizando la siguiente expresión:

$$TOC_t = OC_t^o + OC_t^d \quad (35)$$

Además, el costo operativo total de las plantas desalinizadoras existentes se puede determinar utilizando la siguiente ecuación:

$$TOC^{de} = \sum_t OC_t^{de} \quad (36)$$

El requisito total de energía ( $TER_t$ ) de la nueva planta de desalinización y generación de energía depende del total de agua de mar suministrada. Esta función tiene un comportamiento lineal y depende de la capacidad de la nueva planta de desalinización y generación de energía multiplicada por un factor ( $FCF$ ):

$$TER_t = SW_t^{dp} \cdot FCF, \quad \forall t \in T \quad (37)$$

donde  $TER_t$  es igual a la energía obtenida por la combustión de combustibles fósiles ( $Q_t^{fuel}$ ) durante cualquier período  $t$ .

$$TER_t = Q_t^{\text{fuel}}, \quad \forall t \in T \quad (38)$$

El costo total de energía (*TEC*) de las plantas de desalinización se obtiene mediante la siguiente ecuación, donde *FFC* es el precio del combustible fósil.

$$TEC = H_Y \sum_t FFC \cdot Q_t^{\text{fuel}} \quad (39)$$

### 3.2.4 Costo de bombeo y tuberías

La siguiente ecuación se puede utilizar para calcular el costo total de las tuberías de distribución de agua considerando las nuevas instalaciones:

$$\begin{aligned} TPiC = k_F \left[ \sum_q \sum_r DPC3 \cdot y_{q,r}^{\text{stoq,dom}} + \sum_r DPC7 \cdot y_r^{\text{dp,dom}} + \sum_r DPC8 \cdot y_r^{\text{ot,dom}} \right. \\ + \sum_q \sum_g APC3 \cdot y_{q,g}^{\text{stoq,agr}} + \sum_g APC7 \cdot y_g^{\text{dp,agr}} + \sum_g APC8 \cdot y_g^{\text{ot,agr}} \\ + \sum_p eSPC3 \cdot y_p^{\text{dp,stop}} + \sum_p eSPC4 \cdot y_p^{\text{ot,stop}} + \sum_q nSPC2 \cdot y_q^{\text{desal,stoq}} \\ \left. + \sum_q nSPC3 \cdot y_q^{\text{dp,stoq}} + \sum_q nSPC4 \cdot y_q^{\text{ot,stoq}} \right] \quad (40) \end{aligned}$$

donde *y* son variables binarias para determinar la existencia de las conexiones de las tuberías y *DPC*, *APC*, *eSPC* y *nSPC* son los factores de costo de las tuberías de distribución para consumo doméstico, agrícola, tuberías de almacenamiento existentes y nuevas tuberías de almacenamiento.

Además, para determinar estos factores de costo de las tuberías, se utiliza la ecuación 41:

$$\text{PipingCostFactor} = k_m L D^m \quad (41)$$

donde *L* denota la longitud de la tubería, *D<sup>m</sup>* es el diámetro de la tubería, *k<sub>m</sub>* y *m* son parámetros de costo de la tubería que dependen del material de la tubería. Debido a que el diámetro de la tubería, la distancia desde las estaciones de almacenamiento hasta los consumidores finales y la altura son fijos, el costo de la tubería se determina por la tasa de flujo. Las variables binarias determinan si la tubería existe y se utilizan para activar el costo de la tubería, teniendo en cuenta la capacidad máxima utilizada en todos los períodos de tiempo.

Del mismo modo, el costo total de bombeo se puede estimar utilizando la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
TPuC = H_y \left[ \sum_r \sum_t PPD1 \cdot TW_{r,t}^{dom} + \sum_p \sum_r \sum_t PPD2 \cdot W_{p,r,t}^{spr} \right. \\
+ \sum_q \sum_r \sum_t PPD3 \cdot W_{q,r,t}^{sqr} + \sum_t PPD4 \cdot TW_{rain',t}^{domc} \\
+ \sum_t PPD5 \cdot TW_{raquif',t}^{domc} + \sum_t PPD6 \cdot TW_{desal',t}^{domc} + \sum_t PPD7 \cdot TW_{DP',t}^{domc} \\
+ \sum_t PPD8 \cdot TW_{OTEC',t}^{domc} + \sum_g \sum_t PPA1 \cdot TW_{g,t}^{agr} \\
+ \sum_p \sum_g \sum_t PPA2 \cdot W_{p,g,t}^{spa} + \sum_q \sum_g \sum_t PPA3 \cdot W_{q,g,t}^{sqa} \\
+ \sum_t PPA4 \cdot TW_{rain',t}^{agrc} + \sum_t PPA5 \cdot TW_{raquif',t}^{agrc} + \sum_t PPA6 \cdot TW_{desal',t}^{agrc} \\
+ \sum_t PPA7 \cdot TW_{DP',t}^{agrc} + \sum_t PPA8 \cdot TW_{OTEC',t}^{agrc} \\
+ \sum_p \sum_t ePPS1 \cdot W_{rain',p,t}^{sp} + \sum_p \sum_t ePPS2 \cdot W_{desal',p,t}^{sp} \\
+ \sum_p \sum_t ePPS3 \cdot W_{DP',p,t}^{sp} + \sum_p \sum_t ePPS4 \cdot W_{OTEC',p,t}^{sp} \\
+ \sum_q \sum_t nPPS1 \cdot W_{rain',q,t}^{sq} + \sum_q \sum_t nPPS2 \cdot W_{desal',q,t}^{sq} \\
\left. + \sum_q \sum_t nPPS3 \cdot W_{DP',q,t}^{sq} + \sum_q \sum_t nPPS4 \cdot W_{OTEC',q,t}^{sq} \right] \quad (42)
\end{aligned}$$

Donde cada factor de costo de bombeo ( $PP$ ) mencionado anteriormente se estima utilizando la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$PumpingCostFactor = \frac{1}{0.0000576} \cdot f \cdot \frac{L}{D^5} \cdot \frac{(\text{no. of hours})(\$/kWh)}{\eta} \quad (43)$$

Donde  $f$  es el factor de fricción,  $L$  es la longitud de la tubería,  $D$  es el diámetro interno de la tubería, y  $\eta$  es la eficiencia combinada de la bomba y el motor. El factor de fricción se determina según la rugosidad de la tubería, el diámetro y el número de Reynolds.

### 3.2.5 Funciones objetivo

El modelo de optimización multiobjetivo propuesto incluye tres parámetros significativos. El primer objetivo es maximizar el beneficio anual bruto ( $AP$ ) como un objetivo económico. El segundo objetivo es minimizar el agua extraída de los acuíferos y las emisiones de  $CO_2$  como una función ambiental ( $EF$ ). Finalmente, el objetivo social consiste en maximizar los empleos creados por la instalación de la nueva tecnología ( $JOBS$ ).

$$OF = \text{Max } AP; \text{ Min } EF; \text{ JOBS} \quad (44)$$

Ahora bien, la función económica objetivo consiste en maximizar el beneficio anual bruto, que se calcula restando el costo anual total ( $TAC$ ) de las ventas de agua y energía.

$$AP = \text{WaterSales} + \text{EnergySales} - TAC \quad (45)$$

El primer término de la ecuación 45 se refiere a las ventas anuales de agua ( $WaterSales$ ) e incluye el agua vendida tanto a usuarios domésticos como agrícolas, y puede determinarse utilizando la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \text{WaterSales} = H_Y \sum_t \left[ \left( \sum_r TW_{r,t}^{\text{dom}} + \sum_p \sum_r W_{p,r,t}^{\text{spr}} + \sum_q \sum_r W_{q,r,t}^{\text{sqr}} \right) WDC \right. \\ \left. + \left( \sum_g TW_{g,t}^{\text{agr}} + \sum_p \sum_g W_{p,g,t}^{\text{sqa}} + \sum_q \sum_g W_{q,g,t}^{\text{sqg}} \right) WAC \right] \end{aligned} \quad (46)$$

Mientras que el segundo término de la misma ecuación,  $EnergySales$ , son las ventas de energía y se puede calcular utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{EnergySales} = H_Y \sum_t \left[ \sum_r \sum_l E_{l,r,t}^{\text{dom}} \cdot EDC + \sum_g E_{l,g,t}^{\text{agr}} \cdot EAC \right] \quad (47)$$

Finalmente, el costo anual total ( $TAC$ ) incluye el costo de instalación total ( $TIC$ ) y el costo operativo total ( $TOC_t$ ) de las nuevas plantas  $OC-OTEC$  y de doble propósito, así como el consumo total de energía ( $TEC$ ) y el costo operativo de las plantas de desalación existentes ( $TOC^{de}$ ). La ecuación también incluye el costo de almacenamiento ( $StoC$ ), el costo total de tuberías ( $TPiC$ ) y el costo total de bombeo ( $TPuC$ ).

$$TAC = TIC + TOC_t + TOC^{de} + TEC + StoC + TPiC + TPuC \quad (48)$$

La función ambiental se define como la suma de los valores normalizados del uso del agua de los acuíferos ( $Naw$ ) y el total de las emisiones de  $CO_2$  ( $Nem$ ):

$$EF = Nem + Naw \quad (49)$$

Donde el valor de las emisiones de cada fuente de energía se calcula mediante la ecuación:

$$Emm_l = Eq_l \cdot \sum_t E_{prod,l,t}, \quad \forall l \in L \quad (50)$$

En cuanto a la función social, la cuantificación de empleos ( $JOBS$ ) generados por las nuevas plantas se determina de manera indirecta a través de la cantidad de energía utilizada según el modelo  $JEDI$  (*Jobs and Economic Development Impact*), en el que se puede obtener el número de empleos por kilovatio hora producido por cada fuente de energía:

$$JOBS = \sum_t (JOBS^{OTECE} \cdot E_{prod,OTECE,t}) + \sum_t (JOBS^{DP} \cdot E_{prod,DP,t}) \quad (51)$$

### 3.3. Caso de Estudio

El caso de estudio en este trabajo de tesis es la isla de Tahití, una isla tropical en el Océano Pacífico Sur (Sanjiv et al., 2023). Esa ubicación fue seleccionada para aplicar el modelo propuesto porque Tahití, al igual que muchas regiones insulares aisladas, enfrenta desafíos significativos en la producción y distribución de agua y energía. Estos desafíos incluyen recursos e infraestructura limitados y el alto costo de los combustibles fósiles importados, que actualmente son la principal fuente de energía en la isla. Dadas estas dificultades, la integración de sistemas alternativos para obtener agua y energía se ha vuelto cada vez más importante para la isla.

Además, existen múltiples razones por las cuales Tahití es un lugar atractivo para una planta  $OC-OTEC$ . En primer lugar, debido a su clima cálido durante todo el año y al agua del océano profundo

rica en energía térmica, Tahití es un lugar ideal para una planta *OC-OTEC* que puede utilizar la diferencia de temperatura entre el agua de la superficie y el agua profunda para generar electricidad, como se ve en la Figura S1 de la información adicional. En segundo lugar, Tahití depende en gran medida de los combustibles fósiles importados para sus necesidades energéticas, e invertir en tecnología *OC-OTEC* puede reducir su dependencia y promover la autosuficiencia energética. En tercer lugar, una planta *OC-OTEC* puede crear oportunidades de empleo, estimular el crecimiento económico y proporcionar una fuente estable de energía, atrayendo así nuevos negocios e industrias a la región. En cuarto lugar, la tecnología *OC-OTEC* es una fuente de energía sostenible y limpia que no tiene impactos ambientales negativos. Al invertir en *OC-OTEC*, Tahití puede reducir su huella de carbono y contribuir a los esfuerzos globales para abordar el cambio climático. En quinto lugar, al diversificar sus fuentes de energía, Tahití puede mejorar su seguridad energética y minimizar el riesgo de interrupciones en la cadena de suministro u otros eventos imprevistos. Los beneficios de una planta *OC-OTEC* en Tahití son muchos, incluida la estabilización de los precios de la electricidad y la mejora de la confiabilidad de la red eléctrica. Esto tendrá un impacto positivo en las empresas y los residentes que tendrán acceso a una fuente de electricidad más estable y asequible.

**Tabla 3. Producción máxima de energía**

<b>Fuente de energía [MW]</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>
<i>Hidroeléctrica</i>	144000	144000	128000	144000	144000
<i>Solar</i>	24000	32000	32000	32000	32000
<i>Petróleo</i>	296000	304000	304000	360000	368000

**Tabla 4. Rendimiento máximo de agua**

<b>Fuente de agua [m<sup>3</sup>]</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>
<i>Lluvia</i>	6681349	6718628	6756710	6795935	6835331
<i>Acuífero</i>	10000000	10000000	10000000	10000000	10000000
<i>Desalinización</i>	60132144	60467652	60810387	61163415	61517976

Es importante destacar que la producción máxima de energía de cada fuente existente se obtuvo a partir de *Our World in Data* basado en el *BP Statistical Review of World Energy*, *Ember Global Electricity Review (2022)* y *Ember European Electricity Review (2022)*, y se puede ver en la Tabla 3. Como se muestra en la Tabla 3, la producción actual de energía se deriva principalmente del

petróleo, representando más del 60% del total. Esto subraya el potencial de la incorporación de una planta *OC-OTEC* como una oportunidad atractiva para mitigar la dependencia del petróleo como fuente de energía primaria. Al aprovechar la abundante y renovable energía térmica del océano, *OC-OTEC* tiene el potencial de contribuir significativamente a diversificar la mezcla energética y reducir la dependencia de los combustibles fósiles finitos. Por otro lado, se hizo una estimación de la cantidad máxima de agua obtenida por fuente utilizando la población anual de la Polinesia Francesa, que se encuentra en las Tablas 4 y 5.

**Tabla 5. Población de la Polinesia Francesa**

<b>Año</b>	<b>Población</b>
2016	274576
2017	276108
2018	277673
2019	279285
2020	280904

La demanda de energía y agua de los usuarios domésticos y agrícolas se determinó a través de estimaciones debido a la falta de datos oficiales, como se puede ver en la 6.

**Tabla 6. Demanda de agua y energía por usuario**

	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>
<i>Demanda de energía doméstica [MW]</i>	250560	259200	250560	293760	293760
<i>Demanda de energía agrícola [MW]</i>	167040	172800	167040	195840	195840
<i>Demanda de agua doméstica [m<sup>3</sup>]</i>	20044048	20155884	20270129	20387805	20505992
<i>Demanda de agua agrícola [m<sup>3</sup>]</i>	46769445	47030396	47296968	47571545	47847315

Además, al evaluar el impacto general en el empleo, es crucial considerar la perspectiva más amplia. La instalación de la planta *OC-OTEC* generaría empleos directamente relacionados con su construcción, operación y mantenimiento. Estos empleos pueden contribuir a la economía local y proporcionar oportunidades de empleo para la fuerza laboral. Sin embargo, también es importante reconocer que la reducción en el uso de agua de acuífero podría tener implicaciones para los empleos relacionados con la extracción de agua de acuífero. Si la planta *OC-OTEC* reemplaza la necesidad de agua de acuífero, podría llevar a una disminución en la demanda de empleos relacionados con acuíferos, como la perforación, bombeo y mantenimiento de pozos. Es esencial reconocer que la transición del agua de acuífero a fuentes de agua alternativas, como la planta *OC-*

*OTEC*, puede tener beneficios a largo plazo para el medio ambiente y la sostenibilidad. La preservación de las fuentes de agua de acuífero es crucial para el ecosistema y el bienestar general de la comunidad a largo plazo.

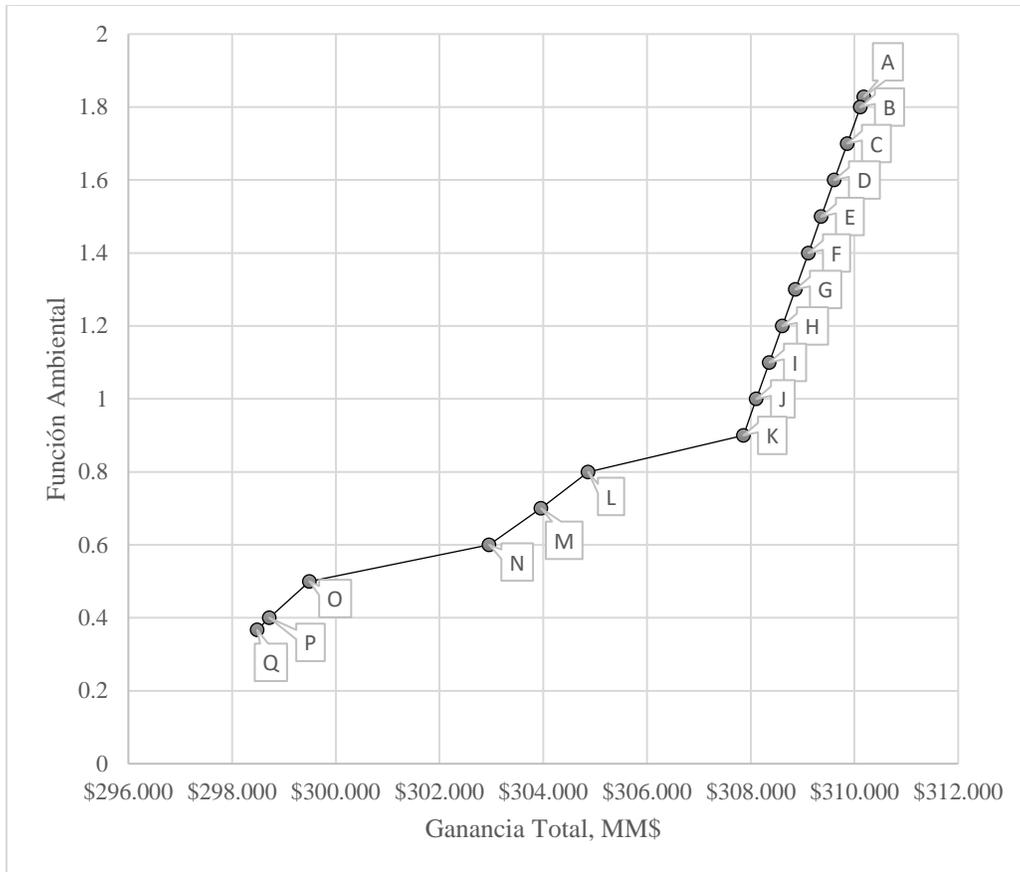
En cuanto a la creación de empleo, es importante considerar el potencial de nuevas oportunidades de empleo asociadas con la planta *OC-OTEC* en sí. Estas podrían incluir posiciones de ingeniería y técnicas para el diseño, instalación y operación de la planta, así como roles administrativos y de gestión. Además, el desarrollo de fuentes de agua y tecnologías alternativas puede estimular la innovación y potencialmente dar lugar a la creación de nuevas industrias y oportunidades de empleo.

La elección del modelo *JEDI* para evaluar la creación de empleo basada en la generación de energía se basó en la practicidad y la facilidad de implementación. El modelo *JEDI* proporciona un marco estandarizado para estimar los impactos económicos y de empleo de diversas fuentes de energía. Al utilizar este modelo, pudimos derivar el número de empleos por kilovatio hora producido por cada fuente de energía, lo que permitió un análisis consistente y comparable entre diferentes tecnologías (Keyser et al., 2016)

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo matemático se implementó utilizando el software *General Algebraic Modeling System (GAMS)* y se resolvió con la ayuda del solucionador *LINDOGLOBAL* (Brooke et al., 2006; *LINDO and LINDOGlobal*, n.d.). El modelo consta de 559 ecuaciones, 936 variables y 61 variables discretas. Además, el problema multiobjetivo se aborda utilizando el método de restricción para dibujar el frente de Pareto, ilustrado en la Figura 11. En la Figura 11, cada punto del frente de Pareto representa un equilibrio entre los dos objetivos en conflicto y se muestra de acuerdo a la preferencia de cada uno de ellos. Este enfoque facilita la exploración de varios escenarios para identificar el equilibrio óptimo entre objetivos competitivos. Además, implica una evaluación de la cantidad de empleos que la propuesta de integración de la planta *OC-OTEC* generaría en cada punto del frente de Pareto. Además, esta evaluación proporciona una evaluación de los impactos económicos, ambientales y sociales de la solución propuesta, lo que permite comprender sus efectos potenciales en la sociedad. Al considerar todos estos factores juntos, se puede proponer un marco de toma de decisiones sobre la incorporación de la planta *OC-OTEC* al tiempo que se maximizan sus beneficios y se minimizan sus inconvenientes.

Es importante destacar que la función ambiental utilizada en el proceso de optimización considera las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes y el uso de agua de acuífero, que son indicadores críticos de la sostenibilidad ambiental. Los valores de estos parámetros se normalizan y suman para crear la función ambiental utilizada en el modelo de optimización. Además, permite una evaluación integral del impacto ambiental de la integración propuesta de la planta *OC-OTEC*. Es importante destacar que los resultados mostrados en la Tabla 7 se basan en datos recopilados durante cinco años. Por lo tanto, los resultados representan el impacto acumulado durante ese período de tiempo. Además, esto resalta la importancia de considerar el impacto a largo plazo de cualquier solución propuesta en lugar de solo los beneficios a corto plazo al evaluar la sostenibilidad de nuevas tecnologías y sistemas.



**Figura 11. Frente Pareto para el caso de estudio**

Dado lo anterior, la sección de resultados se estructura en función de tres análisis. El primero discute el conflicto existente entre las soluciones óptimas del frente de Pareto y los resultados obtenidos al maximizar el beneficio total correspondiente al objetivo económico. Luego se realiza un análisis comparativo de las dos plantas de energía renovable propuestas en términos económicos y ambientales para evaluar su rendimiento. Finalmente, se seleccionó una solución equilibrada para presentar la variación y reducir el desequilibrio entre ambas soluciones óptimas, considerando los criterios de que todos los objetivos tienen la misma importancia en el marco de toma de decisiones.

**Tabla 7. Soluciones óptimas para el frente Pareto**

Solución Óptima	Ganancia Total [MM\$]	Uso del acuífero [hm <sup>3</sup> ]	Emisiones [ktonCO <sub>2</sub> eq]	Función Ambiental	Empleos generados	Planta instalada
A	\$310.184	50	1103	1.83	0	-
B	\$310.113	48.6	1103	1.8	0	-

C	\$309.863	43.6	1103	1.7	0	-
D	\$309.612	38.6	1103	1.6	0	-
E	\$309.362	33.6	1103	1.5	0	-
F	\$309.111	28.6	1103	1.4	0	-
G	\$308.861	23.6	1103	1.3	0	-
H	\$308.610	18.6	1103	1.2	0	-
I	\$308.360	13.6	1103	1.1	0	-
J	\$308.109	8.6	1103	1	0	-
K	\$307.859	3.6	1103	0.9	0	-
L	\$304.868	0	1066	0.8	65	DP
M	\$303.959	0	933	0.7	295	DP
N	\$302.959	0	799	0.6	179	OTEC
O	\$299.493	0	666	0.5	384	DP, OTEC
P	\$298.717	0	533	0.4	615	DP, OTEC
Q	\$298.485	0	489	0.37	692	DP, OTEC

#### 4.1. Análisis del conjunto de soluciones individuales con respecto a la maximización del beneficio total.

De acuerdo con la Tabla 7, las soluciones óptimas obtenidas para cada escenario se etiquetan de la A a la Q. Los resultados muestran la influencia de ambos objetivos y cómo modifican la política operativa de acuerdo con los criterios seleccionados. Además, los resultados muestran los compromisos entre los aspectos económicos y ambientales y su impacto social a través de la generación de empleos. Es importante destacar el conflicto entre la ganancia máxima y el valor mínimo de la función ambiental. En consecuencia, para obtener el mínimo objetivo ambiental, es necesario reducir el beneficio total para presentar soluciones más sostenibles y, con esto, la integración de la planta *OC-OTEC*.

La solución económica óptima, designada como punto A en la Figura 11, está asociada con la máxima ganancia total, que asciende a 310.18 millones de dólares en este caso. Este valor de ganancia se caracteriza por ventas de agua y energía por un valor de 219.62 millones de dólares y 103.33 millones de dólares, respectivamente, y costos anuales totales de 12.77 millones de dólares. Sin embargo, esta solución representa el peor caso en términos del valor ambiental de 1.83. Este valor representa la solución óptima con el mayor consumo de agua del acuífero y la mayor cantidad de emisiones. En este sentido, se requieren 50 hm<sup>3</sup> de agua del acuífero para satisfacer la demanda,

y su solución implica 1103 ktonCO<sub>2</sub>eq. Como se puede ver, esta solución no genera empleos, ya que están directamente relacionados con la instalación de nuevas tecnologías.

Por otro lado, la solución en el punto Q, ubicada en el extremo opuesto del frente de Pareto, corresponde a la función ambiental mínima permitida. Esta solución tiene un valor ambiental de 0.36, lo que significa un impacto positivo en el consumo de agua del acuífero y en términos de emisiones de CO<sub>2</sub>. Además, esta solución implica el desarrollo e implementación de nuevas tecnologías como OTEC y PD, lo que indica indirectamente una mayor generación de empleos, con un valor de 692. Además, al ser fuentes renovables, contribuyen a la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> con 489 ktonCO<sub>2</sub>eq emitidas, lo que representa un 55.69% menos que la solución óptima A. Por otro lado, el beneficio total es de 298.485 millones de dólares, lo que, en comparación con la mejor solución económica, representa un 3.7% menos. Esta reducción en los ingresos se debe principalmente al aumento de los costos anuales totales de hasta 24.472 millones de dólares.

Por otro lado, en las soluciones B a K propuestas en este estudio, se basan en plantas de energía existentes y sistemas de recogida de agua y no implican la instalación de nuevas tecnologías. Como resultado, estas soluciones no generan nuevas oportunidades de empleo. Si bien reducen el uso de agua del acuífero en hasta 3.6 hm<sup>3</sup>, mantienen el mismo nivel de emisiones con 1103 ktonCO<sub>2</sub>eq. como la solución A. Esto se logra a través del sobrediseño de la red de agua, que puede satisfacer la demanda de agua aumentando la recolección de otras fuentes instaladas, como plantas desaladoras y sistemas de recolección de agua de lluvia, sin necesidad de nuevas tecnologías. Sin embargo, este enfoque aumenta los costos anuales debido a los mayores costos de bombeo y almacenamiento. Como resultado, los beneficios se reducen a 307,859 millones de dólares. A pesar de la reducción de costos lograda al evitar la implementación de nuevas tecnologías, la falta de innovación y la creación de empleo pueden limitar la sostenibilidad a largo plazo de estas soluciones.

En cuanto a las soluciones L y M, proponen la instalación de la planta *DP*, que no solo reduce completamente el uso de agua del acuífero, sino que también genera 65 y 295 oportunidades de empleo, respectivamente. Esta diferencia en la creación de empleo es consecuencia de la capacidad de la planta recién instalada. Además, estas soluciones ayudan a cubrir la demanda de agua y, como resultado, reducen las emisiones de CO<sub>2</sub>. Por ejemplo, en el caso de la solución L, se reducen

a un valor de 1066 ktonCO<sub>2</sub>eq., y esto se debe a la carga de trabajo de las plantas de energía instaladas. Mientras que la solución M tiene un valor de 933 ktonCO<sub>2</sub>eq. Ambas soluciones representan un 3.4% y un 15.47% menos que la peor solución ambiental. Además, la instalación de la nueva planta implica un aumento en los costos anuales totales, lo que reduce el beneficio total en 6.2 millones de dólares en comparación con la mejor solución económica.

En el mismo sentido, en la solución N, el enfoque propuesto implica la instalación de una planta *OC-OTEC* para satisfacer las demandas de agua y energía. Aunque esta solución conlleva una disminución de las ganancias totales en 7.2 millones de dólares, presenta una característica prometedora de reducir las emisiones en aproximadamente un 27% en comparación con la Solución A. Específicamente, la instalación de la tecnología *OC-OTEC* resulta en emisiones equivalentes a 799 ktonCO<sub>2</sub>eq., significativamente más bajas que las plantas de desalación de doble propósito. Por otro lado, el alto costo de instalación de la tecnología *OC-OTEC* en comparación con las plantas de doble propósito contribuye a reducir la función económica. Sin embargo, la solución propuesta genera 179 empleos debido a la instalación de esta nueva tecnología.

Finalmente, las soluciones O y P sugieren la instalación de tanto plantas *OC-OTEC* como de doble propósito, lo que reduce las emisiones en aproximadamente un 52% (533 ktonCO<sub>2</sub>eq.) con respecto a la función objetivo ambiental. Sin embargo, estas soluciones, junto con la solución Q, resultan en la disminución más significativa de las ganancias totales, con una reducción de al menos 10.6 millones de dólares, debido a los altos costos de instalación y mantenimiento de ambas tecnologías. No obstante, estas soluciones proporcionan un beneficio considerable para el objetivo social al generar hasta 615 oportunidades de empleo.

#### 4.2. *Evaluación de instalaciones de energías renovables: un análisis comparativo*

Por otro lado, para evaluar aún más el equilibrio entre los objetivos económicos y la sostenibilidad ambiental, se realizó un análisis secundario para minimizar el impacto ambiental mientras se limita el objetivo económico y se permite la instalación de solo una nueva planta, ya sea una *DP* o una *OTEC*, como se muestra en la Tabla 8. El propósito de este escenario es evaluar el resultado

potencial cuando las preocupaciones ambientales tienen prioridad, al tiempo que se asegura la viabilidad económica de la solución propuesta.

**Tabla 8. Minimización de la función ambiental según la tecnología renovable instalada**

Solución Óptima	Función Ambiental	Emisiones [ktonCO <sub>2</sub> eq]	Ganancia Total [MM\$]	Empleos generados	Planta instalada
R	0.58	777	\$302.8	192	OTEC
T	0.61	815	\$303.3	500	DP

La Tabla 8 presenta los resultados del análisis de optimización para la instalación de una planta *OC-OTEC* o una planta de doble propósito en la red de distribución de agua y energía según el caso de estudio. La tabla muestra las soluciones óptimas R y T que minimizan la función ambiental al tiempo que satisfacen las demandas de agua y energía de la red. Los resultados destacan el impacto de cada tecnología en la reducción de las emisiones, con la planta *OC-OTEC* generando 777 ktonCO<sub>2</sub>eq. En comparación, la planta de desalinización de doble propósito genera 815 ktonCO<sub>2</sub>eq. Además, ambas soluciones eliminan el uso de agua del acuífero. Por lo tanto, la instalación de cualquiera de las soluciones tecnológicas contribuye al objetivo social de creación de empleo, con la planta *OC-OTEC* generando 192 empleos y la planta de desalinización de doble propósito generando 500 empleos. Finalmente, esto se alinea con la comprensión general de que las plantas de desalinización de doble propósito tienen un mayor potencial de creación de empleo que las plantas *OC-OTEC*. Además, el beneficio total generado por las soluciones presenta una diferencia de medio millón de dólares, que se puede atribuir a las diferencias en los costos de operación y mantenimiento de ambas plantas.

#### 4.3. Solución propuesta bajo suposición equilibrada

El análisis de optimización multiobjetivo proporcionó información importante para seleccionar la solución óptima para la red de distribución. Según los resultados de este análisis, se determinó que el escenario en el que solo se instala la planta *OC-OTEC* y corresponde a la Solución R en el frente de Pareto mostrado en la Figura 11 es la opción más adecuada. Aunque cualquier solución es viable para satisfacer las demandas de agua y energía, se descubrió que esta solución proporciona un equilibrio entre la viabilidad económica, la sostenibilidad ambiental y el impacto social de la propuesta, ya que la instalación de la tecnología *OC-OTEC* en la red de distribución del estudio de

caso diversifica la matriz energética, proporcionando una fuente de energía más resistente y estable. Además, promueve el desarrollo sostenible al fomentar el uso de fuentes de energía renovable. Por lo tanto, respalda la transición hacia una economía baja en carbono, reduce la dependencia de los combustibles fósiles y contribuye a mitigar los efectos del cambio climático.

La solución propuesta se evaluó en función de su viabilidad económica, sostenibilidad ambiental e impacto social. Los resultados muestran que la solución propuesta equilibra estos factores. Genera ingresos totales de 302,8 millones de dólares, que solo son 7,4 millones de dólares menos que los ingresos máximos posibles, lo que representa una disminución en la economía de solo el 2,4%. Además, la solución propuesta tiene un valor de función ambiental de 0,58, lo que indica un uso nulo de agua del acuífero y emisiones equivalentes a 777 ktonCO<sub>2</sub>eq., una disminución del 30% en comparación con la Solución A. Estos resultados resaltan la importante contribución de la solución a la sostenibilidad ambiental. Además, la solución propuesta genera 192 oportunidades de empleo, lo que demuestra su impacto social positivo.

Por otro lado, al comparar las cantidades máximas permitidas de generación de energía y extracción de agua en las tablas 3 y 4, respectivamente, con los valores sugeridos por la solución óptima para la generación de energía y extracción de agua presentados en las tablas 9 y 10, respectivamente, se hace evidente que la tecnología *OC-OTEC* puede servir como fuente complementaria en la red de distribución. Además, esto se debe a que elimina el uso de agua del acuífero y reduce las fuentes de combustibles fósiles en un 38 a 45%, dependiendo del año analizado.

**Tabla 9. Producción de energía propuesta**

Año	Hidroeléctrica [GWh]	Solar [GWh]	Petróleo [GWh]	<i>OC-OTEC</i> [GWh]	Total [GWh]
1	144	24	162.3	87.3	417.6
2	144	32	168.7	87.3	432
3	128	32	170.3	87.3	417.6
4	144	32	226.3	87.3	489.6
5	144	32	226.3	87.3	489.6

**Tabla 10. Producción de agua propuesta**

Año	Pluvial [hm <sup>3</sup> ]	Desalinizada [hm <sup>3</sup> ]	<i>OC-OTEC</i> [hm <sup>3</sup> ]	Total [hm <sup>3</sup> ]
1	6.7	59	1.3	67

2	6.7	59.1	1.3	67.1
3	6.8	59.5	1.3	67.6
4	6.8	59.9	1.3	68
5	6.8	60.2	1.3	68.3

La Figura 12 ilustra la red óptima de distribución de agua y energía seleccionada para el estudio de caso, mostrando la integración de la planta *OC-OTEC* y el flujo anual resultante de agua y energía. Esta representación visual permite una fácil comparación entre la solución propuesta y la red existente, y facilita la evaluación del impacto ambiental potencial de la solución. Además, la solución propuesta ofrece una matriz energética más diversa y resistente, con la planta *OC-OTEC* actuando como una fuente de energía complementaria que reduce la dependencia de los combustibles fósiles. La solución propuesta mitiga el impacto ambiental negativo al eliminar el uso de agua del acuífero y utilizar agua de mar. La comparación entre las redes propuesta y existente resalta los posibles beneficios de implementar la solución propuesta, incluyendo una red de distribución de agua y energía más sostenible, resistente y económicamente atractiva.

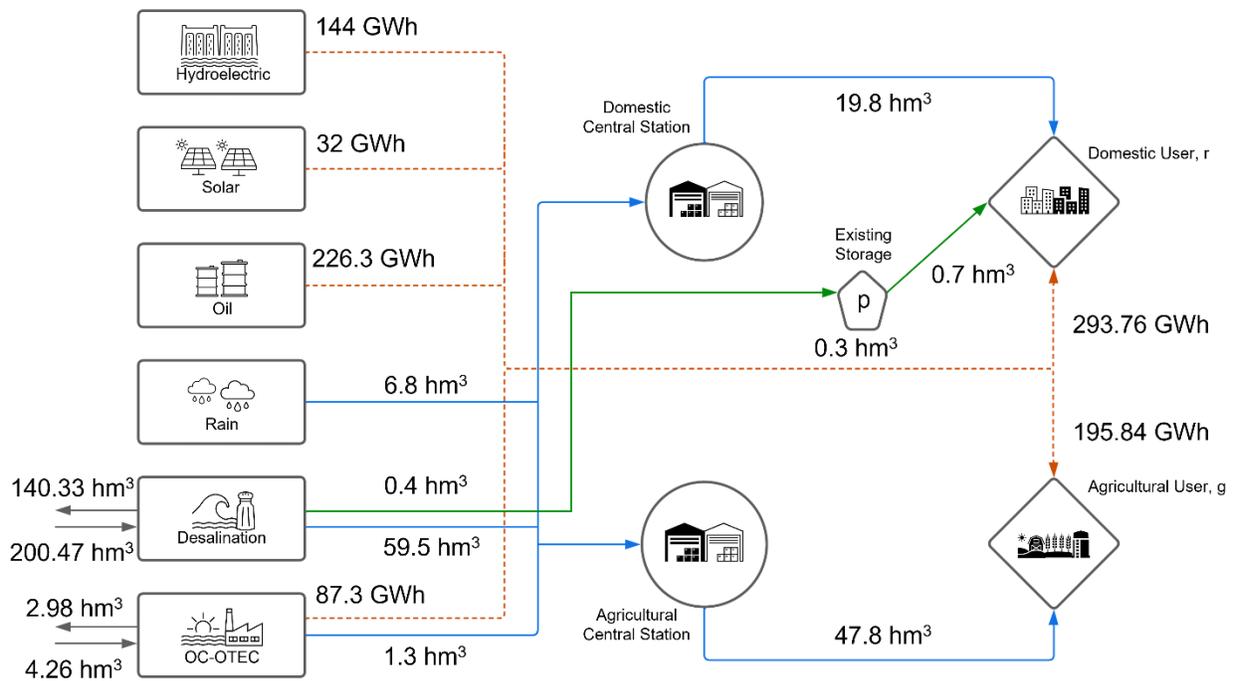


Figura 12. Red de distribución óptima de la solución seleccionada para el caso de estudio

## 5. CONCLUSIONES

Se ha propuesto un modelo de Programación No Lineal Mixta de Enteros (*MINLP*) y multiobjetivo para optimizar la red de distribución de agua y energía de una región aislada considerando la incorporación de una planta *OC-OTEC*. En este caso, se utilizan variables binarias para determinar si se requiere una planta *OC-OTEC*. Además, la evaluación económica para estimar el beneficio total incluye las ventas de agua y energía y los costos totales. Por otro lado, la evaluación ambiental incluye una función normalizada para evaluar simultáneamente la minimización de las emisiones de CO<sub>2</sub> y la minimización del agua de los acuíferos. Además, se consideran los empleos indirectamente asociados creados por la instalación de las nuevas tecnologías en la formulación. Asimismo, el objetivo de la optimización es equilibrar dos objetivos conflictivos: maximizar el beneficio anual mientras se minimiza el impacto ambiental. Esa solución debe satisfacer las necesidades de agua y energía tanto de los consumidores domésticos como de los agrícolas. La metodología utilizada en este estudio implica encontrar la solución óptima a través de una optimización multiobjetivo y presentar los compromisos entre los objetivos a través de un frente de Pareto. La región aislada de Tahití en la Polinesia Francesa sirve como estudio de caso para este análisis.

A partir del estudio, se puede concluir que la instalación de una planta *OC-OTEC* en Tahití podría traer varias ventajas, como la descentralización de la generación de energía, una menor dependencia de las importaciones y un impacto ambiental positivo. Al incorporar una planta *OC-OTEC* en la mezcla de energía, Tahití puede aprovechar el abundante potencial de energía renovable de su océano circundante, reduciendo su dependencia de costosos combustibles importados. El gradiente térmico oceánico en Tahití es estable durante todo el año, proporcionando una fuente constante de energía. Para esta región aislada, una planta *OC-OTEC* puede presentar una ventaja en términos del área requerida en comparación con otras energías renovables. Además, la tecnología *OC-OTEC* se puede instalar a menor escala para atender a áreas remotas, reduciendo la dependencia de fuentes de energía importadas y mejorando la seguridad energética. Es importante destacar el beneficio social, ya que la instalación de plantas *OC-OTEC* también crearía oportunidades de empleo y estimularía la actividad económica, al tiempo que tendría un menor impacto ambiental en comparación con la generación de energía a base de combustibles fósiles,

preservando la belleza natural y la biodiversidad de la isla. Por otro lado, los hallazgos de esta investigación son significativos para los tomadores de decisiones, ya que proporcionan información valiosa sobre los compromisos entre los objetivos en consideración. El frente de Pareto, un gráfico de soluciones óptimas destaca las opciones disponibles para los tomadores de decisiones en función de sus prioridades. La viabilidad económica, la sostenibilidad ambiental y el impacto social son factores críticos que deben considerarse al tomar decisiones. Por lo tanto, el frente de Pareto puede servir como un marco útil para la toma de decisiones, permitiendo a los tomadores de decisiones seleccionar la solución más apropiada según sus prioridades y los factores más importantes.

En general, los resultados sugieren que la tecnología *OC-OTEC* puede ser una solución efectiva para abordar los desafíos energéticos y de agua que enfrentan las regiones aisladas. Esta investigación ofrece conocimientos valiosos sobre el diseño óptimo de una red de distribución de agua y energía que integra la tecnología *OC-OTEC*, que puede servir como modelo para regiones similares que enfrentan desafíos comparables.

Los resultados obtenidos confirman la hipótesis planteada, demostrando que la implementación de sistemas *OC-OTEC* en la red de distribución de agua y energía de Tahití permite aprovechar eficientemente el gradiente de temperatura del océano para generar energía eléctrica y obtener agua desalinizada de manera sostenible y económicamente viable.

Además, la red propuesta y la instalación de una planta *OC-OTEC* pueden aplicarse potencialmente a otras ubicaciones que tienen frentes o accesos al océano pero que no son necesariamente islas. Ciudades costeras o regiones con acceso al océano y una necesidad de recursos hídricos y energéticos pueden beneficiarse de tal red. La implementación de una planta *OC-OTEC* puede proporcionar energía renovable y potencialmente reducir la dependencia de los combustibles fósiles. También puede contribuir a la desalación del agua u otros procesos de tratamiento del agua, según las capacidades específicas de la planta.

Factores como las condiciones ambientales, los marcos regulatorios, los requisitos de infraestructura y las demandas locales de energía y agua deberán evaluarse caso por caso. Sin embargo, es importante destacar que cada ubicación puede tener sus propias características y consideraciones únicas al implementar una red de este tipo.

Además, es crucial llevar a cabo estudios de viabilidad económica, evaluaciones de impacto ambiental y evaluaciones técnicas para determinar la practicidad y adecuación de establecer una red basada en *OC-OTEC* en una ubicación particular. Este enfoque se ejemplifica en nuestro estudio de caso, donde la implementación de una planta *OC-OTEC* resultó en una notable reducción de 162.7GWh en la producción de energía a partir de combustibles fósiles. Además, las emisiones se redujeron en hasta 777 ktonCO<sub>2</sub>eq, al tiempo que se generaron ingresos sustanciales por valor de 302.8 MM\$ y se crearon 192 oportunidades de empleo. Estos resultados subrayan la importancia de llevar a cabo evaluaciones integrales para evaluar la viabilidad y ventajas de implementar la tecnología *OC-OTEC*.

Considerando las siguientes etapas, se han identificado varias áreas para futuros estudios en este campo. Es necesario explorar avances tecnológicos en *OC-OTEC*, centrándose en aspectos como la eficiencia, la escalabilidad y la rentabilidad. Esto maximizará el potencial de las plantas *OC-OTEC* en diferentes contextos y mejorará su rendimiento. Además, también se deben realizar evaluaciones integrales de sostenibilidad. Al considerar una gama más amplia de indicadores ambientales, sociales y económicos, los investigadores pueden obtener una comprensión más holística de los beneficios y desafíos asociados con las instalaciones de plantas *OC-OTEC*. Esto proporcionará una base sólida para la toma de decisiones informadas.

Además, la integración de plantas *OC-OTEC* con otras fuentes de energía renovable, como la solar, eólica y de energía de las olas, ofrece un área intrigante para futuras exploraciones. Al combinar múltiples tecnologías de generación de energía, los investigadores pueden optimizar el rendimiento y la resistencia de las redes integradas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbas, S. M., Alhassany, H. D. S., Vera, D., & Jurado, F. (2022). Review of enhancement for ocean thermal energy conversion system. *Journal of Ocean Engineering and Science*, S2468013322000572.  
<https://doi.org/10.1016/j.joes.2022.03.008>
- Ahaotu, J. O., Nkoi, B., & Lebele, B. T. (2018). Thermodynamic Design and Economic Analysis of Ocean Thermal Energy Conversion for Coastal Nigeria. *American Journal of Engineering Research*, 10.
- Barbier, E. B. (2021). The Evolution of Economic Views on Natural Resource Scarcity. *Review of Environmental Economics and Policy*, 15(1), 24–44. <https://doi.org/10.1086/712926>
- Bin Nadeem, T., A. Naqvi, A., & Ahmed, A. (2022). Suitable Site Selection for Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) systems – A case study for Pakistan. *TECCIENCIA*, 33(17), 35–48.  
<https://doi.org/10.18180/tecciencia.2022.33.4>
- Brecha, R. J., Schoenenberger, K., Ashtine, M., & Koon Koon, R. (2021). Ocean Thermal Energy Conversion—Flexible Enabling Technology for Variable Renewable Energy Integration in the Caribbean. *Energies*, 14(8), 2192. <https://doi.org/10.3390/en14082192>
- Brooke, A., Kendrick, D., Meeruas, A., & Raman, R. (2006). *GAMS-Language guide* [Computer software]. GAMS Development Corp.
- Costa, M., Prasad, R., Ali, M., Khan, M. G. M., De Ramon N'Yeurt, A., & Ahmed, M. R. (2022). Variation of Power Output From an OTEC Power Plant Based on Longterm Sea Surface Temperature Data Analysis. *Volume 6: Energy*, V006T08A031. <https://doi.org/10.1115/IMECE2022-97126>
- Garduño-Ruiz, E. P., García-Huante, A., Rodríguez-Cueto, Y., Barcenas-Graniél, J. F., Alatorre-Mendieta, M. A., Cerezo-Acevedo, E., Tobal-Cupul, J. G., Romero-Medina, V. M., & Silva-Casarin, R. (2017). *Conversión de Energía Térmica Oceánica (OTEC)*. CEMIE-Océano.  
[https://cemieoceano.mx/downloads/libros/CEMIEOceano\\_Gradiente\\_Termico.pdf](https://cemieoceano.mx/downloads/libros/CEMIEOceano_Gradiente_Termico.pdf)
- Garduño-Ruiz, E. P., Silva, R., Rodríguez-Cueto, Y., García-Huante, A., Olmedo-González, J., Martínez, M. L., Wojtarowski, A., Martell-Dubois, R., & Cerdeira-Estrada, S. (2021). Criteria for Optimal Site Selection for Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) Plants in Mexico. *Energies*, 14(8), 2121.  
<https://doi.org/10.3390/en14082121>

- Geng, D., & Gao, X. (2023). Thermodynamic and exergoeconomic optimization of a novel cooling, desalination and power multigeneration system based on ocean thermal energy. *Renewable Energy*, 202, 17–39.  
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.11.088>
- Hernández-Romero, I. M., Nápoles-Rivera, F., Flores-Tlacuahuac, A., & Fuentes-Cortés, L. F. (2020). Optimal design of the ocean thermal energy conversion systems involving weather and energy demand variations. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 157, 108114.  
<https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.108114>
- Hernández-Romero, I. M., Zavala, V. M., Flores-Tlacuahuac, A., Nápoles-Rivera, F., Fuentes-Cortés, L. F., & Esquivel-Patiño, G. G. (2022). Multi-objective optimization of an open-cycle, ocean thermal energy conversion system with desalination. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 179, 109091. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2022.109091>
- Herrera, J., Sierra, S., Hernández-Hamón, H., Ardila, N., Franco-Herrera, A., & Ibeas, A. (2022). Economic Viability Analysis for an OTEC Power Plant at San Andrés Island. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(6), 713. <https://doi.org/10.3390/jmse10060713>
- Herrera, J., Sierra, S., & Ibeas, A. (2021). Ocean Thermal Energy Conversion and Other Uses of Deep Sea Water: A Review. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(4), 356. <https://doi.org/10.3390/jmse9040356>
- Huang, J., & Koroteev, D. D. (2021). Artificial intelligence for planning of energy and waste management. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47, 101426. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101426>
- Keyser, D., Flores-Espino, F., Uriarte, C., & Cox, S. (2016). *User Guide for the International Jobs and Economic Development Impacts Model* (NREL/TP--6A20-67036, 1326732; p. NREL/TP--6A20-67036, 1326732).  
<https://doi.org/10.2172/1326732>
- Kim, A. S. (2022). Special Issue “Selected Papers from the 8th International OTEC Symposium.” *Energies*, 15(3), 954. <https://doi.org/10.3390/en15030954>
- Kim, A. S., Kim, H.-J., Lee, H.-S., & Cha, S. (2016). Dual-use open cycle ocean thermal energy conversion (OC-OTEC) using multiple condenser for adjustable power generation and seawater desalination. *Renewable Energy*, 85, 344–358.

- Kim, H.-J., Lee, H.-S., Lim, S.-T., & Petterson, M. (2021). The Suitability of the Pacific Islands for Harnessing Ocean Thermal Energy and the Feasibility of OTEC Plants for Onshore or Offshore Processing. *Geosciences*, *11*(10), 407. <https://doi.org/10.3390/geosciences11100407>
- Li, D., Yue, J., Zhang, L., & Duan, X. (2018). Numerical study on ocean thermal energy conversion system. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, *10*(4), 044501. <https://doi.org/10.1063/1.5034034>
- Lin, Y.-S., Chien, C.-F., & Chou, D. (2022). UNISON decision framework for hybrid optimization of wastewater treatment and recycle for Industry 3.5 and cleaner semiconductor manufacturing. *Resources, Conservation and Recycling*, *182*, 106282. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106282>
- LINDO and LINDOGlobal. (n.d.). Retrieved March 29, 2023, from [https://www.gams.com/latest/docs/S\\_LINDO.html](https://www.gams.com/latest/docs/S_LINDO.html)
- Liponi, A., Baccioli, A., Vera, D., & Ferrari, L. (2022). Seawater desalination through reverse osmosis driven by ocean thermal energy conversion plant: Thermodynamic and economic feasibility. *Applied Thermal Engineering*, *213*, 118694. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118694>
- Liu, Z., Xu, C., Xu, T., Jia, H., Zhang, X., Chen, Z., & Yin, D. (2021). Integrating socioecological indexes in multiobjective intelligent optimization of green-grey coupled infrastructures. *Resources, Conservation and Recycling*, *174*, 105801. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105801>
- Lopez, G., Ortega Del Rosario, M. de los A., James, A., & Alvarez, H. (2022). Site Selection for Ocean Thermal Energy Conversion Plants (OTEC): A Case Study in Panama. *Energies*, *15*(9), 3077. <https://doi.org/10.3390/en15093077>
- Ma, Q., Zheng, Y., Lu, H., Li, J., Wang, S., Wang, C., Wu, Z., Shen, Y., & Liu, X. (2022). A Novel Ocean Thermal Energy Driven System for Sustainable Power and Fresh Water Supply. *Membranes*, *12*(2), 160. <https://doi.org/10.3390/membranes12020160>
- Martínez-Alvarez, V., González-Ortega, M. J., Martín-Gorriz, B., Soto-García, M., & Maestre-Valero, J. F. (2017). The use of desalinated seawater for crop irrigation in the Segura River Basin (south-eastern Spain). *Desalination*, *422*, 153–164. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.08.022>
- Panagopoulos, A. (2021). Water-energy nexus: Desalination technologies and renewable energy sources. *Environmental Science and Pollution Research*, *28*(17), 21009–21022. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13332-8>

- Paredes, M., Padilla-Rivera, A., & Güereca, L. (2019). Life Cycle Assessment of Ocean Energy Technologies: A Systematic Review. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(9), 322.  
<https://doi.org/10.3390/jmse7090322>
- Pattnaik, B., Mani, A., Dudhgaonkar, P. V., A, K., Rao, Y. V. N., & Jalihal, P. (2022). Performance analysis of an Open Cycle OTEC power module on laboratory scale. *OCEANS 2022 - Chennai*, 1–5.  
<https://doi.org/10.1109/OCEANSCennai45887.2022.9775451>
- Robinson, R., & Engelmann, G. (2023). Changing the Game—Enhanced OTEC System Design. *Day 3 Wed, May 03, 2023*, D031S031R004. <https://doi.org/10.4043/32453-MS>
- Sanjivvy, K., Marc, O., Davies, N., & Lucas, F. (2023). Energy performance assessment of Sea Water Air Conditioning (SWAC) as a solution toward net zero carbon emissions: A case study in French Polynesia. *Energy Reports*, 9, 437–446. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.11.201>
- Sarkodie, S. A., & Strezov, V. (2019). Economic, social and governance adaptation readiness for mitigation of climate change vulnerability: Evidence from 192 countries. *Science of The Total Environment*, 656, 150–164. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.349>
- Seungtaek, L., Hosaeng, L., Junghyun, M., & Hyeonju, K. (2020). Simulation Data of Regional Economic Analysis of OTEC for Applicable Area. *Processes*, 8(9), 1107. <https://doi.org/10.3390/pr8091107>
- Stephens, C. (2018). ECO-GEN Energy Solutions. In *Sustainable Cities and Communities Design Handbook* (pp. 413–420). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813964-6.00020-3>
- Tavakkoli, S., Lokare, O., Vidic, R., & Khanna, V. (2020). Shale gas produced water management using membrane distillation: An optimization-based approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 158, 104803.  
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104803>
- Weir, T. (2018). Renewable energy in the Pacific Islands: Its role and status. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94, 762–771. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.069>
- Yamada, N., Hoshi, A., & Ikegami, Y. (2009). Performance simulation of solar-boosted ocean thermal energy conversion plant. *Renewable Energy*, 34(7), 1752–1758.
- Yue, Q., Wu, H., Wang, Y., & Guo, P. (2021). Achieving sustainable development goals in agricultural energy-water-food nexus system: An integrated inexact multi-objective optimization approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 174, 105833. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105833>

Zereshkian, S., & Mansoury, D. (2021). A study on the feasibility of using solar radiation energy and ocean thermal energy conversion to supply electricity for offshore oil and gas fields in the Caspian Sea. *Renewable Energy*, *163*, 66–77. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.111>