



Universidad de  
Concepción

Dirección de Postgrado

Facultad de Ingeniería – Programa de Magister en Ciencias de la Ingeniería con  
mención en Ingeniería Mecánica



**Optimización Multiobjetivo con múltiples fronteras de Pareto aplicado a un  
sistema de desalinización MED.**

Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería con Mención en  
Ingeniería Mecánica

Por: Cristóbal Marcelo Rivera Castillo  
Profesor Guía: Cristian Cuevas Barraza

Concepción – Chile 2023

## Agradecimientos

Quiero agradecer en primer lugar a Dios, quien ha sido mi fortaleza en todo momento y a quien debo cada uno de los logros alcanzados. También agradecer a mi familia, mi mamá y hermano, con quienes siempre me he apoyado y con quienes hemos pasado momentos difíciles y prósperos. A mis amigos, quienes ha estado presente, con su palabra de aliento, con las risas, las noches de estudio, las salidas y los buenos momentos, a mi profesor guía Cristian, quien me ha apoyado y orientado en este proceso pese a lo extenso que ha sido. Al equipo que compone el DIM que se hizo presente y aportó significativamente a mi formación profesional, cuyos docentes han sido inspiración como modelo a seguir en lo profesional y como persona. Me encuentro agradecido de este proceso, de lo aprendido, de las equivocaciones y aciertos, de las risas y las traspasadas, del buen café que siempre estuvo, de los pequeños momentos que fueron conformando este proceso...



## Resumen

Según la UNESCO y otras organizaciones, la disponibilidad de agua ha ido experimentando una notoria disminución a medida que pasan los años, debido principalmente a dos causas. Por un lado, se tiene el aumento en la demanda debido al aumento de la población, estimándose que para el 2050 la demanda de agua aumente entre un 20 y 30% con respecto a la demanda actual, con los recursos naturales y la necesidad de generar alimento y bienes de consumo para la población. Por otro lado, se tiene la disminución de la disponibilidad debido a los escenarios adversos que plantea el calentamiento global, acelerando aún más este proceso.

Esto ha motivado la búsqueda de distintas alternativas para obtener agua, donde esta investigación se enfoca en la desalinización del agua mediante tecnologías térmicas, basándose en el mayor potencial de producción de agua y la independencia de las condiciones climáticas para la obtención de esta. Estas tecnologías se basan en la evaporación y condensación sucesiva del agua, lo cual ocurre en intercambiadores de calor conocidos como efectos. En la actualidad existen distintas propuestas para estos sistemas, presentando indicadores relevantes como la cantidad de agua producida, energía térmica o eléctrica consumida, cantidad de efectos utilizados, salinidad del agua residual a la descarga, entre otros. Esta investigación propone determinar estos indicadores para un mismo sistema operando con diferentes números de efectos activos, diferentes temperaturas máximas en el primer efecto y diferentes tipos de alimentación del agua de mar.

El mecanismo que se utilizará para llevar a cabo esto es en primera instancia una simulación del sistema operando con 8 a 12 efectos y con una temperatura máxima de 64°C a 72°C, y un flujo de alimentación de agua de mar variable, ingresando a los evaporadores que están en serie o en paralelo. Una vez obtenidas estas simulaciones, se almacenarán los resultados en una base de datos, los cuales se utilizarán para determinar las funciones que determinan los indicadores de estos sistemas mediante aproximaciones lineales y no lineales en 3 dimensiones. Luego se procede a optimizar estas funciones mediante algoritmos genéticos, específicamente se utiliza el NSGA-II con el software Matlab para obtener las fronteras de Pareto que indican los máximos indicadores alcanzables para el sistema propuesto y en qué condiciones se obtienen. Al proponer un número distinto de efectos y distintos tipos de alimentación de agua de mar, no se puede determinar el máximo alcanzable de estos sistemas mediante una sola frontera, ya que, como requisito, las funciones a optimizar deben ser continuas, y al cambiar el número de efectos esa continuidad se pierde al igual que si se cambia el tipo de alimentación. Por este motivo es necesario determinar múltiples fronteras de Pareto, las que se compararán para determinar en qué condiciones es mejor operar ante las distintas condiciones de borde que se les ingresarán a estos sistemas.

Los resultados se expresan en función de las preferencias del usuario, ya que, si se prioriza el costo de producción de agua, se sugiere operar con una alimentación hacia adelante y 9 efectos, alcanzando un costo de 1,794 \$/m<sup>3</sup>. Si se desea priorizar la producción de agua, se sugiere operar con un sistema de alimentación hacia adelante y 12 efectos, alcanzando una cantidad producida de 152,3 kg/s. Finalmente, se presenta una configuración equilibrada en ambos indicadores con sistema de alimentación

paralela cruzada y 12 efectos, alcanzando un costo unitario de 1,94  $\$/m^3$ , entendiéndose por costo la suma de la inversión a realizar más los costos operacionales y de mantención, con 128,1 kg/s de agua producida. En cuanto a la optimización propiamente tal, se obtiene que los sistemas con alimentación hacia adelante (con los evaporadores en serie) obtienen, en promedio, un costo de producción un 14.05% menor que los sistemas de alimentación paralela, y un 18,89% de mayor potencial de agua a producir.



## Tabla de Contenidos

### Contenido

CAPÍTULO 1 .....	1
Introducción.....	1
1.1. Contextualización en un marco global y nacional.....	1
1.2. Planteamiento de la necesidad y problema a resolver. ....	3
1.3. Desalinización y sus tecnologías. ....	5
1.4. Optimización Multiobjetivo.....	9
1.5. Hipótesis y Objetivos.....	9
1.6. Metodología.....	10
CAPÍTULO 2 .....	12
Estado del arte .....	12
2.1. Principio de tecnología MED. ....	12
2.2. Comparación entre alimentaciones de un sistema MED. ....	13
2.1. Tecnología MED y su desarrollo tecnológico. ....	14
2.1.1. Planta MED con evaporadores en serie y paralelo. ....	15
2.1.2. Sistema de Desalinización Multiefecto (MED) con Bomba de calor (HP). ....	16
2.1.3. Sistema MED acoplado a ciclo Rankine Orgánico.....	19
2.1.4. Otras tecnologías relevantes. ....	20
CAPÍTULO 3 .....	25
Marco teórico.....	25
3.1. Teoría asociada a la desalinización.....	25
3.2. Sistemas acoplados a sistema MED.....	30
3.3. Análisis termo-económico. ....	31
3.4. Óptimo de Pareto. ....	33
CAPÍTULO 4 .....	34
Caso de estudio y modelación .....	34
4.1. Caso de estudio. ....	34

4.2. Condiciones de simulación.....	34
4.3. Modelado de los componentes.....	37
4.3.1 Evaporadores.....	37
4.3.2. Modelo de Darwish.....	39
4.3.3. Precalentadores.....	39
4.4. Modelado de los sistemas.....	40
4.5. Validación de modelos.....	44
4.5.1. Validación de modelo con alimentación en serie.....	44
4.5.2. Validación de modelo con alimentación paralela.....	45
CAPÍTULO 5 .....	47
Funciones objetivo.....	47
5.1. Funciones objetivo y variables de decisión.....	47
Capítulo 6 .....	50
Resultados y discusión .....	50
Capítulo 7 .....	59
Conclusiones.....	59
Referencias .....	61
Anexos.....	64
Anexo 1.1: Resultados Simulación Sistema MED-MVC con 8 a 12 efectos operando con alimentación FF.....	64
Anexo 1.2: Resultados Simulación Sistema MED-MVC con 8 a 12 efectos operando con alimentación PCF.....	67
Anexo 2.1: Código EES sistema de desalinización con alimentación hacia adelante.....	71
Anexo 2.2. Código EES Sistema de desalinización con alimentación paralela cruzada.....	85
Anexo 3.1. Código Matlab Optimización multiobjetivo sistemas de desalinización.....	95
Anexo 3.2. Codigo Matlab para definición de coeficientes en funciones objetivo.....	96

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Proporción de extracción de agua por sector y continente. Elaboración propia con datos de FAO, (2019). .....	1
Figura 2: Distribución de la demanda de agua consuntiva por sector en 2015. Elaboración propia con datos del MOP, (2020). .....	2
Figura 3: Disponibilidad de agua per cápita en cada región de Chile .....	3
Figura 4: Principio de funcionamiento de un sistema MED (Perez Gomez. 2017). .....	13
Figura 5: Disposición de flujos en las distintas alimentaciones de un sistema MED (Elsayed et al., 2019). .....	14
Figura 6: Sistema MED con 12 evaporadores en serie (Darwish et al., 2006).....	15
Figura 7: Sistema MED con dos líneas en paralelo de 6 evaporadores cada una (Darwish et al., 2006). .....	16
Figura 8: Compresor de vapor acoplado a sistema MED (Amidpour et al., 2020). .....	17
Figura 9: Sistema MED acoplado a bomba de calor (Amidpour et al., 2020). .....	17
Figura 10: Sistema MED acoplado a bomba de calor ACHP (Amidpour et al., 2020). ....	18
Figura 11: Principales indicadores de los distintos sistemas MED (Amidpour, et al., 2020). .....	18
Figura 12: Sistema MED/ORC (Aguilar, et al., 2020). .....	20
Figura 13: Esquema de ciclo solar con sistema MED (Aroussy et al., 2020). .....	21
Figura 14: a) Sistema integrado MED-TVC/SOFT-MGT/OSER. b) Sistema MED-TVC en detalle (Han et al., 2020). .....	22
Figura 15: Frontera de Pareto para sistema de Han et al., (2020). .....	23
Figura 16: Barra de herramientas Matlab para optimización multiobjetivo con algoritmo genético .....	24
Figura 17: Entalpia específica del agua de mar en función de la salinidad y temperatura. ....	29
Figura 18: BPE del agua de mar en función de la salinidad y temperatura.....	30
Figura 19: Diagrama T-s de los fluidos que intercambian calor en un evaporador.....	32
Figura 20: Configuración 1. ....	35
Figura 21: Configuración 2. ....	36
Figura 22: Modelo de primer evaporador .....	37
Figura 23: Modelo de los evaporadores a excepción del primero. ....	38
Figura 24: Modelo simplificado de los precalentadores. ....	40
Figura 25: Modelo de sistema MED MVC con alimentación hacia adelante. ....	43
Figura 26: Modelo sistema MED MVC con alimentación paralela cruzada. ....	43
Figura 27: Salinidad de la descarga en función del flujo de alimentación y de la TBT....	48
Figura 28: Optimización del área específica, consumo energético del compresor y UCDW para un sistema MED-MVC con alimentación hacia adelante y 9 efectos.....	50

Figura 29: Optimización del agua producida, exergía destruida y salinidad en la descarga para un sistema MED-MVC con alimentación hacia adelante y 9 efectos.....	51
Figura 30: Optimización del área específica, consumo energético del compresor y UCDW para un sistema MED-MVC con alimentación paralela cruzada y 12 efectos. ....	51
Figura 31: Optimización del agua producida, exergía destruida y salinidad en la descarga para un sistema MED-MVC con alimentación paralela cruzada y 12 efectos. ....	52
Figura 32: Optimización del flujo de calor requerido, energía eléctrica consumida y UCDW para un sistema MED-MVC con alimentación hacia adelante y 12 efectos. ....	53





## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Ventajas de las tecnologías de desalinización, Rahimi & Chua (2017). .....	6
Tabla 2: Desventajas de las tecnologías de desalinización Rahimi & Chua, (2017).....	6
Tabla 3: Emisiones relevantes en el aire producidas por sistemas de desalinización (Serra et al., 2006). .....	7
Tabla 4: Puntajes generales para diferentes tecnologías de desalinización c .....	8
Tabla 5: Emisiones relevantes en el aire producidas por sistemas de desalinización térmicos con calorresidual (Serra et al., 2006). .....	8
Tabla 6: Puntajes generales para diferentes tecnologías de desalinización con calor residual (Serra et al., 2006). .....	8
Tabla 7: Variables de entrada y parámetros del modelo de Darwish et al. (2006) usados para la validación de la metodología usada para la configuración 1.....	44
Tabla 8: Valor de validación para la configuración 1.....	45
Tabla 9: Valores relevantes en modelo de validación de la configuración 2 (Amidpour et al., 2020).....	46
Tabla 10: Valores de validación para la configuración 2.....	46
Tabla 11: Variables de desición .....	47
Tabla 12: Mejores resultados de agua producida.....	54
Tabla 13: Mejores resultados de UCDW.....	54
Tabla 14: Mejores resultados de Energía consumida por el compresor. ....	55
Tabla 15: Mejores resultados del área específica de transferencia de calor. ....	55
Tabla 16: Mejores resultados de exergía destruida.....	56
Tabla 17: Mejores resultados de salinidad en la descarga. ....	56

## NOMENCLATURA

### General

A	Área (m <sup>2</sup> )
BPE	Elevación del punto de ebullición (°C)
C	Costo (US\$)
c	Calor específico (kJ/kgK)
CRF	Factor de recuperación de capital (-)
GOR	Gain Output Ratio
h	Entalpía (kJ/kg)
LMDT	Temperatura media logarítmica (°C)
M	Cantidad de agua producida (kg)
<i>m</i>	Flujo másico (kg/s)
N	Número de efectos
PR	Índice de rendimiento (kg/kW)
$\dot{Q}$	Flujo de calor (kW)
RR	Índice de recuperación (-)
S	Salinidad (g/kg)
s	Entropía (kJ/K)
sA	Área específica (m <sup>2</sup> /kg)
SWC	Consumo de trabajo específico (kWh/m <sup>3</sup> )
T	Temperatura (°C)
U	Coefficiente global de transferencia de calor (W/m <sup>2</sup> °C)
UCDW	Costo Unitario de agua desalinizada (\$/m <sup>3</sup> )
y	Fracción de vapor generado por evaporación
<i>W</i>	Flujo de Energía eléctrica producida o consumida (kW)
Z	Costos (CLP)

## Símbolos griegos

$\beta$	Fracción de vapor generado para precalentar agua de alimentación
$\Delta$	Diferencia
$\eta$	Rendimiento

## Subíndices

B	Brine
bba	Bomba
cd	Condensador
cp	Compresor
D	Agua Destilada
$\dot{E}x$	Exergético
eff	Efecto
Feed	Alimentación
f,g	Cambio de fase
HX	Intercambiador de calor
in	Ingreso
out	Salida
ph	Precalentador
res	Residual
s	Isentrópica
ST	Vapor de cada efecto
steam	Vapor equivalente al calor suministrado
T	Temperatura



## Introducción

### 1.1. Contextualización en un marco global y nacional

El agua es un recurso fundamental para la vida de todos los seres vivos que habitan el planeta, desde los organismos vegetales hasta los animales y humanos, siendo estos últimos quienes lo utilizan en distintos tipos de actividades, ligadas tanto a las necesidades fundamentales como secundarias. Tal es su importancia, que el agua potable es considerada un derecho humano fundamental para asegurar el sustento saludable de los hogares y mantener la dignidad de las personas, obligando a los estados a trabajar para conseguir su acceso universal y saneamiento para todos sin discriminación alguna (UNESCO, 2019).

Se estima que en el mundo se tienen 1.400.000 km<sup>3</sup> de agua, de los cuales sólo alrededor del 2,5% pertenece a agua dulce y un 0,8% corresponde a lo disponible para el consumo humano, repartiéndose principalmente en 3 sectores: el sector agropecuario con un 69%, el sector industrial (incluyendo la generación de energía) que ocupa un 19% y el sector municipal que contempla el consumo realizado por los hogares, con un 12% (FAO, (2019)). La figura 1 muestra gráficamente el consumo de agua de los 3 sectores mencionados previamente para cada continente.

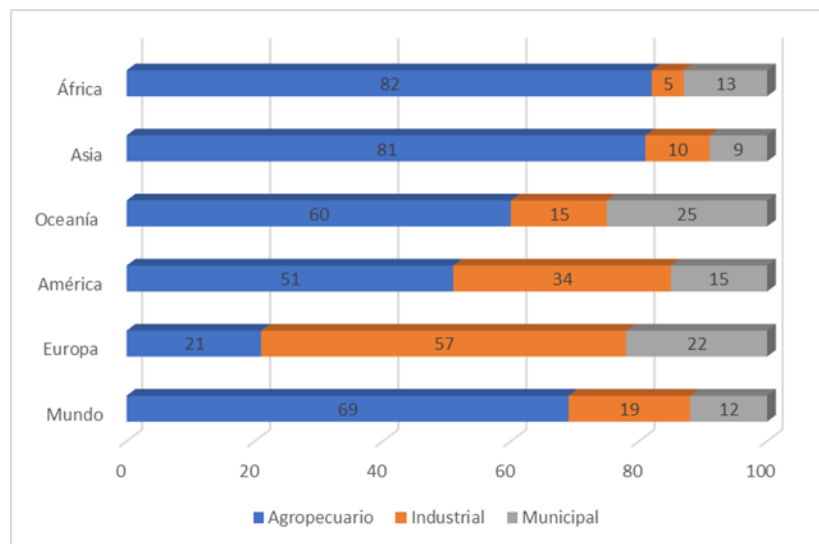


Figura 1: Proporción de extracción de agua por sector y continente. Elaboración propia con datos de FAO, (2019).

Del gráfico se puede apreciar que el sector que más agua consume en el mundo, a excepción de Europa, es el agrícola. A nivel nacional se sigue la tendencia global, con una mayor destinación del agua disponible al sector agrícola, lo cual se refleja en la figura 2, con los principales consumos a nivel nacional.

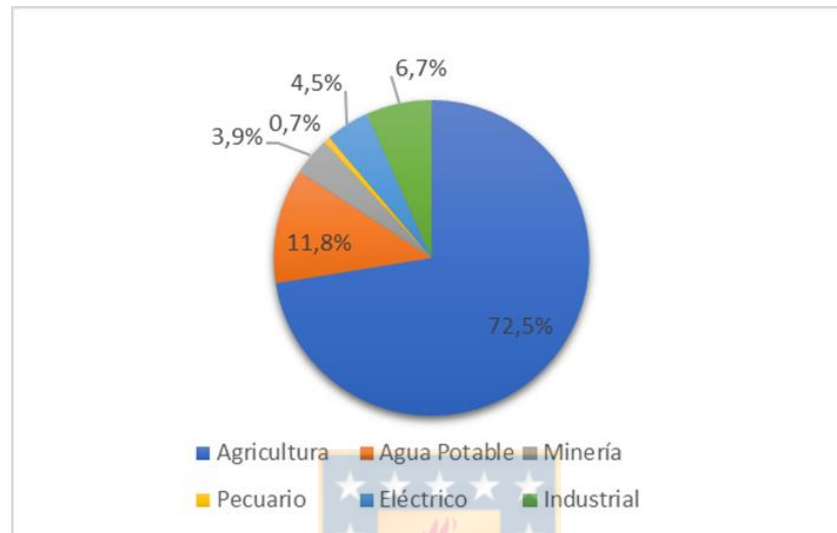


Figura 2: Distribución de la demanda de agua consuntiva por sector en 2015. Elaboración propia condatos del MOP, (2020).

Chile tiene una disponibilidad de agua dulce de 922 km<sup>3</sup>, siendo el 5<sup>to</sup> país en poseer más agua a nivel latinoamericano y 14<sup>vo</sup> país a nivel mundial, FAO-AQUASTAT (2010). Esto deja a Chile en una posición privilegiada en materia de recursos hídricos. Además, nuestro país posee una escorrentía media total de 51.281 m<sup>3</sup>/persona/año, cifra muy por encima a los 6.600 m<sup>3</sup>/persona/año de la media mundial y a los 2.000 m<sup>3</sup>/persona/año al umbral de desarrollo sostenible (Dirección General de Aguas, 2016). Sin embargo, desde la región Metropolitana hacia el Norte se genera un déficit de agua, llegando a una escorrentía inferior a 500 m<sup>3</sup>/persona/año. En la región de O'Higgins se tienen 7.000 m<sup>3</sup>/persona/año, cantidad que va en aumento hacia el Sur, llegando a un valor de 2.950.168 m<sup>3</sup>/persona/año en Aysén (General Water Directorate, (2016)). La figura 3 muestra gráficamente la disponibilidad de agua per cápita por región en el año 2020.

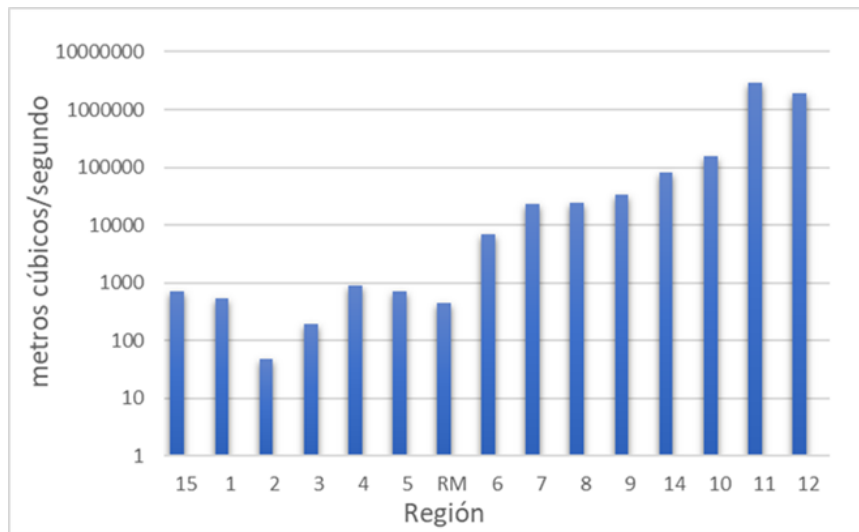


Figura 3: Disponibilidad de agua per cápita en cada región de Chile. Elaboración propia con datos de MOP, (2020).

En total, Chile cuenta con 101 cuencas hidrográficas que incluyen 1.251 ríos y 12.784 cuerpos de agua correspondientes a lagos y lagunas, además de 24.114 glaciares que aportan caudal de escorrentía en el estiaje (MOP, (2020)).

## 1.2. Planteamiento de la necesidad y problema a resolver.

Las distintas actividades realizadas por la sociedad en las materias mencionadas en la figura 2 requieren de una cantidad de agua mínima para ser llevadas a cabo. Lamentablemente, esta disponibilidad no se puede garantizar para todo el mundo, ya sea por las condiciones de la zona o su disponibilidad, y peor aún, con el paso del tiempo se hace más difícil obtener este recurso. Esto se debe principalmente a dos factores: el aumento en su demanda y la disminución de su disponibilidad. El aumento en la demanda se debe principalmente al constante crecimiento de la población a nivel mundial. Según la UNESCO (2019), la demanda mundial de agua es de  $4.600 \text{ km}^3/\text{año}$  y se prevé que para el 2050 aumente entre un 20% y 30% ( $5.500$  a  $6.000 \text{ km}^3/\text{año}$ ), lo cual está relacionado directamente con el aumento de la población, que se estima que ascienda de 7.700 millones en el 2018 a un valor de 9.400 a 10.200 millones para el 2050. Se estima que de estas el 66% se ubicará en ciudades, producto de un aumento en la urbanización, además de la creciente industrialización orientada a generar una mayor producción para satisfacer el mayor consumo de bienes, principalmente de alimentos, los cuales tienen una estrecha relación con la disponibilidad de agua (UNESCO, 2020). Según la FAO (2014), la sequía es la causa más común de escasez

severa en los países en desarrollo. Esto se debe a los altos requerimientos de agua que<sup>4</sup> exige la agricultura. Por ejemplo, para cultivar 1 kg de cereal se necesitan 1,5 toneladas de agua y para el alimento diario de una persona se requieren 3.000 litros de agua, mientras que los requerimientos diarios de agua potable para una persona van de los 2 a los 4 litros, destinados sólo al consumo. A nivel nacional, se proyecta un aumento de la demanda consuntiva del agua de un 4,5% al 2030 y de un 9,7% al 2040 con respecto al 2017, cuyo valor corresponde a 4.900 m<sup>3</sup>/s (MOP, (2020)).

Por otro lado, desde el punto de vista del foco asociado a la disminución de la disponibilidad de agua, se tiene que hay una estrecha relación con el cambio climático, ya que se presenta como una consecuencia de este (Greenpeace Chile, 2020). Un ejemplo significativo de esta situación es Somalia, donde la sequía debido al cambio climático ha traído consecuencias graves, con la peor sequía en 60 años registrada en el 2009. Esto generó un éxodo masivo de más de 2 millones de personas desde la capital, provocando la muerte de 250.000 personas en el año 2013 (UNHRC ACNUR, 2020). Esta situación no ha visto una mejora, llegando a reportar más de 2 millones de personas en situación de hambre aguda en el 2019. En este contexto, la sequía ha generado que zonas como la región de Lower Shabelle disminuyera su producción de alimentos. De esto se puede desprender que las precipitaciones son condicionantes para la agricultura de ese país y su ausencia lleva al país a condiciones críticas para los habitantes (FAO, 2019).

Para el contexto nacional los focos condicionantes para la obtención de agua son los mismos. La disponibilidad de las fuentes de agua existentes ha ido decreciendo con los años, como la nieve que ha visto disminuir su cobertura del 2000 al 2016 en un 13% (MOP, 2020). Además, el cambio climático ha traído consigo disminuciones en las precipitaciones y en el caudal de los ríos, según el balance hídrico nacional para las macrozonas norte y centro, en conjunto con el aumento de las temperaturas que promueven los deshielos prematuros, disminuyendo así en un 8% las reservas de agua en los glaciares cordilleranos (Dirección general de aguas, 2018). Esto ha generado una disminución sostenida y creciente de los recursos hídricos de las macrozonas sur y centro-norte en un 20% y 50% respectivamente, manteniéndose este pronóstico hasta el 2030 (MOP, 2020).

Actualmente, la problemática del agua se manifiesta en distintos indicadores (FAO, 2014), como:

- La sequía es la causa individual de la escasez alimentaria más grave en los países en vías de desarrollo.
- Se han necesitado USD \$103.000 millones anuales para financiar el saneamiento y tratamiento de aguas residuales hasta el 2015 en países en vías de desarrollo.
- 768 millones de personas han utilizado una fuente de agua potable al 2013.
- Se estima que al 2050 se deberá alimentar a una población de 9.000 millones de habitantes, necesitándose un 60% adicional de alimentos, para lo cual

evidentemente se requerirá más agua.

Bajo toda la problemática y contextualización mencionada en términos globales y nacionales, entidades como la FAO (2020) promueven una mejor administración de los recursos hídricos, mejoras en la gobernanza del agua, desarrollo de técnicas de riego, creación de capacidades de alerta temprana en detección de amenazas climáticas, apoyos para el almacenamiento de agua para amortiguar el cambio climático, entre otras actividades. Además, por parte de distintas áreas de la ciencia, se propone desarrollar nuevas tecnologías para aprovechar nuevas fuentes de agua, así como un mejor aprovechamiento de las existentes.

### **1.3. Desalinización y sus tecnologías.**

La desalinización se ha ido incorporando como una alternativa para la producción de agua dulce, debido a las grandes cantidades que se puede llegar a producir, y a la independencia de las condiciones climáticas. Por esta razón, se ha buscado mejorar el proceso, con el fin de hacerlo más eficiente en términos de consumo energético, producción de agua, entre otros. Esto no sólo ha ayudado a reducir los costos, sino que también las emisiones producto del consumo de combustibles fósiles como es el caso de las tecnologías térmicas. Existen dos grupos de tecnologías para desalinizar el agua de mar: a) las mecánicas o de membranas, donde su principio de funcionamiento se basa en la filtración del agua sometida a grandes presiones como la osmósis inversa, y b) las tecnologías térmicas, como los sistemas MED (Multi-Effect Desalination) y MSF (Multi Stage Flash) que se basan en el cambio de fase del agua, mediante la evaporación para separar la sal del agua, y una posterior condensación para obtener el agua en forma líquida para su postratamiento y consumo. Este principio ocurre sucesivamente una cantidad “n” de veces en los sistemas térmicos.

Tanto los sistemas de desalinización de membranas como los térmicos presentan ventajas y desventajas. Las tablas 1 y 2 muestran las ventajas y desventajas generales de estos sistemas, según lo indicado por Rahimi y Chua, (2017).



Tabla 1: Ventajas de las tecnologías de desalinización, Rahimi & Chua (2017). 6

	Ventajas
Osmosis Inversa	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Menor Consumo Energético.</li> <li>- No necesita fuente de calor.</li> <li>- Fácil de aumentar su capacidad incorporando unidades adicionales.</li> <li>- No se necesita detener toda la planta para realizar mantenimiento.</li> </ul>
MSF	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Amplia experiencia en uso comercial y confiabilidad.</li> <li>- Grandes cantidades de agua producida y con gran calidad.</li> <li>- Independencia de la salinidad del agua de alimentación.</li> <li>- Pretratamiento requerido mínimo.</li> <li>- Posibilidad de acoplar a nuevos sistemas (menor que sistema MED).</li> </ul>
MED	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Recepción de calor externo a bajas temperaturas.</li> <li>- Alta calidad del agua y alto rendimiento térmico.</li> <li>- Posibilidad de combinarlo con otros procesos.</li> <li>- Bajo requerimiento energético para bombeo.</li> <li>- Pretratamiento requerido mínimo y alta autonomía de la planta.</li> </ul>

Tabla 2: Desventajas de las tecnologías de desalinización Rahimi & Chua, (2017).

	Desventajas
Osmosis Inversa	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Membranas de alto costo con expectativa de vida máxima de 2 años.</li> <li>- Alta sensibilidad a cambios en la salinidad del agua de alimentación.</li> <li>- Necesidad de altos estándares de calidad en equipamiento y materiales.</li> <li>- Posibilidad de contaminación por bacterias, el pretratamiento es esencial.</li> <li>- Tendencia a fallas mecánicas por altas presiones de operación.</li> </ul>
MSF	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alto costo en construcción y operación.</li> <li>- Se requiere un alto nivel de conocimiento técnico.</li> <li>- Alto consumo de energía térmica.</li> <li>- Opera a altas temperaturas (alimentación debe ingresar a temperaturas entre 90°C y 120°C).</li> </ul>
MED	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alto costo de inversión.</li> <li>- Susceptible a corrosión de componentes.</li> <li>- Menor tasa de recuperación (aunque mayor que un sistema MSF).</li> <li>- Requiere de fuente de energía térmica.</li> </ul>

Como se puede apreciar de las tablas 1 y 2, una de las ventajas de la osmosis inversa sobre las tecnologías térmicas es su bajo consumo energético en comparación a los sistemas térmicos, motivo por el cual se ha promovido el desarrollo de la osmosis inversa, presentando una mayor participación en el mercado. Por otro lado, la versatilidad de las tecnologías térmicas en conjunto con la gran disponibilidad de combustibles fósiles en los países del golfo pérsico ha permitido que se sigan desarrollando y mejorando en el tiempo.

Según un estudio de ciclo de vida realizado por Serra et al. (2006) en 3 plantas: una de osmosis inversa que produce 46.000 m<sup>3</sup>/día, una MSF y una MED que producen 45.000 m<sup>3</sup>/día cada una, las plantas térmicas son las que tienen los peores indicadores ambientales y energéticos. Sin embargo, cuando estas últimas usan calores residuales de otros procesos industriales se obtienen mejores indicadores medioambientales y energéticos, dado que la fuente de calor no implicaría un gasto adicional de combustibles. Esto permite hacer competitivas las tecnologías térmicas, incluso considerando sus deficiencias de gasto energético en comparación con la osmosis inversa. Esto motiva el interés de acoplar otros sistemas a una planta MED o MSF, incluso se podría usar como unidad enfriadora o condensadora para que los sistemas acoplados colaboren entre sí (Serra et al., 2006). Las tablas 3, 4, 5 y 6 muestran las emisiones relevantes producidas y los puntajes generales de los indicadores ambientales asociados a cada tecnología de desalinización antes y después de la integración de una fuente de calor residual para las tecnologías térmicas, donde se puede ver una mejora considerable con la implementación realizada.

Tabla 3: Emisiones relevantes en el aire producidas por sistemas de desalinización (Serra et al., 2006).

	ME D	MSF	Osmosis Inversa
kg de CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> de agua	23,4 1	18,0 5	1,78
g de polvo/ m <sup>3</sup> de agua	2,04	1,02	2,07
g de NO <sub>X</sub> /m <sup>3</sup> de agua	28,3	21,4 1	3,87
g de NMVOC/m <sup>3</sup> de agua	7,90	5,85	1,10
g de SO <sub>X</sub> /m <sup>3</sup> de agua	27,9 1	26,4 8	10,68

Tabla 4: Puntajes generales para diferentes tecnologías de desalinización c

Método	Unidad	MSF	MED	Osmosis Inversa
EI 99	MPoints/h m <sup>3</sup>	1,61 4	1,277	0,084
Ecopoints 97	GPoints/h m <sup>3</sup>	9,23 0	7,573	1,304
CML 2 baseline	10 <sup>-5</sup> /hm <sup>3</sup>	4,51 0	3,147	1,408

Tabla 5: Emisiones relevantes en el aire producidas por sistemas de desalinización térmicos con calorresidual (Serra et al., 2006).

	MSF	ME D
Kg de CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> de agua	1,96	1,11
g de polvo/ m <sup>3</sup> de agua	2,04	1,02
g de NOX/m <sup>3</sup> de agua	4,29	2,42
g de NMVOC/m <sup>3</sup> de agua	1,22	0,59
g de SOX/m <sup>3</sup> de agua	14,80	16,1 1

Tabla 6: Puntajes generales para diferentes tecnologías de desalinización con calor residual (Serra et al., 2006).

Método	Unidad	MSF	MED	Osmosis Inversa
EI 99	MPoints/h m <sup>3</sup>	0,112	0,067	0,084
Ecopoints 97	GPoints/h m <sup>3</sup>	1,664	1,483	1,304
CML 2 baseline	10 <sup>-5</sup> /hm <sup>3</sup>	1,582	0,827	1,408

De los resultados se observa una clara mejora de los indicadores ambientales de los<sup>9</sup> sistemas de desalinización térmicos, lo cual los hace bastante competitivos. Esta mejora se puede también expandir al ámbito energético, puesto que los sistemas MED, en particular, pueden recibir calor de una fuente residual a baja entalpía, ya que opera a menores temperaturas y presiones que el sistema MSF. Esto ha favorecido el desarrollo de los sistemas MED, con el fin de acoplarlos a otros subsistemas como un ciclo de Rankine orgánico, bombas de calor, compresores de vapor, entre otros. Esto permite mejorar los indicadores de producción de agua, eficiencia de los intercambiadores de calor y uso de la energía disponible e incluso se puede lograr una independencia plena de fuentes de calor externa.

#### **1.4. Optimización Multiobjetivo**

Una de las metodologías que ha contribuido a determinar las mejoras implementadas, ha sido la optimización multiobjetivo, que busca determinar fronteras de funcionamiento óptimo, las cuales se conocen como fronteras de Pareto. Estas fronteras se determinan mediante algoritmos genéticos, concepto que se detallará más adelante. Estos algoritmos se han aplicado sobre tecnologías específicas para determinar los máximos indicadores alcanzables, y en qué condiciones de operación se pueden obtener. La limitación de esta metodología es que es aplicable sólo a configuraciones fijas que operan con posibilidad de obtener sólo una frontera de Pareto. Esto implica que un sistema operaría en condiciones óptimas sólo si se encuentra operando en las condiciones para las que fue diseñado, por lo cual, si operara a carga parcial, produciendo menos agua o con menos energía disponible, se alejaría de su estado óptimo. Por esta razón, esta investigación considerará distintos escenarios, para determinar diferentes fronteras de Pareto en las cuales un sistema de desalinización MED pueda transitar, adaptándose mediante la redirección de flujos con válvulas u otra intervención a la planta que sea sencilla de aplicar.

#### **1.5. Hipótesis y Objetivos.**

##### **Hipótesis:**

“Es posible definir una condición óptima de funcionamiento de un sistema de desalinización MED mediante una optimización con múltiples fronteras de Pareto obtenidas de la optimización multiobjetivo, cuyos resultados establecerán cuando conviene mantenerse en una frontera o cambiarse a otra”.

##### **Objetivo general:**

- OG: Determinar las condiciones de operación óptimas de un sistema de

### **Objetivos específicos:**

- OE1: Dimensionar el caso de estudio a considerar para el sistema propuesto.
- OE2: Establecer funciones objetivo a optimizar y sus variables de decisión.
- OE3: Implementar modelos numéricos y simular los sistemas propuestos.
- OE4: Implementar el algoritmo de optimización multiobjetivo y determinar múltiples fronteras de Pareto.
- OE5: Definir condiciones óptimas de funcionamiento del sistema.

### **1.6. Metodología.**

Los pasos para considerar dentro de la metodología son los siguientes:

- OE1: El caso de estudio a dimensionar considera un sistema MED con alimentación “hacia adelante” y otro con alimentación “paralela cruzada”, los cuales se pueden acoplar a un compresor de vapor. Estos sistemas se dimensionarán para producir agua a partir de un flujo de calor de 35 MW (Darwish et al., 2006). Esta configuración permitirá determinar los primeros indicadores, que se usarán como referencia y se compararán con datos de la literatura.
- OE2: Una vez dimensionado el caso, se establecerán las funciones objetivo, que estarán ligadas a mejorar los indicadores de desempeño de la planta desalinizadora de referencia, como el área específica, la fracción de agua obtenida con respecto al agua de mar utilizada (Recovery Ratio: RR), el agua producida por vapor consumido (Gain Output Ratio: GOR), cantidad de agua desalinizada por cada 2330 kJ empleados (Performance ratio: PR) y agua producida (asociados al agua obtenida con respecto al calor suministrado), el costo unitario de agua desalinizada (Unit Cost of Distilled Water: UCDW). Además se buscará maximizar el rendimiento exergético y minimizar la salinidad en la descarga. Luego se definirán los criterios de evaluación de los resultados obtenidos, teniendo en consideración que la mejora de un indicador puede interferir negativamente en otro, por lo cual se plantea implementar técnicas que permitan integrar los resultados de más de un indicador como la optimización multiobjetivo. Los indicadores propuestos se definirán en función del flujo másico de alimentación, la temperatura máxima de la salmuera (Top Brine Temperature: TBT) y la temperatura de la salmuera a la salida del último efecto.
- OE3: Se desarrollarán los modelos numéricos y las simulaciones de las configuraciones propuestas. El software a utilizar para realizar este paso es el Engineering Equation Solver (EES). Los resultados en esta etapa permitirán identificar los efectos de las modificaciones en las configuraciones propuestas en

base a la producción de agua, puesto que se quiere incorporar un compresor para<sup>11</sup> reinyectar vapor a la configuración MED con alimentación en serie y paralelo, dado que según Amidpour et al. (2020) esta implementación muestra resultados favorables.

- OE4: Se implementará y aplicará el algoritmo de optimización NSGA2, y se determinará la frontera de Pareto. Luego se hará lo mismo para las diversas alternativas estructurales para obtener las múltiples fronteras requeridas. Una vez determinados los resultados, se variará el valor de una misma variable de decisión para ver la sensibilidad de los resultados obtenidos y así evaluar si es más conveniente quedarse en una misma frontera de Pareto o desplazarse a otra.
- OE5: Se consolidarán la o las soluciones óptimas obtenidas y se procederá a establecer recomendaciones para el diseño y operación de sistemas de desalinización MED.



### Estado del arte

#### 2.1. Principio de tecnología MED.

Los sistemas MED junto con los MSF componen el 35% de participación en el mercado de la desalinización de agua a nivel mundial, siendo este el más antiguo de todos, con una vigencia de más de 50 años (Rahimi y Chua, 2017), pero con un menor desarrollo tecnológico. Los desafíos están en la mejora del proceso, de los equipos que lo componen, o integrando nuevos componentes, dada la versatilidad en sus aplicaciones. El proceso se inicia con la inyección de agua salada al evaporador de la primera etapa donde recibe calor de una fuente externa, para luego evaporarse parcialmente. La salmuera residual y el vapor generado en la primera etapa se van directo a un segundo evaporador a una temperatura y presión de cambio de fase ligeramente menor. El vapor que llega a la segunda etapa sirve en parte para precalentar el agua de alimentación a través de un intercambiador de calor, y en parte para evaporar la salmuera residual de la primera etapa que ingresa como agua de alimentación para la segunda etapa y/o agua pulverizada que se suministra a esta misma. Luego se repite el proceso por “n” veces hasta que la salinidad de la salmuera residual es muy alta y/o la presión de saturación es muy baja. En las últimas etapas, ya con altas concentraciones de sal, el agua que se puede evaporar es muy baja, por lo cual ya deja de ser conveniente ir agregando efectos.

El proceso descrito corresponde a una alimentación conocida como “hacia adelante” (Forward Feed: FF). Por otro lado, se tiene una orientación inversa en el flujo de alimentación, donde el agua va desde el último efecto hasta el primero, proceso conocido como de alimentación “hacia atrás” (Backward Feed:BF).

Además, se cuenta con la alimentación “paralela” (Parallel Feed: PF), que contempla alimentar a todos los evaporadores al mismo tiempo con agua pulverizada, donde el calor latente sigue la misma ruta que la alimentación hacia adelante. Esta alimentación puede o no hacer recircular la salmuera al siguiente efecto, cuya variante de recirculación de salmuera es conocida como alimentación “paralela cruzada” (Parallel/Cross Feed: PCF) (Elsayed et al., 2019). La figura 4 muestra un sistema MED de alimentación hacia adelante.

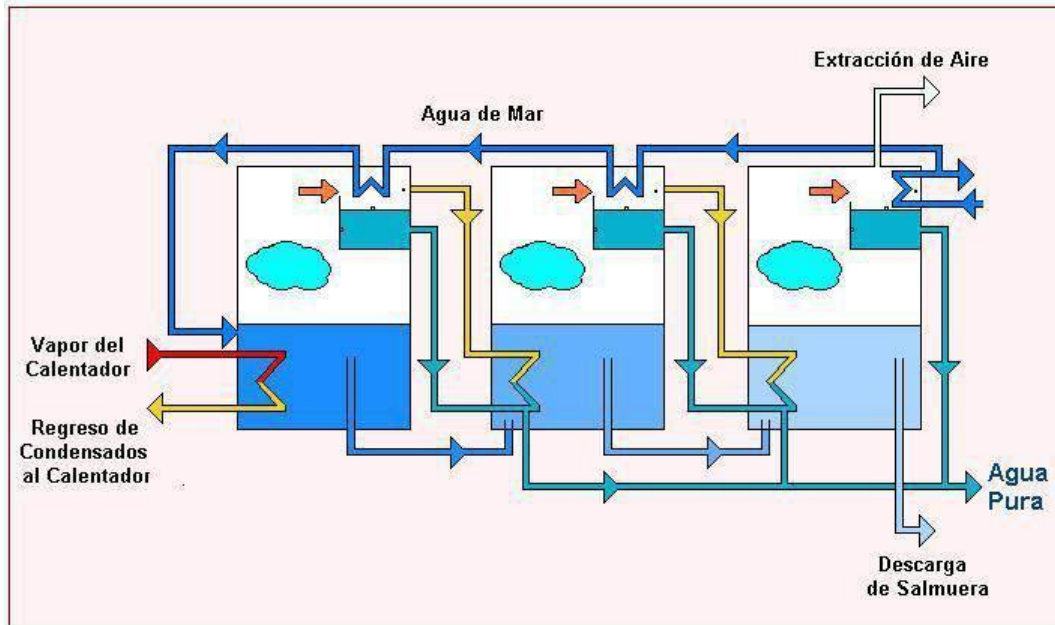


Figura 4: Principio de funcionamiento de un sistema MED (Perez Gomez. 2017).

## 2.2. Comparación entre alimentaciones de un sistema MED.

Elsayed et al., (2019) realizaron un análisis exergoeconómico de los 4 tipos de alimentación descritos anteriormente. A estos sistemas les añade un compresor para recircular el vapor obtenido en el último efecto hacia el primero. Ellos asumen que las propiedades termofísicas del agua de mar dependen de su temperatura y salinidad, y que hay diferencias o pérdidas de temperatura entre la salmuera generada y el vapor de cada efecto por el aumento del punto de ebullición (Boiling Point Elevation: BPE). Este estudio presenta algunas simplificaciones que deberían evaluarse de manera más profunda al realizar un modelado, como el flujo de calor entregado al agua de alimentación para llevarla a la temperatura deseada, principalmente en los primeros evaporadores, cuya evaporación suele ocurrir a temperaturas sobre los 65°C. Esto implica que en la alimentación paralela cruzada se tenga un número más limitado de efectos y que en la alimentación hacia adelante se deban usar precalentadores intermedios para asegurar el buen funcionamiento de la planta.

De este trabajo se desprende la poca viabilidad de la alimentación “hacia atrás”, en términos económicos y técnicos. Los mejores resultados se obtuvieron con la alimentación hacia adelante y la alimentación paralela cruzada, con índices de rendimiento de 3,19 y 3,3 respectivamente. El menor consumo específico de energía es de 13,7 kW/m<sup>3</sup> y se obtiene para la alimentación hacia adelante. Las destrucciones de exergía de los sistemas fueron mayores en los compresores de vapor (entre 35% y



50%) y en los evaporadores (entre 34% y 50%).

Dado estos resultados se propone la modelación y simulación de un sistema MED, solamente con las alimentaciones hacia adelante y paralela cruzada. La figura 5 muestra la disposición de los flujos en cada tipo de alimentación descrita.

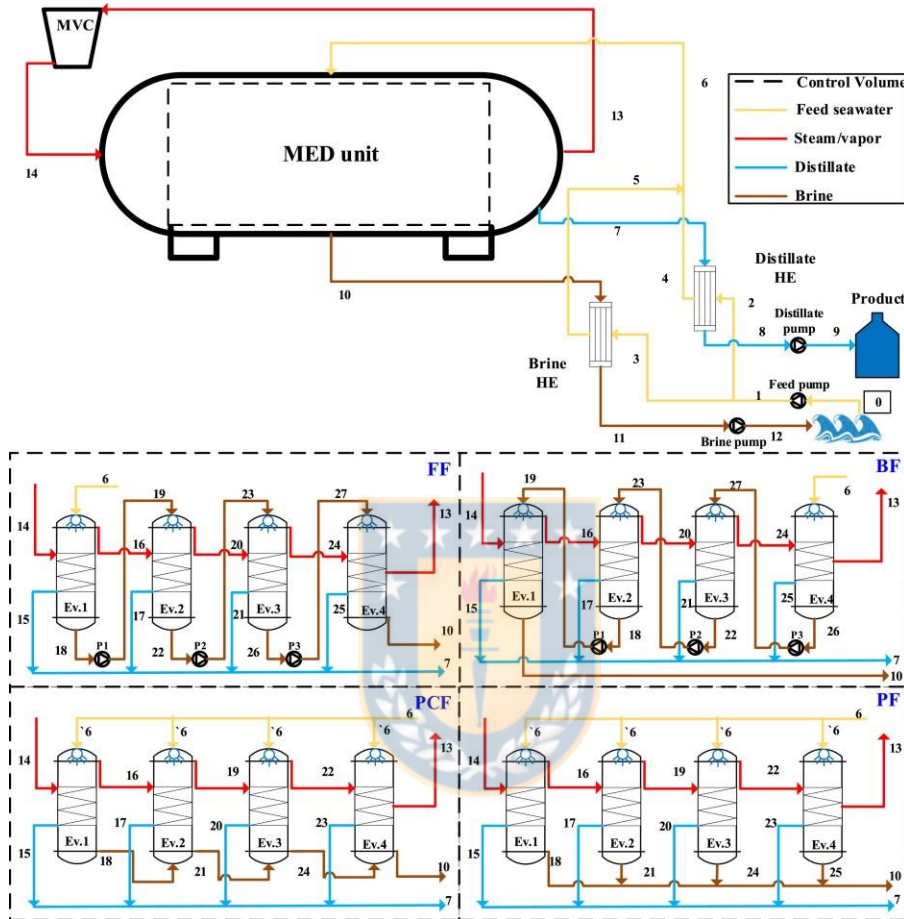


Figura 5: Disposición de flujos en las distintas alimentaciones de un sistema MED (Elsayed et al., 2019).

### 2.1. Tecnología MED y su desarrollo tecnológico.

La tecnología MED se ofrece la oportunidad de ser integrada con sistemas que tengan calores residuales o a sistemas de conversión de energía. Dentro de los sistemas térmicos de desalinización es el más versátil debido a su capacidad de trabajar con flujos de calor a temperaturas menores y de acoplarse a sistemas como ciclos Rankine orgánicos (ORC) (Anastasovski et al., 2020). A continuación, se presentan las tecnologías que más destacan en su potencial de desarrollo.

### 2.1.1. Planta MED con evaporadores en serie y paralelo.

El sistema MED utiliza una fuente de calor externa para desalinizar el agua por evaporación y posterior condensación, consta de varios efectos compuestos de un evaporador, una cámara que contiene el vapor generado y un precalentador de agua de alimentación. El vapor generado en cada etapa sirve para precalentar el agua de alimentación, así como también para entregar su calor latente al condensar en la etapa siguiente y luego ser recolectada con ínfimas concentraciones de sal.

En cuanto a la recepción del calor latente o la orientación de los evaporadores, se ha planteado que estos estén en serie o en paralelo, de modo que en la primera opción se coloque un evaporador tras otro como lo muestra la figura 6. La segunda opción propone que el calor obtenido de la fuente externa se reparta en dos evaporadores en paralelo, para luego seguir en serie en los siguientes evaporadores, como se muestra en la figura 7 (Darwish et al., 2006).

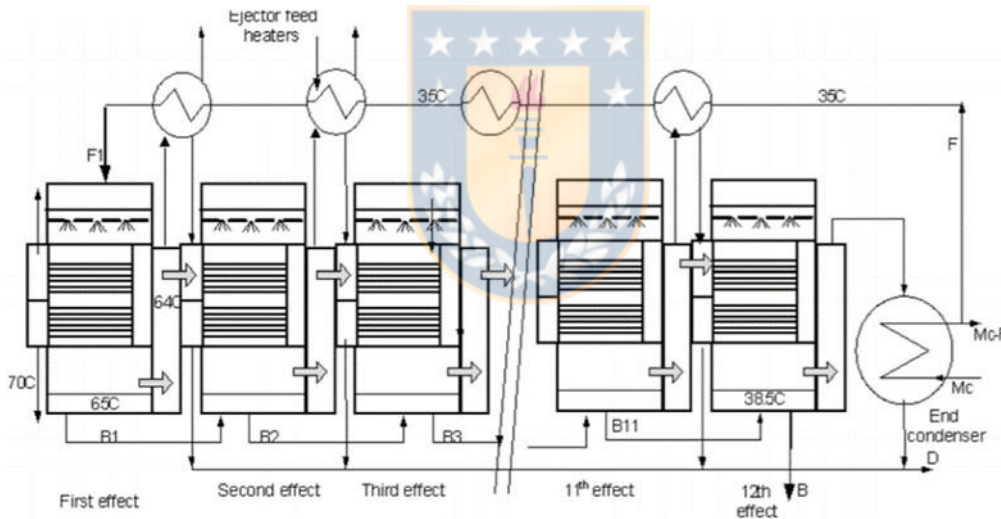


Figura 6: Sistema MED con 12 evaporadores en serie (Darwish et al., 2006)

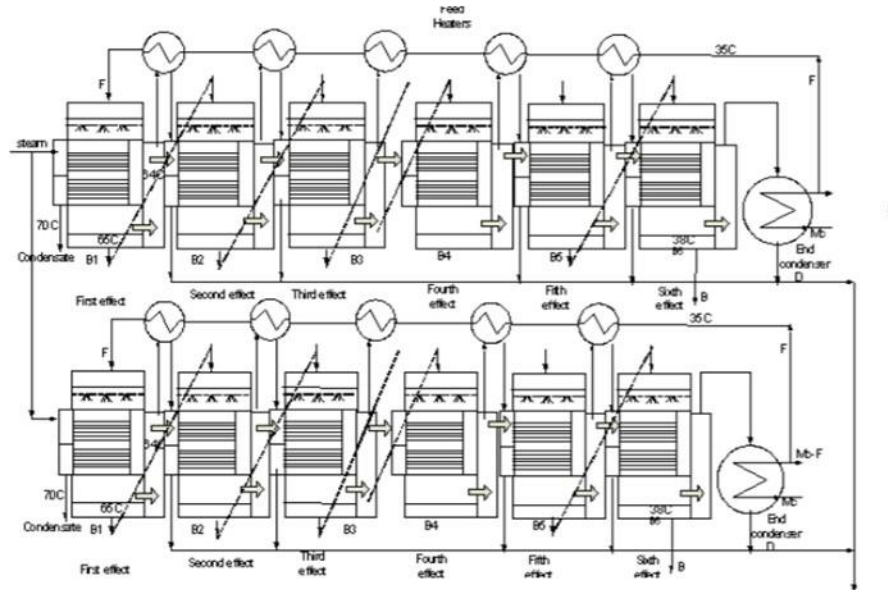


Figura 7: Sistema MED con dos líneas en paralelo de 6 evaporadores cada una (Darwish et al., 2006).

El modelo propuesto por Darwish et al. (2006) presenta simplificaciones, como la imposición de la cantidad de vapor obtenido en cada efecto, asumiendo que es la misma en todos estos, lo que se puede mejorar con un modelo más detallado. Lo positivo de su trabajo es que contempla plantas reales, razón por lo cual se consideran sus resultados y parte de su metodología como referencia en el cálculo de los indicadores de la planta.

### 2.1.2. Sistema de Desalinización Multiefecto (MED) con Bomba de calor (HP).

Este sistema, propuesto por Amidpour et al. (2020) mejora la eficiencia de las unidades MED, independizándose de la fuente de calor externa. Para ello proponen 3 configuraciones: 1) Una unidad MED de la que se extrae el vapor generado de la última etapa con un compresor para inyectarlo en la primera etapa a una mayor presión y temperatura (ver figura 8). 2) Una unidad MED acoplada a una bomba de calor (Vapor Compression Heat Pump: VCHP), donde el intercambiador de calor de la primera etapa toma la función de condensador de la bomba de calor, dado que ahí es donde el vapor que sale del compresor 2 se condensa (Ver figura 9). Una fracción del líquido producido en la primera etapa se expande y se envía al evaporador del ciclo de refrigeración de la bomba de calor, mientras que el vapor obtenido en la última etapa se dirige también a la salida del compresor 1 de la bomba de calor para juntarse con el líquido expandido y evaporado, con el fin de comprimir todo el conjunto e inyectarlo

nuevamente al intercambiador de la etapa 1. El vapor de la etapa 1 se dirige a la etapa 17 como se describió en un sistema MED, mientras que los calores residuales tanto de la salmuera a descargar como del condensado a almacenar se aprovechan para precalentar el agua de alimentación. 3) Una unidad MED acoplada a una bomba de calor por absorción (Absorption-Compression Heat Pump: ACHP), mostrado en la figura 10.

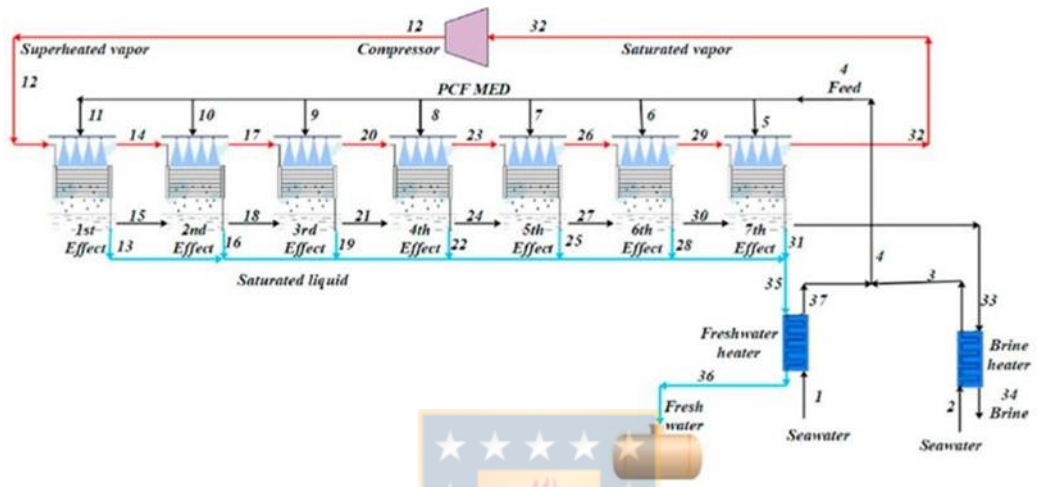


Figura 8: Compresor de vapor acoplado a sistema MED (Amidpour et al., 2020).

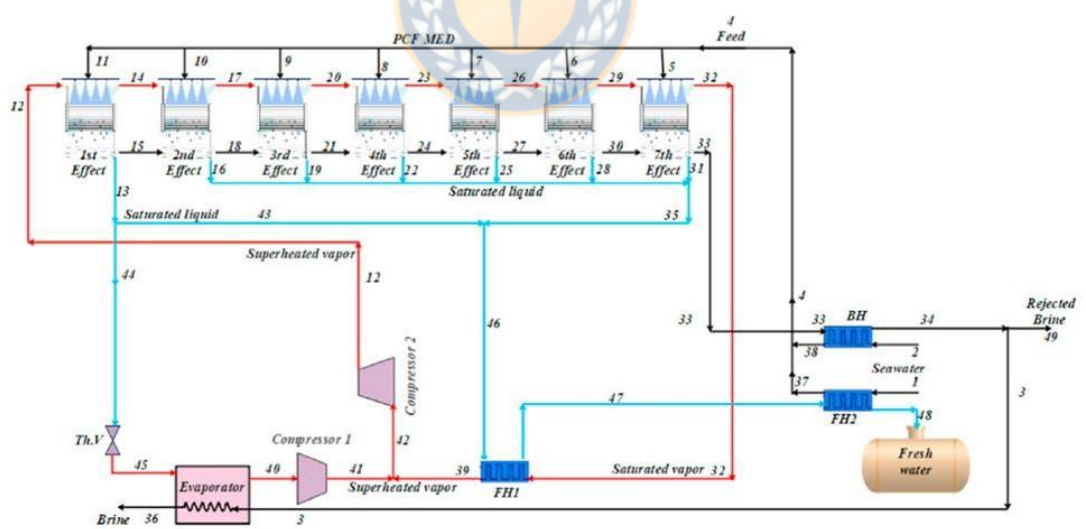


Figura 9: Sistema MED acoplado a bomba de calor por compresión de vapor VCHP (Amidpour et al., 2020).

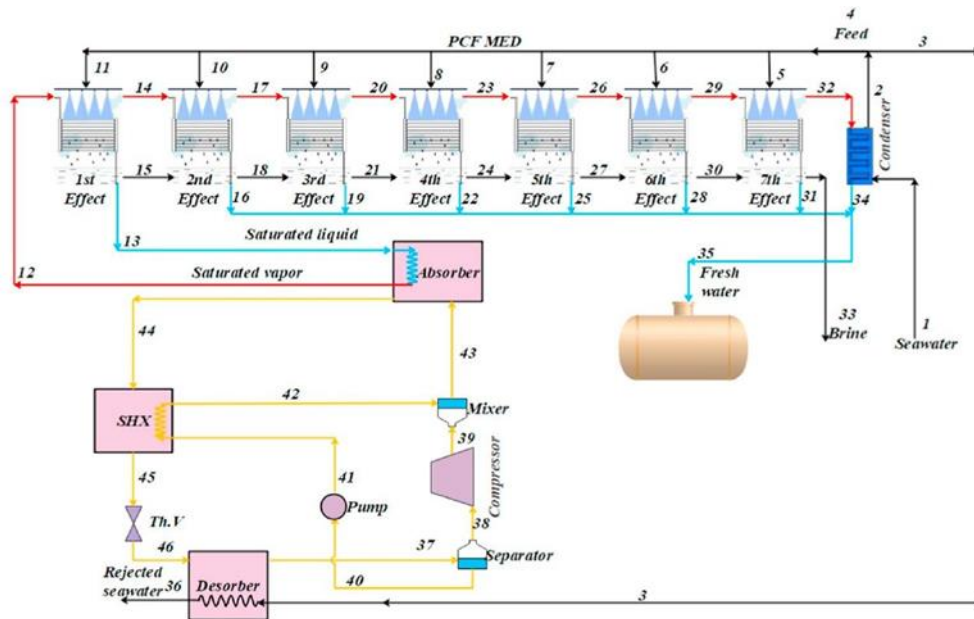


Figura 10: Sistema MED acoplado a bomba de calor por absorción ACHP (Amidpour et al., 2020).

En la figura 11 se muestran los principales resultados obtenidos de una simulación realizada con el software EES. Se puede apreciar que el sistema más conveniente, considerando sus principales indicadores, es la unidad MED acoplada a un compresor de vapor y acoplada a la bomba de calor con ciclo por compresión de vapor (VCHP).

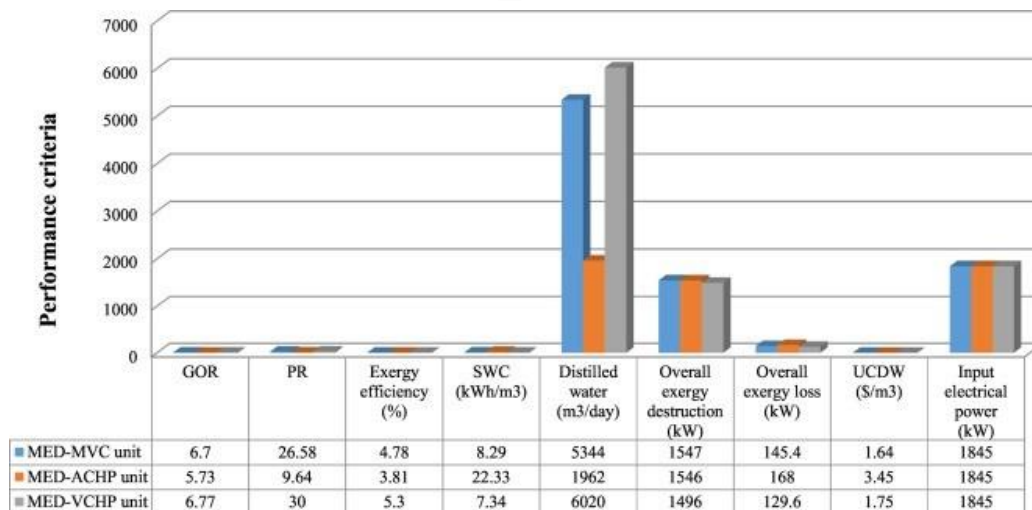


Figura 11: Principales indicadores de los distintos sistemas MED (Amidpour, et al., 2020).

Dados los resultados de este estudio, se considera incorporar a los sistemas MED un compresor de vapor y una bomba de calor por compresión de vapor (VCHP). Se excluye el uso de una bomba de calor por absorción ACHP, debido a sus malos resultados.

### **2.1.3. Sistema MED acoplado a ciclo Rankine Orgánico.**

Esta alternativa, presentada por Aguilar et al. (2020), considera una fuente de energía principal externa al sistema, la que llega al primer evaporador. El vapor generado en este evaporador se envía al evaporador del ciclo de Rankine orgánico y al intercambiador de calor que evapora el agua del segundo efecto. Luego, el vapor generado en este efecto entrega parte de su calor latente al precalentador de agua de alimentación como al evaporador de agua de la etapa siguiente, proceso que se repite  $n$  veces. La particularidad de este sistema MED es que no se inyecta agua pulverizada en todas las etapas de manera paralela. El agua de alimentación va en su totalidad a la primera etapa, donde queda bastante líquido sin evaporar y se envía a la segunda etapa, que se encuentra a una menor presión, y así sucesivamente hasta que se llegue al límite inferior de producción de agua en la última etapa. Finalmente, todo el calor latente de la última etapa es utilizado para precalentar el agua de alimentación.

En este estudio también se determinaron las mejores condiciones de operación y diseño, evaluando el impacto del número de efectos en la producción de agua en el sistema MED, entendiéndose que a más efectos hay más agua producida, pero se requiere una mayor área de transferencia de calor. La Figura 12 muestra la configuración propuesta por Aguilar et al. (2020).

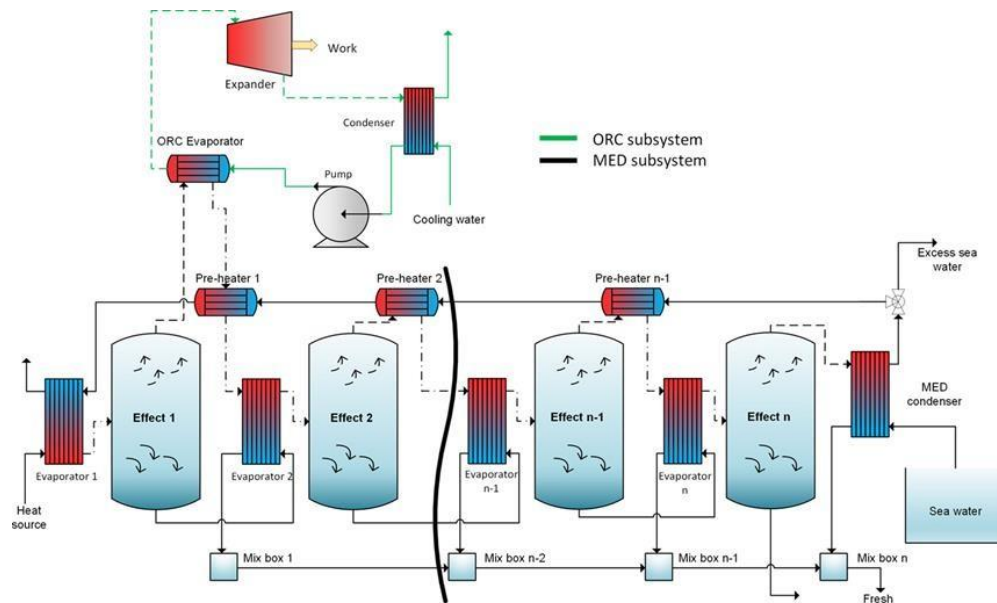


Figura 12: Sistema MED/ORC (Aguilar, et al., 2020).

Los resultados de este estudio presentan un conjunto de soluciones, puesto que dejan la disyuntiva entre obtener una mayor producción de agua considerando que se debe utilizar más área de transferencia de calor, dejando esa consigna como incógnita y no concluyendo nada más al respecto. No obstante, el potencial de desarrollo del planteamiento final de esta alternativa es bueno, pues es importante considerar que hay indicadores de rendimiento en conflicto, por lo cual se debe considerar el sistema operando con diferentes números de efectos y buscar el punto de inflexión que determina la mejor alternativa.

#### 2.1.4. Otras tecnologías relevantes.

Existen otras integraciones que se han ido desarrollando con el fin de aprovechar las ventajas comparativas de los sistemas MED, como el caso de integración con energía solar (ver figura 13). Aroussy et al. (2020) incorporan un eyector como elemento motriz para enviar el vapor al evaporador del primer efecto.

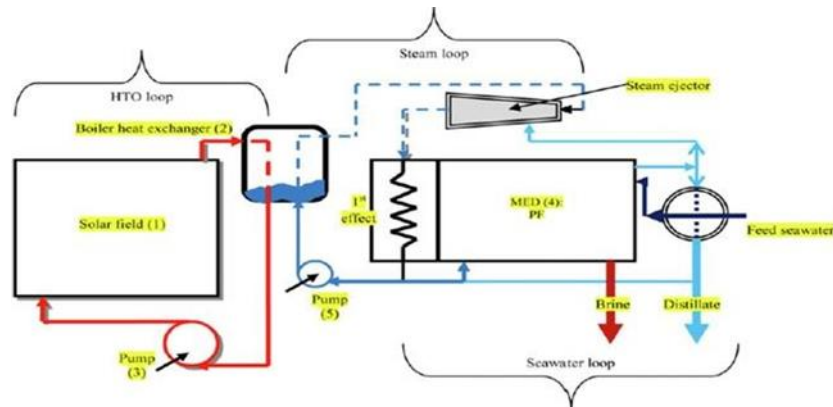


Figura 13: Esquema de ciclo solar con sistema MED (Aroussy et al., 2020).

También se tienen alternativas más convencionales como acoplar estos sistemas a un ciclo combinado, donde la planta MED se usa como unidad condensadora, haciendo que los dos subsistemas cooperen entre sí.

Finalmente, se tiene una propuesta de un sistema MED acoplado a un sistema SOFT/MGT (Solid Oxide Fuel Cell/Micro Gas Turbine) y a un sistema de refrigeración con eyector, donde se busca producir electricidad, refrigeración e incluso agua caliente sanitaria en conjunto agua dulce, siendo una propuesta más integral que las anteriores (Han et al., 2020). La figura 14 muestra en detalle la propuesta descrita.



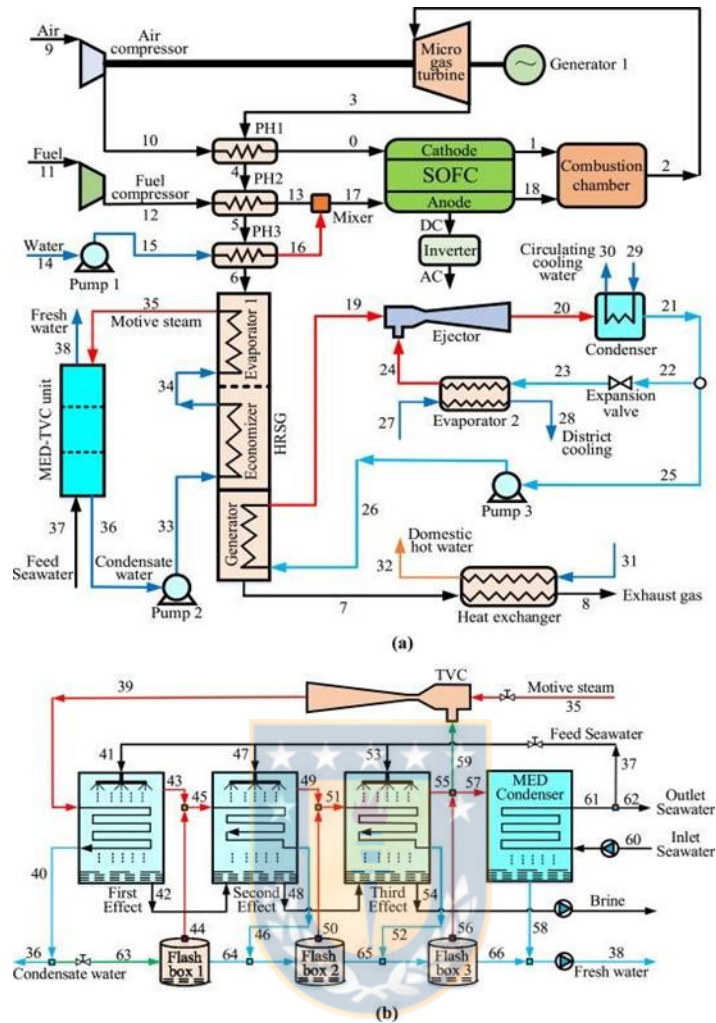


Figura 14: a) Sistema integrado MED-TVC/SOFC-MGT/OSER. b) Sistema MED-TVC en detalle (Han et al., 2020).

### 2.3.4 Optimización Multiobjetivo.

En ingeniería es común encontrar problemas en los que se deben satisfacer al mismo tiempo diferentes objetivos de diferentes índices (Fakhari et al., 2021). Para resolver este tipo de problema se ofrece como solución un conjunto de resultados en una frontera de Pareto. En el caso de un sistema MED los objetivos a optimizar son sus indicadores, conocidos también como funciones objetivo, mientras que las variables de entrada son conocidas como las variables de decisión.

Han et al. (2020) plantea que esta metodología es apta para dar satisfacción a objetivos en conflicto, y lo aplica a un sistema de desalinización incorporado a otros sistemas, como el mostrado en la figura 14. Cuando hay más de 3 funciones objetivos, las optimizaciones realizadas se suelen separar en grupos, dado que la frontera creada se proyecta en la cantidad de dimensiones equivalente al número de objetivos, para

facilitar el análisis de los resultados de manera gráfica. La figura 15 muestra una<sup>23</sup> frontera de Pareto en 3 dimensiones del sistema propuesto por Han et al. (2020) usando un algoritmo genético.

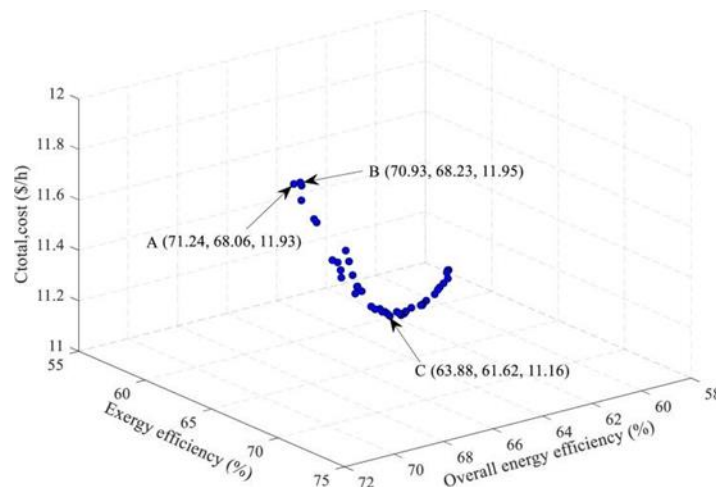


Figura 15: Frontera de Pareto para sistema de Han et al., (2020).

Se busca aplicar la misma metodología para esta investigación, con la diferencia que se determinará más de una frontera de Pareto de modo que a partir de sus resultados se determinará en que frontera conviene posicionarse.

### 2.1.5. Algoritmo Genético.

El algoritmo genético es una técnica de búsqueda basada en la teoría de la evolución, donde se busca replicar el comportamiento biológico de la selección natural (Deb et al., 2002). Opera considerando un rango para cada variable de entrada, dentro de los cuales se seleccionan valores aleatorios conocidos como individuos. Estos se ingresan al modelo propuesto para los sistemas MED y se obtienen distintos resultados, de los cuales se seleccionan los más favorables, para que se vuelvan a evaluar y generen nuevos resultados, repitiéndose este proceso  $n$  veces, hasta que se llegue a las últimas generaciones para aplicar este algoritmo. Los resultados más favorables de esta última simulación son los individuos que componen la frontera de Pareto. Según lo recomendado por Deb et al. (2019) y Han et al. (2020) y considerando la factibilidad técnica, se empleará el algoritmo NSGA-2 en el software Matlab para llevar a cabo la obtención de las fronteras de Pareto. La figura 16 muestra la barra de herramientas del algoritmo genético con las entradas mínimas para llevar a cabo una optimización Multiobjetivo.

The image shows the MATLAB 'gamultiobj' optimization tool interface. At the top, a dropdown menu is set to 'gamultiobj - Multiobjective optimization using Genetic Algorithm'. Below this, the 'Problem' section contains input fields for 'Fitness function:' and 'Number of variables:'. The 'Constraints' section includes fields for 'Linear inequalities: A:' and 'b:', 'Linear equalities: Aeq:' and 'beq:', 'Bounds: Lower:' and 'Upper:', and a 'Nonlinear constraint function:' field. A 'Run solver and view results' section features a checkbox for 'Use random states from previous run' and three buttons: 'Start', 'Pause', and 'Stop'. At the bottom, there is a 'Current iteration:' field and a 'Clear Results' button.

Figura 16: Barra de herramientas Matlab para optimización multiobjetivo con algoritmo genético. Elaboración propia.

Para implementar este algoritmo se requieren las funciones objetivo definidas previamente, en conjunto con las restricciones y rangos en las variables de entrada. También se deben especificar otros elementos como la función de mutación o fracción de cruzamiento.



## Marco teórico

### 3.1. Teoría asociada a la desalinización.

En todos los efectos de desalinización se debe considerar un balance de masa, que considere los flujos másicos de vapor y agua salina (ecuación 1), y balance de masa (concentración) de la sal contenida en el agua de mar (ecuación 2).

$$\sum \dot{M}_{in} - \sum \dot{M}_{out} = 0 \quad (1)$$

$$\sum (\dot{M}S)_{in} - \sum (\dot{M}S)_{out} = 0 \quad (2)$$

De la conservación de masa se tiene el principal equilibrio para cualquier equipo en un sistema MED, independiente del subsistema al que esté acoplado. En términos energéticos, se deben definir algunos indicadores que muestran el desempeño de una planta desalinizadora, como el PR (Performance Ratio) y el GOR (Gain Output Ratio). El PR corresponde a la cantidad de agua desalinizada por cada 2330 kJ empleados, equivalentes al calor de cambio de fase de 1 kg de vapor en condiciones nominales. El GOR corresponde al cociente entre los flujos másicos del agua producida y del vapor empleado, como fuente de calor, para producirla (Darwish et al., 2006). En base a la definición de los conceptos se puede establecer una relación entre estos indicadores, tal como se indica en la ecuación 3.

$$PR = \frac{2330}{h_{f,g,steam}} \cdot \frac{\dot{M}_{p,total}}{\dot{M}_{steam}} = \frac{2330}{h_{f,g,steam}} \cdot GOR \quad (3)$$

Los términos incluidos en los balances de energía de los evaporadores varían según las fuentes de energía, así como también del vapor que circula de un evaporador a otro. Para el primer evaporador de un sistema con alimentación hacia adelante y recibiendo calor de una fuente externa, el balance de energía se presenta en la ecuación 4.

$$\dot{M}_{steam} \cdot (h_{fg,T=T_0}) = \dot{M}_{p,1} \cdot (h_{fg,T=T_1}) + \dot{M}_{feed} \cdot cp_{feed} \cdot (T_1 - t_{feed,1}) \quad (4)$$

La razón entre el agua de alimentación y el agua obtenida como producto se expresa<sup>26</sup> en función de las salinidades del agua de alimentación y de salida del último efecto, mediante la ecuación 5 (Darwish et al., 2006).

$$\frac{\dot{M}_{feed}}{\dot{M}_{p.total}} = \frac{S_n}{S_n - S_{feed}} \quad (5)$$

En primera instancia, se asumen las siguientes condiciones (Darwish et al., 2006):

- Igual cantidad de vapor evaporado en cada efecto.
- Igual diferencia de temperatura entre los efectos.
- Igual incremento de temperatura en los evaporadores y precalentadores de cada efecto.
- Igual calor específico de la salmuera y agua de alimentación.

Parte del vapor equivalente generado en el primer evaporador se puede expresar en función del flujo de alimentación por un coeficiente “y”, que está determinado por la ecuación 6. Esta componente es la que se condensa para precalentar el agua que sale del segundo precalentador y atraviesa el primero, mientras que el resto entra al segundo efecto para entregar su calor latente en el evaporador. Esta componente se expresa por un parámetro “β” en función del destilado total producido, cuyo valor se puede determinar a partir de la ecuación 7.

$$y = \frac{cp_{feed} \cdot (\Delta T)}{(h_{fg,T=T_1})} \quad (6)$$

De la ecuación 1 se tiene que el agua de alimentación del segundo evaporador, que corresponde a la salmuera del primer evaporador, es igual a la suma de salmuera y el vapor producido en este evaporador. Esto, sumado a las simplificaciones mencionadas, permite deducir lo expresado en la ecuación 8.

$$\frac{\beta}{y} = \frac{1}{1 - (1 - y)^N} - \frac{\dot{M}_{feed}}{\dot{M}_{p.total}} \quad (8)$$

Donde, además se tiene:

$$1 - (1 - y)^N \cong \left\{ N \cdot y \cdot \left[ \frac{1 - (N - 1) \cdot y}{2} \right] \right\} ; \quad y \ll 1 \quad (9)$$

De lo anterior, según (Darwish et al., 2006) se puede deducir lo siguiente:

$$GOR = \frac{\dot{M}_{p,total}}{\dot{M}_{steam}} \cong \frac{N}{\left[ 1 + N \cdot \dot{M}_{feed} \cdot c_{p,feed} \cdot \frac{(T_1 - t_{feed,1})}{\dot{M}_{p,total} \cdot h_{f,g,steam}} \right]} \quad (10)$$

De esta ecuación se puede observar que el denominador será siempre ligeramente mayor a 1, por lo cual se concluye que el GOR siempre será menor que el número de efectos  $N$  de cualquier sistema de desalinización MED (Darwish, et al., (2006)).

La variación de temperatura entre cada evaporador o precalentador se determina de la ecuación 11, que requiere como dato la temperatura alcanzada en el último y primer evaporador, además del número de efectos, o en vez de las temperaturas en los evaporadores, se podría considerar la temperatura en los precalentadores.

$$\Delta T = \frac{T_1 - T_n}{N} = \frac{t_1 - t_n}{N} \quad (11)$$

La tasa de recuperación (Recovery Ratio: RR), mostrada en la ecuación 12, refleja la cantidad de agua que se desaliniza con respecto al flujo de alimentación que se suministra al sistema.

$$RR = \frac{\dot{M}_{feed}}{\dot{M}_{p,total}} \quad (12)$$

El área específica (specific Area) corresponde al área de transferencia de calor necesaria para producir un determinado flujo de agua dulce. Esta se determina con la ecuación 13 (Aguilar et al., 2020).

$$sA = \frac{\sum A_{ef} + \sum A_{ph} + A_{cd}}{\dot{M}_{feed}} \quad (13)$$

El trabajo específico requerido (Specific Work Consumption: SWC) determina la energía mecánica requerida por cantidad de agua producida, se determina con la ecuación 14.

$$SWC = \frac{\dot{W}_{MED}}{\dot{M}_{p.total}} \quad (14)$$

La temperatura de evaporación de cada efecto, determinada con la ecuación 15, se expresa en función del BPE (Boiling Point Elevation), que corresponde al aumento de temperatura del punto de ebullición del agua debido a la concentración de sal presente en ella, y del punto de ebullición del agua pura si no existiese ninguna concentración de sal. El BPE está contemplado en la categoría de propiedad termofísica del agua de mar.

$$T_{ev,w,ef,i} = T_{ev,ef,i} - BPE_i \quad (15)$$

Para calcular el área de transferencia de calor en cada evaporador, precalentador o condensador, se acude al método de la diferencia de temperatura media logarítmica mostrado en la ecuación 16.

$$A_{HX} = \frac{\dot{Q}_{in}}{U_{HX} \cdot LMTD} \quad (16)$$

Donde cada coeficiente global de transferencia de calor se deja en función de variables de entrada como el flujo de alimentación y/o la temperatura de cada evaporación, según las correlaciones propuestas por Palenzuela et al. (2014) para los intercambiadores de plantas desalinizadoras. La ecuación 17 permite determinar el coeficiente global de transferencia de calor de los precalentadores, la ecuación 20 de los condensadores, la ecuación 18 del primer evaporador y la ecuación 19 de los evaporadores restantes.

$$U_{ph} = -0,000540399 + 0,836569 \cdot \dot{M}_{feed} \quad (17)$$

$$U_{cd} = 0,9 - 0,0013 \cdot \dot{M}_{feed} - 0,08 \cdot \left( \frac{T_{feed,in} + T_{feed,out}}{2} \right) + 0,11 \cdot T_{ev,ef} \quad (18)$$

$$U_{ef,1} = 9695 - 1,2057 \cdot 10^{-2} \cdot T_{ev,ef,1} - 8,5989 \cdot 10^{-5} \cdot T_{ev,ef,1}^2 \dots + 2,5651 \cdot 10^{-7} \cdot T_{ev,ef,1}^3 \quad (19)$$

$$U_{ef,i} = 1.961,9 + 12,6 \cdot T_{ev,ef,i} - 9,6 \cdot 10^{-2} \cdot T_{ev,ef,i}^2 + 3,16 \cdot 10^{-4} \dots \cdot T_{ev,ef,i}^3; \quad i \geq 2 \quad (20)$$

Para las propiedades termofísicas del agua de mar se tiene una vasta teoría, sin embargo, como se indicó en la metodología, se utilizarán los datos de la biblioteca del software EES obtenida de MIT, (2017) cuyo rango de validez de temperaturas y salinidades se encuentra entre 0°C y 120°C y entre 0 g/kg y 120 g/kg respectivamente. Las figuras 17 y 18 muestran la entalpía específica del agua de mar y el BPE en función de las variables mencionadas anteriormente.

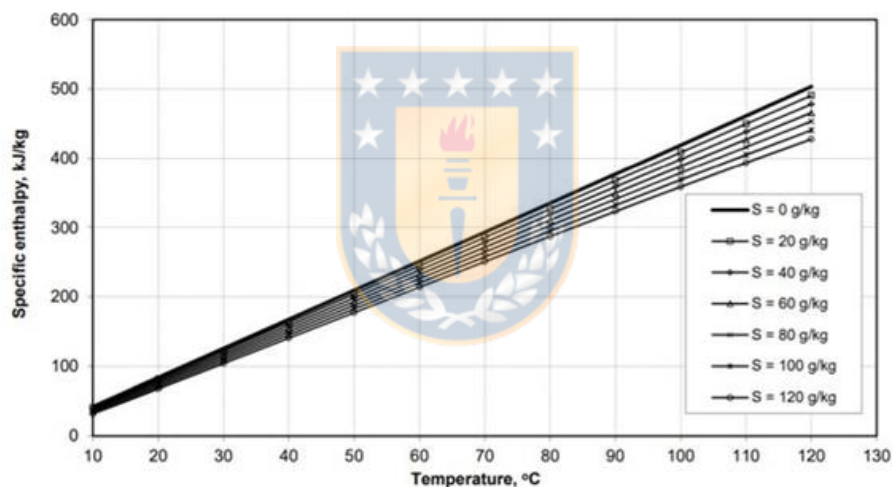


Figura 17: Entalpía específica del agua de mar en función de la salinidad y temperatura. MIT, (2017)



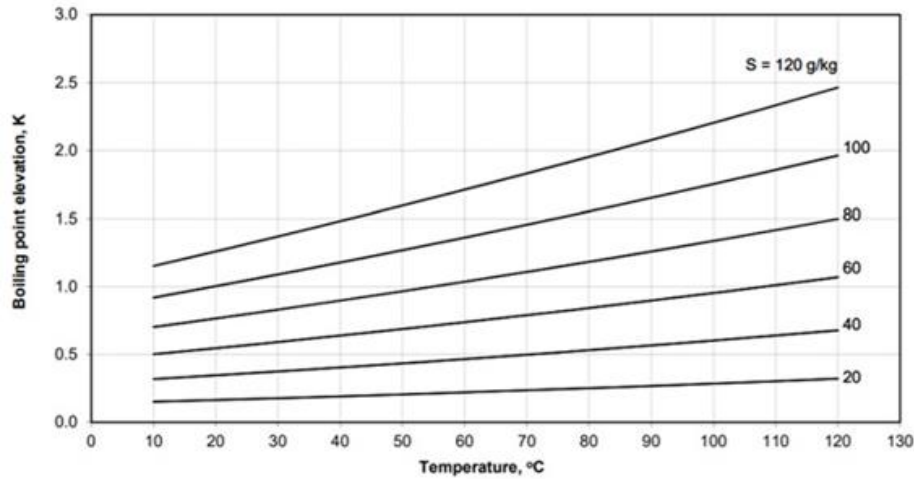


Figura 18: BPE del agua de mar en función de la salinidad y temperatura. MIT, (2017).

### 3.2. Sistemas acoplados a sistema MED.

Los balances de energía propuestos para este escenario están condicionados por la alimentación hacia delante que se consideró inicialmente, lo cual implica que si cambia la alimentación a paralela o se integran nuevos componentes al sistema MED, muchos de los balances propuestos se podrían ver modificados. Utilizando el caso propuesto por Aguilar et al. (2020) y Amidpour et al. (2020) con un ciclo Rankine orgánico y una bomba de calor respectivamente, se plantean los balances del compresor y de la bomba de calor en las ecuaciones 21 y 22 respectivamente. Estos equipos se evalúan usando sus respectivos Eficacias Isentrópicas presentados en las ecuaciones 23 y 24.

$$\dot{W}_{cp} = (\dot{M} \cdot h)_{out,cp} - (\dot{M} \cdot h)_{in,cp} \quad (21)$$

$$\dot{W}_{bba} = (\dot{M} \cdot h)_{out,bba} - (\dot{M} \cdot h)_{in,bba} \quad (22)$$

$$\eta_{s,cp} = \frac{h_{out,cp,s} - h_{in,cp}}{h_{out,cp} - h_{in,cp}} \quad (23)$$

$$\eta_{s,bba} = \frac{h_{out,bba,s} - h_{in,bba}}{h_{out,bba} - h_{in,bba}} \quad (24)$$

### 3.3. Análisis termo-económico.

31

Para realizar un análisis económico convencional, el balance de costos se realiza para un sistema que está operando de manera estacionaria. Este balance se muestra en la ecuación 25.

$$\dot{C}_{P,tot} = \dot{Z}_{MED} + \sum \dot{C}_{Ex} \quad (25)$$

De este balance se puede hacer una distinción entre los componentes del costo total del agua producida. Por un lado, se tiene una componente no exergética que considera los costos de capital, operación y mantenimiento, y por otro lado se considera un costo exergético para el sistema funcionando de manera estacionaria. Estos costos se expresan en función del agua producida, o de la exergía destruida, los cuales se deben adaptar al balance de la ecuación 25 como costos en un periodo determinado. El costo por unidad de tiempo se determina con la ecuación 26.

$$\dot{Z}_{MED} = Z_{MED} \cdot \frac{CRF}{TIME_{operation}} \quad (26)$$

Donde el factor de recuperación del capital está dado por la ecuación 27. El tiempo de operación es el tiempo que la planta estará en funcionamiento durante un año, descontando el tiempo de mantenimiento y detención de esta.

$$CRF = \frac{i \cdot (i+1)^n}{(i+1)^n - 1} \quad (27)$$

Por otro lado, se considera la teoría propuesta por Piacentino (2015) para el cálculo de costos de inversión, operación y mantenimiento de una planta MED, según las ecuaciones 28, 29 y 30.

$$Z_{MED} = Z_{MED,1} + Z_{MED,2} \quad (28)$$

$$Z_{MED,1} = c \cdot A_T^\gamma \quad (29)$$

Donde el coeficiente  $c$  es igual a 0,95 y  $\gamma$  a 300 €/m<sup>2</sup>. Los resultados obtenidos están en euros.

$$Z_{MED,2} = \dot{M}_{D,día} \cdot 800 \quad (30)$$

Para llevar a cabo los cálculos de costos exergéticos se deben incluir en el análisis termodinámico las exergías asociadas a cada flujo del sistema. Para cualquier flujo, la exergía física corresponde a la máxima potencia mecánica alcanzable en un sistema abierto cuando un sistema sólo intercambia calor con el medio ambiente (Piacentino, 2015). La ecuación 31 permite calcular determinar esta exergía física.

$$\dot{E}x_{ph,i} = \dot{M}_i \cdot (h_i - h_0 - T_0 \cdot (s_i - s_0)) \quad (31)$$

Para determinar la exergía del agua en los diferentes evaporadores, sus rendimientos exergéticos y del sistema global, se realiza un balance que considera los dos fluidos que intercambian calor, el vapor del efecto anterior que entrega su calor latente y el agua de mar que se evapora. La figura 19 muestra gráficamente los 4 puntos (1A, 1B, 2A y 2B) de los cuales se obtendrán las exergías requeridas, que corresponden a puntos de saturación antes y después del intercambio de calor.

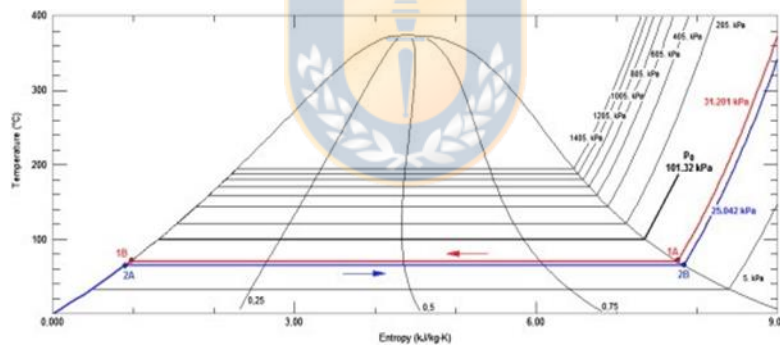


Figura 19: Diagrama T-s de los fluidos que intercambian calor en un evaporador.  
Elaboración propia.

A partir de las exergías obtenidas se determina un costo exergético para cada evaporador, según la ecuación 32.

$$\dot{C}_{Ex,i} = C_i \cdot \dot{E}x_i \quad (32)$$

Las ecuaciones 33 y 34 permiten determinar el rendimiento exergético de un evaporador y del sistema desalinizador, compuesto por un sistema de reinyección de vapor mediante un compresor.

$$\eta_{\dot{E}x, ev} = \frac{\dot{E}x_{2B} - \dot{E}x_{2A}}{\dot{E}x_{1A} - \dot{E}x_{1B}} \quad (33)$$

$$\eta_{\dot{E}x, tot} = \frac{\dot{E}x_p}{\dot{E}x_{feed} + \dot{E}x_{fuel}} = \frac{\dot{E}x_p}{\dot{E}x_{feed} + \frac{\dot{W}_{cp}}{\eta_{conv}}} \quad (34)$$

Además, se puede establecer un costo unitario del agua a partir de la ecuación 35.

$$UCWD = \frac{\dot{Z}_{MED} + \dot{W}_{cp} \cdot C_{elec, cp}}{\dot{M}_D} \quad (35)$$

Finalmente, se tiene que además de calcular la exergía de flujo en cada evaporador, se puede realizar un balance en cada uno de estos para determinar la cantidad de exergía destruida, la cual también se puede calcular a partir de la segunda ley de la termodinámica, determinando en una primera instancia la entropía generada, que posteriormente se multiplica por la temperatura de referencia como lo muestra la ecuación 36.

$$\dot{E}_{Dest, ev, i} = T_0 \cdot \dot{S}_{g, i} \quad (36)$$

### 3.4. Óptimo de Pareto.

Para determinar las fronteras de Pareto, el algoritmo NSGA-2 de Matlab sólo minimiza funciones objetivo, por lo cual, si se quiere maximizar una de estas, debe ingresarse como función negativa. La ecuación 37 muestra un ejemplo de una función donde se busca minimizar las funciones  $g_1$  y  $g_2$ , y maximizar la función  $g_3$ .

$$OP = \min\{(g_1), (g_2), (-g_3)\} \quad (37)$$

## Caso de estudio y modelación

### 4.1. Caso de estudio.

Se utilizarán las propuestas de Darwish et al. (2006), junto con la de Aguilar et al. (2020) y la de Amidpour et al. (2020), las que se modificarán considerando un flujo de calor externo de 35 MW como fuente de energía (Darwish et al., 2006). Los resultados de los modelos desarrollados se compararán con los de la literatura para validar la metodología de cálculo. Además, estos no requieren un dimensionamiento previo, puesto que, con las variables de entrada como el flujo de calor suministrado, se obtendrá no sólo la cantidad de agua producida y las propiedades de la salmuera, sino que también las dimensiones de los intercambiadores de calor requeridos en función del número de efectos que tendrá cada sistema. Por esta razón el número de efectos será variable, para verificar la influencia de estos en el desempeño de la planta. Se evaluarán 4 configuraciones, 2 de ellas recibirán un flujo de calor externo de 35 MW, mientras que las otras 2 recibirán sólo una fracción. El flujo de calor faltante se obtendrá mediante la reinyección de vapor del último efecto hacia el primero. La magnitud del flujo de vapor reinyectado va a variar según el flujo de vapor obtenido en el último efecto, lo que hará variar en consecuencia el flujo de calor requerido de la fuente externa. La magnitud del flujo de calor de 35 MW se escogió del estudio de Darwish et al. (2006), con el fin de obtener un punto de comparación para los resultados que se obtendrán. En este análisis se buscará:

- Minimizar el consumo eléctrico.
- Minimizar el consumo de energía térmica externa.
- Minimizar el área de transferencia de calor específica.
- Maximizar la producción de agua.
- Minimizar los costos.

### 4.2. Condiciones de simulación.

Los sistemas que se evaluarán son:

1. **Configuración 1:** Planta MED con alimentación hacia adelante y reinyección de vapor con un compresor (8 a 12 evaporadores en uso).
2. **Configuración 2:** Planta MED con alimentación paralela cruzada y reinyección de vapor con un compresor (8 a 12 evaporadores en uso).

Inicialmente se querían estudiar las mismas 2 configuraciones mencionadas, pero sin la

reinyección de vapor. Esto no será necesario, ya que según Aguilar et al. (2020), Amidpour, et al., (2020), Elsayed et al., (2019) y Darwish et al., (2006), la reinyección de vapor se consolida como una mejora en el consumo de energía y producción de agua con respecto a las demás configuraciones existentes. Las configuraciones se muestran en las figuras 20 y 21, donde las “cajas negras” corresponden a los evaporadores (y precalentadores los recuadros pequeños), mientras que las “cajas azules” son los acumuladores de agua desalinizada.

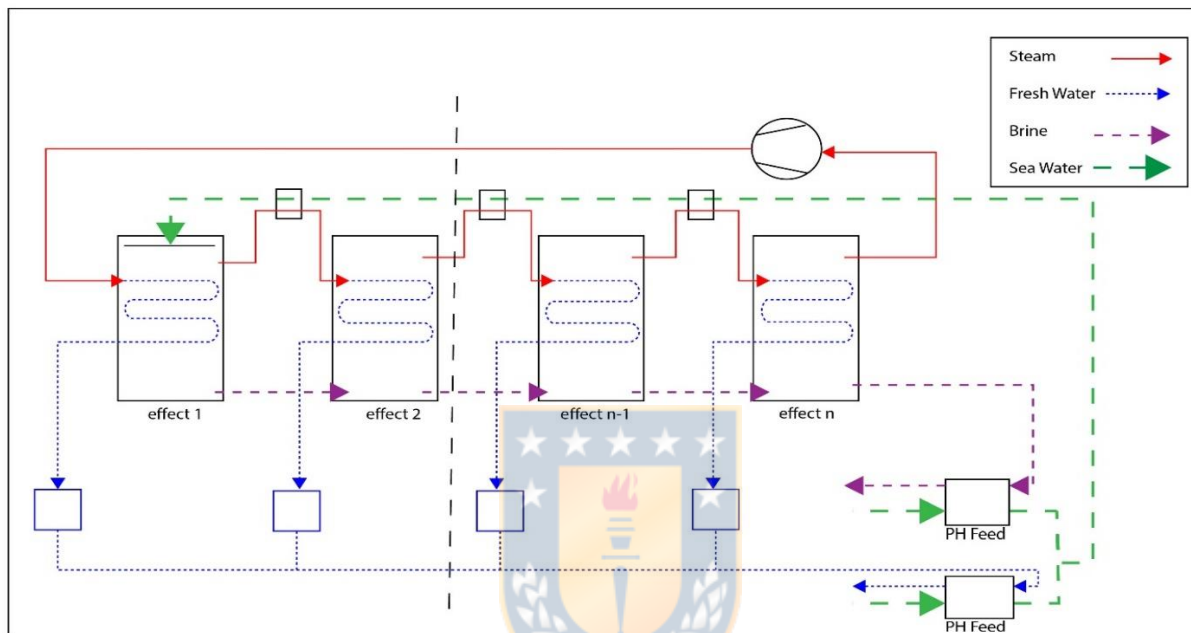


Figura 20: Configuración 1. Elaboración Propia.

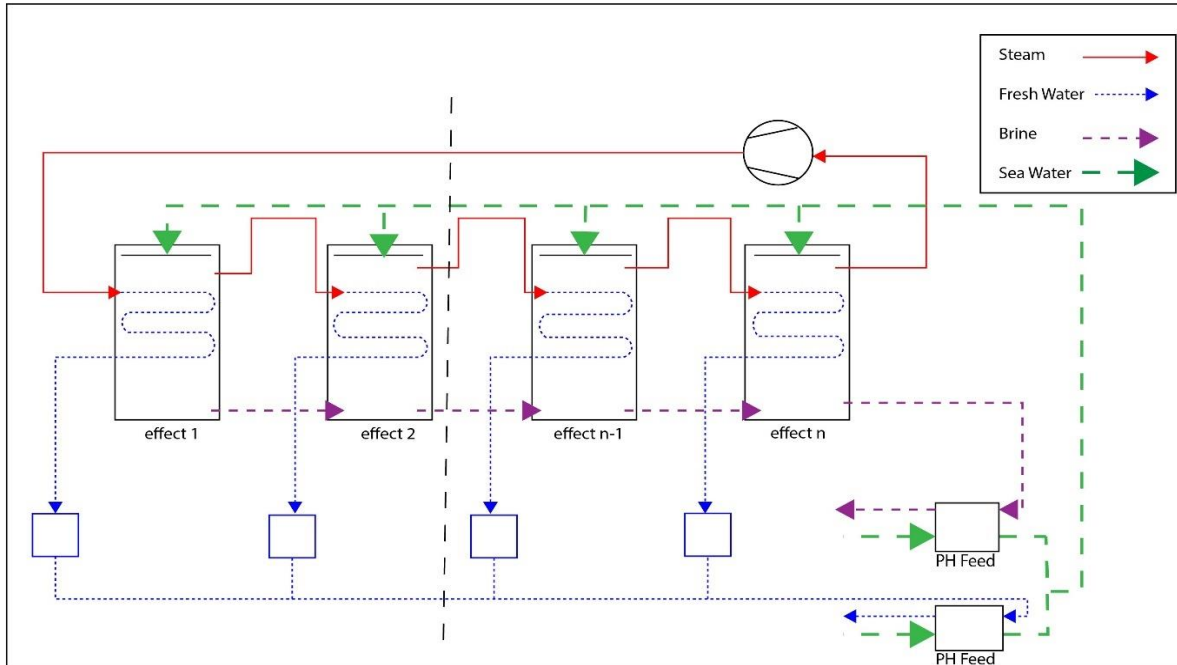


Figura 21: Configuración 2. Elaboración Propia.

Según las figuras mostradas, hay elementos que son propios de cada alimentación, como los precalentadores intermedios que sólo corresponden a la alimentación hacia adelante y los aspersores en todos los efectos corresponden sólo a la configuración paralela cruzada.

Pese a considerar los sistemas de Aguilar et al. (2020), no se llevará a cabo la simulación del mismo modelo con exactitud, ya que se omitirá en este caso el ciclo de Rankine orgánico para enfocarse sólo en el sistema MED.

En las simulaciones se consideran los siguientes supuestos:

- Condiciones estacionarias, despreciando cambios en la energía cinética y potencial.
- Componentes de los sistemas se utilizan como volúmenes de control: parámetros concentrados.
- Se ignoran caídas de presión en componentes y tuberías.
- Se desprecian las pérdidas al ambiente.
- Salinidad del agua de alimentación de 36 g/kg.

Para determinar el comportamiento de las 4 configuraciones propuestas se hace variar en una primera instancia el flujo másico de alimentación, entre 180 y 300 kg/s, para ver cómo afecta a los principales indicadores, considerando un flujo de calor suministrado de 35 MW.

Posteriormente, se hará variar el número de efectos y el flujo de calor suministrado a<sup>37</sup> la planta, entre 20 y 35 MW. Finalmente se llevará a cabo un análisis interno de la planta, es decir, mostrando lo que produce, las propiedades del agua de mar y área de transferencia de calor de cada efecto.

Los resultados de las simulaciones se contrastarán con la normativa señalada en 4.2.1, que restringe la salinidad de los desechos a 75 g/kg. En caso de que se obtengan valores mayores se descartarán los resultados obtenidos.

### 4.3. Modelado de los componentes.

#### 4.3.1 Evaporadores.

La figura 22 muestra de manera simplificada las entradas, parámetros y salidas del modelo del primer evaporador.

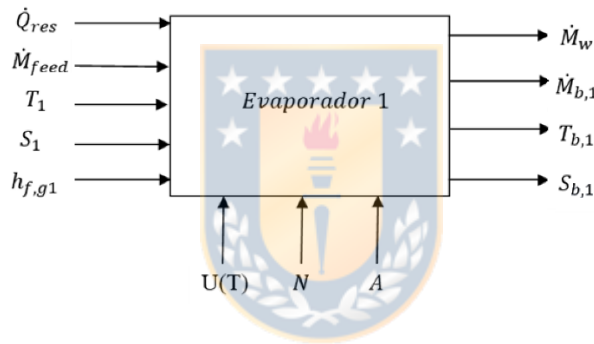


Figura 22: Modelo de primer evaporador. Elaboración Propia.

El balance de energía llevado a cabo en este modelo para la alimentación hacia adelante se muestra en la ecuación 38, mientras que para la alimentación paralela se muestra en la ecuación 39.

$$\begin{aligned} & \dot{M}_{steam,n} \cdot (h_{steam,n,T=T_{steam}}) + \dot{Q}_{ext} + \dot{M}_{feed,1} \cdot (h_{feed,T=T_0}) - \dot{M}_{feed} \\ & \quad \cdot c_{SW,T=T_0} \cdot (T_1 - t_1) \dots \end{aligned} \quad (38)$$

$$\dots = \dot{M}_{p,1} \cdot (h_{p,T=T_1}) + \dot{M}_{B,1} \cdot (h_{B,T=T_1}) + \dot{M}_{steam,1} \cdot (h_{steam,1,T=T_1})$$

$$\begin{aligned} & \dot{M}_{steam,n} \cdot (h_{steam,n,T=T_{steam}}) + \dot{Q}_{ext} + \dot{M}_{feed} \cdot (h_{feed,T=T_0}) \dots \end{aligned} \quad (39)$$

$$\dots = \dot{M}_{p,1} \cdot (h_{p,T=T_1}) + \dot{M}_{B,1} \cdot (h_{B,T=T_1}) + \dot{M}_{steam,1} \cdot (h_{steam,1,T=T_1})$$



Se puede notar la clara diferencia en la porción de energía adicional que consume un<sup>38</sup> efecto en la alimentación hacia adelante. Los principales flujos de energía significativos que ingresan a los evaporadores son el flujo de calor externo y el flujo de vapor reinyectado, los cuales van a variar según la configuración que se esté simulando. Para las configuraciones 1 y 3 no se tiene un flujo de vapor reinyectado.

Para los demás evaporadores se consideran las entradas, parámetros y salidas mostrados en la figura 23, mientras que los balances de energía para los evaporadores en la alimentación hacia adelante y paralela cruzada se muestran en las ecuaciones 40 y 41 respectivamente.

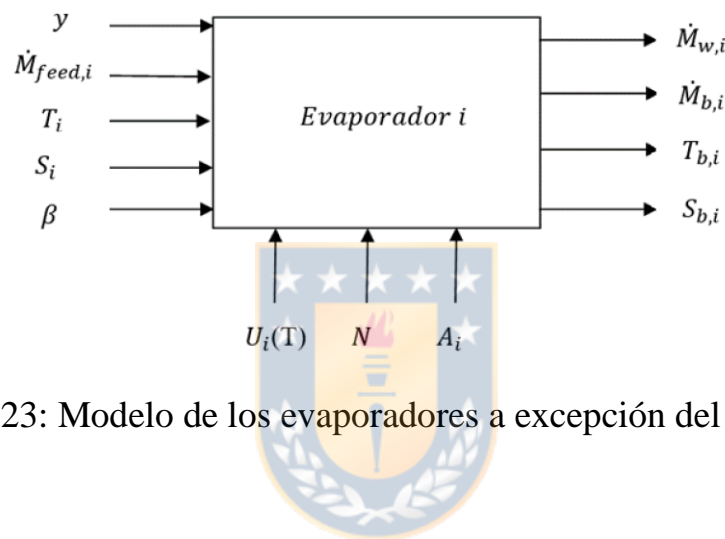


Figura 23: Modelo de los evaporadores a excepción del primero.

$$\begin{aligned} & \dot{M}_{steam,i-1} \cdot (h_{steam,i-1,T=T_{i-1}}) + \dot{M}_{feed,i} \cdot (h_{feed,T=T_0}) - \dot{M}_{feed} \\ & \quad \cdot c_{SW,T=T_0} \cdot (T_i - t_i) \dots \end{aligned} \quad (40)$$

$$\dots = \dot{M}_{p,i} \cdot (h_{p,T=T_i}) + \dot{M}_{B,i} \cdot (h_{B,T=T_i}) + \dot{M}_{steam,i} \cdot (h_{steam,i,T=T_i})$$

$$\begin{aligned} & \dot{M}_{steam,i-1} \cdot (h_{steam,i-1,T=T_{i-1}}) + \dot{M}_{feed,i} \cdot (h_{feed,T=T_0}) + \dot{M}_{B,i-1} \\ & \quad \cdot (h_{B,T=T_{i-1}}) \dots \end{aligned} \quad (41)$$

$$\dots = \dot{M}_{p,i} \cdot (h_{p,T=T_i}) + \dot{M}_{B,i} \cdot (h_{p,T=T_i}) + \dot{M}_{steam,i} \cdot (h_{steam,i,T=T_i})$$

Al igual que para el primer evaporador, se tiene una fracción de energía adicional que consume la alimentación hacia adelante al ir precalentando gradualmente el agua de alimentación. Además, se tiene que los flujos másicos de agua salada que ingresan a los evaporadores provienen de dos fuentes: la alimentación directa del mar y la salmuera proveniente del evaporador anterior.

Este modelo, propuesto por Darwish et al. (2006), es aplicable a las configuraciones con alimentación hacia adelante, ya que también va considerando una pérdida gradual de calor latente debido al precalentamiento del agua de alimentación entre cada evaporador. Lo particular de este modelo es que considera un flujo de calor latente igual en todos los efectos, tanto para precalentar el agua de alimentación como para evaporar el agua en el efecto siguiente. Este nuevo balance cuantifica las fracciones de calor destinadas a cada función a través de los parámetros “ $\beta$ ” e “ $y$ ”. Para mantener una misma cantidad de energía entregada en cada efecto, hay una fracción de agua se evapora, tras la pequeña expansión que sufre en cada efecto, y posteriormente entrega su calor latente para compensar parte del calor requerido en precalentar el agua de alimentación.

Las ecuaciones 42 y 43 plantean los balances de energía y masa en el evaporador 1 y evaporador  $i$  respectivamente.

$$\dot{M}_{steam} \cdot (h_{fg,T=T_0}) = \dot{M}_{p,1} \cdot (h_{fg,T=T_1}) + \dot{M}_{feed} \cdot c_{feed} \cdot (T_1 - t_{feed,1}) \quad (42)$$

$$\dot{M}_{p,1} = y \cdot \dot{M}_{feed,1} + \beta \cdot \dot{M}_{p,total} = \dot{M}_{p,i} \quad (43)$$

### 4.3.3. Precalentadores.

Estos equipos están solamente presentes en las configuraciones con alimentación hacia adelante. El modelo requiere el flujo de agua de alimentación, y una de las temperaturas, ya sea de entrada o salida. Esto, sumado al número de efectos, entrega la diferencia de temperatura entre cada efecto, lo cual también sirve como variable de entrada en la modelación para ir obteniendo las temperaturas requeridas. Las salidas de este modelo son las temperaturas incógnitas y las fracciones de vapor que precalientan el agua en cada efecto y que se dirigen al efecto siguiente. La figura 24 muestra las entradas, parámetros y salidas de este modelo, y las ecuaciones 44 y 45 las expresiones para determinar los flujos de calor transferidos.

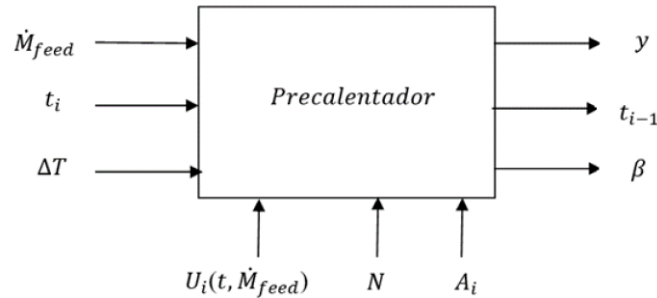


Figura 24: Modelo simplificado de los precalentadores. Elaboración Propia.

$$\dot{Q}_{in,i} = A_{ph,i} \cdot U_{ph,i} \cdot LMTD_i \quad (44)$$

$$LMTD_i = \frac{\Delta T_{eff}}{\ln \left( \frac{T_{steam,i} - t_{i+1}}{T_{steam,i} - t_i} \right)} \quad (45)$$

#### 4.4. Modelado de los sistemas.

En la modelación del sistema se utiliza una aproximación modular, donde cada submodelo representa un módulo que se puede conectar con otro módulo para formar el modelo del sistema. A continuación, se indican las conexiones que se consideran en este estudio.

Para la alimentación hacia adelante, el flujo de alimentación de cada efecto es equivalente a la salmuera del efecto anterior, como se indica en la ecuación 47, a excepción del primero al cual le llega toda el agua proveniente del mar (ecuación 46). Para la alimentación paralela cruzada, el flujo de alimentación de cada efecto es la suma del agua pulverizada que se deja caer en cada evaporador, la cual es la misma para cada efecto, más la salmuera del efecto anterior, lo cual se muestra en la ecuación 48.

$$\dot{M}_{feed,1} = \dot{M}_{feed} \quad (46)$$

$$\dot{M}_{feed,i} = \dot{M}_{B,i-1} \quad (47)$$

$$\dot{M}_{feed,i} = \dot{M}_{B,i-1} + \frac{\dot{M}_{feed}}{n} \quad (48)$$

La temperatura de la salmuera de cada efecto es la temperatura de alimentación del efecto siguiente, a excepción del primer efecto, donde la temperatura es equivalente al

TBT. Esto es transversal para ambas alimentaciones y se muestra en las ecuaciones 49<sup>1</sup> y 50.

$$T_{feed,1} = TBT \quad (49)$$

$$T_{feed,i} = T_{B,i-1} \quad (50)$$

La salinidad de la salmuera de cada efecto es la salinidad del agua de alimentación del efecto siguiente (ecuación 52), a excepción del primer efecto donde la salinidad es la del agua de mar, como lo muestra la ecuación 51. Esto es sólo en el caso de la alimentación hacia adelante, mientras que en la alimentación paralela cruzada se respeta el balance de masas y salinidades establecido en las ecuaciones 1 y 2

$$S_{feed,1} = S_{SW} \quad (51)$$

$$S_{feed,i} = S_{B,i-1} \quad (52)$$

El agua destilada obtenida en cada efecto corresponde al vapor generado en el efecto anterior, como se muestra en la ecuación 53. Esto es transversal para las 2 plantas a simular.

$$\dot{M}_{D,i} = \dot{M}_{steam,i-1} \quad (53)$$

Para la alimentación hacia adelante, la diferencia de temperaturas entre dos evaporadores consecutivos es la misma que para dos precalentadores consecutivos (ecuación 54).

$$T_i - T_{i+1} = t_i - t_{i+1} \quad (54)$$

El flujo de calor suministrado a la planta funcionando a plena carga será de 35 MW, el cual debe ser cubierto por el flujo de calor externo y el flujo de vapor reinyectado por el compresor. Independiente de la configuración, se establece esta condición para que se tengan distintas proporciones de los aportes individuales de cada fuente de energía, a medida que va cambiando el modelo o las condiciones de operación. La ecuación 47 muestra lo descrito.

$$\dot{M}_{steam,n} \cdot (h_{steam,n,T=T_{steam}}) + \dot{Q}_{ext} = 35 [MW] \quad (55) \quad 42$$

Con todas estas conexiones y consideraciones, sumado a las condiciones y ecuaciones establecidas anteriormente, se puede llevar a cabo el modelado de ambos sistemas. En resumen, se requieren las siguientes variables de entrada:

- Flujo másico de agua de alimentación.
- Flujo de calor disponible al primer evaporador.
- Salinidad de alimentación.
- Temperatura del agua de alimentación.
- Número de efectos.
- Temperatura máxima de la salmuera (TBT).
- Temperatura de salida del destilado o salmuera del precalentador de alimentación.



Con las entradas anteriores y el modelo de cálculo se determinarán los siguientes resultados:

- GOR.
- SWC.
- PR.
- Área de cada intercambiador de calor.
- sA.
- Flujo másico de agua producida.
- Flujo de calor requerido.
- Energía consumida por el compresor.
- Diferencia de temperatura de cada efecto.
- RR.

Las figuras 25 y 26 muestran el modelo a implementar para los sistemas con alimentación hacia adelante y paralela cruzada respectivamente.

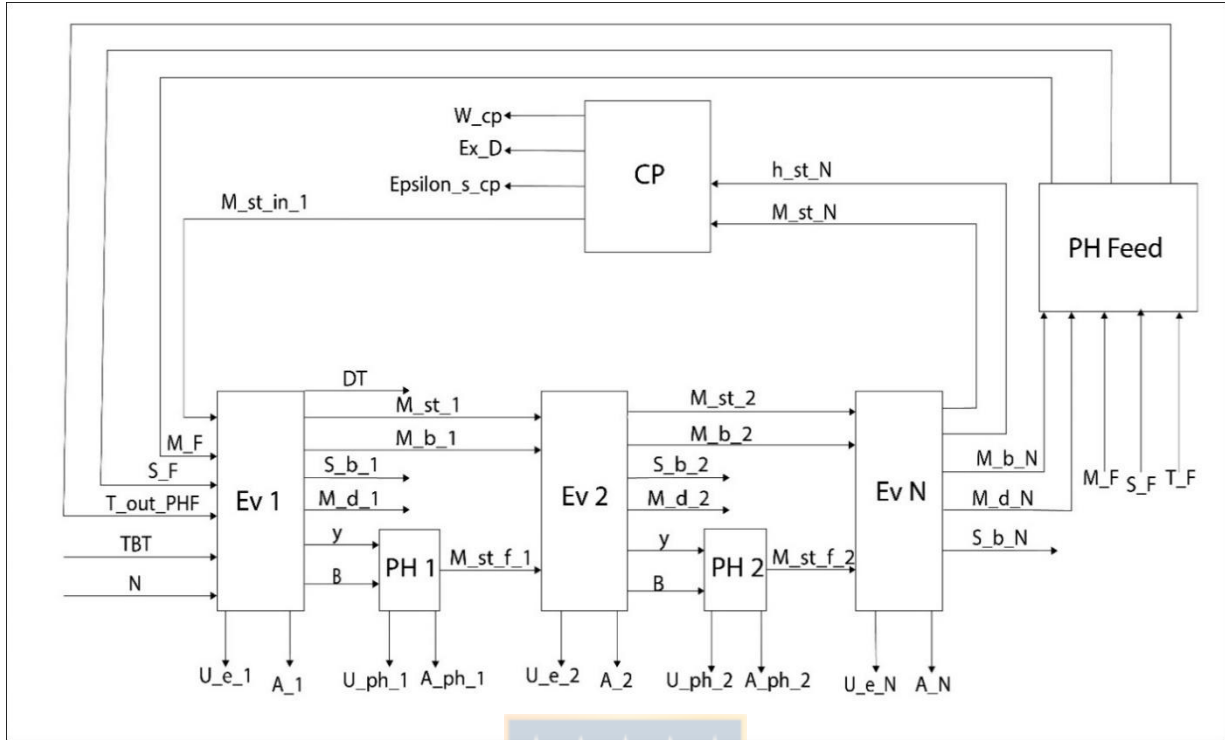


Figura 25: Modelo de sistema MED MVC con alimentación hacia adelante. Elaboración Propia.

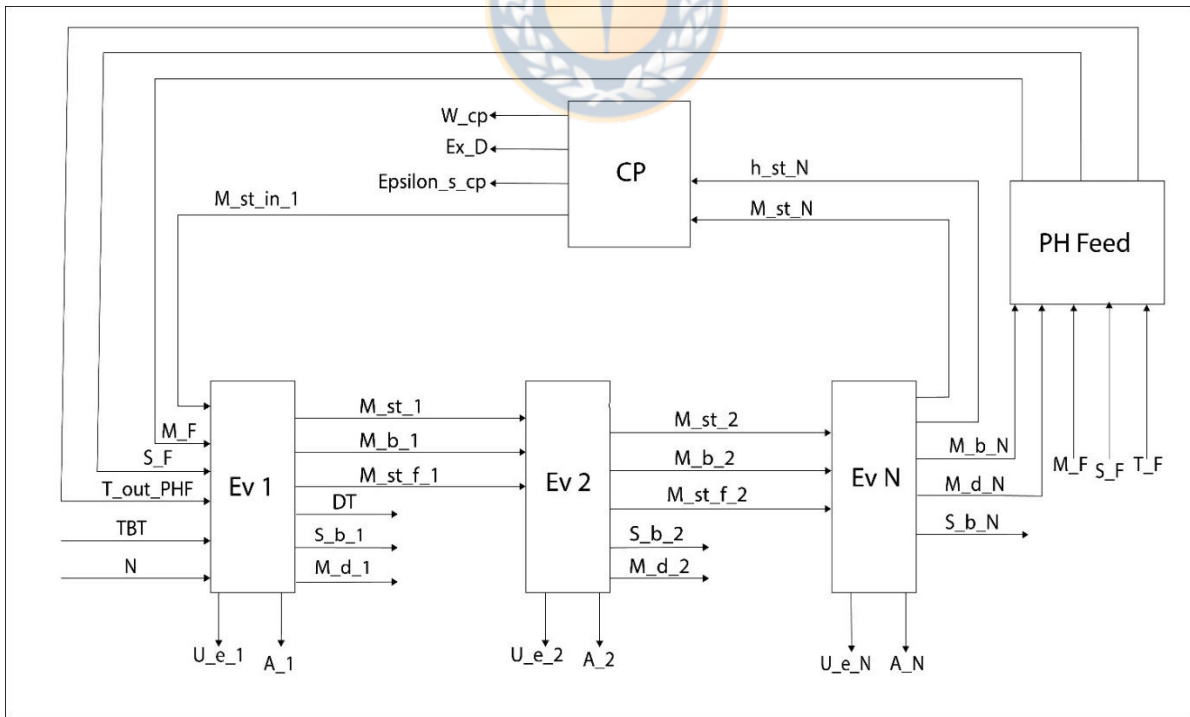


Figura 26: Modelo sistema MED MVC con alimentación paralela cruzada. Elaboración Propia.

## 4.5. Validación de modelos.

La validación de la metodología de modelación se lleva a cabo mediante la recreación de los modelos consultados de la literatura. Para la configuración 1 se utilizará el modelo propuesto por Darwish et al. (2006), por la similitud en el tipo de alimentación, mientras que para la configuración 2 se utilizará el modelo propuesto por Amidpour et al. (2020), por la misma razón. Una vez validados los modelos con los resultados de la literatura, se procederá a adaptarlos a las configuraciones mostradas en las figuras 20 y 21.

### 4.5.1. Validación de modelo con alimentación en serie.

Para llevar a cabo esta validación, se consulta el modelo de Darwish et al. (2006), el cual contempla un sistema MED de 12 efectos, como se muestra en la figura 6. Este sistema considera un flujo de agua producida de 500 ton/h. La tabla 7 presenta otras consideraciones utilizadas por este autor.



Tabla 7: Variables de entrada y parámetros del modelo de Darwish et al. (2006) usados para la validación de la metodología usada para la configuración 1.

Salinidad de alimentación	46 g/kg
Salinidad de salmuera	72 g/kg
Coefficiente global transferencia de calor evaporadores	3 kW/m <sup>2</sup> K
Coefficiente global transferencia de calor precalentadores	3 kW/m <sup>2</sup> K
BPE	1°C
Calor específico agua	4 kJ/kgK

Calor latente del agua	2333 kJ/kg
TBT	65°C
Temperatura en el primer precalentador	35°C
Temperatura en el último evaporador	38°C

A partir de estos valores se determinan los resultados presentados en la tabla 8, los que se comparan con los resultados de Darwish et al. (2006).

Se puede observar que en los indicadores generales el error es bastante pequeño, no superando un 1,1%, lo cual se considera aceptable en este estudio. Se debe tener en cuenta que las dimensiones de los evaporadores y precalentadores son variables a determinar por nuestro modelo, pero en el modelo de Darwish et al. (2006) son fijas. De los resultados obtenidos, se puede concluir de manera preliminar que los balances realizados en esta validación se hicieron de manera correcta y que los modelos se pueden adaptar a las configuraciones consideradas en este estudio.

Tabla 8: Valor de validación para la configuración 1.

Indicador	Valor de validación	Valor literatura	Error
Área específica [m <sup>2</sup> /(kg/s)]	529,3	523,6	1,08 %
GOR [-]	9,91	10,05	-1,04 %
Flujo de alimentación [kg/s]	384,6	385	-0,1 %
Área de evaporador 1 [m <sup>2</sup> ]	7413	7396,8	0,22 %
Área precalentadores [m <sup>2</sup> ]	De 470 a 475,1	Fija de 474,3	De -0,84 % a 0,21 %
Área evaporadores [m <sup>2</sup> ]	De 5506 a 5554	Fija de 5469,6	De 0,67 % a 1,55 %

#### 4.5.2. Validación de modelo con alimentación paralela.

Esta validación se realiza con el modelo propuesto por Amidpour et al. (2020), el que usa un sistema MED con alimentación paralela cruzada de 7 efectos. Se considerará el caso en que se acopla a un compresor de vapor que reinyecta el vapor generado en el último efecto. Los valores impuestos para llevar a cabo la validación se muestran en



Tabla 9: Valores relevantes en modelo de validación de la configuración 2 (Amidpour et al., 2020).

Salinidad de alimentación	39 g/kg
Salinidad de salmuera	65 g/kg
TBT	71 °C
Temperatura de alimentación a los evaporadores	48°C
Eficacia isentrópica del compresor	0,9
Temperatura del agua de mar	18°C

Una característica de los modelos planteados por Amidpour et al. (2020) es que en vez de usar un flujo de calor como entrada del modelo, se considera un consumo de energía eléctrica del compresor que reinyecta el vapor, a partir del cual se determina la cantidad de vapor que se reinyecta al primer evaporador para que se cumplan los balances de masa, energía y salinidad en cada componente. Los resultados principales de nuestro modelo y del modelo de Amidpour et al. (2020) se muestran en la tabla 10.

Tabla 10: Valores de validación para la configuración 2.

Indicador	Valor de validación	Valor literatura	Error
Diferencia de temperatura entre efectos [°C]	3,286	3,3	0,42 %
SWC [KWh/m <sup>3</sup> ]	8,2	8,29	-1,09 %
GOR [-]	6,77	6,7	1,04 %
RR [-]	0,4541	0,4542	-0,01 %
Agua producida [m <sup>3</sup> /día]	5385	5344	0,77 %

Los indicadores mostrados presentan errores aceptables, con un máximo cercano al 1,1 %, de manera que los modelos propuestos son aceptables. Esta investigación considera la reinyección de vapor para ambas alimentaciones como se ha mostrado en las figuras 20 y 21.

## CAPÍTULO 5

### Funciones objetivo

#### 5.1. Funciones objetivo y variables de decisión.

En primer lugar, se simulan las configuraciones descritas para determinar los indicadores del sistema MED con diferentes números de efectos, flujos de alimentación y TBT. La Tabla 11 muestra el valor a considerar en las variables de decisión para los diferentes sistemas a considerar.

Tabla 11: Variables de decisión

Sistema	Variables de decisión	Límite inferior	Límite superior
MED FF	Efectos	8	12
	TBT [°C]	64	72
	$\dot{M}_{feed}$ [kg/s]	380	600
MED PCF	Efectos	8	12
	TBT [°C]	64	72
	$\dot{M}_{feed}$ [kg/s]	170	390

Los puntos calculados se ubicarán en un plano tridimensional en base a dos de las variables de decisión mencionadas y se realizarán regresiones lineales y no lineales según sea necesario, utilizando el software Matlab. La Figura 27 muestra un ejemplo de un indicador de la planta en función de la tasa de agua de alimentación y el TBT.

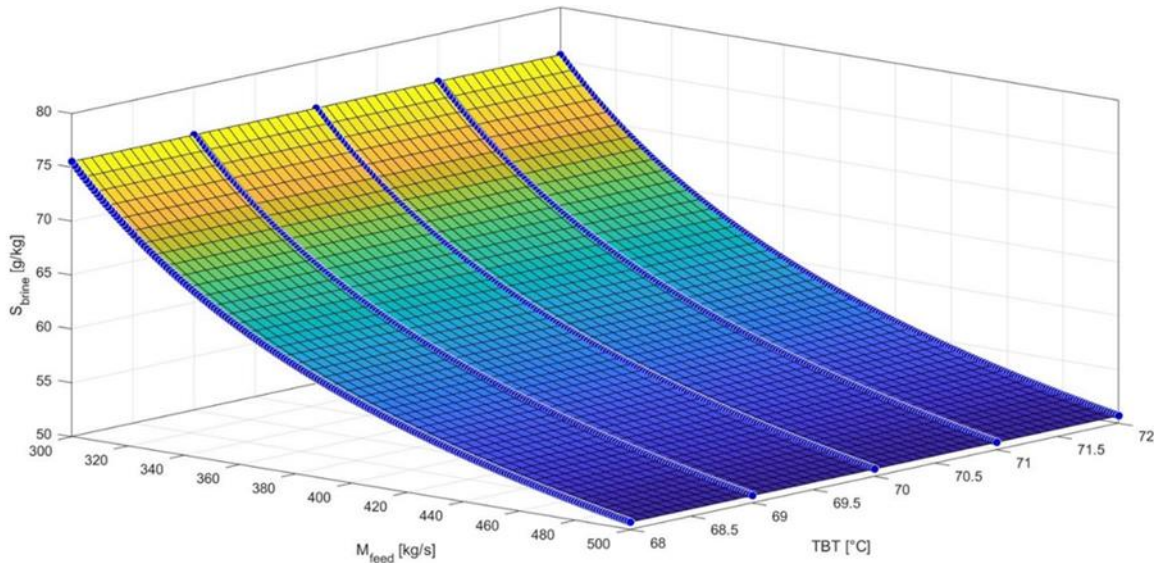


Figura 27: Salinidad de la descarga en función del flujo de alimentación y de la TBT. Elaboración propia.

Estas regresiones permitirán determinar las funciones que caracterizan el comportamiento de los sistemas en el rango de estudio de cada variable independiente, las que se someterán a optimización con el algoritmo genético NSGA-II. Matlab minimizará todo el conjunto de funciones obtenidas.

Se compararán diferentes tipos de suministro de agua de alimentación al igual que su flujo másico y diferentes números de efectos para determinar cuál es el caso que proporciona los mejores indicadores. Las ecuaciones 56 a 61 muestran las funciones objetivos en función del flujo de agua de alimentación (variable “x”) y de su temperatura máxima alcanzada en el primer evaporador (variable “y”). Este procedimiento se realiza para los distintos números de efectos simulados, de modo que los coeficientes numéricos que acompañan a las variables cambian según el tipo de alimentación y la cantidad de evaporadores operando.

$$sA = a + b \cdot x + c \cdot y + d \cdot x \cdot y + e \cdot y^2 \quad (56)$$

$$\dot{W}_{cp} = a + b \cdot x + c \cdot y \quad (57)$$

$$UCDW = a + b \cdot x + c \cdot y + d \cdot x \cdot y + e \cdot x^2 + f \cdot y^2 \quad (58)$$

$$\dot{M}_p = a + b \cdot x + c \cdot y \quad (59)$$

$$Ex_D = a + b \cdot x + c \cdot y + d \cdot x \cdot y + e \cdot x^2 + f \cdot y^2 \quad (60)$$

$$S_B = a + b \cdot x + c \cdot y + d \cdot x \cdot y + e \cdot x^2 \quad (61)$$



**Resultados y discusión**

Los resultados se muestran de una forma que sea fácil de interpretar, por lo que solo se procede a agrupar las funciones objetivo a optimizar en grupos de un máximo de 3. Para cada simulación hay 2 grupos de funciones objetivo a optimizar. El primer grupo considera el flujo másico de agua producida, la exergía destruida en el sistema y la salinidad en la descarga de las aguas residuales. El segundo grupo considera el área específica de transferencia de calor, el consumo de energía del compresor y el costo unitario del agua producida. Las figuras 28 y 29 muestran las funciones objetivo optimizadas para un sistema MED con alimentación hacia adelante y 9 efectos, mientras que las figuras 30 y 31 muestran las mismas funciones optimizadas para un sistema MED con alimentación paralela cruzada y 12 efectos. Se muestran esas configuraciones específicas debido a que son con las que se obtuvieron mejores resultados para cada tipo de alimentación.

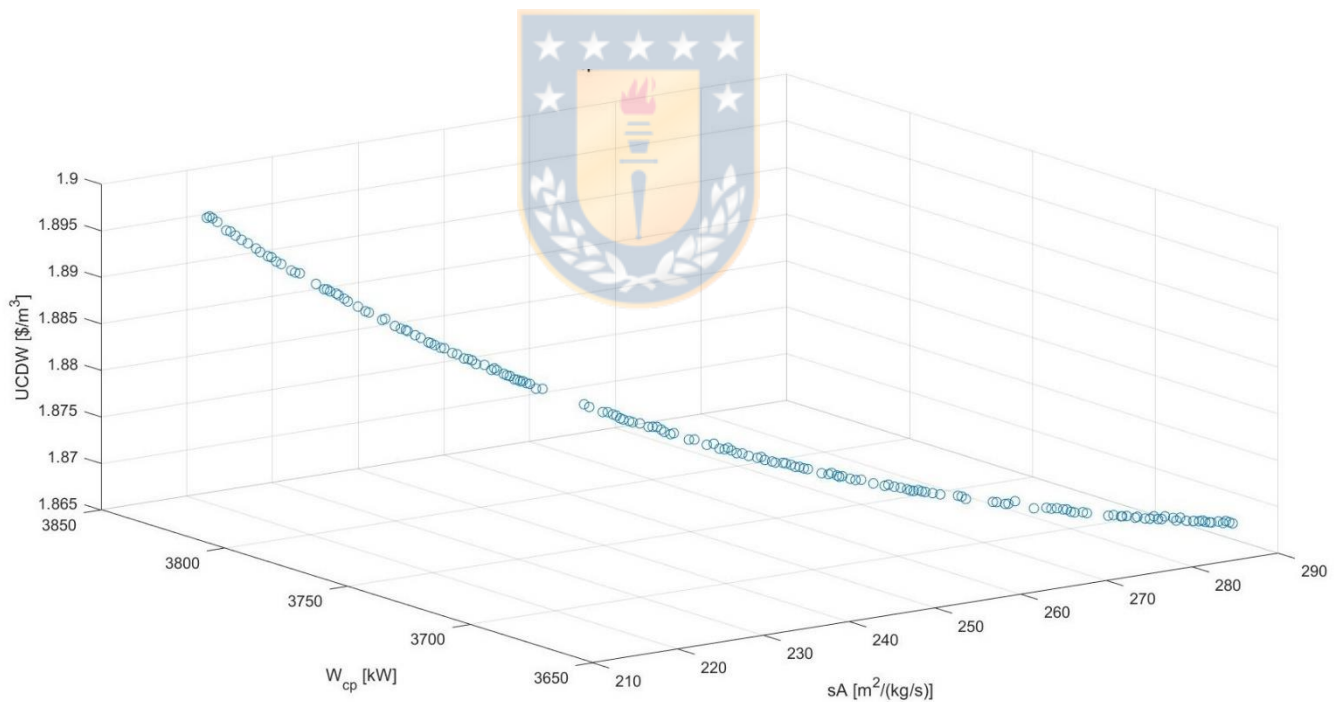


Figura 28: Optimización del área específica, consumo energético del compresor y UCDW para un sistema MED-MVC con alimentación hacia adelante y 9 efectos. Elaboración Propia.

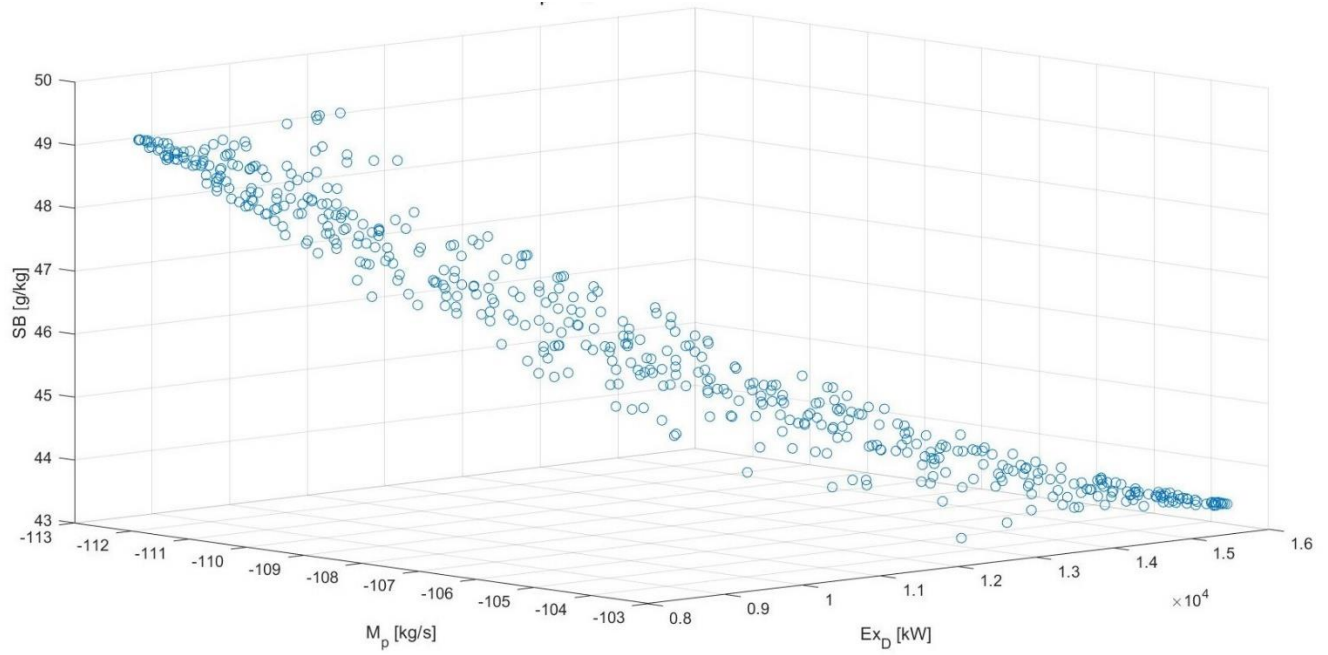


Figura 29: Optimización del agua producida, exergía destruida y salinidad en la descarga para un sistema MED-MVC con alimentación hacia adelante y 9 efectos.

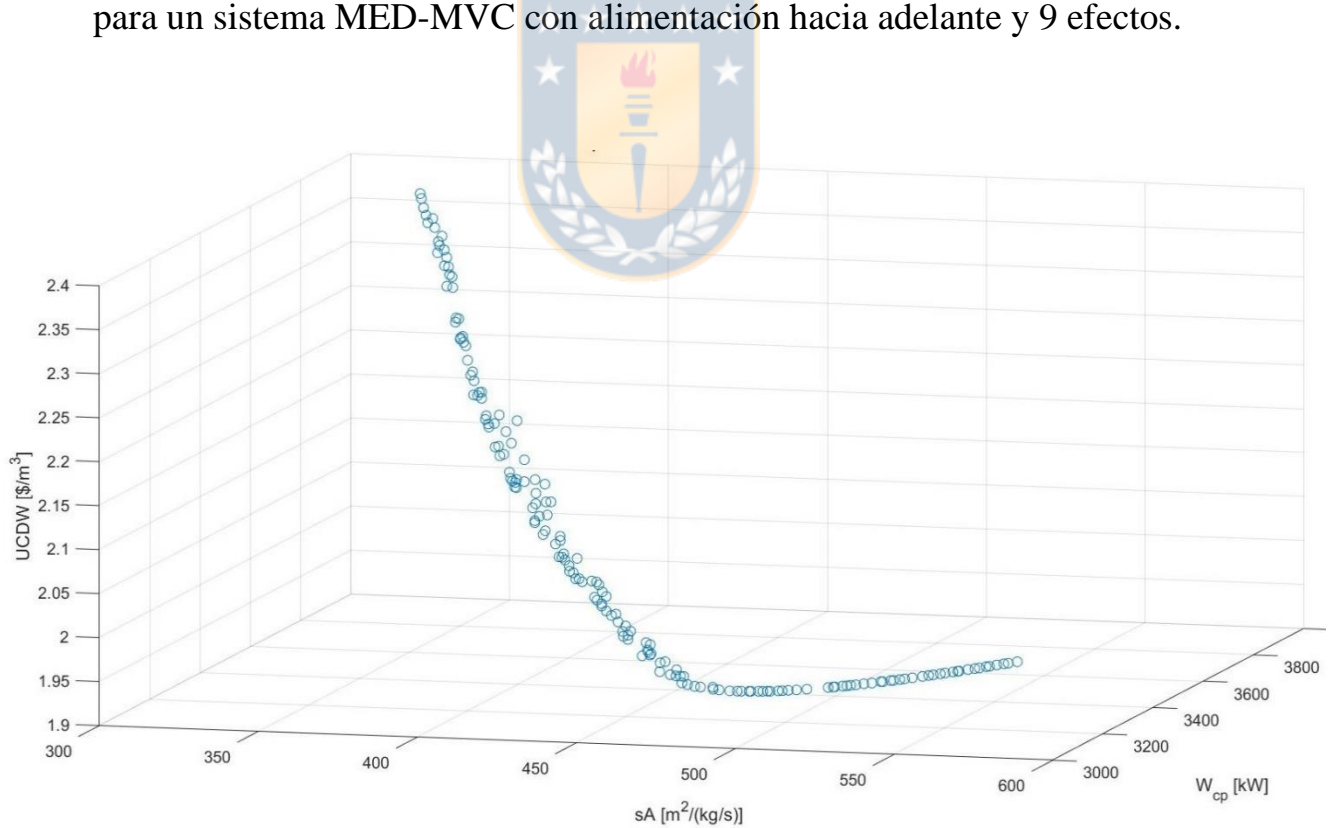


Figura 30: Optimización del área específica, consumo energético del compresor y UCDW para un sistema MED-MVC con alimentación paralela cruzada y 12 efectos. Elaboración Propia.

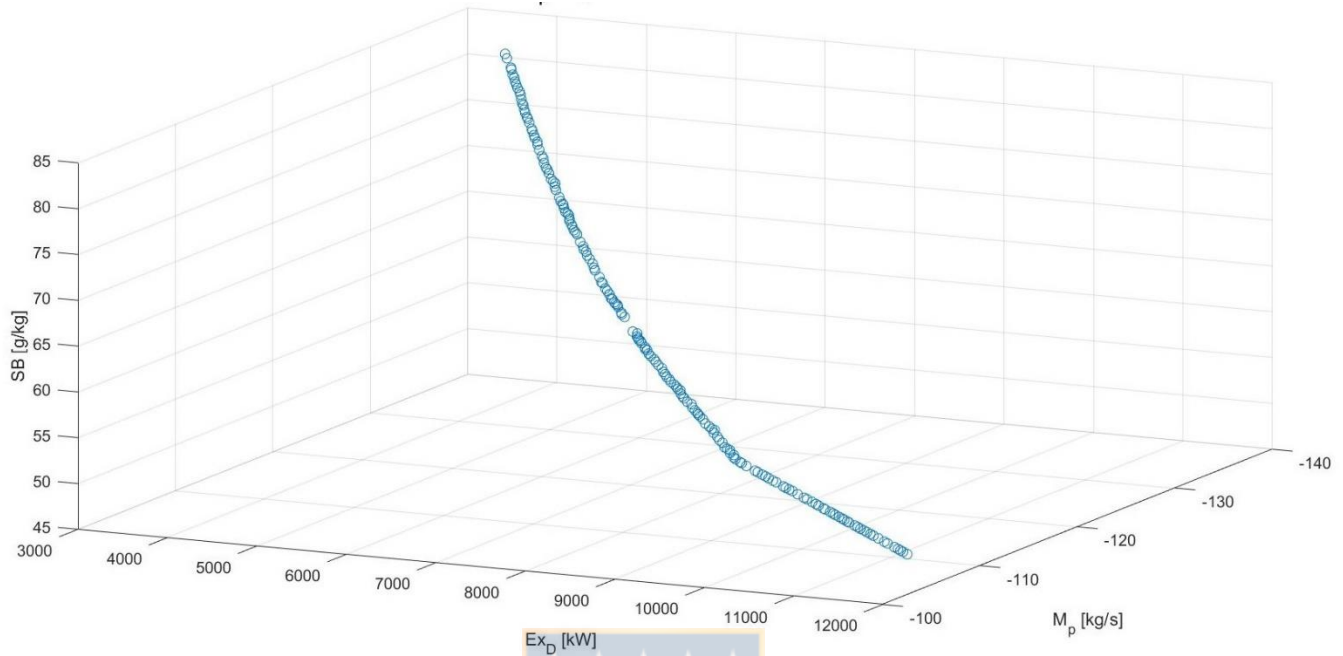


Figura 31: Optimización del agua producida, exergía destruida y salinidad en la descarga para un sistema MED-MVC con alimentación paralela cruzada y 12 efectos. Elaboración Propia.

Las figuras 28 a 31 muestran la variabilidad de posibles puntos óptimos y el conflicto entre funciones objetivo, ya que en ambos tipos de alimentación se prioriza minimizar el consumo de energía de los compresores, y eso implica una mayor área de transferencia de calor requerida. Para la mayoría de las situaciones estudiadas una disminución en el consumo energético conllevaría un menor UCDW, pero no siempre será así como se observa en la figura 30, ya que el modelo de costes plantea un cierto grado de dependencia tanto del consumo energético como de las dimensiones de los intercambiadores de calor. También se puede observar que una mayor producción de agua implica una mayor salinidad de la salmuera en la descarga, dado el equilibrio de salinidad entre los fluidos. La destrucción de exergía está alineada con la producción de agua, ya que a mayor cantidad de producto mayor uso de recursos energéticos en el proceso, principalmente en los evaporadores y precalentadores intermedios. En la figura 29 se observa una dispersión de los puntos, debido a que al estar operando con alimentación hacia adelante y sólo con 9 efectos, hay mayores escenarios posibles en el cómo hay una destrucción de la exergía en vez de direccionarse a solo una posibilidad en el resultado obtenido. Debido a esto no se tiene una tendencia clara y definida como en el caso de la figura 31, donde están operando 12 efectos con una alimentación en paralelo, haciendo que haya una distribución más uniforme de la

energía y si hay un escenario único y palpable que el modelo propuesto identifica cómo<sup>53</sup> óptimo. Esto introduce la convergencia a una única posibilidad para llegar a un punto óptimo para cada valor de entrada simulado, obteniendo así las curvas mostradas.

La figura 32 muestra un ejemplo de la optimización para un sistema MED con FF y 12 efectos, en un escenario un poco más optimista, considerando una fracción de calor residual de otro proceso. Por esta razón, se optimizan el flujo de calor requerido, el UCDW y el consumo requerido del compresor.

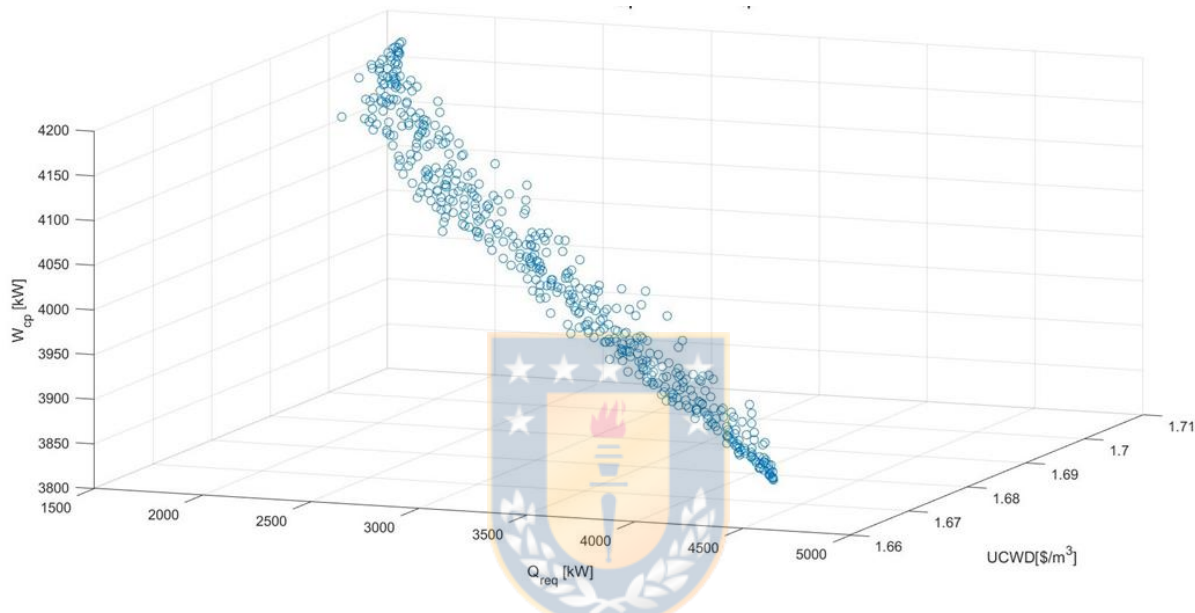


Figura 32: Optimización del flujo de calor requerido, energía eléctrica consumida y UCDW para un sistema MED-MVC con alimentación hacia adelante y 12 efectos. Elaboración Propia.

Considerando todos los puntos obtenidos, el costo mínimo que se puede lograr es cercano a 1,66 \$/m<sup>3</sup>, una potencia mínima requerida por el compresor de 3850 kW y un flujo de calor externo mínimo requerido cercano a 4500 kW. Todos los puntos obtenidos en estos bordes son los óptimos sugeridos, por lo que corresponde al usuario evaluar en qué rango es más conveniente operar. En este caso, también se tiene dispersión en los valores óptimos que componen la frontera, debido a 2 factores: el primero es que el tipo de alimentación propicia una mayor variación en la exergía destruida, principalmente entre los evaporadores, y el segundo es que se le está suministrando un flujo de calor constante que añade variación de pérdidas en el precalentador inicial del sistema, arrastrando también a que la reinyección de vapor no se encuentre optimizada del todo. Esto provoca que no haya una tendencia clara en la potencia del compresor y el flujo de calor externo, generándose una dispersión en los



resultados óptimos. Para este caso se tiene una disminución en el UCDW para un<sup>54</sup> sistema MED FF con 12 efectos a un valor entre \$1,71/m<sup>3</sup> y 1,67 \$/m<sup>3</sup>. Este análisis podría realizarse acoplando el sistema MED a otros procesos.

Las tablas 12 a 17 muestran los valores óptimos alcanzados en las funciones objetivo de para cada configuración y número de efectos simulados, para los casos en que no se cuente con un flujo de calor residual.

Tabla 12: Mejores resultados de agua producida.

Sistema	Efectos	Flujo de alimentación [kg/s]	TBT [°C]	Agua producida [kg/s]
MED FF	8	400	72	100,7
	9	400	72	113,3
	10	400	72	125,9
	11	380	72	139,6
	12	380	72	152,3
MED PCF	8	179	64	92,57
	9	200	64	102,7
	10	220	64	112,7
	11	257	64	120,3
	12	293	64	128,1

Tabla 13: Mejores resultados de UCDW.

Sistema	Efectos	Flujo de alimentación [kg/s]	TBT [°C]	UCDW[\$/m <sup>3</sup> ]
MED FF	8	400	64	1,819
	9	400	64	1,787
	10	400	64	1,8
	11	380	72	1,794
	12	380	72	1,904
MED PCF	8	179	64	2,231
	9	200	64	2,116
	10	220	64	2,062
	11	257	64	2,034
	12	293	64	1,94

Tabla 14: Mejores resultados de Energía consumida por el compresor.

Sistema	Efectos	Flujo de alimentación [kg/s]	TBT [°C]	Energía Consumida [kW]
MED FF	8	400	72	3402
	9	400	72	3402
	10	400	72	3401
	11	380	72	3149
	12	380	72	3149
MED PCF	8	170	64	3396
	9	200	64	3405
	10	220	64	3405
	11	230	64	3398
	12	240	64	3112

Tabla 15: Mejores resultados del área específica de transferencia de calor.

Sistema	Efectos	Flujo de alimentación [kg/s]	TBT [°C]	sA [m <sup>2</sup> /(kg/s)]
MED FF	8	400	72	193,6
	9	400	72	219,3
	10	600	72	245,4
	11	580	72	271,6
	12	580	72	299,6
MED PCF	8	320	72	187,1
	9	350	72	218,8
	10	370	72	251,9
	11	380	72	286,8
	12	293	72	323,8

Tabla 16: Mejores resultados de exergía destruida.

Sistema	Efectos	Flujo de alimentación [kg/s]	TBT [°C]	Exergía Destruída [kW]
MED FF	8	400	64	8029
	9	400	64	7922
	10	400	64	7813
	11	380	64	7305
	12	380	64	7190
MED PCF	8	170	64	2694
	9	200	64	3144
	10	220	64	3234
	11	230	64	3798
	12	240	64	3935

Tabla 17: Mejores resultados de salinidad en la descarga.

Sistema	Efectos	Flujo de alimentación [kg/s]	TBT [°C]	S_B[g/kg]
MED FF	8	600	64	42,57
	9	600	64	43,57
	10	600	64	44,6
	11	580	64	46,23
	12	580	64	47,46
MED PCF	8	320	72	46,84
	9	350	72	46,82
	10	370	72	47,3
	11	380	72	48,32
	12	390	72	49,47

Según los casos considerados, los sistemas MED con alimentación hacia adelante son mejores que los MED con alimentación paralela cruzada en la producción de agua y costo para producirla, aunque el sistema PCF requiere un flujo de alimentación menor, lo cual coincide con la literatura consultada. Además, el punto de funcionamiento

óptimo del UCDW cambia de TBT al pasar de 10 a 11 efectos para el sistema FF,<sup>57</sup> debido a que la temperatura entre efectos disminuye llegando a afectar negativamente el desempeño del sistema a TBT constante. Por esta razón, el TBT óptimo del sistema MED PCF también se mantiene constante, ya que la transferencia de calor sigue siendo óptima con la ausencia de precalentadores intermedios en el caso propuesto.

La tendencia para todos los casos fue minimizar el caudal de agua de alimentación, ya que, si aumenta, se pierde una mayor cantidad de calor por precalentamiento, pero al mismo tiempo se pierde un potencial de agua producida, obligando a que la optimización busque ese punto de equilibrio y ofrezca un abanico de soluciones, razón por la que se lleva a cabo esta investigación. Para el sistema MED PCF no fue posible operar al valor de caudal de alimentación mínimo posible para 8, 11 y 12 efectos, esto porque si opera con valores inferiores a los indicados en las tablas 12 y 13, la salinidad es superior a los 75 g/kg permitidos, por lo que se descartan estos resultados, aunque son mejores en otras funciones objetivo.

Si se desea priorizar la producción de agua, se sugiere operar con sistema FF y 12 efectos, alcanzando una producción de 152,3 kg/s. Por otro lado, se presenta una configuración equilibrada en ambos indicadores con sistema PCF y 12 efectos, alcanzando un UCDW de 1,94 \$/m<sup>3</sup> y 135,1 kg/s de agua producida. La tabla 14 muestra cada función objetivo optimizada para cada tipo de alimentación.

Finalmente, se sugiere que el sistema MED PCF opere con 12 efectos, 293 kg/s de agua de alimentación y 64 °C de TBT para lograr una producción de agua mayor a 135,1 kg/s y un UCDW menor a 1.94 \$/m<sup>3</sup>. Para el sistema MED FF se sugiere operar con 9 efectos, un TBT de 64°C y caudal de alimentación de 380 kg/s para lograr un UCDW menor a 1.79 \$/m<sup>3</sup>, pero si se desea maximizar la producción de agua, se sugiere operar con 12 efectos, un TBT de 72 °C de TBT y un flujo de agua de alimentación de 380 kg/s, para obtener un flujo de agua dulce de 152,3 kg/s.

Comparando entre ambos tipos de alimentaciones, los sistemas FF presentan, en promedio, un UCDW un 14,05% menor que los sistemas PCF, y un 18,89% mayor de agua producida.

Los valores obtenidos en la optimización se acercan bastante a los valores encontrados en la literatura, con UCDW que varían entre 1,64 y 3,45 \$/m<sup>3</sup> como lo muestra la figura 11, mientras que las otras configuraciones consultadas superan los 2 \$/m<sup>3</sup>.

La hipótesis se comprueba, pues es factible operar en un punto óptimo, para cualesquiera sean las variables de entrada del sistema, dentro de un rango predefinido.

Se debe sí dejar en claro que este óptimo es sólo con respecto a las alternativas que se<sup>58</sup> pueden conseguir con las distintas rutas de operación para los valores de entrada dados. Es decir, se puede obtener un UCDW mínimo, pero si cambian las variables de entrada, el sistema buscará otra ruta para obtener un nuevo UCDW minimizado dentro de las alternativas posibles, el cual no necesariamente sigue siendo igual al valor anterior.

Lo descrito es en esencia la optimización multiobjetivo, pues no se está proponiendo un sistema que opere en condiciones fijas, como lo hacen la mayoría de autores consultados en la literatura, sino que se sugiere operar en función del indicador a optimizar y de las condiciones de entrada a las que esté operando. Por esta razón se mostraron las distintas curvas en las imágenes 28 a 32 y las tablas 12 a 17.

Para la cantidad de agua producida existe una mejora considerable gracias a la optimización multiobjetivo, pues se consiguió producir un 200% más de en comparación con el promedio de lo producido en otros estudios, manteniendo un costo similar al mejor de los casos de las propuestas de la literatura, y con un área de transferencia de calor dentro de un margen aceptable. Según Darwish. et al. (2006), un intercambiador de calor “aceptable” para la desalinización no debe superar los 270 m<sup>2</sup>/(kg/s) (ver tabla 15).



## Conclusiones

Se estudió un sistema de desalinización MED-MVC con alimentación hacia adelante y paralela cruzada, con una cantidad de efectos activos que variaron entre 8 y 12. Las variables de decisión consideradas en la optimización fueron el número de efectos, la tasa de agua de alimentación y el TBT. Los sistemas con alimentación FF mostraron mejores resultados que los con alimentación PCF, con un UCDW en promedio 14,05% menor que los sistemas PCF, y un 18,89% mayor de agua producida.

Se observó un aumento evidente en la producción de agua a medida que aumentó el número de efectos, a diferencia del UCDW que disminuyó al aumentar el número de efectos en el sistema MED con PCF. Por otro lado, para el sistema MED con FF este varió de manera más aleatoria, ya que el modelo es más sensible al flujo de agua de alimentación, debido al calor entregado en el precalentamiento. Finalmente, se sugiere que el sistema MED PCF opere con 12 efectos, con un flujo de agua de alimentación de 293 kg/s y un TBT de 64 °C para lograr una mayor producción de agua (135,1 kg/s) y un menor UCDW (1,94 \$/m<sup>3</sup>). Para el sistema MED FF se sugiere operar con 9 efectos, con un TBT de 64 °C y un flujo de agua de alimentación de 380 kg/s para lograr un UCDW de 1,794 \$/m<sup>3</sup>, pero si se desea maximizar la producción de agua, se sugiere operar con 12 efectos, un TBT de 72 °C y un flujo de agua de alimentación de 380 kg/s, para lograr un flujo de agua producida de 152,3 kg/s.

La optimización se realizó para minimizar simultáneamente el área específica, el consumo de energía y la destrucción de exergía en la cadena del proceso, con lo que también se logra minimizar el UCDW. Por otro lado, el sistema MED PCF presentó un conflicto en la maximización del caudal de agua producido con la salinidad del vertido, por lo que la disminución del agua de alimentación fue limitada. Los sistemas MED FF no presentaron esta limitación, ya que el flujo de agua de alimentación fue mayor.

Se concluye que es posible mantener un sistema operando en un óptimo “local”, independiente del valor de las variables de entrada, lo cual no significa que este óptimo sea absoluto con respecto a los demás resultados. Por esta razón, la ruta con la cual se decide operar el sistema está ligada con el indicador que se quiere priorizar.

Es importante definir funciones objetivo que se puedan contrastar y ver el conflicto que hay entre los indicadores para tomar la decisión de priorizar un indicador y sugerir

la ruta de operación para ese indicador. En particular en esta investigación, se<sup>60</sup> identificó un conflicto entre la energía consumida y el área específica de transferencia de calor, las que inciden en el costo.

Las funciones objetivo deben estar caracterizadas mediante métodos matemáticos. En este caso se utilizaron regresiones lineales y no lineales en 3 dimensiones, y con esto se puede introducir el concepto de optimización multiobjetivo de manera concreta, pues se necesita describir el comportamiento de las funciones objetivos en función de variables de entrada



- Aguilar, J., Velázquez, N., López, R., Beltrán, R., Hernández, L., González, L., & Alonso, V. (2020). Low-temperature multiple-effect desalination/organic Rankine cycle system with a novel integration for fresh water and electrical energy production. *Desalination*, 477(114269).
- Amidpour, M., Rostamzadeh, H., Ghiasiradb, H., & Amidpour, Y. (2020). Performance enhancement of a conventional multi-effect desalination (MED) system by heat pump cycles. *Desalination*, 447(114261).
- Anastasovski, A., Rascovic, P., & Gusovic, Z. (2020). A review of heat integration approaches for organic rankine cycle with waste heat in production processes. *Energy Conversion and Management*, 221.
- Aroussy, Y., Saifaoui, D., Lilano, A., & Tarfaoui, M. (2020). Thermo-economic simulation and analysis of a solar thermal cycle combined with two desalination processes by multi-effect distillation (MED). *Materialstoday Proceedings*, 30, 1027-1032.
- Darwish, M., Al-Juwalwel, F., & Abdulraheim, H. (2006). Multi-effect boiling systems from an energy viewpoint. *Desalination*, 194, 22-39.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II. *IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION*, 6, 182-197.
- Deb, K., Qingfu, Z., Suganthan, P., Chen, L., & Hui, L. (2019). Comparison between MOEA/D and NSGA-III on a set of novel many and multi-objective benchmark problems with challenging difficulties. *Swarm and Evolutionary Computation*, 104-117.
- Dirección General de Aguas. (2018). *Aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional en las cuencas de las macrozonas norte y centro. SIT N° 435*.
- Elsayed, M. L., Mesalhy, O., Mohammed, R. H., & Chow, L. C. (2019). Performance modeling of MED-MVC systems: Exergy-economic analysis. *Energy*, 166, 552-568.



- Fakhari, I., Behzadi, A., Gholamian, E., Ahmadi, P., & Arabkoohsar, A. (2021). Design<sup>62</sup> and tri-objective optimization of a hybrid efficient energy system for tri-generation, based on PEM fuel cell and MED using syngas as a fuel. *Journal of Cleaner Production*, 290.
- FAO. (2014). *Water: the most basic resource but also the most essential*.
- FAO. (2015). *AQUASTAT - FAO's Global Information System on Water and Agriculture*. Retrieved from [http://www.fao.org/nr/water/aquastat/water\\_use/printesp1.stm#tables](http://www.fao.org/nr/water/aquastat/water_use/printesp1.stm#tables)
- FAO. (2019). La FAO alerta de una sequía desastrosa en Somalia: más de 2 millones de personas se enfrentan al hambre aguda.
- FAO. (2020). *La labor de la FAO en el agua*. Obtenido de <http://www.fao.org/water/es/>
- FAO-AQUASTAT. (2010). Sistema de información global en agua y agricultura de la FAO.
- General Water Directorate. (2016). *Water Atlas*.
- Greenpeace Chile. (2020). *Greenpeace.org*. Retrieved April 2021, from <https://www.greenpeace.org/chile/involucrate/glaciares/>
- Han, J., You, H., Liu, Y., Chen, C., & Ge, Y. (2020). 4E analysis and multi-objective optimization of a micro poly-generation system based on SOFC/MGT/MED and organic steam ejector refrigerator. *Energy*, 206.
- MIT. (2017). *MIT.edu*. Recuperado el Noviembre de 2020
- MOP. (2013). *Estrategia Nacional de recursos Hídricos*.
- MOP. (2020). *Primer Informe Mesa Nacional del Agua*.
- Palenzuela, P., Hassan, A., Zaragoza, G., & Alarcón, D. (2014). Steady state model for multi-effect distillation case study: Plataforma Solar de Almería MED pilot plant. *Desalination*, 337, 31-42.
- Piacentino, A. (2015). Application of advanced thermodynamics, thermoconomics and exergy costing to a Multiple Effect Distillation plant: In-depth analysis of cost

formation process. *Desalination*, 371, 88-103.

63

Rahimi, B., & Chua, H. T. (2017). *Low Grade Heat Driven Multi-Effect Distillation and Desalination*.

Saadat, A., Islam, M., Islam, M., Fahmida, P., & Sultana, A. (2018). Desalination Technologies for Developing Countries: A Review. *JOURNAL OF SCIENTIFIC RESEARCH*, 10, 77-97.

Serra, L., Raluy, G., & Uche, J. (2006). Life cycle assessment of MSF, MED and RO. *Energy*, 31, 2361–2372.

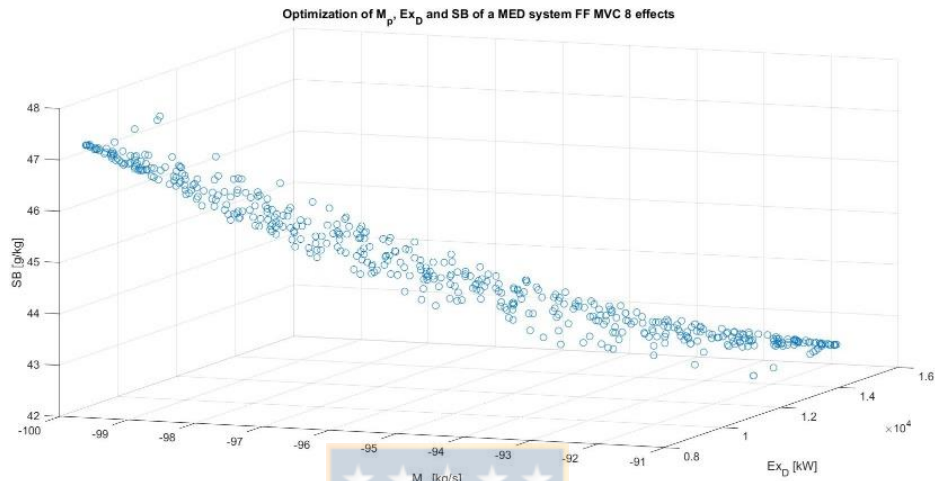
UNESCO. (2019). *United Nations World Water Development Report*.

UNESCO. (2020). *Water and climate changes*.

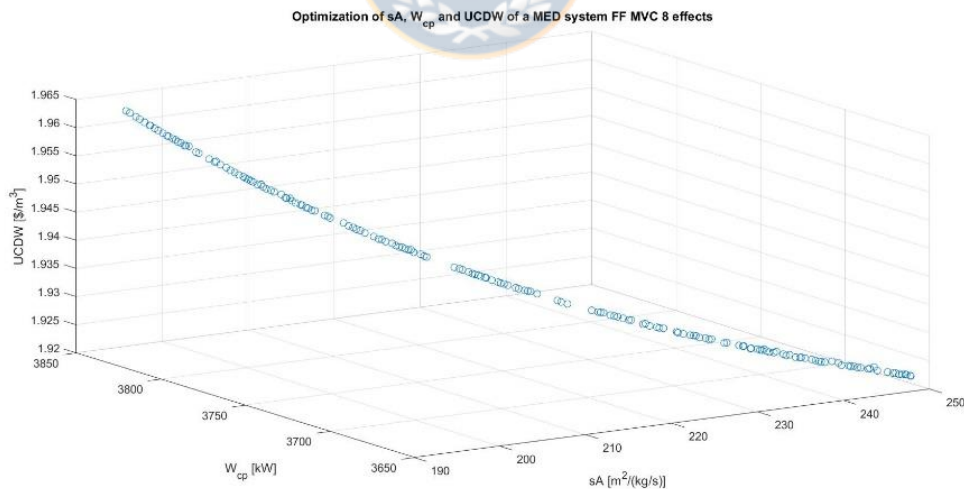
UNHCR ACNUR. (2020). *acnur.org*. Recuperado el 23 de Noviembre de 2020, de <https://www.acnur.org/noticias/briefing/2020/5/5eb582984/decenas-de-miles-de-personas-forzadas-a-abandonar-sus-hogares-en-somalia.html#:~:text=ACNUR%20considera%20que%20la%20situaci%C3%B3n,seg%C3%BAn%20Avanza%20el%20COVID%2D19.&text=A%20pesar%20de%20que%2>

## Anexos

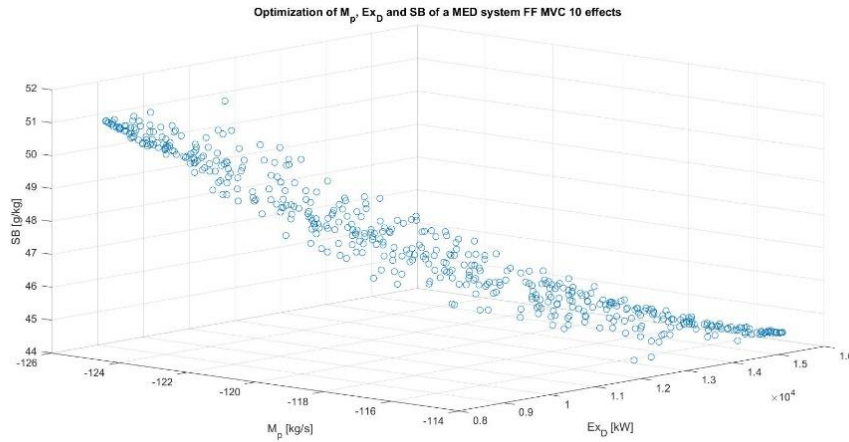
### Anexo 1.1: Resultados Simulación Sistema MED-MVC con 8 a 12 efectos operando con alimentación FF



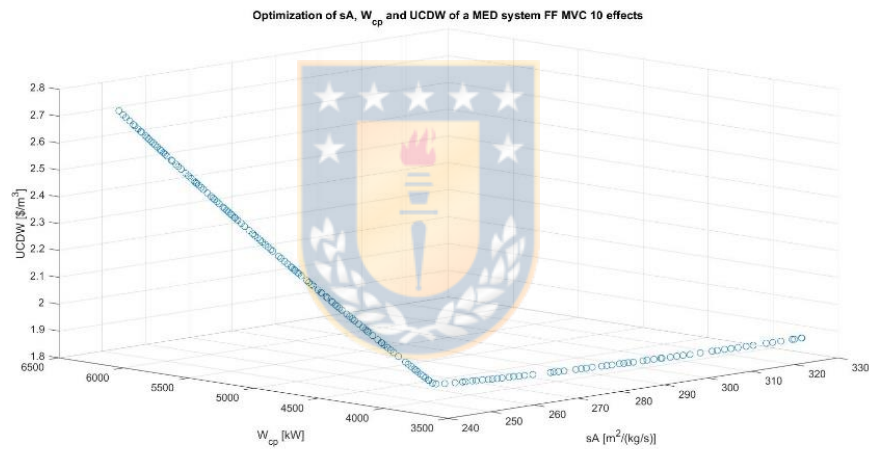
A1.1.1: Optimización del agua producida, exergía destruida y salinidad en la descarga para un sistema MED-MVC con alimentación hacia adelante y 8 efectos. Elaboración Propia.



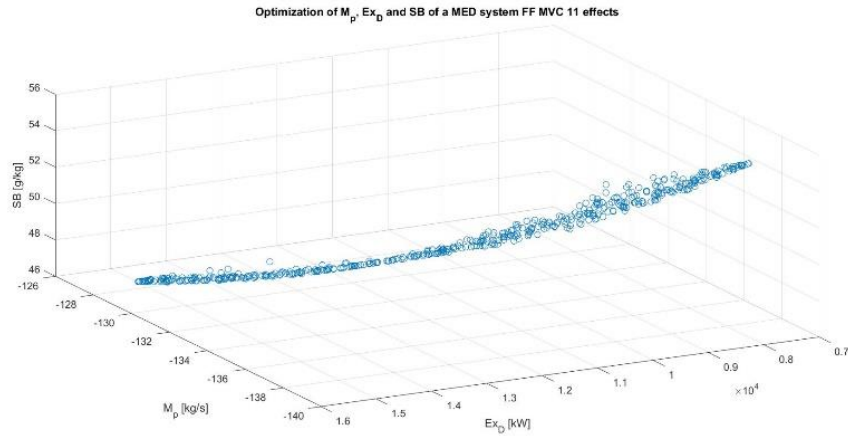
A1.1.2: Optimización del área específica, consumo energético del compresor y UCDW para un sistema MED-MVC con alimentación hacia adelante y 8 efectos. Elaboración Propia.



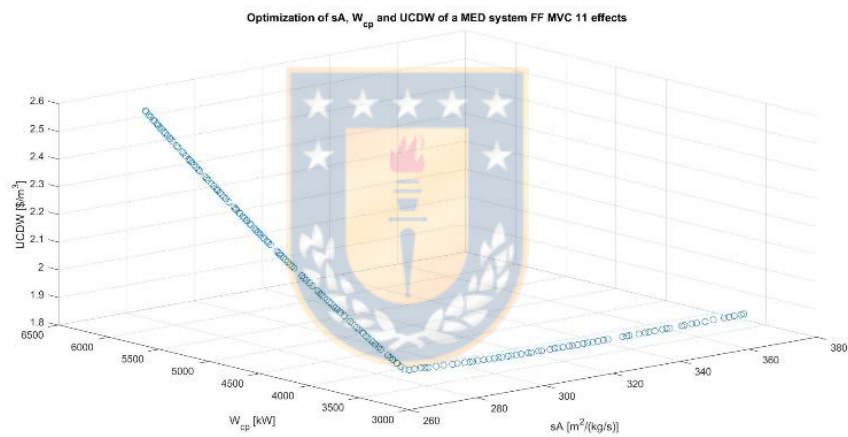
A1.1.3: Optimización del agua producida, exergía destruida y salinidad en la descarga para un sistema MED-MVC con alimentación hacia adelante y 10 efectos. Elaboración Propia.



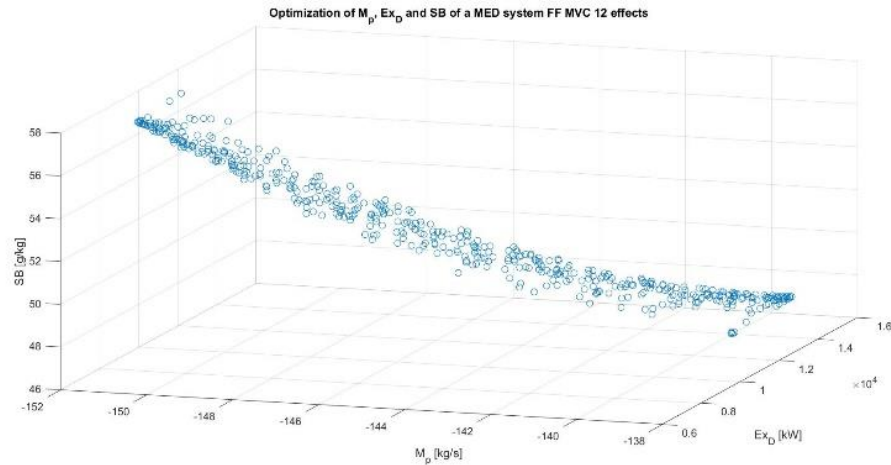
A1.1.4: Optimización del área específica, consumo energético del compresor y UCDW para un sistema MED-MVC con alimentación hacia adelante y 10 efectos. Elaboración Propia.



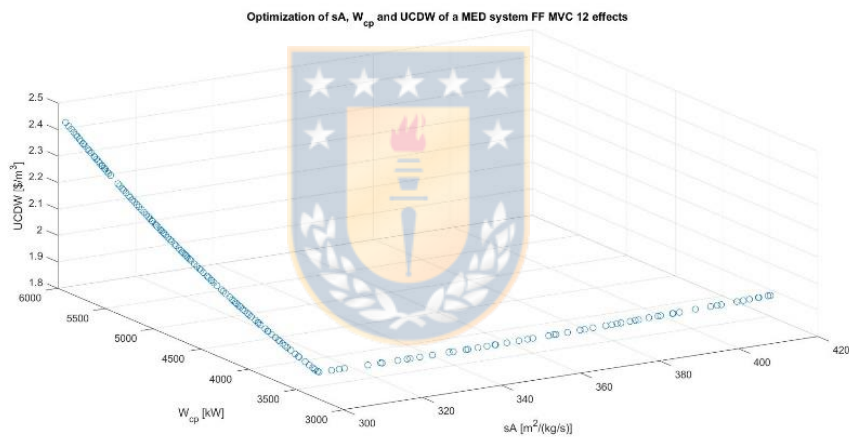
A1.1.5: Optimización del agua producida, exergía destruida y salinidad en la descarga para un sistema MED-MVC con alimentación hacia adelante y 11 efectos. Elaboración Propia.



A1.1.4: Optimización del área específica, consumo energético del compresor y UCDW para un sistema MED-MVC con alimentación hacia adelante y 11 efectos. Elaboración Propia.

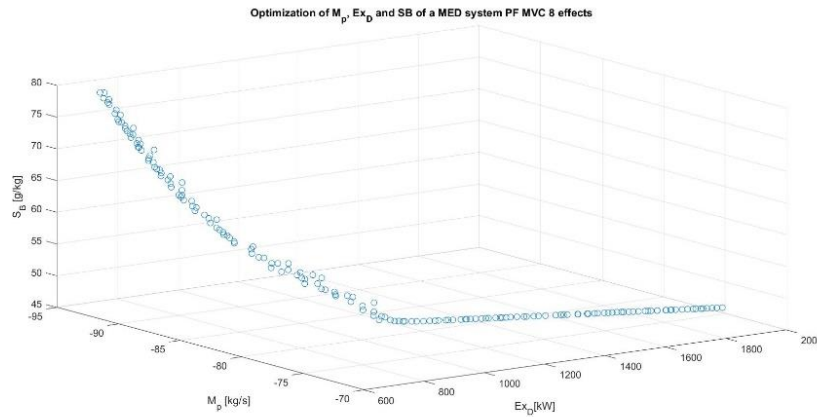


A1.1.5: Optimización del agua producida, exergía destruida y salinidad en la descarga para un sistema MED-MVC con alimentación hacia adelante y 12 efectos. Elaboración Propia.

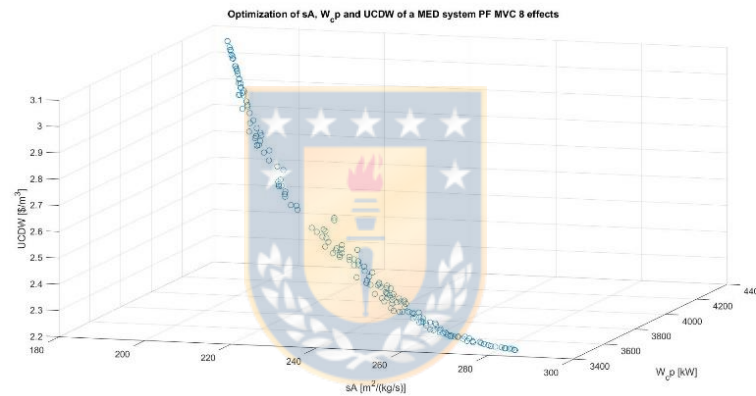


A1.1.6: Optimización del área específica, consumo energético del compresor y UCDW para un sistema MED-MVC con alimentación hacia adelante y 11 efectos. Elaboración Propia.

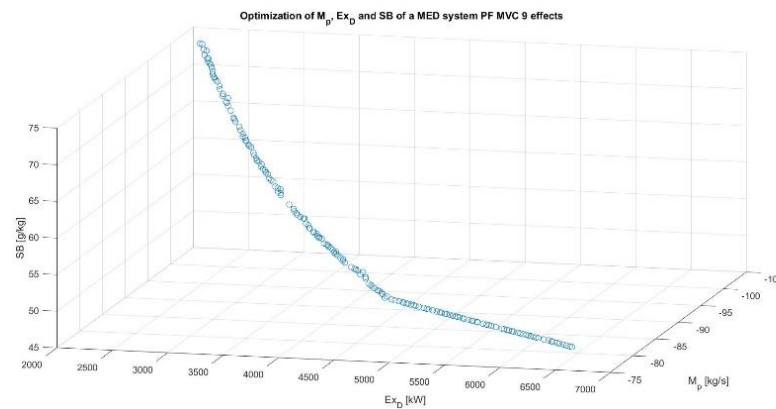
## Anexo 1.2: Resultados Simulación Sistema MED-MVC con 8 a 12 efectos operando con alimentación PCF



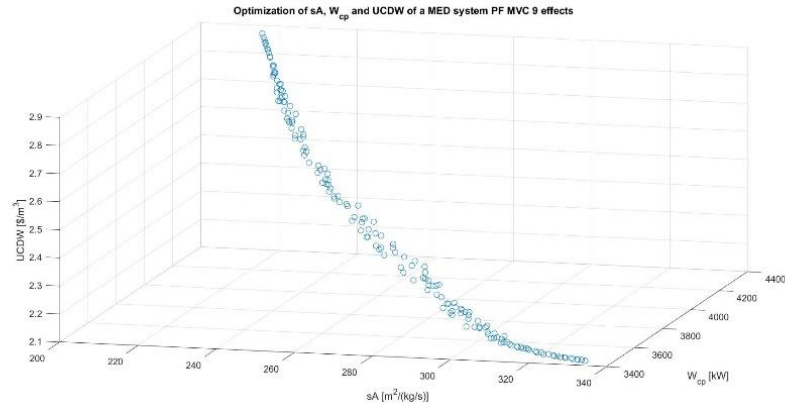
A1.2.1: Optimización del agua producida, exergía destruida y salinidad en la descarga para un sistema MED-MVC con alimentación paralela cruzada y 8 efectos. Elaboración Propia.



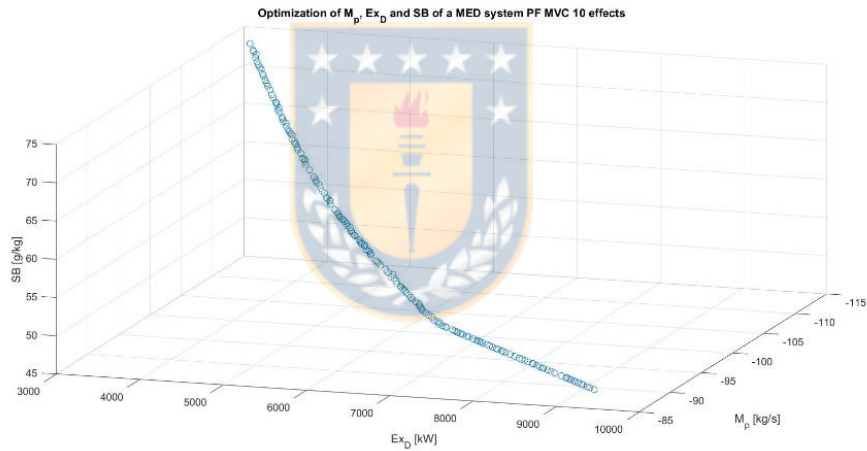
A1.2.2: Optimización del área específica, consumo energético del compresor y UCOW para un sistema MED-MVC con alimentación paralela cruzada y 8 efectos. Elaboración Propia.



A1.2.3: Optimización del agua producida, exergía destruida y salinidad en la descarga para un sistema MED-MVC con alimentación paralela cruzada y 9 efectos.

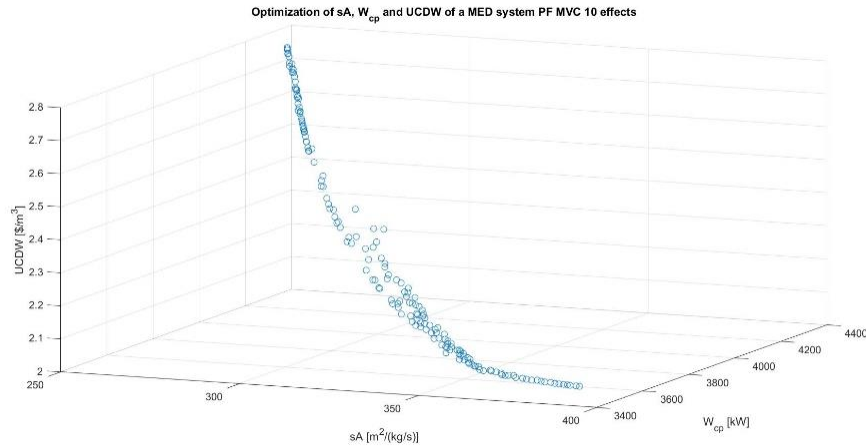


A1.2.4: Optimización del área específica, consumo energético del compresor y UCDW para un sistema MED-MVC con alimentación paralela cruzada y 9 efectos. Elaboración Propia.

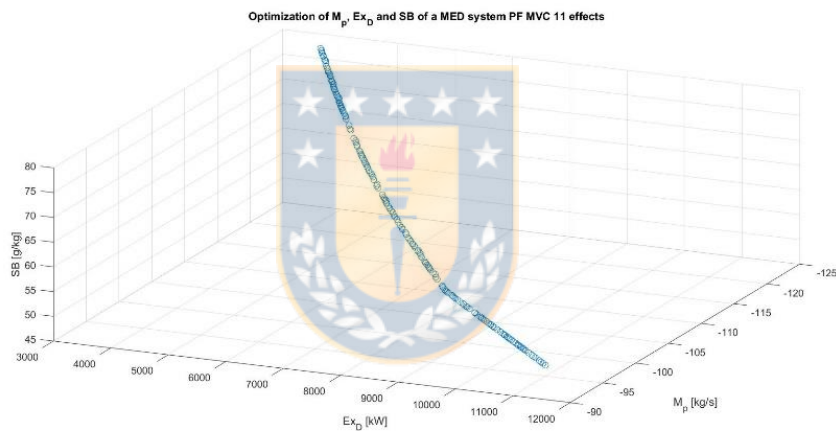


A1.2.5: Optimización del agua producida, exergía destruida y salinidad en la descarga para un sistema MED-MVC con alimentación paralela cruzada y 10 efectos. Elaboración Propia.

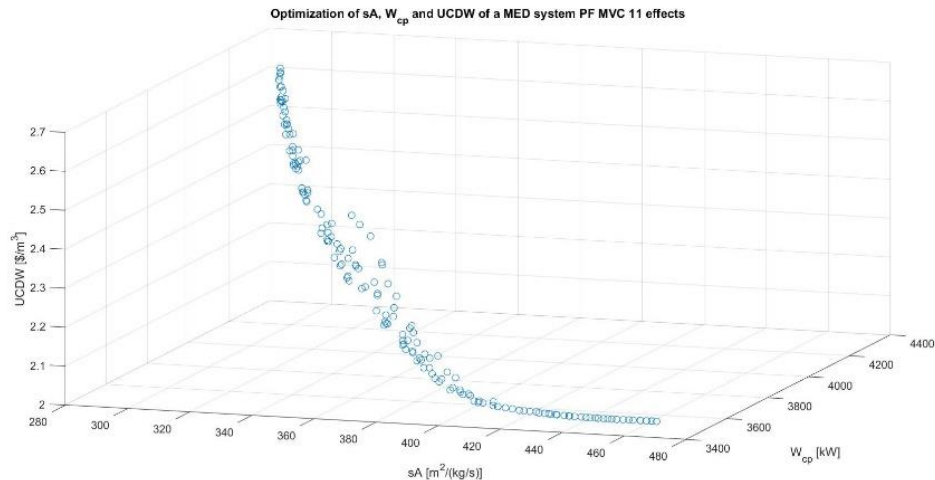




A1.2.6: Optimización del área específica, consumo energético del compresor y UCDW para un sistema MED-MVC con alimentación paralela cruzada y 10 efectos.  
Elaboración Propia.



A1.2.5: Optimización del agua producida, exergía destruida y salinidad en la descarga para un sistema MED-MVC con alimentación paralela cruzada y 11 efectos.  
Elaboración Propia.



A1.2.6: Optimización del área específica, consumo energético del compresor y UCDW para un sistema MED-MVC con alimentación paralela cruzada y 11 efectos.  
Elaboración Propia.

### Anexo 2.1: Código EES sistema de desalinización con alimentación hacia adelante

"Input"

TBT=71

$Q_{dot\_in\_ev}=35000$

$M_{dot\_F}=260$

$S_F=36$

$T_F=18$

$N=7$

$\{T_B=T_{F\_out\_ph}\}$

$\{T_{F\_12}=36\}$

$t_{a\_12}=T_B-3$

$T_B=T_{F\_out\_ph}$

$T_v=80$

$Q_{dot\_dis}=M_{dot\_st\_7}*h_{st\_in\_1}$

$DELTA T_{eff}=(TBT-T_B)/(N-1)$

$\{S_B=70\}$

"efecto 1"

$M_{dot\_F\_1}=M_{dot\_F}$

$M_{dot\_F\_1}=M_{dot\_st\_1}+M_{dot\_B\_1}$

$$M_{\dot{F}_1} S_{F_1} = M_{\dot{B}_1} S_{B_1}$$

$$Q_{\dot{in}_{ev}} + M_{\dot{F}_1} h_{F_1} - M_{\dot{F}_1} c_{p_{sw_1}} (T_{F_1} - t_{a_1}) = M_{\dot{st}_1} h_{st_1} + M_{\dot{B}_1} h_{B_1} + M_{\dot{D}_1} h_{D_1}$$

$$h_{F_1} = SW\_Enthalpy(T_{F_1}; S_{F_1}) * convert(J/kg; kJ/kg)$$

$$h_{B_1} = SW\_Enthalpy(T_{B_1}; S_{B_1}) * convert(J/kg; kJ/kg)$$

$$S_{F_1} = S_F$$

$$T_{F_1} = T_{BT}$$

$$T_{B_1} = T_{st_1}$$

$$h_{st_1} = Enthalpy(Water; T=T_{st_1}; x=1)$$

$$T_{st_1} = T_{F_1} - BPE_1$$

$$BPE_1 = SW\_BPE(T_{F_1}; S_{F_1})$$

$$t_{a_1} = t_{a_{12}} + (N-1) * DELTAT_{eff}$$

$$c_{p_{sw_1}} = SW\_SpHeat(T_{F_1}; S_{F_1}) * convert(J/kg; kJ/kg)$$

$$h_{D_1} = Enthalpy(Water; T=T_{D_1}; x=0)$$

$$T_{D_1} = T_{B_1}$$

$$M_{\dot{D}_1} = M_{\dot{st}_7}$$

$$Q_{\dot{req}} = Q_{\dot{in}_{ev}} - M_{\dot{st}_7} h_{st_{in_1}}$$

$$P_1 = P_{sat}(Water; T=T_{st_1})$$

$$h_{st_{in_1}} = Enthalpy(Water; T=210; P=P_1)$$

"efecto 2"

$$M_{\dot{F}_2} = M_{\dot{B}_1}$$

$$M_{\dot{st}_1} = M_{\dot{D}_2}$$

$$M_{\dot{F}_2} = M_{\dot{st}_2} + M_{\dot{B}_2}$$

$$M_{\dot{F}_2} S_{F_2} = M_{\dot{B}_2} S_{B_2}$$

$$M_{\dot{st}_1} h_{st_1} + M_{\dot{F}_2} h_{F_2} -$$

$$M_{\dot{F}_2} c_{p_{sw_1}} DELTAT_{eff} = M_{\dot{st}_2} h_{st_2} + M_{\dot{B}_2} h_{B_2} + M_{\dot{D}_2} h_{D_2}$$

$$h_{F_2} = SW\_Enthalpy(T_{F_2}; S_{F_2}) * convert(J/kg; kJ/kg)$$

$$h_{B_2} = SW\_Enthalpy(T_{B_2}; S_{B_2}) * convert(J/kg; kJ/kg)$$

$$S_{F_2} = S_{B_1}$$

$$T_{F_2} = T_{F_1} - DELTAT_{eff}$$

$$T_{B_2} = T_{st_2}$$

$$h_{st_2} = Enthalpy(Water; T=T_{st_2}; x=1)$$

$$T_{st_2} = T_{F_2} - BPE_2$$

$$BPE_2 = SW\_BPE(T_{F_2}; S_{F_2})$$

$$t_{a_2} = t_{a_1} - DELTAT_{eff}$$

$$c_{p_{sw_2}} = SW\_SpHeat(T_{F_2}; S_{F_2}) * convert(J/kg; kJ/kg)$$

$$h_{D_2} = Enthalpy(Water; T=T_{st_2}; x=0)$$

$$P_2 = P_{sat}(Water; T=T_{st_2})$$



$M_{\dot{F}_3} = M_{\dot{B}_2}$   
 $M_{\dot{st}_2} = M_{\dot{D}_3}$   
 $M_{\dot{F}_3} = M_{\dot{st}_3} + M_{\dot{B}_3}$   
 $M_{\dot{F}_3} * S_{F_3} = M_{\dot{B}_3} * S_{B_3}$   
 $M_{\dot{st}_2} * h_{st_2} + M_{\dot{F}_3} * h_{F_3} -$   
 $M_{\dot{F}_3} * cp_{sw_3} * \Delta T_{eff} = M_{\dot{st}_3} * h_{st_3} + M_{\dot{B}_3} * h_{B_3} + M_{\dot{D}_3} * h_{D_3}$   
 $h_{F_3} = SW\_Enthalpy(T_{F_3}; S_{F_3}) * convert(J/kg; kJ/kg)$   
 $h_{B_3} = SW\_Enthalpy(T_{B_3}; S_{B_3}) * convert(J/kg; kJ/kg)$   
 $S_{F_3} = S_{B_2}$   
 $T_{F_3} = T_{F_2} - \Delta T_{eff}$   
 $T_{B_3} = T_{st_3}$   
 $h_{st_3} = Enthalpy(Water; T = T_{st_3}; x = 1)$   
 $T_{st_3} = T_{F_3} - BPE_3$   
 $BPE_3 = SW\_BPE(T_{F_3}; S_{F_3})$   
 $t_{a_3} = t_{a_2} - \Delta T_{eff}$   
 $cp_{sw_3} = SW\_SpHeat(T_{F_3}; S_{F_3}) * convert(J/kg; kJ/kg)$   
 $h_{D_3} = Enthalpy(Water; T = T_{st_3}; x = 0)$   
 $P_3 = P_{sat}(Water; T = T_{st_3})$

"efecto 4"

$M_{\dot{F}_4} = M_{\dot{B}_3}$   
 $M_{\dot{st}_3} = M_{\dot{D}_4}$   
 $M_{\dot{F}_4} = M_{\dot{st}_4} + M_{\dot{B}_4}$   
 $M_{\dot{F}_4} * S_{F_4} = M_{\dot{B}_4} * S_{B_4}$   
 $M_{\dot{st}_3} * h_{st_3} + M_{\dot{F}_4} * h_{F_4} -$   
 $M_{\dot{F}_4} * cp_{sw_4} * \Delta T_{eff} = M_{\dot{st}_4} * h_{st_4} + M_{\dot{B}_4} * h_{B_4} + M_{\dot{D}_4} * h_{D_4}$   
 $h_{F_4} = SW\_Enthalpy(T_{F_4}; S_{F_4}) * convert(J/kg; kJ/kg)$   
 $h_{B_4} = SW\_Enthalpy(T_{B_4}; S_{B_4}) * convert(J/kg; kJ/kg)$   
 $S_{F_4} = S_{B_3}$   
 $T_{F_4} = T_{F_3} - \Delta T_{eff}$   
 $T_{B_4} = T_{st_4}$   
 $h_{st_4} = Enthalpy(Water; T = T_{st_4}; x = 1)$   
 $T_{st_4} = T_{F_4} - BPE_4$   
 $BPE_4 = SW\_BPE(T_{F_4}; S_{F_4})$   
 $t_{a_4} = t_{a_3} - \Delta T_{eff}$   
 $cp_{sw_4} = SW\_SpHeat(T_{F_4}; S_{F_4}) * convert(J/kg; kJ/kg)$

$h_{D_4} = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T = T_{st_4}; x = 0)$

$P_4 = P_{sat}(\text{Water}; T = T_{st_4})$

"efecto 5"

$M_{dot\_F\_5} = M_{dot\_B\_4}$

$M_{dot\_st\_4} = M_{dot\_D\_5}$

$M_{dot\_F\_5} = M_{dot\_st\_5} + M_{dot\_B\_5}$

$M_{dot\_F\_5} * S_{F\_5} = M_{dot\_B\_5} * S_{B\_5}$

$M_{dot\_st\_4} * h_{st\_4} + M_{dot\_F\_5} * h_{F\_5} -$

$M_{dot\_F} * cp_{sw\_5} * \Delta T_{eff} = M_{dot\_st\_5} * h_{st\_5} + M_{dot\_B\_5} * h_{B\_5} + M_{dot\_D\_5} * h_{D\_5}$

$h_{F\_5} = \text{SW\_Enthalpy}(T_{F\_5}; S_{F\_5}) * \text{convert}(\text{J/kg}; \text{kJ/kg})$

$h_{B\_5} = \text{SW\_Enthalpy}(T_{B\_5}; S_{B\_5}) * \text{convert}(\text{J/kg}; \text{kJ/kg})$

$S_{F\_5} = S_{B\_4}$

$T_{F\_5} = T_{F\_4} - \Delta T_{eff}$

$T_{B\_5} = T_{st\_5}$

$h_{st\_5} = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T = T_{st\_5}; x = 1)$

$T_{st\_5} = T_{F\_5} - BPE_5$

$BPE_5 = \text{SW\_BPE}(T_{F\_5}; S_{F\_5})$

$t_{a\_5} = t_{a\_4} - \Delta T_{eff}$

$cp_{sw\_5} = \text{SW\_SpHeat}(T_{F\_5}; S_{F\_5}) * \text{convert}(\text{J/kg}; \text{kJ/kg})$

$h_{D\_5} = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T = T_{st\_5}; x = 0)$

$P_5 = P_{sat}(\text{Water}; T = T_{st\_5})$

"efecto 6"

$M_{dot\_F\_6} = M_{dot\_B\_5}$

$M_{dot\_st\_5} = M_{dot\_D\_6}$

$M_{dot\_F\_6} = M_{dot\_st\_6} + M_{dot\_B\_6}$

$M_{dot\_F\_6} * S_{F\_6} = M_{dot\_B\_6} * S_{B\_6}$

$M_{dot\_st\_5} * h_{st\_5} + M_{dot\_F\_6} * h_{F\_6} -$

$M_{dot\_F} * cp_{sw\_6} * \Delta T_{eff} = M_{dot\_st\_6} * h_{st\_6} + M_{dot\_B\_6} * h_{B\_6} + M_{dot\_D\_6} * h_{D\_6}$

$h_{F\_6} = \text{SW\_Enthalpy}(T_{F\_6}; S_{F\_6}) * \text{convert}(\text{J/kg}; \text{kJ/kg})$

$h_{B\_6} = \text{SW\_Enthalpy}(T_{B\_6}; S_{B\_6}) * \text{convert}(\text{J/kg}; \text{kJ/kg})$

$S_{F\_6} = S_{B\_5}$

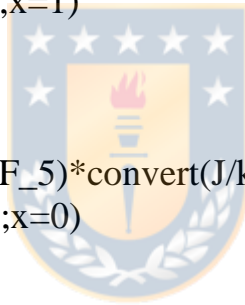
$T_{F\_6} = T_{F\_5} - \Delta T_{eff}$

$T_{B\_6} = T_{st\_6}$

$h_{st\_6} = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T = T_{st\_6}; x = 1)$

$T_{st\_6} = T_{F\_6} - BPE_6$

$BPE_6 = \text{SW\_BPE}(T_{F\_6}; S_{F\_6})$



$t_{a\_6} = t_{a\_5} - \Delta T_{\text{eff}}$   
 $cp_{sw\_6} = SW\_SpHeat(T_{F\_6}; S_{F\_6}) * \text{convert}(J/kg; kJ/kg)$   
 $h_{D\_6} = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T = T_{st\_6}; x = 0)$   
 $P_6 = P_{\text{sat}}(\text{Water}; T = T_{st\_6})$   
 "efecto 7"

$M_{dot\_F\_7} = M_{dot\_B\_6}$   
 $M_{dot\_st\_6} = M_{dot\_D\_7}$   
 $M_{dot\_F\_7} = M_{dot\_st\_7} + M_{dot\_B\_7}$   
 $M_{dot\_F\_7} * S_{F\_7} = M_{dot\_B\_7} * S_{B\_7}$   
 $M_{dot\_st\_6} * h_{st\_6} + M_{dot\_F\_7} * h_{F\_7} -$   
 $M_{dot\_F} * cp_{sw\_7} * \Delta T_{\text{eff}} = M_{dot\_st\_7} * h_{st\_7} + M_{dot\_B\_7} * h_{B\_7} + M_{dot\_D\_7} * h_{D\_7}$   
 $h_{F\_7} = SW\_Enthalpy(T_{F\_7}; S_{F\_7}) * \text{convert}(J/kg; kJ/kg)$   
 $h_{B\_7} = SW\_Enthalpy(T_{B\_7}; S_{B\_7}) * \text{convert}(J/kg; kJ/kg)$   
 $S_{F\_7} = S_{B\_6}$   
 $T_{F\_7} = T_{F\_6} - \Delta T_{\text{eff}}$   
 $T_{B\_7} = T_{st\_7}$   
 $h_{st\_7} = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T = T_{st\_7}; x = 1)$   
 $T_{st\_7} = T_{F\_7} - BPE_7$   
 $BPE_7 = SW\_BPE(T_{F\_7}; S_{F\_7})$   
 $t_{a\_7} = t_{a\_6} - \Delta T_{\text{eff}}$   
 $cp_{sw\_7} = SW\_SpHeat(T_{F\_7}; S_{F\_7}) * \text{convert}(J/kg; kJ/kg)$   
 $h_{D\_7} = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T = T_{st\_7}; x = 0)$   
 $P_7 = P_{\text{sat}}(\text{Water}; T = T_{st\_7})$   
 {" efecto 8"



$M_{dot\_F\_8} = M_{dot\_B\_7}$   
 $M_{dot\_st\_7} = M_{dot\_D\_8}$   
 $M_{dot\_F\_8} = M_{dot\_st\_8} + M_{dot\_B\_8}$   
 $M_{dot\_F\_8} * S_{F\_8} = M_{dot\_B\_8} * S_{B\_8}$   
 $M_{dot\_st\_7} * h_{st\_7} + M_{dot\_F\_8} * h_{F\_8} -$   
 $M_{dot\_F} * cp_{sw\_8} * \Delta T_{\text{eff}} = M_{dot\_st\_8} * h_{st\_8} + M_{dot\_B\_8} * h_{B\_8} + M_{dot\_D\_8} * h_{D\_8}$   
 $h_{F\_8} = SW\_Enthalpy(T_{F\_8}; S_{F\_8}) * \text{convert}(J/kg; kJ/kg)$   
 $h_{B\_8} = SW\_Enthalpy(T_{B\_8}; S_{B\_8}) * \text{convert}(J/kg; kJ/kg)$   
 $S_{F\_8} = S_{B\_7}$   
 $T_{F\_8} = T_{F\_7} - \Delta T_{\text{eff}}$   
 $T_{B\_8} = T_{st\_8}$   
 $h_{st\_8} = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T = T_{st\_8}; x = 1)$

$T_{st\_8} = T_{F\_8} - BPE\_8$   
 $BPE\_8 = SW\_BPE(T_{F\_8}; S_{F\_8})$   
 $t_{a\_8} = t_{a\_7} - DELTAT\_eff$   
 $cp\_sw\_8 = SW\_SpHeat(T_{F\_8}; S_{F\_8}) * convert(J/kg; kJ/kg)$   
 $h_{D\_8} = Enthalpy(Water; T = T_{st\_8}; x = 0)$

"efecto 9"

$M_{dot\_F\_9} = M_{dot\_B\_8}$   
 $M_{dot\_st\_8} = M_{dot\_D\_9}$   
 $M_{dot\_F\_9} = M_{dot\_st\_9} + M_{dot\_B\_9}$   
 $M_{dot\_F\_9} * S_{F\_9} = M_{dot\_B\_9} * S_{B\_9}$   
 $M_{dot\_st\_8} * h_{st\_8} + M_{dot\_F\_9} * h_{F\_9} -$   
 $M_{dot\_F} * cp\_sw\_9 * DELTAT\_eff = M_{dot\_st\_9} * h_{st\_9} + M_{dot\_B\_9} * h_{B\_9} + M_{dot\_D\_9} * h_{D\_9}$   
 $h_{F\_9} = SW\_Enthalpy(T_{F\_9}; S_{F\_9}) * convert(J/kg; kJ/kg)$   
 $h_{B\_9} = SW\_Enthalpy(T_{B\_9}; S_{B\_9}) * convert(J/kg; kJ/kg)$   
 $S_{F\_9} = S_{B\_8}$   
 $T_{F\_9} = T_{F\_8} - DELTAT\_eff$   
 $T_{B\_9} = T_{st\_9}$   
 $h_{st\_9} = Enthalpy(Water; T = T_{st\_9}; x = 1)$   
 $T_{st\_9} = T_{F\_9} - BPE\_9$   
 $BPE\_9 = SW\_BPE(T_{F\_9}; S_{F\_9})$   
 $t_{a\_9} = t_{a\_8} - DELTAT\_eff$   
 $cp\_sw\_9 = SW\_SpHeat(T_{F\_9}; S_{F\_9}) * convert(J/kg; kJ/kg)$   
 $h_{D\_9} = Enthalpy(Water; T = T_{st\_9}; x = 0)$

"efecto 10"

$M_{dot\_F\_10} = M_{dot\_B\_9}$   
 $M_{dot\_st\_9} = M_{dot\_D\_10}$   
 $M_{dot\_F\_10} = M_{dot\_st\_10} + M_{dot\_B\_10}$   
 $M_{dot\_F\_10} * S_{F\_10} = M_{dot\_B\_10} * S_{B\_10}$   
 $M_{dot\_st\_9} * h_{st\_9} + M_{dot\_F\_10} * h_{F\_10} -$   
 $M_{dot\_F} * cp\_sw\_10 * DELTAT\_eff = M_{dot\_st\_10} * h_{st\_10} + M_{dot\_B\_10} * h_{B\_10} + M_{dot\_D\_10} * h_{D\_10}$   
 $h_{F\_10} = SW\_Enthalpy(T_{F\_10}; S_{F\_10}) * convert(J/kg; kJ/kg)$   
 $h_{B\_10} = SW\_Enthalpy(T_{B\_10}; S_{B\_10}) * convert(J/kg; kJ/kg)$   
 $S_{F\_10} = S_{B\_9}$   
 $T_{F\_10} = T_{F\_9} - DELTAT\_eff$

$T_{B\_10}=T_{st\_10}$   
 $h_{st\_10}=\text{Enthalpy}(\text{Water};T=T_{st\_10};x=1)$   
 $T_{st\_10}=T_{F\_10}-BPE_{10}$   
 $BPE_{10}=\text{SW\_BPE}(T_{F\_10};S_{F\_10})$   
 $t_{a\_10}=t_{a\_9}-\text{DELTAT\_eff}$   
 $cp_{sw\_10}=\text{SW\_SpHeat}(T_{F\_10};S_{F\_10})*\text{convert}(\text{J/kg};\text{kJ/kg})$   
 $h_{D\_10}=\text{Enthalpy}(\text{Water};T=T_{st\_10};x=0)$

"efecto 11"

$M_{dot\_F\_11}=M_{dot\_B\_10}$   
 $M_{dot\_st\_10}=M_{dot\_D\_11}$   
 $M_{dot\_F\_11}=M_{dot\_st\_11}+M_{dot\_B\_11}$   
 $M_{dot\_F\_11}*S_{F\_11}=M_{dot\_B\_11}*S_{B\_11}$   
 $M_{dot\_st\_10}*h_{st\_10}+M_{dot\_F\_11}*h_{F\_11}-$   
 $M_{dot\_F}*cp_{sw\_11}*DELTAT\_eff=M_{dot\_st\_11}*h_{st\_11}+M_{dot\_B\_11}*h_{B\_11}+M_{dot\_D\_11}*h_{D\_11}$   
 $h_{F\_11}=\text{SW\_Enthalpy}(T_{F\_11};S_{F\_11})*\text{convert}(\text{J/kg};\text{kJ/kg})$   
 $h_{B\_11}=\text{SW\_Enthalpy}(T_{B\_11};S_{B\_11})*\text{convert}(\text{J/kg};\text{kJ/kg})$   
 $S_{F\_11}=S_{B\_10}$   
 $T_{F\_11}=T_{F\_10}-\text{DELTAT\_eff}$   
 $T_{B\_11}=T_{st\_11}$   
 $h_{st\_11}=\text{Enthalpy}(\text{Water};T=T_{st\_11};x=1)$   
 $T_{st\_11}=T_{F\_11}-BPE_{11}$   
 $BPE_{11}=\text{SW\_BPE}(T_{F\_11};S_{F\_11})$   
 $t_{a\_11}=t_{a\_10}-\text{DELTAT\_eff}$   
 $cp_{sw\_11}=\text{SW\_SpHeat}(T_{F\_11};S_{F\_11})*\text{convert}(\text{J/kg};\text{kJ/kg})$   
 $h_{D\_11}=\text{Enthalpy}(\text{Water};T=T_{st\_11};x=0)$

"efecto 12"

$M_{dot\_F\_12}=M_{dot\_B\_11}$   
 $M_{dot\_st\_11}=M_{dot\_D\_12}$   
 $M_{dot\_F\_12}=M_{dot\_st\_12}+M_{dot\_B\_12}$   
 $M_{dot\_F\_12}*S_{F\_12}=M_{dot\_B\_12}*S_{B\_12}$   
 $M_{dot\_st\_11}*h_{st\_11}+M_{dot\_F\_12}*h_{F\_12}-$   
 $M_{dot\_F}*cp_{sw\_12}*DELTAT\_eff=M_{dot\_st\_12}*h_{st\_12}+M_{dot\_B\_12}*h_{B\_12}+M_{dot\_D\_12}*h_{D\_12}$   
 $h_{F\_12}=\text{SW\_Enthalpy}(T_{F\_12};S_{F\_12})*\text{convert}(\text{J/kg};\text{kJ/kg})$   
 $h_{B\_12}=\text{SW\_Enthalpy}(T_{B\_12};S_{B\_12})*\text{convert}(\text{J/kg};\text{kJ/kg})$



$S_{F\_12}=S_{B\_11}$   
 $T_{F\_12}=T_{F\_11}-\text{DELTA}T_{\text{eff}}$   
 $T_{B\_12}=T_{st\_12}$   
 $h_{st\_12}=\text{Enthalpy}(\text{Water};T=T_{st\_12};x=1)$   
 $T_{st\_12}=T_{F\_12}-\text{BPE}_{12}$   
 $\text{BPE}_{12}=\text{SW\_BPE}(T_{F\_12};S_{F\_12})$   
 $cp_{sw\_12}=\text{SW\_SpHeat}(T_{F\_12};S_{F\_12})*\text{convert}(\text{J/kg};\text{kJ/kg})$   
 $h_{D\_12}=\text{Enthalpy}(\text{Water};T=T_{st\_12};x=0)$

"Indicadores globales"

$M_{\text{dot}}D=M_{\text{dot}}D_1+M_{\text{dot}}D_2+M_{\text{dot}}D_3+M_{\text{dot}}D_4+M_{\text{dot}}D_5+M_{\text{dot}}D_6+M_{\text{dot}}D_7\{+M_{\text{dot}}D_8+M_{\text{dot}}D_9+M_{\text{dot}}D_{10}+M_{\text{dot}}D_{11}\{+M_{\text{dot}}D_{12}\}}$   
 $PR=M_{\text{dot}}D/Q_{\text{dot}}in_{ev}$   
 $RR=M_{\text{dot}}D/M_{\text{dot}}F$   
 $M_{\text{dot}}steam=(Q_{\text{dot}}req\{+Q_{\text{dot}}req_2\}+Q_{\text{dot}}dis)/h_{fg\_1}$   
 $h_{fg\_1}=\text{Enthalpy\_vaporization}(\text{Water};T=T_{F\_1})$   
 $GOR=M_{\text{dot}}D/M_{\text{dot}}steam$   
 $GOR_2=M_{\text{dot}}D/M_{\text{dot}}steam_2$   
 $M_{\text{dot}}steam_2=(Q_{\text{dot}}req\{+Q_{\text{dot}}req_2\})/(h_{st\_in\_1}-h_{D\_1})$   
 $A_T=A_1+A_2+A_3+A_4+A_5+A_6+A_7\{+A_8+A_9+A_{10}+A_{11}\}\{+A_{12}\}+A_p$   
 $h$   
 $sA=A_T/M_{\text{dot}}D$   
 $\{Q_{\text{dot}}req_T=Q_{\text{dot}}req+Q_{\text{dot}}req_2\}$   
 $S_B=S_{B\_7}$

"Evaporator areas"

$Q_{\text{dot}}in_{ev}=U_1*A_1*LMDT_1$   
 $U_1=1,9695+1,2057*10^{(-2)}*T_{st\_1}-8,5989*10^{(-5)}*T_{st\_1}^2+2,5651*10^{(-7)}*T_{st\_1}^3$   
 $LMDT_1=\text{DELTA}T_{\text{eff}}/\ln((T_v-t_{a\_1})/(T_v-T_{F\_1}))$

$M_{\text{dot}}st_1*(h_{st\_1}-h_{D\_2})=U_2*A_2*(\text{DELTA}T_{\text{eff}}-\text{BPE}_2)$   
 $U_2=1,9695+1,2057*10^{(-2)}*T_{st\_2}-8,5989*10^{(-5)}*T_{st\_2}^2+2,5651*10^{(-7)}*T_{st\_2}^3$

$M_{\text{dot}}st_2*(h_{st\_2}-h_{D\_3})=U_3*A_3*(\text{DELTA}T_{\text{eff}}-\text{BPE}_3)$   
 $U_3=1,9695+1,2057*10^{(-2)}*T_{st\_3}-8,5989*10^{(-5)}*T_{st\_3}^2+2,5651*10^{(-7)}*T_{st\_3}^3$

$$M_{\text{dot\_st\_3}}*(h_{\text{st\_3}}-h_{\text{D\_4}})=U_4*A_4*(\text{DELTAT\_eff}-\text{BPE}_4)$$

$$U_4=1,9695+1,2057*10^{(-2)}*T_{\text{st\_4}}-8,5989*10^{(-5)}*T_{\text{st\_4}}^2+2,5651*10^{(-7)}*T_{\text{st\_4}}^3$$

$$M_{\text{dot\_st\_4}}*(h_{\text{st\_4}}-h_{\text{D\_5}})=U_5*A_5*(\text{DELTAT\_eff}-\text{BPE}_5)$$

$$U_5=1,9695+1,2057*10^{(-2)}*T_{\text{st\_5}}-8,5989*10^{(-5)}*T_{\text{st\_5}}^2+2,5651*10^{(-7)}*T_{\text{st\_5}}^3$$

$$M_{\text{dot\_st\_5}}*(h_{\text{st\_5}}-h_{\text{D\_6}})=U_6*A_6*(\text{DELTAT\_eff}-\text{BPE}_6)$$

$$U_6=1,9695+1,2057*10^{(-2)}*T_{\text{st\_6}}-8,5989*10^{(-5)}*T_{\text{st\_6}}^2+2,5651*10^{(-7)}*T_{\text{st\_6}}^3$$

$$M_{\text{dot\_st\_6}}*(h_{\text{st\_6}}-h_{\text{D\_7}})=U_7*A_7*(\text{DELTAT\_eff}-\text{BPE}_7)$$

$$U_7=1,9695+1,2057*10^{(-2)}*T_{\text{st\_7}}-8,5989*10^{(-5)}*T_{\text{st\_7}}^2+2,5651*10^{(-7)}*T_{\text{st\_7}}^3$$

$$\{M_{\text{dot\_st\_7}}*(h_{\text{st\_7}}-h_{\text{D\_8}})=U_8*A_8*(\text{DELTAT\_eff}-\text{BPE}_8)$$

$$U_8=1,9695+1,2057*10^{(-2)}*T_{\text{st\_8}}-8,5989*10^{(-5)}*T_{\text{st\_8}}^2+2,5651*10^{(-7)}*T_{\text{st\_8}}^3$$

$$M_{\text{dot\_st\_8}}*(h_{\text{st\_8}}-h_{\text{D\_9}})=U_9*A_9*(\text{DELTAT\_eff}-\text{BPE}_9)$$

$$U_9=1,9695+1,2057*10^{(-2)}*T_{\text{st\_9}}-8,5989*10^{(-5)}*T_{\text{st\_9}}^2+2,5651*10^{(-7)}*T_{\text{st\_9}}^3$$

$$M_{\text{dot\_st\_9}}*(h_{\text{st\_9}}-h_{\text{D\_10}})=U_{10}*A_{10}*(\text{DELTAT\_eff}-\text{BPE}_{10})$$

$$U_{10}=1,9695+1,2057*10^{(-2)}*T_{\text{st\_10}}-8,5989*10^{(-5)}*T_{\text{st\_10}}^2+2,5651*10^{(-7)}*T_{\text{st\_10}}^3$$

$$M_{\text{dot\_st\_10}}*(h_{\text{st\_10}}-h_{\text{D\_11}})=U_{11}*A_{11}*(\text{DELTAT\_eff}-\text{BPE}_{11})$$

$$U_{11}=1,9695+1,2057*10^{(-2)}*T_{\text{st\_11}}-8,5989*10^{(-5)}*T_{\text{st\_11}}^2+2,5651*10^{(-7)}*T_{\text{st\_11}}^3$$

$$M_{\text{dot\_st\_11}}*(h_{\text{st\_11}}-h_{\text{D\_11}})=U_{12}*A_{12}*(\text{DELTAT\_eff}-\text{BPE}_{12})$$

$$U_{12}=1,9695+1,2057*10^{(-2)}*T_{\text{st\_12}}-8,5989*10^{(-5)}*T_{\text{st\_12}}^2+2,5651*10^{(-7)}*T_{\text{st\_12}}^3\}$$

"preheaters area"

$$U_{\text{ph}}=-0,000540399+M_{\text{dot\_F}}*0,836569$$

$$M_{\text{dot}}F*cp_{\text{sw}_1}*DELTA T_{\text{eff}}=U_{\text{ph}}*A_{\text{ph}_1}*LMDT_1$$

$$M_{\text{dot}}F*cp_{\text{sw}_2}*DELTA T_{\text{eff}}=U_{\text{ph}}*A_{\text{ph}_2}*LMDT_2$$

$$LMDT_2=DELTA t_{\text{eff}}/\ln((T_{\text{st}_2}-t_{\text{a}_3})/(T_{\text{st}_2}-t_{\text{a}_2}))$$

$$M_{\text{dot}}F*cp_{\text{sw}_3}*DELTA T_{\text{eff}}=U_{\text{ph}}*A_{\text{ph}_3}*LMDT_3$$

$$LMDT_3=DELTA t_{\text{eff}}/\ln((T_{\text{st}_3}-t_{\text{a}_4})/(T_{\text{st}_3}-t_{\text{a}_3}))$$

$$M_{\text{dot}}F*cp_{\text{sw}_4}*DELTA T_{\text{eff}}=U_{\text{ph}}*A_{\text{ph}_4}*LMDT_4$$

$$LMDT_4=DELTA t_{\text{eff}}/\ln((T_{\text{st}_4}-t_{\text{a}_5})/(T_{\text{st}_4}-t_{\text{a}_4}))$$

$$M_{\text{dot}}F*cp_{\text{sw}_5}*DELTA T_{\text{eff}}=U_{\text{ph}}*A_{\text{ph}_5}*LMDT_5$$

$$LMDT_5=DELTA t_{\text{eff}}/\ln((T_{\text{st}_5}-t_{\text{a}_6})/(T_{\text{st}_5}-t_{\text{a}_5}))$$

$$M_{\text{dot}}F*cp_{\text{sw}_6}*DELTA T_{\text{eff}}=U_{\text{ph}}*A_{\text{ph}_6}*LMDT_6$$

$$LMDT_6=DELTA t_{\text{eff}}/\ln((T_{\text{st}_6}-t_{\text{a}_7})/(T_{\text{st}_6}-t_{\text{a}_6}))$$

$$\{M_{\text{dot}}F*cp_{\text{sw}_7}*DELTA T_{\text{eff}}=U_{\text{ph}}*A_{\text{ph}_7}*LMDT_7$$

$$LMDT_7=DELTA t_{\text{eff}}/\ln((T_{\text{st}_7}-t_{\text{a}_8})/(T_{\text{st}_7}-t_{\text{a}_7}))$$

$$M_{\text{dot}}F*cp_{\text{sw}_8}*DELTA T_{\text{eff}}=U_{\text{ph}}*A_{\text{ph}_8}*LMDT_8$$

$$LMDT_8=DELTA t_{\text{eff}}/\ln((T_{\text{st}_8}-t_{\text{a}_9})/(T_{\text{st}_8}-t_{\text{a}_8}))$$

$$M_{\text{dot}}F*cp_{\text{sw}_9}*DELTA T_{\text{eff}}=U_{\text{ph}}*A_{\text{ph}_9}*LMDT_9$$

$$LMDT_9=DELTA t_{\text{eff}}/\ln((T_{\text{st}_9}-t_{\text{a}_{10}})/(T_{\text{st}_9}-t_{\text{a}_9}))$$

$$M_{\text{dot}}F*cp_{\text{sw}_{10}}*DELTA T_{\text{eff}}=U_{\text{ph}}*A_{\text{ph}_{10}}*LMDT_{10}$$

$$LMDT_{10}=DELTA t_{\text{eff}}/\ln((T_{\text{st}_{10}}-t_{\text{a}_{11}})/(T_{\text{st}_{10}}-t_{\text{a}_{10}}))$$

$$M_{\text{dot}}F*cp_{\text{sw}_{11}}*DELTA T_{\text{eff}}=U_{\text{ph}}*A_{\text{ph}_{11}}*LMDT_{11}$$

$$LMDT_{11}=DELTA t_{\text{eff}}/\ln((T_{\text{st}_{11}}-t_{\text{a}_{12}})/(T_{\text{st}_{11}}-t_{\text{a}_{11}}))\}$$

$$A_{\text{ph}}=A_{\text{ph}_1}+A_{\text{ph}_2}+A_{\text{ph}_3}+A_{\text{ph}_4}+A_{\text{ph}_5}+A_{\text{ph}_6}\{+A_{\text{ph}_7}+A_{\text{ph}_8}+A_{\text{ph}_9}+A_{\text{ph}_{10}}+A_{\text{ph}_{11}}\}$$

"feed heaters inlet"

$$M_{\text{dot}}D*h_D=M_{\text{dot}}D_1*h_{D_1}+M_{\text{dot}}D_2*h_{D_2}+M_{\text{dot}}D_3*h_{D_3}+M_{\text{dot}}D_4*h_{D_4}+M_{\text{dot}}D_5*h_{D_5}+M_{\text{dot}}D_6*h_{D_6}+M_{\text{dot}}D_7*h_{D_7}\{+M_{\text{dot}}D_8*h_{D_8}+M_{\text{dot}}D_9*h_{D_9}+M_{\text{dot}}D_{10}*h_{D_{10}}+M_{\text{dot}}D_{11}*h_{D_{11}}\}$$

$$t_{D_8} \cdot h_{D_8} + M_{\dot{D}_9} \cdot h_{D_9} + M_{\dot{D}_{10}} \cdot h_{D_{10}} + M_{\dot{D}_{11}} \cdot h_{D_{11}} \{ \&1$$

$$M_{\dot{D}_{12}} \cdot h_{D_{12}} \}$$

$$T_D = \text{Temperature}(\text{Water}; h = h_D; x = 0)$$

$$P_D = \text{Pressure}(\text{Water}; h = h_D; x = 0)$$

$$\{ T_{F_{out\_ph}} = 36 \}$$

$$P_B = P_{\text{sat}}(\text{Water}; T = T_{F_7})$$

$$M_{\dot{B}} = M_{\dot{B}_7}$$

$$M_{\dot{B}} \cdot c_{p\_sw\_7} \cdot (T_B - T_{B_{out\_ph}}) = M_{\dot{F}} \cdot c_{p\_sw\_1} \cdot (T_{F_{out\_ph1}} - T_F)$$

$$T_{B_{out\_ph}} - T_{F_{out\_ph1}} = 5$$

$$M_{\dot{F}} \cdot c_{p\_sw\_1} \cdot (T_{F_{out\_ph}} - T_{F_{in\_ph}}) = M_{\dot{D}} \cdot 4,18 \cdot (T_D - T_{D_{out\_ph}})$$

$$T_{D_{out\_ph}} - T_{F_{out\_ph}} = 5$$

$$\{ \dot{Q}_{req\_2} = M_{\dot{F}} \cdot c_{p\_sw\_1} \cdot (T_{FF} - T_{F_{out\_ph}}) \}$$

$$T_{D_{out\_ph}} = 50$$

### "Compressor"

$$\dot{W}_{cp} = M_{\dot{st}_7} \cdot (h_{st_{in\_1}} - h_{st_7})$$

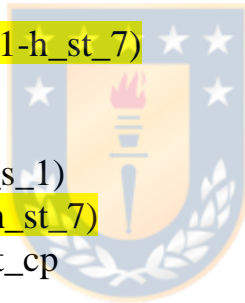
$$s_7 = \text{Entropy}(\text{Water}; x = 1; P = P_B)$$

$$s_{s_1} = s_7$$

$$h_{1s} = \text{Enthalpy}(\text{Water}; P = P_1; s = s_{s_1})$$

$$\dot{W}_{cp\_s} = M_{\dot{st}_1} \cdot (h_{1s} - h_{st_7})$$

$$\epsilon_{s\_cp} = \dot{W}_{cp\_s} / \dot{W}_{cp}$$



$$Z_1 = c \cdot A_T^{\gamma}$$

$$\gamma = 0,95$$

$$c = 300$$

$$Z_2 = 800 \cdot M_{\dot{p\_dia}}$$

$$M_{\dot{p\_dia}} = M_{\dot{D}} \cdot 3,6 \cdot 24$$

$$Z = Z_1 + Z_2$$

$$CRF = k \cdot (1+k)^{n_r} / ((1+k)^{n_r} - 1)$$

$$k = 0,15$$

$$n_r = 30$$

$$Z_{clp} = Z \cdot 890$$

$$\text{Prod} = M_{\dot{D}} \cdot 3,6 \cdot 24 \cdot 365 \cdot 400 \cdot 0,9$$

$$\text{Costo} = 100 \cdot 0,9 \cdot \dot{W}_{cp} \cdot 2$$

$$(\text{Prod} - \text{Costo}) \cdot \text{Payback} - Z_{clp} = 0$$

$$h_0 = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T = 18; P = 101)$$

s\_0=Entropy(Water;T=18;P=101)  
T\_0\_K=291

"análisis exergético"

{M\_dot\_st\_7\*(s\_st\_in\_1-s\_D\_1)+s\_F\_1-}

Ex\_F=M\_dot\_F/N\*(h\_F\_1-h\_0-T\_0\_K\*(s\_F1-s\_0))  
s\_F1=SW\_Entropy(T\_F\_1;S\_F)\*convert(J/kg;kJ/kg)

Ex\_Fu\_1=M\_dot\_st\_1\*(h\_st\_in\_1-h\_D\_1-T\_0\_K\*(s\_st\_in1-s\_D\_1))  
s\_st\_in1=Entropy(Water;T=210;P=P\_1)  
s\_D\_1=Entropy(Water;x=0;P=P\_1)

Ex\_B\_1=M\_dot\_B\_1\*(h\_B\_1-h\_0-T\_0\_K\*(s\_B1-s\_0))  
s\_B1=SW\_Entropy(T\_B\_1;S\_B\_1)\*convert(J/kg;kJ/kg)

Ex\_Pr\_1=M\_dot\_st\_1\*(h\_st\_1-h\_0-T\_0\_K\*(s\_st1-s\_0))  
s\_st1=Entropy(Water;x=1;P=P\_1)

Ex\_prod\_1=Ex\_Pr\_1-Ex\_F+Ex\_B\_1

{Ex\_1A=(h\_st\_in\_1-h\_0-T\_0\_K\*(s\_1A-s\_0))\*M\_dot\_st\_7  
s\_1A=Entropy(Water;T=210;P=P\_1)

Ex\_1B=(h\_st\_1B-h\_0-T\_0\_K\*(s\_1B-s\_0))\*M\_dot\_st\_7  
h\_st\_1B=Enthalpy(Water;x=0;P=P\_1)  
s\_1B=Entropy(Water;x=0;P=P\_1)

Ex\_2A=(h\_F\_1-h\_0-T\_0\_K\*(s\_2A-s\_0))\*M\_dot\_st\_1  
s\_2A=Entropy(Water;x=0;T=TBT)

Ex\_2B=(h\_st\_1-h\_0-T\_0\_K\*(s\_2B-s\_0))\*M\_dot\_st\_1  
s\_2B=Entropy(Water;x=1;T=TBT)

eta\_2\_1=(Ex\_2B-Ex\_2A)/(Ex\_1A-Ex\_1B)

Ex\_1A\_2=(h\_st\_2-h\_0-T\_0\_K\*(s\_1A\_2-s\_0))\*M\_dot\_st\_1  
s\_1A\_2=Entropy(Water;T=T\_F\_2;x=1)

$$\begin{aligned} Ex_{1B\_2} &= (h_{st\_1B\_2} - h_0 - T_0 K (s_{1B\_2} - s_0)) * M_{dot\_st\_1} \\ h_{st\_1B\_2} &= \text{Enthalpy}(\text{Water}; x=0; T=T_{F\_2}) \\ s_{1B\_2} &= \text{Entropy}(\text{Water}; x=0; T=T_{F\_2}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Ex_{2A\_2} &= (h_{F\_2} - h_0 - T_0 K (s_{2A\_2} - s_0)) * M_{dot\_st\_2} \\ s_{2A\_2} &= \text{Entropy}(\text{Water}; x=0; P=P_2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Ex_{2B\_2} &= (h_{st\_2} - h_0 - T_0 K (s_{2B\_2} - s_0)) * M_{dot\_st\_2} \\ s_{2B\_2} &= \text{Entropy}(\text{Water}; x=1; P=P_2) \end{aligned}$$

$$\eta_{2\_2} = (Ex_{2B\_2} - Ex_{2A\_2}) / (Ex_{1A\_2} - Ex_{1B\_2})$$

$$\begin{aligned} Ex_{1A\_3} &= (h_{st\_3} - h_0 - T_0 K (s_{1A\_3} - s_0)) * M_{dot\_st\_2} \\ s_{1A\_3} &= \text{Entropy}(\text{Water}; T=T_{F\_3}; x=1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Ex_{1B\_3} &= (h_{st\_1B\_3} - h_0 - T_0 K (s_{1B\_3} - s_0)) * M_{dot\_st\_2} \\ h_{st\_1B\_3} &= \text{Enthalpy}(\text{Water}; x=0; T=T_{F\_3}) \\ s_{1B\_3} &= \text{Entropy}(\text{Water}; x=0; T=T_{F\_3}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Ex_{2A\_3} &= (h_{F\_3} - h_0 - T_0 K (s_{2A\_3} - s_0)) * M_{dot\_st\_3} \\ s_{2A\_3} &= \text{Entropy}(\text{Water}; x=0; P=P_3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Ex_{2B\_3} &= (h_{st\_3} - h_0 - T_0 K (s_{2B\_3} - s_0)) * M_{dot\_st\_3} \\ s_{2B\_3} &= \text{Entropy}(\text{Water}; x=1; P=P_3) \end{aligned}$$

$$\eta_{2\_3} = (Ex_{2B\_3} - Ex_{2A\_3}) / (Ex_{1A\_3} - Ex_{1B\_3})$$

$$\begin{aligned} Ex_{1A\_4} &= (h_{st\_4} - h_0 - T_0 K (s_{1A\_4} - s_0)) * M_{dot\_st\_4} \\ s_{1A\_4} &= \text{Entropy}(\text{Water}; T=T_{F\_4}; x=1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Ex_{1B\_4} &= (h_{st\_1B\_4} - h_0 - T_0 K (s_{1B\_4} - s_0)) * M_{dot\_st\_4} \\ h_{st\_1B\_4} &= \text{Enthalpy}(\text{Water}; x=0; T=T_{F\_4}) \\ s_{1B\_4} &= \text{Entropy}(\text{Water}; x=0; T=T_{F\_4}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Ex_{2A\_4} &= (h_{F\_4} - h_0 - T_0 K (s_{2A\_4} - s_0)) * M_{dot\_st\_5} \\ s_{2A\_4} &= \text{Entropy}(\text{Water}; x=0; P=P_4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Ex_{2B\_4} &= (h_{st\_4} - h_0 - T_0 K (s_{2B\_4} - s_0)) * M_{dot\_st\_5} \\ s_{2B\_4} &= \text{Entropy}(\text{Water}; x=1; P=P_4) \end{aligned}$$

$$\eta_{2,4} = (\text{Ex}_{2B,4} - \text{Ex}_{2A,4}) / (\text{Ex}_{1A,4} - \text{Ex}_{1B,4})$$

$$\begin{aligned} \text{Ex}_{1A,5} &= (h_{st,5} - h_0 - T_0 K * (s_{1A,5} - s_0)) * M_{dot,st,5} \\ s_{1A,5} &= \text{Entropy}(\text{Water}; T=T_{F,5}; x=1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Ex}_{1B,5} &= (h_{st,1B,5} - h_0 - T_0 K * (s_{1B,5} - s_0)) * M_{dot,st,5} \\ h_{st,1B,5} &= \text{Enthalpy}(\text{Water}; x=0; T=T_{F,5}) \\ s_{1B,5} &= \text{Entropy}(\text{Water}; x=0; T=T_{F,5}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Ex}_{2A,5} &= (h_{F,5} - h_0 - T_0 K * (s_{2A,5} - s_0)) * M_{dot,st,6} \\ s_{2A,5} &= \text{Entropy}(\text{Water}; x=0; P=P_5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Ex}_{2B,5} &= (h_{st,5} - h_0 - T_0 K * (s_{2B,5} - s_0)) * M_{dot,st,6} \\ s_{2B,5} &= \text{Entropy}(\text{Water}; x=1; P=P_5) \end{aligned}$$

$$\eta_{2,5} = (\text{Ex}_{2B,5} - \text{Ex}_{2A,5}) / (\text{Ex}_{1A,5} - \text{Ex}_{1B,5})$$

$$\begin{aligned} \text{Ex}_{1A,6} &= (h_{st,6} - h_0 - T_0 K * (s_{1A,6} - s_0)) * M_{dot,st,6} \\ s_{1A,6} &= \text{Entropy}(\text{Water}; T=T_{F,6}; x=1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Ex}_{1B,6} &= (h_{st,1B,6} - h_0 - T_0 K * (s_{1B,6} - s_0)) * M_{dot,st,6} \\ h_{st,1B,6} &= \text{Enthalpy}(\text{Water}; x=0; T=T_{F,6}) \\ s_{1B,6} &= \text{Entropy}(\text{Water}; x=0; T=T_{F,6}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Ex}_{2A,6} &= (h_{F,6} - h_0 - T_0 K * (s_{2A,6} - s_0)) * M_{dot,st,7} \\ s_{2A,6} &= \text{Entropy}(\text{Water}; x=0; P=P_6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Ex}_{2B,6} &= (h_{st,6} - h_0 - T_0 K * (s_{2B,6} - s_0)) * M_{dot,st,7} \\ s_{2B,6} &= \text{Entropy}(\text{Water}; x=1; P=P_6) \end{aligned}$$

$$\eta_{2,6} = (\text{Ex}_{2B,6} - \text{Ex}_{2A,6}) / (\text{Ex}_{1A,6} - \text{Ex}_{1B,6})$$

$$\begin{aligned} \text{Ex}_{1A,7} &= (h_{st,7} - h_0 - T_0 K * (s_{1A,7} - s_0)) * M_{dot,st,7} \\ s_{1A,7} &= \text{Entropy}(\text{Water}; T=T_{F,7}; x=1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Ex}_{1B,7} &= (h_{st,1B,7} - h_0 - T_0 K * (s_{1B,7} - s_0)) * M_{dot,st,7} \\ h_{st,1B,7} &= \text{Enthalpy}(\text{Water}; x=0; T=T_{F,7}) \\ s_{1B,7} &= \text{Entropy}(\text{Water}; x=0; T=T_{F,7}) \end{aligned}$$

$$\text{Ex}_{2A,7} = (h_{F,7} - h_0 - T_0 K * (s_{2A,7} - s_0)) * M_{dot,st,1}$$

$$s_{2A_7} = \text{Entropy}(\text{Water}; x=0; P=P_7)$$

$$\text{Ex}_{2B_7} = (h_{st_7} - h_0 - T_0 \cdot K \cdot (s_{2B_7} - s_0)) \cdot \dot{M}_{st_1}$$

$$s_{2B_7} = \text{Entropy}(\text{Water}; x=1; P=P_7)$$

$$\eta_{2_7} = (\text{Ex}_{2B_7} - \text{Ex}_{2A_7}) / (\text{Ex}_{1A_7} - \text{Ex}_{1B_7})$$

$$\eta_{2\_total} = (\text{Ex}_{2B_7} - \text{Ex}_{2A_7}) / (\text{Ex}_{1A} - \text{Ex}_{1B})$$

## Anexo 2.2. Código EES Sistema de desalinización con alimentación paralela cruzada.

$$Q_{dot\_in\_ev} = 35000$$

$$TBT = 71$$

$$S_F = 36$$

$$N = 7$$

$$\text{DELTAT}_{eff} = (TBT - T_B) / (N - 1)$$

$$\{T_B = T_{FF}\}$$

$$T_{F_0} = 18$$

$$\dot{M}_{dot\_F} = 280$$

$$\{T_B = T_F\}$$



"Efecto 1"

$$T_{st_1} = TBT$$

$$T_{in_1} = T_F$$

$$T_{st_1} = T_{B_1}$$

$$\dot{M}_{dot\_F_1} = \dot{M}_{dot\_F} / N$$

$$\dot{M}_{dot\_F_1} = \dot{M}_{dot\_B_1} + \dot{M}_{dot\_st_1}$$

$$\dot{M}_{dot\_F_1} \cdot S_F = \dot{M}_{dot\_B_1} \cdot S_{B_1}$$

$$\dot{M}_{dot\_F_1} \cdot h_{F_1} + Q_{dot\_in\_ev} = \dot{M}_{dot\_B_1} \cdot h_{B_1} + \dot{M}_{dot\_st_1} \cdot h_{st_1}$$

$$h_{F_1} = \text{SW\_Enthalpy}(T_F; S_F) \cdot \text{convert}(\text{J/kg}; \text{kJ/kg})$$

$$h_{B_1} = \text{SW\_Enthalpy}(T_{B_1}; S_{B_1}) \cdot \text{convert}(\text{J/kg}; \text{kJ/kg})$$

$$h_{st_1} = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T=T_{st_1}; x=1)$$

$$P_1 = P_{sat}(\text{Water}; T=T_{st_1})$$

"heat transfer area"

$$Q_{dot\_in\_ev} = U_1 \cdot A_1 \cdot (\text{DELTAT}_{eff} - BPE_1)$$



$$BPE_1 = SW\_BPE(T_1; S\_B_1)$$

$$U_1 * 1000 = 1961,9 + 12,6 * (T_{st_1}) - 9,6 * 10^{(-3)} * T_{st_1}^2 + 3,16 * 10^{(-4)} * T_{st_1}^3$$

$$h_{fg_1} = \text{Enthalpy\_vaporization}(\text{Water}; T = T_1)$$

$$T_1 = T_{st_1} - BPE_1$$

### "Efecto 2"

$$T_{st_1} - \Delta T_{eff} = T_{B_2}$$

$$T_{st_2} = T_{B_2}$$

$$T_{D_2} = T_{st_1}$$

$$T_{in_2} = T_F$$

$$M_{dot\_F_2} = M_{dot\_F}/N$$

$$M_{dot\_F_2} + M_{dot\_B_1} = M_{dot\_B_2} + M_{dot\_st_2}$$

$$M_{dot\_D_2} = M_{dot\_st_1}$$

$$M_{dot\_B_1} * S_{B_1} + M_{dot\_F_2} * S_F = M_{dot\_B_2} * S_{B_2}$$

$$M_{dot\_F_2} * h_{F_2} + M_{dot\_B_1} * h_{B_1} + M_{dot\_st_1} * h_{st_1} = M_{dot\_st_2} * h_{st_2} + M_{dot\_B_2} * h_{B_2} + M_{dot\_D_2} * h_{D_2}$$

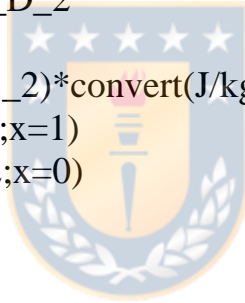
$$h_{F_2} = h_{F_1}$$

$$h_{B_2} = SW\_Enthalpy(T_{B_2}; S_{B_2}) * \text{convert}(J/kg; kJ/kg)$$

$$h_{st_2} = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T = T_{st_2}; x = 1)$$

$$h_{D_2} = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T = T_{D_2}; x = 0)$$

$$P_2 = P_{sat}(\text{Water}; T = T_{st_2})$$



### "heat transfer area"

$$M_{dot\_st_1} * h_{fg_1} = U_2 * A_2 * (\Delta T_{eff} - BPE_2)$$

$$BPE_2 = SW\_BPE(T_2; S_{B_2})$$

$$U_2 * 1000 = 1961,9 + 12,6 * (T_{st_2}) - 9,6 * 10^{(-3)} * T_{st_2}^2 + 3,16 * 10^{(-4)} * T_{st_2}^3$$

$$h_{fg_2} = \text{Enthalpy\_vaporization}(\text{Water}; T = T_2)$$

$$T_2 = T_{st_2} - BPE_2$$

### "Efecto 3"

$$T_{st_2} - \Delta T_{eff} = T_{B_3}$$

$$T_{st_3} = T_{B_3}$$

$$T_{D_3} = T_{st_2}$$

$$T_{in_3} = T_F$$

$$M_{dot\_F_3} = M_{dot\_F}/N$$

$$M_{dot\_F_3} + M_{dot\_B_2} = M_{dot\_B_3} + M_{dot\_st_3}$$

$$M_{dot\_D_3} = M_{dot\_st_2}$$

$$M_{dot\_B_2} * S_{B_2} + M_{dot\_F_3} * S_F = M_{dot\_B_3} * S_{B_3}$$

$$M_{\dot{F}_3}h_{F_3}+M_{\dot{B}_2}h_{B_2}+M_{\dot{st}_2}h_{st_2}=M_{\dot{st}_3}h_{st_3}+M_{\dot{B}_3}h_{B_3}+M_{\dot{D}_3}h_{D_3}$$

$$h_{F_3}=h_{F_2}$$

$$h_{B_3}=SW\_Enthalpy(T_{B_3};S_{B_3})*convert(J/kg;kJ/kg)$$

$$h_{st_3}=Enthalpy(Water;T=T_{st_3};x=1)$$

$$h_{D_3}=Enthalpy(Water;T=T_{D_3};x=0)$$

$$P_3=P_{sat}(Water;T=T_{st_3})$$

"heat transfer area"

$$M_{\dot{st}_2}h_{fg_2}=U_3*A_3*(\Delta T_{eff}-BPE_3)$$

$$BPE_3=SW\_BPE(T_3;S_{B_3})$$

$$U_3*1000=1961,9+12,6*(T_{st_3})-9,6*10^{(-3)}*T_{st_3}^2+3,16*10^{(-4)}*T_{st_3}^3$$

$$h_{fg_3}=Enthalpy\_vaporization(Water;T=T_3)$$

$$T_3=T_{st_3}-BPE_3$$

"Efecto 4"

$$T_{st_3}-\Delta T_{eff}=T_{B_4}$$

$$T_{st_4}=T_{B_4}$$

$$T_{D_4}=T_{st_3}$$

$$T_{in_4}=T_F$$

$$M_{\dot{F}_4}=M_{\dot{F}}/N$$

$$M_{\dot{F}_4}+M_{\dot{B}_3}=M_{\dot{B}_4}+M_{\dot{st}_4}$$

$$M_{\dot{D}_4}=M_{\dot{st}_3}$$

$$M_{\dot{B}_3}S_{B_3}+M_{\dot{F}_4}S_F=M_{\dot{B}_4}S_{B_4}$$

$$M_{\dot{F}_4}h_{F_4}+M_{\dot{B}_3}h_{B_3}+M_{\dot{st}_3}h_{st_3}=M_{\dot{st}_4}h_{st_4}+M_{\dot{B}_4}h_{B_4}+M_{\dot{D}_4}h_{D_4}$$

$$h_{F_4}=h_{F_3}$$

$$h_{B_4}=SW\_Enthalpy(T_{B_4};S_{B_4})*convert(J/kg;kJ/kg)$$

$$h_{st_4}=Enthalpy(Water;T=T_{st_4};x=1)$$

$$h_{D_4}=Enthalpy(Water;T=T_{D_4};x=0)$$

$$P_4=P_{sat}(Water;T=T_{st_4})$$



"heat transfer area"

$$M_{\dot{st}_3}h_{fg_3}=U_4*A_4*(\Delta T_{eff}-BPE_4)$$

$$BPE_4=SW\_BPE(T_4;S_{B_4})$$

$$U_4*1000=1961,9+12,6*(T_{st_4})-9,6*10^{(-3)}*T_{st_4}^2+3,16*10^{(-4)}*T_{st_4}^3$$

$$h_{fg_4}=Enthalpy\_vaporization(Water;T=T_4)$$

$$T_4=T_{st_4}-BPE_4$$

**"Efecto 5"**

$$T_{st\_4} - \Delta T_{eff} = T_{B\_5}$$

$$T_{st\_5} = T_{B\_5}$$

$$T_{D\_5} = T_{st\_4}$$

$$T_{in\_5} = T_F$$

$$\dot{M}_{F\_5} = \dot{M}_{F/N}$$

$$\dot{M}_{F\_5} + \dot{M}_{B\_4} = \dot{M}_{B\_5} + \dot{M}_{st\_5}$$

$$\dot{M}_{D\_5} = \dot{M}_{st\_4}$$

$$\dot{M}_{B\_4} * S_{B\_4} + \dot{M}_{F\_5} * S_F = \dot{M}_{B\_5} * S_{B\_5}$$

$$\dot{M}_{F\_5} * h_{F\_5} + \dot{M}_{B\_4} * h_{B\_4} + \dot{M}_{st\_4} * h_{st\_4} = \dot{M}_{st\_5} * h_{st\_5} + \dot{M}_{B\_5} * h_{B\_5} + \dot{M}_{D\_5} * h_{D\_5}$$

$$h_{F\_5} = h_{F\_4}$$

$$h_{B\_5} = SW\_Enthalpy(T_{B\_5}; S_{B\_5}) * \text{convert}(J/kg; kJ/kg)$$

$$h_{st\_5} = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T=T_{st\_5}; x=1)$$

$$h_{D\_5} = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T=T_{D\_5}; x=0)$$

$$P_5 = P_{sat}(\text{Water}; T=T_{st\_5})$$

**"heat transfer area"**

$$\dot{M}_{st\_4} * h_{fg\_4} = U_5 * A_5 * (\Delta T_{eff} - BPE_5)$$

$$BPE_5 = SW\_BPE(T_5; S_{B\_5})$$

$$U_5 * 1000 = 1961,9 + 12,6 * (T_{st\_5}) - 9,6 * 10^{(-3)} * T_{st\_5}^2 + 3,16 * 10^{(-4)} * T_{st\_5}^3$$

$$h_{fg\_5} = \text{Enthalpy\_vaporization}(\text{Water}; T=T_5)$$

$$T_5 = T_{st\_5} - BPE_5$$

**"Efecto 6"**

$$T_{st\_5} - \Delta T_{eff} = T_{B\_6}$$

$$T_{st\_6} = T_{B\_6}$$

$$T_{D\_6} = T_{st\_5}$$

$$T_{in\_6} = T_F$$

$$\dot{M}_{F\_6} = \dot{M}_{F/N}$$

$$\dot{M}_{F\_6} + \dot{M}_{B\_5} = \dot{M}_{B\_6} + \dot{M}_{st\_6}$$

$$\dot{M}_{D\_6} = \dot{M}_{st\_5}$$

$$\dot{M}_{B\_5} * S_{B\_5} + \dot{M}_{F\_6} * S_F = \dot{M}_{B\_6} * S_{B\_6}$$

$$\dot{M}_{F\_6} * h_{F\_6} + \dot{M}_{B\_5} * h_{B\_5} + \dot{M}_{st\_5} * h_{st\_5} = \dot{M}_{st\_6} * h_{st\_6} + \dot{M}_{B\_6} * h_{B\_6} + \dot{M}_{D\_6} * h_{D\_6}$$

$$h_{F\_6} = h_{F\_5}$$

$$h_{B\_6} = SW\_Enthalpy(T_{B\_6}; S_{B\_6}) * \text{convert}(J/kg; kJ/kg)$$

$$h_{st\_6} = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T=T_{st\_6}; x=1)$$

$$h_{D_6} = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T = T_{D_6}; x = 0)$$

$$P_6 = P_{\text{sat}}(\text{Water}; T = T_{st_6})$$

"heat transfer area"

$$M_{\text{dot}_{st_5}} * h_{fg_5} = U_6 * A_6 * (\text{DELTA}T_{\text{eff}} - \text{BPE}_6)$$

$$\text{BPE}_6 = \text{SW\_BPE}(T_6; S_{B_6})$$

$$U_6 * 1000 = 1961,9 + 12,6 * (T_{st_6}) - 9,6 * 10^{(-3)} * T_{st_6}^2 + 3,16 * 10^{(-4)} * T_{st_6}^3$$

$$h_{fg_6} = \text{Enthalpy\_vaporization}(\text{Water}; T = T_6)$$

$$T_6 = T_{st_6} - \text{BPE}_6$$

"Efecto 7"

$$T_{st_6} - \text{DELTA}T_{\text{eff}} = T_{B_7}$$

$$T_{st_7} = T_{B_7}$$

$$T_{D_7} = T_{st_6}$$

$$T_{in_7} = T_F$$

$$M_{\text{dot}_{F_7}} = M_{\text{dot}_{F/N}}$$

$$M_{\text{dot}_{F_7}} + M_{\text{dot}_{B_6}} = M_{\text{dot}_{B_7}} + M_{\text{dot}_{st_7}}$$

$$M_{\text{dot}_{D_7}} = M_{\text{dot}_{st_6}}$$

$$M_{\text{dot}_{B_6}} * S_{B_6} + M_{\text{dot}_{F_7}} * S_F = M_{\text{dot}_{B_7}} * S_{B_7}$$

$$M_{\text{dot}_{F_7}} * h_{F_7} + M_{\text{dot}_{B_6}} * h_{B_6} + M_{\text{dot}_{st_6}} * h_{st_6} = M_{\text{dot}_{st_7}} * h_{st_7} + M_{\text{dot}_{B_7}} * h_{B_7} + M_{\text{dot}_{D_7}} * h_{D_7}$$

$$h_{F_7} = h_{F_6}$$

$$h_{B_7} = \text{SW\_Enthalpy}(T_{B_7}; S_{B_7}) * \text{convert}(\text{J/kg}; \text{kJ/kg})$$

$$h_{st_7} = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T = T_{st_7}; x = 1)$$

$$h_{D_7} = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T = T_{D_7}; x = 0)$$

$$P_7 = P_{\text{sat}}(\text{Water}; T = T_{st_7})$$

"heat transfer area"

$$M_{\text{dot}_{st_6}} * h_{fg_6} = U_7 * A_7 * (\text{DELTA}T_{\text{eff}} - \text{BPE}_7)$$

$$\text{BPE}_7 = \text{SW\_BPE}(T_7; S_{B_7})$$

$$U_7 * 1000 = 1961,9 + 12,6 * (T_{st_7}) - 9,6 * 10^{(-3)} * T_{st_7}^2 + 3,16 * 10^{(-4)} * T_{st_7}^3$$

$$h_{fg_7} = \text{Enthalpy\_vaporization}(\text{Water}; T = T_7)$$

$$T_7 = T_{st_7} - \text{BPE}_7$$

{"Efecto 8"

$$T_{st_7} - \text{DELTA}T_{\text{eff}} = T_{B_8}$$

$$T_{st_8} = T_{B_8}$$

$$T_{D_8} = T_{st_7}$$

$$T_{in\_8}=T_F$$

$$M_{dot\_F\_8}=M_{dot\_F}/N$$

$$M_{dot\_F\_8}+M_{dot\_B\_7}=M_{dot\_B\_8}+M_{dot\_st\_8}$$

$$M_{dot\_D\_8}=M_{dot\_st\_7}$$

$$M_{dot\_B\_7}*S_{B\_7}+M_{dot\_F\_8}*S_F=M_{dot\_B\_8}*S_{B\_8}$$

$$M_{dot\_F\_8}*h_{F\_8}+M_{dot\_B\_7}*h_{B\_7}+M_{dot\_st\_7}*h_{st\_7}=M_{dot\_st\_8}*h_{st\_8}+M_{dot\_B\_8}*h_{B\_8}+M_{dot\_D\_8}*h_{D\_8}$$

$$h_{F\_8}=h_{F\_7}$$

$$h_{B\_8}=SW\_Enthalpy(T_{B\_8};S_{B\_8})*convert(J/kg;kJ/kg)$$

$$h_{st\_8}=Enthalpy(Water;T=T_{st\_8};x=1)$$

$$h_{D\_8}=Enthalpy(Water;T=T_{D\_8};x=0)$$

$$P_8=P_{sat}(Water;T=T_{st\_8})$$

"heat transfer area"

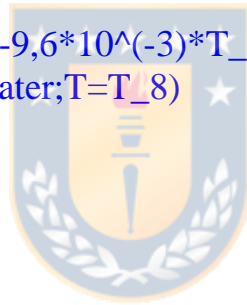
$$M_{dot\_st\_7}*h_{fg\_7}=U_8*A_8*(DELTA T_{eff}-BPE_8)$$

$$BPE_8=SW\_BPE(T_8;S_{B\_8})$$

$$U_8*1000=1961,9+12,6*(T_{st\_8})-9,6*10^{(-3)}*T_{st\_8}^2+3,16*10^{(-4)}*T_{st\_8}^3$$

$$h_{fg\_8}=Enthalpy\_vaporization(Water;T=T_8)$$

$$T_8=T_{st\_8}-BPE_8$$



"Efecto 9"

$$T_{st\_8}-DELTA T_{eff}=T_{B\_9}$$

$$T_{st\_9}=T_{B\_9}$$

$$T_{D\_9}=T_{st\_8}$$

$$T_{in\_9}=T_F$$

$$M_{dot\_F\_9}=M_{dot\_F}/N$$

$$M_{dot\_F\_9}+M_{dot\_B\_8}=M_{dot\_B\_9}+M_{dot\_st\_9}$$

$$M_{dot\_D\_9}=M_{dot\_st\_8}$$

$$M_{dot\_B\_8}*S_{B\_8}+M_{dot\_F\_9}*S_F=M_{dot\_B\_9}*S_{B\_9}$$

$$M_{dot\_F\_9}*h_{F\_9}+M_{dot\_B\_8}*h_{B\_8}+M_{dot\_st\_8}*h_{st\_8}=M_{dot\_st\_9}*h_{st\_9}+M_{dot\_B\_9}*h_{B\_9}+M_{dot\_D\_9}*h_{D\_9}$$

$$h_{F\_9}=h_{F\_8}$$

$$h_{B\_9}=SW\_Enthalpy(T_{B\_9};S_{B\_9})*convert(J/kg;kJ/kg)$$

$$h_{st\_9}=Enthalpy(Water;T=T_{st\_9};x=1)$$

$$h_{D\_9}=Enthalpy(Water;T=T_{D\_9};x=0)$$

$$P_9=P_{sat}(Water;T=T_{st\_9})$$

"heat transfer area"

$M_{\dot{st}_8} \cdot h_{fg_8} = U_9 \cdot A_9 \cdot (\Delta T_{eff} - BPE_9)$   
 $BPE_9 = SW_{BPE}(T_9; S_{B_9})$   
 $U_9 \cdot 1000 = 1961,9 + 12,6 \cdot (T_{st_9}) - 9,6 \cdot 10^{(-3)} \cdot T_{st_9}^2 + 3,16 \cdot 10^{(-4)} \cdot T_{st_9}^3$   
 $h_{fg_9} = \text{Enthalpy\_vaporization}(\text{Water}; T = T_9)$   
 $T_9 = T_{st_9} - BPE_9$

"Efecto 10"

$T_{st_9} - \Delta T_{eff} = T_{B_10}$   
 $T_{st_10} = T_{B_10}$   
 $T_{D_10} = T_{st_9}$   
 $T_{in_10} = T_F$   
 $M_{\dot{F}_10} = M_{\dot{F}} / N$   
 $M_{\dot{F}_10} + M_{\dot{B}_9} = M_{\dot{B}_10} + M_{\dot{st}_10}$   
 $M_{\dot{D}_10} = M_{\dot{st}_9}$   
 $M_{\dot{B}_9} \cdot S_{B_9} + M_{\dot{F}_10} \cdot S_F = M_{\dot{B}_10} \cdot S_{B_10}$   
 $M_{\dot{F}_10} \cdot h_{F_10} + M_{\dot{B}_9} \cdot h_{B_9} + M_{\dot{st}_9} \cdot h_{st_9} = M_{\dot{st}_10} \cdot h_{st_10} + M_{\dot{B}_10} \cdot h_{B_10} + M_{\dot{D}_10} \cdot h_{D_10}$   
 $h_{F_10} = h_{F_9}$   
 $h_{B_10} = SW_{\text{Enthalpy}}(T_{B_10}; S_{B_10}) \cdot \text{convert}(J/kg; kJ/kg)$   
 $h_{st_10} = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T = T_{st_10}; x = 1)$   
 $h_{D_10} = \text{Enthalpy}(\text{Water}; T = T_{D_10}; x = 0)$   
 $P_{10} = P_{\text{sat}}(\text{Water}; T = T_{st_10})$

"heat transfer area"

$M_{\dot{st}_9} \cdot h_{fg_9} = U_{10} \cdot A_{10} \cdot (\Delta T_{eff} - BPE_{10})$   
 $BPE_{10} = SW_{BPE}(T_{10}; S_{B_{10}})$   
 $U_{10} \cdot 1000 = 1961,9 + 12,6 \cdot (T_{st_{10}}) - 9,6 \cdot 10^{(-3)} \cdot T_{st_{10}}^2 + 3,16 \cdot 10^{(-4)} \cdot T_{st_{10}}^3$   
 $h_{fg_{10}} = \text{Enthalpy\_vaporization}(\text{Water}; T = T_{10})$   
 $T_{10} = T_{st_{10}} - BPE_{10}$

"Efecto 11"

$T_{st_{10}} - \Delta T_{eff} = T_{B_{11}}$   
 $T_{st_{11}} = T_{B_{11}}$   
 $T_{D_{11}} = T_{st_{10}}$   
 $T_{in_{11}} = T_F$   
 $M_{\dot{F}_{11}} = M_{\dot{F}} / N$   
 $M_{\dot{F}_{11}} + M_{\dot{B}_{10}} = M_{\dot{B}_{11}} + M_{\dot{st}_{11}}$   
 $M_{\dot{D}_{11}} = M_{\dot{st}_{10}}$   
 $M_{\dot{B}_{10}} \cdot S_{B_{10}} + M_{\dot{F}_{11}} \cdot S_F = M_{\dot{B}_{11}} \cdot S_{B_{11}}$

$M_{\dot{F}_{11}}*h_{F_{11}}+M_{\dot{B}_{10}}*h_{B_{10}}+M_{\dot{st}_{10}}*h_{st_{10}}=M_{\dot{st}_{11}}*h_{st_{11}}+M_{\dot{B}_{11}}*h_{B_{11}}+M_{\dot{D}_{11}}*h_{D_{11}}$   
 $h_{F_{11}}=h_{F_{10}}$   
 $h_{B_{11}}=SW\_Enthalpy(T_{B_{11}};S_{B_{11}})*convert(J/kg;kJ/kg)$   
 $h_{st_{11}}=Enthalpy(Water;T=T_{st_{11}};x=1)$   
 $h_{D_{11}}=Enthalpy(Water;T=T_{D_{11}};x=0)$   
 $P_{11}=P_{\text{sat}}(Water;T=T_{st_{11}})$

"heat transfer area"

$M_{\dot{st}_{10}}*h_{fg_{10}}=U_{11}*A_{11}*(\Delta T_{\text{eff}}-BPE_{11})$   
 $BPE_{11}=SW\_BPE(T_{11};S_{B_{11}})$   
 $U_{11}*1000=1961,9+12,6*(T_{st_{11}})-9,6*10^{(-3)}*T_{st_{10}}^2+3,16*11^{(-4)}*T_{st_{11}}^3$   
 $h_{fg_{11}}=Enthalpy\_vaporization(Water;T=T_{11})$   
 $T_{11}=T_{st_{11}}-BPE_{11}$

"Efecto 12"

$T_{st_{11}}-\Delta T_{\text{eff}}=T_{B_{12}}$   
 $T_{st_{12}}=T_{B_{12}}$   
 $T_{D_{12}}=T_{st_{11}}$   
 $T_{in_{12}}=T_F$   
 $M_{\dot{F}_{12}}=M_{\dot{F}}/N$   
 $M_{\dot{F}_{12}}+M_{\dot{B}_{11}}=M_{\dot{B}_{12}}+M_{\dot{st}_{12}}$   
 $M_{\dot{D}_{12}}=M_{\dot{st}_{11}}$   
 $M_{\dot{B}_{11}}*S_{B_{11}}+M_{\dot{F}_{12}}*S_F=M_{\dot{B}_{12}}*S_{B_{12}}$   
 $M_{\dot{F}_{12}}*h_{F_{12}}+M_{\dot{B}_{11}}*h_{B_{11}}+M_{\dot{st}_{11}}*h_{st_{11}}=M_{\dot{st}_{12}}*h_{st_{12}}+M_{\dot{B}_{12}}*h_{B_{12}}+M_{\dot{D}_{12}}*h_{D_{12}}$   
 $h_{F_{12}}=h_{F_{11}}$   
 $h_{B_{12}}=SW\_Enthalpy(T_{B_{12}};S_{B_{12}})*convert(J/kg;kJ/kg)$   
 $h_{st_{12}}=Enthalpy(Water;T=T_{st_{12}};x=1)$   
 $h_{D_{12}}=Enthalpy(Water;T=T_{D_{12}};x=0)$   
 $P_{12}=P_{\text{sat}}(Water;T=T_{st_{12}})$

"heat transfer area"

$M_{\dot{st}_{11}}*h_{fg_{11}}=U_{12}*A_{12}*(\Delta T_{\text{eff}}-BPE_{12})$   
 $BPE_{12}=SW\_BPE(T_{12};S_{B_{12}})$   
 $U_{12}*1000=1961,9+12,6*(T_{st_{12}})-9,6*10^{(-3)}*T_{st_{12}}^2+3,16*11^{(-4)}*T_{st_{12}}^3$   
 $h_{fg_{12}}=Enthalpy\_vaporization(Water;T=T_{12})$   
 $T_{12}=T_{st_{12}}-BPE_{12}$



{"Cooler"

$M_{\dot{D}_c} = M_{\dot{st}_{12}}$   
 $M_{\dot{st}_{12}} * h_{fg_{12}} = U_c * A_c * LMTD_c$   
 $U_c = 0,9 - 0,0013 * M_{\dot{F}} - 0,08 * (T_{F_{in}_c} + T_{F_{out}_c}) / 2 + 0,12 * T_{st_{12}}$   
 $T_{F_{in}_c} = T_{F_0}$   
 $T_{F_{out}_c} = 32$   
 $M_{\dot{st}_{12}} * h_{fg_{12}} = M_{\dot{c}} * cp_{sw} * (T_{F_{out}_c} - T_{F_{in}_c})$   
 $\{cp_{sw} = SW\_SpchHeat(T_{F_{bar}_1}; S_F) \{ *convert(J/kg; kJ/kg) \} \}$   
 $T_{F_{bar}_1} = (T_{F_{out}_c} + T_{F_{in}_c}) / 2$   
 $DELTA_T_A = T_{st_{12}} - T_{F_{in}_c}$   
 $DELTA_T_B = T_{st_{12}} - T_{F_{out}_c}$   
 $LMTD_c = (DELTA_T_A - DELTA_T_B) / (\ln(DELTA_T_A / DELTA_T_B))$   
 $cp_{sw} = 4,18$

" Indicadores globales "

$M_{\dot{D}} = M_{\dot{D}_2} + M_{\dot{D}_3} + M_{\dot{D}_4} + M_{\dot{D}_5} + M_{\dot{D}_6} + M_{\dot{D}_7} + M_{\dot{D}_8} + M_{\dot{D}_9} + M_{\dot{D}_{10}} + M_{\dot{D}_{11}} + M_{\dot{D}_{12}} + M_{\dot{D}_c}$   
 $h_{fg_{st}} = SW\_LatentHeat(T_{st_1}; S_F) * convert(J/kg; kJ/kg)$   
 $M_{\dot{steam}} = Q_{\dot{in}_{ev}} / h_{fg_{st}}$   
 $GOR = M_{\dot{D}} / M_{\dot{steam}}$   
 $RR = M_{\dot{D}} / M_{\dot{F}}$   
 $A_T = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6 + A_7 + A_8 + A_9 + A_{10} + A_{11} + A_{12} \{ + A_c \}$   
 $sA = A_T / M_{\dot{D}}$   
 $RR_2 = (1 / (S_B / (S_B - S_F)))$   
 $M_{\dot{B}} = M_{\dot{B}_{12}}$   
 $S_B = S_{B_{12}}$

"Mezcla de destilados"

$M_{\dot{D}} * h_D = M_{\dot{D}_2} * h_{D_2} + M_{\dot{D}_3} * h_{D_3} + M_{\dot{D}_4} * h_{D_4} + M_{\dot{D}_5} * h_{D_5} + M_{\dot{D}_6} * h_{D_6} + M_{\dot{D}_7} * h_{D_7} + M_{\dot{D}_8} * h_{D_8} + M_{\dot{D}_9} * h_{D_9} + M_{\dot{D}_{10}} * h_{D_{10}} + M_{\dot{D}_{11}} * h_{D_{11}} + M_{\dot{D}_{12}} * h_{D_{12}} + M_{\dot{D}_c} * h_{D_{12}}$   
 $T_D = Temperature(Water; h = h_D; x = 0)$   
 $P_D = Pressure(Water; h = h_D; x = 0)$



$$\{M\_dot\_D\_c=M\_dot\_st\_7$$

$$\{M\_dot\_st\_8*h\_fg\_8=U\_c*A\_c*LMTD\_c\}$$

$$\{U\_c=0,9-0,0013*M\_dot\_F-0,08*(T\_F\_in\_c+T\_F\_out\_c)/2+0,12*T\_st\_8\}$$

$$T\_F\_in\_c=T\_F\_0$$

$$\{T\_F\_out\_c=42\}$$

$$M\_dot\_st\_7*h\_fg\_7=M\_dot\_F*cp\_sw*(T\_F\_out\_c-T\_F\_in\_c)$$

$$\{T\_F\_out\_c=48\}$$

$$\{cp\_sw=SW\_SpHeat(T\_F\_bar\_1;S\_F)\{*conveart(J/kg;kJ/kg)\}\}$$

$$\{T\_F\_bar\_1=(T\_F\_out\_c+T\_F\_in\_c)/2\}$$

$$\{DELTA\_T\_A=T\_st\_9-T\_F\_in\_c$$

$$DELTA\_T\_B=T\_st\_9-T\_F\_out\_c$$

$$LMTD\_c=(DELTA\_T\_A-DELTA\_T\_B)/(ln(DELTA\_T\_A/DELTA\_T\_B))\}$$

$$cp\_sw=4,18$$

$$T\_F\_out\_c=T\_st\_7-4$$

$$\{M\_dot\_B*cp\_sw*(T\_B-T\_out\_B\_ph)=M\_dot\_F*cp\_sw*(T\_F\_out\_ph-T\_F\_out\_c)\}$$

$$\{T\_out\_B\_ph=44\}$$

$$\{M\_dot\_c=350\}$$

" Indicadores globales "

$$M\_dot\_D=M\_dot\_D\_2+M\_dot\_D\_3+M\_dot\_D\_4+M\_dot\_D\_5+M\_dot\_D\_6+M\_dot\_D\_7\{+M\_dot\_D\_8+M\_dot\_D\_9+M\_dot\_D\_10+M\_dot\_D\_11\{+M\_dot\_D\_12\}+M\_dot\_D\_c\}$$

$$h\_fg\_st=SW\_LatentHeat(T\_st\_1;S\_F)*convert(J/kg;kJ/kg)$$

$$M\_dot\_steam=(Q\_dot\_in\_ev\{+Q\_dot\_req\})/h\_fg\_st$$

$$GOR=M\_dot\_D/M\_dot\_steam$$

$$RR=M\_dot\_D/M\_dot\_F$$

$$A\_T=A\_1+A\_2+A\_3+A\_4+A\_5+A\_6+A\_7\{+A\_8+A\_9+A\_10+A\_11\{+A\_12\}\{+A\_c\}\}$$

$$sA=A\_T/M\_dot\_D$$

$$RR\_2=(1/(S\_B/(S\_B-S\_F)))$$

$$M\_dot\_B=M\_dot\_B\_7$$

$$S\_B=S\_B\_7$$

"Mezcla de destilados"

$$M\_dot\_D*h\_D=M\_dot\_D\_2*h\_D\_2+M\_dot\_D\_3*h\_D\_3+M\_dot\_D\_4*h\_D\_4+M\_dot\_D\_5*h\_D\_5+M\_dot\_D\_6*h\_D\_6+M\_dot\_D\_7*h\_D\_7\{M\_dot\_D\_8*h\_D\_8+M\_dot\_D\_9*h\_D\_9+M\_dot\_D\_10*h\_D\_10+M\_dot\_D\_11*h\_D\_11\{+M\_dot\_D\_12*h\_D\_12\}+M\_dot\_D\_c*h\_D\_12\}$$

```
T_D=Temperature(Water;h=h_D;x=0)
P_D=Pressure(Water;h=h_D;x=0)
```

"Prealentador Destilado y aras de los ph"

```
{M_dot_D*cp_sw*(T_D-T_D_out_ph)=M_dot_F*cp_sw*(T_F-T_F_out_c)}
{T_D_out_ph=48}
U_ph_B=-0,00540339+0,836569*M_dot_F
U_ph_D=U_ph_B
M_P_año=M_dot_D*3,6*24
T_F=T_F_out_c
{Q_dot_req=M_dot_F*cp_sw*(T_F-T_FF)}
{T_F=T_F_out_c}
```

### Anexo 3.1. Código Matlab Optimización multiobjetivo sistemas de desalinización.

```
clc
clear all
close all

nvars=2;
lb=[400 64];
ub=[600 72];
PopulationSize_Data=500;
MaxGenerations_Data=100;
MaxStallGenerations_Data=100;
FunctionTolerance_Data=0;
ConstraintTolerance_Data=0;
[x,fval,exitflag,output,population,score]=Prueba(nvars,lb,ub,PopulationSize_Data,Max
Generations_Data,MaxStallGenerations_Data,FunctionTolerance_Data,ConstraintToler
ance_Data);
optimal_solution=x;
objective_functions=fval;
figure
plot3(fval(:,1),fval(:,2),fval(:,3),'o')
xlabel('sA [m^2/(kg/s)]')
ylabel('W_c_p [kW]')
zlabel('UCDW [$/m^3]')
% xlabel('M_p [kg/s]')
% ylabel('Ex_D [kW]')
```



```
% xlabel('SB [g/kg]')
title('Optimization of sA, W_c_p and UCDW of a MED system FF MVC 8 effects')
% title('Optimization of M_p, Ex_D and SB of a MED system FF MVC 8 effects')
```

```
grid on
```

```
function
```

```
[x,fval,exitflag,output,population,score]=Prueba(nvars,lb,ub,PopulationSize_Data,Max
Generations_Data,MaxStallGenerations_Data,FunctionTolerance_Data,ConstraintToler
ance_Data)
```

```
options=optimoptions('gamultiobj');
```

```
options=optimoptions(options,'PopulationSize',PopulationSize_Data);
```

```
options=optimoptions(options,'MaxGenerations',MaxGenerations_Data);
```

```
options=optimoptions(options,'MaxStallGenerations',MaxStallGenerations_Data);
```

```
options=optimoptions(options,'FunctionTolerance',FunctionTolerance_Data);
```

```
options = optimoptions(options,'ConstraintTolerance', ConstraintTolerance_Data);
```

```
options = optimoptions(options,'CrossoverFcn', { @crossoverintermediate [] });
```

```
options = optimoptions(options,'Display', 'off');
```

```
[x,fval,exitflag,output,population,score] =
gamultiobj(@prueba2,nvars,[],[],[],[],lb,ub,[],options);
```

```
function Output=prueba2(Input)
```

```
x=Input(1);
```

```
y=Input(2);
```

```
F1=2045-0.2121*x-45.72*y+0.003304*x*y+0.276*y^2;
```

```
F2=-2854+12.57*x+23.17*y;
```

```
F3=1.492+0.002785*x-0.03916*y+2.639*10^(-6)*x^2+4.889*10^(-
6)*x*y+0.0003112*y^2;
```

```
% F1=-(115-0.04017*x+0.0135*y);
```

```
% F2=516.1-12.51*x-128.6*y-0.0002237*x^2+0.5019*x*y+2.032*y^2;
```

```
% F3=73.53-0.09436*x+0.004232*y+7.065*10^(-5)*x^2-5.62*10^(-6)*x*y;
```

```
Output=[F1 F2 F3];
```

**Anexo 3.2. Código Matlab para definición de coeficientes en funciones objetivo.**

```
clc
```

```
clear all
```

```
A1= xlsread('MEDhaciaadelanteMVC8.xlsx','C3:k1007');
```

```
x=A1(:,1);
```

```
y=A1(:,9);
```

```
S_B=A1(:,8);
```

```
Ex_D=A1(:,6);  
M_p=A1(:,7);  
Q_req=A1(:,3);  
sA=A1(:,3);  
UCWD=A1(:,5);  
W_cp=A1(:,4);  
RR=A1(:,2);  
plot3(M_p,Q_req,S_B,'o')  
grid on  
f = fit([x, y],M_p,'linearinterp');  
figure  
plot( f, [x, y], M_p )
```

