



UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
Cuna de héroes, crisol de pensadores

**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



Facultad de Ingeniería Química

División de estudios de posgrado

Maestría en ciencias en Ingeniería Química

Diseño óptimo de sistemas de aire acondicionado usando agua de mar profunda

TESIS

Que para obtener el grado de Maestra en Ciencias en
Ingeniería Química presenta:

I.Q Ilse María Hernández Romero

Asesor:

Dr. Fabricio Nápoles Rivera



Morelia, Michoacán Agosto 2017

Agradecimientos

Quiero agradecer de una manera especial y sincera al Dr. Fabricio Nápoles Rivera por aceptarme para realizar esta tesis bajo su dirección. Su disponibilidad, su apoyo y confianza en mi trabajo y su capacidad para guiarme ha sido un aporte invaluable, no solamente en el desarrollo de esta tesis sino en cada trabajo realizado.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en especial al Posgrado de Ingeniería Química por su calidad y excelencia en su programa de Maestría.

A mis Sinodales: El Dr. José María Ponce Ortega, El Dr. Agustín Jaime Castro Montoya, a la Dra. Ma. del Carmen Chávez Parga y al Dr. Luis Fernando Lira; por sus comentarios acertados para complementar mi investigación, por cada pregunta hecha en los avances motivándome a seguir preparándome en mi tema.

A mis padres: Lázaro y Edith por su gran apoyo, por el afecto, por el apoyo incondicional y por el respaldo que me dan en cada decisión que tomo.

A mi tía Mary y a mi abuelita Hermina, por sus consejos y sus bendiciones.

A mis hermanas: Vera, Karina, Dahian y Paola por sus consejos motivacionales para concluir este proyecto, gracias por su apoyo en cada actividad que realizo.

A mis Sobrinos: Gadi y Verita y a mi cuñado Eli; por ser ahora participes de cada proyecto de mi vida y su apoyo.

A mis amigos: Ramón, Juan y Fabían, por el apoyo en esta etapa de mi vida, porque cada consejo que me dieron fue para tener presente que uno debe aprender a hacer las cosas por uno mismo. Gracias por cada momento que vivimos juntos en ese “cubículo”, gracias por su amistad invaluable.

A mis amigas Leydi, Yuli e Ivette por su amistad incondicional de tantos años, porque en cada etapa de mi vida siempre están para apoyarme.

A mi amiga la Lic. Alexa Cabrera por ser parte de esta etapa, gracias por revisar mis trabajos y corregirme el diseño de mis presentaciones, gracias por tu tiempo, apoyo y amistad en cada momento.

Finalmente agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su patrocinio para la realización de este proyecto de tesis.

Isse María Hernández Romero

ÍNDICE DE CONTENIDO

Índice de Figuras.....	I
Índice de Tablas	II
Resumen	III
Abstract	IV

Capítulo	Página
1. Introducción.....	1
2. Justificación de la investigación.....	11
3. Hipótesis.....	11
4. Objetivos.....	12
4.1 Objetivo General.....	12
4.2 Objetivos Específicos	12
5. Antecedentes	14
6. Marco Teórico	17
7. Metodología.....	21
8. Descripción del problema	23
8.1 Planteamiento del problema	24
9. Modelo de optimización.....	25
9.1 Balances de Masa.....	25
Balance de masa en la planta de tratamiento	25
Balance de masa en el punto de mezclado	25
Balance de masa en la salida de los hoteles	25
Balance de masa en la planta de neutralización de biosidas.....	26
9.2 Balance de energía.....	26
9.3 Programación de dosificación de biosidas y neutralización química	27
9.4 Capacidad máxima para intercambiadores de calor, bombas y tuberías.....	28
9.5 Cálculos de costos	30
Costo de intercambiadores de calor	30
Costo de biosida, neutralización química y mantenimiento mecánico	31
Costo de tuberías	31
Costo de bombas y bombeo	32

Costo de la electricidad	33
9.6 Función objetivo económica.....	34
9.7 Función objetivo ambiental	34
Emisiones de CO ₂ generadas por usar electricidad	34
Emisiones generadas por el uso de las bombas	34
10. Problema multi-objetivo.....	36
11. Caso de estudio	38
12. Discusión de resultados	43
13. Conclusiones	53
14. Referencias	55
15. Nomenclatura.....	59

Índice de Figuras

Figura	Descripción	Página
1	Producción de energía primaria nacional.	2
2	Representación de los sistemas OTEC.	3
3	Gráfico general de temperaturas respecto a la profundidad del agua de mar	4
4	Representación esquemática de sistemas SWAC.	8
5	Componentes y funcionamiento de un aire acondicionado	17
6	Figura 6. a) Ciclo de refrigeración por compresión de vapor. b) Diagrama Ts.	19
7	Superestructura propuesta para el sector hotelero	23
8	Visión general del caso de estudio. Creado en Google Earth	38
9	Distribución de temperatura a 950m de profundidad	39
10	Perfil de temperatura respecto a profundidad	39
11	Curva Pareto	43
12	Configuración óptima para el punto A	44
13	Configuración óptima para el punto C	45
14	Demanda de agua de mar total, biosida y químico de neutralización por día	46
15	Distribución de agua para cada hotel	47
16	Calor removido usando agua y energía por hotel	48
17	Perfil de uso de electricidad por hotel	48
18	Configuración óptima para el punto D	50
19	GHGE (Ton CO ₂ /año) para cada punto de la curva Pareto	51

Índice de Tablas

Tabla	Descripción	Página
1	Porcentaje del monitoreo de la ocupación en servicios turísticos de hospedaje Cancún, México.	40
2	Parámetros para la optimización.	41
3	Consumo de energía diario necesario para abastecer servicios de aire acondicionado en kWh.	42
4	Requerimientos de agua y energía en cada hotel para el caso C	46
5	Costo correspondiente a cada uno de los hoteles priorizando el aspecto ambiental	49
6	Costo correspondiente a cada uno de los hoteles priorizando costo	49

Resumen

Diseño óptimo de sistemas de aire acondicionado usando agua de mar profunda.

Ilse María Hernández Romero, Agosto 2017

Dirigida por: Dr. Fabricio Nápoles Rivera

Entidad: Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química

Uno de los principales desafíos en la actualidad es reducir las grandes cantidades de energía necesarias para satisfacer las necesidades diarias y mejorar la calidad del medio ambiente, debido a los altos costos de los servicios públicos y la contaminación ambiental asociada. Los hoteles se encuentran entre las instalaciones de turismo más intensivas de energía. Los hoteles operan una variedad de instalaciones 24 horas al día, 365 días al año y proporcionan una gran variedad de servicios a sus huéspedes, donde el principal contribuyente a este tema son los servicios de aire acondicionado, que representan aproximadamente el 42% de la energía total de cada hotel. Por tal motivo, es necesario estudiar y optimizar sistemas capaces de producir energía mediante el uso de fuentes alternas. Los sistemas de conversión de energía térmica oceánica (OTEC) son sistemas basados en el uso de agua de mar, los cuales aprovechan el gradiente de temperatura del agua de mar profunda fría respecto a la temperatura del agua de mar superficial cálida para la generación de electricidad y directamente como medio de enfriamiento; sistemas conocidos como SWAC (Seawater air conditionig). En este proyecto se propone la optimización de sistemas SWAC mediante el uso de agua de mar profunda como una utilidad de refrigeración para abordar esta cuestión en zonas hoteleras considerando aspectos técnicos, económicos y ambientales.

Palabras clave:

Sistemas de aire acondicionado basados en agua de mar, Multi-objetivo, Consumo de energía, Optimización, Distribución de agua de mar.

Abstract

Optimal design of air-conditioning systems using deep seawater

Ilse María Hernández Romero, August 2017

Advisor: Dr. Fabricio Nápoles Rivera

Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química

One of the main challenges nowadays is to reduce the large amounts of energy required to meet daily needs and improve the quality of the environment, because of the high utility costs as well as the associated environmental pollution. Hotels are among the most energy-intensive tourism facilities. The hotels operate a variety of facilities 24 hours a day, 365 days a year and provide a wide variety of services to its guests, where the main contributor to this issue are air conditioning services, which represent approximately 42% of the total energy of each hotel. For this reason, it is necessary to study and optimize systems capable of producing energy through the use of alternate sources. Ocean thermal energy conversion systems (OTEC) are systems that take advantage of the temperature gradient of cold deep sea water relative to the warm surface sea water temperature for the generation of electricity and directly as a cooling medium; systems known as SWAC (Seawater air conditioning). This project proposes the optimization of SWAC systems through the use of deep sea water as a refrigeration utility to address this issue in hotel sector considering technical, economic and environmental aspects.

Keywords

Seawater air conditioning, Multi-objective, Energy Consumption, Optimization, Seawater distribution

INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN.

El incremento en las demandas energéticas cada vez mayores, aunado a la amenaza del cambio climático presenta un panorama adecuado para desarrollar técnicas para energías renovables y eficiencia energética. Existen factores que apuntan a la inversión en energía sustentable: La constatación de la volatilidad en los precios del petróleo y la dependencia con otros países, y las cantidades enormes de emisiones de gases de efecto invernadero del consumo de energía provenientes de la transformación de ésta. El uso creciente de combustibles fósiles, asociado al incremento en la población y al aumento en los estándares de vida en general, trae consigo la producción de emisiones de gases de efecto invernadero. En México, los tres combustibles más utilizados son el petróleo, gas natural y carbón, que en conjunto proporcionan más del 87% del total de energía primaria. Sin embargo, los recientes aumentos en la producción nacional de energía eléctrica han llevado a cambios entre los usos de los combustibles fósiles (principalmente de carbón a gas natural), pero el predominio de estas tres fuentes de energía es probable que continúe en el futuro. En la **Figura 1** se muestra la categoría de producción de energía (contemplando las emisiones que son resultado de la producción, transformación, manejo y consumo de productos energéticos). En 2015, la producción nacional de energía primaria fue de 8,261.03 PJ un 6.7% menor respecto a 2014. La producción de petróleo, principal energético primario, disminuyó 9.4 % comparado con 2014. Existe una disminución mínima de los principales hidrocarburos para la generación de energía eléctrica. Pero el consumo de energía es cada vez mayor debiéndose a diversos factores entre los que destaca la población, a medida que ésta aumenta tiende a requerir más servicios energéticos, lo que ocasiona al aumento de uso de combustibles necesarios para satisfacerlos, otra es la estabilidad económica del país, al sufrir inestabilidades en la moneda, inflaciones, etc. hace que los

combustibles tiendan a variar en costo de adquisición , por lo que se opta por recurrir al combustible más barato para la generación de energía. Sin embargo, como se puede apreciar en la **Figura 1**, referido a la energía proveniente de fuentes renovables, se observa un avance importante debido al creciente y evidente deterioro ambiental. Por ende, se pretende contribuir mediante el análisis e implementación de estrategias que permitan la disminución del consumo de combustibles fósiles y emisiones de GEI.

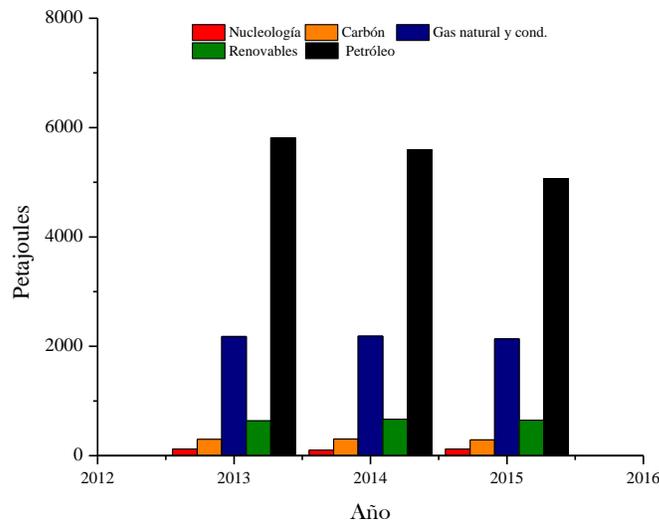


Figura 1. Producción de energía primaria nacional. SENER 2015

El océano cubre alrededor del 71% de la superficie terrestre y representa el recolector natural más grande de energía solar. Como resultado de su absorción por los océanos y por las corrientes oceánicas, se producen gradientes de temperatura. Cuando hay grandes masas a distintas temperaturas, los principios termodinámicos predicen que se puede crear un ciclo generador de energía que extrae energía de la masa con mayor temperatura y transferir una cantidad a la masa con temperatura menor. La diferencia entre estas energías se manifiesta

como energía mecánica (para mover una turbina, por ejemplo), que puede conectarse a un generador para producir electricidad o usarse como medio de enfriamiento. La técnica se conoce por las siglas en inglés OTEC, que corresponden a “conversión de la energía térmica del océano” cuya representación gráfica se muestra en la **Figura 2**.

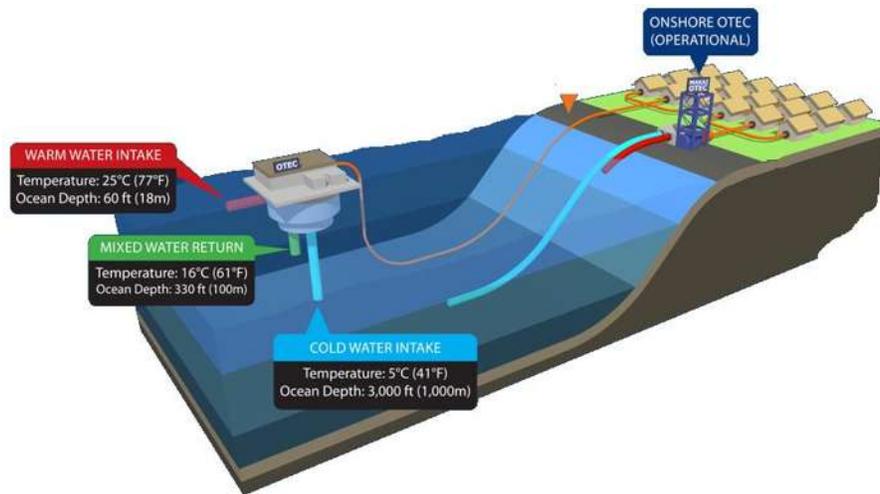


Figura 2. Representación de los sistemas OTEC

Estos sistemas pueden producir cantidades significativas de electricidad renovable a partir de la evaluación del gradiente de temperatura, las características medioambientales y socio-económicos, además se requieren intercambiadores de calor y otros aparatos en el océano para producir potencias del orden de megavatios.

La conversión térmica oceánica genera electricidad en plataformas situadas en el mar. En los mares tropicales las temperaturas varían desde 25°C en su superficie hasta los 5° C a 700m, como se puede apreciar en la **Figura 3**. Según el principio de Carnot, si se transfiere energía térmica de una masa caliente a otra fría se produce trabajo y mientras mayor sea la diferencia de temperaturas, mayor será la cantidad de energía producida.

En diferentes zonas del mundo el agua tiene distintas temperaturas dependiendo de la profundidad en que se encuentre, en especial en los trópicos, donde pueden distinguirse tres capas térmicas:

- La superficial: de 100 a 200 metros de espesor, que actúa como colector de calor, con temperaturas entre 25 y 30 grados.
- La intermedia: entre los 200 y 400 metros de profundidad, con una variación rápida de temperatura y que actúa como barrera térmica entre las capas superior y profunda.
- La profunda: en la que la temperatura disminuye suavemente hasta alcanzar 4 °C a 1000 metros y 2 °C a 5000 metros.

Esta diferencia de temperatura enorme hace posible la implementación de los OTEC. La temperatura del agua cambia rápidamente con la profundidad en la región media, que se conoce como la termoclina.

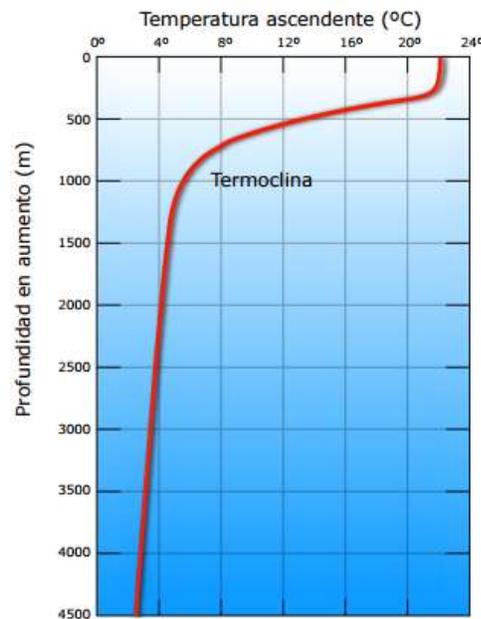


Figura 3. Gráfico general de temperaturas respecto a la profundidad del agua de mar

Usando el agua superficial para calentar un líquido con un punto de ebullición bajo, éste se transformaría en vapor que podría mover una turbina para generar electricidad. Luego, ese vapor se enfriaría en otro intercambiador de calor en contacto con el agua fría de las profundidades para luego reiniciar el ciclo de generación. Otra forma de aprovechar el gradiente de temperatura de la capa profunda respecto a la capa superficial es usándolo directamente como un sistema **SWAC (Seawater air conditionig) *medio de enfriamiento*** en unidades habitacionales o complejos turísticos.

En este sentido; la industria del turismo ha sido una de las industrias más rentables para las economías en desarrollo de cada país, sin embargo, está asociado a uno de los rubros con mayor consumo energético y con gran impacto negativo en el medio ambiente a través de las emisiones de gases de efecto invernadero [1]. Los hoteles se encuentran en las instalaciones de turismo más intensivas en energía [2], aunado al sistema de producción de energía eléctrica basado principalmente en carbón y combustibles fósiles no es un escenario ambientalmente sostenible, además de la superficie del hotel y el número de noches por habitación vendidas afectan el uso de la energía aumentando el porcentaje de energía requerido por cada uno influyendo directamente en los costos operativos del hotel [3]. En México, uno de los principales sectores con mayor consumo de energía es el sector hotelero, el cual cuenta con 20,038 hoteles con cerca de 736 mil cuartos [4], ofrecen diversos servicios como iluminación, lavandería, calefacción y aire acondicionado que influyen en el consumo de energía del edificio [5]. Varios estudios se han enfocado en analizar el consumo energético de los hoteles, así como la implementación de métodos para el control moderado de energía mediante la implementación de indicadores referidos a los rendimientos energético y medioambiental para diferentes grupos de hoteles, para evaluar el consumo de electricidad y así establecer listas de

acciones con prioridades asignadas derivadas de temas de energía, medio ambiente y economía [6,7]. Además, se evaluaron y clasificaron diversas tecnologías, así como las soluciones de ahorro en este sector a partir de factores energéticos clave [8]. Otro análisis en el sector hotelero se realizó mediante la recopilación de datos de consumo de energía para hoteles, edificios y oficinas, de modo que pudieron identificar y cuantificar la energía en forma de electricidad y calor, cuanto combustible se consume, y los valores máximos de consumo [9]. Surge entonces la necesidad del uso de la energía de manera controlada, y la compatibilidad con el medio ambiente, además de las alternativas sustentables que pueden ser consideradas, se tiene la necesidad de un mayor uso de recursos y tecnologías de energías renovables, así como en sistemas de calefacción, iluminación y enfriamiento pasivos, así como en las complejas necesidades energéticas en edificios hoteleros y otras instalaciones [10]. El análisis del consumo de energía permite explorar técnicas sustentables eficientes, así como el desempeño ambiental en los hoteles puede contribuir a proporcionarles una ventaja competitiva sostenible y económica [11,12]. Entonces, la distribución del consumo energético dependerá del tipo de hotel, el tamaño, situación geográfica, categoría y los servicios que ofrece. En climas tropicales, los servicios de aire acondicionado (AC) representan un porcentaje considerable de la demanda de energía de los hoteles hasta un 42% de la energía total de los hoteles [13], donde la energía por este servicio aunado a las bajas eficiencias que presentan los sistemas de aire acondicionado está asociada a grandes costos de operación de los hoteles [14]. Con esto, se vuelve necesario investigar y desarrollar estrategias de enfriamiento para reducir el consumo elevado de energía debido a la demanda de aire acondicionado, así como proponer sistemas capaces de reducir los costos de operación e impacto ambiental. En zonas con acceso y disponibilidad a un cuerpo de agua como el océano,

existe una manera de reducir la demanda de energía de AC y es aprovechada la temperatura del agua de mar profunda para medio de enfriamiento (SWAC) [15,16]. La utilización del agua de mar tiene méritos como fuente de enfriamiento, porque la temperatura del agua de mar es más baja que el aire exterior y es rentable porque no hay costo monetario del agua [17]. Estos sistemas tienen un enorme potencial para reducir la demanda de energía de un 75-90% [18]. Utilizar agua de mar fría como medio de enfriamiento en el aire acondicionado sería una alternativa atractiva desde el punto de vista económico y ambiental en comparación con los procesos de aire acondicionado convencionales. Un proceso de aire acondicionado estándar utiliza refrigerantes como la fuente primaria de "frío" mientras que el proceso SWAC elimina el uso de éstos y en su lugar utiliza agua de mar fría como el fluido termodinámico primario de enfriamiento [19].

Los sistemas de aire acondicionado con agua de mar (SWAC) tienen importantes beneficios: reducciones drásticas del consumo de electricidad reduciendo la contaminación atmosférica y la producción de gases de efecto invernadero, además de que en estos sistemas se sustituyen intercambiadores de calor por máquinas de enfriamiento que a menudo utilizan clorofluorocarbonos(CFC) perjudiciales para la capa de ozono, tecnologías probadas, tasa de retorno en cortos periodos, amigable con el medio ambiente, no sufre variaciones respecto a incrementos en energéticos [20]. Los sistemas SWAC trabajan bombeando agua de mar fría (4-7°C) que debe ser suministrada a los intercambiadores de calor para eliminar la energía térmica del agua dulce que circula y ocurre la transferencia de calor (**Figura 4**).

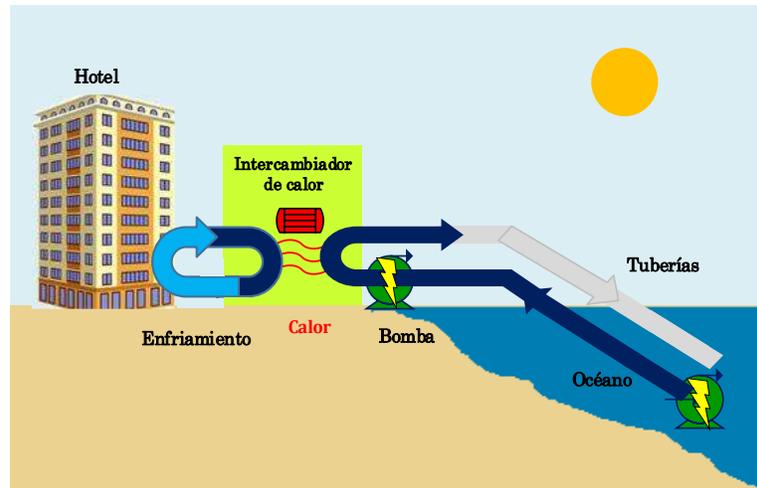


Figura 4. Representación esquemática de los sistemas SWAC

Estos sistemas han sido estudiados a través de los años, uno de los estudios más completos se presenta en [21]. En el 2004, el proyecto de agua profunda para enfriamiento en Toronto, Canadá, comenzó el enfriamiento del centro de Toronto con una capacidad máxima de 59.000 toneladas. En ese mismo año, Makai completó el diseño de un sistema SWAC de 450 toneladas en la isla Polinesia Francesa de Bora Bora para un gran hotel cuya construcción terminó en 2006, para un complejo de 80 unidades, donde ahorraron el 90% del consumo de electricidad del hotel para el aire acondicionado o 2,5 millones de litros de combustible cada año [21]. Otro proyecto de gran impacto se comenzó en el año 2006 con el diseño y panificación de sistemas SWAC en el Caribe para 2500 toneladas AC para un complejo hotelero, centros de reuniones y universidades. Mediante el uso de agua naturalmente fría, estos sistemas reducen considerablemente la demanda de aire acondicionado, además de no requerir torres de enfriamiento, estos sistemas nos permiten ahorrar de manera significativa el uso de agua dulce para tales fines. En 2008, en Honolulu, Hawái se inició el diseño de otro sistema SWAC muy grande para el servicio y abastecimiento de la energía del mismo donde

se ha estimado reduciría el uso de energía de AC en un 75% (75.5 millones de kilovatios-hora) (kWh/anales) y ahorrar aproximadamente 260 millones de galones de agua potable al año, además de reducir la contaminación térmica en las cercanías al 40%. En 2013 se realizó un estudio para evaluar la viabilidad de enfriamiento del agua de mar para cuantificar el ahorro de energía potencial sobre los sistemas AC convencional [22].

El uso de agua de mar como fluido refrigerante se ha convertido en una alternativa (ver, [23,24]), sin embargo uno de los retos asociados al uso del agua de mar es la formación de biopelículas y los problemas operativos que tren consigo tal como la pérdida de la eficiencia térmica, reducción de la transferencia de calor, deterioro prematuro de las instalaciones y el aumento de costos de operación y mantenimiento [25]. Por otro lado, es importante considerar el impacto de los químicos utilizados para reducir la formación de las bio películas. Varios autores han presentado diversos estudios para el control de bio incrustaciones. Las técnicas disponibles incluyen métodos físicos y adición de químicos Bott et al. [26], Bin-Mahfouz et al. [27] presentó un modelo para una dosificación óptima y programación de biosidas en una planta desalinizadora de energía, y Nápoles-Rivera et al. [28] presentó un modelo de programación matemática más eficiente usando la programación disyuntiva como parte de la formulación.

En este trabajo se retoma esta tecnología y se presenta un modelo de optimización multi-objetivo que nos permite optimizar los sistemas SWAC, obteniendo la red de distribución de agua de mar óptima requerida por cada hotel de acuerdo a su consumo para AC, además nos permita reconciliar varios aspectos simultáneamente el económico y el ambiental además de involucrar los retos técnicos asociados al uso de agua de mar.

JUSTIFICACIÓN, HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

2. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.

En la actualidad existe un problema energético y ambiental preocupante debido al incremento en el consumo de combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas a ellos. Uno de los principales contribuyentes en este tema es la generación de energía a partir de hidrocarburos o combustibles fósiles, en este trabajo se pretende optimizar los sistemas de aire acondicionado basados en agua de mar (SWAC) como medio de enfriamiento.

3. HIPÓTESIS.

Mediante la implementación de sistemas optimizados de aire acondicionado basados en agua de mar (SWAC) es posible aprovechar el gradiente de temperatura de las capas profunda y superficial del océano como medio de enfriamiento en sistemas habitacionales o complejos turísticos, con lo cual se tendrán beneficios económicos y ambientales al utilizar una fuente de energía renovable.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo General.

Desarrollar un modelo para optimizar los sistemas de aire acondicionado basados en agua de mar (SWAC) para el máximo aprovechamiento como medio de enfriamiento.

4.2 Objetivos Específicos

- Desarrollar una superestructura representativa de los sistemas SWAC.
- Diseño de un modelo matemático basado en la superestructura propuesta
- Determinar la factibilidad técnica, económica y ambiental como medio de enfriamiento en zonas hoteleras.
- Solución de caso de estudio práctico.

ANTECEDENTES Y MARCO TÉORICO

5. ANTECEDENTES

Hoy en día, múltiples e interesantes nuevos desarrollos de los sistemas SWAC se han ido potenciando a lo largo de los años en todo el mundo, al tener proyección a futuro se han ido implementando en diversos lugares, específicamente en lugares con disponibilidad de agua oceánica. El océano frío y el agua de mar son un recurso renovable natural que puede usarse para múltiples servicios, como la producción de energía, refrigeración, desalinización y agricultura. El uso más viable económicamente del agua profunda es acondicionar los edificios a través de un sistema de aire acondicionado de agua de mar (SWAC).

En los años 80's, el Laboratorio de Energía Natural de la Autoridad de Hawái (NELHA) desarrolló el sistema de aire acondicionado de agua de mar mientras realizaban investigación y desarrollo para la Conversión de Energía Térmica Oceánica (OTEC). Utilizando las mismas tuberías submarinas para extraer agua fría de las profundidades del océano, NELHA concluyó que podían desarrollar aire acondicionado libre de refrigerantes, además de un ahorro considerable en comparación con los sistemas convencionales [29]. Estos sistemas son potencialmente atractivos, diversas plantas han sido instaladas y evaluadas en diferentes lugares del mundo, por ejemplo:

- **Nueva York, Estados Unidos.** En el 2011 la Universidad de Cornell desarrolló este tipo de sistema de refrigeración usando el lago Cayuga para su campus. El costo del desarrollo fue de \$ 60 millones con una recuperación financiera de aproximadamente 15 años, enfriando una carga de 14500 toneladas.
- **Hamina, Finlandia.** En 2011, Google abrió un centro de datos en Finlandia que utiliza agua de mar del océano para enfriar la instalación.

- **Estocolmo, Suiza.** Estocolmo Energy construyó un sistema SWAC de 80.000 toneladas en 1995, y fue el sistema de refrigeración de agua de mar más grande del mundo en ese momento.
- **Ámsterdam, Países Bajos.** En el 2006, se completó un sistema de refrigeración para enfriar el distrito de Zuidas en Ámsterdam. Con una capacidad para enfriar una carga de 17.000 toneladas.

En 2009, se construyó un segundo sistema en el distrito de Zuidoost, para una carga de 18.000 toneladas. Ambos sistemas son operados y se trata de uno de los mayores proveedores de calor y electricidad de Europa.
- **Hong Kong, China.** Actualmente el hotel Excélsior y la torre de oficinas HSBC operan bajo el principio del sistema SWAC.
- **Halifax, Canadá.** El primer sistema SWAC del mundo ha estado operativo desde 1986 en Purdy's Wharf y enfría un complejo de oficinas de 700,000 ft², además un sistema adicional entró en funcionamiento en 2010, enfriando un edificio de oficinas de 330,000 ft². Los informes muestran que los dos sistemas ahorran \$ 400.000 anuales en comparación con los sistemas de aire acondicionado tradicionales.
- **Nassau, Bahamas.** Ocean Thermal Energy Corporation (OTE) diseñó y desarrolló el proyecto para un gran sistema SWAC para el complejo de Baha Mar en las Bahamas. para suministrar enfriamiento de agua de mar a cinco hoteles y un casino de 100,000 ft². OTE ya ha instalado toda la tubería SWAC en el lado de la tierra del complejo.

Estudios se han enfocado en estudiar a detalle estos sistemas, tratando de mejorar las eficiencias comparados con otros sistemas, tal es el caso de Surroop et al. [30] Compararon tres sistemas de aire acondicionado: de agua de mar, de agua de mar con enfriador y

convencional, donde los compararon de acuerdo al consumo energético para cierta carga de enfriamiento, ellos concluyeron que los sistemas de agua de mar son consumen menos energía respecto a los otros dos, y mientras que en el aspecto ambiental esta opción sigue siendo rentable. Por el contrario el sistema de agua de mar es más caro que los otros dos sistemas. Elsafty et al. [31] analizaron y clasificaron los componentes principales del sistema (SWAC) donde determinaron el desempeño operacional y costos probables. El análisis económico se basó en dos métodos: Métodos de pago simples y el valor actual neto (VAN). Zhen et al. [32] analizan estos sistemas de manera económica, energética y ambiental. Para el análisis económico se llevaron a cabo diferentes sistemas el costo anual (AC) y valor presente neto (VPN).

Teniendo en cuenta los beneficios evidentes de la SWAC, es necesario investigar y desarrollar técnicas para el máximo aprovechamiento de estos sistemas y aunque los SWAC no "crean energía", garantizan un ahorro significativo de energía y otros beneficios en comparación con los sistemas convencionales de aire acondicionado. Se espera que el aumento del costo y la competencia por los combustibles fósiles dirijan a otras alternativas ecológicas de energía renovable. Si bien, los trabajos antes mencionados abordan diversas contribuciones acerca de los sistemas SWAC, algunos se enfocan en el desarrollo teórico, mientras que otros tratan de implementar técnicas para aumentar la eficiencia térmica, sin embargo en este trabajo se propone optimizar los sistemas de conversión de energía térmica oceánica ya establecidos con la finalidad de aprovechar estos sistemas como medio de enfriamiento, así como determinar la factibilidad técnica, económica y ambiental de dichos sistemas.

6. MARCO TEORICO

Este tipo de sistemas se pueden aprovechar como ya se mencionó anteriormente como medio para generar energía (OTEC) o directamente como **medio de enfriamiento (SWAC)**. Los consumos energéticos a gran escala en diversos sectores del país como es el sector hotelero se deben principalmente a los múltiples servicios que ofrecen estos complejos a sus huéspedes, entre los cuales se encuentra el aire acondicionado. Sin embargo, ¿A qué se debe que el aire acondicionado requiere grandes cantidades de energía para operar? En la **Figura 5** se muestran los componentes del ciclo de refrigeración.

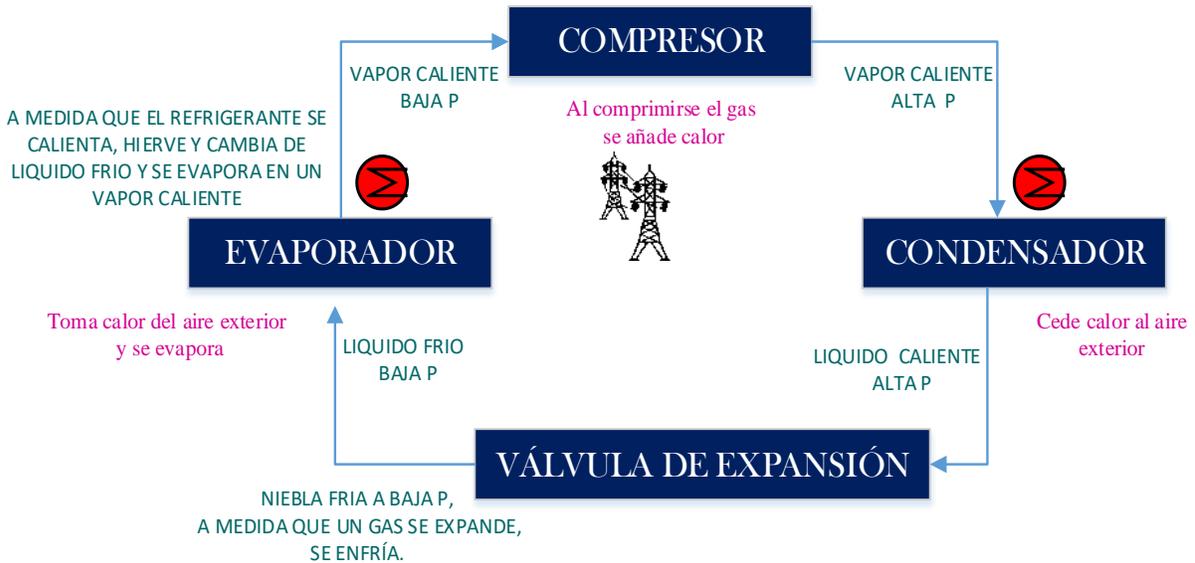


Figura 5 Componentes y funcionamiento de un aire acondicionado

Una de las principales áreas de aplicación de la termodinámica es la refrigeración, que es la transferencia de calor de una región de temperatura inferior hacia una temperatura superior. Los dispositivos que producen la refrigeración se llaman refrigeradores, y los ciclos en los que operan se denominan ciclos de refrigeración por compresión de vapor, donde el refrigerante se evapora y condensa alternadamente, para luego comprimirse en la fase de vapor.

En este sentido, el aire acondicionado funciona circulando un refrigerante cuya función es la de reducir o mantener la temperatura de un determinado ambiente por debajo de la temperatura del entorno. Para ello, se debe extraer calor del espacio que deseamos refrigerar y transferirlo a otro cuerpo cuya temperatura sea inferior que pasa por diversos estados o condiciones. El refrigerante comienza en un estado o condición inicial, pasa por una serie de procesos según una secuencia definida y vuelve a su condición inicial. El conjunto de esta serie de procesos se denomina "ciclo de refrigeración". El ciclo de refrigeración simple se compone de cuatro procesos fundamentales:

Expansión. Al principio, el refrigerante está en estado líquido en la unidad exterior a alta presión. Es necesario enviarlo a la unidad interior y, para conseguir el efecto de refrigeración, se manda a través de un elemento de expansión. Con ello se consiguen dos cosas: reducir la presión y la temperatura del líquido, dejándolo con las condiciones óptimas para la operación.

Evaporación. Este elemento es un intercambiador de calor que, por sus necesidades caloríficas, absorbe calor del medio en el que se encuentra, con lo cual lo enfría. En el evaporador (dentro de la unidad interior), el líquido se evapora, cediendo frío al aire del ambiente que se desea climatizar. Todo el refrigerante se evapora en el evaporador y como resultado se obtiene gas.

Compresión. Este gas vuelve a la unidad exterior para convertirse, de nuevo, en líquido. El primer paso es comprimir el gas. Esta operación se efectúa en el compresor obteniendo gas a alta presión.

Condensación. El vapor a alta presión circula a través del condensador. Se libera el calor al exterior y se obtiene el refrigerante en estado líquido. En la liberación de su calor, el vapor se

condensa completamente y entonces es enfriado. El líquido enfriado llega al regulador y está listo para un nuevo ciclo.

Ciclo de refrigeración desde la termodinámica

Evaporador: Se transfiere calor (absorbe) de la región fría al refrigerante (ver **Figura 6-a**), que experimenta un cambio de fase a temperatura constante. Para que la transferencia de calor sea efectiva, la temperatura de saturación del refrigerante debe ser menor que la temperatura de la región fría.

Condensador: El refrigerante se condensa al ceder calor a una corriente externa al ciclo (ver **Figura 6-a**). Para conseguir que se transfiera calor, la temperatura de saturación del refrigerante debe ser mayor que las temperaturas de las corrientes atmosféricas.

Compresor: Para alcanzar las condiciones requeridas en el condensador logrando la liberación del calor desde el sistema al ambiente, es necesario comprimir el refrigerante de manera de aumentar su presión y en consecuencia su temperatura (generalmente temperaturas de sobrecalentamiento).

Válvula de expansión: Liberado el calor en el condensador es necesario revertir el proceso del compresor de manera de obtener bajas temperaturas al disminuir la presión (estrangular), logrando las condiciones requeridas en el evaporador.

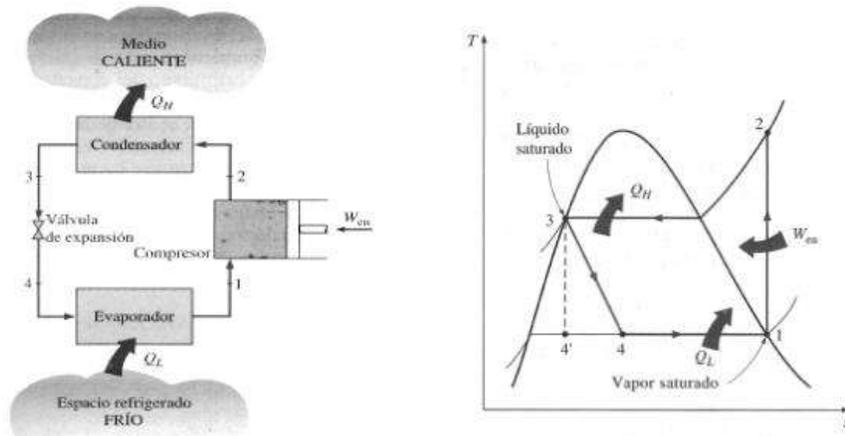


Figura 6. a) Ciclo de refrigeración por compresión de vapor. **b)** Diagrama Ts.

Fuente: Yunus Cengel “Termodinámica” 4 edición.

METODOLOGÍA

7. METODOLOGÍA

Durante el desarrollo del proyecto se pretenden llevar a cabo las siguientes etapas.

Etapa 1- Investigación bibliográfica y de información.

En esta etapa se realizó una investigación bibliográfica con el fin de obtener información que nos permitirá plantear un modelo matemático. Para esto, se necesitará hacer una investigación acerca de los sistemas SWAC con la finalidad de conocer el funcionamiento, operatividad, variables y factores implícitos.

Etapa 2- Creación de una superestructura y Desarrollo del modelo matemático.

Con los la información recabada con anterioridad, se tuvo que crear un superestructura, que es una representación gráfica del problema a abordar, en ésta se deberá incluir aspectos para la optimización de los sistemas SWAC.

Etapa 3.-Modelo matemático. Para el desarrollo del modelo matemático que represente los sistemas SWAC, se debieron considerar: balances de masa y energía, restricciones termodinámicas, ecuaciones empíricas; además de ecuaciones que permitan determinar los costos asociados al precio de la infraestructura de tuberías y bombeo así como para determinar las sustentabilidad del sistema. Las ecuaciones propuestas en el modelo matemático se programarán en el lenguaje de programación “GAMS” para optimizar.

Etapa 4-Análisis de resultados. Se realizó un amplio análisis de los resultados obtenidos de GAMS, para obtener las conclusiones pertinentes del trabajo de investigación.

MODELO MATEMÁTICO

8. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Una problemática que surge es el uso de grandes cantidades de energía para abastecer los servicios de aire acondicionado en los hoteles, los cuales representa más del 40% de la energía total de un hotel. Dicho consumo debe ser abatido por la red eléctrica la cual para su generación y transformación, implica procesos con grandes cantidades de emisiones de gases de efecto invernadero. Entonces se pretende utilizar agua de mar como medio de enfriamiento, de tal manera que se tenga un beneficio ambiental y económico a largo plazo. La descripción del problema se plantea de acuerdo a la superestructura propuesta en la **Figura 7**. Utilizar agua de mar para abastecer los servicios de aire acondicionado en el sector hotelero.

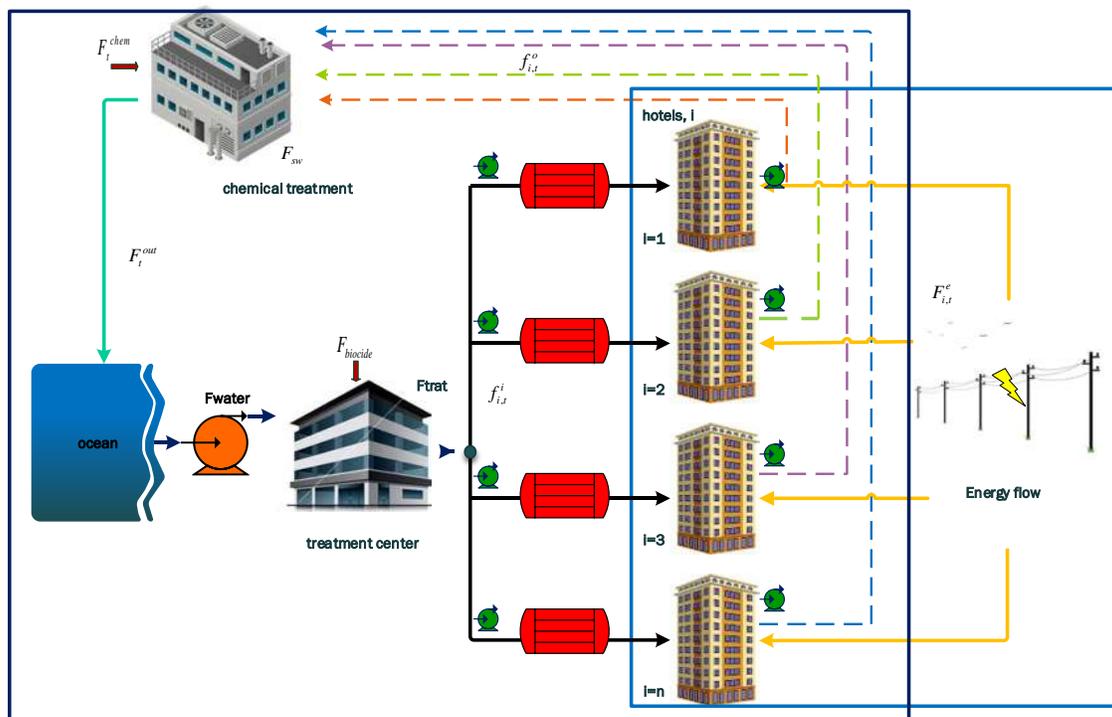


Figura 7. Superestructura propuesta para el sector hotelero

Además se pretende simultáneamente minimizar los costos asociados, y las emisiones de gases de efecto invernadero, con la implementación y optimización se pretende disminuir emisiones de gases de efecto invernadero ya que remplazamos el uso de refrigerantes por una fuente natural alterna capaz de enfriar a las temperaturas deseadas en éste sector.

8.1 Planteamiento del problema.

El consumo energético de los hoteles debe ser suministrado por la red eléctrica, la cual para su generación y transformación implica procesos con grandes cantidades de emisiones de gases de efecto invernadero. La descripción del problema se describe a continuación.

Dado lo siguiente:

- Consumo medio de energía por mes en cada hotel.
- Costo de energía eléctrica.
- Temperatura media del mar profundo y temperatura ambiente.
- Diferencia de temperatura mínima para la transferencia de calor entre los flujos de proceso.
- Costo de biosida y neutralización.

El problema consiste en encontrar la programación óptima de calor removido utilizando agua de mar profunda y los sistemas de AC convencionales para satisfacer las demandas de enfriamiento en los hoteles, también se requiere definir la programación óptima para la dosificación de biosida y químicos de neutralización que minimice el costo total de la red y las emisiones globales de gases de efecto invernadero GHGE del proceso.

9. MODELO DE OPTIMIZACIÓN.

El modelo matemático es basado en la superestructura que se muestra en la **Figura 7**. Este modelo consiste en balances de masa y energía, ecuaciones de diseño y restricciones de operación. Dos funciones objetivo son consideradas, se busca minimizar el costo total de la red y además de minimizar las GHGE.

9.1 Balances de Masa

Balance de masa en la planta de tratamiento

El agua del mar profunda se bombea a una planta de tratamiento donde se añade un biosida para evitar la formación de incrustaciones biológicas en los intercambiadores de calor. F_t^{water} es el agua tomada del océano y F_t^{trat} es el agua que sale de la planta de tratamiento. Se supone que el flujo de biosida es despreciable en comparación con el flujo de agua.

$$F_t^{water} = F_t^{trat} \quad \forall t \in T \quad (1)$$

Balance de masa en el punto de mezclado después de la planta de tratamiento

El agua tratada se distribuye a los diferentes hoteles, $f_{i,t}^i$ es el flujo enviado al hotel i en el tiempo t .

$$F_t^{trat} = \sum_i f_{i,t}^i \quad \forall t \in T \quad (2)$$

Balance de masa en la salida de hoteles

El agua que entra en el hotel i en el tiempo t $f_{i,t}^i$ es igual al flujo de agua $f_{i,t}^o$ que sale del hotel i en el mismo período de tiempo t . Se supone que no hay pérdidas en el sistema de distribución.

$$f_{i,t}^i = f_{i,t}^o \quad \forall t \in T \quad \forall i \in I \quad (3)$$

Balance de masa en la planta de neutralización de biosidas

El agua no puede ser devuelta al océano con la concentración de biosida requerida para tener un efecto biosida en el sistema, por lo que debe neutralizarse en una planta de tratamiento. El agua tratada F_t^{out} en el sistema de neutralización es la suma del agua que sale de los hoteles i en el tiempo t $f_{i,t}^o$, nuevamente se supone que no se producen pérdidas de agua en el sistema.

$$F_t^{out} = \sum_i f_{i,t}^o \quad \forall t \in T \quad (4)$$

9.2 Balances de energía

A partir del consumo de energía por hotel, es posible determinar la carga de calor que debe eliminarse del entorno conociendo el coeficiente de rendimiento (COP) de los sistemas de AC actualmente en funcionamiento. El COP se define como la relación entre el calor eliminado de la fuente caliente y el trabajo requerido por el sistema [33].

$$\text{COP} = \frac{Q}{W} \quad (5)$$

Si el coeficiente de rendimiento es constante, entonces la carga de calor requerida para ser retirada del aire en el hotel i en el tiempo t es $Q_{i,t}^H$, mientras que el trabajo requerido es el

consumo de electricidad en este uso ($c_{\text{consp}_{i,t}}$), este parámetro se puede obtener de datos históricos de cada hotel.

$$Q_{i,t}^H = \text{COP} \cdot c_{\text{consp}_{i,t}} \quad \forall t \in T, \forall i \in I \quad (6)$$

La carga de calor puede ser removida utilizando agua de mar profunda $Q_{i,t}^{\text{water}}$ o con sistemas de AC convencionales $Q_{i,t}^e$ entonces,

$$Q_{i,t}^H = Q_{i,t}^{\text{water}} + Q_{i,t}^e \quad \forall t \in T, \forall i \in I \quad (7)$$

Para determinar la cantidad de agua requerida para eliminar este calor $Q_{i,t}^{\text{water}}$ se utiliza el siguiente balance energético:

$$Q_{i,t}^{\text{water}} = f_{i,t}^i \rho C_p \Delta T \quad \forall t \in T, \forall i \in I \quad (8)$$

Dónde $f_{i,t}^i$ es el flujo de agua de mar profunda enviada a cada hotel i en un tiempo t , C_p y ρ son la capacidad calorífica y densidad del agua de mar y ΔT es la diferencia de temperatura.

Para el diseño de los intercambiadores de calor el área de intercambio A_i requerida en cada hotel se calcula considerando la máxima carga térmica en cualquier momento Q_i^{qwm} , la diferencia de temperatura media logarítmica ΔT_{ml} y el coeficiente de transferencia de calor global U , estos dos últimos parámetros son considerados constantes.

$$A_i = \frac{Q_i^{\text{qwm}}}{\Delta T_{\text{ml}} U} \quad \forall i \in I \quad (9)$$

9.3 Programación de dosificación de biosidas y neutralización química

Los sistemas de enfriamiento con agua de mar proporcionan un medio apropiado para el crecimiento de microorganismos que causan la formación de bio películas y, por lo tanto, cuestiones como la corrosión y la incrustación biológica que podrían acortar la vida útil del equipo y reducir su eficiencia térmica si no se gestionan adecuadamente. A continuación, para reducir la bio incrustación se requiere emplear un biosida, este flujo está en función del agua de mar requerida en la planta de tratamiento F_t^{water} , la concentración requerida debe tener un efecto biosida C^{bio} y la concentración comercial de biosida es C_t^{in} .

$$F_t^{bio} = \frac{C^{bio} F_t^{water}}{C_t^{in}} \quad \forall t \in T \quad (10)$$

Una vez que el agua de mar ha absorbido el calor en los intercambiadores de calor se envía a un sistema de neutralización donde la concentración de biosida se reduce al nivel establecido por la regulación ambiental, generalmente el biosida más común es hipoclorito de sodio que puede neutralizarse con SO_2 . El flujo de químico para la neutralización F_t^{chem} depende de la concentración de entrada del biosida y de la concentración del producto químico de neutralización, para los productos químicos seleccionados la relación es 1: 1 para asegurar la deoloración completa, así que la concentración del biosida puede ser utilizada.

$$F_t^{chem} = \frac{C^{in} F_t^{out}}{C_{bio}} \quad \forall t \in T \quad (11)$$

9.4 Capacidad máxima para intercambiadores de calor, bombas y segmentos de tuberías

Los intercambiadores de calor, bombas y cada segmento de tuberías deben ser diseñados con la capacidad máxima requerida para cada unidad de equipo por lo tanto las siguientes relaciones deben ser incluidos en la formulación.

La carga máxima de calor removida con agua de mar debe ser mayor que el calor máximo eliminado en cualquier momento.

$$Q_i^{qwm} \geq Q_{i,t}^{water} \quad \forall t \in T, \forall i \in I \quad (12)$$

La siguiente ecuación determina la existencia o no existencia del intercambiador de calor en una ubicación i , además establece un límite superior para el calor eliminado utilizando este servicio.

$$Q_i^{qwm} \leq Q^{Wmax} y_i^{he} \quad \forall t \in T, \forall i \in I \quad (13)$$

Si se utiliza agua de enfriamiento, a continuación, un segmento de tubería desde las profundidades del océano a la planta de tratamiento debe existir, y la capacidad máxima debe ser mayor o igual a la suma de velocidades de flujo de la planta de tratamiento a cada hotel en cualquier momento.

$$F^{trat} \geq \sum_i f_{i,t}^i \quad \forall t \in T \quad (14)$$

Como el intercambiador de calor, la existencia del segmento de tubería desde el océano a la planta de tratamiento se determina con una variable binaria, si la variable binaria es igual a uno, entonces existe el segmento de tubería y su flujo debe ser inferior a un límite máximo, de lo contrario debe ser igual a cero.

$$F^{trat} \leq F^{trat,max} \cdot y^{trat} \quad \forall t \in T \quad (15)$$

Además, el flujo máximo en cada segmento de la tubería desde la planta de tratamiento a cada hotel debe ser menor que el flujo en cualquier momento.

$$fwm_i \geq f_{i,t}^i \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (16)$$

Y la existencia de dicho segmento está asociada a la variable binaria y_i^{hotel} como sigue.

$$f_{i,t}^i \leq f^{\text{hotel,max}} \cdot y_i^{\text{hotel}} \quad \forall i \in I \quad (17)$$

Si existe una conexión entre la planta de tratamiento y un hotel entonces debe haber un sistema de tuberías desde el hotel i a la planta de neutralización y el caudal máximo debe ser el mismo. La existencia de este segmento de tubería se designa con la variable binaria con la siguiente relación.

$$y_i^{\text{hotel}} = y_i^{\text{out}} \quad \forall i \in I \quad (18)$$

Una vez que estos límites se han establecido y la existencia de cada equipo se ha determinado los costos se pueden calcular de la siguiente manera.

9.5 Cálculo de costos

Costo de intercambiadores de calor

El costo de cada intercambiador de calor depende de un costo fijo $\text{FCost}_i^{\text{unit}}$ que sólo se añade si existe el intercambiador de calor y un costo variable $\text{VCost}_i^{\text{unit}}$ que depende del área instalada. La existencia o no existencia se modela con la variable binaria y_i^{he} , si la variable binaria es igual a uno entonces existe el intercambiador de calor y se incluye el costo, de lo contrario el intercambiador de calor no existe y el costo no es considerado.

$$\text{Cost}_i^{\text{unit}} = \text{VCost}_i^{\text{unit}} (A_i)^{\delta} + \text{FCost}_i^{\text{unit}} y_i^{\text{he}} \quad \forall i \in I \quad (19)$$

El costo de los intercambiadores de calor es la suma de todas las unidades requeridas en el sistema, multiplicado por un factor de anualización K_F .

$$\text{heateCost} = K_F \sum_i \text{Cost}_i^{\text{unit}} \quad (20)$$

Costos de biosida, neutralización química y mantenimiento mecánico

Los costos totales de biosida y del químico para la neutralización se dan por las ecuaciones siguientes:

$$BiocideCost = \sum_t F_t^{bio} \xi \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (21)$$

$$chemicalCost = \sum_t F_t^{chem} \gamma \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (22)$$

Donde ξ y γ son los costos unitarios de estas utilidades.

Aunque usar biosidas puede ayudar en el control de la contaminación biológica, el mantenimiento mecánico se requiere al menos dos veces al año. El costo de mantenimiento se calcula como el producto del número de mantenimientos programados τ , β que es el costo unitario por mantenimiento, y y^{main} que es una variable binaria que representa la necesidad de llevar a cabo un mantenimiento.

$$MaintCost = \beta \tau y^{main} \quad \forall i \in I \quad (23)$$

El mantenimiento mecánico está directamente asociado a la existencia o no de intercambiadores de calor, si existe al menos un intercambiador de calor, entonces el mantenimiento debe programarse durante el año. Esto se modela con la siguiente ecuación

$$y_i^{he} \leq y^{main} \quad (24)$$

Costo de tuberías

Los costos de tuberías se determinan con la siguiente ecuación:

$$PipingCost = K_F \left[Pcf^{trat} + \sum_i Pcf_i + \sum_i Pcf_i^{out} \right] \quad (25)$$

Los factores de costo (Pcf) para cada segmento se determinan como sigue:

$$P_{cf} = k_m L D^m \quad (26)$$

Donde L es la longitud de la tubería, D^m es el diámetro de la tubería, k_m and m son parámetros de costo que dependen del material de la tubería [34].

Tubería desde la profundidad del océano hasta la planta de tratamiento

$$P_{cf}^{trat} = k_m L D^m \cdot y^{trat} \quad (27)$$

Tubería desde la planta de tratamiento hasta el hotel i

$$P_{cf_i} = k_m L_i D_i^m \cdot y_i^{hotel} \quad \forall i \in I \quad (28)$$

Tubería desde el hotel i hasta la planta de neutralización

$$P_{cf_i}^{out} = k_m L_i D_i^m \cdot y_i^{out} \quad \forall i \in I \quad (29)$$

El diámetro y las distancias se fijan antes del paso de optimización, entonces sólo la existencia o no existencia de los segmentos determina su costo.

Costo de bombas y de bombeo.

El costo de las bombas depende de un costo fijo CFB^{pump} que se multiplica por una variable binaria, aquí la variable binaria es la misma que la utilizada para la existencia de segmentos de tubería, por lo que sí existe un segmento de tubería se debe utilizar una bomba para transportar la fluido de un punto a otro. El costo variable de las bombas CVP^{pump} depende del flujo máximo en cada segmento de tubería, para cada bomba requerida las ecuaciones son las siguientes.

Bomba necesaria para la profundidad del océano a la planta de tratamiento

$$P_{cost1} = CVP^{pump} F_i^{trat} + CFB^{pump} y^{trat} \quad (30)$$

Bomba necesaria de la planta de tratamiento a cada hotel i

$$P_{cost2_i} = CVP_i^{pump} f_{wm_i} + CFB_i^{pump} y_i^{hotel} \quad (31)$$

Bomba necesaria para cada hotel i a la planta de neutralización

$$Pcost3_i = CVP_i^{pump} fwm_i + CFB_i^{pump} y_i^{out} \quad \forall i \in I \quad (32)$$

El costo total para las bombas es:

$$Pumpequip = Kf \cdot \left(\left(\sum_i Pcost2_i + \sum_i Pcost3_i \right) + Pcost1 \right) \quad (33)$$

El costo de bombeo se puede estimar con la ecuación (34):

$$Pumpingcost = H_Y \left[\sum_t F_t^{trat} PPC1_t + \sum_i \sum_t f_{i,t}^i PPC2_{i,t} + \sum_i \sum_t f_{i,t}^o PPC3_{i,t} \right] \quad (34)$$

Donde H_Y son las horas de operación de la planta en un año. Y los factores de bombeo se determinan con la ecuación de Darcy-Weisbach [34]:

$$PumpingCost = \frac{1}{0.0000576} f \frac{L}{D^5} \frac{(\text{no. de hrs})(\$/kWh)}{\eta} \quad (35)$$

f es el factor de fricción, L longitud de la tubería, D diámetro de la tubería, η es la eficiencia de las bombas.

Costo de la electricidad.

El costo de la electricidad ($Cost_{i,t}^e$) representa el costo pagado a la compañía de electricidad local. El costo unitario es (UCE). Y el calor removido utilizando sistemas de AC convencional es $Q_{i,t}^e$, por lo tanto, el consumo de energía puede estar relacionado con el calor removido y con el COP:

$$Elect_{i,t}^e = \frac{Q_{i,t}^e}{COP} \quad \forall t \in T, \forall i \in I \quad (36)$$

El costo de energía en cada hotel i en un tiempo t se puede calcular como sigue.

$$Cost_{i,t}^e = Elect_{i,t}^e \cdot UCE \quad \forall t \in T, \forall i \in I \quad (37)$$

Y el costo total por este concepto es:

$$Electricity\ Cost = \sum_i \sum_t Cost_{i,t}^e \quad (38)$$

9.6 Función objetivo económica

La función objetivo económica consiste en la minimización del costo total anual del proceso, incluyendo: tuberías, bombeo, intercambiadores de calor, bombas, mantenimientos, biosidas, productos químicos de neutralización y energía requerida.

$$\text{Min TAC} = \left[\begin{array}{l} \text{PipeCost} + \text{PumpingCost} + \text{HeateCost} + \text{ElectricityCost} + \text{MaintCost} \\ \text{BiocideCost} + \text{chemicalCost} \end{array} \right] \quad (39)$$

9.7 Función objetivo ambiental.

El impacto medioambiental se mide a través de las emisiones globales de CO₂ que pueden ser generadas por el consumo de energía en los sistemas convencionales de AC y la electricidad utilizada por las bombas de los sistemas SWAC.

Emisiones de CO₂ generadas por usar electricidad

Para calcular las emisiones producidas para el uso de electricidad procedente de la red local se utiliza un factor de 0.454 kg CO₂/kWh [35].

$$Emelec_{i,t} = Elect_{i,t}^e \cdot EFE \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (40)$$

Las emisiones totales son:

$$Emissionselect = \sum_i \sum_t Emelec_{i,t} \quad (41)$$

Emisiones generadas para el uso de bombas

En el proceso propuesto las únicas emisiones generadas son por el uso de bombas. Entonces se calcula la potencia de las bombas para cada tipo de bomba utilizada en la red. Las bombas se simulan en Aspen Plus®. Para producir la siguiente relación lineal en función entre la

potencia utilizada y el caudal tratado, para activar o desactivar la parte constante de la ecuación se utilizan las variables binarias asociadas a cada segmento de proceso.

Bomba desde el océano profundo hasta la planta de tratamiento

$$Power_t = \Omega_t \cdot F_t^{water} + \Psi_t \cdot y^{trat} \quad \forall t \in T \quad (42)$$

Bomba de la planta de tratamiento al hotel i

$$Power2_{i,t} = \Omega_{i,t} \cdot f_{i,t}^i + \Psi_{i,t} \cdot y_i^{hotel} \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (43)$$

Bomba del hotel i a la planta de neutralización

$$Power3_{i,t} = \Omega_{i,t} \cdot f_{i,t}^o + \Psi_{i,t} \cdot y_i^{out} \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (44)$$

Donde $\Omega_{i,t}$ y $\Psi_{i,t}$ son la pendiente y la intersección en la regresión lineal obtenida para cada bomba con los resultados de la simulación. Finalmente, la energía total consumida en las bombas es:

$$TotalPower = \sum_i \sum_t Power2_{i,t} + \sum_i \sum_t Power3_{i,t} + Power_t \quad (45)$$

$$EnergyPump = (TotalPower)(H_Y) \quad (46)$$

Entonces las emisiones totales se calculan utilizando el mismo factor de emisión que en la ecuación (40):

$$Emissionprocess = EnergyPump \cdot EFE \quad (47)$$

Y el objetivo ambiental es la minimización de las emisiones totales:

$$MinGHGE = Emissionprocess + Emissionselect \quad (48)$$

Aquí (*GHGE*) son las emisiones totales de gases de efecto invernadero, (*Emissionprocess*) corresponden a las emisiones contribuidas por parte del sistema de refrigeración de agua de mar y (*Emissionselect*) son las emisiones que corresponden al uso de electricidad.

10. PROBLEMA MULTI-OBJETIVO

La formulación propuesta es un problema de optimización multi-objetivo. Por un lado el costo total anual del proceso tiene que ser minimizado, pero al mismo tiempo el impacto ambiental debe ser también minimizado. Por lo general, las opciones con menor costo corresponden a altos niveles de emisiones y por el contrario, los procesos con más bajas emisiones tienen los costos más altos. Por lo tanto, el mínimo de los dos objetivos no puede ser alcanzado simultáneamente, por lo que se requiere evaluar los compromisos entre estos dos objetivos [36].

$$F = \text{MinTAC} + \text{MinGHGE} \quad (49)$$

$$\text{s.t } GHGE \leq \varepsilon_i \quad (50)$$

El método implementado en este trabajo es epsilon constraint, donde el problema de optimización individual se resuelve para varios valores de ε_i que varía entre los valores extremos de GHGE [37]. Los valores se obtienen minimizando el TAC sin considerar GHGE, en este punto se obtienen la máxima cantidad de GHGE, y por otro lado minimizamos GHGE y se obtiene el máximo TAC. De este procedimiento se obtiene una curva de Pareto, la cual nos muestra información sobre las compensaciones entre las funciones objetivo útil en la toma de decisiones.

RESULTADOS

11. CASO DE ESTUDIO.

Se seleccionó la zona hotelera de Cancún, México (**Figura 8**). De acuerdo la Comisión Federal de Electricidad (CFE), de la energía total que se consume en Cancún mes con mes, la mitad es en la zona hotelera, ya que los hoteles ubicados en la zona de playas abarcan 23 kilómetros y consumen cerca de 59 mil mega watts por mes [38]. En este trabajo se seleccionaron únicamente cuatro hoteles de categorías 5 y 4 estrellas para aplicar el modelo propuesto, partiendo del porcentaje de ocupación mensual que se muestra en la **Tabla 1** obtenido de DATATUR para este sector [4].

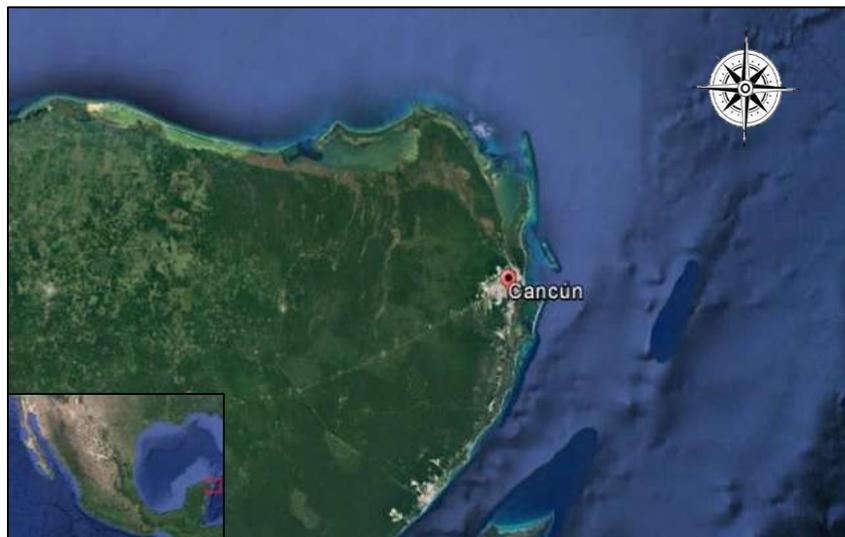


Figura 8. Visión general del caso de estudio. Creado en Google Earth

Según los datos de los Centros Nacionales de Información Ambiental (World Ocean Atlas 2013 [39]), la distribución anual de la temperatura a una profundidad de 950 m oscila entre 5°C y 5.55°C (**Figura 9**), además se puede observar la distribución de temperatura respecto a la profundidad de la zona seleccionada que presenta las siguientes coordenadas: Latitud ($21^{\circ}09'38\text{N}$) y Longitud ($86^{\circ}50'51''\text{O}$), (ver **Figura 10**).

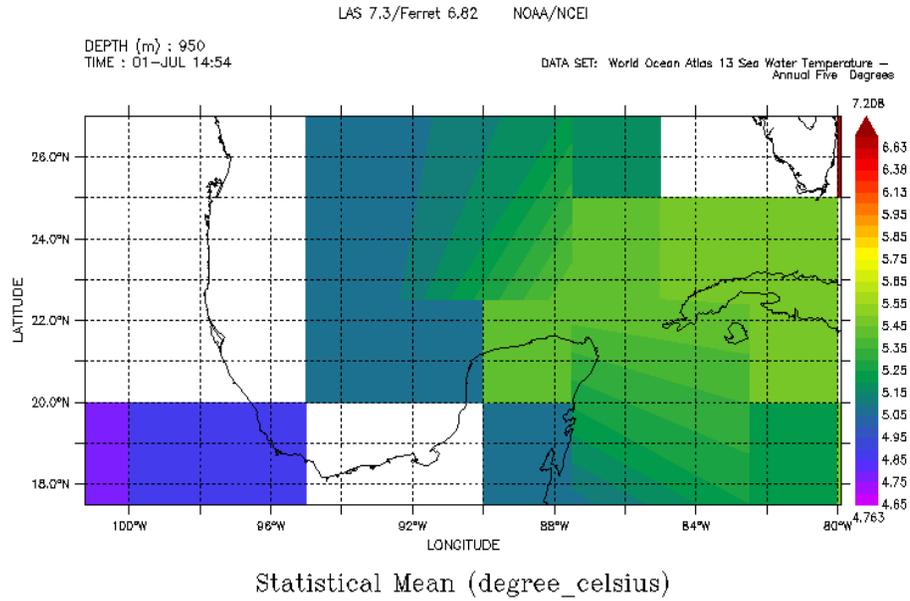


Figura 9. Distribución de temperatura a 950m de profundidad

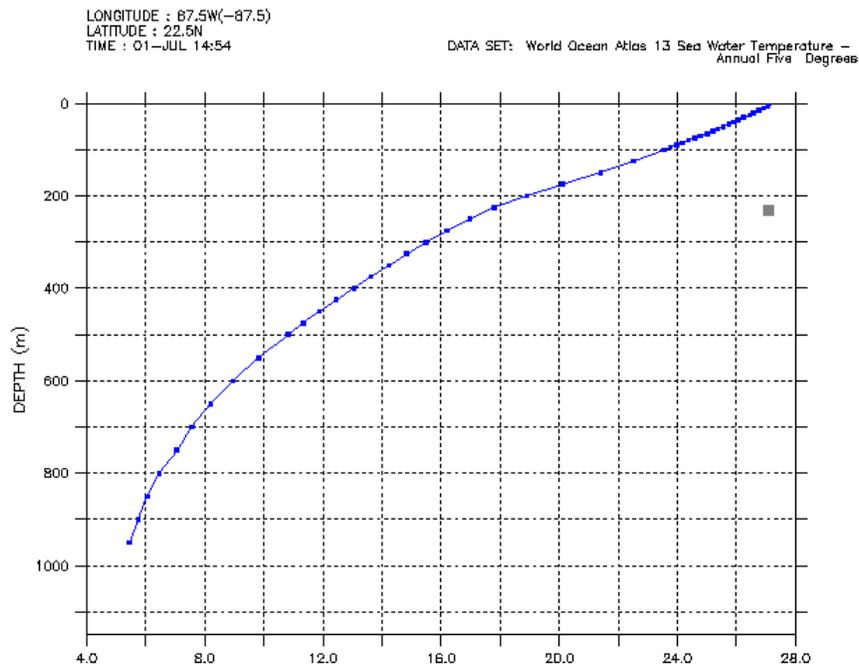


Figura 10. Perfil de temperatura respecto a profundidad

Tabla 1. Porcentaje de la ocupación en servicios turísticos de hospedaje Cancún, México.

	5 estrellas	4 estrellas
Enero	83.03	84.05
Febrero	84.20	84.48
Marzo	83.85	84.60
Abril	83.91	80.92
Mayo	77.18	83.60
Junio	81.28	82.73
Julio	88.28	88.18
Agosto	81.37	81.82
Septiembre	65.34	68.00
Octubre	66.18	70.23
Noviembre	76.52	79.01
Diciembre	76.48	78.27
Total Anual	78.97	80.49

Los parámetros de costos y de diseño usados en la formulación se muestran en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Parámetros usados para la optimización.

Concepto	Valor
Factor de emisiones por el consumo de electricidad (kg CO ₂ /kWh)	0.458
Coefficiente global de transferencia de calor (kW/m ² °C) (Cengel, 2007)	0.9
Eficiencia de las bombas, η (Swamee, 2008)	0.8
Horas de operación por año , H _Y (h/año)	8760
Factor usado para anualizar la inversión, k _F (año ⁻¹)	0.463
Precio unitario de la electricidad (\$/kWh) (CFE,2016)	0.14
Costo de compra de biosida (\$/m ³)	350
Costo unitario del químico de neutralización (\$/m ³)	1350
Coefficiente de rendimiento para los sistemas de AC	2
Diámetro de tubería principal (m)	0.4
Diámetro de tuberías para la distribución (m)	0.2
Longitud de tubería principal (m)	1500
Longitud de tuberías para la distribución (m)	400
Concentración de biosida (kg/m ³)	0.005
Concentración del químico de neutralización (kg/m ³)	0.001
Número de habitaciones para el hotel (H51) 5 estrellas	569
Número de habitaciones para el hotel (H52) 5 estrellas	426
Número de habitaciones para el hotel (H41) 4 estrellas	344
Número de habitaciones para el hotel (H42) 4 estrellas	295

En base a la cantidad de energía promedio por huésped por noche, considerando el porcentaje de energía que se gasta en un hotel únicamente el destinado para aire acondicionado, además de tamaño del hotel en cuestiones de habitaciones, se calculó la cantidad de energía o el consumo energético (kWh /día) para satisfacer dicho servicio por cada día, durante todo el año como se muestra en la **Tabla 3** de manera tabulada.

Tabla 3. Consumo de energía diario necesario para abastecer servicios de aire acondicionado en kWh.

Mes	H51	H52	H41	H42
Enero	4163.22	3108.78	2545.20	2181.60
Febrero	4690.44	3508.74	2836.08	2436.12
Marzo	4217.76	3163.32	2563.38	2199.78
Abril	4345.02	3254.22	2545.20	2181.60
Mayo	2581.56	1945.26	1690.74	1454.40
Junio	4217.76	3163.32	2599.74	2236.14
Julio	4435.92	3326.94	2672.46	2290.68
Agosto	4090.50	3054.24	2472.48	2127.06
Septiembre	2254.32	1690.74	1418.04	1218.06
Octubre	2217.96	1654.38	1418.04	1218.06
Noviembre	2654.28	1981.62	1654.38	1418.04
Diciembre	2563.38	1927.08	1581.66	1363.50

12. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

El modelo propuesto fue codificado en el software GAMS® con el solucionador CPLEX para resolver el problema Mixto entero lineal que consta de 30.736 ecuaciones y 21.978 variables. Los resultados se muestran en la curva de Pareto (**Figura 11**). Donde se pueden identificar diferentes puntos como soluciones óptimas Pareto. Los puntos por debajo de la curva son inviábiles, mientras que los puntos por encima de la curva corresponden a soluciones no óptimas.

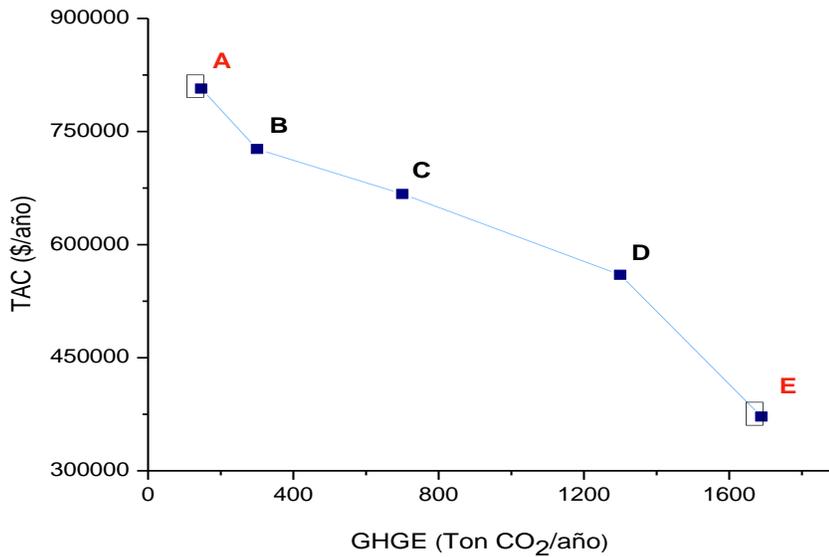


Figura 11. Curva Pareto

El punto A de la Figura 11 es el resultado de la minimización de las emisiones totales anuales (GHGE). En este caso se producen 147 Ton CO₂ eq / año, por el uso de las bombas y electricidad durante el mantenimiento programado, el costo total es de 806,934 \$ / año y cuya configuración se observa en la **Figura 12**. El punto E representa la solución cuando se minimiza el costo total, para este escenario las emisiones totales son 1689 toneladas CO₂ eq / año con

un costo total de \$ 371,928 / año. Los puntos B, C y D son soluciones óptimas intermedias que compensan ambos objetivos. En el escenario C para compensar los objetivos medioambientales y económicos se utilizan tanto agua fría de mar como electricidad, la configuración para este escenario se muestra en la **Figura 13**. El sistema requiere 381.500 m³ / año de agua que se distribuye según las necesidades diarias de cada hotel, Esta configuración requiere 572 m³/año de biosida para mantener la transferencia de calor en los intercambiadores de calor en un nivel deseable y 572 m³ / año de neutralización química con el fin de neutralizar totalmente el biosida. Los requerimientos de agua y energía en cada hotel se muestran en la **Tabla 4**.

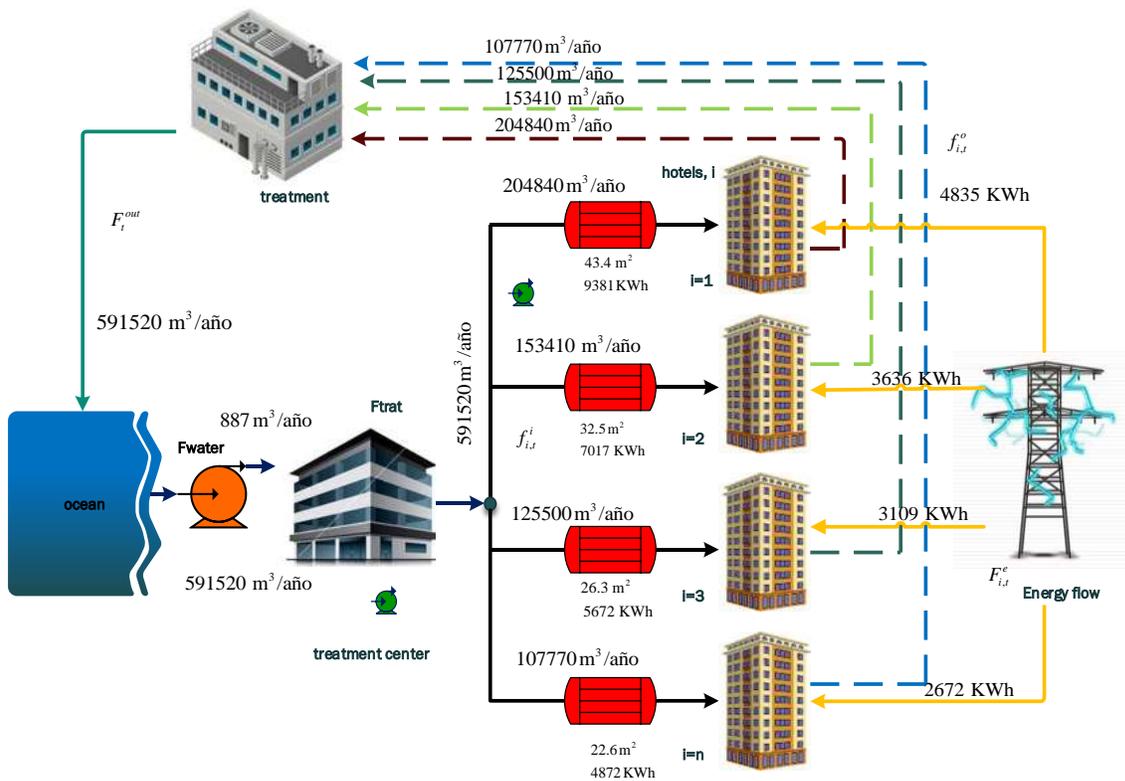


Figura 12. Configuración óptima para el punto A

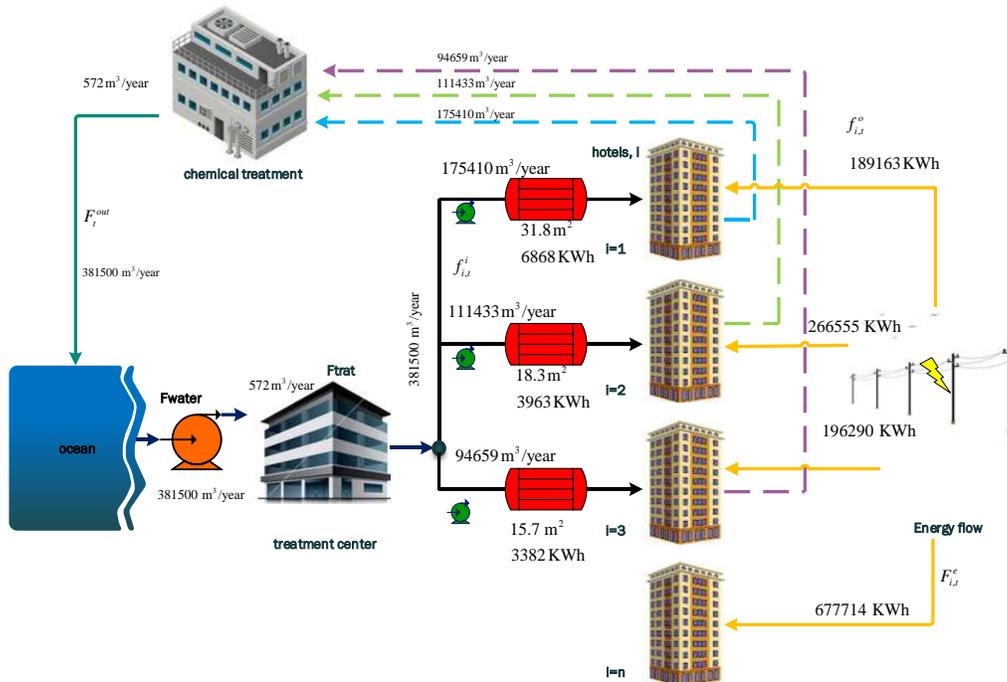


Figura 13. Configuración óptima para el punto C

Se puede ver que el hotel H42 satisface plenamente sus demandas utilizando la red eléctrica local. La Figura 14 muestra los perfiles de consumo total de agua, biosida y neutralización química, observando que los perfiles químicos de biosida y neutralización se superponen debido a la suposición de que la concentración de biosida a la sustancia química de neutralización es 1: 1. La Figura 15 muestra las distribuciones de agua para cada hotel en el lapso de tiempo. Se observa que los días de mantenimiento (días 151 y 273) seleccionados durante los meses de mayo y septiembre el uso de agua es cero, debido a que en estos días el sistema se cierra para mantenimiento y la red eléctrica se utiliza para satisfacer las peticiones. Los días de mantenimiento fueron seleccionados antes del proceso de optimización en temporada baja de ocupación.

Tabla 4. Requerimientos de agua y energía en cada hotel para el caso C

Hotel	Agua de mar (m ³ /año)	Electricidad (kWh/año)
H51	175,410	189,163
H52	111,433	266,555
H41	94,659	196,290
H42	0	677,714

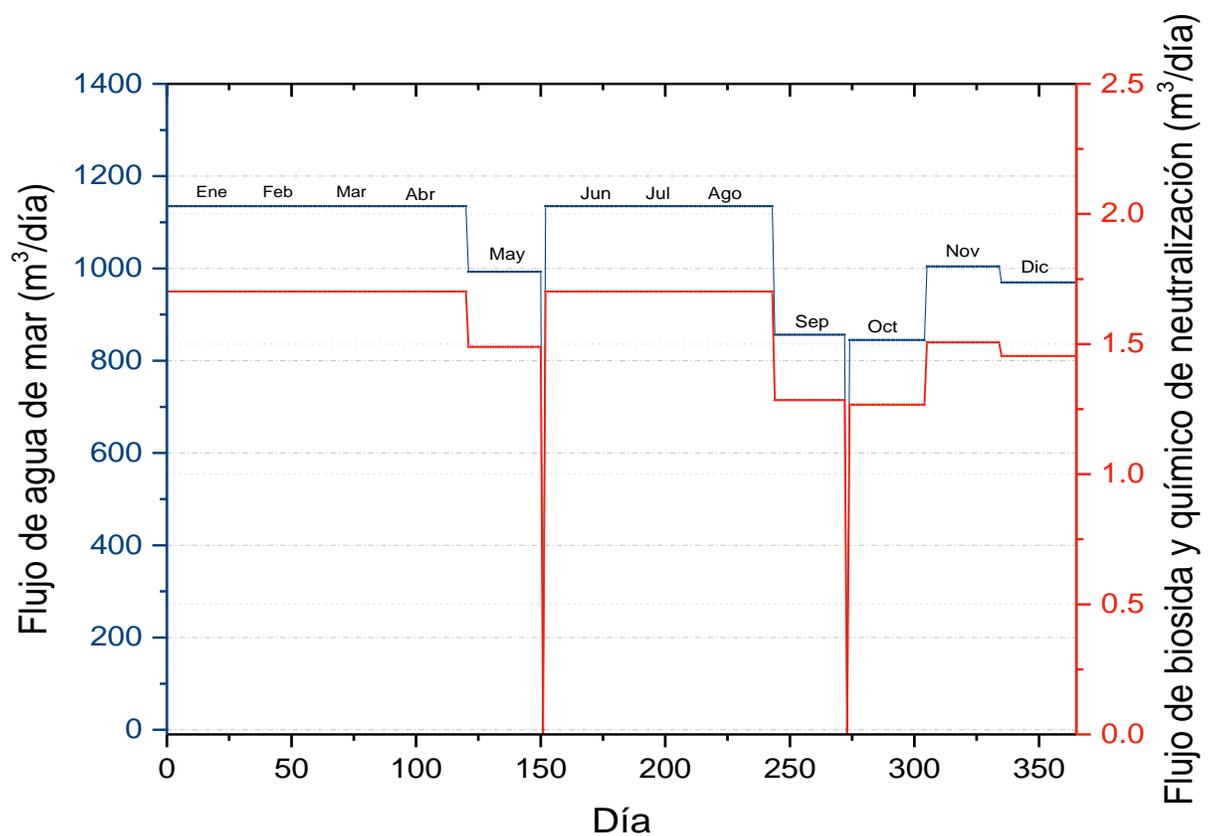


Figura 14. Demanda de agua de mar total, biosida y químico de neutralización por día

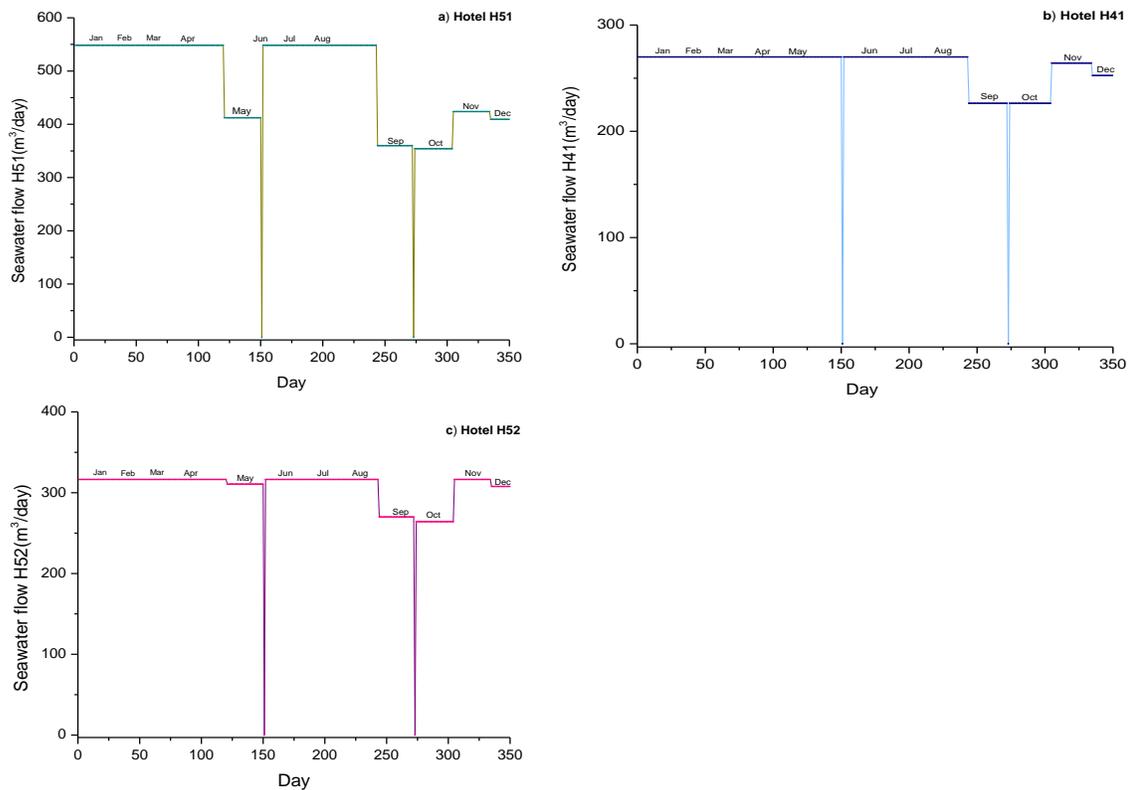


Figura 15. Distribución de agua para cada hotel

Las **Figuras 16** y **17** muestran la cantidad de energía eliminada utilizando cada uno de los sistemas, para los hoteles H51, H52 y H41 que representan los hoteles con las capacidades más altas se recomienda la combinación de agua fría y electricidad, mientras que para el hotel más pequeño se prefiere el uso de electricidad. Utilizando esta configuración, las emisiones totales son 700 Ton CO₂ eq / año con un costo total de \$ 667,1097 año.

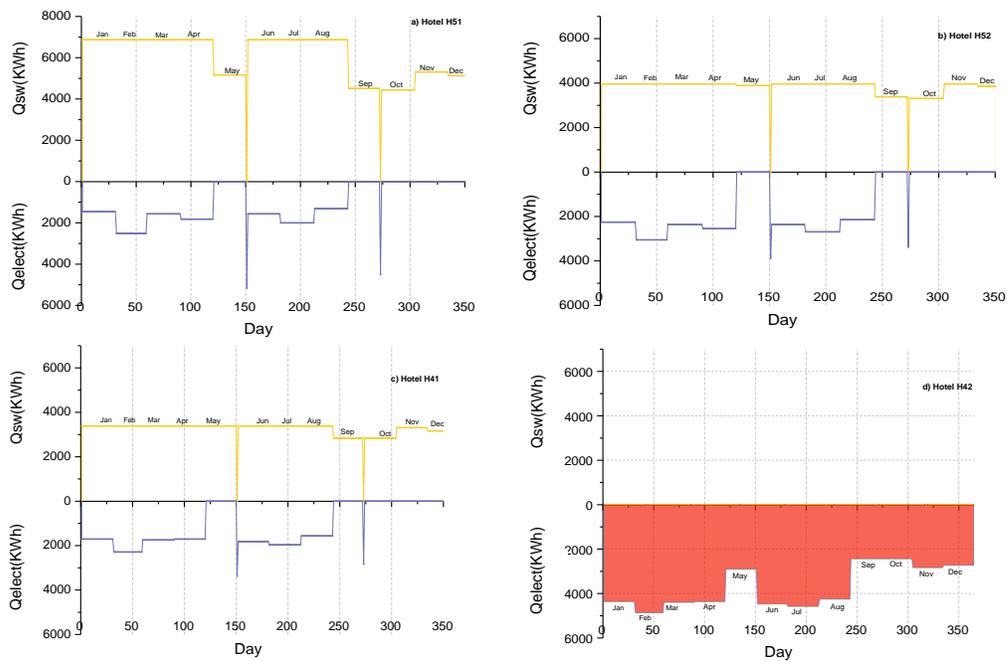


Figura 16. Calor removido usando agua y energía por hotel

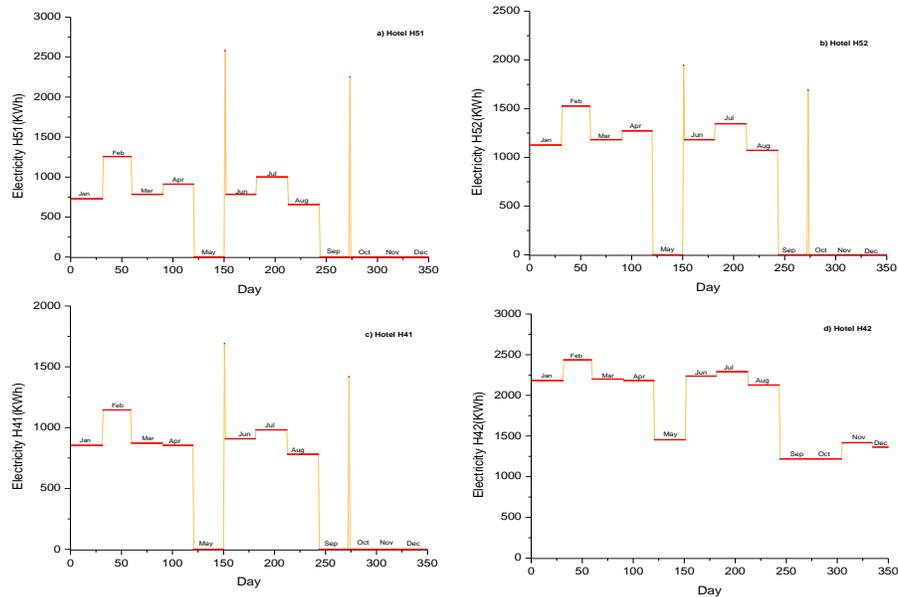


Figura 17. Perfil de uso de electricidad por hotel

La **Tabla 5** presenta la evaluación económica y ambiental para cada uno de los hoteles considerados de manera individual, se muestra el resultado de minimizar la función ambiental (GHGE) y el costo asociado a los servicios de aire acondicionado de cada hotel con esta consideración. Las emisiones están ligadas directamente al tamaño del hotel, ya que si el hotel es de gran tamaño, éste requiere mayor cantidad de energía y por tanto emite más cantidad de emisiones de efecto invernadero al medio ambiente.

Tabla 5. Costo correspondiente a cada uno de los hoteles priorizando el aspecto ambiental

USO DE AGUA DE MAR MINIMIZANDO EMISIONES COSTO (\$)			
H51	H52	H41	H42
\$	\$	\$	\$
349,240	313,300	293,610	281,270
EMISIONES TOATLES USANDO AGUA DE MAR TON CO₂/año			
28.89	23.63	20.84	19.02

La **Tabla 6** presenta la evaluación económica y ambiental para cada uno de los hoteles considerados, se muestra el resultado si se minimiza la función objetivo de costos (TAC) y cuál sería la cantidad de emisiones totales emitidas por cada hotel. En este caso las emisiones provienen por el uso de la electricidad.

Tabla 6. Costo correspondiente a cada uno de los hoteles priorizando costo

REQUERIMIENTOS DE LA RED ELECTRICA MINIMIZANDO COSTOS (\$)			
H51	H52	H41	H42
\$	\$	\$	\$
128,790.00	96,452.17	78,919.38	67,771.40
EMISIONES TOTALES USANDO RED ELECTRICA (TON CO₂/año)			
584.69	437.89	358.29	307.68

La **Figura 18** muestra la configuración óptima que representa el punto D de la curva Pareto, con una cantidad de 1300 ton CO₂ eq/ año de emisiones de gases de efecto invernadero emitidas y un costo de \$559,985/ año.

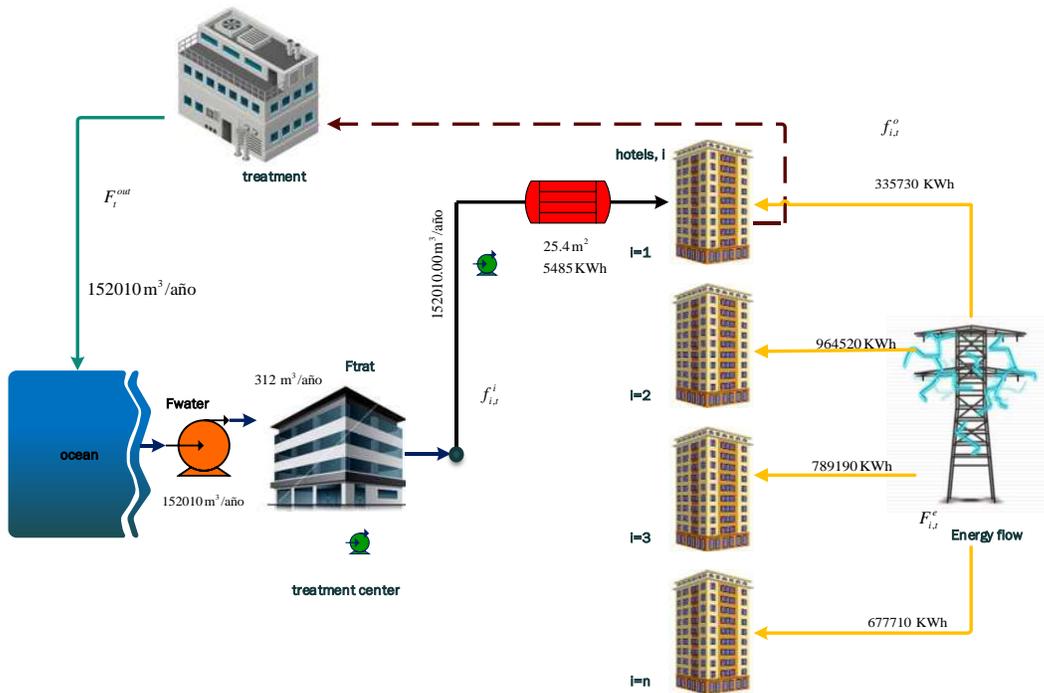


Figura 18. Configuración óptima para el punto D

La **Figura 19** muestra una comparación de las GHGE producidas en cada uno de los puntos de la Curva de Pareto. En el punto E 1689 ton CO₂ / año con el menor costo, para el punto A 140 ton CO₂ / año se producen, lo cual representa una reducción del 91,3% en comparación con el caso donde el TAC es más bajo. Los puntos B, C y D son una combinación de ambos sistemas. En el caso B 300 Ton CO₂ / año se producen y presenta una disminución de 84,24% respecto al peor caso ambiental con un costo total de 726.758 \$ / año. En el Punto C 700 Ton CO₂ / año se producen con un costo total anual de 667108 \$ / año, aquí las emisiones

representan el 13% por el uso del sistema de agua de mar y el 86% por el uso de electricidad y juntos representan un 58,55% menos que el punto E. Este punto representa una solución económica y ambiental equilibrada, ya que obtenemos valores intermedios en términos de costos y emisiones con respecto a los demás. El punto D tiene un costo total anual de 559,985 \$ / año y 1300 ton CO₂ / año, aquí las emisiones representan el 3,3% por el uso del sistema de agua de mar y el 96% por el uso de electricidad. Ambas configuraciones resultan ser soluciones atractivas al tomar decisiones.

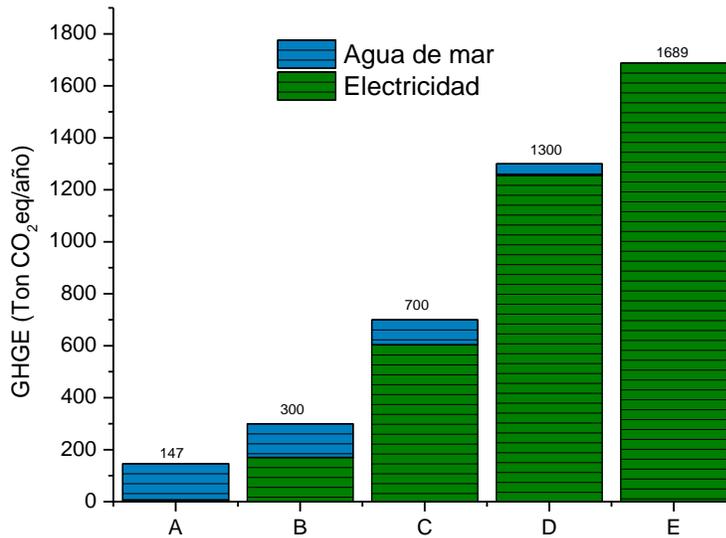


Figure 19. GHGE (ton CO₂/año) para cada punto de la curva Pareto

CONCLUSIONES

13. CONCLUSIONES

Un modelo general de programación multi-objetivo para encontrar la distribución óptima de agua de mar y electricidad para satisfacer los servicios de aire acondicionado en un complejo hotelero es presentado. El modelo incluye aspectos técnicos, económicos y ambientales. El rendimiento económico se evalúa en función de los requerimientos de energía, el consumo de biosida, los mantenimientos, instalación y operación de nuevos equipos. En la cuestión técnica asociada al uso de agua de mar y las bio películas formadas en las tuberías e intercambiadores de calor se obtiene la dosificación óptima de biosida para contrarrestar tal efecto. Mientras que el aspecto ambiental del proceso, se evaluó considerando como fuente de energía los combustibles fósiles para el manejo y transformación de la electricidad y el impacto ambiental se midió en función de las emisiones totales. El enfoque propuesto implica la solución de un problema multi-objetivo que se resolvió utilizando el método epsilon constraint para construir la curva de Pareto que muestra soluciones compensadas entre los aspectos económicos y ambientales. La zona hotelera de Cancún, México ha sido considerada como caso de estudio. Las soluciones propuestas pueden alcanzar reducciones hasta en un 90% del GHGE total. El modelo es general y se puede aplicar a cualquier estudio de caso con los datos necesarios.

REFERENCIAS

14. REFERENCIAS

- [1] Xuchao W, Priyadarsini R, Eang L.S. Benchmarking energy use and greenhouse gas emissions in Singapore's hotel industry. *Energy Policy* **2010**; 38:4520-4527.
- [2] Lu S, Wei S, Zhang K, Kong X, Wu W. Investigation and analysis on the energy consumption of starred hotel buildings in Hainan Province, the tropical region of China. *Energy Conversion and Management* **2013**; 75:570-580.
- [3] Bohdanowicz P, Martinac I. Determinants and benchmarking of resource consumption in hotels—Case study of Hilton International and Scandic in Europe. *Energy and Buildings* **2007**; 39: 82-95.
- [4] SECTUR (México). Secretaría de Turismo, Compendio estadístico del turismo en México **2015**. <http://www.datatur.sectur.gob.mx/SitePages/CompendioEstadistico.aspx> [accessed 21.09.16].
- [5] Ali Y.; Mustafa M, Al-Mashaqbah S, Mashal K, Mohsen M. Potential of energy savings in the hotel sector in Jordan. *Energy Conversion and Management* **2008**; 49: 3391–3397.
- [6] Beccali M, La-Gennusa M, Coco L.L, Rizzo G. An empirical approach for ranking environmental and energy saving measures in the hotel sector. *Renewable Energy* **2009**; 34: 82-90.
- [7] Cabello-Eras J.J, Sousa-Santos V, Sagastume-Gutiérrez A, Guerra-Plasencia M.A, Haeseldonckx D, Vandecasteele C. Tools to improve forecasting and control of the electricity consumption in hotels. *Journal of Cleaner Production* **2016**; 137: 803-812.
- [8] Mardani A, Zavadskas E.K, Streimikiene D, Jusoh A, Nor K.M, Khoshnoudi M. Using fuzzy multiple criteria decision making approaches for evaluating energy saving technologies and solutions in five star hotels: A new hierarchical framework. *Energy* **2016**; 117:131-148.
- [9] Chung M, Park H.-C. Comparison of building energy demand for hotels, hospitals, and offices in Korea. *Energy* **2015**; 92: 383-393.
- [10] Bohdanowicz, P., Churie-Kallhauge, A., & Martinac, I. (2001). Energy-efficiency and conservation in hotels—towards sustainable tourism. 4º Simpósio Internacional em Arquitetura da Ásia e Pacífico, Havaí.
- [11] De Burgos-Jiménez J, Cano-Guillén C. J, Céspedes-Lorente, J. J. Planning and control of environmental performance in hotels. *Journal of Sustainable Tourism* **2002**; 10:207-221.
- [12] Trung DN, Kumar S. Resource use and waste management in Vietnam hotel industry. *J Cleaner Prod* **2005**; 13:109–16.
- [13] Eley Associates. Hawaii commercial building guidelines for energy efficiency. Honolulu, State of Hawaii: Department of Business, Economic Development and Tourism; **2004**. p. 367.

- [14] Ni J, Bai X. A review of air conditioning energy performance in data centers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2017**; 67: 625-640.
- [15] Osorio A.F, Arias-Gaviria J, Devis- Morales A, Acevedo D, Velasquez H.I, Arango-Aramburo S. Beyond electricity: The potential of ocean thermal energy and ocean technology ecoparks in small tropical islands. *Energy Police*. **2016**; 98:713-724.
- [16] Martí J.A, Laboy M, Ruiz O.E. Feasibility of Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) for Production of Renewable Energy and Drinking Water in Developing Countries, **2010**.
- [17] Young-hak, S; Yasumori, A; Jurng-Jae, Y; Effects of utilizing seawater as a cooling source system in a commercial complex. *Energy Buildings* **2007**; 39, 1080-1087.
- [18] Lilley J, Eby-Konan D, T. Lerner D. Cool as a (sea) cucumber? Exploring public attitudes toward seawater air conditioning in Hawai'i. *Energy Research & Social Science* **2015**; 8:173-183.
- [19] War J. C. "Seawater Air Conditioning (SWAC) a renewable energy alternative," in *OCEANS 2011*, **2011**, pp. 1-9.
- [20] Elgamal H. SEA WATER AIR CONDITIONING. Alexandria University, **2008**.
- [21] An introduction to Seawater Air Conditioning. Makai Ocean Engineering. **2008**
- [22] Porak D. N, VanZwieten J. H., and Wiles B. "An Analysis of Florida's Sea Water Cooling Resource," *Marine Technology Society Journal* **2013** 47:226-239.
- [23] Nebot E, Casanueva JF, Casanueva T, Sales D. Model for fouling deposition on power plant steam condensers cooled with seawater: effect of water velocity and tube material. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **2007**; 50:3351-3358.
- [24] Satpathy KK, Mohanty AK, Sahu G, Biswas S, Selvanayagam M. Biofouling and its control in seawater cooled power plant cooling water system - a review. *Nuclear Power*. **2010**; 191-241.
- [25] Rubio D, Casanueva J, Nebot E. Assessment of the antifouling effect of five different treatment strategies on a seawater cooling system. *Applied Thermal Engineering* **2015**; 85: 124-134.
- [26] Bott T. Techniques for reducing the amount of biocide necessary to counteract the effects of biofilm growth in cooling water systems. *Applied Thermal Engineering* **1998**; 18: 1059-1066.
- [27] Bin-Mahfouz A.B, Atilhan S, Batchelor B, Linke P, Abdel-Wahab A, El-Halwagi M.M. Optimal scheduling of biocide dosing for seawater-cooled power and desalination plants. *Clean Technologies and Environmental Policy* **2011**; 13:783-796.

- [28] Nápoles-Rivera F, Bin-Mahfouz A, Jiménez-Gutiérrez A, El-Halwagi M.M, Ponce-Ortega J.M. An MINLP model for biofouling control in seawater-cooled facilities. *Computers & Chemical Engineering* **2012**; 37:163-71.
- [29] Ocean Thermal Energy Corporation. USA
- [30] Surroop, D and Abhishekanand, A. “Technical and Economic Assessment of Seawater Air Conditioning in Hotels,” *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, **2013**, 4:6:382.
- [31] Elsafty, A. F., Saeid, L. “Sea water air conditioning [SWAC]: A cost effective alternative,” *International Journal of Engineering* **2009**, 3:346.
- [32] L. Zhen, D. Lin, H. Shu, S. Jiang, and Y. Zhu, “District cooling and heating with seawater as heat source and sink in Dalian, China,” *Renewable energy*, **2007**, 32:2603–2616.
- [33] Smith J, Van Ness H, Abbott M. *Introducción a la termodinámica en Ingeniería Química*. 5th ed. México: McGraw-Hill, 1997.
- [34] Swamee P. K., Sharma A.K. Design of Water Supply Pipe Networks: Cost considerations. Wiley. **2008** 4: 79-95.
- [35] SEMARNAT (México). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Programa GEI México **2015** <http://www.gob.mx/semarnat> [accessed 10.09.16].
- [36] Diwekar U. *Introduction to applied optimization*, vol. 22. Springer Science & Business Media, **2008**.
- [37] Marler R. T. and Arora J. S., “Survey of multi-objective optimization methods for engineering,” *Structural and multidisciplinary optimization*, **2004** 26:369–395.
- [38] CFE (México). Comisión Federal de electricidad <http://www.cfe.gob.mx> 2015 [accessed 10.09.16].
- [39] NCEI (USA). National Centers for Environmental Information <https://data.nodc.noaa.gov/las/getUI.do> 2013 [accessed 20.06.17].

NOMENCLATURA

15. NOMENCLATURA

Sets

i	Hoteles 5 y 4 estrellas
t	Tiempo en días

Variables

F_t^{water}	Flujo de agua de mar profunda del océano, m ³ /día
F_t^{trat}	Flujo de salida de la planta de tratamiento, m ³ /día
$f_{i,t}^i$	Flujos de agua de mar enviado al hotel i en un tiempo t , m ³ /día
$f_{i,t}^o$	Flujos de salida del hotel i en un tiempo t , m ³ /h
F_t^{out}	Flujos tratados en la planta de neutralización, m ³ /día
F_t^{bio}	Flujo de biosida m ³ /día
$Q_{i,t}^{water}$	Calor que puede ser removido usando agua de mar, kWh/día
$Q_{i,t}^e$	Calor que puede ser removido con el sistema convencional de AC, kWh/día
$Cost_{i,t}^e$	Costo pagado a la compañía de electricidad local, \$/día
$Elect_{i,t}^e$	Consumo de energía, kWh/día
Q_i^{qwm}	Máximo carga de calor en cualquier tiempo t , m ³ /día
A_i	Área de los intercambiadores de calor, m ²
$Cost_i^{unit}$	Costo unitario para intercambiadores de calor, \$
$heateCost$	Costo total de intercambiadores de calor, \$
$MaintCost$	Costo de mantenimiento de intercambiadores de calor, \$
$BiocideCost$	Costo total de biosida, \$
$chemicalCost$	Costo de químico de neutralización, \$

<i>ElectricityCost</i>	Costo total de electricidad, \$
P_{cf}^{trat}	Costo unitario de tubería del océano profundo a la planta de tratamiento, \$
P_{cf}_i	Costo unitario de tubería de la planta de tratamiento al hotel i , \$
$P_{cf}_i^{out}$	Costo unitario de tubería del hotel i a la planta de neutralización, \$
<i>PipingCost</i>	Costo total de tubería, \$
<i>Pcost1</i>	Costo unitario de la bomba del océano a la planta de tratamiento, \$
P_{cost2}_i	Costo unitario de la bomba de la planta de tratamiento al hotel i , \$
P_{cost3}_i	Costo unitario de la bomba del hotel i a la planta de neutralización, \$
<i>PumpingCost</i>	Costo total de bombeo, \$
f_{wm}_i	Flujo máximo en cada segmento de tubería de la planta de tratamiento al hotel i , m ³ /día
F^{trat}	Flujo máximo del océano profundo a la planta de tratamiento, m ³ /día
<i>Pumpequip</i>	Costo total de las bombas, \$
<i>TAC</i>	Costo total anual, \$/año
$E_{melec}_{i,t}$	Emisiones generadas por el uso de electricidad del hotel i , Ton CO ₂ eq. /día
<i>Emissionselect</i>	Emisiones totales generadas por electricidad, Ton CO ₂ /año
$Power_t$	Potencia de la bomba del océano a la planta de tratamiento, en un tiempo t , kW/día
$Power2_{i,t}$	Potencia de la bomba de la planta de tratamiento al hotel i en un tiempo t , kW/día
$Power3_{i,t}$	Potencia de la bomba del hotel i a la planta de neutralización, en un tiempo t , kW/día
<i>TotalPower</i>	Potencia total anual usada por todas las bombas, kW/año
<i>EnergyPump</i>	Energía total usada por todas las bombas, kWh/año
<i>Emissionprocess</i>	Emisiones totales generadas usando agua de mar, Ton CO ₂ eq. /año
<i>GHGE</i>	Emisiones totales anuales, Ton CO ₂ eq. /año

Parámetros

ρ	Densidad del agua de mar, kg/m^3
$C_{p_{sw}}$	Capacidad calorífica del agua de mar, $\text{kJ/Kg } ^\circ\text{C}$
U	Coefficiente global de transferencia de calor, $\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$
COP	Coefficiente de desempeño
$Q_{i,t}^H$	Carga de calor requerida para remover el aire en el hotel i en un tiempo t , kWh
$\text{consp}_{i,t}$	Electricidad gastada con el sistema convencional de AC, kWh
ΔT	Diferencial de temperatura, $^\circ\text{C}$
UCE	Costo unitario para la electricidad, $\$/\text{kWh}$
ΔT_{ml}	Diferencia de temperatura media logarítmica, $^\circ\text{C}$
EFE	Factor de emisiones para la producción de energía, $\text{Kg CO}_2/\text{kWh}$
C^{bio}	Concentración para tener un efecto biosida, Kg/m^3
C_t^{in}	Concentración de biosida comercial, Kg/m^3
ξ	Costo unitario de biosida, $\$/\text{m}^3$ agua tratada
β	Costo de mantenimiento de una planta mediana, desalinizadora, $\$$
γ	Costo unitario del químico de neutralización, $\$/\text{m}^3$ de agua tratada
τ	Número de mantenimientos programados al año
H_y	Horas de operación de la planta por año, hrs/año
η	Eficiencia de las bombas
f	Factor de fricción
D	Diámetro de tubería, m
L	Longitud de tubería, m
k_F	Factor usado para anualizar el costo capital, años^{-1}

k_m, m	Parámetros de costos de tuberías [34]
δ	Exponente para la función de costos de intercambiadores de calor
$V\text{Cost}_i^{\text{unit}}$	Costo unitario variable para intercambiadores de calor, \$
$F\text{Cost}_i^{\text{unit}}$	Costo unitario fijo para intercambiadores de calor, \$
PPC1_t	Costo de bombeo del océano a la planta de tratamiento, \$/m ³
$\text{PPC2}_{i,t}$	Costo de bombeo de la planta de tratamiento al hotel i , \$/m ³
$\text{PPC3}_{i,t}$	Costo de bombeo del hotel i a la planta de neutralización, \$/m ³
CVP^{pump}	Costo unitario variable para las bombas, \$
CFB^{pump}	Costo unitario fijo para las bombas, \$
Ω	Pendiente en la regresión lineal para cada bomba
Ψ	Intercepto en la regresión lineal para cada bomba
$F^{\text{trat,max}}$	Flujo máximo tratado, m ³ /día
$f^{\text{hotel,max}}$	Flujo máximo para cada hotel, m ³ /día
Q^{Wmax}	Flujo de calor máximo, m ³ /día

Variables binarias

y_i^{he}	Variable binaria asociada a la existencia de los intercambiadores de calor.
y^{trat}	Variable binaria asociada a la existencia del segmento de tubería del océano a la planta de tratamiento
y_i^{hotel}	Variable binaria asociada a la existencia del segmento de tubería de la planta de tratamiento a cada hotel i
y_i^{out}	Variable binaria asociada a la existencia del segmento de tubería de cada hotel a la planta de neutralización.
y^{main}	Variable binaria asociada a la existencia de los mantenimientos.
