

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA  
INSTITUTO DE INGENIERÍA



MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA

**“ESTUDIO DE SISTEMAS TÉRMICOS DE DESALINIZACIÓN AL ALTO  
VACÍO CON EFECTO CONDENSACIÓN ACTIVADOS CON ENERGÍA  
TERMO-SOLAR”**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

PRESENTA:

**CRISTIAN ASCENCIÓN CASARES DE LA TORRE**

DIRECTORES:

**DR. NICOLÁS VELÁZQUEZ LIMÓN**

**DR. RICARDO LÓPEZ ZAVÁLA**

MEXICALI, B.C., MÉXICO A JUNIO DEL 2021

EL SIGUIENTE PROYECTO FUE DESARROLLADO EN EL CENTRO DE ESTUDIOS DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES.



## RESUMEN

Es sabido por todos que, el agua es un elemento imprescindible para la vida; sin embargo, a nivel mundial existe una crisis con la disponibilidad del recurso hídrico de potable debido al crecimiento poblacional y calentamiento global. La escasez del agua provoca serios problemas de salud, además de limitar de manera significativa el desarrollo de las actividades productivas de los sectores agrícola, ganadero, industrial, entre otros. Por lo anterior, la comunidad científica está buscando desarrollar tecnologías sustentables y con mayor eficiencia que brinden el servicio de agua potable a través de nuevas configuraciones que utilicen las energías renovables como su fuente de activación. Con la intención de contribuir a esta causa, en esta tesis se estudiaron teóricamente los sistemas de desalinización térmicos al alto vacío con eyecto-condensación, la hibridación entre ellos y diferentes configuraciones para su activación y funcionamiento; se generaron tres propuestas tecnológicas, las cuales se evaluaron a través del simulador Aspen Plus. Dichas propuestas tecnológicas de desalinización, son activadas mediante energía solar térmica para contribuir en la mitigación de la contaminación ambiental, el daño a la capa de ozono y el aumento del calentamiento global producido por la sobreutilización de los combustibles fósiles. La propuesta tecnológica MED-AV, consiste en un sistema de desalinización por evaporación de múltiple efecto integrado a un subsistema de eyecto-condensación, en el cual se propone un rango de presión y temperatura a lo largo de sus 14 efectos, que alcanza la presión correspondiente a una temperatura de saturación de 4 °C en el último efecto, sin la necesidad de contar con el acoplamiento de un sistema de enfriamiento por absorción para la condensación del vapor del último efecto. En la condición de diseño encontrada dentro de este estudio, se producen 106,269 L/día, suficientes para satisfacer las necesidades de una comunidad de hasta 1000 personas, con un GOR de 14.96, mostrando un incremento del 21% para ambos indicadores con respecto a un sistema convencional de desalinización MED-CONV. La segunda propuesta tecnológica MSF/MED-AV, consiste en un sistema de desalinización al alto vacío y con eyecto-condensación que acopla los procesos térmicos de desalinización de múltiple etapa flash y evaporación de múltiple efecto, en donde debido a la configuración se puede operar en un rango de flujo mayor que el de la propuesta MED-AV, reduciendo, además el número de componentes, e incrementando el valor en el indicador de eficiencia GOR en un 25% con respecto a un sistema MED convencional

y casi 4% con respecto a la MED-AV; además se produce 108,926 L/día de agua producto con un GOR de 15.62. La tercera propuesta tecnológica MED-AV-BTA, consiste en un sistema de desalinización MED al alto vacío con eyecto-condensación de 14 efectos que se activa con una TBT de 25 °C, por lo que el agua de mar de alimentación no requiere precalentamiento, esto a su vez se refleja en un sistema que alcanza una capacidad de 210,816 L/día con un GOR de 29.66 y que presenta un incremento del 60% en la capacidad y eficiencia respecto al sistema MED-CONV. Al realizar el estudio comparativo de las propuestas tecnológicas, se observa que el sistema MED-AV-BTA tiene los mejores indicadores de eficiencia y capacidad, con lo cual sería posible competir con las tecnologías actuales en el mercado, además de contar con una alta potencialidad de ser empleado en distintos escenarios, con distintas configuraciones para satisfacer las necesidades relacionadas a la disponibilidad de agua de las comunidades marginadas.

## ABSTRACT

It is common knowledge that water is an essential element for life; however, worldwide there is a crisis with the availability of drinking water resources due to population growth and global warming. Water scarcity causes serious health problems, in addition to significantly limiting the development of productive activities in the agricultural, livestock and industrial sectors, among others. Therefore, the scientific community is seeking to develop sustainable and more efficient technologies that provide drinking water service through new configurations that use renewable energy as their source of activation. With the intention of contributing to this cause, in this thesis we theoretically studied high vacuum thermal desalination systems with ejector-condensation, the hybridization between them and different configurations for their activation and operation; three technological proposals were generated, which were evaluated through the Aspen Plus simulator. These desalination technology proposals are activated by solar thermal energy to contribute to the mitigation of environmental pollution, damage to the ozone layer and the increase in global warming caused by the overuse of fossil fuels. The technological proposal MED-AV, consists of a multiple effect evaporation desalination system integrated to an ejector-condensation subsystem, in which a range of pressure and temperature is proposed along its 14 effects, reaching the pressure corresponding to a saturation temperature of 4 °C in the last effect, without the need to have the coupling of an absorption cooling system for the condensation of the vapor of the last effect. In the design condition found within this study, 106,269 L/day are produced, enough to satisfy the needs of a community of up to 1000 people, with a GOR of 14.96, showing an increase of 21% for both indicators with respect to a conventional MED-CONV desalination system. The second technological proposal MSF/MED-AV, consists of a high vacuum desalination system with ejector-condensation that couples the thermal processes of multiple stage flash desalination and multiple effect evaporation, where due to the configuration it can operate in a larger flow range than the MED-AV proposal, also reducing the number of components, and increasing the value in the GOR efficiency indicator by 25% with respect to a conventional MED system and almost 4% with respect to the MED-AV; In addition, 108,926 L/day of product water is produced with a GOR of 15.62. The third technological proposal MED-AV-BTA, consists of a high-vacuum MED desalination system with 14-effect ejection-condensation that is activated with a TBT of 25 °C, so that the feed seawater does not require preheating, this in turn is reflected in a system that reaches

a capacity of 210,816 L/day with a GOR of 29.66 and presents an increase of 60% in capacity and efficiency with respect to the MED-CONV system. The comparative study of the technological proposals shows that the MED-AV-BTA system has the best indicators of efficiency and capacity, which would make it possible to compete with current technologies on the market, in addition to having a high potential to be used in different scenarios, with different configurations to meet the needs related to water availability in marginalized communities.

# DEDICATORIA

---

*Principalmente dedico esta tesis a Dios por sostenerme y acompañarme en todo momento durante ese arduo y emocionante trayecto; por darme la fuerza, salud y capacidad para llegar hasta aquí. La dedico también a mis padres, que con paciencia y amor han sabido acompañarme y brindarme la motivación necesaria en los momentos más complicados, además de proveer un hogar y todo lo necesario para cubrir las necesidades que se presentaron en el camino. A mi ahora esposa, por ser una fuente de inspiración, por su paciencia y amor, por creer en mí en todo momento y por alentarme día a día a seguir adelante y alcanzar mis sueños. A mis dos hermanas, por siempre estar al pendiente de mí cuando se presentaban las múltiples desveladas y largas horas de trabajo para cumplir con mis compromisos, animándome constantemente con una sonrisa para lograr alcanzar mis objetivos.*

# AGRADECIMIENTOS

---

A mi director de tesis, el Dr. Nicolás Velázquez Limón que, me ha brindado todo su apoyo, tiempo, paciencia, experiencia y su incansable ánimo para sacar la mejor versión de mí, corrigiéndome cuando la ocasión lo ameritaba, pero sobre todo por propiciar mi crecimiento y desarrollo profesional y personal, brindándome además la oportunidad de colaborar con un excelente equipo de trabajo en el CEENER. Al Dr. Ricardo López Zavala, que al igual que el Dr. Nicolás, ha sido un excelente director de tesis, brindándome su tiempo, su apoyo incondicional y todos sus conocimientos y experiencias adquiridas a lo largo de su trayecto profesional, además le estaré siempre agradecido por brindarme su amistad y hacerme sentir bienvenido desde el primer día que llegue al laboratorio. Al M.I. Armando Aguilar Jiménez, por mostrarse siempre dispuesto a apoyarme y compartirme todos sus conocimientos, además de mostrarse como un buen amigo a lo largo de este trayecto. Al Ing. Juan Río Arriola, por ser mi amigo y fiel compañero de batallas a lo largo de este proceso y por brindarme los tiempos de “entropía” necesarios para reír y liberar el estrés acumulado del día a día. Al Dr. Saúl Islas Pereda, por compartirme de igual manera su amistad y por ser siempre una persona transparente y objetiva, la cual a través de sus consejos y conocimientos potenció mi desempeño en este proyecto. A cada uno de los compañeros con los que compartí vivencias diarias a lo largo de los dos últimos años e hicieron mucho más placentero este trayecto. A mi amigo de vida Roberto Iribe que, a pesar de no ser aún a los temas de ingeniería, siempre estuvo ahí para escucharme y brindarme sus consejos y apoyo. A mi padre Ascención Cazares, mi madre Llexica De la Torre, a mi esposa Elizabeth Contreras, a mi hermana Llexica Cazares y a mi hermana Alexia Cazares, los cuales conforman la hermosa familia que es parte fundamental de mi vida y de la persona que soy.

A la Universidad Autónoma de Baja California y al Centro de Estudios de las Energías Renovables del Instituto de Ingeniería por abrirme las puertas y brindarme la oportunidad de desarrollar mi proyecto de investigación y de pertenecer a esta gran institución.

**RESUMEN**

**LISTA DE FIGURAS**

**LISTA DE TABLAS**

<b>1. <u>INTRODUCCIÓN</u></b> .....	1
1.1 <u>Problemática y justificación</u> .....	1
1.2 <u>Antecedentes</u> .....	4
1.3 <u>Hipótesis</u> .....	7
1.4 <u>Objetivos</u> .....	7
1.4.1 <u>General</u> .....	7
1.4.2 <u>Específicos</u> .....	7
1.5 <u>Descripción general de la tesis</u> .....	8
<b>2. <u>FUNDAMENTOS TEÓRICOS</u></b> .....	9
2.1. <u>Energía solar térmica</u> .....	45
2.1.1. <u>Tecnologías de captación solar térmica</u> .....	48
2.2. <u>Desalinización térmica</u> .....	50
2.2.1. <u>Agua de mar</u> .....	51
2.2.2. <u>Historia y clasificación de los procesos de desalinización</u> .....	53
2.2.3. <u>Procesos de desalinización térmica</u> .....	55

<b>3. <u>ESTUDIO DE SISTEMAS AVANZADOS DE DESALINIZACIÓN TÉRMICA</u></b> .....	58
<b>3.1. <u>Sistema de desalinización MED convencional (MED CONV)</u></b> .....	58
3.1.1. <u>Descripción del sistema</u> .....	59
3.1.2. <u>Metodología de estudio</u> .....	62
3.1.3. <u>Validación de la simulación</u> .....	64
3.1.4. <u>Análisis y discusión de resultados</u> .....	66
<b>3.2. <u>Sistema de desalinización MED al alto vacío (MED AV)</u></b> .....	71
3.2.1. <u>Descripción del sistema</u> .....	72
3.2.2. <u>Metodología de estudio</u> .....	75
3.2.3. <u>Análisis y discusión de resultados</u> .....	76
<b>3.3. <u>Sistema de desalinización híbrido MSF-MED al alto vacío (HÍBRIDO AV)</u></b> .....	82
3.3.1. <u>Descripción del sistema</u> .....	82
3.3.2. <u>Metodología de estudio</u> .....	86
3.3.3. <u>Análisis y discusión de resultados</u> .....	87
<b>3.4. <u>Sistema de desalinización MED al alto vacío con baja temperatura de activación (MED AV-BTA)</u></b> .....	94
3.4.1. <u>Descripción del sistema</u> .....	94
3.4.2. <u>Metodología de estudio</u> .....	98
3.4.3. <u>Análisis y discusión de resultados</u> .....	99
<b>3.5. <u>Comparación de las propuestas tecnológicas</u></b> .....	106
<b>4. <u>CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS</u></b> .....	113
4.1. <u>Conclusiones</u> .....	113
4.2. <u>Trabajos Futuros</u> .....	115
<b>REFERENCIAS</b> .....	115
<b>APÉNDICE</b> .....	121

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

---

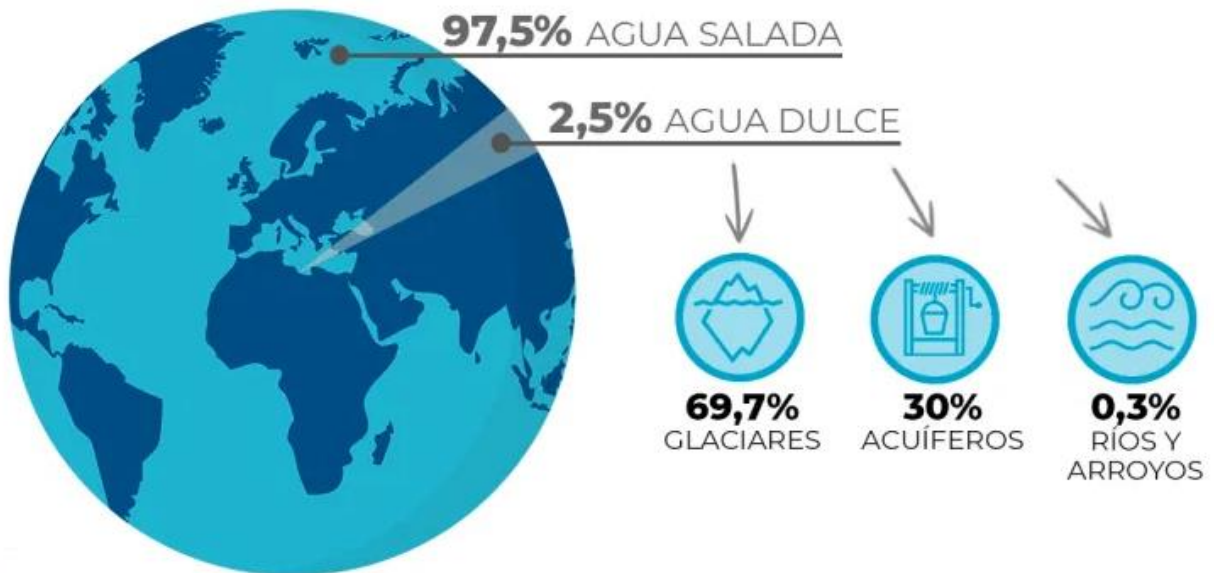
En este primer capítulo se presentan de manera general las bases que fundamentan el proyecto de tesis propuesto; se plantea la problemática de la escasez del recurso hídrico potable y las afectaciones que se derivan de esta, así como la argumentación que justifica dicha investigación, seguida de un planteamiento de hipótesis y objetivos que proponen brindar soluciones a través del estudio, desarrollo y propuesta de nuevos sistemas de desalinización que provean el servicio de agua potable de una manera más eficiente y sustentable. De igual manera se presentan los antecedentes más relevantes en la búsqueda de combatir y mitigar la presente problemática del agua, así como la delimitación y alcances del presente proyecto.

### 1.1 Problemática y justificación

El agua es un elemento de la naturaleza, fundamental para el sostenimiento y la reproducción de la vida en el planeta. Es indispensable para el bienestar y desarrollo de los seres humanos, dado que se ve directamente involucrado en la salud, producción de alimentos y la estabilidad social de un país. En términos prácticos, no hay proceso o actividad que directa o indirectamente no esté relacionado con el agua. A pesar de que el agua es imprescindible para la vida, actualmente existe en el mundo una crisis relacionada con la disponibilidad del recurso hídrico de buena calidad, afectando a todos los países sin importar la gran cantidad de agua que cubre la superficie de la Tierra.

Es conocido que el 75% de la superficie del planeta está compuesto por agua. El 100% del agua del planeta se divide en dos categorías principales, agua salada y agua dulce. Siendo el agua salada la que predomina entre ambas, con un 97.5%, restando tan solo un 2.5% de agua dulce

(Clarke & King, 2004); de la cual, el 69% se encuentra como hielo en glaciares y capas polares, 30% en mantos subterráneos y sólo el 1% se encuentra en lagos, ríos y atmósfera, siendo esta de menor porcentaje, el agua que es accesible para el hombre (Mahmood et al., 2011). Para que el ser humano pueda consumir el agua, esta debe llevar su respectivo tratamiento.

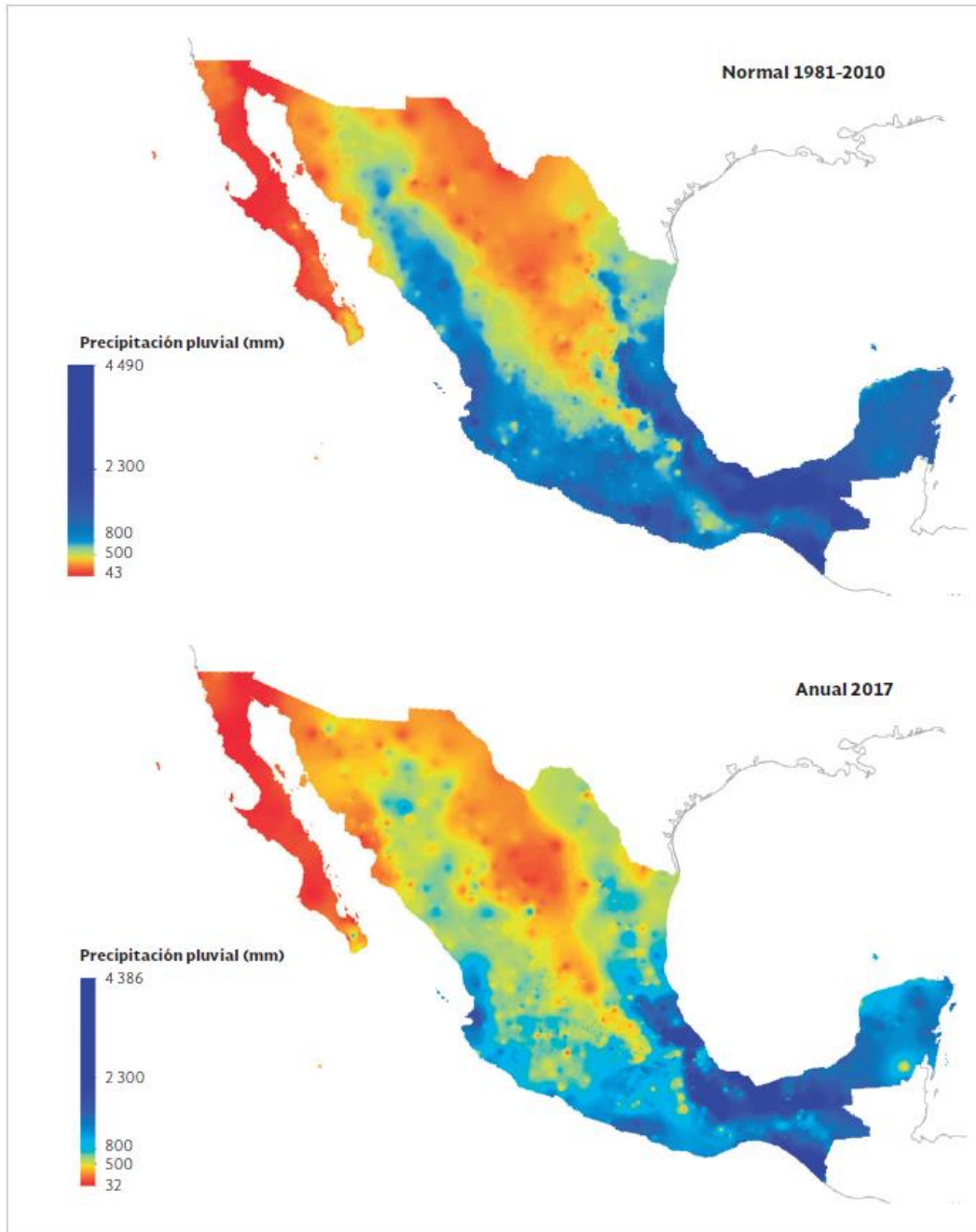


**Figura 1.1:** Distribución del agua en el mundo. Fuente: Elaborado con base en (Clarke & King, 2004)/FAO.

Existen diferentes factores involucrados dentro de la crisis de escasez de agua, pero sin duda son el cambio climático, la mala gestión del recurso y el incremento poblacional a nivel global, los que generan el mayor riesgo e impacto dentro de este problema. Esto debido a que, provocan que los abastecimientos de agua disminuyan, mientras que la demanda del recurso incrementa a un ritmo acelerado e insostenible. En base al último ejercicio demográfico realizado por las Naciones Unidas, se estimó que, en 1950, la población mundial ascendía a 2,536 millones de personas, mientras que para 2017 había aumentado a 7,550 millones. La población mundial actual es de 7,600 millones de personas y se estima que alcanzará los 8,600 millones para el año 2030 (UN, 2019). Este crecimiento poblacional tan drástico y acelerado, se ha producido en gran medida por el aumento en el número de personas que sobreviven hasta llegar a la edad reproductiva y ha venido acompañado de grandes cambios en las tasas de fecundidad, lo que ha aumentado los procesos de urbanización y los movimientos migratorios. Sin embargo, estas tendencias, aunadas a las malas

prácticas de utilización, distribución y conservación de los recursos, tendrán importantes repercusiones para las generaciones venideras, tales como lo es, la escasez del recurso hídrico (UNFPA., 2019).

México por su parte ocupa el undécimo lugar de los países con mayor población; el país está conformado por 31 estados y la Ciudad de México; cuenta con una extensión territorial de 1,964 millones de km<sup>2</sup> y 653 acuíferos para la administración de agua subterráneas, de los cuales 105 se encuentran en condición de sobreexplotación, 32 con presencia de suelos salinos y agua salobre y 18 con intrusión marina; se registra una media anual en la precipitación pluvial de 750 mm. La población del país se estima a partir de recorridos y enumeraciones a nivel nacional, denominados censos y conteos de población y vivienda; de acuerdo en el último censo realizado por el INEGI en 2010, se encontró una población de 112 millones de habitantes, sin embargo, en base a una conciliación demográfica, se estima que hasta el año 2020 existe una población aproximada a los 127 millones de habitantes, de los cuales, el 10% carece de agua potable (CONAGUA, 2018). La disminución del 75% de la disponibilidad del agua y el crecimiento poblacional son cifras alarmantes que obligan a México a implementar nuevas formas de abasto de agua potable. Unas de las principales regiones del país que se ven afectadas de gran manera con la crisis relacionada a la escasez de agua potable, son las zonas costeras; y dado que muchas de éstas, son regiones áridas, la desalinización de agua de mar es una alternativa razonable. Lo mencionado anteriormente se observa en la figura 1.2, donde se muestra la característica de la distribución de precipitación pluvial en 2017 y la precipitación normal 1981-2010 y donde se identifican las zonas costeras del norte del país como las de menor precipitación pluvial; caso contrario a lo que se presenta en la zona sureste donde se registran cantidades de precipitación cercanas a los 4,000 mm, sin embargo, al analizar la diferencia que existen entre los datos registrados en el periodo de 1981-2010 con respecto a los del 2017, se observa que el nivel de la precipitación pluvial ha ido en decadencia progresiva en todo el país, pero el impacto se ha visto mayormente reflejado en las zonas que anteriormente no presentaban problemas de sequías, como la zona centro y sur que incluye estados como Zacatecas, Durango, Michoacán y Guerrero. Los estados ubicados en la zona norte del país como Baja California, Sonora, Chihuahua y Durango son los que presentan el mayor problema de sequías y la menor cantidad de precipitación pluvial.



**Figura 1.2:** Distribución de precipitación pluvial. Fuente: (CONAGUA, 2018).

En la figura 1.3 se muestra que la mayoría de las regiones áridas del país presentan altos recursos de energía renovable, como es el caso de la península de Baja California, que presenta una gran cantidad de irradiación solar, la mayor del país; por lo cual, el uso de energías renovables en la desalinización de agua de mar presenta una posibilidad interesante, o incluso la única forma de ofrecer una fuente segura y eficiente de agua dulce.



**Figura 1.3:** Mapa del recurso solar en México, Irradiación Global. Fuente: 2017 The World Bank, Solar resource data: Solargis.

En su tesis doctoral, “Desarrollo de un sistema de enfriamiento-desalinización de baja capacidad activado con energías renovables”, (González-Uribe, 2017), menciona que hoy en día existen comunidades costeras apartadas que no cuentan con el acceso al preciado recurso hídrico de manera segura; además de mencionar que la crisis mundial del agua cobrará en los próximos años proporciones sin precedentes, aumentando la creciente penuria por falta del recurso hídrico. Aunado a esto, los abastecimientos de agua disminuyen, mientras que la demanda crece a un ritmo pasmoso e insostenible. Se menciona también el caso de la ciudad, La Paz, Baja California Sur, la cual se encuentra en un punto crítico en estos momentos debido a que durante varios años se ha venido extrayendo de los pozos, una cantidad de agua mayor a la que se puede recargar el acuífero, propiciando un avance considerable de la cuña salina, afectando de forma directa dicho acuífero; actualmente existen pozos de agricultores que están salados debido a la intrusión marina.

Por otra parte, debido al cambio climático, existen cada vez más, zonas costeras con problemas de sequías las cuales obstruyen el desarrollo económico y social de dichas comunidades. Un caso particular es el del poblado de Puertecitos, ubicado en zona costera de Ensenada, Baja California, el cual cuenta con una comunidad aislada de 20 familias aproximadamente, presentando unas condiciones bastante desfavorables en la intención de lograr y mantener un nivel de vida digno. La comunidad, se considera aislada, debido a que no cuentan con elementos básicos y fundamentales en el desarrollo de un nivel de vida de buena calidad, como lo son: la producción de alimentos, los servicios de agua potable, salud y hasta hace apenas algunos años el servicio de energía eléctrica; el cuál, actualmente se brinda por medio de una micro red aislada (Aguilar-Jiménez y cols., 2018). Consecuentemente, la combinación de estas condiciones desfavorables, pero principalmente la nula presencia del servicio de agua potable para el consumo y uso humano, provocan grandes problemas de salud y económicos dentro de la comunidad, debido a ser un elemento indispensable para el bienestar y desarrollo de los seres humanos.

Por lo anterior, en esta investigación se propone el estudio de tres sistemas térmicos de desalinización al alto vacío con eyecto-condensación y activados con energía de captación solar, que contribuirán a disminuir la escasez de agua potable, principalmente en comunidades aisladas, tales como lo es la comunidad de Puertecitos, Baja California a través de máquinas que sean capaces de proveer el servicio de desalinización de una manera práctica, con menor complejidad, siendo más eficiente y empleando recursos renovables para mitigar el impacto ambiental que se tiene de utilizar los combustibles convencionales, ocasionando con esto que, las poblaciones marginadas tengan una mejor calidad de vida. Es importante mencionar, que para este proyecto se consideran las tecnologías de desalinización térmicas como las opciones más adecuada, debido a la gran capacidad de acoplamiento que tienen tanto con los sistemas de captación solar térmica, como con los sistemas poligenerativos, siendo esto un factor de peso en la elección del proceso de desalinización, ya que se busca que en un futuro próximo, después de establecer las bases a través de este estudio operativo y de comparación, este proyecto se integre al acoplamiento de un sistema poligenerativo capaz de producir simultáneamente diferentes servicios, tales como la desalinización, enfriamiento, calefacción, generación de energía eléctrica, entre otros, brindando a su vez un mayor beneficio a las comunidades.

## 1.2 Antecedentes

“La desalinización, es el proceso por el cual el agua de mar, que contiene en promedio 35 000 ppm (partes por millón) del total de sólidos disueltos (TSD), y las aguas salobres, que contienen de 5,000 a 10,000 ppm del TSD, se convierten en agua apta para el consumo del hombre, uso doméstico e industrial” (URIBE, 2017).

La desalinización no es un concepto de reciente nacimiento, de hecho, se tienen las primeras referencias desde los años de Cristo. Para ser concreto se registró que, en el año 348-322 a.C., Aristóteles, describió el ciclo del agua; mencionó que el ciclo del agua es una gran planta de destilación abierta de energía solar en un ciclo operacional perpetuo (Aguilar-Jiménez y cols., 2019).

Alejandro de Afrodisias, al comentar la Meteorológica de Aristóteles, describe por primera vez el procedimiento de destilación como método de obtención de agua dulce a partir de agua de mar. En la Edad Media varios autores trataron el problema de la desalinización del agua de mar, entre los que se puede citar a John Gaddesden, que en su obra *Rosa medicine* describe cuatro métodos para la desalinización del agua de mar. En la Edad Moderna se multiplican las observaciones científicas debido a los descubrimientos geográficos, la expansión del comercio y los largos viajes a través de los mares. Ello implica un nuevo avance en el problema de la desalinización del agua, especialmente en lo que se refiere al abastecimiento de las tripulaciones de los buques. Andrés Laguna, médico personal del Rey de España Carlos I, en sus comentarios escritos sobre la materia médica de Dioscórides, cita diferentes métodos de desalinización. Giovan Battista Della publicó en 1589 la segunda edición de su *Magiae naturalis* en veinte tomos y en el último describe los métodos de obtención de agua dulce a partir de agua salina conocidos en la época. Este autor tiene el mérito de haber hecho un estudio crítico de dichos métodos y comprobar experimentalmente algunos.

A comienzos del siglo XIX ya eran conocidos los principios de los métodos de desalinización que podemos llamar naturales, concretamente la evaporación solar, la destilación y la congelación. El uso industrial de estos principios tuvo en cambio, un lento desarrollo, excepto en las

instalaciones de destilación para barcos, cuyo crecimiento fue relativamente rápido. La destilación tuvo un primer impulso de desarrollo en 1884 cuando James Weir creó, con destino a barcos, una planta de evaporación que utilizaba la energía residual del vapor de salida de la caldera. Desde 1884 hasta 1956 el tipo de destilación de tubos sumergidos sirvió de base a la mayoría de las instalaciones marinas de esta naturaleza, y en la época final a instalaciones terrestres. Las primeras instalaciones de este tipo, de las que se tiene noticias, son una en Egipto, instalada en 1912, cuya producción era de 75 m<sup>3</sup>/día; otra en Stears, Kentucky, montada en 1917 con una producción de 150 m<sup>3</sup>/día, y otras en las islas de Aruba y Curazao, de 6,500 m<sup>3</sup>/día, instaladas en el periodo 1956-1958. Fue precisamente el aumento de capacidad de estas plantas terrestres lo que llevó al abandono del principio de tubos sumergidos, ya que el sistema era difícilmente adaptable a capacidades mayores.

El desarrollo de la evaporación súbita se inicia con el fin de las instalaciones de tubos sumergidos, a las que prácticamente viene a sustituir. El punto de comienzo de la era industrial de la evaporación súbita se puede enmarcar en 1956, en que la compañía Westinghouse comenzó la instalación en Kuwait de una planta de 2,273 m<sup>3</sup>/día. Los sistemas de compresión de vapor y de tubos verticales largos pueden considerarse variaciones de los métodos básicos de destilación. El nacimiento de su desarrollo coincide también con la década de los años cincuenta.

La desalinización ha contado con una larga prehistoria de ideas, mitos y una historia inferior a un siglo de realizaciones prácticas. A partir de los fuertes estudios que se han realizado en los sistemas de desalinización, se han desarrollado muchos métodos buscando la consolidación industrial. Estos métodos se dividen en dos grupos generales: procesos térmicos y no térmicos o se pueden dividir de acuerdo con el modo de separación del elemento, es decir, si el elemento separado es el agua o la sal. Pero a nivel industrial, los procesos de desalinización más utilizados son: vaporación súbita por efecto flash (MSF), destilación multiefecto (MED), termocompresión de vapor (TVC), compresión mecánica de vapor (CV), osmosis inversa (OI) y electrodiálisis (ED).

## **1.3 Hipótesis**

Es posible desarrollar un sistema de desalinización térmico al alto vacío con eyecto-condensación activado con energía solar térmica, para mejorar la capacidad y eficiencia de las tecnologías convencionales y que permita contrarrestar el problema de la disponibilidad de agua de las comunidades en zonas costeras.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 General**

Proponer, estudiar y desarrollar sistemas de desalinización al alto vacío con eyecto-condensación activados con energía solar térmica, para obtener una máquina con mayor capacidad y eficiencia, que permita contrarrestar el creciente problema la disponibilidad de agua de las poblaciones que viven en zonas costeras.

### **1.4.2 Específicos**

- Realizar una revisión del estado del arte de las tecnologías de desalinización térmica, enfatizando en los procesos térmicos de desalinización por evaporación de múltiple efecto y múltiple etapa flash.
- Generar propuestas de sistemas de desalinización activados con energía solar, buscando incorporar elementos pasivos, como lo son los sellos hidráulicos con tuberías tipo U, las columnas barométricas y el proceso de eyecto-condensación.
- Realizar estudio teórico operativo de las tecnologías de desalinización en simulador Aspen Plus.
- Validar el simulador con resultados reportados en la literatura.
- Realizar el estudio comparativo de las propuestas tecnológicas y en base a este definir cuál es la mejor opción en su condición de diseño.
- Redactar y escribir el documento de tesis de maestría.

## 1.5 Descripción general de la tesis

**Capítulo 1:** Se presenta el desglose de la problemática de la escasez del recurso hídrico potable de buena calidad en los panoramas internacional y nacional, además de los principales factores que se involucran en la misma, como son el cambio climático, la mala gestión del recurso y el incremento poblacional. De igual manera se presenta el planteamiento de una hipótesis y objetivos que proponen brindar soluciones a través del estudio, desarrollo y propuesta de nuevos sistemas de desalinización que provean el servicio de agua potable de una manera más eficiente y sustentable que las tecnologías presentes en el mercado. También se presentan los antecedentes más relevantes a lo largo de la historia en la búsqueda de combatir y mitigar la presente problemática del agua, así como la delimitación y alcances del presente proyecto.

**Capítulo 2:** Se muestran los fundamentos teóricos de la desalinización y la energía solar térmica, además de los principios operativos de los sistemas de desalinización y las tecnologías de activación termosolar. De igual manera se presentan las principales y más recientes configuraciones de los sistemas de desalinización, para mostrar el avance realizado hasta el momento por la comunidad científica y el área de oportunidad que existe para la mejora de estas tecnologías.

**Capítulo 3:** Se realiza el estudio teórico y operativo de simulación de las propuestas tecnológicas MED-CONV, MED-AV, HÍBRIDO MSF/MED-AV y MED-AV-BTA, con el software Aspen Plus, para mostrar la viabilidad técnica de cada una. Se presenta una sección para cada una de las propuestas tecnológicas, en la que se muestra la descripción física y operativa del sistema, el diagrama esquemático del mismo, la validación del simulador, el desglose y planteamiento de la metodología y el análisis y discusión de los resultados obtenidos. De igual manera se desarrolla un estudio comparativo entre las propuestas tecnológicas, para vislumbrar su potencial y definir cuál es la mejor operando en su condición de diseño.

**Capítulo 4:** Se presentan las conclusiones generales de cada propuesta tecnológica en base a los resultados obtenidos de los estudios operativos realizados en el capítulo anterior y del estudio comparativo. Se presentan los trabajos futuros que se recomiendan en esta tesis para potenciar la línea de investigación de la desalinización termosolar al alto vacío con eyecto-condensación.

# CAPÍTULO 2

## FUNDAMENTOS TEÓRICOS

---

En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos que rigen la naturaleza de la energía solar y la desalinización. Se muestra la disponibilidad del recurso solar en el mundo y en México; las diferentes tecnologías de captación solar y su acoplamiento con los procesos térmicos de desalinización. También se muestra la evolución de la desalinización a lo largo de la historia, así como la descripción de las tecnologías líderes en el campo de la desalinización.

### 2.1. Energía solar térmica

La energía que da sostén y vida a la Tierra es proveniente del Sol manifestándose como radiación, su flujo es conocido como irradiación y es la energía que en forma de radiación se integra o totaliza durante cierto tiempo en una superficie o zona (kWh/m<sup>2</sup>día). El sol es una esfera gaseosa, compuesta por un 74% de hidrógeno y 25% de helio; el restante 1% consta de oxígeno, nitrógeno, carbón, silicio, magnesio y calcio. Tiene un radio de aproximadamente  $6.96 \times 10^5$  km y un diámetro de aproximadamente 109 veces el de la Tierra (Wells, 1999). La estructura del Sol está dividida principalmente por cuatro partes: el núcleo, la superficie visible o fotosfera, y las dos capas de su atmósfera: la cromósfera y la corona (Benestad, 2006).

En el núcleo del Sol, la energía es producida por reacciones nucleares (fusión de cuatro átomos de hidrógeno en uno de helio, con una pequeña pérdida de masa). La fotosfera es la capa externa brillante que emite la mayor parte de la radiación. Consiste en una zona de gases ardientes de aproximadamente 300 km de grosor, donde se encuentra compuesta en un 90% de hidrógeno y 10% de helio, y su temperatura efectiva es del orden de los 6,000 K. Presenta unos desniveles con

pequeñas áreas brillantes llamados gránulos que tienen un promedio de 1,000 km de diámetro (Tejeda Martínez y Gómez-Azpeitia, 2015).

La cromósfera es la capa que continúa de la fotosfera. Es una capa delgada de gases incandescentes, con una temperatura de 10,000 K. Dentro de esta capa se pueden encontrar electrones y protones que escapan como una corriente llamada viento solar (con una velocidad de  $1.5 \times 10^6$  km/h) (Hidore y Oliver, 1993). Dicho viento solar da origen a la magnetósfera; es decir, crea un campo magnético en dos bandas a 3,000 y 16,000 km de altitud, conocidas como los cinturones de Van Allen (Barry y Chorley, 1992).

Desde el punto de vista energético, la masa solar que por segundo se irradia al espacio en forma de partículas de alta energía y de radiación electromagnética es aproximadamente de  $5.6 \times 10^{35}$  y de ella, la Tierra recibe en el exterior de su atmósfera un total de  $1.73 \times 10^{14}$  kW, o sea 1.353 kW/m<sup>2</sup>, que se conoce como constante solar y cuyo valor fluctúa en un +- 3% debido a la variación periódica de la distancia entre la Tierra y el Sol. No toda la energía proveniente de la constante solar llega a la superficie terrestre, en la siguiente figura 2.1 se puede observar que solo el 31% es absorbida por el suelo (Tejeda Martínez y Gómez-Azpeitia, 2015) (Fernandez Diez Pedro, 2019).

La actividad de los procesos nucleares que ocurren en el Sol y los factores geométricos que existen entre el Sol y la Tierra son los causantes de la variabilidad solar y dicha variabilidad solar permite las variaciones estacionales que se presentan en la Tierra. Para medir la energía que recibimos del Sol debemos considerar, que el resultado dependerá del día, la hora, el lugar y las condiciones atmosféricas. En la figura 2.2 se muestra la distribución de la radiación solar a nivel mundial. México al estar situado entre los paralelos 14 y 32 de latitud Norte, es de los países del continente americano que cuenta con mejor recurso de radiación solar durante todo el año, como se puede ver la figura 2.2.

La mayor parte del territorio mexicano presenta un alto potencial de energía solar para su aprovechamiento como energía útil. En la figura 2.3 se muestra el potencial de horas pico para las diferentes zonas de México. Se puede observar que las costas del mar de Cortes tienen gran potencia, del orden de 5-6 horas pico de insolación. Cuando los rayos solares inciden de manera perpendicular en los sistemas de captación de energía solar (se define en la sección 2.1.1) la

captación de energía es mayor, por lo anterior, estos sistemas deben tener una adecuada orientación en función del movimiento aparente del Sol y de la aplicación que se busque con la energía solar.

Para un sistema de producción de energía fotovoltaica la adecuada inclinación para un sistema fijo se encuentra aproximadamente a  $31^\circ$  al Sur (similar a la latitud de Mexicali  $32^\circ$ ), esto debido a que la demanda de energía tendrá que permanecer disponible durante todo el año. Sin embargo, para aplicaciones de enfriamiento por absorción, la inclinación debe ser de  $15^\circ$  aproximadamente porque la demanda de enfriamiento se requiere en verano y los rayos solares inciden en la superficie con una mayor altura solar, lo que hace que los sistemas de captación requieran de poca inclinación. Ahora, que, si se requiere calentamiento de agua el sistema de captación de energía solar, deberá estar a  $50^\circ$  aproximadamente, esto debido a que la incidencia de los rayos solares disminuye y se requiere que la superficie captadora de energía útil este más vertical ([González U., 2017](#)).

### **2.2. Tecnologías de captación solar térmica**

Un colector solar transforma la energía solar incidente en otra forma de energía útil. Son intercambiadores de calor que transforman la energía de la radiación solar incidente en energía interna como medio de transporte. En otras palabras, los colectores solares son dispositivos que absorben la radiación solar entrante, convirtiéndola en calor el cual es transferido hacia un fluido que está pasando a través del colector. Los principales fluidos que se utilizan en los sistemas captadores de energía solar son aire, agua, diferentes tipos de aceites térmicos y más recientemente los nanofluidos. La energía solar captada es llevada por medio del fluido caloportador a intercambiar calor con tanques de almacenamiento de energía o con el espacio a ser calentado.

Hay básicamente dos tipos de colectores solares: los que no son de concentración o estacionarios y los de concentración. Los colectores sin concentración tienen la misma área de intercepción y absorción de la radiación solar, mientras que los colectores solares de concentración, usualmente tienen un seguidor de sol y utilizan superficies de reflexión cóncavas que interceptan y focalizan el haz de radiación hacia una menor área receptora. Los colectores de concentración son adecuados para aplicaciones de altas temperaturas. Los concentradores de calor también se pueden clasificar por aquellos que utilizan cubierta o los que son abiertos. En la

siguiente Tabla 2.1 se muestra una serie de colectores solares que se encuentran disponibles en el mercado ([Kalogirou, 2003](#)), ([Soteris, 2014](#)).

Al comparar la energía solar con las fuentes convencionales de energía, debe hacerse en los siguientes términos básicos; reservas o disponibilidad, precio, calidad ecológica, inversión inicial, tecnología, mantenimiento, requerimientos de espacio, comodidad en el manejo, transporte y distribución ([González U., 2017](#)). El Sol estará radiando energía a la superficie terrestre durante billones de años, por lo que se puede considerar una fuente inagotable y sin costo. En México, si se considera lo comentado anteriormente, la energía solar es una de las mejores fuentes de energía debido al gran potencial que presenta, además de ser la responsable de todas las demás fuentes de energías renovables.

Otras de las ventajas de la energía solar es que es una energía limpia y no contamina, no plantea problemas de transporte y distribución al tenerse disponible en el lugar de aplicación, sus sistemas tienen prácticamente nulo mantenimiento, es cómoda y segura su utilización ([González U., 2017](#)). La energía solar al transformarse en energía química, mecánica o eléctrica se puede aplicar en una gran variedad de procesos y aplicaciones, como la producción de electricidad, desalinización de agua, calefacción y aire acondicionado, bombeo, cocción, conservación de alimentos por refrigeración, secado de productos de pesca, frutas y verduras, calentamiento de agua, generación de vapor y una infinidad de usos industriales adicionales.

El continuo incremento del costo de los combustibles fósiles ha hecho que la investigación científica se enfoque en el desarrollo de nuevos sistemas de captación de la energía solar, por otra parte, la principal ventaja de la utilización de la energía solar contra las tecnologías convencionales es su bajo impacto ambiental.

La principal desventaja de los sistemas de captación solar es su alto costo de inversión inicial y que depende fuertemente de la variabilidad de la energía solar. La barrera de la variabilidad solar, ha sido contrarrestada con sistemas de almacenamiento térmico y calentamiento auxiliar, permitiendo que se tengan procesos con operación continua durante todo el día. Caber mencionar que el almacenamiento térmico eleva la inversión inicial; sin embargo, un buen dimensionamiento del campo de colectores solares y almacenamiento térmico hace que el retorno de la inversión inicial se reduzca.

## 2.2. Desalinización térmica

La desalinización consiste en el proceso de retirar las sales del agua de mar o de las aguas salobres, para convertirlas en aguas potables o útiles para actividades humanas. El agua de mar presenta un rango de salinidad media de 35,000 ppm (partes por millón) del total de sólidos disueltos (T.S.D.), mientras que las aguas salobres, contienen de 5,000 a 10,000 ppm del T.S.D., según la Organización Mundial de la Salud (OMS).

### 2.2.1. Agua de Mar

La salinidad del agua de mar varía en función de las condiciones ambientales y topográficas que se presentan en cada región. Por ejemplo, los mares cerrados, entre los que destaca el caso del Mar Muerto, tienen mayor salinidad que los mares abiertos y los océanos. Los mares que se encuentran en zonas con altas temperaturas o que reciben altas tasas de descargas de agua salina, tendrán sin duda un mayor grado de salinidad. Debido a lo anterior es que, la salinidad del agua del Golfo cerca de las líneas costeras de Kuwait, Arabia Saudita y los Emiratos Árabes Unidos, alcanza valores cercanos a los 50,000 ppm; por otro lado, la salinidad del agua del Golfo cerca de las costas occidentales de Florida, USA, puede alcanzar valores por debajo de las 30,000 ppm, debido a la gran cantidad de agua dulce que recibe de los ríos y manantiales de esa zona (El-Dessouky, 2002). En la tabla 2.1 elaborada por (López-Zavala, 2019), se presenta la salinidad para diferentes mares y Océanos.

**Tabla 2.1:** Valor medio de las sales totales disueltas en varios mares y océanos (López-Z., 2019).

Mar u Océano	T.D.S. (ppm)	Mar u Océano	T.D.S. (ppm)
Mar Báltico	7,000	Océano Índico	33,800
Mar Caspian	13,500	Mediterráneo cerca de Creta	37,900
Mar Negro	20,000	Mediterráneo	39,000
Mar Blanco	28,000	Mar Rojo	43,000
Atlántico Norte 1	29,000	Golfo Árabe	50,000
Mar Adriático	31,400	Bahía de tiburón asutraliano	70,000
Océano Pacífico	33,600	Golfo de Kara Bogas	164,000
Atlántico del Sur	36,000	Mar Muerto	220,000
Atlántico Norte 2	36,200		

**Tabla 2.2:** Clasificación del agua en función al nivel de concentración de sal. Elaborado de (Cipollina y cols., 2009).

Tipo	Total de sólidos disueltos	Nota
Agua dulce	Hasta 1,500	Composición química variable
Agua salobre	1,500 - 10,000	Composición química variable
Agua salada	> 10,000	Composición química variable
Agua de mar	10,000 - 50,000	Composición química fija
Estándar del agua de mar	35,000	Composición química fija

Por su parte, la tabla 2.2 muestra una clasificación sencilla de las aguas naturales en función a su nivel de salinidad. Las aguas dulces pueden tener una concentración de sal de hasta 1,500 ppm, las aguas salobres presentan una salinidad en el rango de 3,000-10,000 ppm, mientras que la salinidad del agua de mar suele oscilar entre 10,000 ppm (como en el caso del Mar Báltico) hasta 50,000 ppm (como en el Golfo Árabe). La baja salinidad puede deberse a la presencia de afluencia de ríos y al deshielo de los casquetes polares, así como a la abundancia de precipitaciones. Por otro lado, la alta salinidad puede ser el resultado de la lejanía de la tierra y de las altas temperaturas que promueven la evaporación.

La composición del agua de mar se basa en los iones de  $Na^+$ ,  $Ca^{++}$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{++}$ ,  $(SO_4)$  y  $Cl^-$  (Sodio, Calcio, Potasio, Magnesio, Sulfato y Cloro, respectivamente). Los principales componentes químicos que se encuentran en el agua de mar son esencialmente el sodio (30%) y el cloruro (55%), lo que representa el 85% del contenido total de sólidos disueltos del agua de mar. El sulfato y el magnesio también son abundantes, con un porcentaje de casi el 8% y 4%, respectivamente. Cabe señalar que, aunque la salinidad del agua de mar puede variar según la región concreta del mundo, la composición porcentual del agua de mar es esencialmente constante en todo el mundo, es decir, las proporciones de los principales componentes son constantes. Además, en la tabla 2.3 se muestra que, junto a los principales iones que componen el agua de mar, también se encuentran una gran variedad de materia fina en suspensión que incluyen arena, arcilla, microorganismos, virus y materia coloidal. El tamaño de estos compuestos varía en un rango de  $5 \times 10^{-2}$  a  $0.15 \mu m$  (El-Dessouky, 2002).

**Tabla 2.3:** Composición estándar del agua de mar. Elaborado de (Cipollina y cols., 2009).

Componente	Composición	Porcentaje del total del contenido de sal (%)	Concentración (ppm)
Cloruro	$Cl^-$	55.0	19,345
Sodio	$Na^+$	30.6	10,752
Sulfato	$(SO_4)^{2-}$	7.6	2,701
Magnesio	$Mg^{2+}$	3.7	1,295
Calcio	$Ca^{2+}$	1.2	416
Potasio	$K^+$	1.1	390
Bicarbonato	$HCO_3^-$	0.4	145
Bromuro	$Br^-$	0.2	66
Borato	$BO_3^{3-}$	0.08	27
Estroncio	$Sr^{2+}$	0.04	13
Fluoruro	$F^-$	0.003	1
Total		99.9	35,151.00

### 2.2.2. Historia y evolución de los procesos de desalinización.

La desalinización no es un concepto de reciente nacimiento, de hecho, se tienen las primeras referencias desde los años de Cristo. Para ser concreto se registró que, en el año 348-322 a.C., Aristóteles, describió el ciclo del agua; mencionó que el ciclo del agua es una gran planta de destilación abierta de energía solar en un ciclo operacional perpetuo (Aguilar-Jiménez y cols., 2019).

Alejandro de Afrodisias, al comentar la Meteorológica de Aristóteles, describe por primera vez el procedimiento de destilación como método de obtención de agua dulce a partir de agua de mar. En la Edad Media varios autores trataron el problema de la desalinización del agua de mar, entre los que se puede citar a John Gaddesden, que en su obra Rosa medicine describe cuatro métodos para la desalinización del agua de mar. En la Edad Moderna se multiplican las observaciones científicas debido a los descubrimientos geográficos, la expansión del comercio y los largos viajes a través de los mares. Ello implica un nuevo avance en el problema de la desalinización del agua, especialmente en lo que se refiere al abastecimiento de las tripulaciones de los buques. Andrés Laguna, médico personal del Rey de España Carlos I, en sus comentarios escritos sobre la materia médica de Dioscórides, cita diferentes métodos de desalinización. Giovan

Battista Della publicó en 1589 la segunda edición de su *Magiae naturalis* en veinte tomos y en el último describe los métodos de obtención de agua dulce a partir de agua salina conocidos en la época. Este autor tiene el mérito de haber hecho un estudio crítico de dichos métodos y comprobar experimentalmente algunos.

A comienzos del siglo XIX ya eran conocidos los principios de los métodos de desalinización que podemos llamar naturales, concretamente la evaporación solar, la destilación y la congelación. El uso industrial de estos principios tuvo en cambio, un lento desarrollo, excepto en las instalaciones de destilación para barcos, cuyo crecimiento fue relativamente rápido. La destilación tuvo un primer impulso de desarrollo en 1884 cuando James Weir creó, con destino a barcos, una planta de evaporación que utilizaba la energía residual del vapor de salida de la caldera. Desde 1884 hasta 1956 el tipo de destilación de tubos sumergidos sirvió de base a la mayoría de las instalaciones marinas de esta naturaleza, y en la época final a instalaciones terrestres. Las primeras instalaciones de este tipo, de las que se tiene noticias, son una en Egipto, instalada en 1912, cuya producción era de 75 m<sup>3</sup>/día; otra en Stears, Kentucky, montada en 1917 con una producción de 150 m<sup>3</sup>/día, y otras en las islas de Aruba y Curazao, de 6,500 m<sup>3</sup>/día, instaladas en el periodo 1956-1958. Fue precisamente el aumento de capacidad de estas plantas terrestres lo que llevó al abandono del principio de tubos sumergidos, ya que el sistema era difícilmente adaptable a capacidades mayores.

El desarrollo de la evaporación súbita se inicia con el fin de las instalaciones de tubos sumergidos, a las que prácticamente viene a sustituir. El punto de comienzo de la era industrial de la evaporación súbita se puede enmarcar en 1956, en que la compañía Westinghouse comenzó la instalación en Kuwait de una planta de 2,273 m<sup>3</sup>/día. Los sistemas de compresión de vapor y de tubos verticales largos pueden considerarse variaciones de los métodos básicos de destilación. El nacimiento de su desarrollo coincide también con la década de los años cincuenta.

La desalinización ha contado con una larga prehistoria de ideas, mitos y una historia inferior a un siglo de realizaciones prácticas. A partir de los fuertes estudios que se han realizado en los sistemas de desalinización, se han desarrollado muchos métodos buscando la consolidación industrial. Estos métodos se dividen en dos grupos generales: procesos térmicos y no térmicos o se pueden dividir de acuerdo con el modo de separación del elemento, es decir, si el elemento separado es el agua o la sal.

# CAPÍTULO 3

## ESTUDIO DE SISTEMAS AVANZADOS DE DESALINIZACIÓN TÉRMICA

---

En este capítulo se presenta de forma detallada el desarrollo del estudio teórico de simulación con el software Aspen Plus de las propuestas tecnológicas MED-CONV, MED-AV, MSF/MED-AV y MED-AV-BTA, con la finalidad de mostrar la viabilidad técnica de cada una de ellas. En primera instancia se hace una descripción física y operativa de las propuestas tecnológicas, se presenta la metodología y las consideraciones aplicadas en cada estudio, además se presenta la validación de la simulación, así como el análisis e interpretación de los resultados en cada una de las simulaciones. También se desarrolla un estudio comparativo entre las propuestas tecnológicas, para vislumbrar su potencial y definir bajo que escenarios cada propuesta puede ser más pertinente.

### 3.1. Sistema de desalinización MED convencional (MED-CONV)

En esta sección se analiza y evalúa el comportamiento del sistema convencional de desalinización por evaporación de múltiple efecto (MED), el cual es activado con energía solar térmica. El proceso MED consiste en una serie de efectos consecutivos a diferentes presiones y temperaturas, que permiten que el agua de mar de alimentación se evapore sin la necesidad de suministrar calor adicional tras el primer efecto (generador).

#### 3.1.1 Descripción del sistema

En la figura 3.1 se presenta el esquema del sistema de desalinización MED convencional (MED-CONV), el cual cuenta con 14 efectos (n) y 13 precalentadores (pc); esto último debido a

que es conocido que una MED con mayor integración energética interna es más eficiente que una MED sin precalentamiento.

De acuerdo con la figura 3.1, la bomba de agua de mar de alimentación (BAM) succiona a la corriente (1) proveniente del recipiente de agua de mar, convirtiéndola en la corriente (2) y la lleva hacia el primer efecto de la MED como la corriente (18). Previamente la corriente (2) es dirigida hacia los precalentadores, para recibir el 100% del calor latente de condensación del vapor producido por flasheo, desde el efecto trece hasta el segundo efecto de la MED, dado a que el precalentamiento en el primer efecto se lleva a cabo con un porcentaje del vapor producido por ebullición. Con lo anterior se consigue el mínimo de servicios de calentamiento externo en el generador (GEN).

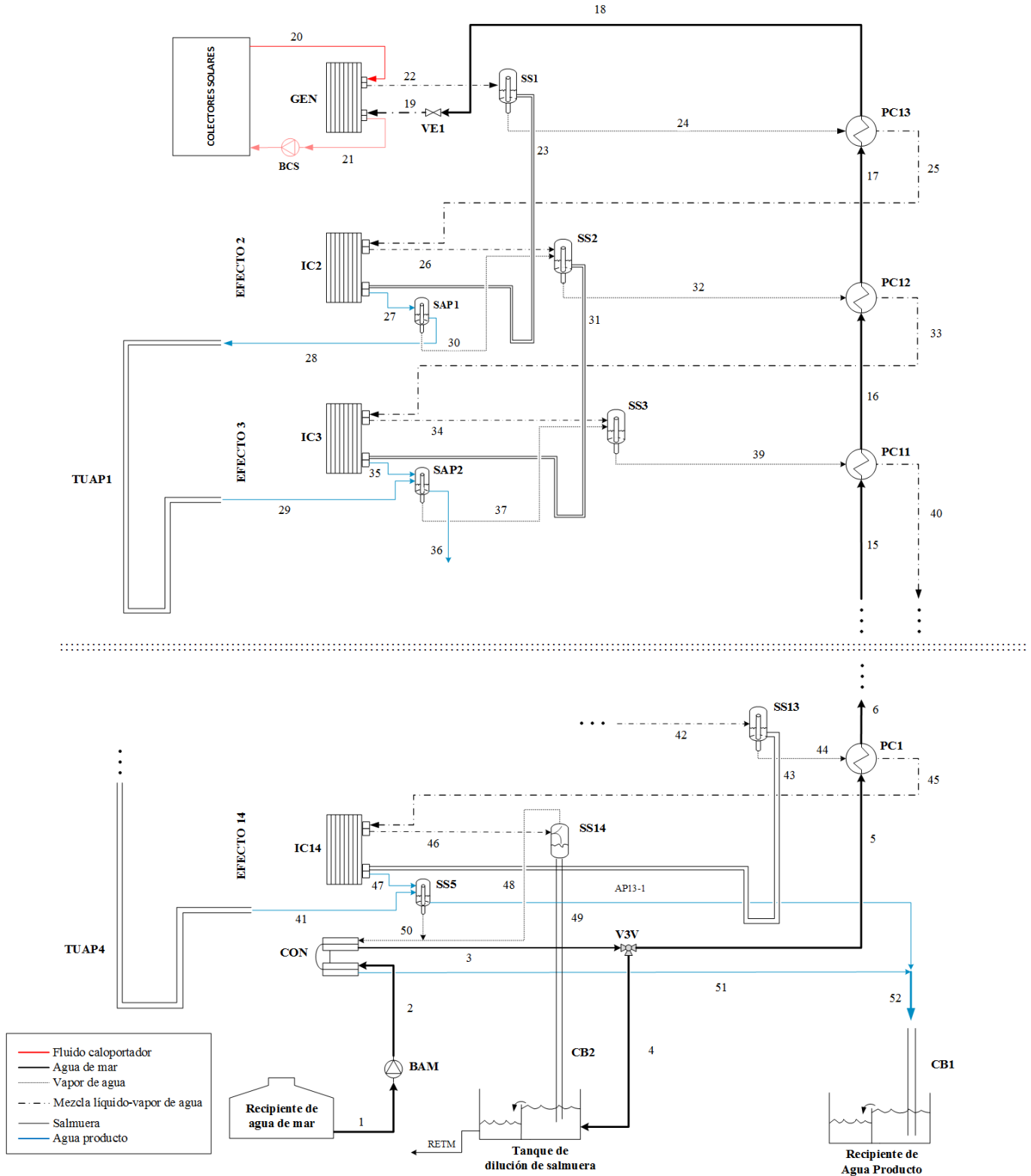
La corriente (18), después de recibir todo el calor de precalentamiento, pasa por una válvula de expansión (VE1) para bajar súbitamente su presión hasta la presión de saturación del primer efecto, quedando como un líquido subenfriado (19). En estas condiciones, la corriente (19) ingresa el GEN o primer efecto de la MED, donde recibe el calor del fluido caloportador proveniente del campo de concentradores solares para elevar su temperatura hasta quedar como una corriente en dos fases (22) a la salida del GEN, y en esta condición entrar a un separador líquido-vapor (SS1) resultando en las corrientes de salmuera y vapor (23) y (24) respectivamente.

La corriente de salmuera (23) es dirigida al evaporador del segundo efecto (IC2) de la MED, ingresando a través de una tubería en forma de U, la cual permite tener un sello hidráulico para mantener la diferencia de presión que existe entre el efecto 1 y efecto 2. Cuando la corriente (23) pasa de tener la presión del efecto 1 a la del siguiente efecto, esta disminuye su presión y temperatura de saturación, convirtiéndose en una corriente en dos fases. En esta condición ingresa al segundo evaporador (IC2). Por otro lado, el vapor de agua (24) ingresa al (IC2) y al tener mayor temperatura que la corriente (23), el vapor le cede su calor latente hasta condensarse y convertirse en el primer condensado de agua producto (27) de la MED. La corriente (27), se unirá con el agua producto de los efectos posteriores. La salmuera (26) que sale del (IC2) y que se encuentra en dos fases, es dirigida al separador (SS2) en donde se separan las corrientes (31) y (32). La corriente de vapor (32) ingresa al precalentador 13 (PC13) para ceder un porcentaje de su calor latente y con esto terminar de precalentar al agua de mar (17). En esta condición es dirigida al evaporador del

tercer efecto (IC3). Por otra parte, la salmuera (31) es dirigida por una tubería U hacia el (IC3) del tercer efecto. Lo ocurrido en el efecto 2, sucede en los posteriores efectos hasta el efecto 13.

Finalmente, el vapor generado en el último efecto por ebullición y flasheo (50) se condensa en el condensador final (CON), transfiriendo su calor latente al agua de mar (2) que ingresa al condensador. El agua de mar (3) que sale con una mayor temperatura del CON se divide en las corrientes de agua de mar de retorno y la que se dirige a la MED, (4) y (5) respectivamente. La corriente (5), es el flujo necesario de agua de mar de alimentación que se bombea al primer efecto de la MED pasando previamente por los precalentadores; por su parte AMRET es el flujo restante de agua de mar que se retorna al mar.

El agua producto de todos los efectos se comunica por medio de tubos en forma de U, con los que se logra mantener la diferencia de presión entre ellos. Este proceso se repite hasta el último efecto (efecto 14). El total de agua producto que se obtiene de los catorce efectos del sistema (52) es dirigida a la columna barométrica CB1 para mantener el vacío en el sistema y posteriormente se deposita en el recipiente de agua producto para su extracción en condiciones atmosféricas. De la misma manera, la corriente de salmuera (49) que sale del último efecto, es llevada al contenedor de salmuera a través de la columna barométrica CB2, para posteriormente ser extraída del sistema con una presión atmosférica y ser dirigida a otro tipo de subproceso, postratamiento y/o de nueva cuenta al mar.



**Figura 3.1:** Diagrama esquemático del sistema de desalinización MED convencional, activado con energía termosolar.

### 3.1.2. Metodología de estudio

En la figura 3.2 se muestra el diagrama de la metodología general para la generación de la propuesta tecnológica y el procedimiento de simulación en Aspen Plus, mediante el cual se realizó el estudio para mostrar la viabilidad técnica del sistema bajo diferentes condiciones de operación. Una vez generada la propuesta tecnológica y decidir usar el software Aspen Plus, fue necesario ver en Aspen Plus cuales eran los módulos más adecuados, definir las variables de diseño, establecer el tipo de propiedades a calcular, determinar las variables críticas y explorar el comportamiento operativo para encontrar las mejores condiciones de operación y dimensionamiento del sistema. Se estudió en forma especial las variables que tienen un efecto directo en la capacidad y eficiencia.

Para realizar la simulación en Aspen Plus, cuando se tienen corrientes de recirculación en el sistema, resulta crítico definir e inicializar las variables iterativas del block de convergencia, las cuales definen el procedimiento de cálculo iterativo y por consecuencia la solución final de cada simulación del estudio paramétrico. Para realizar la simulación del comportamiento operativo del sistema se asumen las siguientes consideraciones:

- El sistema de desalinización MED convencional opera en estado estable.
- La presión del primer efecto de la MED es la presión correspondiente a una temperatura de saturación de 68 °C (Top Brine Temperature **TBT**).
- La presión del último efecto de la MED es la presión correspondiente a una temperatura de saturación de 35 °C (Bottom Brine Temperature **BBT**).
- Se consideró una temperatura mínima de aproximación de 2.8 °C entre las corrientes de vapor (50) y agua de mar (3) en el condensador del último efecto de la MED. De la misma manera, para las corrientes (20) y (22) del generador se consideró una temperatura de aproximación de 2.8 °C.
- El flujo másico del fluido caloportador se consideró igual al utilizado por la planta solar experimental de Almería por Palenzuela (Palenzuela y cols., 2014). El flujo del fluido caloportador  $m_{20} = 0.0822 \text{ kg/s}$ . A su vez los flujos de agua de mar de alimentación al condensador y a la MED (corrientes 2 y 5 respectivamente), son  $m_2 = 4.996 \text{ kg/s}$  y  $m_5 = 0.95 \text{ kg/s}$ .

**Figura 3.2:** Diagrama de la metodología general y del procedimiento de simulación en Aspen Plus.

- Se consideró una bomba para agua de mar de flujo variable (BAM), en donde el flujo de agua de mar (2) debe ser el necesario para condensar la corriente de vapor de agua (50) que proviene del efecto 14 de la MED. La corriente de agua de mar (3) sale del condensador a una condición de temperatura de 32.2 °C, con lo que se cumple con la temperatura de aproximación de 2.8 °C respecto a los 35 °C que se tienen en el último efecto del sistema.

Para evaluar el efecto de la desalinización MED-CONV, se utilizan dos indicadores, el coeficiente de rendimiento (Gain Output Ratio **GOR**) y la relación de flujo (Recovery Ratio **RR**). El GOR, representa una relación de la cantidad de agua producida ( $m_{52}$ ) entre el vapor de activación requerido ( $m_{20}$ ). El indicador RR, es una relación que representa la cantidad de agua producto ( $m_{52}$ ) respecto al agua de mar de alimentación suministrada a la MED ( $m_5$ ). Los indicadores se presentan en las siguientes ecuaciones:

$$GOR = \frac{m_{52}}{m_{20}} \quad (3.1)$$

$$RR = \frac{m_{52}}{m_5} \quad (3.2)$$

### 3.1.3. Validación de la simulación

Aspen Plus, es una herramienta de simulación utilizada principalmente para el diseño, optimización y monitoreo de operación de diferentes procesos dentro de la industria química, debido a que es capaz de calcular las propiedades termodinámicas de fluidos puros y mezclas. Además, presenta una gran cantidad de equipos y componentes previamente validados, facilitando con esto su operación y funcionamiento. Por esto y más, es que la simulación del sistema de desalinización MED convencional se realizó con el software Aspen Plus.

Para llevar a cabo la validación del sistema de desalinización MED-CONV, se utilizaron los datos experimentales reportados por (Palenzuela y cols., 2014), los cuales corresponden al comportamiento de una planta solar de desalinización en Almería, el cual cuenta con el mismo

número de efectos que el sistema utilizado para la validación. Se utilizó la composición del agua de mar reportada por (Zheng, 2017) y (Mejía Mercado y cols, 2014), respectivamente.

En la Tabla 3.1, se presenta la comparación de resultados obtenidos de la simulación, al utilizar los datos experimentales reportados por (Palenzuela y cols, 2014). Se puede ver que el error más grande que se presenta en el indicador GOR, con un porcentaje de error de -6.33 %. Esto es debido a que, para la obtención del mismo, no se conoce con certeza el método de cálculo utilizado y es probable que existan diferencias en el valor del calor latente que involucra la ecuación. Sin embargo, puede observarse que en la mayoría de resultados de la simulación tienen una desviación con respecto a los resultados experimentales menor al 3 %, por lo que se concluye que la simulación en Aspen Plus, al utilizar los datos experimentales reportados por (Palenzuela et al., 2014), es satisfactoria. Esta validación también es válida para las propuestas tecnológicas mostradas en las secciones 3.2, 3.3 y 3.4, debido a que presentan procesos similares al que se está validando en esta sección.

**Tabla 3.1:** Validación con respecto a los datos experimentales de Palenzuela y cols.

<i>Parámetros</i>	<i>Unidades</i>	<i>P. Palenzuela (2014)</i>	<i>Aspen Plus</i>	<i>Error</i>
<b>Temperatura del agua de mar a la entrada del condensador</b>	°C	25.00	25.00	0.00%
<b>Temperatura del agua de mar alimentada a la salida del condensador</b>	°C	32.3	32.3	0.00%
<b>Flujo másico del agua de mar de alimentación</b>	kg/s	2.22	2.22	0.00%
<b>Flujo másico del vapor de activación</b>	kg/s	0.0822	0.0822	0.00%
<b>Capacidad de agua producto</b>	kg/s	0.8288	0.8476	<b>-2.27%</b>
<b>GOR</b>	kg/s	9.70	10.31	<b>-6.33%</b>
<b>RR</b>	kg/s	37.50	38.19	<b>-1.84%</b>

### 3.1.4 Análisis y discusión de resultados

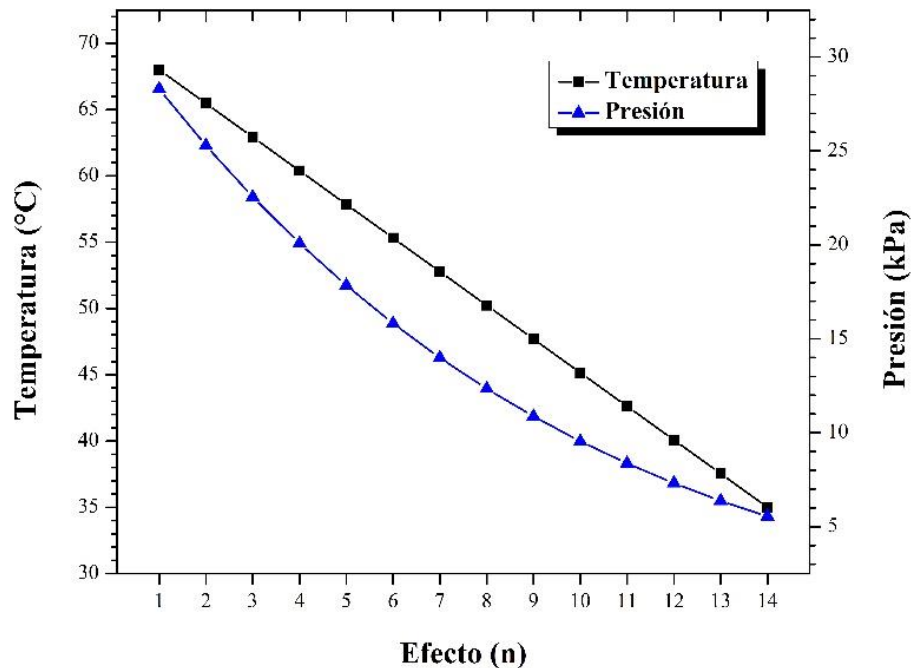
La operación del sistema de desalinización MED convencional, está sujeta a las intermitencias del recurso solar, a la variación de temperatura y concentración del agua de mar. Por lo anterior, la viabilidad técnica o comportamiento operativo del sistema se realizó estudiando el efecto que tiene la variación del flujo de agua de mar de alimentación en la capacidad total del sistema y su repercusión en los indicadores de eficiencia GOR y RR.

Acorde a la metodología descrita se realizó el diagrama de proceso en Aspen Plus, donde se muestran todas las corrientes y componentes utilizados. Se consideró una temperatura de aproximación de 2.8 °C entre la temperatura del agua de mar a la salida del condensador (3) y la temperatura del vapor del último efecto del sistema MED-CONV (50); además de considerar un delta mínimo de 2.5 °C en la temperatura de aproximación de cada uno de los evaporadores y precalentadores.

Con el propósito de evaluar el comportamiento del sistema MED convencional bajo diferentes condiciones de flujo de agua de mar de alimentación, se establecieron como valores constantes, el calor de activación en el GEN de 191.61 kW, la temperatura del vapor de activación de 70.8 °C, la Top Brine Temperature (TBT) de 68 °C y la concentración del agua de mar de alimentación de 35,000 ppm, como se muestra en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2:** Datos de entrada del sistema MED convencional (MED CONV)

Número de efectos ( $n$ )	14	
Número de precalentamientos ( $PC$ )	13	
Temperatura del agua de mar a la entrada del sistema ( $T_{cw, in}$ )	25.0	°C
Temperatura del agua de mar a la salida del condensador ( $T_{cw, out}$ )	32.3	°C
Concentración de sal del agua de mar de alimentación ( $X_f$ )	35,000	ppm
Flujo másico del vapor de activación ( $M_s$ )	0.0822	kg/s
Temperatura del vapor de activación ( $T_s$ )	70.8	°C
Calor externo de activación ( $Q_{gen}$ )	191.61	kW
Temperatura del agua de mar a la entrada del primer efecto ( $TBT$ )	68.0	°C
Rango de la cascada de temperaturas del sistema	68 - 35	°C



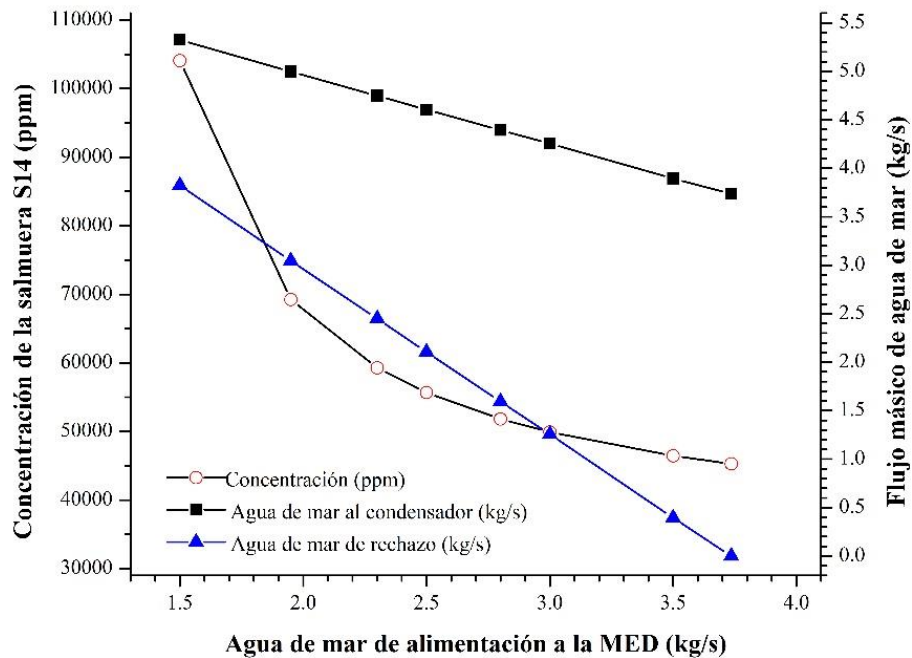
**Figura 3.3:** Perfiles de presión y temperatura de operación del sistema MED convencional.

Como se mencionó anteriormente, el sistema MED convencional consiste en una serie de efectos que operan en una cascada de presión y temperatura descendente, tal y como se muestra en la figura 3.3, lo que permite que el agua de mar de alimentación se evapore en cada efecto sin la necesidad de aportar calor adicional externo tras el suministrado en el generador (primer efecto).

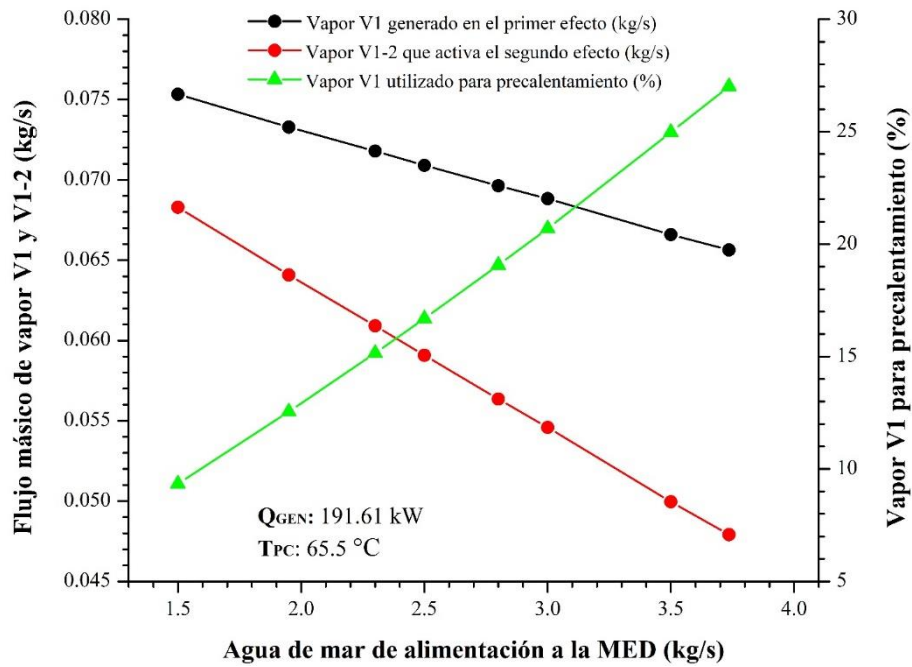
En la figura 3.4 se muestra el efecto de la variación del agua de mar de alimentación que ingresa al sistema MED-CONV en las siguientes corrientes: 1) agua de mar a la entrada del condensador (2) y 2) agua de mar de rechazo (4). El flujo másico del agua de mar alimentado condensador, es el necesario para asegurar la condensación de la corriente de vapor de agua del último efecto (50). Una vez que la corriente de agua de mar (2) logra condensar totalmente la corriente de vapor (50), pasa por una válvula de 3 vías y se divide en 2 corrientes: 1) agua de mar de alimentación a la MED y agua de mar de rechazo. El agua de rechazo, es la resultante entre el agua de mar que se requiere en el condensador (2) y el flujo mínimo de agua de mar (5) que se necesita para operar correctamente los 14 efectos del sistema con las consideraciones establecidas. Por lo tanto, se puede observar que conforme se aumenta el flujo de agua de mar que se dirige a los efectos (5), es necesario una menor cantidad de agua de mar a la entrada del condensador, dado a que la generación de vapor en el último efecto se ve disminuida, esto debido a que al aumentar el flujo de la corriente (5) y mantener una fuente externa de calor constante, el agua de mar llega

cada vez con un mayor sub-enfriamiento a la entrada del generador, requiriendo que un mayor porcentaje del calor transferido para la activación se vea reflejado como calor sensible en lugar de calor latente para cambio de fase, lo que provoca que se tenga una menor generación de vapor en la cascada desde el primer efecto. De igual manera, lo anterior lleva como consecuencia que el flujo de agua de rechazo (4) también disminuya conforme se incrementa el agua de mar alimentada a los efectos de la MED, llegando al punto dentro de la exploración en la que ya no se presenta flujo másico en esta corriente de rechazo debido a que todo el flujo de agua de mar necesario a la entrada del condensador es también el requerido por el sistema MED-CONV para poder operar correctamente en cada uno de los 14 efectos.

Por otra parte, en la misma figura, se observa el efecto que tiene la variación del flujo másico del agua de alimentación en la concentración de la salmuera a la salida del último efecto (49), se observa que conforme se aumenta el flujo de agua de mar de alimentación, la concentración en la salmuera disminuye. Con respecto a la concentración de la salmuera, hay que cuidar dos aspectos; 1) que no se presenten precipitaciones en los equipos y 2) disminuir al máximo el impacto ambiental por retornar al mar un fluido muy concentrado. El nivel de concentración de la salmuera en el último efecto, se recomienda que sea menor a las 70,000 ppm (Zheng, 2017).



**Figura 3.4:** Efecto de la variación del agua de mar de alimentación a la MED en las diferentes corrientes de agua de mar y su efecto en la concentración de la salmuera.



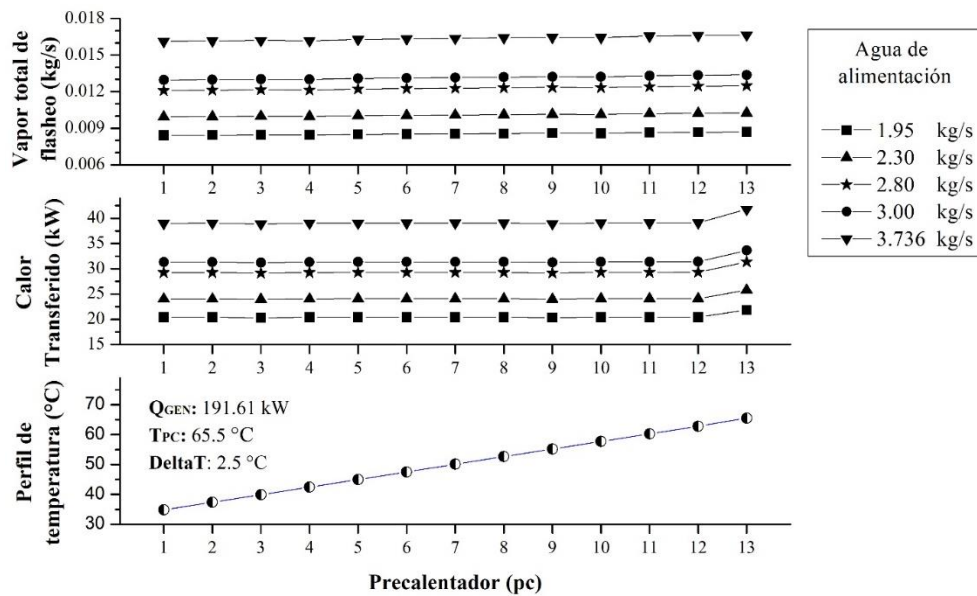
**Figura 3.5:** Efecto de la variación del agua de mar de alimentación a la MED en la generación y utilización del vapor del primer efecto (24).

En la figura 3.5 se puede apreciar como el vapor de agua (24) generado en el primer efecto del sistema MED-CONV disminuye cuando se aumenta el flujo de agua de alimentación (5) y se mantiene un calor constante en el generador de 191.61 kW. De la misma manera se puede apreciar que conforme se incrementa el flujo de la corriente (50), se requiere un mayor porcentaje del vapor (24) para conservar el máximo precalentamiento posible en el agua de mar alimentada a los efectos (18) y llevarla a la temperatura de 65.5 °C. Esta es la máxima temperatura que puede alcanzar la corriente de agua de mar, debido a que como se mencionó en las consideraciones, se respeta un delta mínimo de 2.5 °C en la temperatura de aproximación en cada uno de los efectos y precalentadores.

El comportamiento operativo que se tiene en los precalentadores al variar el flujo de alimentación de agua de mar se observa en la figura 3.6, en donde es posible apreciar los flujos de vapor utilizado para el precalentamiento en cada efecto, el calor transferido y el perfil de temperaturas obtenidos de cada uno de los precalentadores. El sistema convencional propuesto, opera bajo el principio de la utilización del 100 % del vapor generado por flasheo de la salmuera

y agua producto para precalentamiento del agua de mar, además de la utilización de un porcentaje del vapor generado por ebullición en el primer efecto (24). En relación al flujo de vapor generado por flasheo, se puede apreciar que éste aumenta conforme se tiene una mayor alimentación de agua de mar al sistema, debido a que si bien los porcentajes del vapor flasheado que se desprenden de la salmuera en cada efecto son los mismos para cada condición de flujo de alimentación, los flujos máxicos del vapor generado por flasheo aumentan por el simple hecho de tener una mayor masa de agua. Esto a su vez resulta en un incremento proporcional en el calor transferido para cada uno de los precalentadores. Por último, en la misma figura, se puede observar que el perfil de temperatura en el precalentamiento se mantiene constante para cada uno de las condiciones de flujo estudiadas, debido a que, a pesar del incremento en los flujos de vapor generado por flasheo, el agua de mar de alimentación incrementa de manera proporcional. El contar con precalentamiento del agua de mar en un sistema MED convencional, brinda una mayor integración másica y energética, además de reducir los requerimientos de energía externa en el generador e incrementar la capacidad de agua producto.

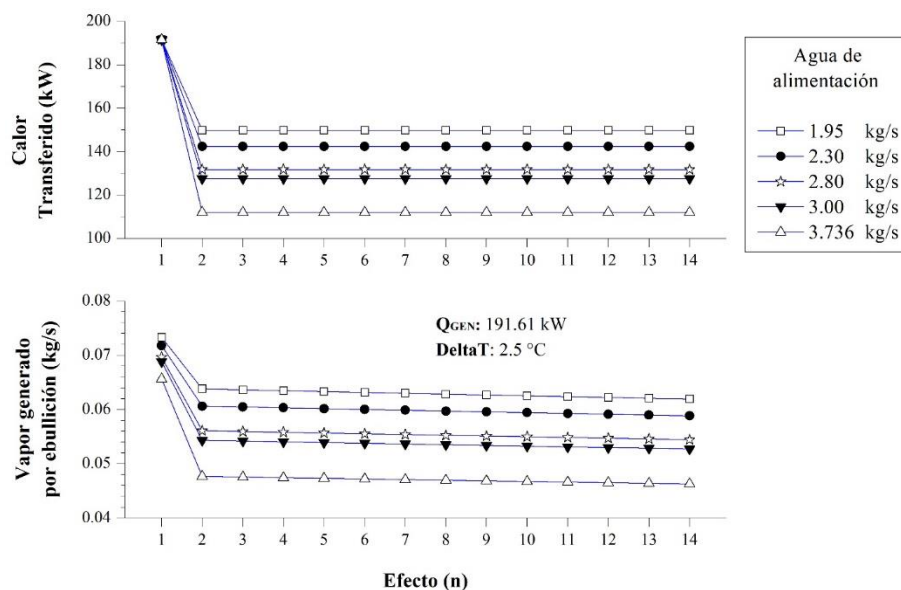
A su vez, la figura 3.7, muestra el comportamiento térmico y operativo de cada uno de los efectos. Se puede observar que a diferencia del vapor generado por flasheo, el cual incrementa



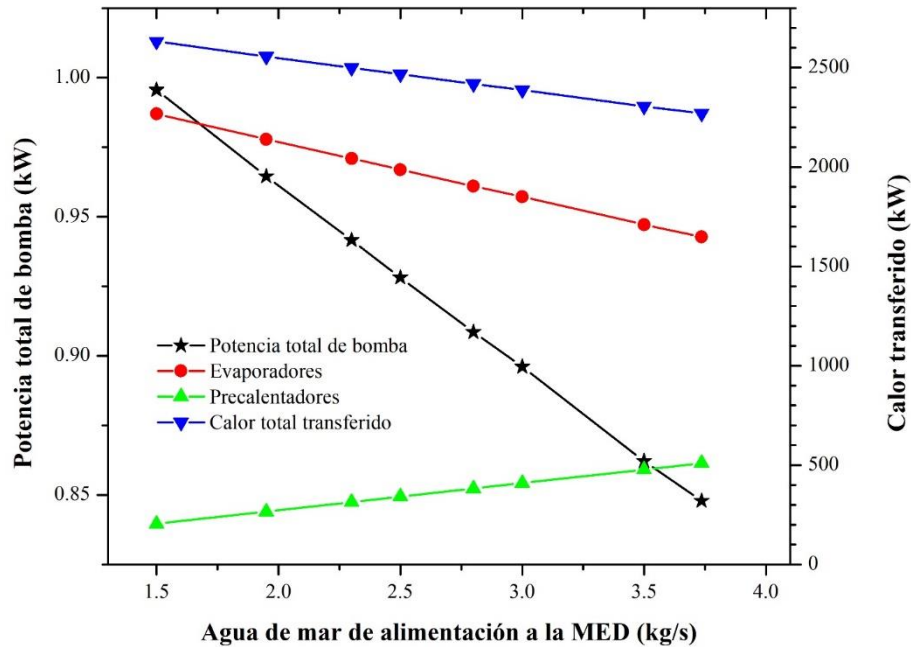
**Figura 3.6:** Comportamiento operativo de los precalentadores del sistema MED convencional al variar el flujo de alimentación de agua de mar.

conforme se aumenta el agua de alimentación a la MED, el vapor generado por ebullición o por la adición de calor, disminuye conforme la alimentación incrementa, esto debido a lo que se mostró y comento anteriormente en la figura 3.5, que conforme se aumenta el flujo de alimentación (5) y mantener una fuente de calor constante en el generador, el agua de mar llega cada vez con un mayor sub-enfriamiento a la entrada del generador, requiriendo que un mayor porcentaje del calor para la activación sea transferido calor sensible en lugar de calor latente para cambio de fase, lo que provoca que se tenga una menor generación de vapor en la cascada desde el primer efecto hasta el efecto final. La disminución del flujo de vapor generado por ebullición conforme se aumenta el flujo de alimentación, es directamente proporcional al calor transferido por efecto, dado a que este corresponde a la energía que el vapor de agua por ebullición transfiere a la salmuera de cada efecto al condensarse. Esta figura no considera el calor transferido en los precalentadores dado a que éste se analizó de manera individual en figura anterior.

Una vez observado el comportamiento operativo general y por componentes en las figuras anteriores, en la figura 3.8, se analizan los parámetros requeridos para el correcto funcionamiento de la propuesta tecnológica, los cuales tienen una gran importancia a la hora de realizar una

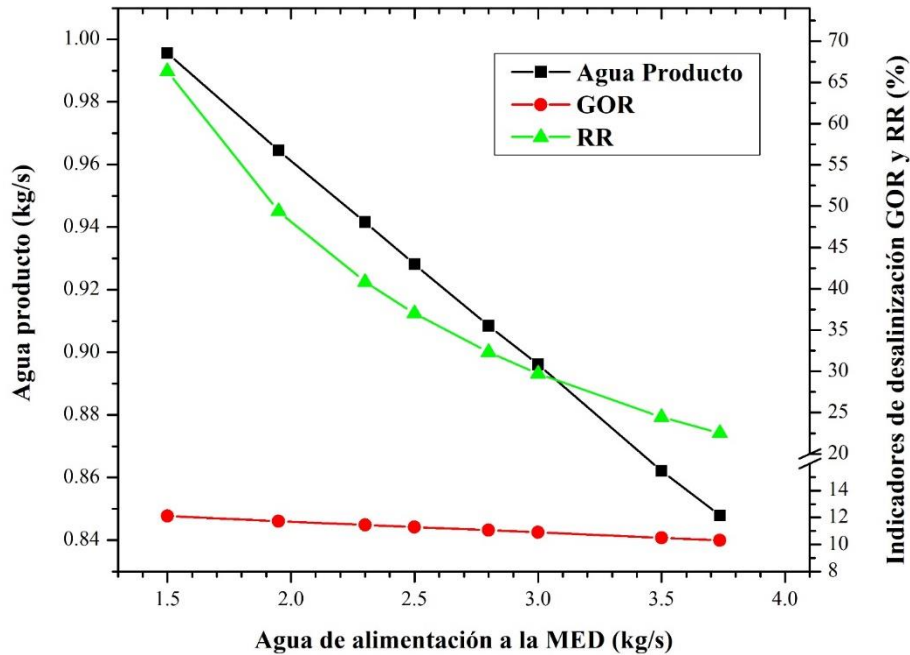


**Figura 3.7:** Comportamiento operativo de los efectos de la MED convencional para diferentes flujos de alimentación de agua de mar.



**Figura 3.8:** Efecto de la variación del agua de mar de alimentación en la potencia de bombeo requerida y el calor transferido en el sistema.

evaluación techno-económica en la que se consideran los costos de inversión inicial, operación y mantenimiento, principalmente. La figura 3.8, muestra dos de los parámetros de mayor consideración cuando se tienen que definir las mejores condiciones de operación, como lo son el calor transferido en el sistema, relacionado directamente al área de transferencia de calor requerida y el consumo de energía eléctrica por las bombas en el sistema. Se observa que el incrementar el flujo de agua de mar (5), tanto la potencia de bombas, como el calor transferido disminuyen, lo cual es beneficioso, debido a que reduciría el costo de la tecnología. Sin embargo, cabe remarcar que la condición de flujo de alimentación donde se encuentra la mayor eficiencia y capacidad de agua producto, coinciden con el mayor requerimiento de potencia total de bombas y área de transferencia de calor. Es importante remarcar que el incremento máximo de los requerimientos de potencia dentro de los límites de operación permitidos en el sistema, es de 22%, mientras que el incremento de área de transferencia de calor necesaria del mayor flujo de alimentación permitido con respecto al menor es de 11.7%, esto para poder establecer la mejor condición de flujo considerando tanto el comportamiento de los indicadores de eficiencia y capacidad, como los parámetros involucrados en los costos del sistema.



**Figura 3.9:** Efecto de la variación del agua de mar de alimentación en la capacidad de agua producto y los indicadores de desalinización GOR y RR.

Por último, en la figura 3.9 se muestra el comportamiento de los indicadores de eficiencia del sistema propuesto y la capacidad de agua producto para diferentes condiciones de flujo en la corriente de agua de mar de alimentación (5). Se observa que a menor flujo de alimentación en la corriente de agua de mar (5) la capacidad de desalinización y el indicador de eficiencia GOR se ven incrementados, esto debido a que, al mantener un calor constante en la activación, el comportamiento del GOR se verá directamente relacionado con el incremento o decremento de la capacidad de agua producto. Por otro lado, se observa que a la vez que se reduce el flujo másico de agua de mar (5), el indicador RR disminuye, esto debido a que como se mostró en la figura 3.3, conforme se reduce el flujo de agua de mar alimentado a los efectos (5), mayor será el requerimiento de flujo en la corriente de agua de mar (2) para condensar el vapor generado en el último efecto. Considerando que el sistema opere con una concentración de la salmuera (49) menor a 70,000 ppm y un calor constante de activación, se establece que la condición de flujo de alimentación  $m_5 = 1.95 \text{ kg/s}$  es el punto de diseño, debido a que se obtiene la máxima capacidad y eficiencia.

Es importante mencionar que los límites operativos del sistema se encuentran dados por la concentración de sal en la corriente de salmuera (49) y por la relación de flujo que existe entre las corrientes de alimentación (2) y (5). El límite inferior se encuentra en la condición de flujo  $m_5 = 1.95 \text{ kg/s}$  dado a que en esta condición la salmuera (49) sale con una concentración de  $X_{49} = 69,252.91 \text{ ppm}$  (5), mientras que el límite superior operativo se encuentra cuando se utiliza un flujo de alimentación a los efectos  $m_5 = 3.736 \text{ kg/s}$ , debido a que este punto, el flujo del agua de rechazo se anula y la corriente 5 se empata con el flujo de alimentación requerido en el condensador (2) de la cual viene precedida, siendo imposible suministrar una mayor cantidad de agua en la corriente 5 debido a la configuración y a las consideraciones propuestas en el sistema MED-CONV.

Después de haber hecho el análisis operativo para mostrar la viabilidad técnica de la tecnología propuesta, en la Tabla 3.3, se muestra el resumen de las propiedades de todas corrientes del sistema para una condición donde se dispone de una temperatura de  $25 \text{ °C}$  para el agua de mar que es succionado por la bomba de agua de mar (BAM) y un flujo másico de  $1.95 \text{ kg/s}$  para la corriente de agua de mar que se alimenta a los efectos (5). En la tabla 3.4 se muestran los indicadores del sistema de desalinización MED-CONV, la cantidad de agua producto, así como la transferencia de calor de cada uno de los componentes. Se producen  $0.996 \text{ kg/s}$  equivalentes a  $83,332.8 \text{ L/día}$ , suficientes para satisfacer las necesidades de una comunidad de hasta 700 personas, según la Organización Mundial de la Salud (OMS) (Howard & Bartram, 2003).

**Tabla 3.3:** Propiedades de las corrientes del sistema MED-CONV, para una condición de diseño.

**Tabla 3.4:** Evaluación energética del sistema MED convencional (MED-CONV) propuesto.

COMPONENTES	BALANCE DE ENERGÍA	GANANCIAS (kW)	PÉRDIDAS (kW)	INTEGRACIÓN ENERGÉTICA INTERNA (kW)
GENERADOR	$Q_{GEN} = m_{21}h_{21} - m_{20}h_{20}$	191.612		
CONDENSADOR	$Q_{CON} = m_3h_3 - m_2h_2$			149.842
EFFECTOS PRECALENTADORES				1947.838
BAM	$W_{BAM} = m_1v_1(P_2 - P_1)/Eff_{BAM}$	0.522		266.329
<b>FLUJO DE LAS CORRIENTES</b>				
$m_1h_1$	Entrada del agua de mar	-77,634.949		
$m_{49}h_{49}$	Salida de la salmuera		-14,949.480	
$m_4h_4$	Retorno de salmuera al mar		-47,242.147	
$m_{52}h_{52}$	Salida de agua producto		-15,251.187	
<b>TOTAL</b>		<b>-77,442.817</b>	<b>-77,442.817</b>	<b>2,364.009</b>
<b>AGUA PRODUCTO</b>		83,332.8 L/día		<b>Producción diaria</b>
<b>RR</b>	$RR = m_{52}/m_{18}$	0.49		<b>Recovery Ratio</b>
<b>GOR</b>	$GOR = m_{52}/m_{20}$ $*GOR = (m_{52} * 2,236kJ/kg)/Q_{GEN}$	11.73		<b>Gain Output Ratio</b>

\* Otra ecuación para calcular el indicador de eficiencia GOR. El resultado es el mismo.

Tabla 3.5: Características termodinámicas y operativas de la MED convencional en su punto de diseño.

<b>Efecto</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Presión (kPa)</b>	<b>Agua producto (kg/s)</b>	<b>Concentración de la salmuera (ppm)</b>	<b>Q (kW)</b>	<b>Temperatura del agua de mar (°C)</b>
<b>1</b>	68.00	28.30	0.0574	36,283.9	149.83	65.50
<b>2</b>	65.46	25.29	0.0635	37,832.4	149.83	62.78
<b>3</b>	62.92	22.55	0.063	39,522.7	149.83	60.21
<b>4</b>	60.38	20.07	0.0628	41,356.2	149.83	57.68
<b>5</b>	57.85	17.84	0.0626	43,353.1	149.83	55.14
<b>6</b>	55.31	15.81	0.0624	45,534.4	149.83	52.61
<b>7</b>	52.77	13.98	0.0622	47,928.5	149.83	50.07
<b>8</b>	50.23	12.34	0.0621	50,568.4	149.83	47.53
<b>9</b>	47.69	10.86	0.0619	53,491.1	149.83	44.99
<b>10</b>	45.15	9.54	0.0617	56,748.7	149.84	42.45
<b>11</b>	42.62	8.36	0.0616	60,399.7	149.84	39.91
<b>12</b>	40.08	7.31	0.0614	64,520.8	149.84	37.38
<b>13</b>	37.54	6.37	0.0613	69,208.8	149.84	34.84
<b>14</b>	35.00	5.54	0.0611	74,597.6	149.84	32.30
<b>Total</b>			<b>0.9645</b>		<b>2097.68</b>	

## 3.2. Sistema de desalinización MED al alto vacío (MED-AV)

En esta sección se presenta el estudio de operativo del sistema de desalinización MED al alto vacío con eyecto-condensación de catorce efectos, activado con energía solar térmico, en donde debido a la configuración y condiciones de operación propuestas, se tiene una alta integración energética y másica interna. La principal novedad que se propone en la propuesta tecnológica, es que a diferencia de los sistemas MED convencionales, esta opera con una cascada de presión que alcanza el alto vacío, lo que es equivalente a tener la presión correspondiente a una temperatura de saturación de 4 °C en el último efecto del sistema y un eyecto-condensador para así lograr condensar un vapor frío en el efecto final. Esto tiene un impacto directo en el incremento de la capacidad de agua producto.

### 3.2.1. Descripción del sistema

En la figura 3.10 se presenta el esquema del sistema de desalinización por evaporación múltiple de alto vacío (MED-AV), el cual está conformado por dos subsistemas: 1) el subsistema de desalinización MED y 2) el subsistema de extracción y adecuación de agua producto. El primer subsistema; está constituido por 14 efectos (n), 8 precalentadores (PC), una bomba de agua de mar (BAM) y un sistema de captación y almacenamiento de energía térmica para la activación del proceso MED-AV. Por otra parte, el segundo subsistema está conformado por un eyecto-condensador (EYC), un depósito para agua producto (TAP), un dissipador de calor (DIS), un contenedor de salmuera (TSAL), dos bombas; una para agua producto (BAP) y otra para el agua de mar de enfriamiento (BAE), y tres columnas barométricas; una para la extracción del agua producto (CB1), extracción de salmuera (CB2) y otra para mantener el vacío en el eyector (CB3).

De acuerdo con la figura 3.10, la bomba BAM succiona a la corriente (2) proveniente del recipiente de agua de mar y la lleva hacia el subsistema de desalinización MED como la corriente (3). La corriente (3), es dirigida hacia los precalentadores, para recibir el 100% del calor latente del vapor producido por flasheo, desde el efecto ocho hasta el segundo efecto de la MED, dado a que en el primer efecto a diferencia de los demás, se precalienta con un porcentaje del vapor producido por ebullición. Con lo anterior se consigue el mínimo de servicios de calentamiento externo en el generador (GEN). La corriente (12), después de recibir todos los precalentamientos,

pasa por una válvula de expansión (VE1) para bajar súbitamente su presión hasta la presión de saturación del primer efecto de la MED, quedando subenfriada (13). En estas condiciones, la corriente (13) ingresa al generador (GEN), donde recibe calor del fluido caloportador proveniente del campo de concentradores solares, para elevar su temperatura hasta quedar en dos fases (16) a la salida del generador, y en esta condición entrar a un separador líquido-vapor (SS1) resultando en las corrientes de salmuera y vapor (17) y (18) respectivamente.

La corriente de salmuera (17) es dirigida al evaporador del segundo efecto de la MED (IC2), ingresando a través de una tubería en forma de U, la cual permite tener un sello hidráulico para mantener la diferencia de presión que existe entre el primer efecto y el efecto 2. Cuando la corriente (17) pasa de tener la presión del efecto 1 a la del siguiente efecto, esta disminuye su presión y temperatura provocando que la salmuera (17) se vaya a dos fases. En esta condición ingresa al evaporador del segundo efecto (IC2). Por otro lado, el vapor de agua (18) ingresa al (IC2) y al tener mayor temperatura que la corriente de salmuera (17), el vapor le cede su calor latente hasta condensarse y convertirse en la primer agua producto (21) de la MED. La corriente (21) se unirá con el agua producto de los efectos posteriores. La corriente (20) que sale del IC2 y que se encuentra en dos fases, es mezclada con la corriente de vapor (23) resultando en la corriente (24). La corriente (24) es dirigida al separador (SS2) en donde se separan las corrientes de vapor (26) y de salmuera (25). La corriente de vapor (26) ingresa al precalentador (PC7) para ceder un porcentaje de su calor latente. En esta condición es dirigida al evaporador del tercer efecto (IC3). Por otra parte, la salmuera (25) es dirigida por una tubería en U hacia el (IC3). Lo ocurrido en el efecto 2, sucede en los posteriores efectos, hasta el efecto 13.

El agua producto de todos los efectos se comunica por medio de tubos en forma de U, con los que se logra mantener la diferencia de presión entre efectos. Este proceso se repite hasta el último efecto (Efecto 14). El total de agua producto que se obtiene de los catorce efectos del sistema (44), es llevada al subsistema de extracción y adecuación de agua producto por medio de una columna barométrica (CB1), mientras que la salmuera (46) a la salida del último efecto, es llevada al contenedor de salmuera a través de la columna barométrica (CB3), donde posteriormente se diluirá al mezclarse con la corriente de agua de mar de enfriamiento (51) antes de ser expulsada del sistema.

En el subsistema de extracción y adecuación de agua producto, el vapor de agua (48), que sale del último efecto de la MED, es succionado por el eyecto-condensador (EYC), el cual es activado por el agua producto (57) suministrada por la bomba (BAP), actuando como el fluido motriz del eyector. Dentro del eyector, se mezclan las corrientes (48) y (57), resultando en una corriente líquida debido al incremento de presión en el difusor del eyector. La presión de descarga en el eyector tiene una presión intermedia entre las corrientes (48) y (57). Dentro del eyector, el calor de la condensación de la corriente de vapor (48), es recibido por la corriente del fluido motriz (57), teniendo como resultado un aumento en la temperatura de la mezcla a la salida del eyector. La corriente condensada y con mayor temperatura que sale del eyector, es dirigida a una columna barométrica (CB3) para mantener el vacío en el sistema y posteriormente se deposita en el recipiente de agua producto del eyector. A la salida de la columna barométrica CB1, el agua producto se encuentra a presión atmosférica. Del recipiente de agua producto, la bomba BAP succiona a la corriente (53) para activar nuevamente al eyector. La corriente de agua producto (54) que sale de la bomba (BAP) es llevada a una válvula divisora de tres vías (V3V) y es dividida en las corrientes (55) y (56). El flujo másico de la corriente (56) corresponde al agua producto del sistema y es igual a la suma de las corrientes (44) y (48).

Por otro lado, la corriente (56) ingresa al intercambiador de calor (DIS) del subsistema, en donde la corriente de agua de mar (50) le retira el calor de condensación que recibió del vapor (48) y dejando a la corriente (57) a la misma condición de temperatura a la entrada del eyector. Por su parte, la corriente de agua de mar (51) después de enfriar a la corriente (56), es dirigida al contenedor de salmuera para diluir la concentración de sal a la salmuera (44) que sale del último efecto. Con el eyecto-condensador se logra llevar a la MED a un nivel de vacío superior al convencional, ya que este equipo permite condensar un vapor a baja temperatura y en condición de presión de alto vacío. Lo anterior permite tener un sistema de desalinización MED con mayor producción de agua.



### 3.2.2. Metodología de estudio

En la figura 3.11 se muestra el diagrama de la metodología general para el desarrollo de la propuesta tecnológica de desalinización al alto vacío (MED-AV). De la misma manera que la tecnología convencional, el procedimiento de simulación se llevó a cabo mediante el software Aspen Plus, para mostrar la viabilidad técnica del sistema bajo diferentes condiciones de operación. Se estudió en forma especial las variables que tienen un efecto directo en la capacidad y eficiencia.

Para realizar la simulación en Aspen Plus, cuando se tienen corrientes de recirculación en el sistema, resulta crítico definir e inicializar las variables iterativas del block de convergencia, las cuales definen el procedimiento de cálculo iterativo y por consecuencia la solución final de cada simulación del estudio paramétrico. Para realizar la simulación del comportamiento operativo del sistema se asumen las siguientes consideraciones:

- El sistema de desalinización MED al alto vacío opera en estado estable.
- La presión del primer efecto de la MED es la presión correspondiente a una temperatura de saturación de 68 °C (Top Brine Temperature **TBT**).
- La presión del último efecto de la MED es la presión correspondiente a una temperatura de saturación de 4 °C (Bottom Brine Temperature **BBT**).
- Se consideró una temperatura mínima de aproximación de 2.8 °C entre las corrientes de fluido caloportador de activación y la corriente en dos fases que sale del generador, corrientes (14) y (16) respectivamente. El flujo másico del fluido caloportador se consideró igual al utilizado por la planta solar experimental de Almería por Palenzuela ([Palenzuela y cols., 2014](#)); el flujo del fluido caloportador  $m_{14} = 0.0822 \text{ kg/s}$
- El generador (GEN), evaporadores en los efectos y precalentadores, trabajan en condiciones de saturación y la caída de presión en los equipos y tuberías es despreciable.

Al igual que en el sistema MED convencional, se utilizan los indicadores GOR y RR, para evaluar el efecto de la desalinización MED. El GOR, representa una relación de la cantidad de agua producida entre el vapor de activación requerido, mientras que el indicador RR, es una relación que representa la cantidad de agua producto respecto al agua de mar de alimentación suministrada a la MED. Los indicadores se presentaron en las ecuaciones (3.1) y (3.2).

**Figura 3.11:** Diagrama de la metodología general y del procedimiento de simulación en Aspen Plus.

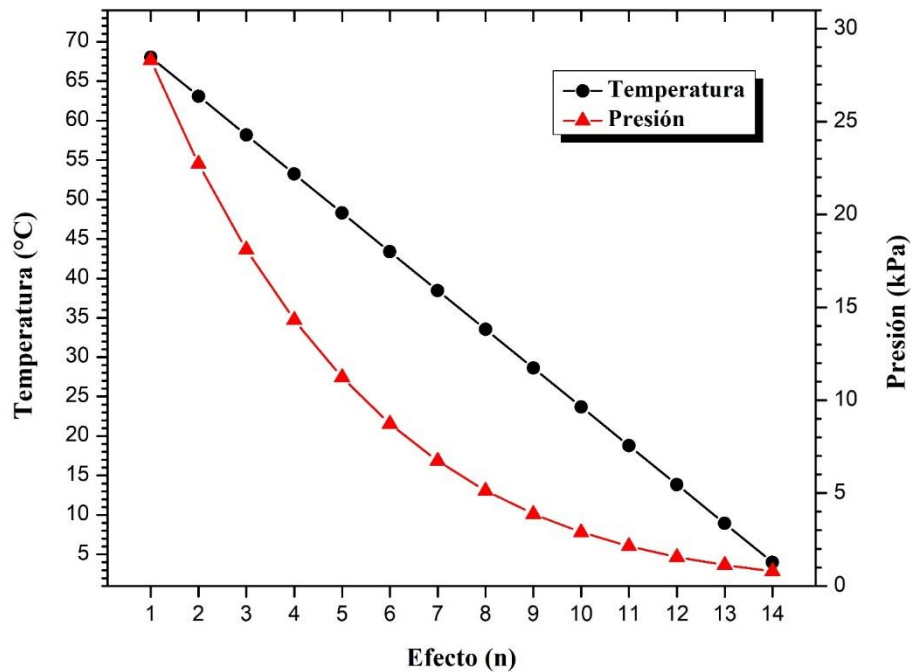
### 3.2.3. Análisis y discusión de resultados.

El comportamiento operativo del sistema de desalinización MED-AV depende de las intermitencias del recurso solar, así como del flujo y temperatura del agua de mar de alimentación que ingresa al primer efecto de la MED. La variabilidad de la energía solar, tiene un impacto directo en la capacidad y eficiencia del campo de colectores solares y se manifiesta directamente en la temperatura del fluido caloportador, provocando diferentes condiciones de operación en el sistema propuesto, de la misma manera la variación del flujo másico y las condiciones del agua de mar influyen directamente en los indicadores de eficiencia y en la capacidad del sistema. Por lo tanto, la viabilidad técnica de la propuesta tecnológica, se evaluó estudiando el efecto que tiene la variación del flujo de agua de mar de alimentación en la capacidad total del sistema y su repercusión en los indicadores de eficiencia GOR y RR. Lo anterior con la finalidad de establecer las condiciones estándar de diseño.

Con el propósito de evaluar el comportamiento del sistema MED al alto vacío, bajo diferentes condiciones de flujo de agua de mar de alimentación, se establecieron como valores constantes, el calor de activación en el GEN 191.61 kW, la temperatura del vapor de activación de 70.8 °C y el delta mínimo en la temperatura de aproximación de 2.5 °C para todos los intercambiadores de calor. Además, se utiliza una concentración y temperatura en el agua de mar de alimentación de 35,000 ppm y 25 °C respectivamente, como se muestra en la Tabla 3.6.

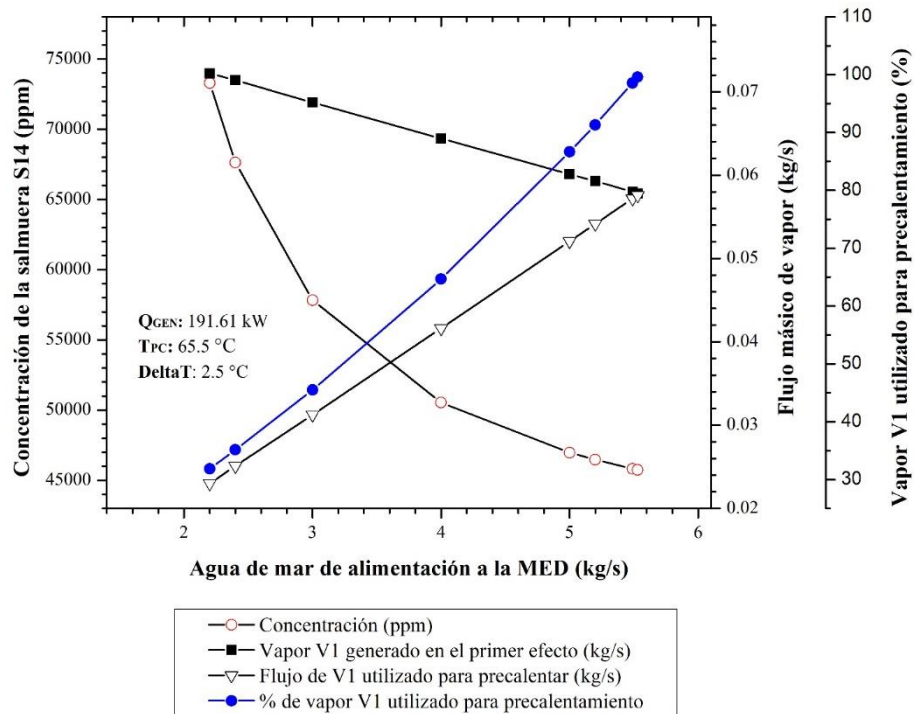
**Tabla 3.6:** Datos de entrada del sistema MED al alto vacío (MED-AV)

Número de efectos ( $n$ )	14	-
Número de precalentamientos ( $PC$ )	8	-
Temperatura del agua de mar a la entrada del sistema ( $T_{cw, in}$ )	25.0	°C
Concentración de sal del agua de mar de alimentación ( $X_f$ )	35,000	ppm
Flujo másico del vapor de activación ( $M_s$ )	0.0822	kg/s
Temperatura del vapor de activación ( $T_s$ )	70.8	°C
Calor externo de activación ( $Q_{gen}$ )	191.61	kW
Temperatura del agua de mar a la entrada del primer efecto ( $T_{BT}$ )	68.0	°C
Rango de la cascada de temperaturas del sistema	68 - 4	°C



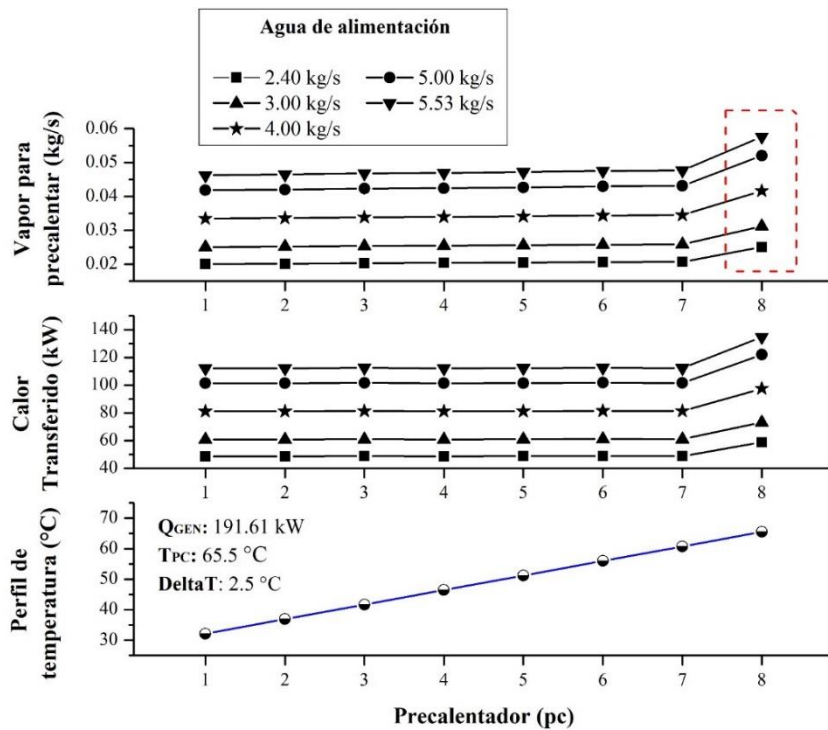
**Figura 3.12:** Perfiles de presión y temperatura de operación del sistema MED al alto vacío.

Al igual que el sistema MED-CONV, la propuesta tecnológica de desalinización por evaporación de múltiple efecto al alto vacío con eyecto-condensación (MED-AV) consiste en una serie de efectos que operan en una cascada de presión y temperatura descendente, tal y como se muestra en la figura 3.12, lo que permite que el vapor generado en cada efecto pueda calentar la salmuera del efecto posterior que se encuentra a una menor presión, transfiriendo su energía de condensación en forma de calor latente y con esto provocando una mayor generación de vapor, que a la postre se verá reflejado como una mayor cantidad de condensado de agua producto. Las principales características que difiere al sistema MED-AV del sistema convencional, es que el sistema propone operar en una cascada de presión que desciende a niveles de alto vacío, lo que es igual a tener una presión correspondiente a una temperatura de saturación de 4 °C en el último efecto, además de sustituir la manera de condensar el vapor en el último efecto, ya que en lugar de condensar el vapor del último efecto (48) con el agua de mar de alimentación, se condensa a través del proceso de eyecto-condensación.



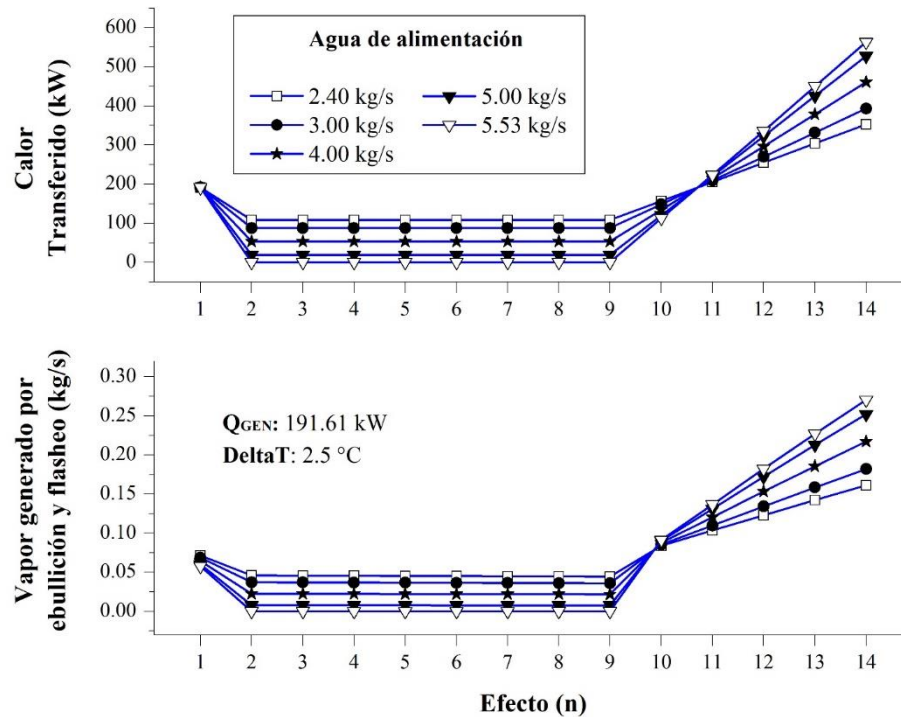
**Figura 3.13:** Efecto de la variación del agua de mar de alimentación en la concentración de salmuera y el flujo de vapor generado y utilizado para precalentar en el primer efecto.

En la figura 3.13 se muestra el efecto de la variación del agua de mar de alimentación en la concentración de la salmuera de salida en el último efecto y el flujo de vapor generado por ebullición en el primer efecto, además del porcentaje utilizado del vapor (18) para precalentamiento del agua de mar. En la misma figura se identifican los límites operativos del sistema MED-AV, el límite inferior en el flujo de alimentación está dado por la concentración en la salmuera que sale del sistema, dado a que esta aumenta conforme se disminuye el flujo de alimentación. De acuerdo con (Bamufleh y cols., 2017) la concentración de la salmuera no debe sobrepasar el 70% o lo que es equivalente a las 70,000 ppm para evitar la cristalización y evitar problemas de corrosión. Por otra parte, considerando las condiciones establecidas para el estudio operativo, el límite superior en el flujo de alimentación se encuentra cuando no se cuenta con vapor para activar la cascada de efectos posteriores. En la condición de flujo de alimentación de 5.53 kg/s, la cantidad de vapor generado por ebullición en el efecto 1 se empata con el porcentaje requerido del mismo vapor para el precalentamiento del agua de mar, con lo que se obstruye la cascada de evaporación múltiple.



**Figura 3.14:** Comportamiento operativo de los precalentadores de la MED convencional al variar el flujo de alimentación de agua de mar.

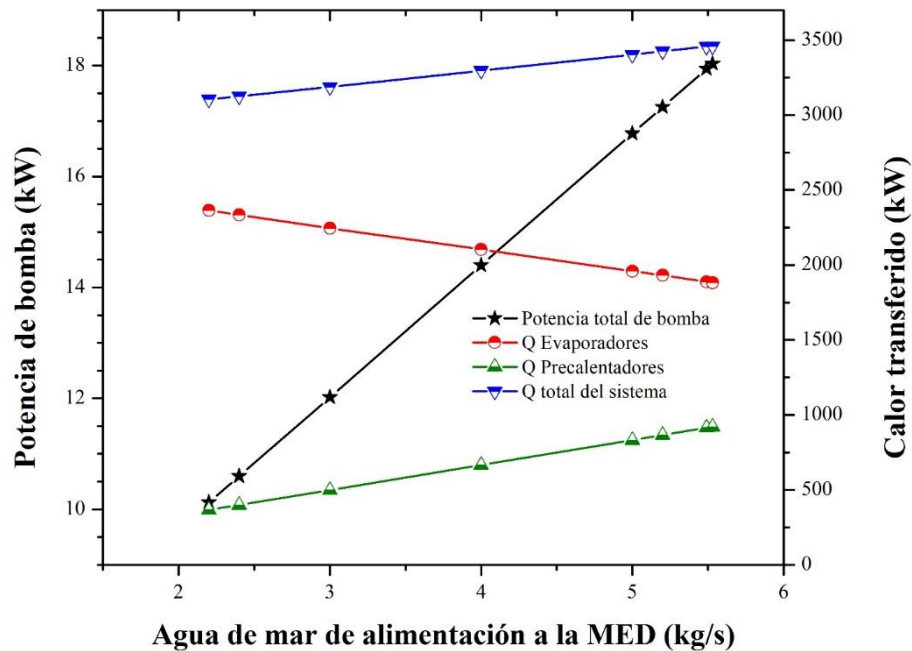
En la figura 3.14 se muestra el comportamiento de los precalentadores en el sistema MED-AV al variar el flujo de alimentación de agua de mar. El sistema MED-AV solo cuenta con 8 precalentamientos, a diferencia del sistema MED-CONV que utiliza 13 efectos para precalentar el agua de mar, esto debido a que, solo es posible utilizar los efectos que cuenten con un gradiente de temperatura con respecto al agua de alimentación. A pesar de precalentar con menor número de efectos, se alcanza la máxima temperatura de precalentamiento, respetando el delta mínimo en la temperatura de aproximación, debido a que el sistema MED-AV presenta deltas de presión de un efecto con respecto a otro más grande que los sistemas convencionales, lo que produce una mayor generación de vapor de flasheo, el cual debido a la configuración de la propuesta se utiliza en su totalidad para precalentamiento del agua de mar, en los primeros ocho efectos. La generación de vapor de flasheo es muy similar en todos los efectos, sin embargo, en el octavo precalentador (PC8) se observa un incremento considerable, esto debido a que el precalentador 8 coincide con la generación de vapor por ebullición en el primer efecto. Por otra parte, se observa que conforme se



**Figura 3.15:** Comportamiento operativo de los efectos de la MED convencional para diferentes flujos de alimentación de agua de mar.

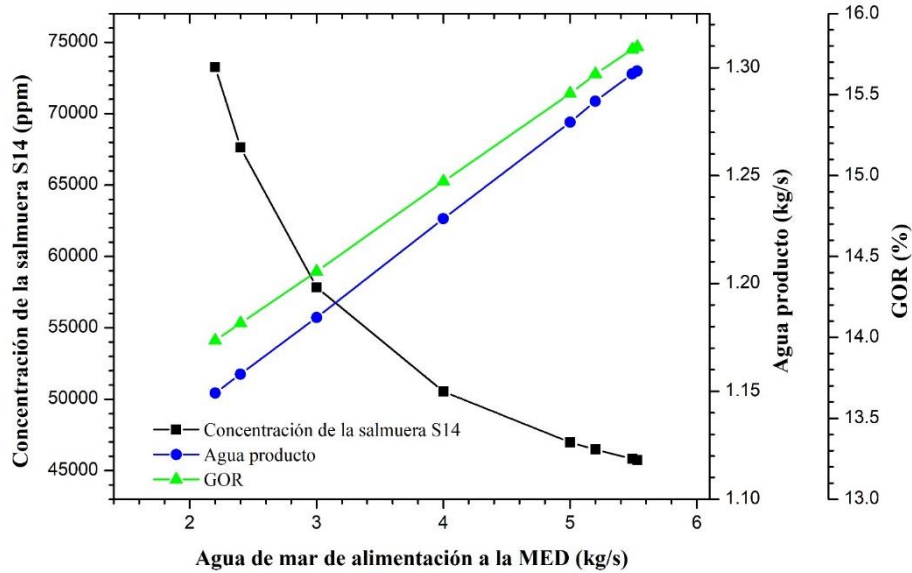
aumenta el flujo de alimentación, aumenta el calor transferido en los precalentadores, lo que a su vez corresponde a un mayor requerimiento de área de transferencia de calor para estos componentes.

De manera similar, en la figura 3.15 se muestra el comportamiento operativo de los evaporadores/efectos del sistema con respecto a la variación del flujo de alimentación. Se observa que tanto el vapor generado como el calor transferido por efecto, aumenta conforme se incrementa el flujo de alimentación. Para cada una de las condiciones de flujo de alimentación se puede observar que la generación de vapor en los primeros nueve efectos es casi constante, pero a partir del efecto 10 hasta el 14, se muestra un incremento bastante considerable, debido a que a partir de ese efecto, la cascada de presión y temperatura no presentan las condiciones necesarias para precalentar el agua de mar, por lo que el vapor generador por flasheo a partir del décimo efecto se une al vapor generado por ebullición y se dirigen hacia el siguiente efecto para calentar la salmuera, lo que produce una mayor generación de vapor por ebullición en los últimos efectos.



**Figura 3.16:** Efecto de la variación del agua de mar de alimentación en la potencia de bombeo requerida y el calor transferido en el sistema.

En la figura 3.16, se analizan los parámetros requeridos para el correcto funcionamiento de la propuesta tecnológica, los cuales tienen una gran importancia a la hora de realizar una evaluación técnica y económica en la que se consideran los costos de inversión inicial, operación y mantenimiento, principalmente. En la figura, se presenta el calor transferido total en el sistema, así como el calor transferido por componentes, precalentadores y efectos/evaporadores; además se muestra la potencia total requerida por las bombas. Se observa que al incrementar el flujo de agua de mar de alimentación (2), tanto la potencia de bombas, como la cantidad de calor transferido en el sistema, aumentan. A pesar de que es posible observar una disminución del calor transferido en los efectos/evaporadores conforme se aumenta el flujo de alimentación, el calor transferido en los precalentadores aumenta, lo que propicia a que la cantidad neta de calor transferida sea cada vez mayor conforme se incrementa el flujo de alimentación (2). Lo anterior tiene como consecuencia que, a mayor flujo de alimentación, mayor será la necesidad de área de transferencia de calor y de potencia total de bombas.



**Figura 3.17:** Efecto de la variación del agua de mar de alimentación en la capacidad de agua producto y el indicador de desalinización GOR.

Para finalizar con el análisis operativo del sistema MED-AV, en la figura 3.17 se muestra el comportamiento de la capacidad de agua producto del sistema, la concentración de la salmuera final, así como los indicadores de eficiencia, para diferentes condiciones de flujo en la corriente de agua de mar de alimentación (2). Dentro de la figura es posible observar que, a mayor flujo de alimentación en la corriente de agua de mar, la capacidad de desalinización y el indicador de eficiencia GOR se ven incrementados, esto debido a que, al mantener un calor constante en la activación, el comportamiento del GOR se verá directamente relacionado con el incremento o decremento de la capacidad de agua producto, sin embargo, en la figura 3.16 se presentó que al incrementar el flujo de alimentación, también incrementaban los requerimientos energéticos en el sistema.

En base a lo anterior, se establece que la condición de flujo de alimentación  $m_2 = 4.0 \text{ kg/s}$ , es la mejor condición de diseño, dado a que se observa la mejor relación entre los indicadores de capacidad, eficiencia y los requerimientos del sistema (potencia de bomba, número de componentes y la cantidad de calor transferido que define el área de transferencia de calor); todo esto considerando que el sistema opere con una concentración de la salmuera (46) menor a 70,000 ppm y un calor constante de activación.

Tabla 3.7: Evaluación energética del sistema MED al alto vacío propuesto bajo las condiciones de diseño.

COMPONENTES	BALANCE DE ENERGÍA	GANANCIAS (kW)	PÉRDIDAS (kW)	INTEGRACIÓN ENERGÉTICA INTERNA (kW)
<b>GENERADOR</b>	$Q_{GEN} = m_{11}h_{11} - m_8h_8$	191.612		
<b>DISIPADOR</b>	$Q_{DIS} = m_{69}h_{69} - m_{68}h_{68}$		526.510	
<b>EFFECTOS PRECALENTADORES</b>				1,911.651 665.962
<b>BAM</b>	$W_{BAM} = m_2v_2(P_3 - P_2)/Eff_{BAM}$	0.696		
<b>BFM</b>	$W_{BAP} = m_{67}v_{67}(P_{68} - P_{67})/Eff_{BAP}$	7.141		
<b>BAE</b>	$W_{BAE} = m_{63}v_{63}(P_{64} - P_{63})/Eff_{BAE}$	6.563		
<b>FLUJO DE LAS CORRIENTES</b>				
$m_2h_2$	Entrada del agua de mar	-62,156.155		
$m_{60}h_{60}$	Salida de la salmuera		-42,866.917	
$m_{62}h_{62}$	Salida del agua producto		-19,611.559	
<b>TOTAL</b>		<b>-61,950.143</b>	<b>-61,950.9143</b>	<b>2,577.613</b>
<b>AGUA PRODUCTO</b>		106,268.994 L/día		<b>Producción diaria</b>
<b>RR</b>	$RR = m_{62}/m_3$	0.375		<b>Recovery Ratio</b>
<b>GOR</b>	$GOR = m_{62}/m_9$ $* GOR = (m_{62} * 2,326kJ/kg)/Q_{GEN}$	14.963		<b>Gain Output Ratio</b>

Tabla 3.8: Características termodinámicas y operativas de la MED al alto vacío en su punto de diseño.

<b>Efecto</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Presión (kPa)</b>	<b>Agua producto (kg/s)</b>	<b>Concentración de la salmuera (ppm)</b>	<b>Q (kW)</b>	<b>Temperatura del agua de mar (°C)</b>
<b>1</b>	68.00	28.30	0.0574	35,882.4	191.61	65.50
<b>2</b>	63.08	22.73	0.0635	36,404.9	53.385	60.75
<b>3</b>	58.15	18.10	0.063	36,934.6	53.381	55.96
<b>4</b>	53.23	14.32	0.0628	37,472.4	53.378	51.19
<b>5</b>	48.31	11.23	0.0626	38,019.2	53.378	46.42
<b>6</b>	43.38	8.72	0.0624	38,573.8	53.378	41.65
<b>7</b>	38.46	6.72	0.0622	39,137.1	53.378	36.88
<b>8</b>	33.54	5.13	0.0621	39,709.7	53.378	32.11
<b>9</b>	28.61	3.87	0.0619	40,292.5	53.413	25.00
<b>10</b>	23.69	2.89	0.0617	41,280.6	134.563	25.00
<b>11</b>	18.77	2.14	0.0616	42,723.9	214.896	25.00
<b>12</b>	13.85	1.56	0.0614	44,713.4	296.056	25.00
<b>13</b>	8.92	1.12	0.0613	47,393.0	378.604	25.00
<b>14</b>	4.00	0.79	0.0611	50,541.8	460.456	25.00
<b>Total</b>			<b>1.230</b>		<b>2,103.26</b>	

Tabla 3.9: Propiedades termodinámicas de las corrientes y evaluación energética de la propuesta MED-AV.

### **3.3. Sistema de desalinización híbrido MSF/MED al alto vacío con eyecto-condensación (MSF/MED-AV)**

En esta sección se presenta el estudio operativo del sistema de desalinización híbrido que acopla las tecnologías de múltiple etapa flash (MSF) y evaporación de múltiple efecto (MED) operando en condiciones de alto vacío, integrando un subproceso de eyecto-condensación, en donde debido a la configuración y condiciones de operación propuestas, se tiene una alta integración energética y másica interna. La siguiente propuesta tecnológica al igual que el sistema de desalinización al alto vacío (MED-AV), utiliza una cascada de presión y temperatura que alcanza la temperatura de saturación de 4 °C en el último efecto y utiliza un proceso de eyecto-condensación para la condensación del vapor del último efecto. La principal novedad que propone el sistema MSF/MED-AV es operar inicialmente con una serie de etapas de flasheo y posteriormente operar con etapas de evaporación en la parte final de la cascada de temperatura, y así con esto operar con flujos másicos de alimentación mayores a los límites permitidos en la MED-AV. Esto tiene un impacto directo en el incremento de la capacidad de agua producto.

#### **3.3.1. Descripción operativa del sistema**

Aprovechando las características operativas que tienen los sistemas de desalinización de múltiple etapa flash (MSF) y evaporación de múltiple efecto (MED), en la figura 3.18 se presenta el esquema del sistema propuesto de desalinización MSF-MED al alto vacío con eyecto-condensación, el cual surge de la exploración en el estudio operativo del sistema MED-AV y está conformado por tres subsistemas: 1) el subsistema de desalinización por múltiple etapa flash (MSF), 2) el subsistema de desalinización MED y 3) el subsistema de extracción y adecuación de agua producto.

El primer subsistema; está constituido por 8 etapas (ne), 7 condensadores (CON1, CON2, ...CON7), una bomba de agua de mar (BAM), un calentador externo para la activación (CE) y un sistema de captación y almacenamiento de energía térmica para la activación del sistema MSF-MED. A su vez, el segundo subsistema está conformado por 5 efectos (n) de evaporación de múltiple. Por otra parte, el tercer subsistema, se conforma por un eyecto-condensador (EYC), un

depósito para agua producto (TAP), un disipador de calor (DIS), un contenedor de salmuera (TSAL), dos bombas; una para agua producto (BAP) y otra para el agua de mar de enfriamiento (BAE), y tres columnas barométricas; una para la extracción del agua producto (CB1), extracción de salmuera (CB2) y otra para mantener el vacío en el eyector (CB3).

De acuerdo con la figura 3.18, la bomba de agua de mar (BAM) succiona a la corriente (2) proveniente del recipiente de agua de mar y la lleva hacia el subsistema de desalinización MSF como la corriente (3). La corriente (3), es dirigida hacia los condensadores, para recibir el 100% del calor latente del vapor de agua producido por el flasheo, desde la etapa siete hasta la primera etapa. Con lo anterior se consigue el mínimo de servicios de calentamiento externo en el CE.

La corriente (3), después de recibir todo el calor latente de los vapores de agua, desde la etapa siete hasta la etapa 1, sale del condensador de la primera etapa (CON1) como la corriente (7), y posteriormente pasa por una válvula de expansión (VE1) para bajar súbitamente su presión hasta la presión de saturación del calentador externo (CE), quedando en (8) como una corriente subenfriada. En estas condiciones, la corriente (8) ingresa al calentador externo, donde recibe calor del fluido caloportador proveniente del campo de concentradores solares, para elevar su temperatura y reducir el subenfriamiento a la salida del CE (11), y en esta condición ingresar una tubería en forma de U (U1), la cual disminuye la presión de la corriente (11) a las condiciones de la primer etapa y además permite formar un sello hidráulico para mantener la diferencia de presión que existe entre la primer y segunda etapa. El cambio de presión que sufre la corriente (11) pasando de tener las condiciones de presión del calentador externo a las de la etapa 2, provoca que la salmuera se convierta en una corriente en dos fases (12) a la salida de U1. En esta condición ingresa al primer separador ciclónico líquido-vapor (SS1) del sistema, en donde la corriente (12) se divide en las corrientes de vapor (14) y salmuera (13). La corriente de salmuera (13) es dirigida a una nueva tubería en forma de U (U2) para disminuir su presión a las condiciones de la etapa 2 y así ingresar al segundo separador (SS2). Por otro lado, el vapor de agua (14) ingresa al condensador de la etapa 1 (CON1) cediendo todo su calor latente a la corriente de agua de mar (6) hasta condensarse totalmente y convertirse en el primer agua producto del sistema (15). La corriente (15) pasa por una tubería en forma de U, bajando su presión y quedando en dos fases (16) para después ingresar al separador (SAP1) y dividirse en las corrientes (17) y (18).

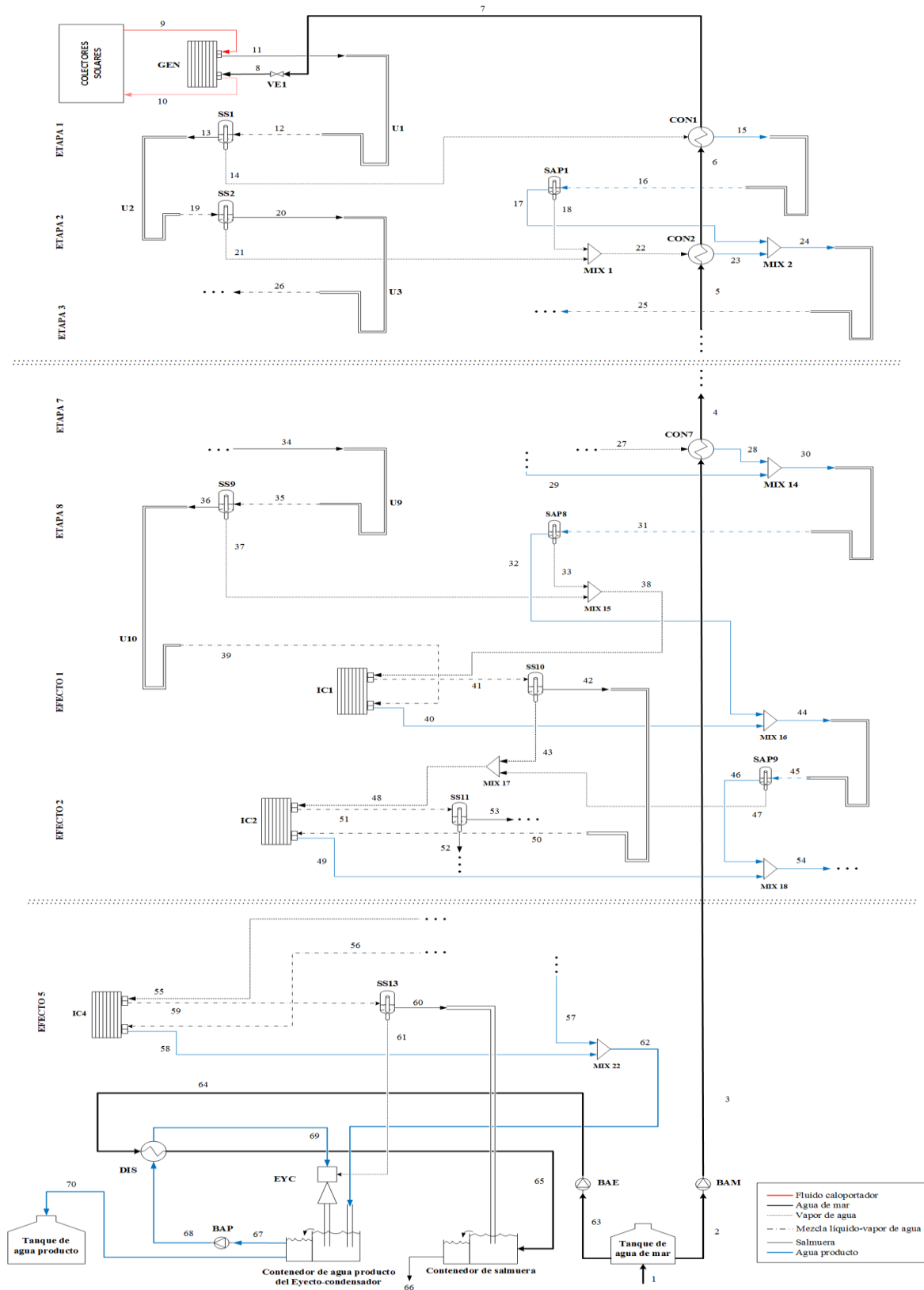


Figura 3.18: Diagrama del sistema de desalinización híbrido MFS-MED al alto vacío.

La corriente de vapor de agua (18) se une en el mezclador MIX1, a la corriente de vapor (21) proveniente del SS2, para entrar al segundo condensador (CON2) y quedar totalmente condensada como la corriente (23), teniendo con esto el segundo condensado de agua producto en el sistema. A su vez, la corriente líquida de agua producto (17) se une al condensado (23) en el MIX2 para ingresar de nueva cuenta a una tubería U y repetir el proceso anterior. Lo ocurrido en la etapa 2, sucede de la misma manera en las posteriores etapas, hasta la etapa 7, debido a que en la etapa 8 a diferencia de las anteriores, las corrientes de salmuera (39) y la de vapor de agua (38) son dirigidas al evaporador del primer efecto MED (IC1) para activar el segundo subsistema.

A la salida del primer efecto MED (IC1) la corriente (41) sale en dos fases, para después ingresar al separador (SS10) y dividirse en las corrientes de vapor de agua y salmuera, (43) y (42) respectivamente. Cuando la corriente (38) se condensa completamente en el IC1, se convierte en el primer agua producto del subsistema MED y se une al condensador anterior (32) en el MIX16, para juntos pasar por una tubería en forma de U y bajar su presión a las condiciones del efecto siguiente y así quedar en dos fases debido al flasheo (45). La corriente (45) ingresa al separador (SAP9), donde surgen las corrientes (46) y (47); la corriente condensada (46) pasará a unirse al siguiente condensado, mientras que la corriente de vapor (47) se une con el vapor de agua (43).

El subsistema de desalinización MED, no cuenta con precalentamiento del agua de mar, debido a que las condiciones de temperatura en esta sección de la cascada, están por debajo de las condiciones de temperatura a las que ingresa el agua de mar (3), lo que implica que no exista gradiente de temperatura positivo para poder añadir calor a la corriente (3). Debido a esto, la corriente de vapor (43) al unirse con la corriente (47) y convertirse en la corriente de vapor (48), se ingresa completamente al segundo efecto del subsistema MED para calentar la corriente de salmuera (50) y con esto generar una mayor cantidad de vapor que a la postre se verá reflejado como una mayor cantidad de agua producto. El mismo proceso se repite hasta el efecto 4.

El agua producto de todos los efectos se comunica por medio de tuberías en forma de U, con los que se logra mantener la diferencia de presión entre etapas y efectos. Este proceso se repite hasta el último efecto del subsistema MED (efecto 5). El total de agua producto que se obtiene de las 8 etapas y los 5 efectos, se ve reflejado en la corriente (62), la cual es llevada al subsistema de

extracción y adecuación de agua producto por medio de una columna barométrica (CB1), mientras que la salmuera (60) a la salida del último efecto, es llevada al contenedor de salmuera a través de la columna barométrica (CB2), donde posteriormente se diluirá al mezclarse con la corriente de agua de mar de enfriamiento (65) antes de ser expulsada del sistema en la corriente (66).

En el subsistema de extracción y adecuación de agua producto, el vapor de agua (61), que sale del último efecto de la MED, es succionado por el eyecto-condensador (EYC), el cual es activado por el agua producto (69) suministrada por la bomba (BAP), actuando como el fluido motriz del eyector. Dentro del eyector, se mezclan las corrientes (69) y (61), resultando en una corriente líquida debido al incremento de presión en el difusor del eyector. La presión de descarga en el eyector tiene una presión intermedia entre las corrientes (61) y (69). Dentro del eyector, el calor de la condensación de la corriente de vapor (61), es recibido por la corriente del fluido motriz (69), teniendo como resultado un aumento en la temperatura de la mezcla a la salida del eyector. La corriente condensada y con mayor temperatura que sale del eyector, es dirigida a una columna barométrica (CB3) para mantener el vacío en el sistema y posteriormente se deposita en el recipiente de agua producto del eyector. A la salida de la columna barométrica CB1, el agua producto se encuentra a presión atmosférica. Del recipiente de agua producto, la bomba BAP succiona a la corriente (67) para activar nuevamente al eyector. La corriente de agua producto (68) que sale de la bomba BAP es llevada a una válvula divisora de tres vías (V3V) y es dividida en las corrientes (70) y (68). El flujo másico de la corriente (70) corresponde al agua producto del sistema y es igual a la suma de las corrientes (61) y (62).

Por otro lado, la corriente (68) ingresa al intercambiador de calor (DIS) del subsistema, en donde la corriente de agua de mar (64) le retira el calor de condensación que recibió del vapor (61), dejando a la corriente (69) a la misma condición de temperatura a la entrada del eyector. Por su parte, la corriente de agua de mar (65) después de enfriar a la corriente (68), es dirigida al contenedor de salmuera para diluir la concentración de sal a la salmuera (60) que sale del último efecto. Con el eyecto-condensador se logra llevar al sistema a un nivel de vacío superior al convencional, ya que este equipo permite condensar un vapor a baja temperatura y en condición de presión de alto vacío. Lo anterior permite tener un sistema de desalinización MED con mayor producción de agua.

### 3.3.2. Metodología de estudio

Para llevar a cabo el estudio de la propuesta tecnológica MSF-MED al alto vacío con eyecto-condensación, se utiliza la misma metodología mostrada en la figura 3.11, en donde se muestra el diagrama de la metodología general para el desarrollo de la propuesta tecnológica híbrida de desalinización al alto vacío y los procedimientos utilizados para desarrollar la simulación en el software Aspen Plus, con la finalidad de mostrar la viabilidad técnica del sistema, bajo distintas condiciones de operación. Para realizar la simulación del comportamiento operativo del sistema se asumen las siguientes consideraciones:

- El sistema de desalinización híbrido MSF/MED al alto vacío con eyecto-condensación opera en estado estable.
- Las condiciones de presión en el calentador externo (CE) corresponden a una temperatura de saturación de 68 °C.
- La presión en la primera etapa flash corresponde a una temperatura de saturación de 63.8 °C.
- La presión en el último efecto del subsistema MED (efecto 5) es la presión correspondiente a una temperatura de saturación de 4 °C (Bottom Brine Temperature **BBT**).
- Se consideró una temperatura mínima de aproximación de 2.8 °C entre las corrientes de fluido caloportador de activación que ingresa al calentador externo (9) y la corriente de agua de mar (11) que sale del CE. El flujo másico del fluido caloportador se consideró igual al utilizado por la planta solar experimental de Almería por Palenzuela (Palenzuela y cols., 2014); el flujo del fluido caloportador  $m_g = 0.0822 \text{ kg/s}$
- El calentador externo (CE), condensadores en las etapas flash y los evaporadores en los efectos MED, trabajan en condiciones de saturación y la caída de presión en los equipos y tuberías es despreciable.

Al igual que en el sistema MED-CONV y MED-AV, se utilizan los indicadores GOR y RR, para evaluar el efecto de la desalinización. El GOR, representa una relación de la cantidad de agua producida entre el vapor de activación requerido, mientras que el indicador RR, es una relación que representa la cantidad de agua producto respecto al agua de mar de alimentación suministrada a la MED. Los indicadores se presentaron en las ecuaciones (3.1) y (3.2).

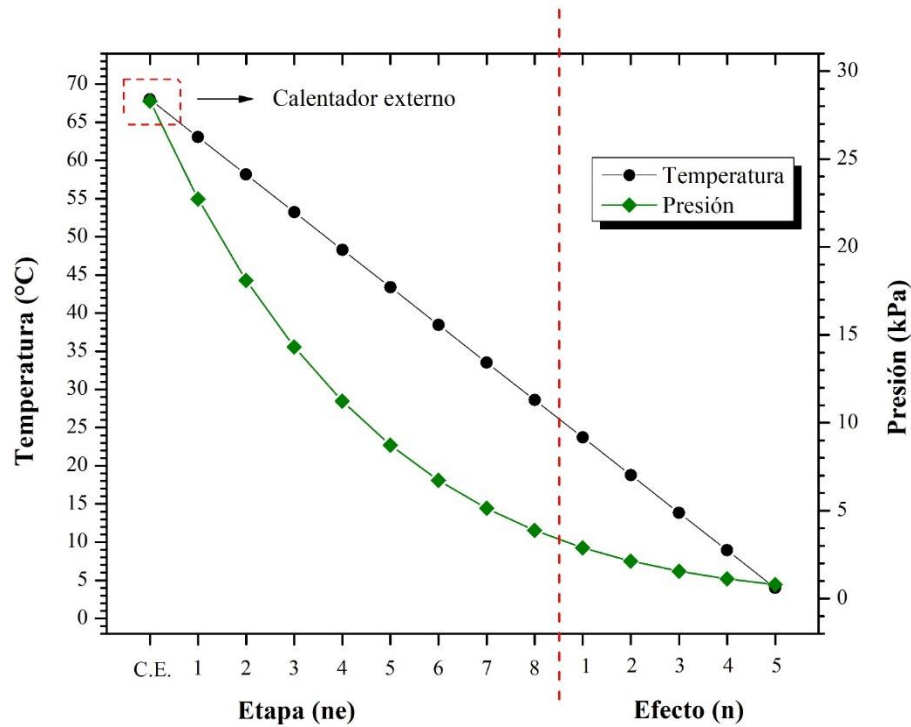
### 3.3.1 Análisis y discusión de resultados.

La operación del sistema de desalinización híbrido MSF/MED al alto vacío, está sujeta a la variación de temperatura y concentración del agua de mar. Por lo anterior, la viabilidad técnica o comportamiento operativo del sistema se realizó estudiando el efecto que tiene la variación del flujo de agua de mar de alimentación en la capacidad total del sistema y su repercusión en los indicadores de eficiencia GOR y RR. Lo anterior con la finalidad de establecer las mejores condiciones de operación.

Con el propósito de evaluar el comportamiento del sistema MSF/MED-AV, bajo diferentes condiciones de flujo de agua de mar de alimentación, se establecieron como valores constantes, el calor de activación en el calentador externo (CE) 191.61 kW, la temperatura del vapor de activación de 70.8 °C y el delta mínimo en la temperatura de aproximación de 2.5 °C para todos los intercambiadores de calor. Además, al igual que en las simulaciones de las propuestas anteriores, se utiliza una concentración y temperatura en el agua de mar de alimentación de 35,000 ppm y 25 °C respectivamente, como se muestra en la Tabla 3.10.

**Tabla 3.10:** Datos de entrada del sistema de desalinización híbrido MSF/MED-AV

Número de efectos ( $n$ )	4	-
Número de etapas ( $ne$ )	8	-
Número de condensadores/precalentadores ( $cond/pc$ )	7	-
Temperatura del agua de mar a la entrada del sistema ( $T_{cw, in}$ )	25.0	°C
Concentración de sal del agua de mar de alimentación ( $X_f$ )	35,000	ppm
Flujo másico del vapor de activación ( $M_s$ )	0.0822	kg/s
Temperatura del vapor de activación ( $T_s$ )	70.8	°C
Calor externo de activación ( $Q_{gen}$ )	191.61	kW
Temperatura del agua de mar a la entrada del primer efecto ( $T_{BT}$ )	68.0	°C
Rango de la cascada de temperaturas del sistema	63.08 - 4	°C



**Figura 3.19:** Perfiles de presión y temperatura de operación del sistema híbrido MSF-MED al alto vacío.

La propuesta tecnológica del sistema de desalinización híbrido conformada por etapas y efectos, resultó de un estudio paramétrico de exploración, donde en primera instancia se fue realizando un incremento del flujo de alimentación a un sistema MED al alto vacío hasta agotar el rango de flujos donde aún se tiene generación de vapor en los 14 efectos, porque se observó que al seguir incrementando el flujo de alimentación al sistema y mantener una adición constante en el calentador de activación, se llega al punto en el que ya no se cuenta con generación de vapor en el efecto 1, dado a que la misma cantidad de calor se emplea en una mayor masa de agua de mar subenfriada y esto tiene como consecuencia que el primer efecto del sistema MED deje de funcionar como tal y pase a convertirse en la primer cámara de expansión súbita (etapa 1), en la que ahora sólo se tendrá generación de vapor por el flasheo que ocurre de pasar de la presión de saturación del calentador externo a la presión de la etapa 1.

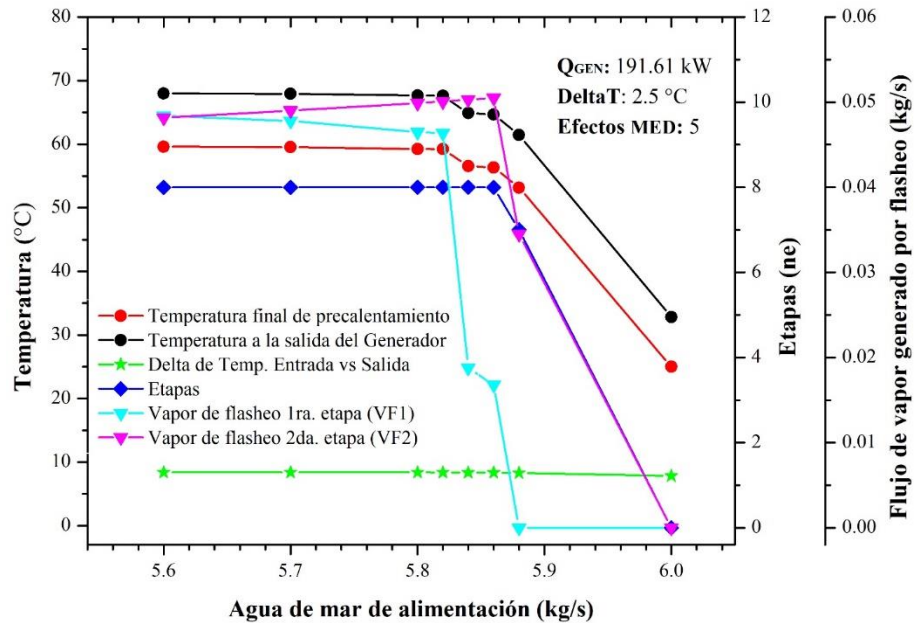
En la figura 3.19 se puede observar el perfil de temperaturas y presión en las etapas y efectos del sistema de desalinización híbrido múltiple efecto flash (MSF) y evaporación de múltiple efecto (MED). Es importante hacer notar que, si convertimos una MED al alto vacío de 14 efectos en un

sistema híbrido MSF/MED, el primer efecto donde normalmente también se conoce como el generador, deja de considerarse como tal y pasa a convertirse en el calentador externo de la sección de múltiple etapa flash. Por su parte, la última etapa de la sección flash (etapa 8) no cuenta con un condensador como todas las etapas anteriores, ya que esta suministra el vapor generado por flasheo al primer efecto de la sección MED, dando inicio a la sección de múltiple efecto.

El perfil de temperaturas del sistema híbrido va desde los 68 °C en el calentador externo hasta 4 °C en el último efecto de la sección MED (efecto 5). Este perfil se utiliza principalmente con el propósito de evitar problemas de corrosión en el extremo superior y llevar a cabo una desalinización al alto vacío para con esto lograr que el agua producto que se genere en el último efecto alcance una temperatura y presión adecuada para ser utilizado como refrigerante en un sistema de enfriamiento. Para esto es necesario recurrir al proceso de eyecto-condensación, dado a que el vapor en el último efecto tiene una temperatura muy por debajo de la lleva el agua de mar y es imposible condensar por gradiente de temperaturas.

En la figura 3.20 se puede observar que el nivel de precalentamiento en este sistema va disminuyendo conforme se incrementa el agua de mar de alimentación. Este comportamiento se debe que el sistema opera con una cantidad de calor externo constante y al tener mayores flujos de activación, se genera menor cantidad de vapor en la primera etapa y, por ende, en la cascada de etapas posteriores, lo cual ocasiona que no se pueda mantener el mismo nivel de precalentamiento. El agua de mar que es succionada por la bomba de agua de mar (BAM), ingresa en cada uno de los condensadores de las etapas flash donde se tiene gradiente de temperatura para recibir el calor latente de la condensación de los vapores de flasheo y con esto precalentarse antes de llegar al calentador externo de activación. De manera contraria, se descarta la sección de múltiple efecto para brindar precalentamiento debido a que tienen una temperatura más baja que la del agua de mar que ingresa a 25 °C.

En consecuencia al efecto anterior, se observa que conforme se aumenta el flujo de alimentación y se mantiene una adición de calor constante en el calentador auxiliar (CE), también se presenta una disminución en forma proporcional en la temperatura del agua de mar a la salida



**Figura 3.20:** Efecto de la variación del flujo de agua de mar de alimentación en las temperaturas a la entrada y salida del generador y en la generación de vapor flasheado en la primera etapa.

del CE. De igual manera es posible observar que la disminución en las temperaturas de precalentamiento alcanzada y la temperatura a la salida del CE, disminuyen conforme cae la generación de vapor de flasheo en la primera etapa; esta debido al efecto mencionado anteriormente, que produce que debido al subenfriamiento y la reducción de la generación de vapor, las etapas flash vayan dejando de funcionar paulatinamente conforme se siga aumentando el flujo de alimentación. Por último, en la misma figura es posible observar los límites de operación para el sistema MSF/MED al alto vacío con eyecto-condensación, el cual puede operar en un rango de flujo de alimentación que va de los 5.6 kg/s hasta los 6 kg/s en donde se deja de contar con etapas flash funcionando.

Por último, en la figura 3.20 podemos observar que conforme se aumenta el flujo de alimentación, la cantidad de vapor generado en la primera etapa va disminuyendo, debido a que la corriente de agua de mar que se introduce en la primera etapa, ingresa cada vez con una mayor condición de subenfriamiento, dado al incremento de flujo y a la adición de calor constante.

El efecto de generar cada vez menor cantidad de vapor de flasheo en la primera etapa y seguir aumentando el flujo de agua de mar de alimentación, nos lleva al punto donde la primera etapa

flash deja de funcionar, debido a que ya no se genera vapor en esta. Si se continua con el mismo proceso de incrementar el flujo de alimentación y mantener una adición de calor constante, al igual que sucedió con la etapa 1, la etapa 2 dejará de operar ya que cada vez se tendrá menor generación de vapor hasta llegar al punto de ya no presentar generación de vapor en dicha etapa. Por último, se observó que es posible incrementar el flujo de alimentación e ir dejando cada vez más etapas flash sin funcionar, hasta ya no tener ninguna etapa flash trabajando y operar el sistema únicamente con la sección de múltiple efecto MED. Sin embargo, en una primera instancia, el estudio de simulación no se desarrolló con la intención de determinar el flujo específico de cada uno de estos escenarios, sino que se realizó con la intención principal de conocer los escenarios en los extremos y determinar los límites operativos del sistema, y así con esto demostrar el funcionamiento operativo del sistema de desalinización híbrido MSF/MED-AV cuando se incrementa el flujo de alimentación y se emplea una cascada de presión al alto vacío y una integración del subproceso de eyecto-condensación.

En la figura 3.21 se observa de manera más precisa el comportamiento operativo del sistema híbrido de desalinización; se observa que el funcionamiento de la sección de etapas flash consiste en la generación de vapor de flasheo por cambio de presión, descartando así la generación de vapor por ebullición en el funcionamiento de las 8 etapas flash. Esto a su vez provoca que sólo se transfiera calor en los condensadores, el cual se presenta en la figura 3.22, a diferencia de un sistema MED, que en cada uno de sus efectos presenta transferencia de calor en su evaporador interno (IC) y en el precalentador (PC).

De la misma manera, en la figura 3.21 se observa que la generación de vapor por ebullición, la cual se provoca por la adición de calor a la salmuera, se produce en la sección de efectos de evaporación múltiple (MED), teniendo un impacto directo en la capacidad de agua producto.

Como se mencionó anteriormente, en la figura 3.22 se observa el comportamiento operativo de los condensadores en la sección flash de múltiple etapa, que de igual manera funcionan como precalentadores para el agua de mar de alimentación. Cada uno de los condensadores, recibe el vapor generado por flasheo en cada etapa y permite que éste ceda su calor latente de condensación al agua de mar de alimentación, convirtiéndose a la postre en los condensados de agua producto, mientras que el agua de mar sale con una mayor temperatura después de cada condensador dado al precalentamiento recibido, como se puede observar en el perfil de temperatura.

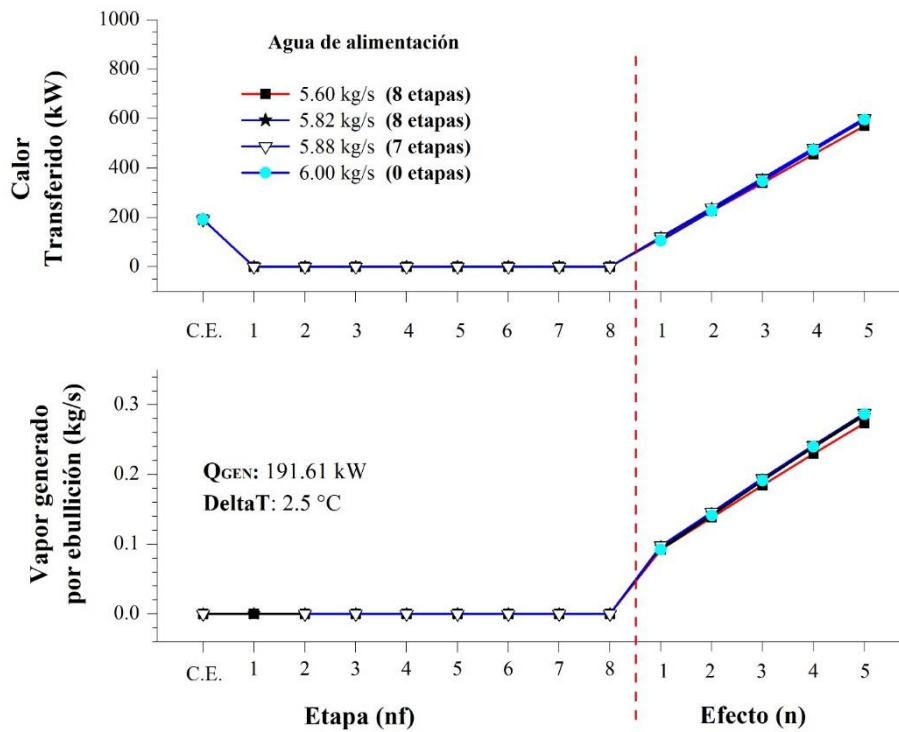


Figura 3.21: Comportamiento operativo de los efectos y etapas del sistema MSF/MED-AV.

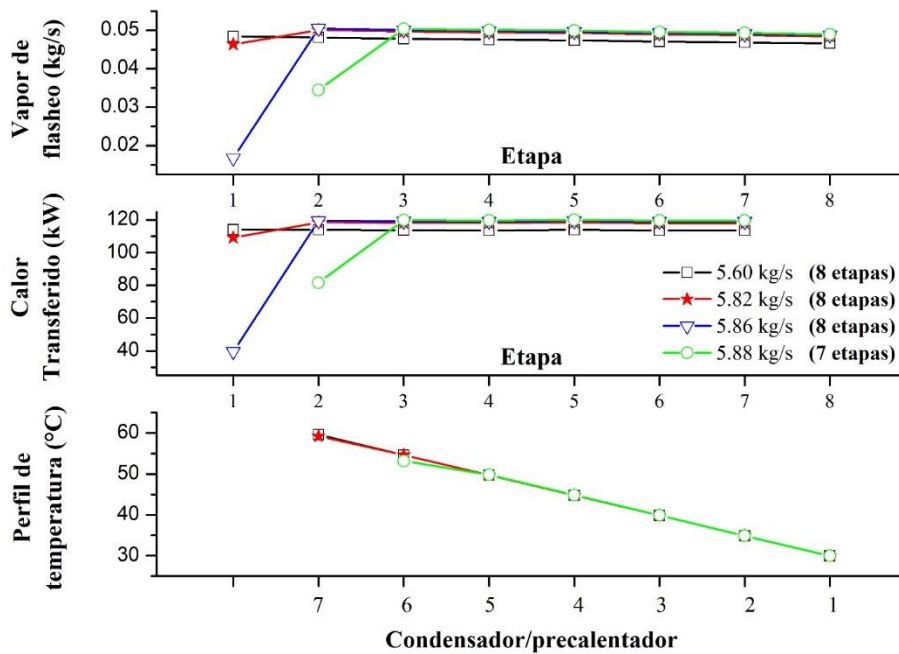


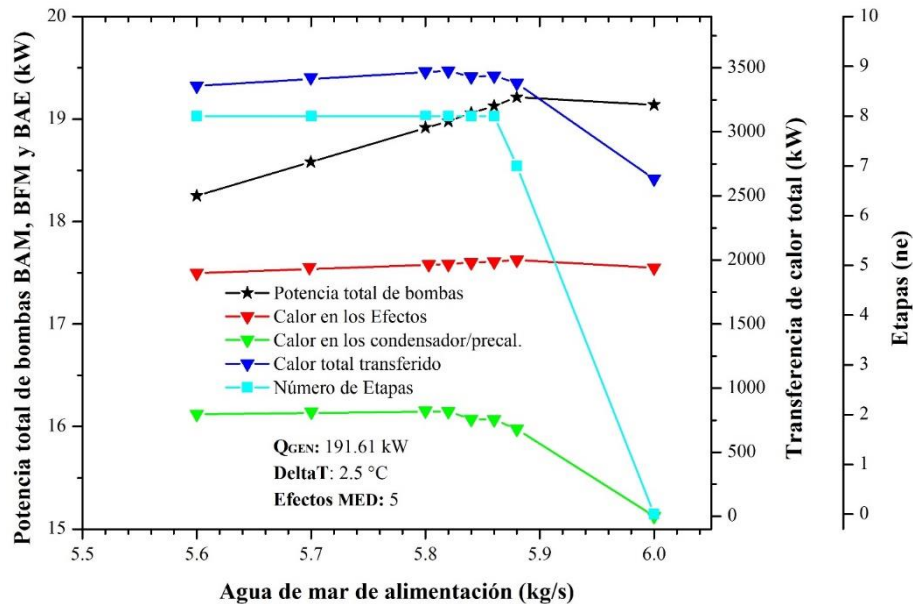
Figura 3.22: Comportamiento operativo de los condensadores/precalentadores del sistema híbrido MSF-MED al variar el flujo de alimentación de agua de mar.

En la figura 3.22 se muestra que, conforme se aumenta el flujo de alimentación de agua de mar, incrementa la cantidad de vapor generado por flasheo y derivado a esto también aumenta la cantidad de calor transferido en cada uno de los condensadores, al ser una mayor cantidad de vapor la que libera y cede su energía de condensación al agua de mar.

En la figura 3.23 se evaluó para diferentes flujos de alimentación, el comportamiento de la potencia total de bombeo que incluye la energía requerida por las bombas BAM (Bomba de Agua de Mar), BAP (Bomba de Agua Producto) y BAE (Bomba de Agua de mar de Enfriamiento), además de evaluar el requerimiento de área de transferencia de calor del sistema, a través de la variación en la cantidad de calor total transferido en el sistema.

En primera instancia se puede observar que el rango de flujos donde el sistema MSF/MED-AV opera con 8 etapas flash, va de los 5.6 kg/s hasta los 5.86 kg/s, dado a que cuando se sigue aumentando el flujo de alimentación el sistema tiende a operar cada vez con un menor número de etapas. Esto se demuestra en la condición de flujo de 5.88 kg/s donde el sistema empieza a funcionar con 7 etapas flash y 5 efectos MED, hasta llegar a la condición de flujo de 6.0 kg/s donde el sistema deja de operar sin ninguna de las etapas flash y haciéndolo únicamente con las 5 etapas de evaporación múltiple. Lo anterior tiene una relación directa en el comportamiento del calor total transferido, debido a que este aumenta de manera proporcional conforme se aumenta el flujo de agua de alimentación, sin embargo, en el momento que las etapas flash comienzan a dejar de funcionar una a una, la transferencia de calor total en el sistema empieza a disminuir debido a la reducción de componentes, entre los que destacan los condensadores. Por lo tanto, se observa que la disminución del calor total transferido en el sistema, es debido a la reducción de calor de los condensadores, conforme estos van dejando de operar junto a su etapa correspondiente.

Por su parte, en la misma figura, se observa que conforme se aumenta el flujo másico en la corriente de agua de mar de alimentación, se incrementan los requerimientos de potencia de bomba.

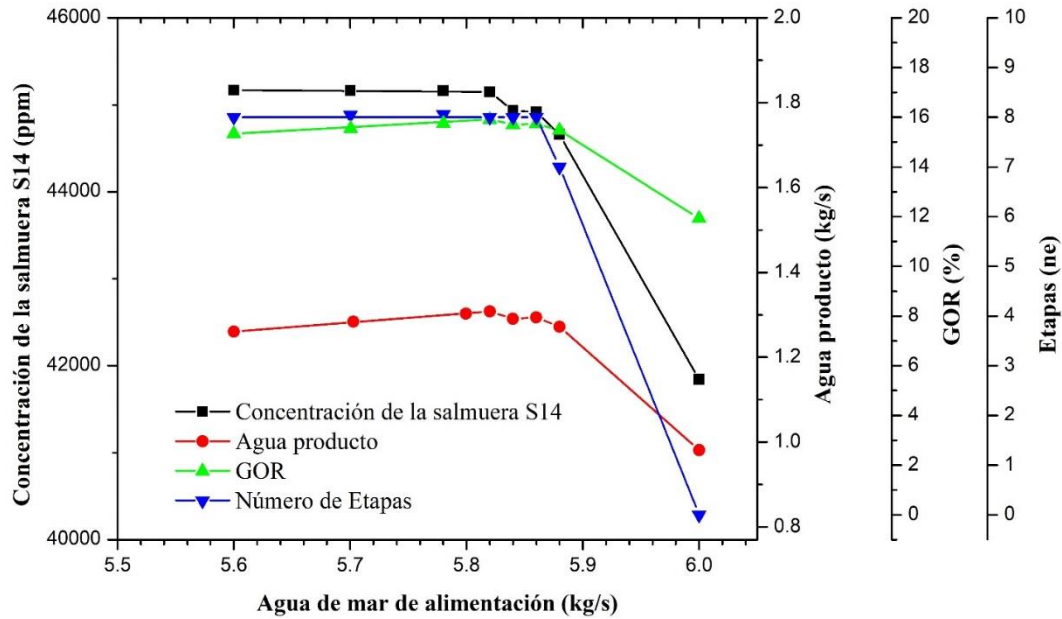


**Figura 3.23:** Efecto de la variación del agua de mar de alimentación en la potencia de bombeo requerida y el calor transferido en el sistema.

Por último, en la figura 3.24 se muestra el efecto de la variación del agua de mar de alimentación en la capacidad de agua producto, el nivel de concentración de sal en la corriente de salmuera del último efecto y en el indicador de eficiencia GOR.

Se observa que, conforme se aumenta el flujo másico de alimentación, la capacidad de agua producto incrementa hasta llegar a la condición de flujo (5.88 kg/s), donde el sistema pasa de operar con 8 etapas flash a hacerlo con 7 etapas. El mismo comportamiento se tiene con el indicador de eficiencia GOR. De manera contraria, se observa que la concentración de sal en la corriente de salmuera a la salida del último efecto, disminuye conforme se aumenta el flujo en la alimentación, debido a que a la misma vez que incrementa el flujo de alimentación, aumenta la cantidad de vapor de flasheo que se retira del agua de mar a lo largo de las etapas y efecto del sistema.

En base al estudio operativo que se presenta, se establece que la condición de flujo de 5.6 kg/s es la mejor condición de diseño, dado a que se observa la mejor relación entre los indicadores de capacidad, eficiencia y los requerimientos del sistema (potencia de bomba, número de componentes y la cantidad de calor transferido que define el área de transferencia de calor).



**Figura 3.24:** Efecto de la variación del agua de mar de alimentación en la capacidad de agua producto, concentración de la salmuera y el indicador de desalinización GOR.

Después de haber hecho el análisis operativo para mostrar la viabilidad técnica de la tecnología propuesta, en la Tabla 3.11, se muestra el resumen de las propiedades de todas corrientes del sistema para una condición donde se dispone de una temperatura de 25 °C para el agua de mar que es succionado por la bomba de agua de mar (BAM) y un flujo másico de 5.6 kg/s para la corriente de agua de mar que se alimenta a las etapas y posteriormente a las efectos (3). En la tabla 3.11 se muestran los indicadores del sistema de desalinización MSF/MED-AV, la cantidad de agua producto, así como la transferencia de calor de cada uno de los componentes. Se producen 1.28 kg/s equivalentes a 108,926.232 L/día, suficientes para satisfacer las necesidades de una comunidad de hasta 1,045 personas, según la Organización Mundial de la Salud (OMS) (Howard & Bartram, 2003).

Tabla 3.11: Evaluación energética del sistema híbrido FLASH/MED-AV propuesto.

COMPONENTES	BALANCE DE ENERGÍA	GANANCIAS (kW)	PÉRDIDAS (kW)	INTEGRACIÓN ENERGÉTICA INTERNA (kW)
GENERADOR	$Q_{GEN} = m_{11}h_{11} - m_8h_8$	191.612		
DISIPADOR	$Q_{DIS} = m_{69}h_{69} - m_{68}h_{68}$		663.811	
EFFECTOS PRECALENTADORES				1,704.955 796.295
BAM	$W_{BAM} = m_2v_2(P_3 - P_2)/Eff_{BAM}$	0.974		
BFM	$W_{BAP} = m_{67}v_{67}(P_{68} - P_{67})/Eff_{BAP}$	9.003		
BAE	$W_{BAE} = m_{63}v_{63}(P_{64} - P_{63})/Eff_{BAE}$	8.275		
<b>FLUJO DE LAS CORRIENTES</b>				
$m_2h_2$	Entrada del agua de mar	-87,018.617		
$m_{60}h_{60}$	Salida de la salmuera		-67,377.363	
$m_{62}h_{62}$	Salida del agua producto		-20,095.201	
<b>TOTAL</b>		<b>-86,808.753</b>	<b>-86,808.753</b>	<b>2,501.20</b>
AGUA PRODUCTO		108,926.232 L/día		<b>Producción diaria</b>
RR	$RR = m_{62}/m_3$	0.225		<b>Recovery Ratio</b>
GOR	$GOR = m_{62}/m_9$ $* GOR = (m_{62} * 2,326kJ/kg)/Q_{GEN}$	15.337		<b>Gain Output Ratio</b>

Tabla 3.12: Características termodinámicas y operativas del sistema MSF/MED al alto vacío.

<b>Etapa/Efecto</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Presión (kPa)</b>	<b>Agua producto (kg/s)</b>	<b>Concentración de la salmuera (ppm)</b>	<b>Q (kW)</b>	<b>Temperatura del agua de mar (°C)</b>
<b>C.E.</b>	68.00	28.30	-	35,000.0	191.61	67.99
<b>1</b>	63.08	22.73	0.0635	35,305.1	-	59.22
<b>2</b>	58.15	18.10	0.063	35,611.4	-	59.22
<b>3</b>	53.23	14.32	0.0628	35,918.1	-	54.63
<b>4</b>	48.31	11.23	0.0626	36,225.9	-	49.68
<b>5</b>	43.38	8.72	0.0624	36,535.4	-	44.76
<b>6</b>	38.46	6.72	0.0622	36,845.5	-	39.83
<b>7</b>	33.54	5.13	0.0621	37,156.8	-	34.86
<b>8</b>	28.61	3.87	0.0619	37,469.4	-	29.93
<b>1</b>	23.69	2.89	0.0617	37,783.8	113.88	25.00
<b>2</b>	18.77	2.14	0.0616	38,443.1	225.95	25.00
<b>3</b>	13.85	1.56	0.0614	39,473.7	339.51	25.00
<b>4</b>	8.92	1.12	0.0613	40,934.3	455.52	25.00
<b>5</b>	4.00	0.79	0.0611	42,919.1	570.07	25.00
<b>Total</b>			<b>1.2607</b>		<b>1,896.56</b>	

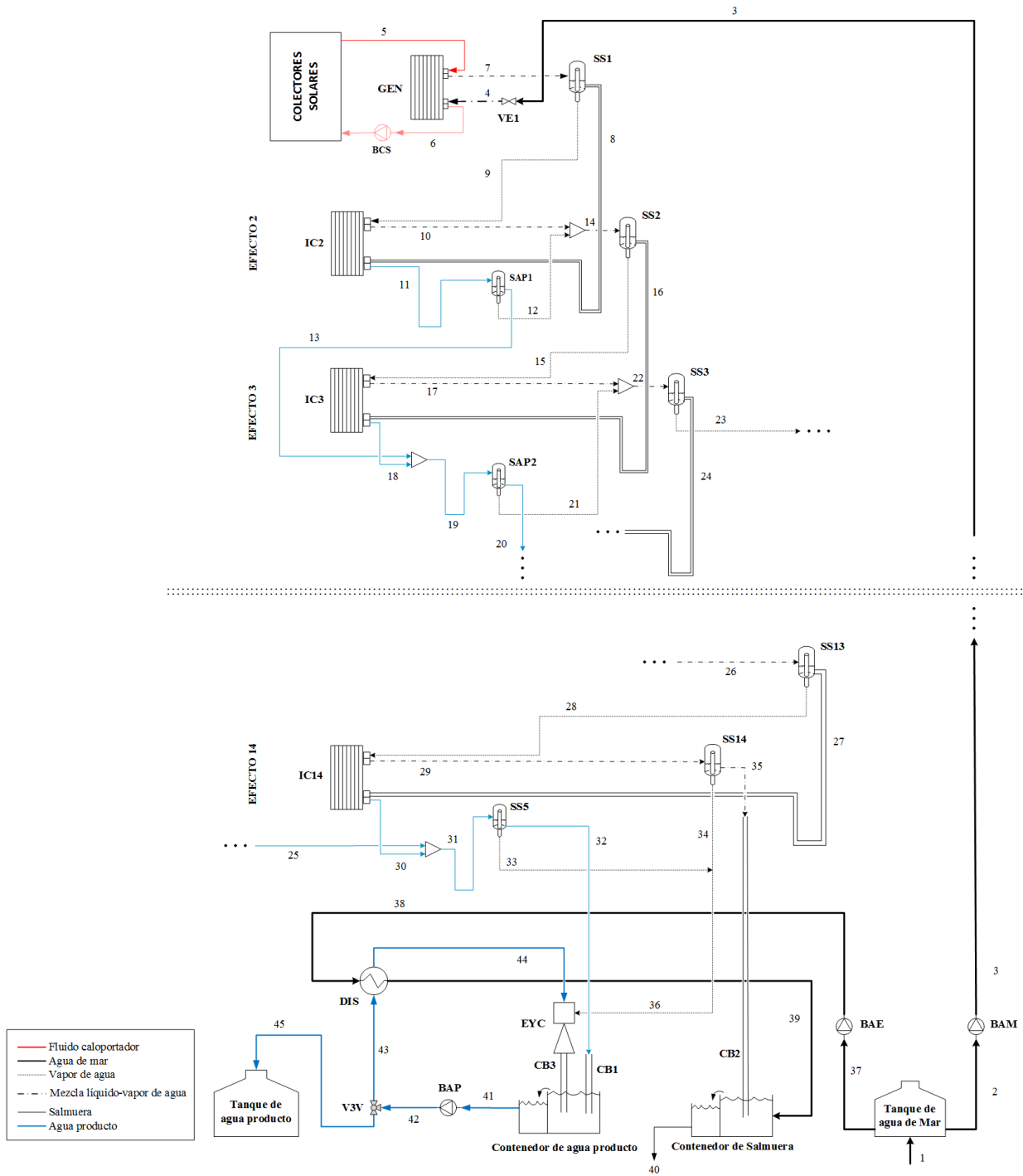
Tabla 3.13: Propiedades termodinámicas de las corrientes y evaluación energética de la tecnología propuesta.

### **3.4. Sistema de desalinización MED al alto vacío con baja temperatura de activación (MED-AV-BTA)**

En esta sección se presenta y evalúa el comportamiento de la propuesta tecnológica de desalinización MED al alto vacío con eyecto-condensación y baja temperatura de activación, el cual es activado mediante energía solar térmica. En esta propuesta al igual que en los sistemas MED-AV y MSF/MED-AV, se establece una cascada de presión y temperatura que alcanza la presión correspondiente a una temperatura de saturación de 4 °C en el último efecto, pero a diferencia de los dos sistemas anteriores, el sistema propuesto en esta sección, parte de una Top Brine Temperature (TBT) de 25 °C en el primer efecto, temperatura que coincide con la temperatura a la cual ingresa el agua de mar de alimentación, ocasionando que el agua de mar no requiera ser precalentada, por lo tanto todo el vapor generado en los efectos se dispondrá para la generación de más vapor, que a su vez se verá reflejada en el incremento de la capacidad de agua producto. Además, se tendrá una disminución bastante significativa en los requerimientos de energía solar externa al tener una TBT de 25 °C, impactando directamente en los costos de inversión inicial, mantenimiento y de operación.

#### **3.4.1. Descripción del sistema**

En la figura 3.25 se presenta el esquema del sistema MED-AV-BTA, el cual está conformado por dos subsistemas: 1) el subsistema de desalinización MED al alto vacío y 2) el subsistema de enfriamiento, extracción y adecuación de agua producto. El primer subsistema; está constituido por 14 efectos (n), una bomba de agua de mar (BAM) y un sistema de captación y almacenamiento de energía térmica para la activación del proceso MED-AV. Por otra parte, el segundo subsistema está conformado por un eyecto-condensador (EYC), un depósito para agua producto (TAP), un disipador de calor (DIS), un evaporador (EVA) para llevar a cabo el enfriamiento, un contenedor de salmuera (TSAL), dos bombas; una para agua producto (BAP) y otra para el agua de mar de enfriamiento (BAME), y tres columnas barométricas; una para la extracción del agua producto (CB1), extracción de salmuera (CB2) y otra para mantener el vacío en el eyector (CB3).



**Figura 3.25:** Diagrama del sistema de desalinización por evaporación múltiple efecto al alto vacío con baja temperatura de activación en el primer efecto (TBT).

De acuerdo con la figura 3.25, la bomba BAM succiona a la corriente (2) proveniente del recipiente de agua de mar y la lleva hacia el subsistema de desalinización MED como la corriente (3). La corriente (3), a diferencia de una MED convencional con precalentamiento, es dirigida directamente hacia el generador (GEN) en el primer efecto, debido a que la temperatura de activación (TBT) que se tiene en el efecto 1 coincide exactamente con la temperatura a la que ingresa el agua de mar (25 °C); y por lo tanto no requiere ser precalentada. La corriente (3) previamente a entrar al generador, pasa por una válvula de expansión (VE1) para bajar súbitamente su presión hasta la presión de saturación del primer efecto de la MED, quedando como una corriente saturada (4). En estas condiciones, la corriente (4) ingresa al generador, donde recibe el calor del fluido caloportador proveniente del campo de colectores solares en manera de calor latente, para posteriormente salir del generador como una corriente en dos fases (7), y en esta condición entrar a un separador líquido-vapor (SS1) resultando en las corrientes de salmuera y vapor (8) y (9) respectivamente.

La corriente de salmuera (8) es dirigida al evaporador del segundo efecto de la MED (IC2), ingresando a través de una tubería en forma de U, la cual permite tener un sello hidráulico para mantener la diferencia de presión que existe entre el generador y el efecto 2. Cuando la corriente (8) pasa de tener la presión del GEN a la del siguiente efecto, esta disminuye su presión y temperatura provocando que la salmuera (8) se vaya a dos fases. En esta condición ingresa al IC2. Por otro lado, el vapor de agua (9) ingresa al IC2 y al tener mayor temperatura que la corriente de salmuera (8), el vapor le cede su calor latente hasta condensarse y convertirse en la primer agua producto de la MED (11). El condensado de la corriente (11) se unirá con el agua producto de los efectos posteriores. La salmuera (10) que sale del IC2 y que se encuentra en dos fases, es dirigida al separador ciclónico líquido-vapor (SS2), en donde se separan las corrientes de vapor (15) y de salmuera (16). La corriente de vapor (15) ingresa al evaporador del tercer efecto (IC3) cediendo su calor a la corriente de salmuera (16) hasta condensarse totalmente. Por su parte, la salmuera (16) es dirigida por una tubería en U hacia el IC3 y repetir lo ocurrido con la corriente de salmuera (8). Lo ocurrido en el efecto 2, sucede en los posteriores efectos, hasta el efecto 13.

El agua producto de todos los efectos se comunica por medio de tubos en forma de U, con los que se logra mantener la diferencia de presión entre efectos. Este proceso se repite hasta el último

efecto (Efecto 14). El total de agua producto (39) que se obtiene de los catorce efectos del sistema, es llevada al subsistema de extracción y adecuación de agua producto por medio de una columna barométrica (CB1), mientras que la salmuera (35) a la salida del último efecto, es llevada al contenedor de salmuera a través de una columna barométrica (CB2), donde posteriormente se diluirá al mezclarse con la corriente de agua de mar (33) antes de ser expulsada del sistema.

En el subsistema de enfriamiento, extracción y adecuación de agua producto, el agua producto de la MED es utilizada como refrigerante. Para controlar la capacidad de enfriamiento y adecuarla a la demanda, la válvula de tres vías (V3V2) varía el flujo de la corriente (33), desviando el remanente por la corriente (39). La corriente (33) que viene con las condiciones de presión y temperatura del último efecto, ingresa al EVA para producir el efecto frigorífico.

Por otro lado, la corriente (39) es dirigida al contenedor de agua producto a través de la columna barométrica (CB1). El vapor de agua (36), que sale del último efecto de la MED, se une al vapor (37) proveniente del evaporador enfriador (EVA), para posteriormente ser succionado por el eyector (38), el cual es activado por el agua producto (49) suministrada por la bomba (BAP), actuando como el fluido motriz del eyector.

Dentro del eyector, se mezclan las corrientes (38) y (49), resultando en una corriente líquida debido al incremento de presión en el difusor del eyector. La presión de descarga en el eyector tiene una presión intermedia entre las corrientes (38) y (49). Dentro del eyector, el calor de la condensación de la corriente de vapor (38), es recibido por la corriente del fluido motriz (49), teniendo como resultado un aumento en la temperatura de la mezcla a la salida del eyector. La corriente condensada y con mayor temperatura que sale del eyector, es dirigida a la columna barométrica (CB3) para mantener el vacío en el sistema y posteriormente se deposita en el recipiente de agua producto del eyector. A la salida de la columna barométrica CB2, el agua producto se encuentra a presión atmosférica. Del recipiente de agua producto, la bomba BAP succiona a la corriente (46) para activar nuevamente al eyector. La corriente de agua producto (47) que sale de la bomba BAP es llevada a una válvula divisora de tres vías (V3V) y es dividida en las corrientes (48) y (50). El flujo másico de la corriente (50) corresponde al agua producto del sistema y es igual a la suma de las corrientes (39) y (38).

Por otro lado, la corriente (48), ingresa al intercambiador de calor (DIS) del subsistema, en donde la corriente de agua de mar (43) le retira el calor de condensación que recibió del vapor (38) y dejando a la corriente (44) a la misma condición de temperatura a la entrada del eyector. Por su parte, la corriente de agua de mar (44) después de enfriar a la corriente (48) es dirigida al contenedor de salmuera para diluir la concentración de sal a la salmuera (34) que sale del último efecto. Con el eyecto-condensador se logra llevar a la MED a un nivel de vacío superior al convencional, ya que este equipo permite condensar un vapor a baja temperatura y en condición de presión de alto vacío. Lo anterior permite tener un sistema de desalinización MED con mayor producción de agua.

### 3.4.2. Metodología de estudio

Al igual que con las dos propuestas tecnológicas anteriores, para llevar a cabo el estudio de la propuesta tecnológica MED-AV-BTA con eyecto-condensación, se utiliza la misma metodología mostrada en la figura 3.11, en donde se muestra el diagrama de la metodología general para el desarrollo de la propuesta tecnológica de desalinización MED al alto vacío, con eyecto-condensación y baja temperatura de activación, además de los procedimientos utilizados para desarrollar la simulación en el software Aspen Plus, con la finalidad de mostrar la viabilidad técnica del sistema, bajo distintas condiciones de operación. Para realizar la simulación del comportamiento operativo del sistema se asumen las siguientes consideraciones:

- El sistema de desalinización MED al alto vacío con eyecto-condensación y baja temperatura de activación, opera en estado estable.
- Las condiciones de presión en el generador (GEN) y efecto 1, corresponden a una Top Brine Temperature (TBT) de 25 °C.
- La presión en el último efecto del subsistema MED (efecto 5) es la presión correspondiente a una temperatura de saturación de 4 °C.
- Se consideró una temperatura mínima de aproximación de 2.8 °C entre las corrientes de fluido caloportador de activación en el GEN (5) y la corriente de agua de mar (7) que sale del GEN. Con la intención de homogenizar los estudios operativos de las tecnologías, para el fluido caloportador de activación, al igual que en las propuestas anteriores, se consideró el flujo másico al utilizado por la planta solar experimental de Almería por ([Palenzuela et al., 2014](#)); el flujo del fluido caloportador  $m_5 = 0.0822 \text{ kg/s}$ .
- El generador (GEN) y los evaporadores en los efectos MED, trabajan en condiciones de saturación y la caída de presión en los equipos y tuberías es despreciable.

Al igual que en todas las propuestas anteriores, se utilizan los indicadores GOR y RR, para evaluar el efecto de la desalinización MED. El GOR, representa una relación de la cantidad de agua producida entre el vapor de activación requerido, mientras que el indicador RR, es una relación que representa la cantidad de agua producto respecto al agua de mar de alimentación suministrada a la MED. Los indicadores se presentaron en las ecuaciones (3.1) y (3.2).

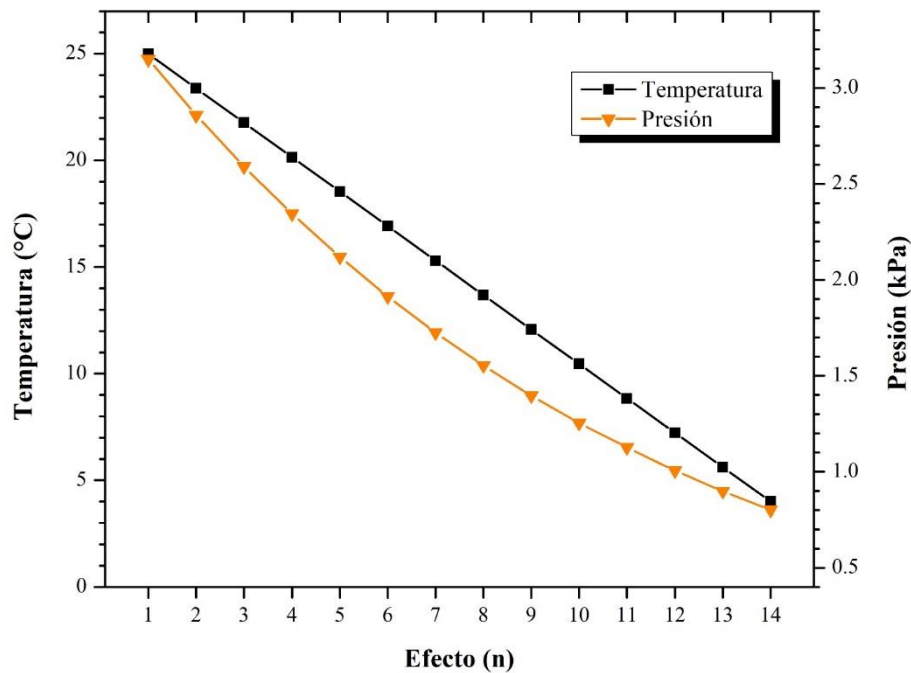
### 3.4.1. Análisis y discusión de resultados.

El comportamiento operativo del sistema de desalinización MED-AV con baja temperatura de activación depende de las intermitencias del recurso solar, así como del flujo y temperatura del agua de mar de alimentación que ingresa al primer efecto de la MED. La variabilidad de la energía solar, tiene un impacto directo en la capacidad y eficiencia del campo de colectores solares y se manifiesta directamente en la temperatura del fluido caloportador, provocando diferentes condiciones de operación en el sistema propuesto, de la misma manera la variación del flujo másico y las condiciones del agua de mar influyen directamente en los indicadores de eficiencia y en la capacidad del sistema. Por lo tanto, la viabilidad técnica de la propuesta tecnológica, se evaluó estudiando el efecto que tiene la variación del flujo de agua de mar de alimentación en la capacidad total del sistema y su repercusión en los indicadores de eficiencia GOR y RR. Lo anterior con la finalidad de establecer las condiciones estándar de diseño.

Con el propósito de evaluar el comportamiento del sistema MED al alto vacío con baja temperatura de activación, bajo diferentes condiciones de flujo de agua de mar de alimentación, se establecieron como valores constantes, el calor de activación en el GEN 191.61 kW, la temperatura del vapor de activación de 70.8 °C y el delta mínimo en la temperatura de aproximación de 2.5 °C para todos los intercambiadores de calor. Además, se utiliza una concentración y temperatura en el agua de mar de alimentación de 35,000 ppm y 25 °C respectivamente, como se muestra en la Tabla 3.14.

**Tabla 3.14:** Datos de entrada del sistema MED al alto vacío con baja temperatura de activación.

Número de efectos ( $n$ )	14	-
Número de precalentamientos ( $PC$ )	0	-
Temperatura del agua de mar a la entrada del sistema ( $T_{cw, in}$ )	25.0	°C
Concentración de sal del agua de mar de alimentación ( $X_f$ )	35,000	ppm
Flujo másico del vapor de activación ( $M_s$ )	0.0822	kg/s
Temperatura del vapor de activación ( $T_s$ )	70.8	°C
Calor externo de activación ( $Q_{gen}$ )	191.61	kW
Temperatura del agua de mar a la entrada del primer efecto ( $T_{BT}$ )	25.0	°C
Rango de la cascada de temperaturas del sistema	25 - 4	°C

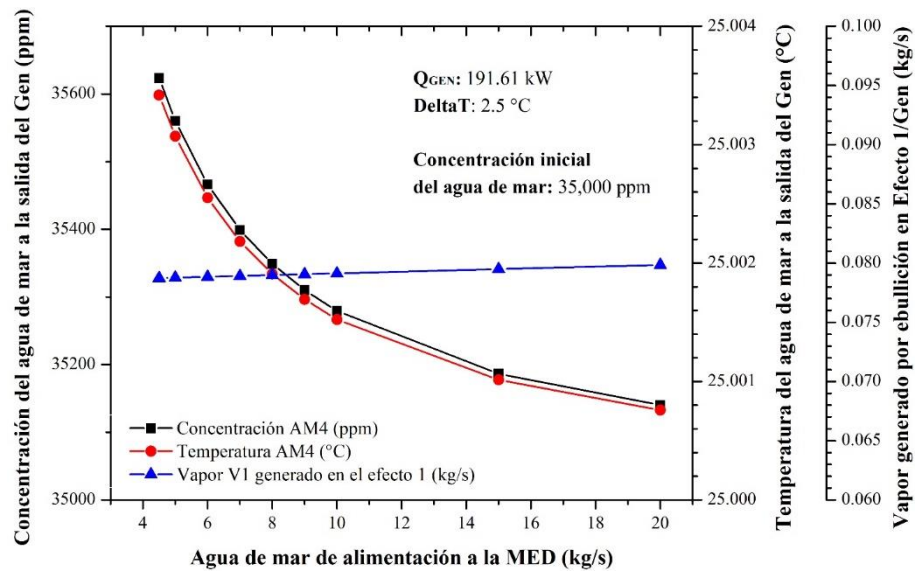


**Figura 3.26:** Perfiles de presión y temperatura de operación del sistema MED-AV-BTA.

En la figura 3.26 se puede observar el perfil de presión y temperatura, el cuál va desde los 25 °C hasta los 4 °C. El hecho de que en el primer efecto y generador se tenga una TBT de 25 °C tendría como consecuencia favorable el poder utilizar colectores solares de calor de bajo costo y alta eficiencia para la activación del sistema, esto debido que, al tener una baja temperatura de activación, los colectores solares tendrían que operar en rangos de temperaturas bajo, brindando únicamente un gradiente de temperatura de 15 °C máximo por encima de la TBT establecida.

Una de las principales características del sistema es que, no cuenta con precalentadores dado a que el agua de mar de alimentación no requiere ser precalentada, por contar con la misma condición de temperatura en el agua de mar de alimentación y la TBT del primer efecto 25 °C.

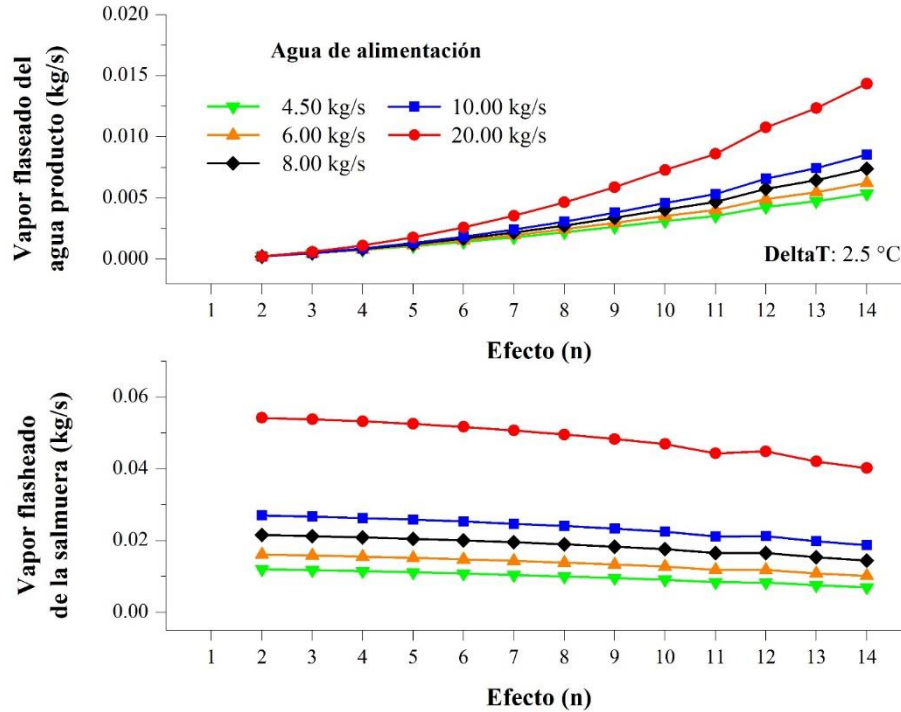
Con la intención de evaluar el comportamiento operativo del generador (GEN), en la figura 3.27 se muestra el efecto que tiene la variación del flujo de agua de mar en el nivel de concentración de la salmuera a la salida del GEN (7) al igual que la temperatura con la que sale esta corriente; además se presenta la cantidad de vapor generado por ebullición a la salida del generador.



**Figura 3.27:** Efecto de la variación del flujo de agua de mar en la concentración de salmuera y la cantidad de vapor generado por ebullición a la salida del generador.

A pesar de que el sistema MED-AV-BTA nos permite trabajar en un rango de operación que alcanza flujos de alimentación bastante altos con respecto a los sistemas analizados anteriormente, se estableció un rango de flujos de los 4 kg/s hasta los 20 kg/s, para la realización de este estudio. En la figura 3.27 se muestra que, a pesar de operar dentro de un amplio rango de flujos de alimentación, las condiciones de las variables analizadas a la entrada y salida del GEN, son casi constantes. Se menciona esto debido a que, la variable de temperatura de salida del generador, no presenta un incremento mayor al 0.01%, operando dentro del rango de flujos mencionado anteriormente. Por su parte, el incremento que se tiene en la concentración de la salmuera es de tan solo 1.12% y la variación en la generación de vapor en el primer efecto no rebasa el 1.25%; todo esto debido a que, se mantiene constante el calor en la fuente de activación y a que el agua de mar ingresa a la misma temperatura que la condición de saturación en el primer efecto.

En la figura 3.28 se muestra el efecto que tiene la variación de flujo del agua de mar de alimentación en la generación de vapor de flasheo tanto de la salmuera como del agua producto. Se observa que conforme se opera en condiciones de mayor flujo de alimentación la generación de vapor de flasheo de ambas corrientes aumenta, esto debido a que conforme se tiene mayor masa o cantidad de agua, el vapor de agua liberado en el flasheo será cada vez mayor.



**Figura 3.28:** Efecto de la variación del flujo de agua de mar en la generación de vapor de flasheo de la salmuera y agua producto.

De igual manera, al analizar el comportamiento de la generación de vapor flasheado de la salmuera se observa que, se tiene una ligera pero constante disminución efecto tras efecto, siendo este un comportamiento esperado debido a que, los saltos de presión de un efecto con respecto al otro, no son constantes; además de que, conforme la salmuera pasa de un efecto a otro en el que previamente ya se le retiro un porcentaje de vapor de agua, tiene una menor capacidad de flasheo con respecto el efecto anterior.

Por otra parte, para analizar el comportamiento operativo de los efectos del sistema MED-AV-BTA, en la figura 3.29 se muestran las variables de vapor generado por efecto y el calor transferido en cada uno de ellos. Se observa que al igual que el vapor de flasheo mostrado en la imagen anterior, el vapor generado por ebullición y el calor transferido aumentan proporcionalmente conforme se opera en condiciones de flujo de alimentación más elevadas. También se observa que, debido a que el sistema presenta una menor complejidad de operación al no contar con precalentadores, tanto la generación de vapor por la ebullición de la salmuera y el calor transferido

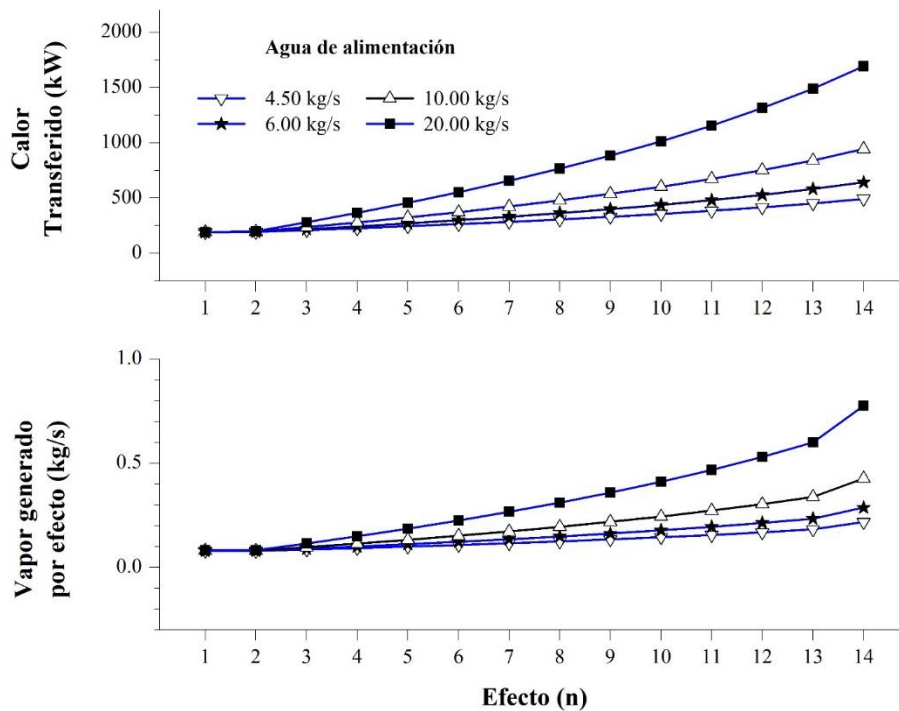
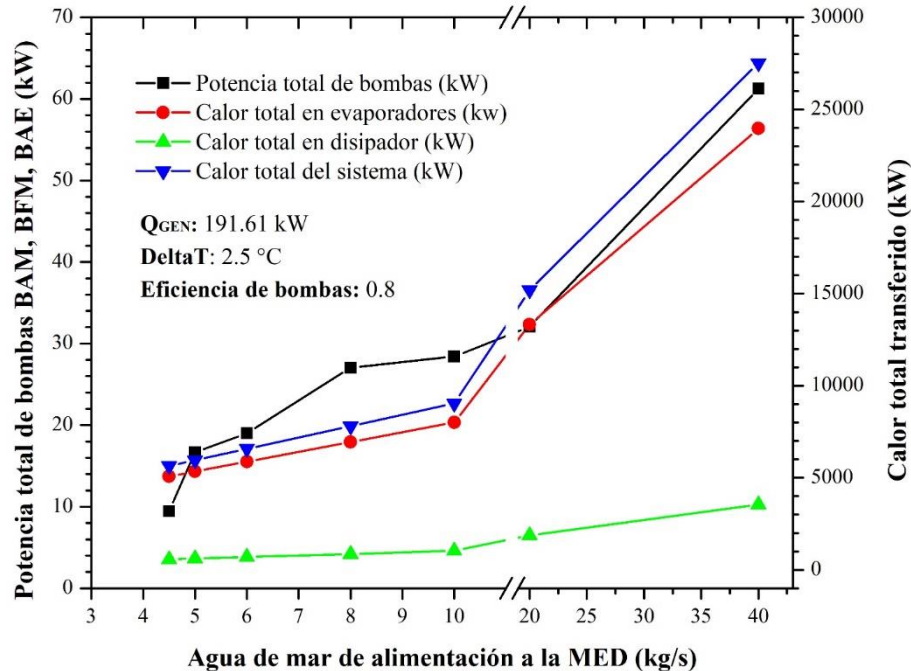


Figura 3.29: Comportamiento operativo de los efectos del sistema MED al alto vacío con BTA.

aumentan progresivamente efecto tras efecto, lo cual a diferencia de una MED convencional, se debe a que el vapor que se genera por flasheo en cada efecto deja de ser utilizado para precalentamiento, provocando que este se una con el vapor generado por la adición de calor y esto a su vez provoque que la salmuera sea calentada hasta el punto de ebullición por una mayor cantidad de vapor, que a la postre se reflejará en una mayor capacidad de agua producto.

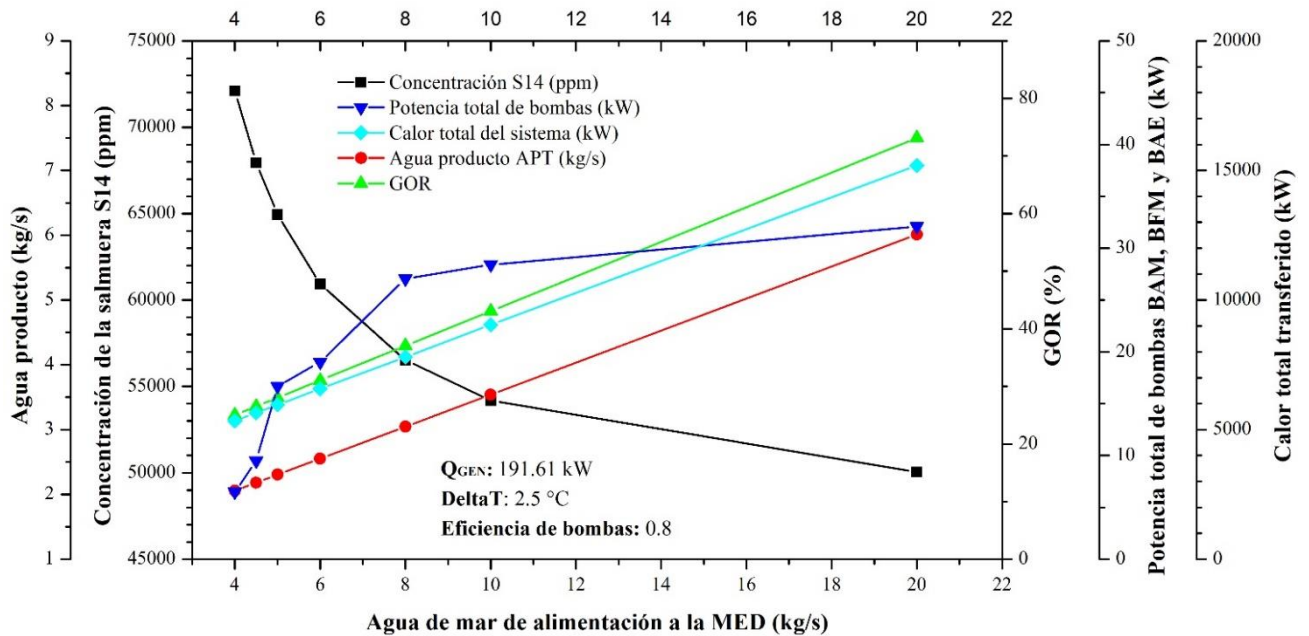
En la figura 3.30 se muestra el efecto que tiene la variación del flujo de agua de alimentación en los requerimientos de potencia total de bomba, la cual incluye a las bombas BAM, BAP y BAE y en el calor total transferido en el sistema, lo cual es un indicador que se relaciona directamente con la cantidad de área de transferencia de calor que requerirá en el equipo de desalinización. Además, se muestran las cantidades de calor transferido en los diferentes componentes, como lo son los evaporadores y condensadores de cada efecto, y el disipador en el subproceso de eyecto-condensación. Considerando los parámetros de potencia de bomba y calor transferido total se observa que, conforme se incrementa el flujo de agua de alimentación, también incrementa la cantidad de calor transferida y la potencia de bombeo.



**Figura 3.30:** Efecto de la variación del agua de mar de alimentación en la potencia de bombeo requerida y el calor transferido en el sistema.

Lo anterior tiene un grado de importancia bastante elevado dado a que, estos parámetros están directamente relacionados con la inversión inicial para el diseño del sistema y los costos de operación y mantenimiento del mismo.

Por último, en la figura 8 se muestran los indicadores de capacidad y eficiencia, además de mostrar nuevamente los parámetros de potencia total de bomba y calor total transferido con la intención de mostrar la mejor condición de diseño del sistema. En primer lugar, se observa que, conforme se incrementa el flujo en la corriente de agua de mar de alimentación, se tiene una mayor capacidad de agua producto. El mismo comportamiento se tiene en el indicador de eficiencia GOR, dado que éste representa una relación de la cantidad de agua producida entre el vapor de activación requerido, el cual permanece constante. Debido a esto, podría considerarse que la mejor condición de operación corresponde a utilizar el mayor flujo de alimentación posible en el sistema dado que presenta los mayores valores de eficiencia y capacidad, sin embargo, como observamos en la figura 7 y se reitera en la figura 8, las condiciones de operación con mayores flujos de alimentación también coinciden con los mayores requerimientos totales de potencia de bombas y de área de transferencia de calor, provocando un incremento considerable en el costo total del sistema.



**Figura 3.31:** Efecto de la variación del agua de mar de alimentación en la capacidad de agua producto, concentración de la salmuera y el indicador de desalinización GOR.

Considerando lo anterior, se eligió la condición de flujo de 5.6 kg/s como la mejor condición de diseño, dado a que es la que muestra la mejor relación entre los indicadores de capacidad y eficiencia y los requerimientos energéticos del sistema. De la misma manera, se consideró importante elegir la misma condición de flujo que el sistema MSF/MED-AV para realizar una comparación más precisa entre ambas propuestas, y de igual manera compararlas con el resto de tecnologías. El estudio comparativo mencionado se presenta en la siguiente sección.

Después de haber hecho el análisis operativo para mostrar la viabilidad técnica de la tecnología propuesta, en la Tabla 3.15, se muestra el resumen de las propiedades de todas corrientes del sistema para una condición donde se dispone de una temperatura de 25 °C para el agua de mar que es succionado por la bomba de agua de mar (BAM) y un flujo másico de 5.6 kg/s para la corriente de agua de mar que se alimenta a los efectos (3). En la tabla 3.16 se muestran los indicadores del sistema de desalinización MED-CONV, la cantidad de agua producto, así como la transferencia de calor de cada uno de los componentes. Se producen 2.44 kg/s equivalentes a 210,816 L/día, suficientes para satisfacer las necesidades de una comunidad de hasta 2,007 personas, según la Organización Mundial de la Salud (OMS) (Howard & Bartram, 2003).

Tabla 3.16: Evaluación energética del sistema MED al alto vacío con baja temperatura de activación (MED-AV-BTA)

COMPONENTES	BALANCE DE ENERGÍA	GANANCIAS (kW)	PÉRDIDAS (kW)	INTEGRACIÓN ENERGÉTICA INTERNA (kW)
<b>GENERADOR</b>	$Q_{GEN} = m_7 h_7 - m_4 h_4$	191.612		
<b>DISIPADOR</b>	$Q_{DIS} = m_{44} h_{44} - m_{43} h_{43}$		663.811	
<b>EFFECTOS PRECALENTADORES</b>				5,240.087
<b>BAM</b>	$W_{BAM} = m_2 v_2 (P_3 - P_2) / Eff_{BAM}$	0.780		-
<b>BAP</b>	$W_{BAP} = m_{41} v_{41} (P_{42} - P_{41}) / Eff_{BAP}$	9.010		
<b>BAE</b>	$W_{BAE} = m_{37} v_{37} (P_{38} - P_{37}) / Eff_{BAE}$	8.282		
<b>FLUJO DE LAS CORRIENTES</b>				
$m_2 h_2$	Entrada del agua de mar	-87,018.617		
$m_{60} h_{60}$	Salida de la salmuera		-48,581.625	
$m_{62} h_{62}$	Salida del agua producto		-38,891.679	
<b>TOTAL</b>		<b>-86,808.933</b>	<b>-86,808.933</b>	<b>5,240.087</b>
<b>AGUA PRODUCTO</b>		210,816 L/día		<b>Producción diaria</b>
<b>RR</b>	$RR = m_{32} / m_3$	0.296		<b>Recovery Ratio</b>
<b>GOR</b>	$GOR = m_{32} / m_5$	29.66		<b>Gain Output Ratio</b>
	* $GOR = (m_{32} * 2,326 \text{ kJ/kg}) / Q_{GEN}$			

Tabla 3.17: Características termodinámicas y operativas de la MED-AV-BTA.

Tabla 3.15: Propiedades termodinámicas de las corrientes y evaluación energética de la tecnología propuesta.

### 3.5. Estudio comparativo de las propuestas tecnológicas

En las secciones 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4 se presentó la viabilidad técnica de las propuestas tecnológicas planteadas en esta Tesis. En esta sección se hace un estudio comparativo entre las propuestas tecnológicas MED-CONV, MED-AV, MSF/MED-AV Y MED-AV-BTA. Como se mostró anteriormente; las propuestas tecnológicas planteadas son viables técnicamente hablando, pero dependiendo de los escenarios planteados, cada una puede ser más competitiva.

Para vislumbrar una comparación detallada del potencial de las propuestas tecnológicas, en la Tabla 3.18 se presentan las variables y parámetros utilizados por las propuestas tecnológicas, cuando operan en su mejor condición de diseño. Cabe remarcar que estas condiciones de diseño encontradas para cada tecnología, son bajo las condiciones y consideraciones establecidas para el desarrollo del estudio operativo de cada sistema. De igual manera es importante mencionar que para dentro del estudio comparativo se manejó una temperatura constante en el flujo de activación de 70.80 °C para cada tecnología, al igual que una cantidad de calor constante de 191.61 kW, con diferentes condiciones de flujo másico en el agua de mar de alimentación.

**Tabla 3.18:** Variables y parámetros de las propuestas tecnológicas en estudio para llevar a cabo el estudio comparativo cuando operan en una condición de diseño.

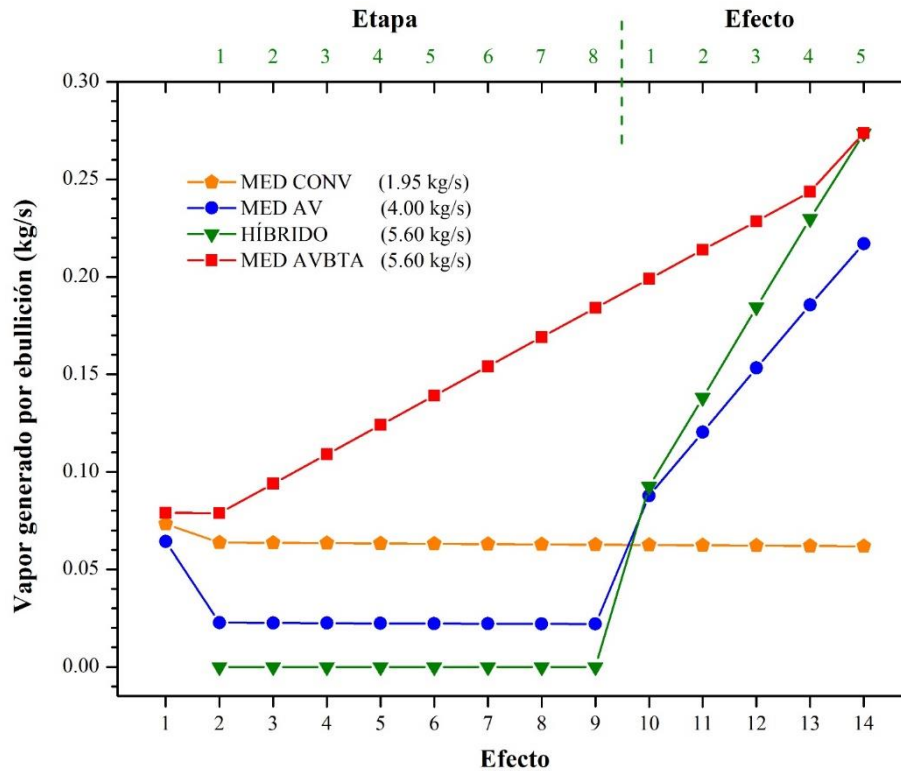
Parámetros	MED-CONV	MED-AV	MSF/MED-AV	MED-AV-BTA
Número de efectos	14	14	5	14
Número de etapas	-	-	8	-
Número de precalentadores	13	8	-	-
Número de condensadores	1	-	7	-
Temperatura del agua de mar de alimentación (°C)	25.00	25.00	25.00	25.00
Flujo del agua de mar de alimentación (°C)	1.95	4.00	5.60	5.60
Temperatura del fluido de activación (°C)	70.80	70.80	70.80	70.80
Flujo másico del fluido de activación (kg/s)	0.08	0.08	0.08	0.08
Calor de activación (kW)	191.61	191.61	191.61	191.61
Concentración inicial del agua de mar (ppm)	35,000.00	35,000.00	35,000.00	35,000.00
Temperatura del primer efecto TBT (°C)	68.00	68.00	68.00	25.00
Temperatura del último efecto BBT (°C)	35.00	4.00	4.00	4.00
Concentración final de la salmuera (ppm)	69,252.91	50,439.49	44,907.24	61,987.40
Flujo de agua de mar en el condensador (kg/s)	4.996	-	-	-

De la tabla 3.18 también se observa que, los sistemas MED-CONV, MED-AV y MED-AV-BTA operan con una serie de 14 efectos de evaporación múltiple (MED), mientras que el sistema híbrido MSF/MED-AV cuenta con 5 efectos MED y 8 etapas flash. Por su parte las condiciones de concentración y temperatura del agua de mar son las mismas para las 4 tecnologías, 35,000 ppm y 25 °C respectivamente, siendo el parámetro de flujo másico de la corriente de alimentación el que varía dependiendo de la tecnología, debido a que como se observó anteriormente, cada tecnología presenta diferentes límites de operación y de flujo dependiendo de su configuración. A pesar de eso, se buscó que las propuestas MSF/MED-AV y MED-AV-BTA operaran con el mismo flujo de alimentación de 5.6 kg/s para observar una comparación en sus indicadores de capacidad y eficiencia, suministrando la misma cantidad de agua de mar.

Con la intención de analizar y comparar el comportamiento operativo de las propuestas tecnológicas, en la figura 3.32 se presenta la generación de vapor por ebullición provocado por la adición de calor, para cada uno de los sistemas propuestos. En el caso de las tecnologías MED-CONV, MED-AV y MED-AV-BTA, se muestra la generación de vapor con respecto a cada uno de los efectos en el eje inferior en x, mientras que para la tecnología MSF/MED-AV se utiliza el eje superior donde se encuentran las etapas flash y efectos MED.

La generación de vapor por ebullición para el sistema MED-CONV muestra un comportamiento en cascada descendente a lo largo de los efectos, sin embargo, debido a que la disminución que se presenta es muy pequeña con respecto al vapor generado en el efecto anterior, en la figura se observa un comportamiento casi constante, en el sistema MED convencional de 14 efectos.

Por su parte, el sistema MED-AV inicia con una generación de vapor en el efecto 1 similar a la que se presentó el sistema MED-CONV, sin embargo, a diferencia de este, presenta una disminución en la generación de vapor por ebullición bastante significativa en los 8 efectos posteriores (efecto 2 al 9), esto debido a que el 65% del vapor generado en el primer efecto se utiliza para precalentar el agua de mar y llevarla a alcanzar el máximo precalentamiento posible antes de ingresar al generador. Con esto se explica el comportamiento de la generación de vapor por ebullición en los primeros 9 efectos, sin embargo, también se observa que después del noveno efecto se presenta un incremento de forma exponencial en la generación de vapor, esto debido a



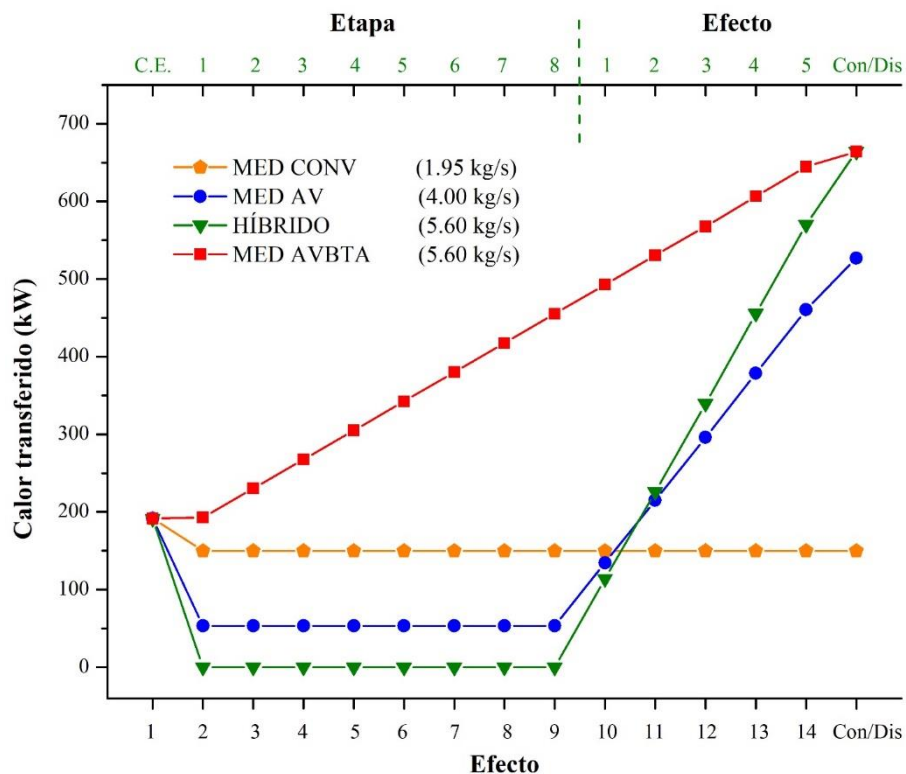
**Figura 3.32:** Comportamiento del vapor generado por ebullición en las propuestas MED CONV, MED AV, HÍBRIDO MSF-MED y MED AVBTA; considerando su punto de diseño.

que a partir del efecto 10 hasta el 14, no existe gradiente de temperatura para precalentar el agua de mar, provocando que el vapor de flasheo pase de precalentar el agua de mar a utilizarse para la ebullición de la salmuera de cada uno de los efectos posteriores, al unirse con el vapor de ebullición y juntos calentar a las corrientes de salmuera. Esto tiene un impacto directo en el incremento de la capacidad del sistema del 21% con respecto al sistema convencional.

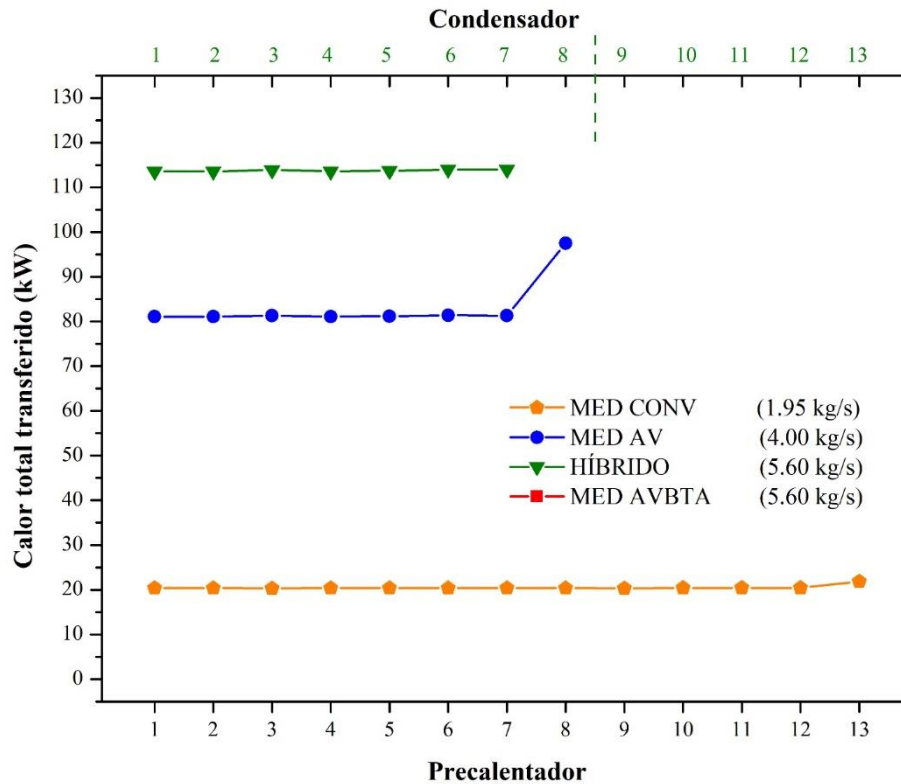
El sistema híbrido de desalinización MSF/MED-AV por su parte no presenta generación de vapor en la primera sección, debido a que esta se compone de 8 etapas MSF, las cuales operan únicamente con el vapor generado por el flasheo, sin embargo, en la sección MED, que se compone de 5 efectos, se tiene un comportamiento similar a lo que sucedió en los últimos 5 efectos del sistema MED-AV. Lo anterior tiene como resultado que el sistema MSF/MED-AV generando vapor por ebullición únicamente con 5 efecto MED, presente un incremento del 25% en la capacidad de agua producto con respecto al sistema convencional y un 4% con respecto al sistema MED-AV.

Por último, se observa que la tecnología MED-AV-BTA, presenta la mayor generación de vapor por ebullición, esto debido a que como se observó en la sección 3.4, los sistemas MED al alto vacío y con baja temperatura de activación (BTA) no requieren precalentamiento en el agua de mar de alimentación. Lo anterior tiene un impacto bastante significativo en la capacidad de agua producto, ya que a la postre representa un incremento del 60% con respecto a la MED-CONV y aproximadamente un 35% con respecto al sistema híbrido MSF/MED-AV utilizando el mismo flujo de alimentación en el agua de mar.

De igual manera, en la figura 3.33 se observa que, a la misma razón que incrementa la generación de vapor por efecto o etapa, también incrementa la transferencia de calor en la misma. El comportamiento del vapor generado en cada uno de los sistemas, tiene una relación directa y proporcional en el incremento del calor total transferido. Cabe remarcar que conforme aumenta el calor transferido por efecto/etapa, mayor serán los requerimientos de área de transferencia de calor por componente y por sistema.

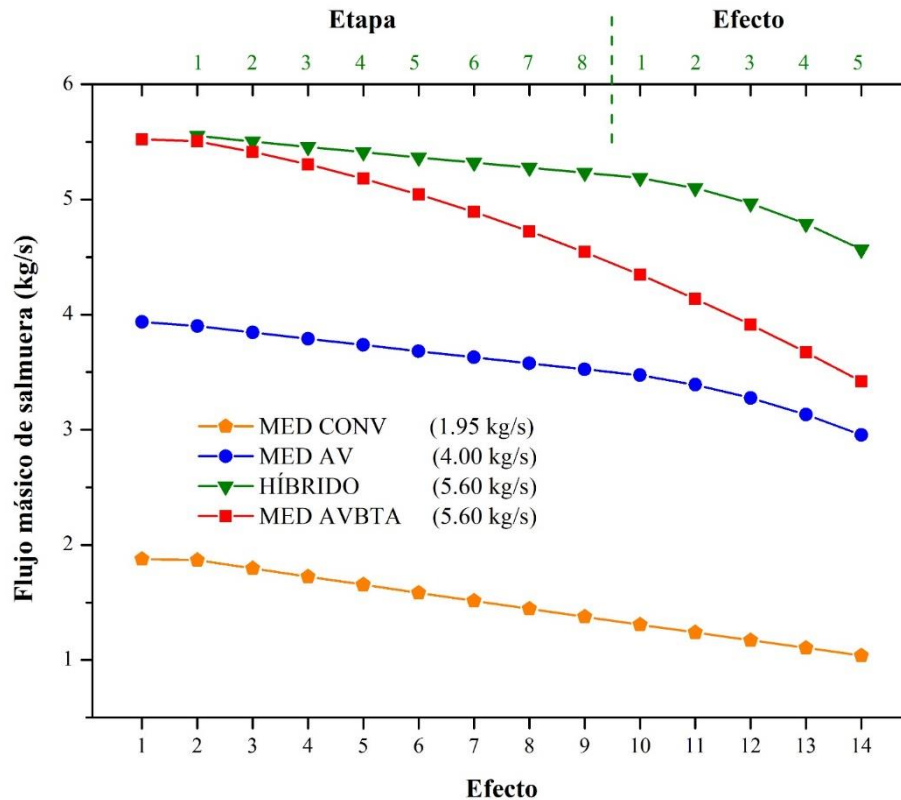


**Figura 3.33:** Comportamiento del calor transferido en los efectos y/o etapas de las propuestas MED CONV, MED AV, HÍBRIDO MSF-MED y MED AVBTA; considerando su punto de diseño.



**Figura 3.34:** Comportamiento del calor transferido en los precalentadores y/o condensadores propuestas MED CONV, MED AV, HÍBRIDO MSF-MED y MED AVBTA; considerando su punto de diseño.

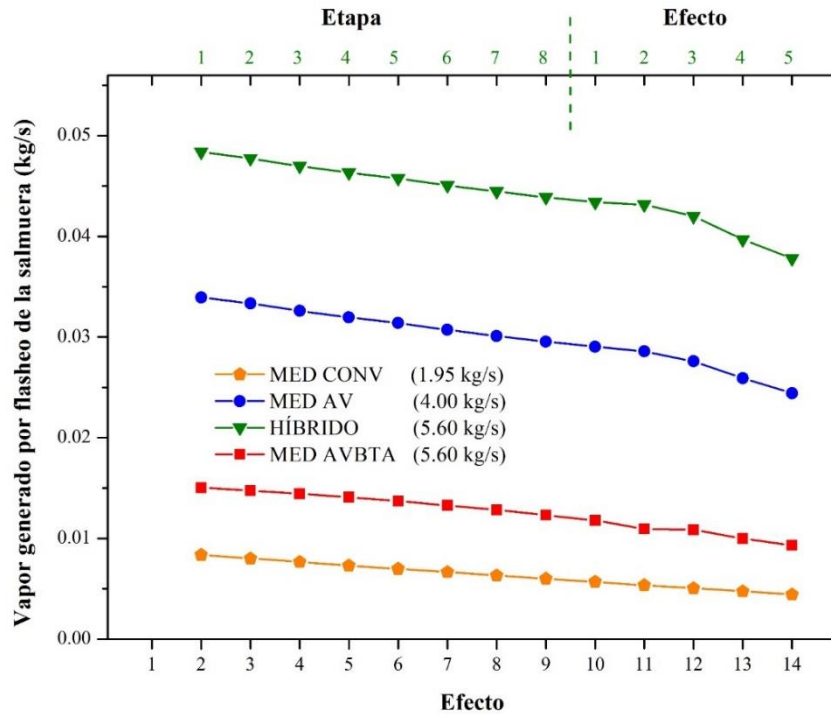
En la figura 3.34 se presenta el comportamiento de la concentración de salmuera a lo largo de los efectos y/o etapas del sistema. Se observa que la concentración en la salmuera va incrementando conforme se pasa de un efecto a otro, esto debido que en cada efecto se le retira una cantidad de vapor de agua, la cual se va acumulando del primer hasta el último efecto, para dejar a la salmuera en su máximo nivel de concentración en la salida del sistema. Con esto se observa que, bajo las condiciones de diseño de los diferentes sistemas, se tiene un mayor riesgo de tener problemas de corrosión y cristalización al operar un sistema MED convencional, el cual alcanza niveles de concentración cercanos a las 70,000 ppm, a diferencia de las tecnologías que operan al alto vacío, que no presentan niveles de concentración por encima de las 60,000 ppm. Observando lo anterior, vemos que las propuestas tecnológicas que operan al alto vacío con un subsistema de eyecto-condensación, además de brindar mayor capacidad y mayor eficiencia, también ayudan a mitigar los problemas de corrosión y cristalización con los que se enfrentan las tecnologías de evaporación múltiple convencionales.



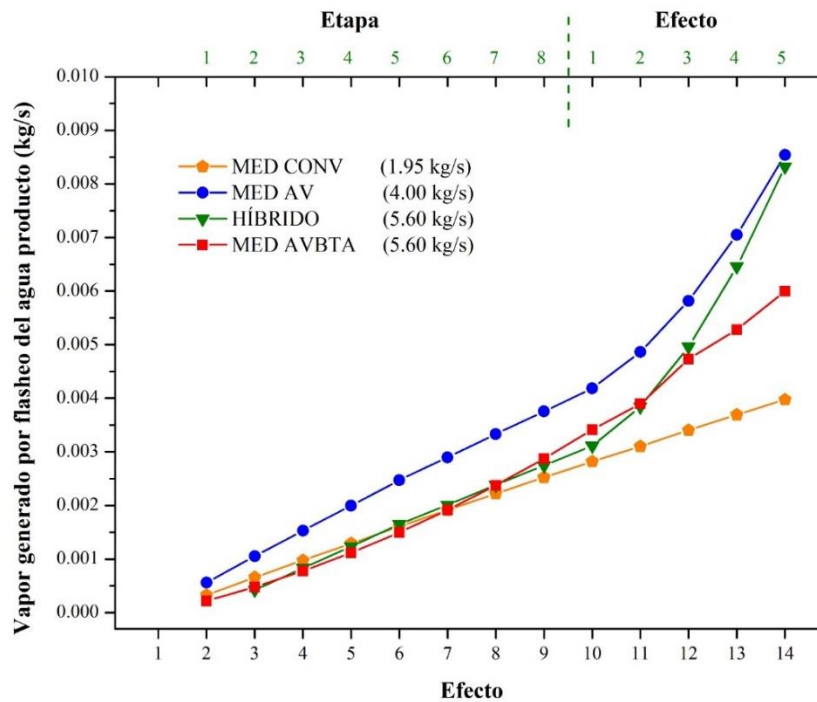
**Figura 3.35:** Comportamiento del flujo másico de salmuera en las propuestas MED CONV, MED AV, HÍBRIDO MSF-MED y MED AVBTA; considerando su punto de diseño.

En la figura 3.35 se muestra el comportamiento del flujo másico de la salmuera en cada uno de los sistemas propuestos. Se observa que, en todas las tecnologías de desalinización, el flujo de salmuera va disminuyendo conforme esta avanza de un efecto a otro, esta varía para cada uno de los sistemas y está relacionado directamente al vapor de agua que se retira en cada efecto por efecto del flasheo. El efecto anterior, se muestra en las figuras 3.36 y 3.37, donde se muestra la generación de vapor por flasheo de la salmuera y del agua producto.

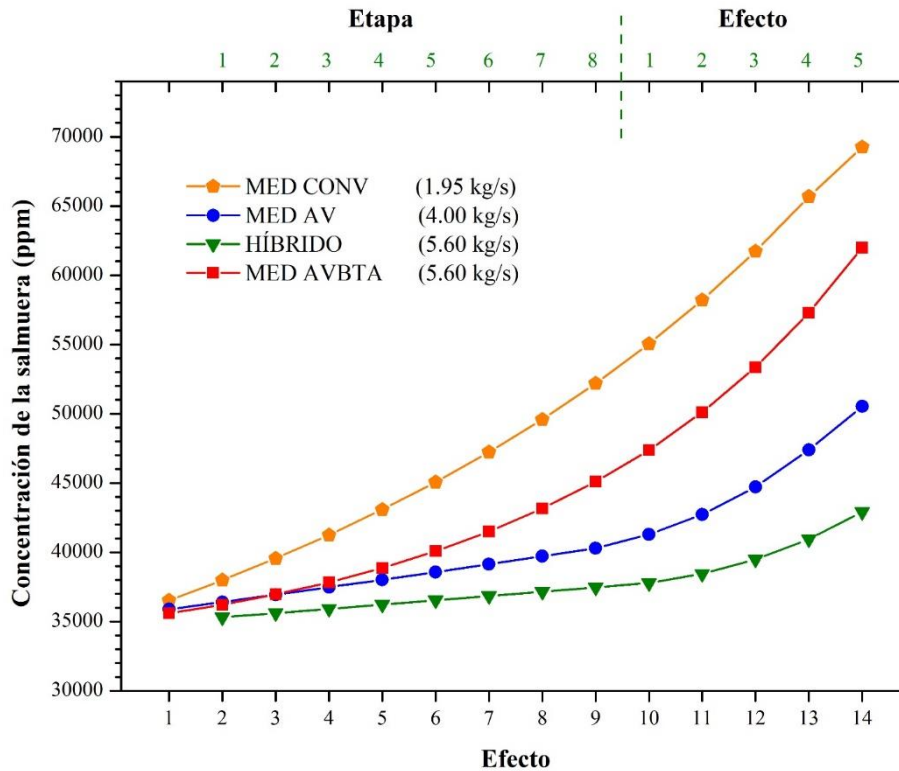
En la figura 3.35 se observa que el flujo másico de salmuera en el sistema MED-CONV disminuye de manera proporcional en cada uno de los 14 efectos, por lo que es posible inferir que la generación de vapor total de flasheo es muy similar en cada uno de los efectos. Caso distinto es el que se provoca en las tres propuestas que operan al alto vacío, dado a que la generación de vapor de flasheo y a su vez el retiro del vapor de agua es mucho mayor en los últimos efectos, dado a las condiciones de operación y configuraciones establecidas.



**Figura 3.36:** Comportamiento del vapor generado por flasheo de la salmuera en las propuestas MED CONV, MED AV, HÍBRIDO MSF-MED y MED AVBTA; considerando su punto de diseño.

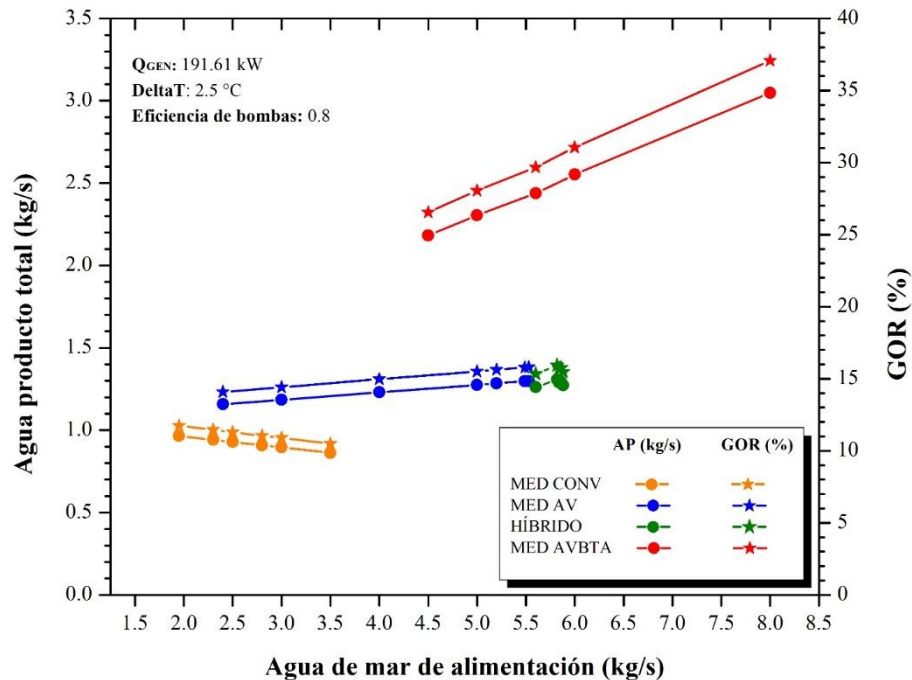


**Figura 3.37:** Comportamiento del vapor generado por flasheo del agua producto en las propuestas MED CONV, MED AV, HÍBRIDO MSF-MED y MED AVBTA; considerando su punto de diseño



**Figura 3.38:** Comportamiento de la concentración de la salmuera en las propuestas MED CONV, MED AV, HÍBRIDO MSF-MED y MED AVBTA; considerando su punto de diseño.

En la figura 3.38 se presenta el comportamiento de la concentración de salmuera a lo largo de los efectos y/o etapas del sistema. Se observa que la concentración en la salmuera va incrementando conforme se pasa de un efecto a otro, esto debido que en cada efecto se le retira una cantidad de vapor de agua, la cual se va acumulando del primer hasta el último efecto, para dejar a la salmuera en su máximo nivel de concentración en la salida del sistema. Con esto se observa que, bajo las condiciones de diseño de los diferentes sistemas, se tiene un mayor riesgo de tener problemas de corrosión y cristalización al operar un sistema MED convencional, el cual alcanza niveles de concentración cercanos a las 70,000 ppm, a diferencia de las tecnologías que operan al alto vacío, que no presentan niveles de concentración por encima de las 60,000 ppm. Observando lo anterior, vemos que las propuestas tecnológicas que operan al alto vacío con un subsistema de efecto-condensación, además de brindar mayor capacidad y mayor eficiencia, también ayudan a mitigar los problemas de corrosión y cristalización con los que se enfrentan las tecnologías de evaporación múltiple convencionales.



**Figura 3.39:** Comportamiento del agua producto y el indicador de desalinización GOR, en las propuestas MED CONV, MED AV, HÍBRIDO MSF-MED y MED AVBTA; para diferentes flujos de alimentación.

El indicador GOR evalúa la desalinización en términos de energía, como se plasmó en la ecuación (3.1). Para desarrollar el estudio paramétrico, se utilizó una energía constante de 191.61 kW para las 4 propuestas tecnológicas, suministrada en el generador y/o calentador externo; lo cual provoca que al tener constante la energía externa de activación, el comportamiento del indicador de eficiencia GOR y la capacidad de agua producto incrementen o decrezcan en igual porcentaje. Para el sistema MED-CONV, se observa en la figura 3.39 que, al aumentar el flujo de agua de alimentación, el indicador GOR y la capacidad tiene la tendencia de disminuir, debido a que, se mantiene constante el calor de activación y se sigue incrementando masa de agua de mar que ingresa al sistema, con lo cual se tiene un mayor subenfriamiento en la corriente de agua de mar y de igual manera una menor generación de vapor en el efecto 1 y en el resto de la cascada de efectos.

Por otra parte, se observa que en las tecnologías MED-AV, MSF/MED-AV y MED-AV-BTA, se presenta un incremento en la capacidad y eficiencia, conforme se aumenta el flujo de

alimentación de agua de mar. Este comportamiento se debe gracias al incremento en el vapor de flasheo, el cual viene derivado por operar dichos sistemas con una cascada de presión mayor, en donde los saltos de presión de un efecto con respecto al otro son más grandes, lo que propicia a tener un mayor flasheo en cada efecto y a la postre una mayor generación de agua producto.

Después de haber realizado los estudios de viabilidad técnica y de comparación de las propuestas tecnológicas para una capacidad específica, en la Tabla 3.19 se presentan los principales indicadores y características de cada propuesta tecnológica evaluada en su condición. Cabe mencionar que la condición de diseño de los sistemas MED-CONV, MED-AV, MSF/MED-AV y MED-AV-BTA se consideró en donde se encontraron los mayores indicadores de capacidad y eficiencia.

**Tabla 3.19:** Resumen del estudio comparativo de las propuestas tecnológicas operando en su condición de diseño.

<b>RESULTADOS</b>				
	<b>MED-CONV</b>	<b>MED-AV</b>	<b>MSF/MED-AV</b>	<b>MED-AV-BTA</b>
Calor de condensación del último vapor (kW)	149.84	-	-	-
Calor de disipación en eyecto-condensador (kW)	-	526.51	663.81	664.37
Calor transferido en los efectos MED (kW)	1947.84	1911.65	1704.96	5240.09
Calor transferido en los precalentadores (kW)	266.33	665.96	-	-
Calor transferido en los condensadores (kW)	-	-	796.29	-
Integración energética total (kW)**	2364.01	2577.61	2501.25	5240.09
Potencia total de bombas (kW)*	0.52	14.40	18.25	18.07
Capacidad de agua producto (kg/s)	0.96	1.22	1.28	2.44
GOR	11.73	14.90	15.62	29.66

<b>COMPARACIÓN DE LAS PROPUESTAS TECNOLÓGICAS</b>				
	<b>MED-CONV</b>	<b>MED-AV</b>	<b>MSF/MED-AV</b>	<b>MED-AV-BTA</b>
Calor de disipación en EYC (kW)***			20.68%	20.75%
Calor transferido en los efectos MED (kW)		-1.89%	-14.25%	62.83%
Calor transferido en los precalentadores (kW)		60.01%	-	-
Integración energética total (kW)		8.29%	5.49%	54.89%
Potencia total de bombas (kW)		96.38%	97.14%	97.11%
Capacidad de agua producto (kg/s)		21.23%	24.88%	60.44%
GOR		21.23%	24.88%	60.44%

\* Se considera la potencia de las bombas BAM, BAP y BAE.

\*\* Corresponde a la suma de calor transferido de efectos, precalentadores o condensadores.

Para el cálculo de integración energética en la MED-CONV se añade además el calor en el condensador.

\*\*\* La comparación del calor de disipación en eyecto-condensador se hizo tomando de referencia la MED-AV.

En la Tabla 3.19 se observa que el GOR y la capacidad del sistema MED-AV son 21% superior a los valores presentados por el sistema MED-CONV, disminuyendo los niveles de concentración de la salmuera con respecto al sistema convencional y además dejando al agua producto en el último efecto con las condiciones necesarias para que esta a la postre, pudiera ser utilizada para producir el efecto frigorífico y producir enfriamiento de manera simultánea. Por esto último, en la sección de trabajos futuros, se propone el estudio de las propuestas tecnológicas al alto vacío bajo el escenario de producir simultáneamente los servicios de desalinización y enfriamiento.

Buscando incrementar la capacidad y eficiencia del sistema MED-AV, se continuó incrementando el flujo de alimentación hasta encontrar el límite máximo de operación y su vez la frontera con el sistema híbrido de desalinización MSF/MED-AV, el cual consiste en un acoplamiento de dos procesos de desalinización térmica, MSF y MED operando al alto vacío e integrándolo a un subsistema de eyecto-condensación, convirtiéndose en un solo proceso. Cuando se comparan los principales indicadores de capacidad de desalinización y eficiencia con respecto al sistema MED-CONV, se puede observar que el GOR la capacidad son 25% superior a estos y aproximadamente 4% superior a los indicadores de capacidad y eficiencias mostrados por la MED-AV. Por otra parte, el sistema MED-AV-BTA en su condición de diseño tiene una capacidad y GOR de 210,816 L/día y 29.66 respectivamente, los cuales son 60% y 35% superiores a los de los sistemas MED-CONV y MSF/MED-AV respectivamente.

En todos los casos la concentración de la salmuera se encuentra dentro de los límites reportados en la literatura (referencia de Palenzuela et al., 2014). Con base a la organización mundial de la Salud (OMS) (Howard & Bartram, 2003) el sistema MED-CONV, puede dar agua a 793 personas, mientras que los sistemas MED-AV y MSF/MED-AV a 1,012 y 1,046 personas respectivamente; el sistema MED-AV-BTA produce una capacidad de agua producto capaz de abastecer los requerimientos hídricos de 2,007 personas. Por otra parte, el sistema MED-AV-BTA; al ser el de mayor capacidad, puede brindar agua a los hoteles ubicados en zonas costeras según (Becken, 2014). El sistema MED-AV-BTA puede satisfacer los requerimientos de un hotel de 359 personas.

De manera cualitativa se puede observar que el sistema MED-CONV, al tener mayor cantidad de equipos, es el sistema con mayor inversión inicial, sin embargo, tendría los menores costos de operación, con respecto a las demás tecnologías. El sistema MED-AV-BTA sería el sistema de menor inversión inicial al tener un campo de colectores más pequeño y el menor número de componentes, sin embargo, sus costos de operación y mantenimiento serían elevados para la condición de diseño que se mostró, dado que presentó los mayores requerimientos de potencia de bomba y área de transferencia de calor. Estos podrían reducirse si se establecen las condiciones para tener un sistema de menor capacidad.

# CAPÍTULO 4

## CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

---

En este capítulo se plasman las conclusiones generales de cada propuesta tecnológica y de los estudios experimentales realizados en esta Tesis, además se presentan como trabajos futuros, los retos que deben asumirse y superarse para continuar con esta línea de investigación y hacer sistemas de desalinización eficientes, que puedan ser competitivos en el mercado.

### 4.1. Conclusiones

Después de haber realizado la evaluación técnica y operativa de los sistemas de desalinización propuestos, se lograron desarrollar diferentes invenciones tecnológicas con alta eficiencia y menor número de componentes, lo cual reduce la inversión inicial y costo de operación, incrementando la potencialidad para satisfacer las necesidades de disponibilidad de agua de las comunidades costeras, pudiendo competir en el mercado con las tecnologías convencionales.

El sistema de evaporación de múltiple efecto convencional (MED-CONV) que cuenta con catorce efectos y utiliza el agua de mar como medio de condensación del vapor del último efecto, resultó con una capacidad y eficiencia de 83,332 L/día y 11.73%, respectivamente, pudiendo operar en un rango de temperatura de 68 a 35 °C.

La tecnología MED al alto vacío (MED-AV) que tiene integrado un sistema de eyecto-condensación, el cual permite operar en un rango de temperatura y presión mayor al de un sistema MED convencional, que va de los 68 a los 4 °C, permitió tener una mayor generación de vapor en los últimos efectos, debido a que en esta sección no se cuenta con precalentamiento, provocando que todo el vapor de flasheo sea utilizado para calentar la salmuera y generar una mayor cantidad de vapor, resultando con una capacidad y eficiencia de 106,269 L/día y 14.90% respectivamente y un incremento de 21.23% para ambos casos, con respecto al sistema convencional.

Basados en el estudio de factibilidad técnica, el sistema híbrido al alto vacío FLASH/MED (MSF/MED-AV), permite operar en un rango de flujos mayor al del sistema MED-AV, acoplando las tecnologías de desalinización de múltiple etapa flash (MSF) y evaporación de múltiple efecto (MED), lo cual produce una capacidad de 108,926 L/día con un GOR de 15.62%. Además, esta propuesta tecnológica, reduce una gran cantidad de componentes al eliminar los primeros 9 intercambiadores de calor que operaban como evaporadores en los efectos, dado a que este sistema opera como un sistema flash en sus primeras 9 etapas. La tecnología MSF/MED-AV, incrementó la capacidad y eficiencia en un 24.28% con respecto al sistema MED-CONV y un 3.68% con respecto a la MED-AV, en su mejor condición de diseño.

El estudio paramétrico del sistema híbrido MSF/MED-AV, nos mostró que es posible diseñar y operar un sistema de desalinización MED al alto vacío con baja temperatura de activación (BTA), del cual surge la propuesta tecnológica MED-AV-BTA. La tecnología de desalinización MED al alto vacío con baja temperatura de activación, que al igual que los sistemas MED-AV y MSF/MED-AV, cuenta con un sistema de eyecto-condensación que le permite operar en un rango de temperaturas de 25 a 4 °C, además, el utilizar una TBT de 25 °C permite ingresar el agua de mar al primer efecto sin la necesidad de precalentamiento, debido a que la temperatura de saturación del efecto 1 corresponde con las condiciones de temperatura del agua de mar de alimentación, lo que provoca que todo el calor suministrado en el generador sea recibido en forma de calor latente para cambio de fase, generando una mayor cantidad de vapor, que a la postre se utilizará para calentar las corrientes de salmuera en cada efecto; lo anterior resultó en una capacidad de 210,816 L/día con un indicador de eficiencia GOR de 29.66% y un incremento del 60.44% para ambos casos con respecto al sistema MED-CONV.

Como resultado de este estudio podemos establecer un nuevo paradigma, donde es posible desarrollar y diseñar sistemas de desalinización que se integren a los subsistemas de eyecto-condensación, que operen en rangos de presión y temperatura mucho mayor a los convencionales, que utilicen la hibridación de procesos de desalinización térmicos al alto vacío, además de ser activados con una baja TBT, y que a su vez incrementen su capacidad y eficiencia de manera significativa con respecto a las tecnologías convencionales.

Al comparar las 4 tecnologías en estudio, se concluyó que las tecnologías MED-AV-BTA y MSF/MED-AV, muestran las aportaciones más atractivas y los mayores incrementos de capacidad y eficiencia, debido a que ambas proponen una cascada de presión y temperatura con un rango mayor a las utilizadas por los sistemas convencionales; además de que la primera, demostró que un sistema MED puede ser activado con una baja temperatura de activación, lo cual reduciría los problemas por corrosión que experimentan las tecnologías convencionales y el costo de inversión inicial, debido a utilizar tecnologías de captación solar de baja temperatura y bajo costo para su activación, mientras que la segunda propuesta tecnológica demostró que es posible reducir componentes e incrementar la capacidad y eficiencia al acoplar tecnologías de desalinización térmicas convencionales e integrarlas al proceso de eyecto-condensación para operar en condiciones de alto vacío.

### **4.2. Trabajos futuros**

En relación a las propuestas tecnológicas planteadas en esta tesis, se propone lo siguiente:

- Se recomienda el estudio y optimización del proceso de eyecto-condensación al alto vacío.
- Estudiar a profundidad la tecnología de desalinización híbrida FLASH/MED con eyecto-condensación al alto vacío, para diferentes aplicaciones y escenarios de operación.
- Se recomienda estudiar de manera individual la tecnología de múltiple etapa FLASH (MSF) en condiciones de alto vacío.
- Estudiar a profundidad los sistemas de desalinización al alto vacío con baja temperatura de activación (BTA), con la finalidad de proponer máquinas de desalinización portátiles de baja y mediana capacidad, con una mayor eficiencia y con requerimientos de tecnologías solares de activación de baja temperatura y bajo costo.
- Estudiar y proponer sistema de cogeneración, trigeneración y poligeneración que brinden los servicios de desalinización, enfriamiento, calefacción y energía eléctrica.
- Probar diferentes niveles de alto vacío para satisfacer diferentes necesidades de aire acondicionado y refrigeración.

## REFERENCIAS

- Aguilar-Jiménez, J. A., Velázquez, N., Acuña, A., Cota, R., González, E., González, L., López, R., & Islas, S. (2018). Techno-economic analysis of a hybrid PV-CSP system with thermal energy storage applied to isolated microgrids. *Solar Energy*, *174*(August), 55–65. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.08.078>
- Aguilar-Jiménez, Jesús Armando, Velázquez, N., López-Zavala, R., González-Uribe, L. A., Beltrán, R., & Hernández-Callejo, L. (2019). Simulation of a solar-assisted air-conditioning system applied to a remote school. *Applied Sciences (Switzerland)*, *9*(16). <https://doi.org/10.3390/app9163398>
- Bamufleh, H., Abdelhady, F., Baaqeel, H. M., & El-Halwagi, M. M. (2017). Optimization of multi-effect distillation with brine treatment via membrane distillation and process heat integration. *Desalination*, *408*, 110–118. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.01.016>
- Becken, S. (2014). Waterequity – Contrasting tourismwateruse with that of the local community. *Water Resources and Industry*, *7–8*, 9–22. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2014.09.002>
- Bernstein, S., Mogelgaard, K., Edmeades, J., Luchsinger, G., Ryan, W. A., Starrs, A. M., & Jensen, J. (2019). Un asunto pendiente: la defensa de los derechos y la libertad de decidir de todas las personas. *Unfpa*, 1–180. [www.unfpa.org/es](http://www.unfpa.org/es)
- Cipollina, A. (2009). Green Energy and Technology. In *Green Energy and Technology*. <https://doi.org/10.2174/97816080528511120101>
- Clarke, R., & King, J. (2004). *THE WATER ATLAS A Unique Visual Analysis of the World 's Most Critical Resource*.
- El-Dessouky, H. T. (2002). *Fundamentals of Salt Water Desalination*.
- Howard, G., & Bartram, J. (2003). Domestic Water Quantity, Service Level and Health. *Clinical Radiology*, *53*(11), 796–804. [https://doi.org/10.1016/S0009-9260\(98\)80189-X](https://doi.org/10.1016/S0009-9260(98)80189-X)

- López Zavala, R. (2019). *Estudio de sistemas avanzados de enfriamiento y desalinización por absorción activados con energía solar térmica*. 7, 1–22.
- Mahmood, K., Rana, A., Tariq, S., Kanwal, S., Ali, R., & Haidar, A. (2011). Groundwater Levels Susceptibility To Degradation in Lahore Metropolitan. *Depression*, 150(1), 8.01.
- Mejía Mercado, B. E. (2013). Explorando el mar profundo del golfo de california. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9).
- Nations, U. (2019). World population prospects 2019. In *Department of Economic and Social Affairs. World Population Prospects 2019*. (Issue 141).  
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12283219>
- Palenzuela, P., Hassan, A. S., Zaragoza, G., & Alarcón-Padilla, D. C. (2014). Steady state model for multi-effect distillation case study: Plataforma Solar de Almería MED pilot plant. *Desalination*, 337(1), 31–42. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.12.029>
- Renewable Energy Desalination. (2012). In *Renewable Energy Desalination*.  
<https://doi.org/10.1596/978-0-8213-8838-9>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2018). *Estadísticas del Agua en México*.
- URIBE, L. A. G. (2017). “*Desarrollo de un sistema de enfriamiento-desalinización de baja capacidad activado con energías renovables.*”
- Zheng, H. (2017). Solar Desalination System Combined With Conventional Technologies. In *Solar Energy Desalination Technology*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-805411-6.00007-5>