

## VIABILIDAD DE UN SISTEMA OCEÁNICO-SOLAR PARA SUPLIR LA DEMANDA HÍDRICA DE LA INDUSTRIA TURÍSTICA EN COZUMEL

JESÚS FLORIDO ORTEGA,  
EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN  
Y ESTELA CEREZO ACEVEDO

### RESUMEN

En el presente trabajo, se realizó una evaluación técnico-económica de un sistema solar-oceánico capaz de abastecer la demanda de agua y su fracción caliente, requerida en el sector turístico de Cozumel. Los resultados muestran que el sistema es capaz de satisfacer la totalidad de la demanda durante diez meses del año; pero sólo una fracción durante el resto del año. Además, se encontró que el costo nivelado del agua es rentable en comparación con las tarifas locales, mientras que el costo nivelado del calor sólo resulta viable en comparación con el combustible fósil más caro.

### INTRODUCCIÓN

El sector turístico es fundamental para la economía global, representando aproximadamente 10% del Producto Interno Bruto mundial y generando una considerable cantidad de empleos<sup>[1]</sup>. Sin embargo, también causa impactos negativos, como huellas hídricas y de carbono, así como pérdida de biodiversidad en los destinos turísticos<sup>[2]</sup>. Para hacerlo más sostenible, es crucial abordar el uso de agua y energía. El consumo de agua turística *per cápita* es varias veces mayor que el consumo local, especialmente en países en desarrollo<sup>[3]</sup>. Además, el turismo demanda una gran cantidad de energía, principalmente de fuentes de combustibles fósiles, lo que contribuye significativamente a las emisiones de gases de efecto invernadero<sup>[4]</sup><sup>[5]</sup><sup>[6]</sup>.

Los destinos turísticos en islas y áreas costeras remotas enfrentan éstos y otros desafíos adicionales, debido tanto a su dependencia de recursos limitados como a la dificultad en el suministro de energía y agua<sup>[7]</sup>. Ante esto, se están explorando tecnologías que aprovechan las energías del océano, como la energía térmica oceánica, como posibles soluciones para estas áreas, ya que pueden proporcionar agua desalada y electricidad<sup>[8]</sup><sup>[9]</sup><sup>[10]</sup>.

La isla de Cozumel, en México, enfrenta problemas similares, dependiendo de una única fuente de agua subterránea y de una

dependencia energética con la energía generada en continente, así como de la obtenida con centrales de diésel instaladas en la isla<sup>[3]</sup><sup>[11]</sup>. Por estas razones, en este trabajo se realizó un estudio para implementar un sistema energético oceánico-solar integrado con una planta de energía oceánica por gradiente térmico, ósmosis inversa y calentadores solares para diversificar la matriz energética y abastecer tanto agua como energía al sector turístico de Cozumel.

### METODOLOGÍA

#### Demanda de agua y su fracción caliente del sector turístico de Cozumel

Para la caracterización de la demanda de agua en Cozumel, se utilizó la metodología de cálculo del documento “Requisitos mínimos y metodología de evaluación de sistemas de calentamiento solar de agua para hoteles”, publicado por la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE) de México. Este documento, fue elaborado específicamente para el sector turístico hotelero mexicano para incentivar la instalación de tecnología termo-solar, donde se encuentra incluida la isla de Cozumel. Para utilizar esta metodología, se descargaron los indicadores turísticos disponibles en la base de datos de la Secretaría de Turismo del Gobierno de México (DATATUR), del sector hotelero de Cozumel para el periodo de 2004 a 2009. Con esta información, se calculó tanto la demanda de agua mensual como la fracción de agua caliente correspondiente. Cabe señalar que, el valor de la temperatura del agua caliente requerida por el sector hotelero se fijó en 60°C, como es normalmente sugerido en la literatura<sup>[12]</sup><sup>[13]</sup>.

Con los resultados anteriores, se obtuvieron las curvas de demanda mensual de agua total y de su fracción caliente por cada categoría hotelera en Cozumel a partir del ajuste del uso del método de Montecarlo simple. Las curvas de demanda corresponden al percentil 95 de los valores proyectados.

#### SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL SITIO DE INSTALACIÓN

##### Selección del sitio de instalación

Para determinar el sitio de instalación, se identificó que, entre los criterios de selección de los componentes del sistema oceánico-solar (sistema termo-solar, OTEC y ósmosis), los criterios del sistema OTEC resultan ser los más restrictivos en la selección del punto de propuesta.

##### Caracterización del recurso renovable

Para obtener el recurso solar, se descargó el año típico meteorológico de la región de estudio, mientras que, para caracterizar

el recurso térmico oceánico, se descargó la batimetría de los alrededores de la isla, así como los datos de temperatura y salinidad tanto para la capa superficial como de zonas profundas del mar. Esta información se procesó y analizó para su posterior uso.

## **DIMENSIONAMIENTO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA A PARTIR DE LA DEMANDA DE AGUA TURÍSTICA**

### **Dimensionamiento y simulación del sistema OTEC**

Con la información de demanda de agua, se calcularon los caudales de agua marina superficial de bombeo del sistema OTEC, con la finalidad de obtener el dimensionamiento óptimo que resultara en la mayor cobertura de desalación en la mayoría de los meses del año bajo condiciones operativas estables.

Estos cálculos del ciclo termodinámico, las ecuaciones, los parámetros y las variables de diseño fueron programados en Python y se pueden consultar en el trabajo extenso de este artículo en el repositorio de Tesis UNAM titulado: Viabilidad de un sistema oceánico-solar para suplir la demanda hídrica de la industria turística en Cozumel.

### **Sistema termo-solar**

Para el dimensionamiento y simulación del sistema termo-solar, se utilizó el *software* libre System Advisor Model (SAM), versión 2022.11.21. De manera análoga al sistema anterior, los parámetros y consideraciones de diseño ingresados en el *software* se pueden consultar en el trabajo extenso.

### **Sistema de ósmosis inversa**

Se seleccionó un tamaño de planta<sup>[14]</sup> capaz de darle un tratamiento al agua desalada con el sistema OTEC sin que la demanda de energía eléctrica por este sistema sobrepasara a la generación eléctrica OTEC.

## **EVALUACIÓN FINANCIERA**

### **Indicadores inflacionarios y de tipo de cambio**

Para la evaluación financiera, se utilizaron indicadores inflacionarios y de tipo de cambio tanto de México como de Estados Unidos, así como indicadores propios de la industria asociada a los componentes principales de cada sistema. Estos indicadores fueron referenciados al mes de marzo de 2023 con la finalidad de actualizar el valor del dinero en el tiempo a una misma fecha.

### **Costo de capital**

Para determinar las tasas de descuento, se implementó el modelo Capital Asset Pricing Model (CAPM). Esto permitió calcular cuatro valores de tasas de descuento en términos reales por giro de negocio con o sin deuda, contemplando la estructura de deuda y de capital propio, características de cada giro de negocio.

## **ESTIMACIÓN DE COSTOS DEL SISTEMA OCEÁNICO SOLAR**

### **Sistema OTEC de ciclo abierto**

Para determinar los costos del sistema OTEC se consultaron y actualizaron los valores reportados por el Dr. Vega<sup>[15]</sup>, de acuerdo con lo sugerido en la literatura<sup>[16]</sup>, donde se calcularon los costos de cada componente y concepto en función de la capacidad nominal.

### **Sistema termo-solar**

Para determinar los costos del sistema termo-solar se cotizó, mediante consultoría, el costo total de la propuesta.

### **Sistema de ósmosis inversa**

Los costos del sistema de ósmosis inversa fueron obtenidos a partir de la literatura<sup>[14]</sup> y de ecuaciones de economía de escala para una planta con capacidad similar a la requerida por el sistema propuesto en el presente trabajo.

### **Cálculo del costo nivelado**

El cálculo del costo nivelado se efectuó para cada componente del sistema oceánico-solar; así como para la electricidad, el agua desalada y/o ambos productos en conjunto, donde las consideraciones generales fueron: a) Un periodo de evaluación acorde al tiempo de vida útil del componente menor del sistema, y b) un análisis tarifario de electricidad, agua y calor de proceso correspondientes al sector turístico de Cozumel o de la región local en general.

### **Evaluación financiera del proyecto**

Para evaluar la rentabilidad financiera del proyecto, se utilizaron los resultados de las simulaciones de cada componente del sistema océano-solar a lo largo de su vida útil; de igual manera, se usaron las tasas de descuento de los giros de negocio renovable (plantas termo-solares) y de venta de agua (componentes OTEC y ósmosis), con un plazo de deuda equivalente a la mitad del horizonte de evaluación y un incremento de la deuda por periodo constructivo. Todo esto acoplado al esquema de depreciación fiscal mexicano. Se consideró un esquema de cogeneración. Estas consideraciones se pueden consultar en el trabajo extenso.

## **RESULTADOS**

### **Perfiles de demanda de agua**

En la Figura 1, se muestran los percentiles 95 de demanda de agua en el sector turístico de Cozumel, donde es posible identificar que en los meses de septiembre y octubre ocurren los mayores consumos, en comparación con el resto del año. Por esta razón, se optó por modificar tanto el perfil de demanda de agua total como su fracción caliente para asegurar un

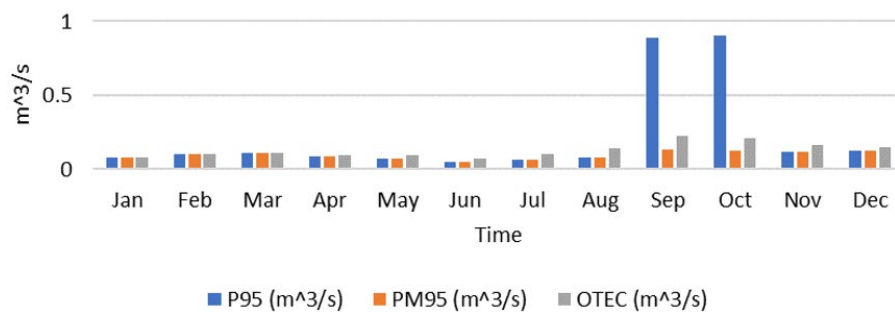


Figura 1. Perfiles de demanda de agua de uso municipal y de agua caliente, percentiles 95 y perfil modificado

margen operativo más estable, arriesgando la cobertura total únicamente en los meses de mayor afluencia turística.

## SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL SITIO

### Selección del sitio

Como se puede ver en la Figura 2, se muestran dos puntos indicados en color amarillo, los cuales, corresponden con las ubicaciones de la propuesta del sistema oceánico-solar. Aquel punto ubicado sobre el mar refiere a la ubicación de la planta OTEC de ciclo abierto, mientras que el segundo punto representa la ubicación del resto del componente. Cabe señalar que, en el presente trabajo no se contempló la gestión de distribución de los productos obtenidos, por lo que se recomienda realizar una nueva valuación que así lo contemple.

### Caracterización del recurso renovable

Al analizar los datos, se identificó que la insolación solar en Cozumel no sostiene gran variación durante el año en su recurso solar, sosteniendo valores de insolación promedio diaria global de entre 15 y 20 MJ/m<sup>2</sup> en el primer caso, y de entre 5 y 10 MJ/m<sup>2</sup> de la componente difusa.

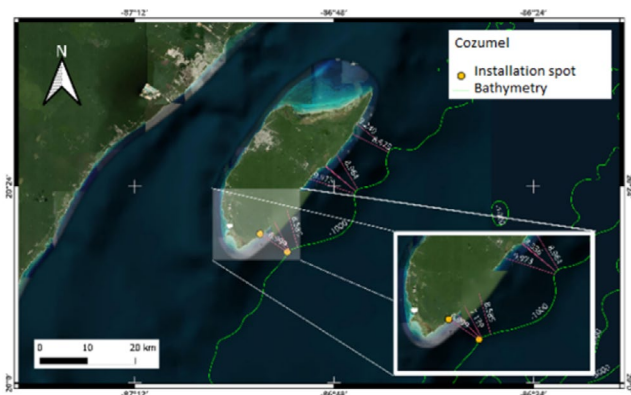


Figura 2. Batimetría y ubicación de los sitios de instalación

En cuanto al recurso térmico oceánico, durante todo el año, el gradiente de temperatura es superior a los 21 °C, llegando a sostener valores de hasta 24 °C. En cuanto a los valores de salinidad del mar, la superficie marina en esa zona sostiene valores muy estables alrededor de los 36 UPS, cuestión que se mantiene igual en zonas profundas donde la salinidad registra valores cercanos o iguales a los 35 UPS.

## DIMENSIONAMIENTO Y SIMULACIÓN

### Sistema OTEC

Para efectuar su dimensionamiento, se llevaron a cabo varias simulaciones, para determinar los parámetros de la configuración óptima. Al hacerlo, se obtuvo que el ciclo termodinámico OTEC de ciclo abierto, logra generar desde 5 hasta los 10.7 MW durante los meses de julio a diciembre, mientras que en el resto del año se tienen valores desde los 3.5 MW hasta casi los 5 MW.

En la Figura 1, se puede apreciar que la demanda de agua es totalmente cubierta (enero a marzo), incluso rebasada en gran parte del año, con excepción de los meses de septiembre y octubre, donde se logra una cobertura parcial.

### Sistema termo-solar

En la Figura 3 se muestra una comparación entre la demanda y cobertura de agua caliente por parte del sistema termo-solar completo, en dicha imagen, se puede apreciar un esquema equivalente a lo ocurrido con el sistema OTEC.

## EVALUACIÓN DE RENTABILIDAD FINANCIERA

### Estimación de costos

En la Tabla 1 se muestran los montos de inversión de cada uno de los componentes del sistema oceánico-solar. En dichos montos, se puede apreciar que las mayores erogaciones corresponden al sistema OTEC, con excepción de los costos de mantenimiento del sistema de ósmosis inversa.

Tabla 1. Costos de los componentes de sistema oceánico-solar

Sistema	Capacidad	Inversión (\$MUSD 2023)	O&M (\$MUSD 2023)	R&R (\$MUSD 2023)
OTEC	13 MW <sub>e</sub>	312.12	0.28	0.79
Ósmosis	700 m <sup>3</sup> /día	0.41	0.31	-
Solar	1.36 MW <sub>t</sub>	1.15	0.02	-

### Cálculo del costo nivelado

Al calcular los costos nivelados del sistema, se obtuvo que el sistema OTEC sostiene un costo nivelado de la electricidad bastante elevado 15 MXN/kWh (0.79 USD/kWh), comparada con la tarifa GDMTH-Peninsular nivelada de 2.47 MXN/kWh (0.13 USD/kWh); cuestión contraria con el costo nivelado de desalación de agua OTEC obtenido de 0.171 MXN/m<sup>3</sup> (0.009 USD/m<sup>3</sup>), el cual, es sumamente atractivo frente a las tarifas de agua local (6.13 MXN/m<sup>3</sup> [Cozumel]<sup>[3]</sup>, 40.73 MXN/m<sup>3</sup> [Cancún-comercial]<sup>[17]</sup>, 29.26 MXN/m<sup>3</sup> [Cancún]<sup>[17]</sup>). Por su parte, el sistema de ósmosis resulta atractivo frente a las tarifas de agua con un valor de 13 MXN/m<sup>3</sup> (0.7USD/m<sup>3</sup>), mientras que el sistema termo-solar sostiene un costo nivelado de calor alto 3.04 MXN/kWh (0.16 USD/kWh), únicamente competitivo comparado con el costo nivelado de calor del combustible más contaminante (Diésel-8.55 MXN/kWh<sup>[18]</sup>). Por su parte, el agua con tratamiento asciende a un valor de 13.43 MXN/m<sup>3</sup> (0.707USD/m<sup>3</sup>), valor que sigue siendo competitivo ante las tarifas locales.

### Evaluación financiera

Al efectuar la evaluación financiera, se obtuvieron valores muy similares a los reportados en la sección anterior; sin embargo, en el sistema OTEC se efectuó un análisis de costo nivelado contemplando un esquema de cogeneración, donde

se fijó el costo de la venta de electricidad al precio de la tarifa local (2.47 MXN/kWh). Al hacerlo, se obtuvo un costo nivelado de agua de 0.19 MXN/m<sup>3</sup> (0.01 USD/m<sup>3</sup>) bastante atractivo. En cuanto al resto de componentes se obtuvieron valores similares donde el sistema de ósmosis resultó en 14.44 MXN/m<sup>3</sup> (0.707 USD/m<sup>3</sup>) y el sistema termo-solar en 3.23 MXN/kWh (0.17 USD/kWh). Por su parte, el agua con tratamiento asciende a un valor de 14.63 MXN/m<sup>3</sup> (0.77USD/m<sup>3</sup>) valor que sigue siendo competitivo ante las tarifas locales.

### CONCLUSIONES

En el presente trabajo, se determinó que el sistema oceánico-solar sostiene la capacidad para satisfacer el total de la demanda de agua y su fracción caliente del sector turístico de Cozumel durante la mayor parte del año, con excepción de los dos meses con mayor afluencia turística.

La evaluación financiera del proyecto reveló que la venta de agua es la línea de negocio más rentable, con costos nivelados económicamente atractivos en comparación con las tarifas locales; mientras que, las menos redituables son la venta de agua caliente y la venta de electricidad. Ante esto, se sugiere una reevaluación financiera con un esquema de distribución de productos, donde los márgenes de venta de agua podrían mantener su viabilidad económica, a diferencia de la venta de agua caliente. |

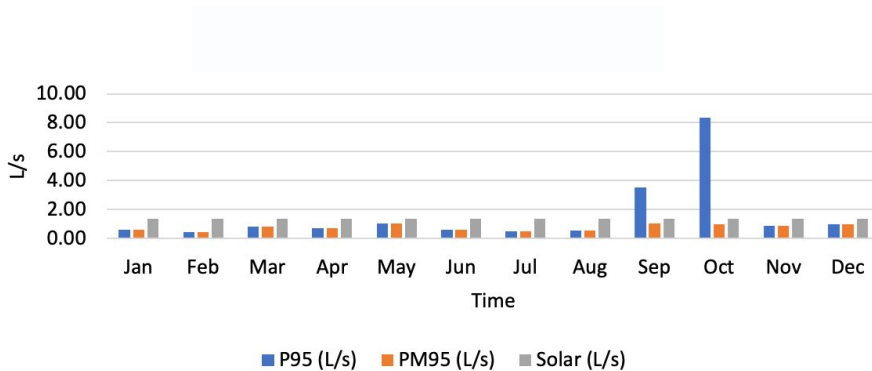


Figura 3. Demanda y cobertura de agua caliente por parte del sistema termo-solar



Referencias