UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

SANTIAGO-CHILE

FACTIBILIDAD TÉCNICA PARA ACOPLAR UNA PLANTA DESALADORA POR DESTILACIÓN A UNA CENTRAL TÉRMICA A VAPOR

SEBASTIÁN CÁNOVAS SEPÚLVEDA

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO MENCIÓN ENERGIA

PROFESOR GUIA: **ARTURO GONZÁLEZ ARAYA**

PROFESOR CORREFERENTE: **RODRIGO BARRAZA VICENCIO**

Índice General

Índice General ..... **i**

Indicie de Gráficos ..... **v**

Índice de Ilustraciones ..... **vii**

Índice de tablas ..... **viii**

Glosario ..... **x**

Resumen ..... **xv**

Abstract ..... **xvi**

1 Introducción **17**

1.1 Objetivo General 23

1.2 Objetivos específicos 23

2 Estado del arte **24**

2.1 Situación Hídrica 24

2.1.1 Disponibilidad de agua 24

2.1.1.1 Extremo Norte 26

2.1.1.2 Norte Chico 26

2.1.1.3 Zona Central 26

2.1.1.4 Zona Sur 27

2.1.1.5 Extremo Austral 27

2.1.2 Fuentes de agua en Chile 27

2.1.2.1 Embalses 27

2.1.2.2 Aguas subterráneas 31

2.1.2.3 Glaciares y lagos 32

2.1.2.4 Lagos y lagunas 33

2.1.3 Uso del agua en Chile 35

2.1.3.1 Sector Silvo-agropecuario 37

2.1.3.2 Sector minero 37

2.1.3.3 Agua Potable y saneamiento 37

2.1.3.4 Producción de energía eléctrica 38

2.1.4 Balance de Oferta-Demanda de agua en Chile 38

2.1.5 Escasez hídrica 40

2.1.6 Cambio Climático 42

2.2 Calores residuales 43

2.3 Operación de una termoeléctrica 44

2.4 Tecnologías de desalación 45

2.4.1 MSF Multi-Stage flash 48

2.4.2 MED Multi-Effect Desalinisation 51

2.4.3 Thermal Vapour Compression (TVC) 54

2.4.4 Mechanical Vapour Compression (MVC) 55

2.4.5 Osmosis reversa 56

2.5 Conclusión 58

3 Metodología 60

3.1 Modelo Central Termoeléctrica 62

3.2 Modelo planta desaladora 68

3.2.1 Modelo MED-TC 69

3.2.2 Modelo MED 77

3.2.3 Datos MED planta Tianjin, China 83

3.2.4 Comparación entre modelos de plantas desaladoras 86

3.3 Recuperación de agua presente en gases producto de la quema de gas natural 87

3.3.1 Agua presente en gases de escape 88

3.3.2 Consumo de gas natural 91

4 Resultados 92

4.1 Caso 1 MED-TC 92

4.1.1 Parámetros de funcionamiento del modelo 92

4.1.2 Impactos sobre el ciclo Rankine 93

4.2 Caso 2 94

4.2.1 Parámetros de funcionamiento del modelo. 94

4.2.2 Impactos sobre el ciclo Rankine 95

4.3 Caso III 96

4.3.1 Impacto sobre ciclo Rankine 98

4.4 Potencial de desalinización a partir de cogeneración con termoeléctricas. 102

4.5 Obtención de agua dulce a partir de gases de escape en centrales térmicas operadas con gas natural 107

4.6 Conclusiones 110

5 Bibliografía 114

6 Anexos 117

6.1 Tablas de capacidad instalada 117

6.2 Código de modelo paramétrico de ciclo Rankine 122

Indicie de Gráficos

Gráfico 2-1 Disponibilidad de los recursos hídricos en el mundo, elaboración propia 25

Gráfico 2-2 Promedio histórico mensual de disponibilidad hídrica en los principales embalses del país. Elaborado a partir de (5). 28

Gráfico 2-3 Disponibilidad de agua en los principales embalses del país durante Octubre del año 2014. Elaborado a partir de (5) 30

Gráfico 2-4 Distribución de lagos y lagunas en el país. Elaboración propia a partir de (5) 34

Gráfico 2-5 Extracciones de uso consuntivo según sector. Elaboración propia a partir de (5) 35

Gráfico 2-6 Usos del agua en cada región. Elaboración propia a partir de (5) 36

Gráfico 2-7 Balance hídrico oferta/demanda. Elaboración propia a partir de (5) 39

Gráfico 3-1 Temperatura en función de la entropía para el modelo de central termoeléctrica, elaborado con ESS 67

Gráfico 3-2 Parámetros de funcionamiento central MED en Tianjin, China. Obtenido a partir del documento (13). 85

Gráfico 4-1 Comportamiento de central termoeléctrica frente a las extracciones de vapor. 100

Gráfico 4-2 Eficiencia de la central termoeléctrica en función del flujo másico de vapor extraído a 0,3 [bar]. 102

Gráfico 4-3 Principales resultados obtenidos. ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Índice de Ilustraciones

Ilustración 4.1 Diagrama de funcionamiento planta MSF (18)..... 50

Ilustración 4.2 Diagrama de funcionamiento de planta MED (18)..... 52

Ilustración 4.3 Izquierda, sustitución de condensador por planta desoladora térmica. Derecha, trade-off entre generación y desalación (18). 53

Ilustración 4.4 Diagrama de funcionamiento de planta MED con compresor de vapor térmico (TVC) (18) 55

Ilustración 4.5 Diagrama de funcionamiento planta MED de un solo efecto con compresor de vapor mecánico (MVC) (18) 56

Ilustración 4.6 Diagrama de funcionamiento planta de osmosis reversa (18) 57

Ilustración 5.1 Lay out de modelo de central termoeléctrica 63

Ilustración 5.2Lay out de planta MED de 3 efectos. (16) 70

Ilustración 5.3 Lay Out planta MED-TC de 3 efectos (20)..... 71

Ilustración 5.4 Lay out planta ALBA MED TC (20) 73

Ilustración 5.5 Lay out planta MED (19) 79

Índice de tablas

Tabla 3-1 Variables conocidas y desconocidas del sistema 65

Tabla 3-2 Parámetros de operación para modelo de central termoeléctrica. 68

Tabla 3-3 Principales datos de operación planta MED-TC 74

Tabla 3-4 Principales datos de operación planta MED-TC 75

Tabla 3-5 Comparación valores reales y valores modelo. 76

Tabla 3-6 Comparación valores reales y valores del modelo 81

Tabla 3-7 Principales datos de operación planta MED 82

Tabla 3-8 Principales datos de operación planta MED 83

Tabla 3-9 Comparación de los 3 modelos utilizados 86

Tabla 3-10 Composición en volumen del gas natural suministrado en Valparaíso 88

Tabla 4-1 Parámetros de funcionamiento del conjunto CT + MED TC 94

Tabla 4-2 Parámetros de funcionamiento del conjunto CT+MED caso II 96

Tabla 4-3 Datos equivalentes de funcionamiento de central MED Tianjin 98

Tabla 4-4 Condiciones operacionales de la central termoeléctrica al realizar las extracciones de vapor 99

Tabla 4-5 Condiciones operacionales de la central termoeléctrica al extraer la totalidad del vapor a 0,3 [bar] 101

Tabla 4-6 Valores calculados a partir de las tablas 6.3, 6.4 y 6.5 107

Tabla 6-1 Centrales térmicas operadas con carbón o petcoke en el SIC para Febrero del año 2015 117

Tabla 6-2 Centrales térmicas operadas con carbón o petcoke en el SING para Febrero del año 2015 118

Tabla 6-3 Potencia instalada de GN en el SING Febrero 2015 119

Tabla 6-4 Potencia instalada de GN en el SING Febrero 2015 120

Tabla 6-5 Potencia instalada de GN en MAGALLANES Febrero 2015 121

Glosario

Brine	Rechazo del proceso de destilación, fluido con alta concentración de sal, también conocido como salmuera.
BTT	De sus siglas en inglés, BTT Brine Top Temperature, temperatura máxima de la salmuera en español.
Calor latente	Energía que es absorbida o liberada durante un cambio de fase de un sólido, líquido o gas (1).
Calor sensible	Parte de la energía interna de un sistema que está asociada a la energía cinética de las moléculas (1).
Cambio climático	Cambio significativo y duradero de los patrones locales o globales del clima, las causas pueden ser naturales, o por influencia antrópica (2)
CAPEX	Cantidad que se gasta para adquirir o mejorar los activos productivos, con el fin de aumentar la capacidad o eficiencia

	de una empresa (3)
CT	Central térmica
CT + MED PSA	Central térmica acoplada a planta desaladora de Planta Solar de Almería
CT + MED TC	Central térmica acoplada con planta MED TC
DAA	El derecho de aprovechamiento es un derecho real que recae sobre las aguas y consiste en el uso y goce de ellas, con los requisitos y en conformidad a las reglas que prescribe el Código de aguas.
DGA	Dirección General de Aguas
Escorrentia	Agua de lluvia que circula libremente sobre la superficie de un terreno.
ESS	Engineering Equation Solver
Fouling	Comunidades de seres vivos instaladas sobre diferentes tipos de sustratos sumergidos en el mar.

GOR	Gained output ratio, relación entre kg de destilado y kg de vapor.
Lacustres	Todo lo que guarda relación con un lago.
MMm^3	Millones de metros cúbicos
$MM\ US\$$	Millones de dólares estadounidenses
MED	Multi Effect Desalation
MED-TC	Multi Effect Desalation con turbo compresor.
MSF	Multi Stage Flashing
η_{ciclo}	Eficiencia del ciclo rankine
OPEX	Operating Expenses, es un costo continuo para el funcionamiento de un producto, negocio o sistema (4)
P_{ext}	Presión del vapor en la extracción.
P_{neta}	Potencia neta del ciclo rankine
PPM	Partes por millón

PR	Performance ratio, kg de destilado producido por unidad de energía.
$\dot{q}_{ext}$	Calor extraído de la central térmica e ingresado a la central desaladora.
$\dot{q}_{in}$	Calor ingresado a la central térmica en la caldera.
$\dot{q}_{out}$	Calor disipado en el condensador de la central térmica.
Recarga media	Agua que alcanza las reservas subterráneas.
RR	Recovery Ratio. Relación en flujo másico de destilado y agua de alimentación.
SEC	Specific energy consuption. Energia térmica y eléctrica necesaria para producir 1 kg de destilado.
SIC	Sistema Interconectado Central
SING	Sistema Interconectado Del Norte Grande

Usos Consuntivos	Consumen o extraen el agua de su fuente de origen, por lo que generalmente puede ser medido cuantitativamente
Usos no consuntivos	Usos que ocurren en el ambiente natural de la fuente de agua, sin extracción o consumo del recurso

Resumen

El agua dulce es un recurso esencial para la subsistencia y desarrollo del ser humano, si bien existe incertidumbre sobre su disponibilidad en el futuro, resulta innegable que su demanda aumentara en los próximos años. En el presente trabajo se estudia la factibilidad técnica de acoplar una planta desaladora por destilación a una central termoeléctrica para estimar como se ve afectado el desempeño de la central termoeléctrica y el potencial de agua fresca que se podría obtener mediante esta cogeneración. Se construyó un modelo paramétrico en ESS para un ciclo Ranckine de 244 [Mw] de potencia neta y luego en este modelo se realizaron extracciones de vapor para probar tres modelos diferentes de plantas desaladoras por destilación.

En los resultados se determinó que el rendimiento de la central termoeléctrica resulta menos afectado al realizar las extracciones de vapor a la menor presión posible. De esta manera los mejores resultado se obtuvieron al extraer la totalidad del vapor en la turbina de baja presión a 0,3 [bar], siendo este un flujo másico de $144{,}85\ [kg/s]$ de vapor, permitiendo generar $1.593{,}35\ [kg/s]$ de destilado con un descenso cercano al 3%, tanto en el rendimiento como en la potencia desarrollada por la central termoeléctrica.

Por último, el potencial de desalinización mediante cogeneración que se ve en Chile, es cercano a los $28.000\ [kg/s]$. Si bien este potencial solo alcanza a cubrir una pequeña parte del déficit estimado para los próximos años, la cogeneración entre centrales termoeléctricas y plantas desoladoras por destilación se presenta como una alternativa para contribuir en la disponibilidad del recurso.

Abstract

Fresh water is an essential resource for subsistence and development of human beings, although there is uncertainty about its availability in the future, it is unquestionable that the demands will increase in coming years. This work presents the technical feasibility of coupling a desalination plant by distillation at a thermoelectric plant. The main results estimate how affected the performance of the thermoelectric plant and the potential of fresh water that could be obtained by this cogeneration. A parametric model was constructed on ESS for a Rankine cycle of 244 [MW] net power. Then different steam extractions were performed at this parametric model to supply steam for 3 different desalinations plants.

In the results it was seen that the performance of the thermoelectric plant get less affected as long as the extraction pressure of the steam is as low as possible. Thus best results were obtained by extracting all the steam in the low pressure turbine at a pressure around 0,3 [bar] , this being a mass flow of $144{,}85\ [kg/s]$ of steam, allowing to generate $1593{,}35\ [kg/s]$ of distillate with a decline close to 3% in the performance and power output of the thermoelectric plant.

Finally, the potential of desalination by cogeneration in Chile, is around $28.000\ [kg/s]$. While this potential is only enough to cover a small part of the estimated deficit for the coming years, cogeneration between power plants and desalting plants by distillation is presented as an alternative to contribute to resource availability .

1 Introducción

Del total del agua presente en el planeta solo un 0.03% (5) se encuentra como aguas superficiales, las cuales son de fácil acceso para el ser humano.

En cuanto a los usos a nivel global, el 69% se atribuye a la agricultura, el 21% a la industria y el 10% restante al agua potable. (5)

En Chile se distinguen 4 sectores principales que realizan extracciones de agua para usos consuntivos (6), el principal consumidor de agua es el sector de la agricultura, luego en menor medida le sigue la industria y finalmente se encuentra la minería y el consumo doméstico.

Las extracciones consuntivas representan un 11% de las extracciones totales, las cuales llegan hasta un caudal de $4.710\ [m^3/s]$. Por otra parte el 89% restante se asigna a las extracciones no consultivas (6), principalmente a las hidroeléctricas. (5)

Diversos organismos han señalado que el agua dulce y los recursos hídricos en general, se hacen cada vez más escasos. Las principales razones son, el crecimiento de la población y el desarrollo económico-social. Por ejemplo, en Chile la demanda se ha duplicado en los últimos 30 años (5), hace 25 años el PIB del país era solo el 30% de lo que fue el año 2013 (7), esto demuestra cómo se ha expandido la economía, triplicándose en menos de tres décadas. El desarrollo de nuevos sectores productivos, algunos de los cuales están estrechamente vinculados con una mayor demanda de agua, dejan en evidencia que hoy el país se encuentra en una situación distinta a la observada hace un cuarto de siglo.

Chile al igual que los países vecinos, no está ajeno a este problema que se agudiza con el cambio climático. Este fenómeno altera el régimen de precipitaciones y temperaturas, impactando negativamente sobre los bosques y la cobertura vegetal en general, lo que junto a la actividad humana contribuye a aumentar la erosión y degradación de las tierras, disminuyendo las reservas de agua superficiales y subterráneas.

El gobierno se ha establecido el desafío de establecer a Chile como Potencia Agroalimentaria. Frente al cambio climático, para lograr este objetivo, se requiere aumentar las superficies de riego, aumentando la demanda del recurso hídrico.

Resulta indiscutible que las futuras demandas en relación al consumo de agua, significarán uno de los mayores desafíos a nivel mundial y Chile no está ajeno a esta realidad. Hacia el año 2025, se estima que la demanda total de agua crecerá entre 35% y 60% e inclusive para el año 2050 podría duplicarse. Luego para la demanda energética mundial se espera un aumento cercano al 40%, respecto al año 2015 (5).

Por otra parte, en el área alimenticia, para el año 2030 se estima que la producción de cereales tendrá que aumentar un 85% para ser capaz de atender a la demanda mundial (5).

Chile es considerado un país privilegiado respecto a la disponibilidad de recursos hídricos, sin embargo su disponibilidad es desigual a lo largo del territorio. Por ejemplo, los lagos de mayor tamaño se localizan entre las regiones de la Araucanía, Aisén y Magallanes. Los embalses más importantes se encuentran al sur de la capital, siendo el embalse “La Paloma” el único de tamaño importante que se encuentra al norte de la capital, en la región de Coquimbo. Sin embargo en el último tiempo este

embalse ha mostrado disponibilidad de agua por debajo del 10% de su promedio histórico (5).

A propósito, se han identificado 110 cuencas del país que presentan sobre otorgamiento de sus Derechos de Aprovechamiento de Agua (DAA), es decir, la demanda comprometida es mayor a su recarga natural.

A partir del balance hídrico realizado por el "Ministerio del interior y seguridad pública", se evidencia un actual déficit hídrico desde la región Metropolitana al norte, regiones en las cuales la demanda supera a la oferta, este fenómeno se agrava en la segunda región. Al realizar este mismo ejercicio para los próximos 15 años, se prevé una situación cualitativamente similar a la actual, pero cuantitativamente más grave.

La actual situación hídrica del país es una situación estructural, no hay peor enfoque que enfrentar una situación como esta sólo con medidas a corto plazo, si bien estas medidas son necesarias para sobrellevar momentáneamente los problemas, es necesario implementar medidas a largo plazo para que el país pueda adaptarse a las nuevas realidades.

En el presente trabajo se presentan dos alternativas para obtener agua dulce sin grandes impactos medioambientales y con una perspectiva de largo plazo, proveyendo el recurso de manera constante y segura.

Geográficamente Chile se emplaza entre el océano Pacifico y la Cordillera de los Andes, de esta forma gran parte de sus núcleos urbanos se ubican en las costa, sobre todo en las regiones con mayor déficit hídrico. Para estas ciudades costeras desalar agua de mar se presenta como una alternativa viable, tal como es el caso de las ciudades de Antofagasta y Taltal, las que ya cuentan con plantas de osmosis inversa

de $600\ [kg/s]$ y $5\ [kg/s]$ respectivamente. Esto ha sido posible, principalmente porque el costo de adquirir el agua de fuentes naturales se acerca al costo del agua desalada, hoy en día en Antofagasta se paga cerca de $2.23\ [US\$/m^3]$ y casi el triple por sobreconsumo en horario punta (8) . Sin embargo, la obtención de agua por esta vía requiere grandes cantidades de energía eléctrica. Bajo esta perspectiva la desalación a través de osmosis inversa involucra grandes cantidades de energía, la cual, si se asocia a una matriz netamente térmica, se traduce en la quema de combustibles fósiles, contribuyendo a la emisión de gases de efecto invernadero.

Actualmente existen cerca de 17.000 plantas desaladoras en operación alrededor del mundo (9) y la capacidad instalada se estima que a la fecha supera las $80\ [MMm^3/día]$, lo cual deja en evidencia el fuerte desarrollo que han tenido estos sistemas en las últimas décadas (10).

Frente a lo descrito anteriormente, acá se presenta una alternativa que se ha desarrollado en algunos países líderes en desalación, se trata de la "Desalación por destilación". Hoy en día esta alternativa representa más de un 34% de la capacidad instalada, por detrás de la Osmosis inversa que representa un 60% y el porcentaje restante se conforma por otras tecnologías (9). La desalación térmica se puede realizar a través de dos procesos principalmente, MSF (Multi Stage Flash) y MED (Multi Effect Desalinisation), el primer caso representa un 26% del total y el segundo un 8% (9). Se estima que el sistema MED se desarrolle más que el MSF en los próximos años.

Además del recurso térmico, las plantas MED y MSF también requieren energía eléctrica para bombear los fluidos y generar el vacío en él sistema, sin embargo, el consumo de energía eléctrica de estas plantas puede ser hasta un tercio del consumo de una planta de osmosis inversa. (11) Asimismo, si la energía térmica es de desecho

y no representa un costo, las plantas térmicas son competitivas frente a la osmosis inversa. (12)

Una ventaja que tienen las plantas desoladoras térmicas es que se pueden acoplar a sistemas que tengan calor residual y asi aprovechar esta energía en vez de disiparla al ambiente. Generalmente, estas plantas operan con vapor, el cual generalmente se suministra desde procesos industriales, refinerías o plantas termoeléctricas. (11)

Un buen ejemplo de este acoplamiento, es la planta "Tianjin" emplazada en Beijing, China. Está planta en particular tiene capacidad para generar 4000 [MW] a partir de la quema de carbón y además, se le ha acoplado una planta desaladora MED-TVC la cual produce $200.000\ [m^3/dia]$ de destilado en ocho unidades MED, por último a partir de la salmuera se obtiene sal. El agua desalada se utiliza en tres áreas, alimentar la caldera, procesos industriales y agua potable para la ciudad (13).

La instalación de esta planta ha beneficiado a la comunidad, entregándole una solución a largo plazo para los problemas de escases hídrica, además al mezclar el agua desalada de excelente calidad con el agua potable de la red, se disminuyó la dureza del agua que se suministra a la población, lo que fue beneficioso en las cañerías de las casa, los termos y el post-tratamiento, gracias a la disminución de incrustaciones.

Actualmente la planta desaladora térmica de mayor capacidad, es la planta "Shoaiba" emplazada en Arabia Saudita, la cual es de potencia y desaladora. Esta planta entrega $5.600\ [MW]$ de potencia y la planta MSF tiene una capacidad para producir $880.000\ [m^3/dia]$ de destilado (9).

Hoy en día Chile cuenta con más de 4000 [MW] de potencia instalada entre el SING y el SIC a partir de centrales térmicas que operan con carbón o petcoke. Las centrales instaladas en el SING suman una potencia de 2103 [MW] y se encuentran en las regiones de mayor estrés hídrico (14), estas condiciones resultan interesantes para realizar un estudio de plantas desadoras térmicas acopladas a alguna central térmica existente en el SING. También se deben considerar las centrales de SIC ya que este sistema contempla la región de Valparaíso y Atacama, zonas que no está excluidas de la falta de agua.

Dado lo expuesto anteriormente parece razonable y lógico realizar el estudio técnico sobre el funcionamiento de una planta desoladora acoplada a una planta termoeléctrica. En el presente trabajo se ha programado un Ciclo Rankine en el software EES, para poder simular los parámetros de funcionamiento de una central real. A partir de este modelo, es posible simular como se ve afectado el rendimiento de la planta termoeléctrica al realizar las extracciones de vapor que se suministran a la planta desaladora ya que es un hecho que estas extracciones de vapor disminuirán el rendimiento del ciclo Rankin. De esta manera se desarrollarán varias configuraciones de acoplamiento para estudiar el rendimiento del conjunto.

Con el modelo desarrollado se buscó recrear la Central Termoeléctrica Angamos 1 (ANG1), la cual se encuentra en la ciudad de Mejillones, región de Antofagasta, zona en la cual existe un déficit del recurso hídrico. Esta central fue puesta en marcha el año 2011 y tiene una potencia neta de 244 [Mw]. De esta manera el modelo desarrollado en ESS se ha adecuado para igualar la potencia neta de la central Angamos 1 y así enfocar el estudio en un escenario real de nuestro país.

Por otra parte, en este trabajo también se incluye otra alternativa para obtener agua a partir de procesos ya existentes. Al quemar gas natural, dada su composición es posible obtener agua de gran calidad como producto en los gases de escape. Por lo que esta alternativa resulta lo suficientemente interesante como para desarrollarla en este trabajo, ya que podría contribuir como solución a largo plazo para los problemas hídricos del país.

Con lo expuesto anteriormente se establecen los siguientes objetivos para el presente trabajo.

1.1 Objetivo General

El objetivo general de este trabajo es analizar la factibilidad técnica de acoplar una planta desaladora por destilación a una central térmica a vapor, para poder desalinizar agua mediante cogeneración.

1.2 Objetivos específicos

Para cumplir con el objetivo general se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar las diferentes tecnologías de desalación térmica disponibles.

- Estimar la potencial necesidad de agua dulce en Chile.

- Determinar el potencial de desalar agua mediante cogeneración en plantas térmicas.

- Construir un modelo computacional paramétrico de una central térmica utilizando el software Engineering Equation Solver (EES) para estudiar su interacción con una planta de desalinización.

- Estudiar distintas configuraciones de acople de la planta térmica con la planta desaladora y determinar la mejor alternativa.

2 Estado del arte

2.1 Situación Hídrica

2.1.1 Disponibilidad de agua

Un conjunto de estudios han estimado que a nivel mundial, la totalidad de los recursos hídricos alcanza la cifra de $1{,}45\ millones\ de\ [km^3]$. Ahora bien si se mira en detalle, de estos solo el 2,5% corresponde a agua dulce $(90.000\ [km^3])$ y de este total solo un 1% se encuentra como aguas superficiales que están al alcance del ser humano, el 99% del agua dulce restante corresponde a aguas subterráneas y en forma de hielo. (5)

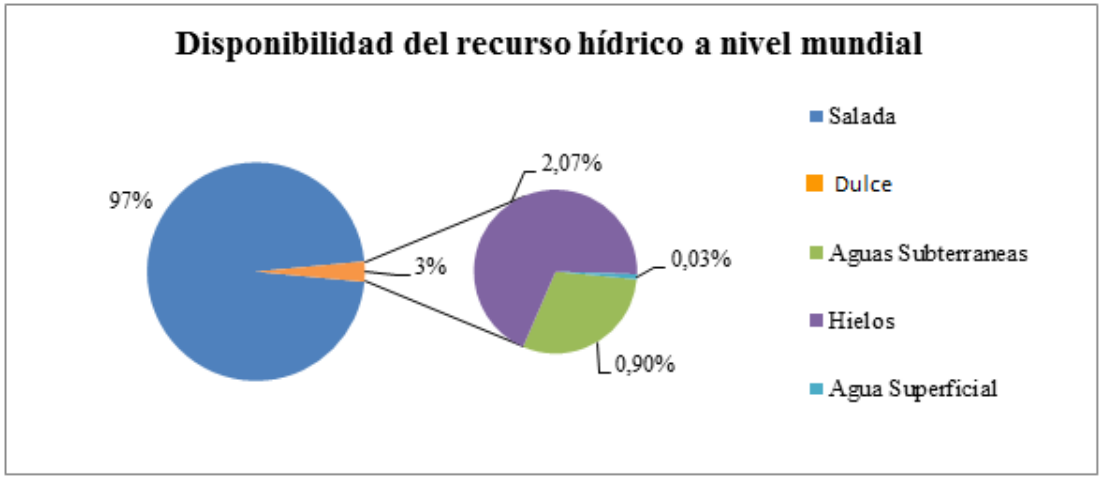

Gráfico 2-1 Disponibilidad de los recursos hídricos en el mundo, elaboración propia

Tal como se aprecia en el gráfico 2.1, del total de agua en el mundo, solo se tiene 0,03% de agua que es dulce y de fácil acceso para el ser humano.

Especialmente para el caso de Chile, los recursos hídricos se pueden resumir de la siguiente manera. (5)

- 8.000 $[km]$ de costa.
- 3.934.936 $[km^2]$de espacios jurisdiccionales marítimos
- 11.452 $[km^2]$ de lagos y lagunas
- 24.114 Cuerpos de hielo
- 23.641 $[km^2]$ Superficie estimada de glaciares
- 4.200 $[km^2]$ Campo de hielo norte
- 13.000 $[km^2]$ Campo de hielo sur
- 97 Cunecas hidrográficas
- 34 Ríos transfronterizos

Según la Superintendencia de Servicios Sanitarios, en el país el agua potable se obtiene de distintas fuente según la zona geográfica. (5)

2.1.1.1 Extremo Norte

La principal fuente son los acuíferos de Azapa, Lluta y de La Pampa del Tamarugal. Para el caso de Antofagasta la extracción del recurso se hace en los ríos de la cuenca del Loa y agua de mar desalada. En la región de Atacama, los acuíferos de Copiapó y Huasco representan las principales fuentes de agua potable.

2.1.1.2 Norte Chico

Las ciudades grandes del norte chico se proveen de agua a partir de los ríos Elqui, Limarí e Illapel y aguas subterráneas presentes en los valles de los mismos ríos. Las localidades más pequeñas, al igual que la mayoría del país, obtienen el recurso exclusivamente a partir de agua subterránea.

2.1.1.3 Zona Central

El agua se obtiene de los ríos Aconcagua, Maipo, Mapocho y Cachapoal, y el agua subterránea de acuíferos como por ejemplo el del Maipo, el cual provee de agua potable a la capital. Así mismo, los acuíferos del río Aconcagua son los que proveen de agua a la mayoría de las localidades de la quinta región.

2.1.1.4 Zona Sur

Los ríos Maule, Chillán, Bío Bío, Malleco, Calle-Calle, Rahue, además de sus acuíferos, constituyen la fuente de agua para la zona sur de Chile.

2.1.1.5 Extremo Austral

Por último, en el extremo austral, las fuentes de agua corresponden a un conjunto de ríos, esteros, lagos y embalses, dentro de los cuales, los más importantes son los esteros de la cuenca de Coyhaique, el lago General Carrera, el embalse Lynch y el Lago Parrillar.

2.1.2 Fuentes de agua en Chile

2.1.2.1 Embalses

En Chile existen más de 60 embalses de acumulación destinados principalmente para riego, hidroelectricidad y agua potable. Los embalses más importantes pueden almacenar hasta $12.900\ [Mm^3]$. Sin embargo, la capacidad total de almacenamiento, representan apenas el 1,39% de la escorrentía total media anual, la cual llega a $928.000\ [Mm^3]$. (5)

Si se compara el promedio histórico de disponibilidad de agua en los embalses con su capacidad total, se sabe que este promedio solo alcanza un 66% de la capacidad total de almacenamiento. (5)

Para evaluar la situación hídrica actual, resulta más conveniente basarse en los promedios históricos mensuales en vez de realizar las evaluaciones respecto a la capacidad total, ya que los niveles de los embalses históricamente han estado muy por debajo de su capacidad total. Para analizar la situación actual de los embalses del país, se trabajará con los datos del año 2014, específicamente durante el mes de octubre (5).

En el gráfico 2.2 se muestra el promedio histórico mensual de disponibilidad de agua para los principales embalses del país. Mientras que la serie roja muestra la sumatoria de los promedios históricos de cada embalse.

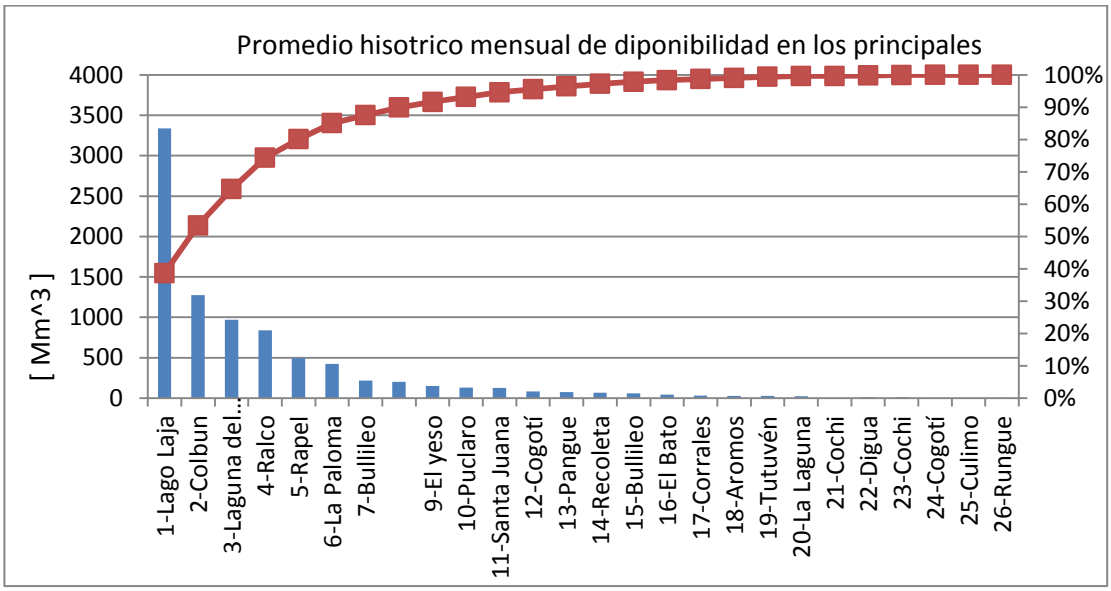

Gráfico 2-2 Promedio histórico mensual de disponibilidad hídrica en los principales embalses del país. Elaborado a partir de (5).

En el gráfico 2.2, a partir de la serie roja se ve que históricamente cerca del 90% de la disponibilidad de agua embalsada, se encuentra concentrada en apenas 7 embalses.

Notoriamente el “Lago Laja” representa cerca del 40% del volumen promedio embalsado del país, seguido por “Colbun”, “Laguna del Maule” y “Ralco”,

También resulta interesante resaltar que de estos 7 embalses, solo uno se encuentra al norte de la capital. El embalse “La Paloma” en la región de Coquimbo se ubica en el 6° lugar de mayor promedio de agua embalsada. Según la DGA, para el mes de octubre del año 2014, el volumen de agua almacenada en este embalse fue de apenas 5.552,5 [MMm^3], cifra que representa el 64% del promedio histórico para ese mes y análogamente un 43% de la capacidad total.

En el gráfico 2.3 se expone la disponibilidad de agua en los principales embalses del país durante Octubre del año 2014. Claramente se puede apreciar como cerca del 90% de la disponibilidad de agua se encuentra concentrada en apenas 6 embalses.

La situación del embalse “La Paloma” tiene un alto impacto en la región de Coquimbo, ya que es el único embalse de gran capacidad que se encuentra en la zona norte del país y además su principal uso consiste en regadío para la agricultura local.

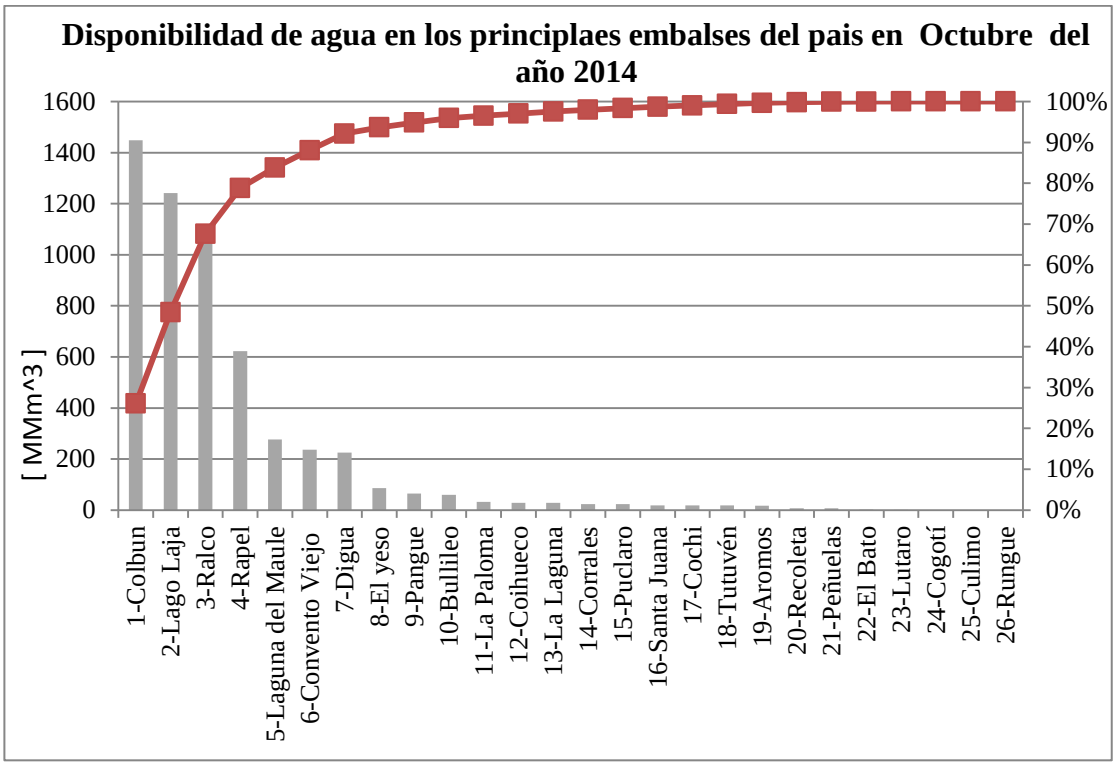

Gráfico 2-3 Disponibilidad de agua en los principales embalses del país durante Octubre del año 2014. Elaborado a partir de (5)

El "Lago Laja" muestra una fuerte baja respecto a sus valores históricos, en el grafico 2.2 se ve que históricamente almacena cerca de $3.300\,[MMm^3]$ mientras que para octubre del 2014 apena almacenó cerca de $1.250[MMm^3]$, siendo superado por el lago "Colbun" y seguido de cerca por "Ralco". La "Laguna del Maule" sufre una realidad parecida, pasando del 3° puesto histórico al 5° puesto el año 2014, siendo superada por "Ralco" y "Rapel".

En el gráfico 2.3 se ve que 9 embalses registraron una disponibilidad de agua igual o superior a su promedio histórico (grafico 2.2). Sin embargo estos 9 embalses representan apenas el 40% del total de agua embalsada, siendo los que más

contribuyen, los embalses Ralco, Rapel y Colbún. Por otra parte, los demás embalses que representan el 60% restante de agua embalsada, registraron niveles inferiores al promedio. Como ya se mencionó, el embalse "Lago Laja" estuvo cerca de $2.050\ [MMm^3]$ por debajo de su promedio histórico, generando un gran impacto, ya que este embalse históricamente representa el 40% del agua embalsada del país. Con un menor impacto, la "Laguna del Maule" que históricamente representa un 10% del volumen de agua embalsada, estuvo cerca de $750\ [MMm^3]$ por debajo de su promedio. También se aprecia que el embalse "La Paloma" apenas dispuso de un 8% de su volumen histórico, representando un déficit cercano a los$360\ [MMm^3]$.

En resumen se afirma que el nivel del "Lago Laja" tiene grandes impactos sobre el volumen de agua embalsada del país, mientras su nivel se encuentre por debajo de su promedio histórico, será muy difícil suplir este volumen de agua con otros embalses.

También queda en evidencia la distinta realidad que se vive al norte de la capital o al sur de esta. En la zona norte solo existe un embalse de capacidad importante, este es "La Paloma", mientras este registre niveles tan bajos como los del 2014, la situación local será compleja

A partir de esta información resulta fácil notar el enorme déficit presente en la región de Atacama, Coquimbo, Valparaíso e incluso en la Región Metropolitana. Por lo visto el déficit se acentúa desde la región metropolitana al norte y disminuye entre las regiones Libertador B. O"Higgins y la del Bío Bío.

2.1.2.2 Aguas subterráneas

En las zonas urbanas del país un 40% del consumo humano de agua proviene de fuentes subterráneas y para el caso del agua potable rural llega hasta el 76%. Si se

considera solo el valle central, es decir desde la región Metropolitana hasta la del Bío Bío, más de un 83% del agua potable en zonas rurales se obtienen de acuíferos subterráneos.

A partir de diversos estudios, se estima que desde la Capital al norte, existe un importante volumen de recursos subterráneos cuya recarga media alcanza los $55.000[kg/s]$ (5). No se conoce con claridad la situación desde la región de O"Higgins al sur, pero una estimación de la DGA señala que entre las regiones Maule y Los Lagos la recarga media estimada es de $160.000\ [kg/s]$ (5).

Hoy en día Chile sufre una sobreexplotación en algunos de sus acuíferos, principalmente en las zonas norte y centro. Los acuíferos se recargan principalmente por los aportes de las precipitaciones e infiltraciones de los ríos y el riego.

2.1.2.3 Glaciares y lagos

Los glaciares representan una de las principales reservas de agua dulce del planeta. Chile concentra el 76% de la superficie de glaciares del continente Sudamericano ($28.200\ [km^2]$). La DGA señala que hasta el momento se han inventariado 5.979 glaciares blancos y 1.514 glaciares rocosos y aún faltan áreas por inventariar (5).

Los glaciares en Chile han experimentado una fuerte tendencia al retroceso, se cree que esto es debido a la variabilidad climática y al proceso de cambio climático.

Mediante sondajes sobre los glaciares ha sido posible estimar que el volumen de hielo representa cerca de $3.662{,}6\ [km^3]$ de agua almacenada como glaciares. De esta manera se ha podido estimar que en la zona glaciológica norte existe un volumen de hielo equivalente a $3{,}9\ [km^3]$ de agua, que representa el 0,11% del total nacional.

Luego en la zona central se tiene $45{,}0\ [km^3]$, correspondientes al 1,23% del total, en la zona sur se estiman $95{,}5\ [km^3]$ correspondientes al 2,55% y por último en la zona austral se estiman $3.519{,}4\ [km^3]$ que corresponden al 96% del total de los glaciares del país (5).

2.1.2.4 Lagos y lagunas

Los lagos y lagunas constituyen una reserva hídrica importante en el país, estos se ubican en su mayoría en la zona sur de Chile y representando el 1,5% de la superficie del país. En general presentan agua de buena calidad y son importantes reguladores de las cuencas de dichas zonas. De acuerdo a la DGA, existen 355 lagos y lagunas cuyos espejos de agua cubren una superficie de $8.162{,}7\ [km^2]$. La distribución de los lagos y lagunas es muy poco homogénea a lo largo del país, tal como se visualiza en el gráfico 2.5 (5).

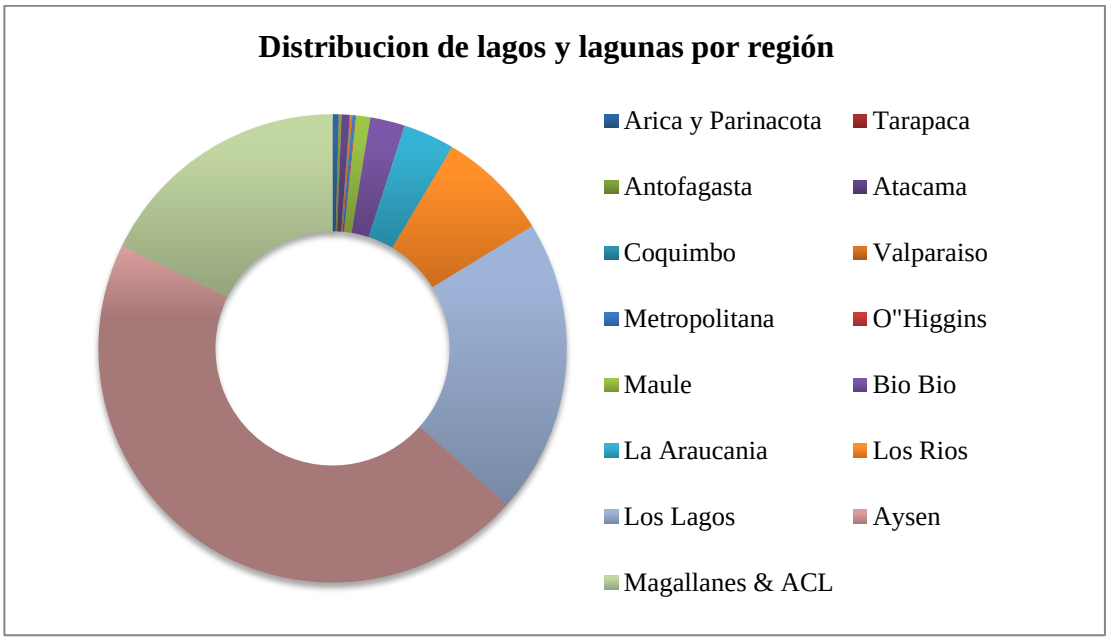

Gráfico 2-4 Distribución de lagos y lagunas en el país. Elaboración propia a partir de (5)

Resulta notorio que el 90% de la superficie de lagos y lagunas se concentra en solo 4 regiones del país, las cuales son las siguientes

- Aysén
- Magallanes y la Antártica Chilena
- Los Lagos
- Los Ríos

Si se realiza la suma de superficies lacustres desde la región de O"Higgins hasta Arica y Parinacota, resulta interesante comprobar que se tienen $131{,}6\ [km^2]$, superficie inferior a la que se encuentra solo en la región del Bio Bio que cuenta con $195{,}6\ [km^2]$.

2.1.3 Uso del agua en Chile

El desarrollo de nuevos sectores productivos, algunos de los cuales están estrechamente vinculados con una mayor demanda de agua, dejan en evidencia que hoy el país se encuentra en una situación diametralmente distinta a la observada hace un cuarto de siglo.

Durante el año 2011 las extracciones totales de agua para usos consuntivos fueron de $650.000\ [kg/s]$, de los cuales el 81% se destinó al riego. En los usos no consuntivos las hidroeléctricas destacan con aproximadamente $4.000.000\ [kg/s]$ (5).

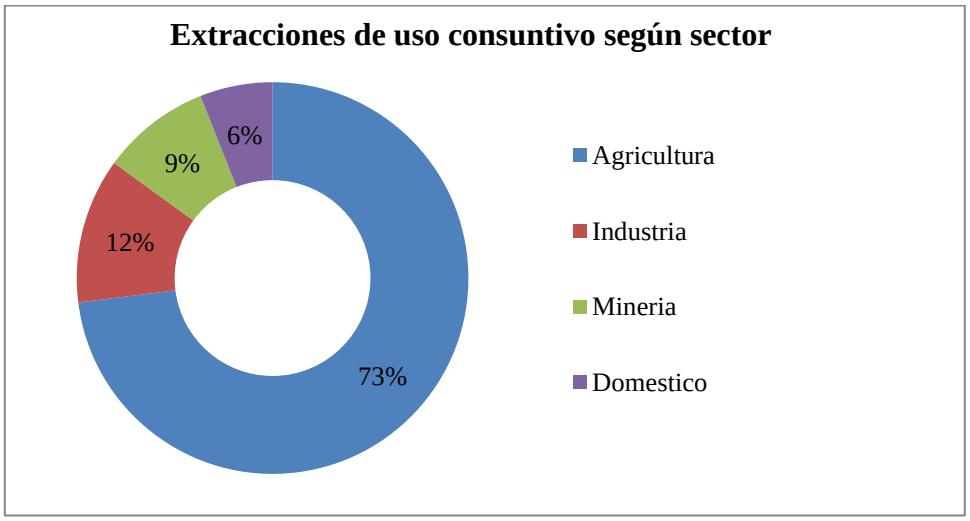

Gráfico 2-5 Extracciones de uso consuntivo según sector. Elaboración propia a partir de (5)

Como muestra el gráfico 2.6, en Chile se distinguen 4 sectores principales que realizan extracciones de agua para usos consuntivos, el principal consumidor de agua es el sector de la agricultura, haciendo uso del 73% de las extracciones de uso consuntivo, luego en menor medida le sigue la industria con un poco más del 10% y

finalmente se encuentran la minería y el consumo doméstico con un 9% y 6% respectivamente.

Al realizar un estudio sobre los distintos usos del agua por regiones, se observan marcadas tendencias según los sectores productivos de cada región. En el gráfico 2.7 se muestra para que se utiliza el agua en cada región.

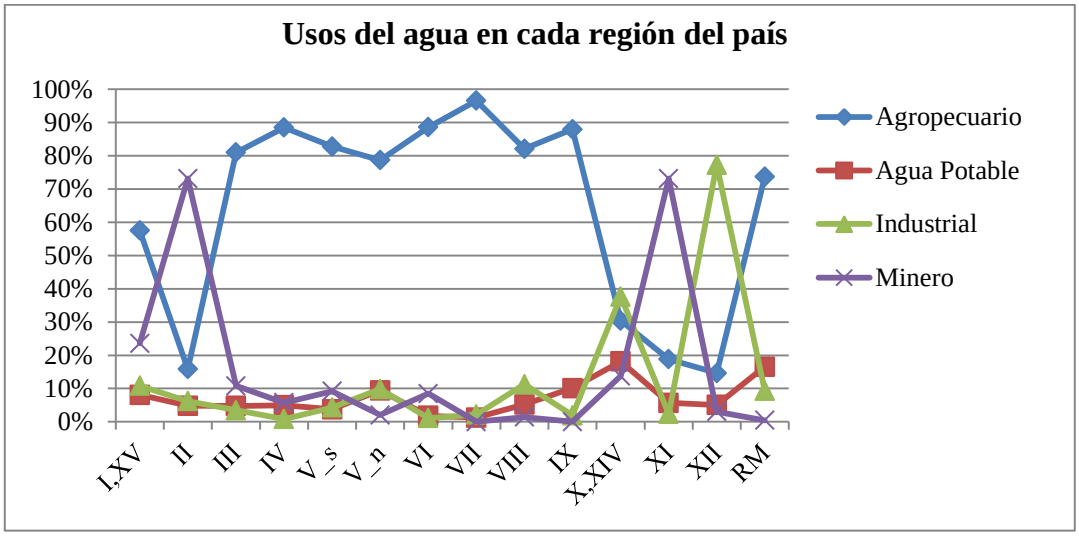

Gráfico 2-6 Usos del agua en cada región. Elaboración propia a partir de (5)

En la I y XV región se aprecia principalmente el sector agropecuario, luego en la segunda región el sector agropecuario disminuye drásticamente pero el sector minero toma el protagonismo en el consumo de agua. Entre las III y IX regiones el sector agropecuario es indiscutiblemente el principal consumidor de agua. Por último al sur, incluyendo la región Metropolitana se observa un aumento en el sector industrial con presencia de minería y agricultura. El consumo de agua potable es bastante constante a lo largo del país.

2.1.3.1 Sector Silvo-agropecuario

Este sector es el principal consumidor de agua del país, llegando al 73% de las extracciones consuntivas, destinadas a regar predios agrícolas ubicados entre las regiones de Coquimbo y Los Lagos. El rubro de la agricultura generó el año 2011 el 22% de las exportaciones del país y emplea casi el 10% de la fuerza laboral y para el mismo año genero el 3% del PIB nacional. Esta actividad está bastante concentrada, siendo muy relevante en algunas regiones (5).

2.1.3.2 Sector minero

Este sector representa el 9% del consumo de agua, el año 2013 figuró como el tercer sector más importante para la economía del país, con una contribución del 11,1% al PIB nacional y generando cerca del 60% de las exportaciones. Este rubro se ubica en la zona de mayor estrés hídrico del país, donde además se estima que la situación se agravará en los próximos 25 años, aumentando la demanda hídrica en un 200% (5).

Si bien el gremio de la minería no es el principal consumidor del recurso, su demanda se encuentra concentrada en el extremo norte del país, precisamente donde el déficit se acentúa (5).

2.1.3.3 Agua Potable y saneamiento

El 6% de los derechos consuntivos se atribuyen a este sector, el 44% de estos derechos de agua están asignados a la región Metropolitana y un 12% a la región de Valparaíso. Se calcula que el 66,7% del total se abastece de fuentes subterráneas, el 18,4% de fuentes superficiales y el porcentaje restante proviene de fuentes mixtas.

Además en el norte del país operan plantas desalaladoras, como es el caso de Antofagasta y Taltal (5).

2.1.3.4 Producción de energía eléctrica

A la fecha la matriz de energía eléctrica nacional tiene una capacidad instalada cercana a los 20.000 MW. De los cuales las centrales térmicas dominan con un 63% del total, las hidráulicas con el 31,2% y en menor medida las eólicas con un 3,5% y las solares con el 1,4% del total (14). Tanto las hidroeléctricas como las centrales térmicas, necesitan agua para operar. Gran parte de las centrales termoeléctricas se ubican desde la región Metropolitana al norte, en las zonas áridas y semiáridas del país, mientras que las centrales hidráulicas se ubican principalmente en las regiones del Maule y el Bío Bío. Se estima que estas últimas utilizan un caudal medio anual de $4.000.000\ [kg/s/año]$ (5). Mientras que las termoeléctricas se abastecen prácticamente en su totalidad a partir de agua de mar, extrayendo apenas $856\ [kg/s]$ de la red de pozos (15).

2.1.4 Balance de Oferta-Demanda de agua en Chile

Con los aspectos estudiados hasta el momento, resulta fácil distinguir la poca homogeneidad en la distribución del recurso hídrico en el país.

En vista de que ya se tiene una idea general de la disponibilidad de los distintos recursos hídricos a lo largo del país y también se conoce la demanda de este recurso según cada sector productivo, se puede estudiar el balance sobre la oferta y demanda de agua en el Chile.

De acuerdo a los antecedentes de la DGA y las proyecciones realizadas en función del crecimiento económico y de la infraestructura prevista a construir, se calcula un déficit de agua entre la oferta y la demanda para la zona comprendida entre la región de Arica y Parinacota y la región Metropolitana, déficit que se incrementara sustantivamente en un horizonte de 15 años, tal como se aprecia en el gráfico 2.8.

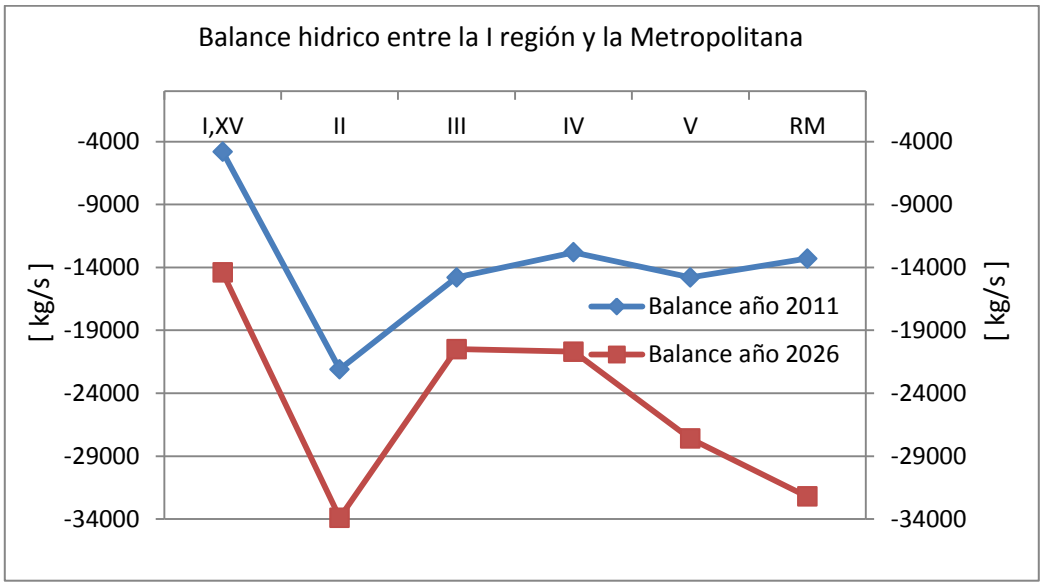

Gráfico 2-7 Balance hídrico oferta/demanda. Elaboración propia a partir de (5)

Tras realizar el balance hídrico de la oferta/demanda por regiones, resulto ser que el déficit se encuentra entre la primera región y la Metropolitana, de esta manera solo se graficaron las series para las regiones con déficit hídrico, tal como se ve en el gráfico 2-7.

A partir del balance actual se observa el mayor déficit en la segunda región, cercano a $23.000\ [kg/s]$, luego desde la tercera región hasta la Metropolitana el déficit se

mantiene en torno a los $14.000\ [kg/s]$, mientras que en el extremo norte del país no es tan crítica la situación, con un déficit de $4.000\ [kg/s]$ para Arica y Parinacota (5).

Al realizar el ejercicio para el año 2026, los resultados son cualitativamente semejantes al escenario actual, pero cuantitativamente un poco más graves. Generalmente la situación se agrava parejamente para totas las regiones, aumentando el déficit en cerca de $10.000\ [kg/s]$, con excepción de la región de Valparaíso y la metropolitana, donde el déficit aumentara en casi $14.000\ [kg/s]$ para valparaiso y en $20.000\ [kg/s]$ para la metropolitana (5).

2.1.5 Escasez hídrica

Resulta inevitable notar una disminución de las precipitaciones y los caudales, además si a esto se le suma la elevación de la isoterma cero, se hace evidente la escasez hídrica que se vive en las zonas norte, centro e incluso en algunas comunas de la zona sur del país. Por otra parte el cambio climático no ayuda a revertir esta situación, como resultado se ve afectada la disponibilidad de agua superficial y con esto la recarga de aguas subterráneas.

Según los datos que se tienen, se ha establecido que ciento diez cuencas del país tienen una demanda comprometida superior a su recarga natural, o sea que las extracciones comprometidas superan la recarga natural del acuífero. Por consiguiente se encuentran sobre otorgadas. Puntualmente la región de Valparaíso presenta el peor escenario, tal como se puede ver en la tabla 2-1 (5).

Tabla 2-1 Sobre otorgamientos de DAA por cada región. Elaboración propia a partir de (5)

Región	Sobre otorgamiento
XV	1
I	5
II	6
III	20
IV	23
V	28
RM	20
VI	7
Total País	110

Paralelamente, los estudios señalan que cada vez lloverá más intensamente y en intervalos de tiempo más cortos, esto provocará que el agua no alcance a infiltrarse en la tierra, sino que escurrirá por la superficie, erosionado el terreno.

El centro de estudios científicos de Valdivia estima que el 90% de los glaciares cordilleranos están disminuyendo y que en campos de hielo sur se han registrado retrocesos de hasta 30 metros por año (16). También la Dirección Meteorológica de Chile señala que en los últimos 100 años las precipitaciones tienden a disminuir en el país (17).

El año 2014 la escasez de agua obligó a la DGA a declarar 41 comunas bajo escasez hídrica durante el mes de mayo. Para hacer frente a esta situación fue necesario implementar abastecimiento con camiones aljibe, medida que cuesta cerca de 4,5 $[MM\ US\$/mes]$. Durante el año 2015, esta situación estuvo presente en 13 de 15 regiones del país, abasteciendo a 400.000 personas en forma mensual (5).

2.1.6 Cambio Climático

La Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) realizo un estudio para estimar los impactos que pueda tener el cambio climático sobre Chile. Se estima que las temperaturas aumentarían en promedio un grado durante los próximos 30 años, por otra parte, las precipitaciones disminuirán hasta un 30% hacia fines de siglo, principalmente entre las regiones de Valparaíso y Los Lagos. Por un lado, no se tiene claro que pueda ocurrir en la zona norte del país, pero para Magallanes se estima un aumento sostenido en las precipitaciones.

Al realizar un análisis por sectores económicos, los más afectados serían, silvo-agropecuario, hidroeléctrico y los consumidores de agua potable. Por una parte el precio de la energía podría aumentar por la falta de agua y para los consumidores de agua potable, una de las cuencas más afectadas seria la del rio Maipo.

Desde comienzos del siglo pasado, las precipitaciones han disminuido a lo largo del país. Por ejemplo tanto en La Serena como en Concepción, las precipitaciones han disminuido desde $80 - 150\ [mm/año]$ aproximadamente. Los registros muestran que en los últimos 20 años las precipitaciones entre Coquimbo y Valdivia han disminuido cerca de una 25%. Las proyecciones muestran que para los próximos 30 años, entre la región de Coquimbo y O"Higgins las precipitaciones disminuirán ente un 20-25%, en el sector costero de Arica y Parinacota se esperan disminuciones del 5-20% y contrariamente en el extremo sur se esperan aumentos cercanos al 25% (5).

A partir de la tasa de crecimiento de la agricultura se prevé que para los próximos 40 años la demanda hídrica por parte de este sector aumentara cerca de $4.000\ [MMm^3]$. A nivel nacional habrá que tomar todas las medidas posibles para hacer frente a la creciente demanda del recurso hídrico y la disminución en la disponibilidad (5).

Como conclusión para este capítulo que se refiere a la situación hídrica en el país se puede afirmar que en Chile existe abundancia de este recurso, sin embargo su distribución es poco homogénea. Predecir el futuro de la situación hídrica es sumamente complejo, no obstante por una parte existen algunos indicadores que predicen una disminución de la disponibilidad del recurso y por otra parte es un hecho que el desarrollo de la sociedad gatillará un aumento en la demanda del recurso. Por lo anterior es importante comenzar a buscar alternativas para aumentar la disponibilidad de agua dulce de manera segura y sin causar grandes impactos en el medio ambiente.

2.2 Calores residuales

Refinerías, termoeléctricas y algunos procesos industriales necesitan agua dulce para operar. Si hay calores residuales o energía eléctrica disponible, es posible acoplar una planta desoladora por evaporación a alguno de los tres casos mencionados y así suministrar agua fresca al proceso mismo y/o a la comunidad.

Cuando se utiliza calor residual proveniente de alguna industria, es importante comprender que más allá de la eficiencia de la planta desoladora, lo importante es que esta planta sea capaz de enfriar al proceso industrial para que este opere oportunamente.

En este estudio esencialmente se trabajara con termoeléctricas como fuente de calor residual, ya que estas centrales tienen una presencia importante en el país.

En Chile, contemplando el SIC y SING se cuenta con casi 30 centrales térmicas que operan con carbón, sumando una capacidad instalada de $4.337{,}2\ [Mw]$. Estas centrales se ubican principalmente en las regiones de Antofagasta, Valparaíso y el

Bio Bio. La potencia generalmente oscila entre los $100 - 300\ [Mw]$, siendo la de mayor potencia la central Guacolda ubicada en la ciudad de Huasco, la cual alcanza una potencia superior a los $600\ [Mw]$ (14).

Geográficamente gran parte de la capacidad instalada en plantas termoeléctricas se encuentra en la zona norte del país, donde la escases hídrica está más presente, también es importante el hecho que gran parte de estas centrales se encuentran en regiones costeras, con un fácil acceso al Océano Pacifico. Estos antecedentes hacen de las termoeléctricas una alternativa interesante para acoplarles una planta desaladora para generar agua dulce para su propio consumo, el de privados y/o la comunidad.

2.3 Operación de una termoeléctrica

Las termoeléctricas a carbón operan bajo un ciclo Rankine. De forma muy general, en este ciclo de vapor, el agua es comprimida a presiones cercanas a los 150 [bar], luego se adiciona calor en la caldera para generar una expansión a presión constante, donde el vapor alcanza temperaturas superiores a los 500 [°C]. Luego el vapor es conducido a la turbina para convertir la energía térmica en mecánica. Una central puede contar con hasta tres turbinas, para expandir el vapor más eficientemente a medida que disminuye su presión. Una vez que el vapor abandona la turbina es conducido al condensador para volver a su fase liquida y comenzar nuevamente el ciclo (18).

Normalmente la eficiencia de estas centrales se encuentra entre el 40-50 %, esto depende de la antigüedad de las instalaciones, para centrales más nuevas se esperan mejores eficiencias, mientras que para las más antiguas este parámetro puede ser inferior al 40% (18).

Aproximadamente, de la totalidad del calor adicionado en la caldera, cerca de un 40% se traduce en energía mecánica en la turbina, luego el 59% se disipa en el condensador y el 1% restante se utiliza para operar compresores de vapor o precalentar el agua de alimentación de la caldera (18).

2.4 Tecnologías de desalación

Hoy en día existen diversos métodos para desalinizar agua, naturalmente algunos métodos están ampliamente desarrollados, mientras que otros aún están en investigación y pruebas piloto.

Para este estudio se han elegido los métodos de desalación por destilación que ya han alcanzado niveles comerciales en el mundo, dentro de los cuales está el método Multi-Stage Flash (MSF) y Multi-Effect Desalinisation (MED), los cuales representan el 34% de la capacidad instalada total. Por otra parte la desalación por osmosis inversa representa cerca del 60% del total de la capacidad instalada por lo que esta tecnología también se menciona en este capítulo. Luego, el porcentaje restante en la capacidad instalada es representado por otras tecnologías (9).

Al utilizar métodos de destilación se obtiene agua de alta pureza con concentraciones de sales inferiores a 10 ppm, mientras que la osmosis inversa permite obtener un producto con concentraciones en torno a las 200-500 ppm, dependiendo de las presiones de trabajo (11).

A continuación en la tabla 2-2 se muestra una comparativa entre los métodos más desarrollados comercialmente.

Tabla 2-2 Comparativa de principales tecnologías de desalación (11).

Energía utilizada	**Térmica**		**Mecánica**
Proceso	MSF	MED	Osmosis inversa
Consumo de calor $[kJ/kg]$	250-330	145-390	[-]
Consumo eléctrico $[kWh/m^3]$	3-5	1,5-2,5	2,5-7
Costo de la planta $[US\$/m^3/día]$	1500-2000	900-1700	900-1500
Producción por unidad $[m^3/día]$	<76000	<36000	<20000
% Destilado/Agua de mar	10-25%	23-33%	20-50%
Mantenimiento(Limpieza por año)	0,5-1	1-2	Muchas veces
Pre tratamiento del agua	Simple	Simple	Demandante
Operación	Simple	Simple	Demandante
Calidad del destilado $[ppm]$	<10	<10	200-500

En la tabla 2-2 se puede ver una comparativa de los principales parámetros de funcionamiento de las tecnologías de desalinización más desarrolladas. Inmediatamente se puede ver que si se contempla la energía térmica y eléctrica, la osmosis inversa tiene un consumo total mucho menor que la MSF y MED, sin embargo si la energía térmica no representa un costo de operación, los sistemas pasan a ser bastante competitivos. Desde el punto de vista de la inversión, las tres tecnologías se asemejan bastante, sin embargo las plantas MED y MSF se destacan por producir grandes cantidades de destilado, necesitar menos mantenimiento, el agua recibe un pretratamiento más simple, su operación es más sencilla y la calidad del destilado es mejor respecto a la osmosis inversa.

Existen algunos parámetros establecidos que permiten determinar el rendimiento de las plantas MED y MSF.

- Gained Output Ratio (GOR)

Es una medida de cuanta energía térmica es consumida en el proceso de destilación, generalmente definida en kilogramos de destilado por kilogramos de vapor.

$$GOR = \frac{kg_{H2O}}{kg_{vapor}}$$

Normalmente este parámetro es cercano a 10, pero cuando la energía térmica es abundante, puede tenerse un GOR menor ya que no es necesario construir una planta tan eficiente. Por el contrario cuando la energía térmica es escasa, se hace plantas desaladoras más eficientes con GOR hasta 18. El GOR se define para minimizar los costos del proyecto, buscando un equilibrio entre los Capex y Opex (12).

- Performance Ratio (PR)

Destilado producido por unidad de energía, se suele utilizar cuando la fuente de energía no es vapor y no es posible definir el GOR (9).

$$PR = \frac{kg_{H2O}}{Q_{ext}}$$

Es importante aclarar que para estos dos parámetros no se toma en cuenta el consumo eléctrico, sino que solo el calor suministrado (9).

- Specific Energy Consuption (SEC)

Consumo específico de energía, ya sea eléctrica (kwh_E) y/o térmica (kwh_T) para producir un unidad de agua fresca (9). El consumo térmico promedio de una planta MED osila entre los $145 - 390$ $[kWh/m^3]$ (11) , mientras que el consumo eléctrico esta entre $1{,}5 - 2{,}5$ $[kWh/m^3]$, esta energía eléctrica es utilizada para bombear los fluidos y producir el vacío en el sistema. (11) .

$$SEC = \frac{kwh_T + kwh_E}{kg_{H2O}}$$

- Recovery Ratio (RR)

Razón entre el flujo másico de destilado y el flujo másico de agua de alimentación (9).

$$RR = \frac{kg/s_{H2O}}{kg/s_{Alimentación}}$$

2.4.1 MSF Multi-Stage flash

Este sistema de desalinización térmica relaciona la evaporación y condensación del agua salada. Así el precalentamiento de esta cuando ingresa al sistema, se realiza mediante intercambiadores que también buscan condensar el agua que ya ha sido evaporada, de esta manera se aprovecha el calor latente al evaporar el fluido. En la imagen 2-1 se puede ver el layout de una central MSF simple.

Al ingresar el agua de mar (agua de alimentación), pasa a través de intercambiadores de calor para el pre-calentamiento y luego ingresa al calentador de salmuera, donde

alcanza su temperatura máxima. El vapor suministrado al calentador de salmuera proviene de ciclos térmicos como el Rankine o cualquier otra fuente de calor.

Tras pasar por el calentador de salmuera, el agua de alimentación ingresa a la primera etapa de evaporación, la cual se encuentra a una presión menor que la caldera. Al ingresar el agua de mar a alta temperatura en una cámara a menor presión, esta ebúlle rápidamente, produciéndose un fenómeno conocido como “flashing”

Una vez que se ha evaporado parte del agua salada, este vapor asciende hasta los intercambiadores de calor que buscan precalentar el agua de alimentación y también condensar el agua que se ha evaporado, así se aprovecha el calor latente de la evaporación del fluido.

A cada uno de estos procesos se le llama “Stage” o “etapa”, se pueden implementar hasta 40, aunque generalmente se usa hasta 20.

Para mejorar la eficiencia del sistema, siempre se busca que las etapas sucesivas se encuentren a una presión más baja que la anterior. Esta disminución de la presión puede lograrse mediante una bomba de vacío que funcione con vapor o mecánicamente.

Las plantas MSF son ampliamente utilizadas en Medio Oriente y representan más del 50% (9) de la capacidad de desalinización en el mundo. Una ventaja de esta tecnología es la desalinización de grandes volúmenes de agua.

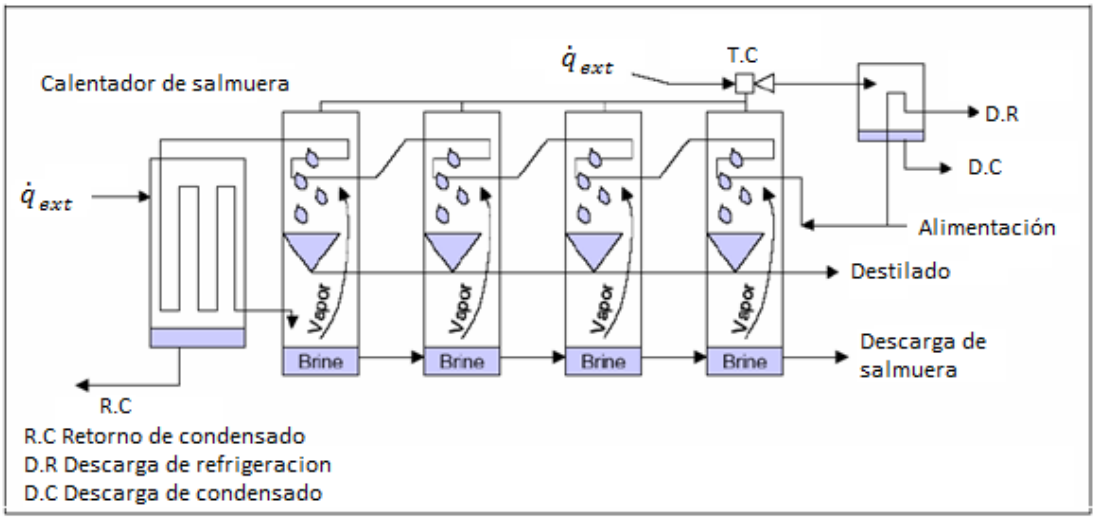

Ilustración 2-1 Diagrama de funcionamiento planta MSF (11)

Generalmente las plantas MSF de gran capacidad, se acoplan a ciclos Rankine, de esta manera se aprovecha el calor excedente de este ciclo y de cierta forma se sustituye el condensador por una planta desalinizadora, así el ciclo Rankine es refrigerado a través de la planta desaladora. Para poder operar la planta desaladora, es necesario que el vapor suministrado tenga ciertas características de presión y temperatura, por lo que se tendrá que sacrificar generación eléctrica para operar el conjunto. De esta manera el vapor extraído de la turbina se encuentra a una temperatura que oscila entre los 90 y 120 °C (11). Se debe resaltar que para aquellas turbinas en las cuales el vapor a la salida tiene temperaturas cercanas a los 50°C (11), se tendrá que sacrificar bastante generación eléctrica para que se den las condiciones necesarias para operar una planta MSF.

Las plantas MSF requieren grandes cantidades de vapor para poder operar, también se debe contar con suficiente energía eléctrica para bombear los fluidos, en torno a los

$3 - 5\ [kWh/m^3]$ y el requerimiento de calor oscila entre los $250 - 330\ [kj/kg]$ (11).

2.4.2 MED Multi-Effect Desalinisation

En este sistema de desalinización térmica, el agua de alimentación se rocía sobre intercambiadores de calor, por dentro de los cuales circula vapor a una temperatura cercana a los 70°C (11). El agua de alimentación se ha precalentado previamente y se busca que al rociarla sobre los intercambiadores, esta se deposite en forma de una película delgada y así una parte de esta agua salada se evapore. Es importante resaltar que solo en los intercambiadores del primer efecto circula vapor proveniente de la fuente de calor externa q_{ext}, luego el vapor generado en este efecto, circulara por los intercambiadores de calor del segundo efecto, donde se condensa y también genera vapor que circula por el tercer efecto y así sucesivamente, tal como se muestra en la imagen 2-2. Al igual que la plantas MSF, en las MED, la presión disminuye en cada efecto, para facilitar la evaporación.

Sucesivamente el proceso se puede repetir unas 16 veces. Tras el último efecto, el vapor generado se condesa en un intercambiador de calor aparte, llamado el condensador final, donde se aprovecha de precalentar el agua de alimentación

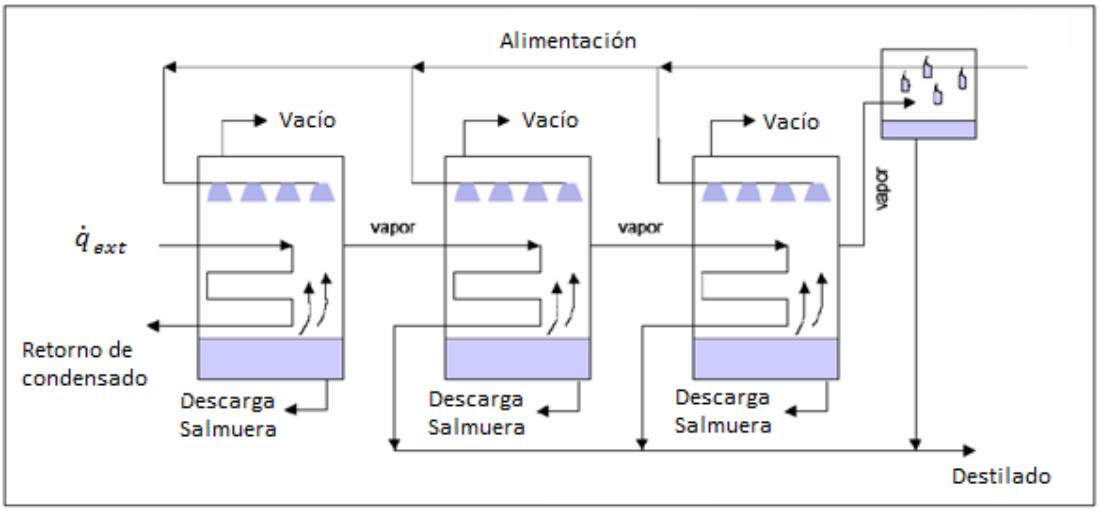

Ilustración 2-2 Diagrama de funcionamiento de planta MED (11)

Estas plantas desalinizadoras presentan una eficiencia eléctrica y térmica superior a las plantas MSF, cercanas a los $1{,}5 - 2{,}5\ [kWh/m^3]$ y $145 - 390\ [kj/kg]$ (11) respectivamente. También pueden operar a temperaturas más bajas, la salmuera alcanza temperaturas máximas (BTT) de 70°C (11), así se disminuye las incrustaciones y corrosión, ya que la sal es menos soluble a mayores temperaturas (11). El límite inferior de temperatura del vapor con el cual pueden operar, es cercano a los 55°C (11), permitiendo así trabajar con vapor residual de bajo grado. De esta manera al acoplar estas plantas desalinizadoras a ciclos térmicos, la energía eléctrica que se deja de generar es menor que para el caso de las plantas MSF.

Las plantas MED pueden tener diferentes configuraciones, principalmente la superficie de intercambio de calor se puede disponer de maneras distintas, también puede variar la dirección del agua de alimentación con respecto al vapor. Estas plantas también se pueden acoplar con sistemas térmicos para adicionar calor entre etapas. Estos sistemas pueden operar con vapor TVC (Thermal Vapor Compresor) o

mecánicamente MVC (Mechanical Vapor Compresor), así se logra mejorar la eficiencia de estas plantas, disminuyendo el número de efectos.

En el siguiente esquema se muestra como estas centrales de desalación se acoplan a centrales térmicas para sustituir el condensador y así aprovechar el calor residual.

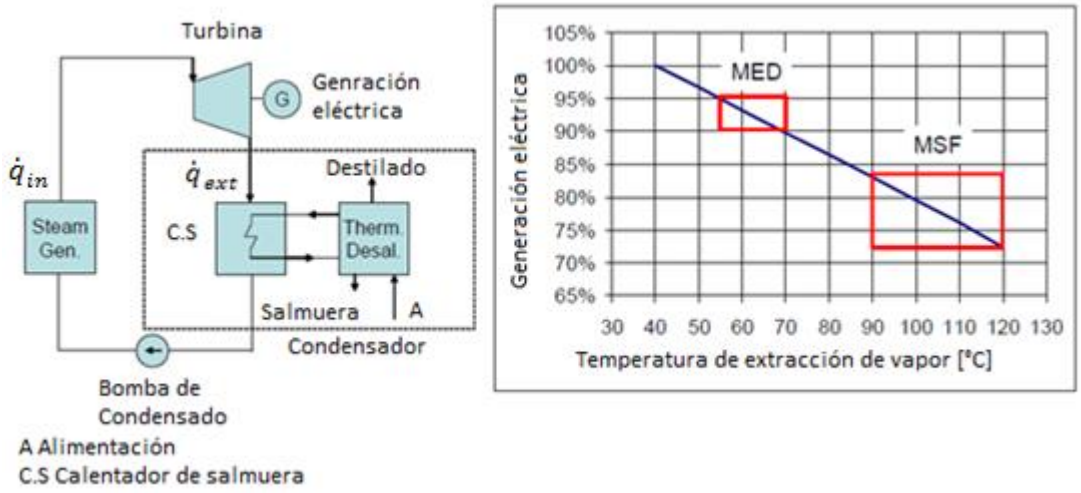

Ilustración 2-3 Izquierda, sustitución de condensador por planta desoladora térmica. Derecha, trade-off entre generación y desalación (11).

También, en la imagen 2-3 se puede apreciar en que rangos de funcionamiento se encuentra cada tipo de central. Tal como se expuso anteriormente las centrales MED pueden operar con vapor a menor temperatura y así se afecta en menor medida en rendimiento de la termoeléctrica. Por otra parte las plantas MSF demandan vapor a mayor temperatura para poder operar correctamente, de esta manera se debe generar menos electricidad para cumplir con los requerimientos de la planta MSF.

Si bien hoy en día el área de desalación térmica es dominada por la tecnología MSF, las pantas MED tienen un auspicioso futuro gracias a mejoras en su eficiencia, de esta forma, se espera que en el corto plazo estas plantas tomen la delantera en términos de capacidad instalada (19).

2.4.3 Thermal Vapour Compression (TVC)

En este sistema se agrega un compresor de vapor a una planta MED con el fin de mejorar su eficiencia. Como se ve en la imagen 2-4, una vez que el vapor ha dejado la última etapa de la planta MED, una parte de este se dirige al compresor y no al condensador. Tras pasar por el compresor, es ingresado a la primera etapa de la planta MED para que comience nuevamente el ciclo. Para hacer funcionar el compresor de vapor térmico, se extrae vapor de alguna fuente externa.

Al instalar un compresor de vapor se disminuye en torno al 50% el número de etapas de la planta, lo cual impacta positivamente los costos de capital del proyecto. Ahora bien, se debe contemplar que el vapor suministrado al compresor de vapor debe estar a una mayor presión y temperatura que para una planta MED, lo cual tendrá mayores efectos sobre el funcionamiento de la fuente de vapor.

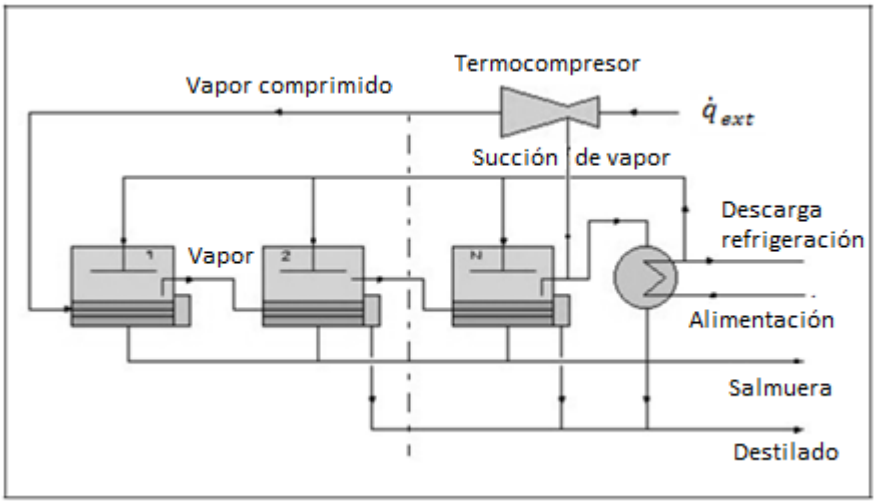

Ilustración 2-4 Diagrama de funcionamiento de planta MED con compresor de vapor térmico (TVC) (11)

2.4.4 Mechanical Vapour Compression (MVC)

El compresor de vapor mecánico se utiliza en plantas MED de pequeña o mediana escala, con capacidades de hasta 3.000 $[m^3/dia]$. Generalmente estos sistemas se instalan en plantas MED de hasta 3 etapas, no así como los sistemas TVC, los cuales se instalan en plantes MED de gran tamaño, con capacidades superiores a 30.000 $[m^3/dia]$. Esta diferencia se debe principalmente a que las altas presiones y temperaturas que se pueden alcanzar mecánicamente, están limitadas (11).

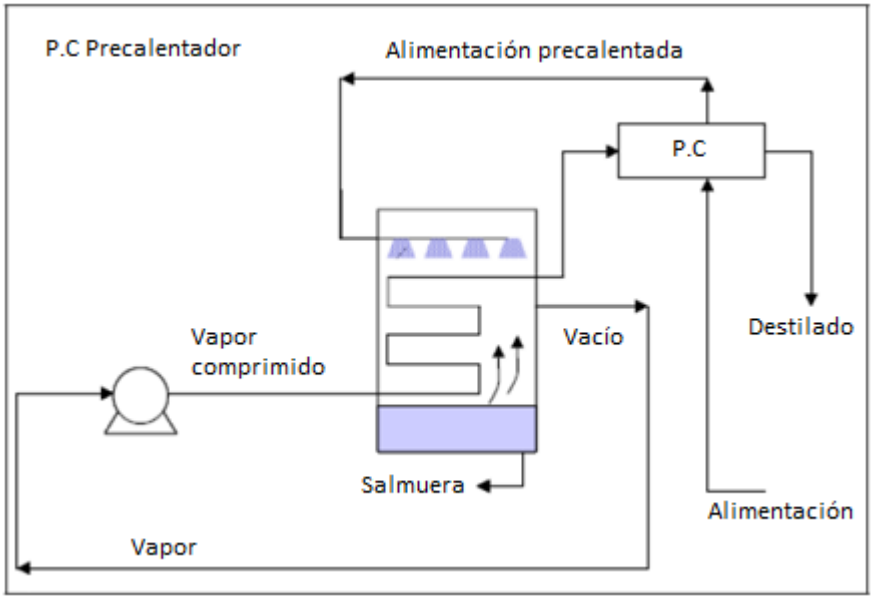

Ilustración 2-5 Diagrama de funcionamiento planta MED de un solo efecto con compresor de vapor mecánico (MVC) (11)

2.4.5 Osmosis reversa

La osmosis reversa es un sistema de separación por membrana que extrae agua dulce de una solución salina. Para separar las sales del agua dulce la solución salina se somete a altas presiones y de esta manera el agua dulce atraviesa la membrana, mientras que las sales se mantienen separadas. Así, la membrana no permite el paso de los iones de sal, sino que solo el paso del agua. Las membranas son muy sensibles al pH, óxidos y un amplio conjunto de sustancias orgánicas, algas, bacterias y fouling. De esta forma, el tratamiento del agua de alimentación es una etapa muy importante en el proceso de desalinización y puede representar parte importante de los costos, más aun si se asume que gran porcentaje del agua tratada, volverá al mar como una salmuera (brine). Últimamente se ha propuesto nano-filtración para sustituir el pretratamiento del agua de alimentación mediante productos químicos y

disminuir la contaminación de los océanos. En el proceso de osmosis reversa también se debe contemplar el post-tratamiento del agua, el cual consiste en remover los gases disueltos (CO2), estabilizar el pH mediante la adición de sales como Ca y Na, y por último se deben quitar todas las sustancias de la salmuera que puedan poner en riesgo el ecosistema marino.

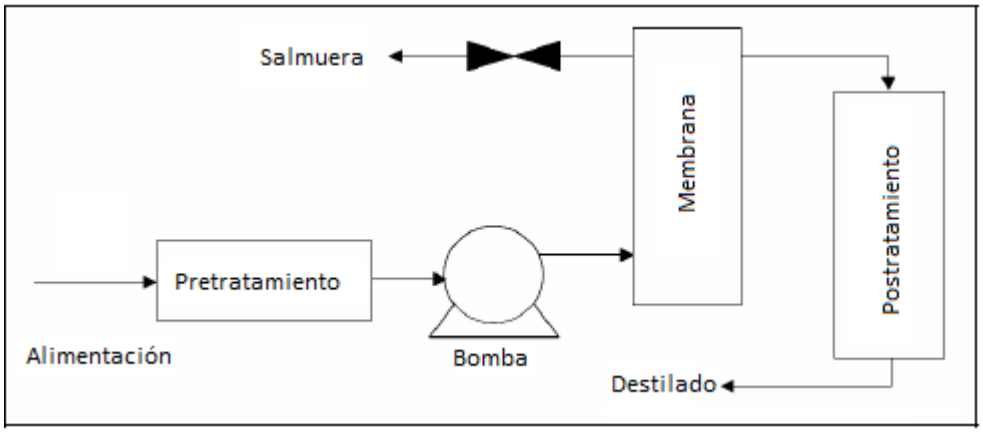

Ilustración 2-6 Diagrama de funcionamiento planta de osmosis reversa (11)

Es importante mencionar que el agua tras atravesar la membrana se encuentra a presión atmosférica, pero la salmuera al ser rechazada por la membrana sufre una muy leve caída de presión y puede ingresar a un recuperador de presión para mejorar la eficiencia del sistema

La salinidad del agua tratada, tiene efectos directos en las presiones que se deben alcanzar para lograr la separación de las sales y el agua. Así mismo, mientras mayores sean las presiones, mayores serán los costos para realizar el proceso de desalinización.

El consumo de energía eléctrica de este sistema oscila entre los $2{,}5 - 7\ [kWh/m^3]$ (11) y naturalmente no hay consumo de calor.

2.5 Conclusión

Si bien es difícil predecir fenómenos meteorológicos, existe una serie de estudios que indican una disminución de las precipitaciones en algunas regiones del país. Más aun el balance hídrico para el año 2014 indicó un déficit importante para las regiones al norte de la capital, señalando un déficit promedio de $14\ [m^3/s]$ que podría duplicarse el año 2026. Tal como ya se mencionó, estos pronósticos tienen altos grados de incertidumbre, por ejemplo este balance se realiza bajo ciertas estimaciones de crecimiento económico, las cuales pueden cumplirse o no. Sin embargo es bastante evidente que el agua es y será un recurso escaso, por lo cual es importante tomar medidas para entregar soluciones de largo plazo.

Hoy en día las principales tecnologías de desalación a gran escala son la MSF y MED en el campo de los sistemas evaporativos y la osmosis inversa en el área mecánica.

Si bien la osmosis inversa tiene la mayor participación en el mercado, los métodos térmicos son atractivos debido a que puede operar con calores residuales. Desde el punto de vista del pretratamiento, los sistemas evaporativos son más robustos y menos sensibles a contaminantes presentes en el agua de alimentación.

Por otra parte si se compara el consumo de energía total de cada sistema (térmica + eléctrica), la osmosis inversa es la que menor consumo tiene, sin embargo, si la energía térmica es residual **y no representa un costo adicional,** los 3 sistemas entran a ser bastante competitivos entre sí. Por otra parte, los sistemas por destilación entregan un producto de alta pureza, lo cual no se logra con osmosis inversa.

Durante los próximos años se espera que el sistema MED, aumente su capacidad instalada de manera significativa, gracias a las mejoras en su eficiencia térmica y al control de incrustaciones.

Al implementar un compresor de vapor a una planta MED es posible disminuir hasta en una 50% el número etapas, lo que se traduce en una importante reducción del CAPEX del proyecto, pero para operar un compresor de vapor se debe suministrar vapor a alta presión y temperatura, por lo que la configuración más conveniente se determinará según el contexto operacional.

Por último, la capacidad instalada de centrales termoeléctricas operadas con carbón es superior a los $4.000\ [Mw]$ y estas se emplazan precisamente en regiones donde el agua dulce es un recurso escaso. De esta manera se afirma que existe un buen potencial de calores residuales que podrían aprovecharse mediante la cogeneración.

3 Metodología

En este punto es importante recordar que el objetivo general de este trabajo es estudiar la factibilidad técnica de acoplar una planta desaladora por destilación a una central térmica a vapor. El principal resultado consiste en cuantificar el descenso de la eficiencia de la central térmica al realizar las extracciones de vapor necesarias para operar la planta desaladora.

En este trabajo se desarrolló un modelo de central termoeléctrica en ESS y se utilizaron 3 modelos de plantas desoladoras desarrollados previamente por otras personas. De esta manera, con el mismo modelo de central térmica se plantean tres escenarios al acoplar cada uno de los tres modelos de plantas desaladoras. El primer modelo es un MED-TVC que recrea la planta desaladora ALBA MED, modelado con ESS. Luego se utiliza un modelo de planta MED que recrea la planta desaladora instalada en la Planta Solar de Almería y por último se trabaja con datos de una planta MED ubicada en Tianjin, China. Más adelante se profundizará en cada uno de estos modelos utilizados.

La metodología utilizada sigue el flujo mostrado en la ilustración 3-1, en la cual se aprecian que para el modelo de central térmica desarrollado se acoplan distintos modelos de plantas desaladoras. De igual manera se muestran los inputs y outputs más importantes del sistema.

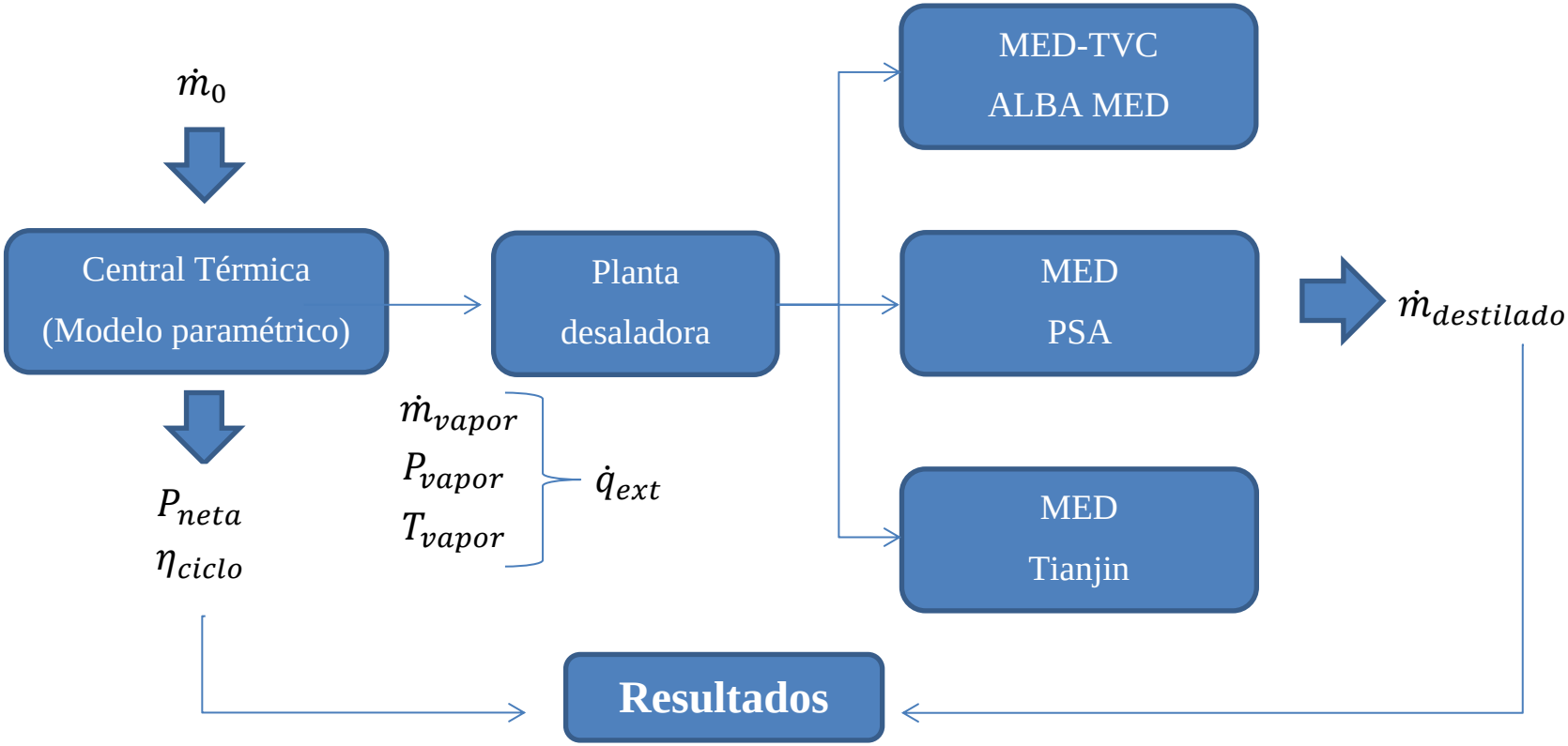

Ilustración 3-1 Diagrama de metodología

3.1 Modelo Central Termoeléctrica

Para desarrollar este modelo se utilizó el lay out de la imagen 3-2 el cual se adecuo lo mejor posible para simular una central real.

Con el modelo desarrollado se buscó recrear la Central Termoeléctrica Angamos 1 (ANG1), la cual se encuentra en la ciudad de Mejillones, región de Antofagasta. Esta central tiene una potencia neta de 244 [Mw]. De esta manera el modelo desarrollado en ESS se ha adecuado para igualar la potencia neta de la central Angamos 1 y así enfocar el estudio en un escenario real de nuestro país.

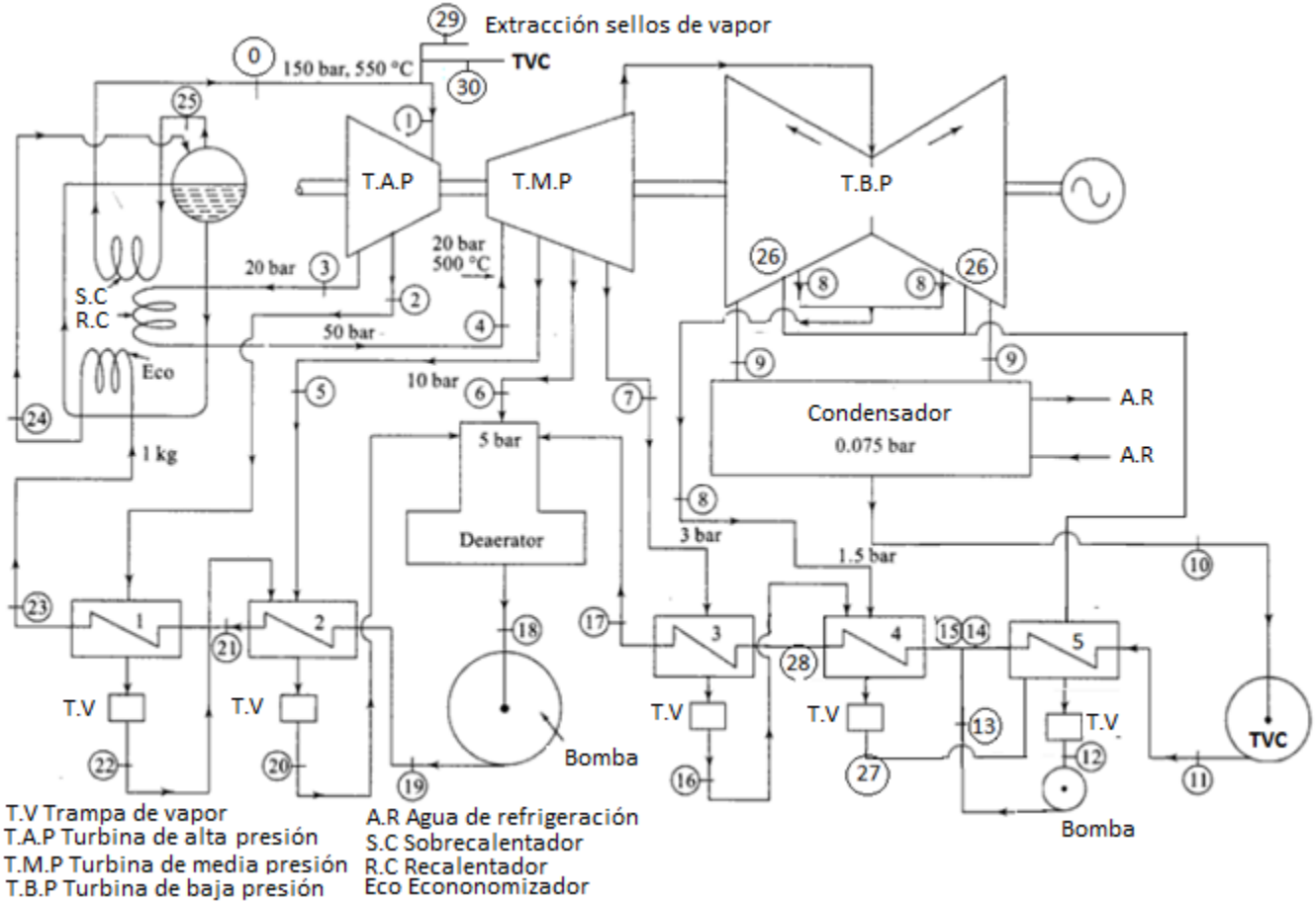

Ilustración 3-2 Lay out del modelo de central termoeléctrica (18)

El ciclo comienza en el punto 18 que corresponde a entrada de la bomba de alimentación de la caldera, donde el fluido está en estado líquido y alcanza una presión de 150 [bar] (punto 19), luego ingresa a los intercambiadores de calor #2 y #1, en los cuales se precalienta con vapor proveniente de las extracciones de los puntos 3 y 5. El fluido ingresa a la caldera, primero por el economizador y luego al domo (punto 25) para separar el vapor y el líquido. El vapor ingresa al sobre calentador, donde se expande a presión constante, alcanzando una temperatura de 550 [°C] y el líquido vuelve a pasar por el economizador. De esta manera a partir del punto 0 se tiene solo vapor sobrecalentado. Antes de ingresar a la turbina se realizan extracción para los sellos de vapor (punto 29) y el compresor de vapor (punto 30). Una vez que el vapor ingresa en la turbina de alta presión, se realiza una extracción a 50 [bar], la cual ingresa a los intercambiadores #1 y #2. El resto del vapor se expande hasta los 20 [bar] para recalentarlo en la caldera e ingresarlo a la turbina de presión intermedia. En esta turbina se realizan 3 extracciones, las cuales se distribuyen entre el intercambiador de calor #2, el desaireador y el intercambiador #3. El vapor restante se extrae por la cola de la turbina e ingresa a la turbina de baja presión. En esta turbina se realiza una extracción para el intercambiador #4 y otra para el #5. Por último, el vapor restante ingresa al condensador para que el fluido vuelva su fase liquida, esta última extracción se realiza a una presión de 0,075 [bar] en el punto 9, con el objetivo de aprovechar la mayor cantidad de calor del fluido. Después del condensador se eleva la presión del líquido con el compresor de vapor (TVC) hasta los 5 [bar] y circula a través de los intercambiadores #5, #4 y #3.

Para finalizar el ciclo, el agua entra al desaireador, este equipo además de ser un intercambiador de calor abierto, tiene la función de eliminar los gases disueltos en el agua de alimentación de la caldera. Algunos gases como el oxígeno y el dióxido de carbono pueden ser corrosivos al reaccionar con metal. La solubilidad de estos gases decrece al aumentar la temperatura y llega cero en la temperatura de saturación. De

esta manera el agua de alimentación se calienta en el desaireador hasta su temperatura de saturación, a partir del vapor extraído de la turbina de presión intermedia (18).

Para tratar gases residuales en el agua de alimentación, se agrega sulfito de sodio Na_2SO_3 o hidracina N_2H_4 en la bomba de alimentación, así se evita que lleguen gases disueltos a la caldera (18).

El modelo opera a partir de algunos parámetros conocidos, los cuales permiten resolver las ecuaciones para determinar los parámetros no conocidos, tal como se ve en la tabla 3-1.

Tabla 3-1 Variables conocidas y desconocidas del sistema

Punto	P [bar]	T [°C]	X[-]	Punto	P [bar]	T [°C]	X[-]
1	150	538	?	16	3	?	0
2	50	?	?	17	5	?	?
3	20	?	?	18	5	?	0
4	20	500	?	19	150	?	?
5	10	?	?	20	10	?	0
6	5	?	?	21	150	?	?
7	3	?	?	22	50	?	0
8	1,5	?	?	23	150	?	?
9	0.075	?	?	24	150	?	0
10	0.075	?	0	25	150	?	1
11	5	?	?	26	1	?	?
12	1	?	0	27	1.5	?	0
13	5	?	?	28	5	?	?
14	5	?	?	29	150	538	1
15	5	?	?	30	150	530	1

Otras variables conocidas son el flujo másico en el punto 0 y 29, este último corresponde al vapor suministrado para los sellos de vapor, valor obtenido de la literatura (18). La potencia neta de la planta se fijó de acuerdo a la central AGM1.

$$\dot{m}_0 = 214\ [kg/s]$$

$$\dot{m}_{29} = 0{,}7\ [kg/s]$$

$$W_{nett} = 244\ [Mw]$$

Luego para calcular cada parámetro no conocido es necesario contar con 2 parámetros conocidos o despejarlo de algún balance de masa o energía.

En las turbinas se aplicó una eficiencia isotrópica para calcular los valores reales de la entropía y así obtener el resto de los parámetros desconocidos

$$\eta_{isentropica} = 0.8\ [-]$$

Así fue posible obtener la entropía, entalpía, temperatura y presión para cada punto.

Para los intercambiadores de calor se determinó una diferencia de temperatura entre la salida del fluido frío y el caliente.

$$\Delta T_{intercambiador} = 5\ [°C]$$

Para determinar los flujos másicos se realizaron balances de masa y energía en cada intercambiador de calor, el desaireador, la caldera, la turbina y el condensador. En las

bombas y el compresor de vapor también se realizó un balance de energía para determinar cuanta energía consumen estos elementos para luego poder calcular la eficiencia del ciclo.

Con las ecuaciones planteadas es posible resolver el sistema y despejar las incógnitas, representando los resultados en el siguiente grafico de temperatura versus entropía.

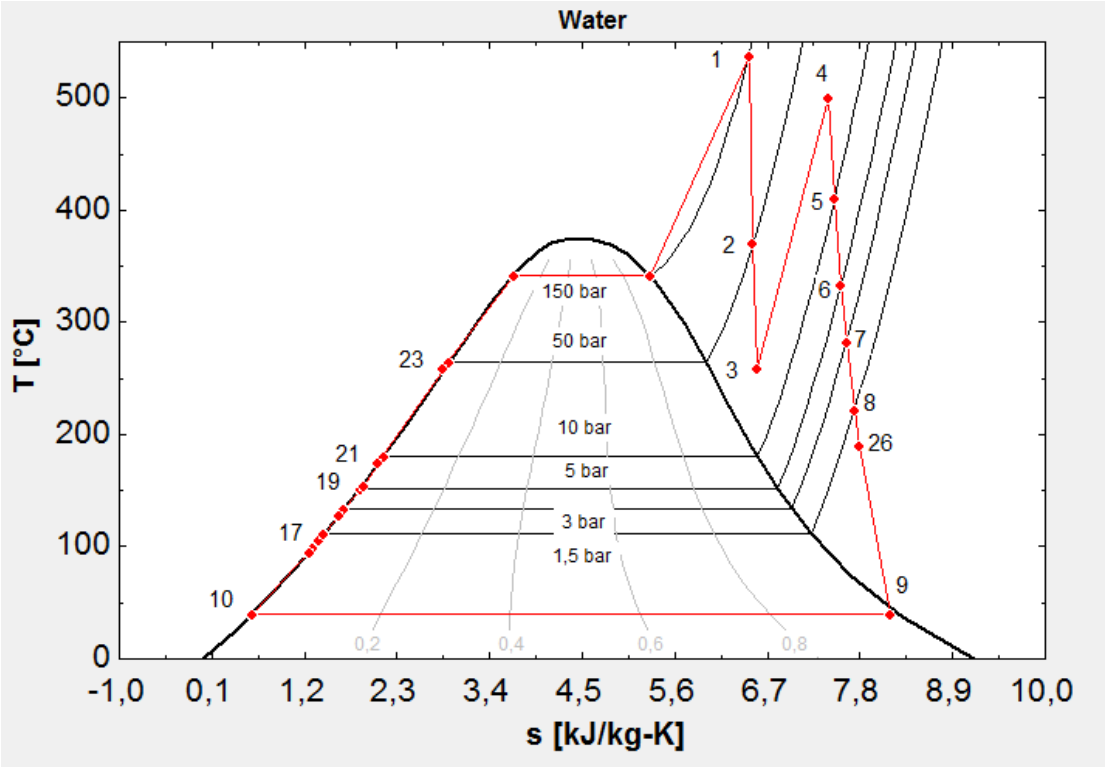

Gráfico 3-1 Temperatura en función de la entropía para el modelo de central termoeléctrica, elaborado con ESS

Bajo este escenario, el modelo desarrollado para la central termoeléctrica opera en torno a los valores que se muestran en la tabla 3-2.

Tabla 3-2 Parámetros de operación para modelo de central termoeléctrica.

	CT
$\dot{q}_{in}$ [Mw]	584,9
$\dot{q}_{out}$ [Mw]	344,6
η_{ciclo} [-]	0,409
P_{neta} [Mw]	244

3.2 Modelo planta desaladora

Como ya se ha mencionado antes, los tres modelos acá propuestos son parte de estudios anteriores. Primero se presenta el modelo de una planta MED-TC desarrollado por el Dr Rodrigo Barraza durante su tesis para optar al grado de "Master of sience" en la universidad de Wisconsin-Madison (20). El segundo modelo de planta MED fue desarrollado en conjunto por el "Qatar Envarioment and Energy Research Institute" y "CIEMAT-Plataforma Solar de Almería" (19). Por último se trabaja con datos del funcionamiento de una planta MED emplazada en Tianjin, China (13).

A continuación se explica brevemente la metodología seguida por los autores que han desarrollado cada uno de los modelos.

3.2.1 Modelo MED-TC

Este modelo de planta MED es estacionario y está compuesto por n-efectos, donde "n" debe ser igual o mayor a 3. El modelo se ha desarrollado para analizar el consumo específico de energía para el proceso de desalación, siendo posible variar el número de efectos, la configuración de la planta, la fuente de energía térmica y las características del agua de alimentación. El modelo se basa en balances de masa, sal y energía, ecuaciones de transferencia de calor y caída de presión en los efectos (20).

El modelo más simple de la planta MED considera solo 3 efectos, tal como se aprecia en la ilustración 3-3, el agua salada $\dot{m}_{Alimentación}$ entra al primer efecto siendo impulsada por la bomba de alimentación, pasando a través del condensador y los precalentadores del primer y segundo efecto. El primer efecto se diferencia de los demás ya que recibe la energía térmica desde una fuente externa $\dot{Q}_{ext}$. Luego de este efecto se extrae vapor y salmuera, para ingresar al segundo efecto, sin embargo, previo a esto el vapor pasa por el precalentador. De esta manera el proceso en el segundo efecto se lleva a cabo a partir del vapor generado en el efecto anterior. El tercer efecto recibe vapor proveniente del segundo efecto y luego el vapor generado se conduce a un condensador, el cual precalienta el agua de alimentación. Por ultimo este condensado se junta con el destilado proveniente de los demás efectos para bombearlo al post tratamiento y luego al centro de consumo $\dot{m}_{fw}$.

El autor de este modelo desarrolló cada efecto por separado, el primero, el intermedio y el último, tal como se ve en la ilustración 3-3. De esta manera si se desea aumentar la capacidad de la planta MED, solo es necesario añadir el efecto intermedio las veces que sea necesario, sin necesidad de reescribir el modelo.

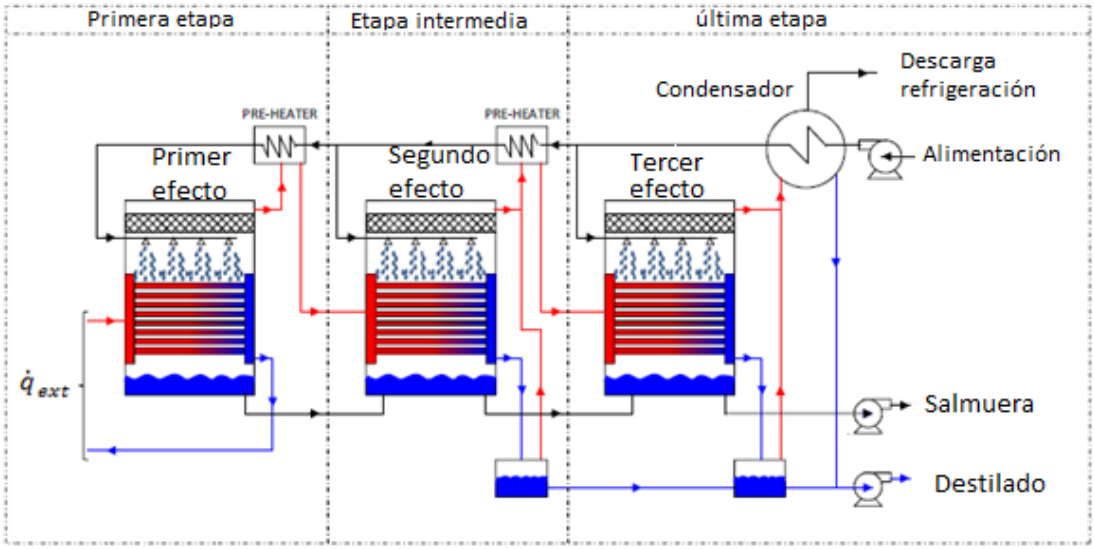

Ilustración 3-3Lay out de planta MED de 3 efectos. (16)

Los inputs requeridos por el modelo son los siguientes (20).

- Flujo másico, temperatura, presión y estado del recurso térmico
- Condiciones del agua de alimentación(temperatura y salinidad)
- Flujo másico de agua de alimentación (para cada efecto)
- Numero de efectos
- Dimensionamiento de los evaporadores, pre calentadores y condensador
- Temperatura del agua fresca que sale de la planta.

Por otra parte los Outputs más importantes proporcionados por el modelo (20).

- Flujo másico de destilado $\dot{m}_{destilado}[kg/s]$
- Consumo específico de energía. $SEC\ [Kwh/m^3]$

Al realizar el balance de energía sobre la planta se contempla tanto la energía térmica suministrada $\dot{Q}_{ext}$, como la energía eléctrica necesaria para las bombas W_{ext}.

Luego este modelo se ha combinado con un termo compresor (ejector), así se ha generado un modelo de una planta MED-TC.

Se realizan las mismas suposiciones que en el modelo de la planta MED, el lay out de la planta MED-TC más simple también contempla solo 3 efectos.

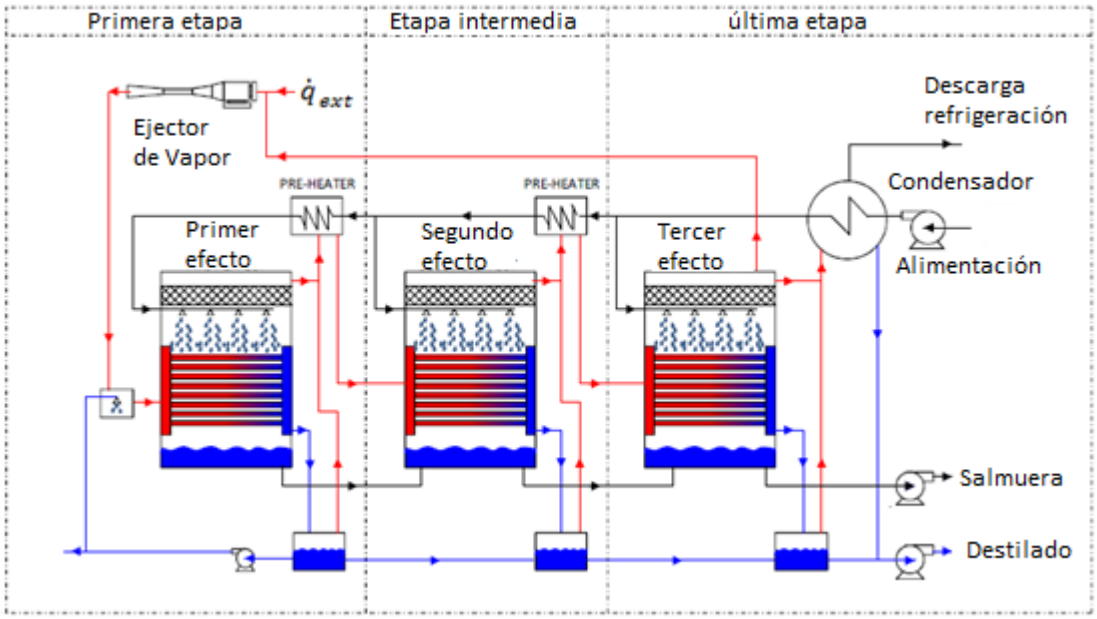

Ilustración 3-4 Lay Out planta MED-TC de 3 efectos (20)

La principal diferencia entre la planta MED y la MED-TC está en el primer efecto. En este nuevo modelo la fuente de calor es reemplazada por el ejector de vapor. Este equipo succiona vapor de agua a baja presión desde alguno de los efectos para comprimirlo y mezclarlo con vapor proveniente de una fuente externa de calor y alimentar al primer efecto. Los demás aspectos de la planta son similares al primer modelo.

La configuración utilizada en este estudio corresponde a la desarrollada para validar el modelo con la planta ALBA MED-TC instalada el año 1990 en una planta de calcinación de la empresa Aluminium Bahrain. Dicha configuración se puede ver en la ilustración 3-5, se aprecia que la primera etapa es la “1A” y “1B” ya que ambos reciben el $\dot{q}_{ext}$. Luego el vapor pasa a las etabas “2A” y “2B” respectivamente y por ultimo a las etapas 3 y 4. Para esta configuración en particular se tiene las etapas “A” y “B” trabajando en paralelo. El sistema cuenta con 3 ejectores de vapor que operan a partir de la energía suministrada $\dot{q}_{ext}$.

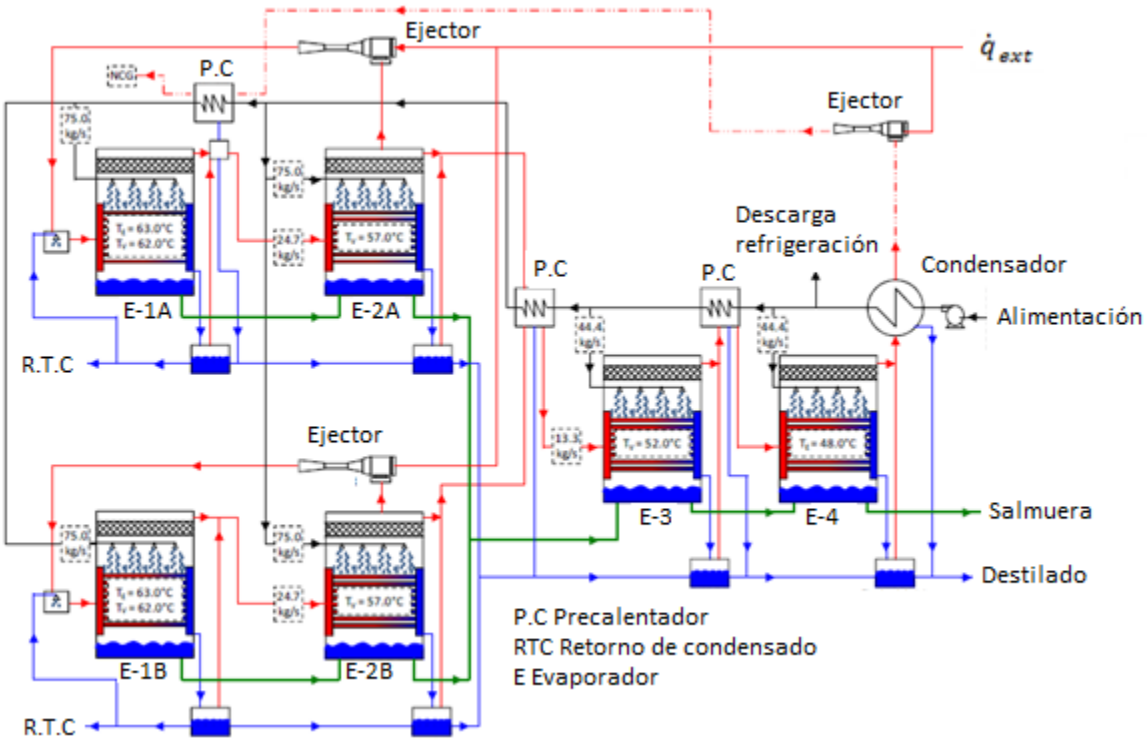

Ilustración 3-5 Lay out planta ALBA MED TC (20)

Los principales datos de operación del modelo se agruparon en la tabla 3-3 (20).

Tabla 3-3 Principales datos de operación planta MED-TC

Agua de alimentación	
$T\ [°C]\ (\text{sin}\, precalentar)$	33
$X_{sal\ en\ alimentación}\ [g/kg]$	35
$\dot{m}_{efecto\ 1}\ \ [kg/s]$	150
$\dot{m}_{efecto\ 2}\ \ [kg/s]$	150
$\dot{m}_{efecto\ 3}\ \ [kg/s]$	44,4
$\dot{m}_{efecto\ 4}\ \ [kg/s]$	44,4
Agua de refrigeración	
$\dot{m}_{refrigeración}\ \ [kg/s]$	602,5
Fuente de calor	
$\dot{m}_{vapor}\ \ [kg/s]$	16,7
$T_{vapor}\ [°C]$	224
$P_{vapor}\ [bar]$	21
Retorno de condensado	
$T_{RC}\ [°C]$	67
Diseño de evaporadores	
$A_{efectos\ 1-2}\ \ [m^2]$	5400
$A_{efectos\ 3-4}\ \ [m^2]$	2300

Con la información, de la tabla anterior, el modelo entrega los datos de operación que se muestran en la tabla 3-4.

Tabla 3-4 Principales datos de operación planta MED-TC

Salmuera	
$\dot{m}_{salmuera}\ [kg/s]$	267
$T_{salmuera}\ [°C]$	45,3
Producción de destilado	
$\dot{m}_{Destilado}\ [kg/s]$	124,4
$T_{Destilado}\ [°C]$	38
$GOR\ [-]$	7,4
$SEC\ [kwh/kg]$	96,6

La validación del modelo ha mostrado diferencias máximas de un 9% respecto a la operación, tal como se ve en la tabla 3-5. El flujo másico de vapor de alimentación en el efecto 2 muestra una diferencia del 9% entre el modelo y la realidad, para todos los otros parámetros, las diferencias son inferiores. Con la nota N.D se señalan los datos que no estuvieron disponibles.

Tabla 3-5 Comparación valores reales y valores modelo.

Parámetros de operación	Valores reales	Valores modelo	Δ [%]
Vapor de alimentación			
Efecto 1	N.D $[kg/s]$	42,2 $[kg/s]$	
Efecto 2	49,4 $[kg/s]$	45,0 $[kg/s]$	-9
Efecto3	13,3 $[kg/s]$	14,0 $[kg/s]$	5
Efecto 4	N.D $[kg/s]$	14,0 $[kg/s]$	
T° Evaporador			
Efecto 1	63,0 $[°C]$	63,0 $[°C]$	1
Efecto 2	N.D $[°C]$	58,0 $[°C]$	
Efecto3	N.D $[°C]$	51,6 $[°C]$	
Efecto 4	48,0 $[°C]$	44,7 $[°C]$	-6
T° Vapor			
Efecto 1	62,0 $[°C]$	63,0 $[°C]$	2
Efecto 2	57,0$[°C]$	58,0 $[°C]$	2
Efecto3	52,0 $[°C]$	51,6 $[°C]$	-1
Efecto 4	N.D $[°C]$	44,7 $[°C]$	
Agua de refrigeración			
Temperatura	43 $[°C]$	43,6 $[°C]$	1
Salmuera			
Flujo másico	263,6 $[kg/s]$	267,0 $[kg/s]$	1
Temperatura	48 [°C]	45,3 [°C]	-6

3.2.2 Modelo MED

En este caso de estudio se utilizara un modelo de planta MED operada con vapor proveniente de colectores solares, instalada in la Plataforma Solar de Almería (PSA) (19). En esta planta piloto se ha mejorado la eficiencia energética y opera con vapor a baja temperatura proveniente de los colectores cilindro-parabólicos, la principal innovación se encuentra en la recuperación del calor sensible presente en el destilado.

La planta desaladora de PSA es una unidad MED construida por la empresa ENTROPY en el año 1987, su lay out se puede ver en la imagen 3-6. Esta planta cuenta con 14 efectos en configuración vertical en los cuales la temperatura y presión va disminuyendo del primero hasta el último. Tiene 13 pre-calentadores ubicados cada uno al lado de un efecto para precalentar el agua de alimentación mientras se bombea hacia arriba hasta el primer efecto. El aumento de temperatura del agua de alimentación en cada pre-calentador corresponde al calor de condensación del vapor generado en cada efecto.

En la ilustración 3-6 se puede ver el diagrama de flujo del proceso. Como se dijo, el agua de alimentación $\dot{m}_{alimentacion}$ pasa por los pre-calentadores para llegar al primer efecto donde es rociada para depositarse en forma de película delgada sobre los tubos horizontales de intercambio de calor.

El primer efecto opera con vapor saturado a baja presión proveniente de los colectores solares u otra fuente de calor $\dot{q}_{ext}$. Este vapor circula por dentro de los tubos de intercambio de calor y entrega su calor latente al agua que se ha depositado

sobre ellos, evaporándose una parte de esta. El vapor generado en el primer efecto fluye a través de una malla para retener las gotas de salmuera presentes en él. Parte del vapor se condesa en el pre-calentador transfiriendo su calor latente al agua de alimentación. El resto del vapor fluye a través de los intercambiadores del segundo efecto, trasfiriendo su calor latente a la salmuera que cae desde el primer efecto.

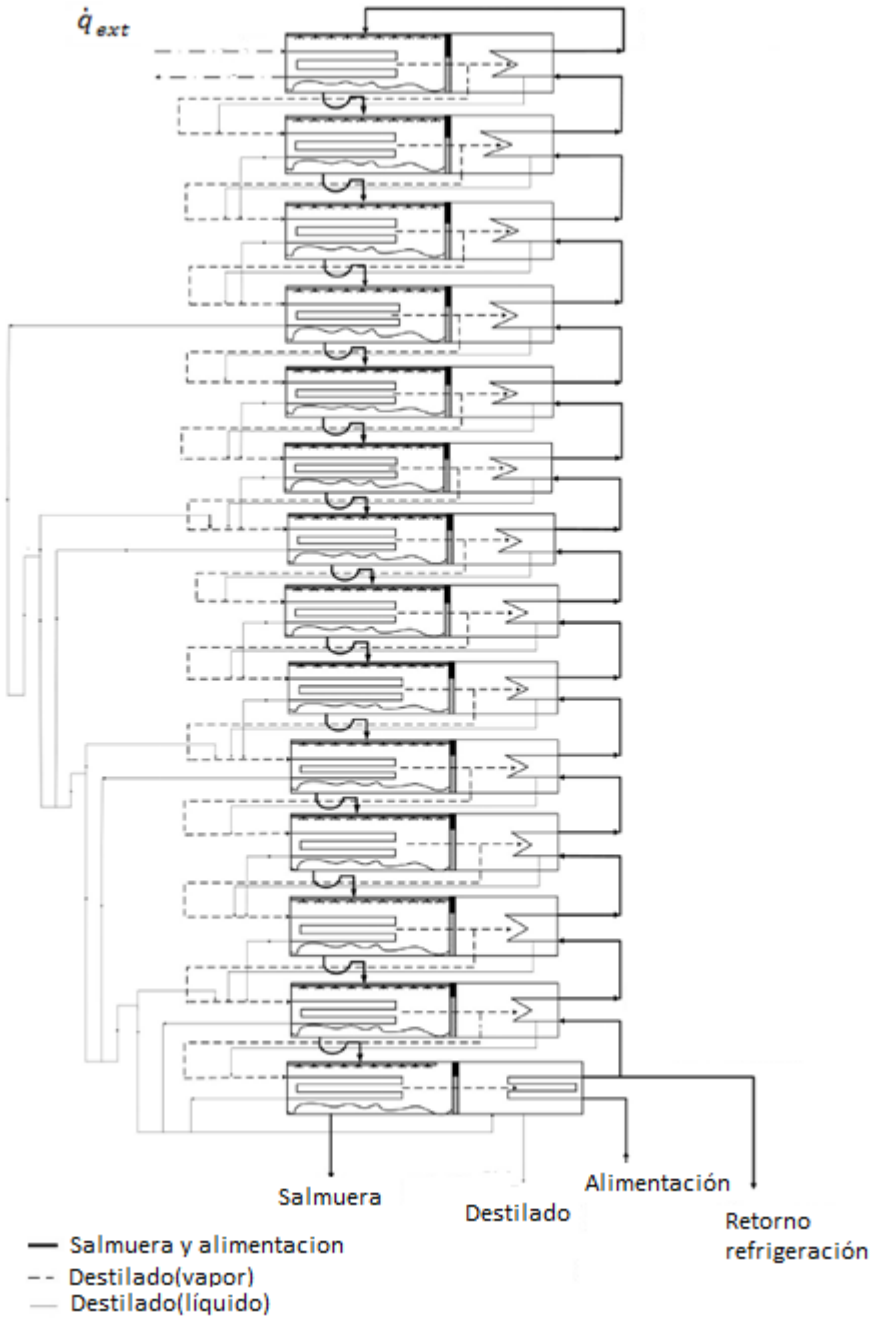

Ilustración 3-6 Lay out planta MED (19)

El vapor que se condensa se mezcla con el destilado proveniente del primer pre-calentador, obteniéndose el primer destilado del proceso. Luego se repite el mismo proceso para los efectos siguientes, siendo siempre el vapor generado en el efecto anterior el que pasa a ser la fuente de energía térmica en el efecto siguiente

Desde el segundo efecto en adelante junto con el vapor formado por la evaporación, apenas la salmuera es rociada, también se genera vapor por "flashing" gracias a la condiciones de presión y temperatura. Finalmente el vapor producido en el último efecto es condensado en el condensador final, trasfiriendo el calor latente de evaporación al agua de alimentación, parte de esta agua es bombeada al primer efecto, pasando por todos los pre-calentadores y la restante se devuelve al mar y es llamada agua de refrigeración.

La producción total de destilado consiste en el vapor condensado en cada efecto y los pre-calentadores, más el generado en el condensador final. Como una estrategia de optimización de energía, el destilado va de un efecto al siguiente para recuperar su calor sensible, lo que mejora la evaporación de salmuera ya que se aumenta la cantidad de vapor, sin suministrar más calor de fuentes externas. En los efectos 4, 7, 10 y 13 se extrae parte del destilado que circula por el interior de los tubos de intercambio, para evitar que estos se inunden y empeore la transferencia térmica.

El vacío es generado por dos eyectores, uno para los efectos dos y siete mientras que el segundo es para el condensador final. El sistema genera el vacío en la planta y también remueve el aire y los gases no condensables.

La modelación se ha desarrollado en MATLAB a partir de los parámetros de la planta PSA-MED (19).

El desarrollo del sistema MED se ha dividido en tres componentes, los pre-calentadores, los efectos y el condensador final. Igualmente los efectos se han agrupado en tres grupos que se han modelado individualmente. El primer efecto, llamado G1, los efectos desde el segundo hasta el N, llamado G2 y el condensador final llamado G3. G2 se divide en tres subgrupos llamados G2-1 para los efectos 7, 10 y 13; G2-2 para los efectos 3, 4, 6, 9 y 12; y G2-3 para los efectos 7, 10 y 13. Las propiedades físicas del agua han sido calculadas utilizando una librería dinámica REFPROB dentro de MATLAB.

La validación del modelo ha mostrado diferencias máximas de un 9% respecto a la planta piloto en la Plataforma Solar de Almería (19). En la tabla 3-6 se muestran las diferencias entre los valores reales y los obtenidos mediante el modelo para el flujo másico de destilado y agua salada, el GOR, el RR y el área de efectos, recalentadores y el condensador.

Tabla 3-6 Comparación valores reales y valores del modelo

Parámetro	**Real**	**Modelo**	**Δ [%]**
$\dot{m}_{destilado}\ [kg/s]$	2984,0	3003,0	1
$\dot{m}_{alimentación}\ [kg/h]$	14,558	15,848	9
GOR	9,7	10,2	5
RR	37,5	37,6	0
$A_{efectos}\ [m^2]$	26,3	33,0	25
$A_{precalntadores}\ [m^2]$	5,0	4,1	-18
$A_{condensador}\ [m^2]$	18,3	13,1	-28

Los parámetros de funcionamiento del modelo se presentan en la tabla 3-7

Tabla 3-7 Principales datos de operación planta MED

Parámetro	Valor
$\dot{m}_{agua\ de\ alimentacion}\ [kg/s]$	2,22
$n^{\circ}_{efectos}$	14
$n^{\circ}_{precalentadoes}$	13
$\dot{m}_{vapor}\ [kg/s]$	0,082
$T_{vapor}\ [°C]$	70,8
$T_{agua\ de\ alimentacion\ 1°\ efecto}\ [°C]$	66,3
$X_{sal}\ [g/kg]$	35
$T_{inlet\ condendser\ seawater}\ [°C]$	25
$T_{outlet\ condendser\ seawater}\ [°C]$	32,3

Con los inputs de la tabla anterior, el modelo genera los siguientes parámetros de funcionamiento.

Tabla 3-8 Principales datos de operación planta MED

Parámetro	Valor
$\dot{m}_{destilado}\ [kg/s]$	0,83
$\dot{m}_{Alimentación}\ [kg/s]$	4,4
$GOR\ [-]$	10,2
$RR\ [-]$	37,6
$A_{efectos}\ [m^2]$	33,6
$A_{precalntadores}\ [m^2]$	4,1
$A_{condensador}\ [m^2]$	13,1

3.2.3 Datos MED planta Tianjin, China

Este caso se diferencia de los anteriores, ya que no provienen de un modelo computacional, sino que corresponden a los datos de operación de la planta.

Los datos utilizados corresponden a una planta de potencia ubicada en Tianjin, China. Esta planta se caracteriza por su alta eficiencia y por integrar generación eléctrica, desalación de agua de mar y producción de sal a partir de la salmuera.

La planta MED-TVC tiene la característica de operar bajo condiciones de trabajo variables, alcanzado siempre una óptima eficiencia entre generación eléctrica y desalación de agua. La capacidad total de la planta es de $200.000\ [m^3/dia]$ a partir de ocho unidades MED.

La generación de electricidad se puede disminuir para suplir una alta demanda de destilado o viceversa. La desalación puede operar con distintas calidades de vapor, variando la producción de destilado entre un 40% y 110%. Las extracciones de vapor se realizan en la 5° o 6° etapa en la turbina de baja presión, dependiendo de la demanda de destilado. En un peak de producción eléctrica se extrae vapor en la 6° etapa a una presión de $1{,}2 - 2{,}3\ [bara]$. Por el contrario, si se prioriza la produccion de destilado se realiza una extracción en la 5° etapa, a una presión que oscila entre los $6 - 3{,}1\ [bara]$, de esta manera, al priorizar la producción de destilado, la producción eléctrica puede bajar hasta en un 100% (13).

A partir del gráfico 5.2 se obtiene el GOR de la planta desaladora y la presión del vapor suministrado, a partir de lo cual se puede extrapolar los datos para adecuarlos al modelo de la termoeléctrica desarrollado.

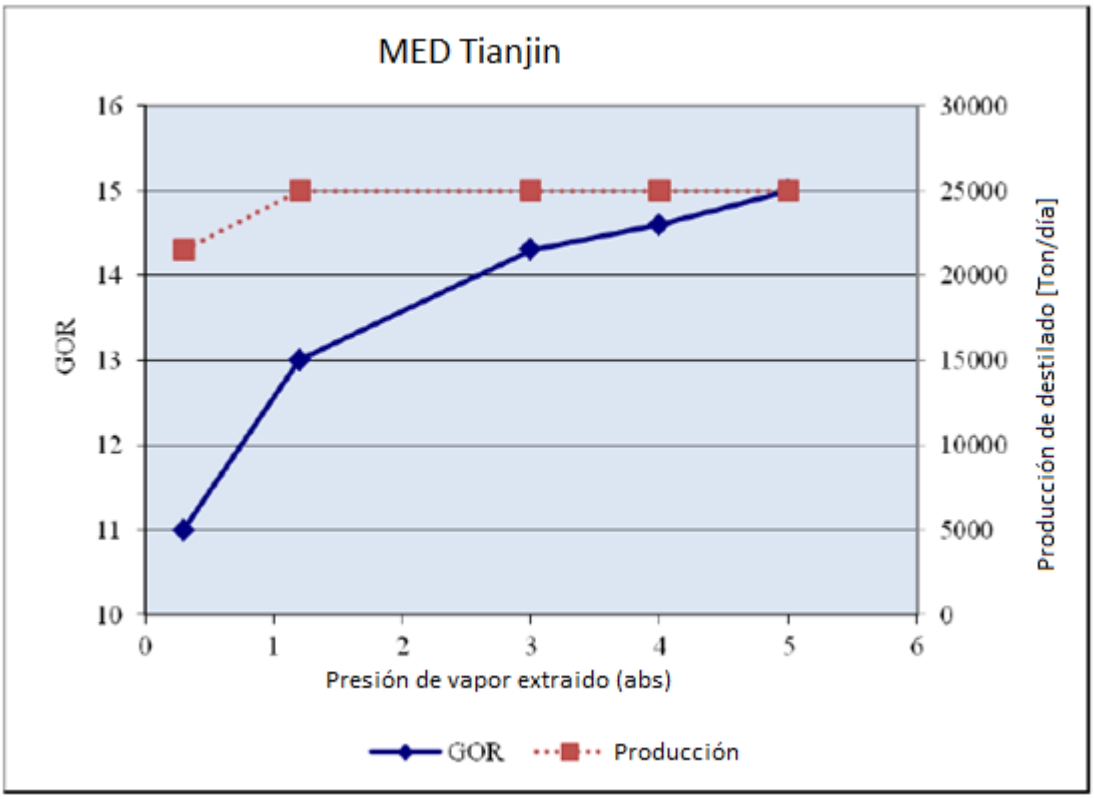

Gráfico 3-2 Parámetros de funcionamiento central MED en Tianjin, China. Obtenido a partir del documento (13).

Como se observa en el gráfico 5.2, esta central está diseñada para producir su capacidad nominal de destilado independientemente de la presión del vapor suministrado. En la medida que el vapor suministrado está a menor presión, el GOR disminuye, por lo cual se debe aumentar el flujo másico de vapor. Por otra parte, si la turbina opera a un presión inferior a la atmosférica (turbina de contra presión), la planta MED alcanza una capacidad nominal de $21.500\ [m^3/dia]$ en cada una de sus 8 unidades.

3.2.4 Comparación entre modelos de plantas desaladoras

Tras presentar los 3 modelos utilizados en este trabajo, se realiza una comparación entre ellos para resaltar sus fortalezas y debilidades.

En la tabla 3-9 se muestra un resumen de los parámetros más importantes del funcionamiento de los 3 modelos. A simple vista se ven grandes diferencias entre los 3 modelos, si se juzga por la producción de destilado el modelo MED-PSA es el más pequeño, luego vendría el MED-TC y finalmente el MED-Tianjin se adjudica la mayor producción con un régimen variable de $1593 - 141\ [kg/s]$ de destilado. Por otra parte los modelos MED-PSA y MED-Tianjin pueden operar con vapor a baja presión, lo que los hace atractivos para operar con vapor de bajo grado, mientras que el modelo MED-TC necesita vapor a no menos de $21\ [bar]$ para operar.

Tabla 3-9 Comparación de los 3 modelos utilizados

Parámetro	**MED-TC**	**MED-PSA**	**MED-Tianjin**
$\dot{m}_{vapor}\ [kg/s]$	16,7	0,082	9,41-144,85
$P_{vapor}\ [bar]$	21	0,322	5-0,3
$T_{vapor}\ [°C]$	224	70,8	314,7-69,11
$\dot{m}_{destilado}\ [kg/s]$	122,8	0,83	1593,35-141,20
GOR	7,4	10,2	15-11

3.3 Recuperación de agua presente en gases producto de la quema de gas natural

Se ha identificado la presencia de agua en los gases de escape de plantas térmicas operadas con gas natural (GN). De esta forma, en esta sección se detalla la metodología desarrollada para poder cuantificar el potencial nacional para generar agua por esta vía.

Principalmente se han desarrollado dos tareas para llegar al resultado, la primera consiste en cuantificar la cantidad de agua contenida en los gases de escape a partir de un $[kg]$ de combustible quemado, así se obtuvo el flujo másico de agua a partir de un flujo másico de combustible. La segunda tarea consistió en realizar un levantamiento de las centrales térmicas operadas con gas natural en el país, para cuantificar la quema de gas natural a partir de su consumo específico. Una vez resueltas estas tareas se ha podido llegar al resultado buscado.

3.3.1 Agua presente en gases de escape

Composición gas natural suministrado en la región de Valparaíso (en volumen)

Tabla 3-10 Composición en volumen del gas natural suministrado en Valparaíso

Compuesto	[%]
CH_4	92,21
C_2H_6	3,55
C_3H_8	1,02
C_4H_{10}	0,45
C_5H_{12}	0,13
C_6H_{14}	0,05
N_2	0,97
O_2	trazas
CO_2	1,61

También se entrega el poder calorífico superior y la densidad relativa al aire.

$$H_{sup} = 39020 \left[{}^{kJ}/_{Nm^3} \right]$$

$$\rho_r = 0{,}61\ [-]$$

Composición elemental, calculada a partir de la información de la tabla 1.

$$m_H = 1.008 * (4 * yCH_4 + 6 * yC_2H_6 + 8 * yC_3H_8 + 10 * yC_4H_{10} + 12 * yC_5H_{12} + 14 * yC_6H_{14})$$

$$m_H = 4{,}083 \left[{}^{kg}/_{kmol} \right]$$

$$m_C = 12.01 * (yCH_4 + 2 * yC_2H_6 + 3 * yC_3H_8 + 4 * yC_4H_{10} + 5 * yC_5H_{12} + 6 * yC_6H_{10} + yCO_2)$$

$$m_C = 12{,}818 \left[{}^{kg}/_{kmol} \right]$$

$$m_O = 16 * (2 * yCO_2)$$

$$m_O = 0{,}515 \left[{}^{kg}/_{kmol} \right]$$

$$m_N = 14 * (2 * yN_2)$$

$$m_N = 0{,}2716 \left[{}^{kg}/_{kmol} \right]$$

Ahora se calcula la masa molecular del gas natural.

$$m_{GN} = m_H + m_C + m_O + m_N = 17{,}688 \left[{}^{kg}/_{kmol} \right]$$

$$X_H = \frac{m_H}{m_{GN}} = 0{,}231 \qquad X_C = \frac{m_C}{m_{GN}} = 0{,}725$$

$$X_O = \frac{m_O}{m_{GN}} = 0{,}029 \qquad X_N = \frac{m_N}{m_{GN}} = 0{,}015$$

Aire característico para la combustión (estequiométrico, normalizado)

$$V_{ae}^{\circ} = \frac{22,4}{0,21} * \left(\frac{X_C}{12,01} + \frac{X_H}{4,032} - \frac{X_0}{32}\right) = \ 12,466 \left[{m^3}/{kg}\right]$$

Moles característico para cada componente presente en los gases de escape, por kilogramo de combustible quemado.

$$n_{CO2} = \frac{XC}{12,01} = 0,060 \left[{mol}/{kg}\right]$$

$$n_{H2O} = \frac{XH}{2,016} = 0,155 \left[{kmol}/{kg}\right]$$

$$n_{N2} = \frac{0,79 * \lambda * V_{ae}^{\circ}}{22,4} = 0,527 \left[{kmol}/{kg}\right]$$

$$n_{O2} = \ 0,21 * (\lambda - 1) * \frac{V_{ae}^{\circ}}{22,4} = 0,023 \left[{kmol}/{kg}\right]$$

Para este estudio solo es de interés la presencia de agua en los gases de escape, por lo que de ahora en adelante el desarrollo solo será en torno al agua.

$$M_{H2O} = 18,016 \left[{kg}/{kmol}\right]$$

Relación H2O/combustible, en kilogramos.

$$\boxed{{H2O}/{GN} = n_{H2O} * M_{H2O} = \ 2,063 \left[{kg_{H2O}}/{kg_{GN}}\right]}$$

El resultado anterior quiere decir que por cada [kg] de gas natural quemado, hay una presencia de $2{,}063\ [kg]$ de agua en los gases de escape.

3.3.2 Consumo de gas natural

Ya que se conoce la proporción de agua presente en los gases de escape por cada $[kg]$ de gas natural quemado, es el momento de estudiar el consumo de las plantas que operan con gas natural, en cada sistema eléctrico del país.

Este levantamiento se desarrolló a partir del documento "Capacidad instalada por sistema eléctrico nacional" (14) emitido por la "comisión nacional de energía", en el cual se expone el inventario de capacidad eléctrica instalada por cada sistema eléctrico nacional para el mes de Febrero del año 2015. Para este caso el interés se enfoca específicamente en las plantas térmicas que operan con gas natural, este tipo de plantas están presentes en el SING, SIC y en el Sistema eléctrico de Magallanes.

En el documento se especifica la Potencia neta para cada planta y su consumo específico de combustible, con esta información se ha calculado el flujo másico de combustible $[kg/hra]$ para cada planta y luego se han calculado los totales para cada sistema y por ultimo un total nacional. También, a partir del flujo másico de combustible y su poder calorífico inferior, se ha calculado la potencia con la que se alimentan estas plantas, para luego calcular la eficiencia.

Finalmente a partir del flujo másico de combustible ha sido posible calcular el flujo másico de agua presente en los gases de escape de cada planta

4 Resultados

Los resultados de este estudio se trabajaron en distintos casos. Se buscó presentar una serie de configuración de acoplamiento entre la planta termoeléctrica y la desoladora, para poder estudiar como se ve afectado el funcionamiento de la planta termoeléctrica al realizar las extracciones de vapor necesarias para operar la planta desaladora.

Principalmente se presentan los resultados del acoplamiento de tres modelos de plantas desaladoras al mismo modelo de central termoeléctrica.

Al realizar los cálculos, resultó que algunas variables permanecieron constante, tales como el calor ingresado al sistema ($\dot{q}_{in} = 584{,}9\ [Mw]$) y el trabajo ($W_{in} = 4{,}25\ [Mw]$). De esta manera, en los resultados se muestra como varía el calor disipado en el condensador ($\dot{q}_{out}$), la eficiencia del ciclo (η_{ciclo}) y la potencia neta (P_{neta}).

4.1 Caso 1 MED-TC

4.1.1 Parámetros de funcionamiento del modelo

El modelo de planta desaladora corresponde a la planta MED-TC, la cual tiene un requerimiento de vapor de 16,7 [kg/s] a una temperatura de 224 [°C] y 21 [bar] de presión. Tal como se mencionó anteriormente al ser una planta con compresor de vapor, el calor suministrado no puede ser de bajo grado.

Al suministrar el flujo másico de vapor con las características descritas anteriormente, según los resultados del autor, tal como se ve en la tabla 3-4, este modelo puede generar 124,4 [kg/s] de destilado.

4.1.2 Impactos sobre el ciclo Rankine

Para suministrar el vapor con las características necesarias, se realiza una extracción en la turbina de alta presión, donde el vapor tiene las siguientes características.

$$\dot{m}_{vapor} = 16{,}7\ [kg/s]$$

$$P_{vapor} = 21\ [bar]$$

$$T_{vapor} = 258\ [°C]$$

Los resultados de cada caso se han dispuesto conforme a la tabla 4-1, en esta detalla como varían los principales parámetros de la termoeléctrica al realiza las extracciones de vapor, tales como el calor ingresado a la termoeléctrica, el calor disipado en el condensador, la eficiencia del ciclo y la potencia neta.

Con esta extracción de vapor, los parámetros de funcionamientos de la planta termoeléctrica son los siguientes.

Tabla 4-1 Parámetros de funcionamiento del conjunto CT + MED TC

	CT	CT+MED TC	Δ%
$\dot{q}_{in}$ [Mw]	584,9	575,8	-1,6
$\dot{q}_{out}$ [Mw]	344,6	302,0	-12,4
η_{ciclo} [-]	0,409	0,389	-4,9
P_{neta} [Mw]	244	228,5	-6,4

En la tabla 4-1 se puede ver que el calor entregado en la caldera disminuye casi en un 2%, debido a la disminución del flujo másico de vapor que se recalienta, esto solo ocurrió en este caso, ya que la extracción se realizó en la turbina de alta presión. Por otra parte, la disipación de calor en el condensador, disminuyo en un 12%. Consecuentemente al caer la potencia en más de un 6,4%, la eficiencia también decae, pero en menor medida, por debajo de un 5%, ya que el calor adicionado al sistema también disminuye.

4.2 Caso 2

En este caso se ha hecho el mismo ejercicio que el caso anterior, pero se acopló la planta MED de la "Planta Solar de Almería".

4.2.1 Parámetros de funcionamiento del modelo.

El modelo de planta desaladora tiene un requerimiento de vapor de 0,0822 [kg/s] a una temperatura de 70,8 [°C] y 0,322 [bar] de presión.

Sin embargo, resulta más interesante evaluar lo que ocurre al realizar una extracción total del vapor a una presión de 0,3227 [bar] para ingresarlo a la planta MED. De esta manera la planta MED se alimenta con un flujo másico de 144,85 $[kg/s]$ y el flujo másico que ingresa al condensador es cero.

$$\dot{m}_{vapor} = 144{,}85 \ \ [kg/s]$$

El desempeño de la planta desaladora se calcula escalando los parámetros de las tablas 6.4 y 6.5.

Gracias a que se conocen las características del vapor a suministrar a la planta MED y el GOR de esta, es posible estimar la producción de destilado a partir del flujo másico de vapor suministrado.

$$GOR = \frac{\dot{m}_{destilado}}{\dot{m}_{vapor}} \rightarrow \dot{m}_{destilado} = \dot{m}_{vapor} * GOR$$

$$\dot{m}_{destilado} = 1.477{,}5 \ [kg/s]$$

4.2.2 Impactos sobre el ciclo Rankine

La extracción de vapor corresponde a la totalidad del flujo que se dirige al condensador.

$$\dot{m}_{vapor} = 144{,}85 \ [kg/s]$$

$$P_{vapor} = 0{,}322 \ [bar]$$

$$T_{vapor} = 70.8\ [°C]$$

Tabla 4-2 Parámetros de funcionamiento del conjunto CT+MED caso II

	CT	CT+MED PSA	Δ%
$\dot{q}_{out}$ [Mw]	344,601	8,59	-97,5
η_{ciclo} [%]	40,98	39,31	-4,075
P_{neta} [Mw]	244,000	234,21	-4,01

Tal como se ve en la tabla 4-2, al realizar una extracción de la totalidad del vapor en la turbina de baja presión, tanto la eficiencia como la potencia neta de la central termoeléctrica disminuyen en torno al 4%. Sin embargo se debe contemplar en que este impacto sobre la central termoeléctrica se traduce en una producción de destilado de 1.477,5 $[kg/s]$, lo cual en un día equivale a 127.653,4 $[m^3/dia]$.

4.3 Caso III

La particularidad de este caso es que el modelo MED de la planta de Tianjin puede operar con vapor a distintas presiones y mantener constante el caudal de destilado. De esta manera, se podrá realizar extracciones de vapor a distintas presiones y determinar la variación del rendimiento de la central térmica

A partir del gráfico 5.2 se escalan los datos de funcionamiento de la central MED para adecuarlos a la central termoeléctrica que acá se trabaja, manteniendo la proporción de caudal de destilado y potencia de la central térmica.

La central térmica de Tianjin tiene una potencia nominal de $4000\ [Mw]$ y la central MED tiene una capacidad nominal de $200.000\ [ton/dia]$. Luego, el modelo desarrollado en este trabajo cuenta con una potencia neta de $244\ [Mw]$, por lo cual si este modelo se acopla a una central MED equivalente a la de Tianjin, se esperaría un producción de $12200\ [ton/dia]$ de destilado.

$$\frac{4.000\ [Mw]}{200.000\ [ton/dia]} = \frac{244\ [Mw]}{\dot{m}_{destilado}}$$

$$\dot{m}_{destilado} = 12200\ [ton/dia]$$

Seguidamente, a partir del GOR se puede determinar el flujo másico de vapor a suministrar a la central MED.

$$GOR = \frac{\dot{m}_{destilado}}{\dot{m}_{vapor}} \rightarrow \dot{m}_{destilado} = \dot{m}_{vapor} * GOR$$

Por último, a partir de la presión del vapor y asumiendo una calidad $x = 1$, es posible determinar su temperatura.

Tabla 4-3 Datos equivalentes de funcionamiento de central MED Tianjin

$P_{vapor}[bara]$	GOR	$\dot{m}_{Destilado}[kg/s]$	$\dot{m}_{Vapor}\ [kg/s]$	$T_{vapor}[°C]$
5	15	141,20	9,41	314,70
4	14,75	141,20	9,57	287,0
3	14,25	141,20	9,91	255,6
1	13	141,20	10,86	151,6
0,3	11	121,43	11,04	69,11
0,3	11	1593,35	144,85	69,11

En la tabla 4-3 se pueden ver las condiciones de operación de la central MED. El caso F consiste en realizar una extracción total de vapor a presión de $0{,}3\ [bar]$, de tal forma de que en el condensador no se disipe calor.

4.3.1 Impacto sobre ciclo Rankine

A partir de la información dispuesta en la tabla 6.8 es posible estudiar los efectos sobre el ciclo Rankine mediante el modelo realizado en ESS para la termoeléctrica.

Para los casos donde la extracción tiene presión igual o superior a $3\ [bar]$, esta se realiza en la turbina de presión intermedia, luego para presiones inferiores se pueden realizar las extracciones en la turbina de baja presión.

Tabla 4-4 Condiciones operacionales de la central termoeléctrica al realizar las extracciones de vapor

		CT	CT+MED	Δ%
$P_{ext} = 5\ [bar]$	$\dot{q}_{out}$ [Mw]	344,60	323,18	-6,22
	η_{ciclo} [%]	40,98	40,15	-2,03
	P_{neta} [Mw]	244,00	239,11	-2,0
$P_{ext} = 4\ [bar]$	$\dot{q}_{out}$ [Mw]	344,60	321,82	-6,61
	η_{ciclo} [%]	40,98	40,18	-1,95
	P_{neta} [Mw]	244,000	239,28	-1,93
$P_{ext} = 3\ [bar]$	$\dot{q}_{out}$ [Mw]	344,601	321,01	-6,85
	η_{ciclo} [%]	40,98	40,25	-1,78
	P_{neta} [Mw]	244,000	239,721	-1,754
$P_{ext} = 1[bar]$	$\dot{q}_{out}$ [Mw]	344,601	318,75	-7,50
	η_{ciclo} [%]	40,98	40,55	-1,05
	P_{neta} [Mw]	244,000	241,47	-1,04
$P_{ext} = 0{,}3\ [bar]$	$\dot{q}_{out}$ [Mw]	344,601	318,33	-7,63
	η_{ciclo} [%]	40,98	40,88	-0,244
	P_{neta} [Mw]	244,000	243,35	-0,266

A partir de la tabla 4-4 se puede ver que mientras menor es la presión a la cual se extrae el vapor, menor es su temperatura por lo cual, su flujo másico debe ser mayor para mantener el caudal de destilado constante.

Luego, los datos que entrega la tabla 4-4 indican que la eficiencia de la termoeléctrica se ve más afectada al realizar extracciones a mayor presión, se advierte que tanto este parámetro como la potencia neta son más sensibles a la presión de extracción, antes

que al caudal. Por ejemplo, al extraer vapor a una presión de 5 $[bar]$, el rendimiento desciende en un 2%, mientras que al extraer vapor a 0,3 $[bar]$ se registra un descenso de apenas un 0,24% en el rendimiento. Por otra parte, el calor disipado en el condensador aumenta en la medida que se disminuye la presión de extracción.

En el siguiente gráfico se ve cómo se comporta la potencia y el rendimiento de la central en función de la presión de extracción.

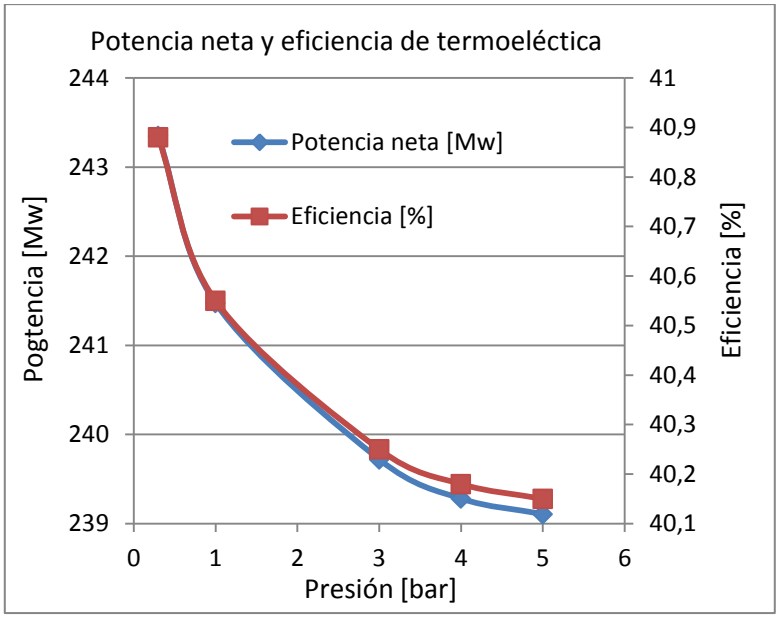

Gráfico 4-1 Comportamiento de central termoeléctrica frente a las extracciones de vapor.

Tal como se puede ver en el gráfico 6.1, la potencia y eficiencia son parámetros interdependientes, por eso las curvas están superpuestas. Por otra parte queda muy claro que la central termoeléctrica alcanza un mejor desempeño al realizar extracciones con mayor caudal, pero a menor presión.

Luego se hizo el ejercicio de extraer la totalidad del vapor a $0{,}3\,[bar]$, lo cual significa extraer un flujo de $144{,}85\,[kg/s]$ de vapor, pudiendo generar $1.593{,}35\,[kg/s]$ de destilado. En este escenario tanto el rendimiento como la potencia de la termoeléctrica caen en torno al $3\,[\%]$. El calor disipado en el condenador no alcanza a ser nulo ya que hay pequeños caudales de los sellos de vapor que no se ingresan a la central MED.

Tabla 4-5 Condiciones operacionales de la central termoeléctrica al extraer la totalidad del vapor a 0,3 [bar]

		CT	**CT+MED**	**Δ%**
$P_{ext} = 0{,}3\,[bar]$	$\dot{q}_{out}$ [Mw]	344,601	8,59	-97,51
	η_{ciclo} [%]	40,98	39,55	-3,49
	P_{neta} [Mw]	244,000	235,60	-3,44

Por último se estudió la sensibilidad de la eficiencia de la termoeléctrica frente al flujo másico de vapor extraído a $0{,}3\,[bar]$.

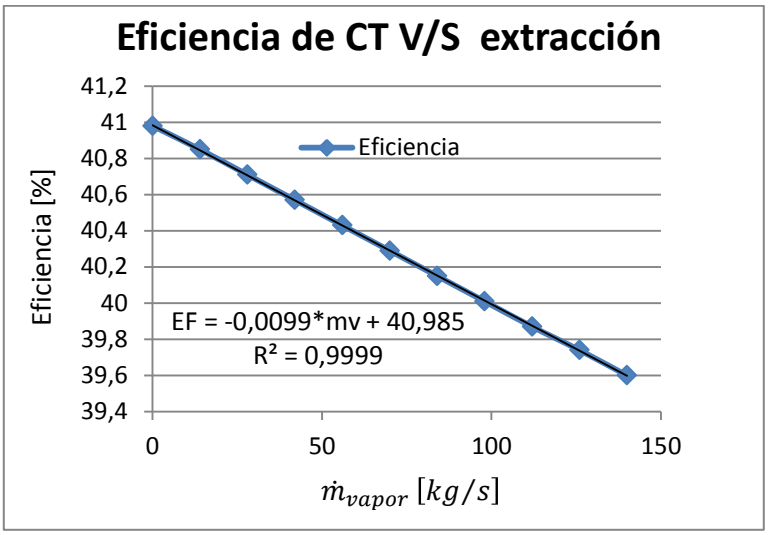

Gráfico 4-2 Eficiencia de la central termoeléctrica en función del flujo másico de vapor extraído a 0,3 [bar].

En el gráfico 6.2 se puede ver que el rendimiento de la central termoeléctrica inversamente proporcional al flujo de vapor extraído. La curva se ajusta muy bien a una recta con un coeficiente de correlación muy cercano a 1, la pendiente es cercana a cero, lo que indica que el rendimiento es muy poco sensible al caudal de extracción de vapor a baja presión.

4.4 Potencial de desalinización a partir de cogeneración con termoeléctricas.

Los principales resultados se representan en el gráfico 4-3, en este se muestra el rendimiento y potencia de la central térmica. Se puede ver que para los tres casos tanto para el rendimiento como para la potencia las diferencias no son muy grandes.

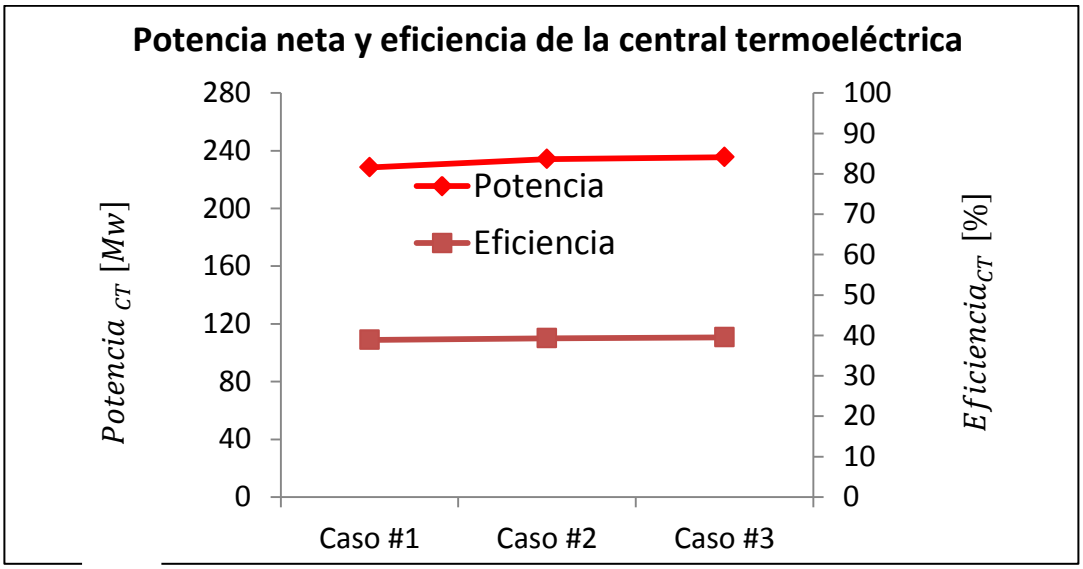

Gráfico 4-3. Potencia y eficiencia de la central térmica para cada caso.

Por otra parte, a pesar de la información mostrada en el gráfico 4-3, en el siguiente gráfico se muestra que respecto a la producción de destilado existe grandes diferencias según cada caso.

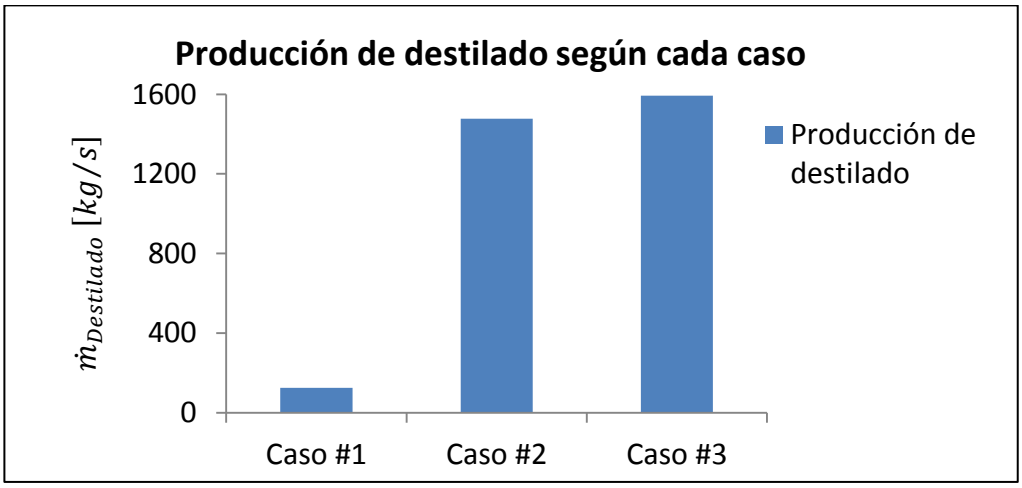

Gráfico 4-4. Producción de destilado para casa caso.

Como ya se mencionó, el modelo MED-TC opera con vapor a $21\ [bar]$ y al realizar extracciones de vapor con esas características afectan fuertemente el rendimiento de la central termina. Por otra parte, tanto el MED-PSA y el MED-Tianjin operan con vapor en torno a los $0{,}3\ [bar]$ por lo cual, si se extraen grandes de caudales, el rendimiento de la central térmica no se ve fuertemente afectado.

El modelo del caso III, representa pequeñas disminuciones en la eficiencia y potencia de la central térmica, mientras que ofrece la mayor producción de destilado. Luego, para este caso la relación de flujo másico de destilado por cada unidad de potencia instalada es el caudal de $1.593{,}35\ [kg/s]$ sobre los $244\ [Mw]$ de potencia neta de la central, lo que da la siguiente relación $6{,}53\ [[kg/s]/Mw]$.

En chile la potencia instalada en plantas termoeléctricas es de $4.337{,}2\ [Mw]$, por lo que si se mantiene la razón expuesta anteriormente, se obtiene un potencial de $28.321{,}92\ [kg/s]$, el cual se puede expresar como un flujo volumétrico de $28{,}32\ [m^3/s]$.

Ahora, en el gráfico 4-5 se aprecia cómo se distribuye este potencial a lo largo del país.

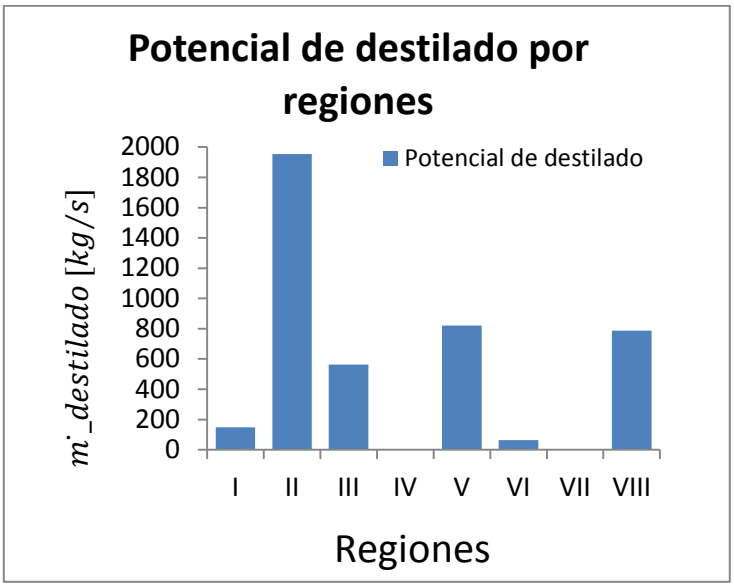

Gráfico 4-5. Distribución de potencial para desalar agua mediante cogeneración

El potencial calculado para el flujo másico de destilado para el país, es una aproximación muy superficial, ya que no se puede asegurar que todas las centrales termoeléctricas tengan el mismo desempeño que el modelo acá propuesto. Sin embargo, este cálculo muestra un potencial máximo, lo que servirá para compararlo con el déficit de agua y determinar qué rol puede jugar la cogeneración en el país.

A partir del potencial de desalinización calculado y contemplando un consumo de agua diario per cápita de 100 litros (21), se puede determinar la población a la cual se le podría suministrar agua potable a partir de plantas desaladoras evaporativas para que cubran óptimamente sus necesidades.

$$Población\ = \frac{28.321{,}92\ [kg/s]}{\frac{100\ [kg\ /habitante\ ]}{86.400\ [s]}} = 24.470.138{,}88\ [habitantes]$$

Por otra parte, se puede realizar un ejercicio similar para la ciudad de Mejillones, ya que allí se encuentra la central Angamos 1. Con una población de 9.752 habitantes, contemplando un consumo de agua diario per cápita de 100 litros, se establece una demanda de $11{,}3\ [kg/s]$. Esta cifra obtenida para la demanda de la población de Mejillones está muy por debajo de los $1.593{,}35\ [kg/s]$ que en teoría se podrían obtener mediante cogeneración con la central Angamos 1.

Por último la energía generada por una central termoeléctrica tiene un valor de $36\ (USD/Mwh)$ y el metro cubico de destilado tiene un valor de $2{,}23\ (USD/m^3)$, con los resultados obtenidos en el caso tres, se puede determinar que las pérdidas económicas por concepto de disminución de potencia no superan los $360\ (USD/h)$, sin embargo las ganancia posibles por el destilado generado son cercanas a los $12402\ (USD/h)$. De esta manera, a partir del "cálculo de la servilleta" se determina que esta cogeneración puede representar una buena alternativa comercial.

4.5 Obtención de agua dulce a partir de gases de escape en centrales térmicas operadas con gas natural

A partir de las tablas 6.3, 6.4 y 6.5 de los anexos, se ha elaborado la tabla 2, en la cual se resumen los valores calculados, según cada sistema eléctrico y por último se ha realizado la suma para obtener los valores a nivel nacional

Tabla 4-6 Valores calculados a partir de las tablas 6.3, 6.4 y 6.5

Sistema	Potencia Neta [MW]	Consumo combustible [kg/s]	Potencia de consumo comb [MW]	Eficiencia [%]	Potencial H2O [kg/s]
SING	1441,23	57,83	2963,93	49%	119,29
SIG	2546,36	114,23	5855,09	43%	235,65
Magallanes	85,59	6,29	322,29	27%	12,97
Total	4073,18	178,35	9141,30	45%	367,91

A partir del de la tabla 4-6 se elaboró el gráfico 4-1, en el cual se muestra como se distribuye el potencial para obtener agua dulce a partir de gases de escape en centrales que operen con gas natural.

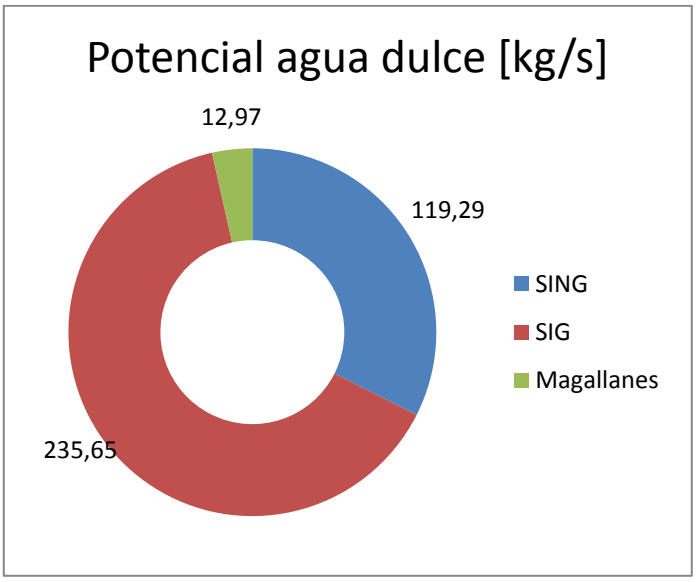

Ilustración 4-1 Potencial de agua dulce en los distintos sistemas eléctricos.

Tal como se aprecia en la tabla 4.7, la mayor capacidad instalada en plantas que operan con gas natural se encuentra en el SIC y consecuentemente este sistema eléctrico tiene el mayor potencial para generar agua. Luego en términos de capacidad instalada, se ubica el SING en segundo lugar y por último el sistema eléctrico de Magallanes.

A nivel nacional se identificó un flujo másico potencial de $367{,}91\ [kg/s]$ de agua dulce presente en los gases de combustión de las plantas térmicas operadas con gas natural en el país, las cuales suman una potencia de $4073{,}18\ [Mw]$.

Por otra parte estudiando las tablas 6.3, 6.4 y 6.5 se observa que aquellas centrales que cuentan con las peores eficiencias, son las que tienen mayor potencial para genera agua por [MW] instalado, ya que tienen un mayor consumo especifico de combustible, de esta forma, necesitan quemar más combustible para generar cada

[MW] de potencia y como se afirmó anteriormente, las producción de agua está sujeta al flujo másico de combustible.

Por último, a nivel nacional el ratio de agua producida sobre la capacidad instalada es de 0,09 $[[kg/s]/Mw]$.

4.6 Conclusiones

Producir agua dulce a partir de calores residuales puede contribuir como solución a largo plazo para la escasez de agua en algunos sectores del país. Particularmente en Chile existe una alta concentración de plantas termoeléctricas en la zona norte y algunas en la zona central. Generalmente estas plantas termoeléctricas se emplazan en localidades costeras donde la escasez hídrica es una realidad.

A partir del balance hídrico de oferta-demanda para el país, se ha determinado que existe un déficit hídrico desde la región metropolitana al norte del país. Para el año 2011 el déficit se estimó en un promedio de $14\,[m^3/s]$ para cada una de las 6 regiones comprometidas, lo entregaría un total de $86\,[m^3/s]$, luego, para el año 2026 se estima que dicho promedio puede llegar a duplicarse.

Si bien la osmosis reversa es la única tecnología de desalinización presente en el país, los métodos evaporativos ofrecen una serie de ventajas que los sitúan como una buena alternativa. Acá se revisaron los principales métodos evaporativos, determinando al MED como la mejor alternativa, gracias a las mejoras en la eficiencia térmica y al mejor control de las incrustaciones.

Acá se ha desarrollado una primera aproximación para evaluar el desempeño de una central termoeléctrica trabajando en cogeneración con una planta MED.

Tras revisar los resultados, se han obtenido importantes diferencias para cada modelo. Si bien un modelo es MED-TC y el otro es MED, la principal diferencia está en las propiedades del vapor que se suministra.

Por una parte el modelo MED-TC tiene una gran capacidad para generar destilado, sin embargo se requiere vapor a alta presión ($21\ [bar]$) y temperatura. Al realizar la extracción en la turbina de alta presión, la potencia neta de la central térmica disminuye en un 6,4% y el rendimiento en casi un 5%, produciendo $124\ [kg/s]$ de destilado.

Luego, el modelo MED de la planta solar de Almería muestra que el vapor suministrado puede extraerse en la turbina de baja presión, afectando de menor manera el rendimiento de la central termoeléctrica. Al extraer la totalidad del vapor a $0{,}322\ [bar]$, la potencia y la eficiencia de la central térmica disminuyen en torno al 4%, generando $1.477{,}5\ [kg/s]$ de destilado.

Por último, al trabajar con los datos de operación de la central MED de Tianjin se determinó que la central térmica es más sensible a la presión de extracción, que al caudal de vapor. Al extraer el vapor a $5\ [bar]$, el rendimiento y la potencia descienden un 2%, generando $141\ [kg/s]$ de destilado. Luego, si se extrae el vapor a $0{,}3\ [bar]$, la potencia cae en apenas un 0,266%, generando $121{,}43\ [kg/s]$ de destilado. Ahora, si se extrae la totalidad del vapor a $0{,}3\ [bar]$, la potencia desciende en un 3,44%, produciendo $1.593{,}5\ [kg/s]$ de destilado.

Con los resultados expuestos se puede apreciar que el rendimiento de la central térmica es particularmente sensible a la presión de extracción. Así, para minimizar los impactos sobre el rendimiento es preferible realizar extracciones a menor presión pero con mayores caudales. Realizar extracciones de la totalidad del vapor es una alternativa interesante, sin embargo no sería recomendable eliminar el condensador y que esto disminuiría la confiabilidad de la central térmica.

El potencial de desalinización mediante cogeneración con centrales termoeléctricas se estima no mayor a $28{,}32\ [ton/s]$ para el país, lo cual cubre cerca de un 34% del déficit hídrico estimado para el año 2011. De esta forma, se determina que esta solución está lejos de cubrir el 100% del déficit actual y futuro de Chile, no obstante se presenta como una buena alternativa para contribuir a la solución del problema.

Si se contempla solo el agua potable para la población, con un consumo promedio de 100 litros per cápita por día, se determinó que mediante cogeneración se podría proveer agua dulce a más de 24 millones de personas, cifra bastante mayor a la población del Chile. También, al comparar el volumen de destilado que se podría obtener solo con la central Angamos 1 con la demanda de agua potable de la ciudad de Mejillones, se obtuvo que esta demanda se cubre con creses mediante cogeneración.

Al producir destilado mediante cogeneración se distinguen ventajas sobre la osmosis inversa. Por una parte se da la posibilidad de producir destilado a partir de procesos ya existente, lo cual no implicaría una expansión de la capacidad instalada y tampoco aumentaría la emisión de gases de efecto invernadero, siendo estas dos ventajas importantes sobre la osmosis reversa.

Por otra parte, se asume que la elección de una planta MED o MED-TC, su rendimiento y capacidad son aspectos que se determinan a partir de la optimización de los costos del proyecto y no solo a partir de los aspectos técnicos. De esta manera se afirma que un futuro estudio debe orientarse en aspectos más económicos que técnicos.

Al realizar un simple cálculo económico se determinó que el destilado producido puede generar ganancias muy superiores a las perdidas por concepto de disminución de la potencia.

Por ultimo a partir del estudio de agua dulce en los gases de escape de las centrales térmicas operadas con gas natural, se determinó un flujo másico máximo de $367{,}91\ [kg/s]$ a partir de los $4073{,}18\ [Mw]$ instalados en centrales operadas con gas natural. A partir de lo anterior se obtiene un ratio de $0{,}09\ [[kg/s]/Mw]$. Este ratio es mucho menor que el obtenido a partir de la cogeneración. Sin embargo, la condensación de los gases de escape podría ser un proceso fácil de implementar, produciendo agua dulce para el mismo funcionamiento de la central o comunidades cercanas. De esta manera se determina que esta alternativa está muy lejos de cubrir el déficit hídrico, pero su implementación permitiría recuperar agua que hoy simplemente se está disipando al ambiente.

5 Bibliografía

1. **A, Yunus Cengel.** *Transferencia de calor y masa, un enfoque práctico* . s.l. : Mc Fraw Hill .

2. Cambio Climatico Global . [En línea] http://cambioclimaticoglobal.com/.

3. Enciclopedia Financiera . [En línea] 25 de 2 de 2016. http://www.enciclopediafinanciera.com/definicion-capex.html.

4. Enciclopedia Finaciera . [En línea] [Citado el: 25 de 2 de 2016.] http://www.enciclopediafinanciera.com/definicion-opex.html.

5. **Delegación Presidencial para los Recursos Hídricos.** *Politica Nacional Para los Recursos Hidricos 2015.* 2015.

6. **Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales.** [En línea] http://www.uach.cl/proforma/insitu/2_insitu.pdf.

7. **Kushnir, Ivan.** www.kushnirs.org. [En línea] [Citado el: 22 de 2 de 2016.] http://www.kushnirs.org/macroeconomics_/es/chile__gdp.html.

8. **Aguas de Antofagasta.** Super Intendencia de Sevicios Sanitarios . [En línea] 2015. http://www.siss.gob.cl/577/articles-4497_Aguas_Antofagasta_G1_Sep2015.pdf.

9. **Saldivia, David.** *Modelación Computacional de sistema térmico de desalinización acoplado con energia solar.* 2015.

10. **idadesal.** idadesa . [En línea] 22 de 2 de 2016. http://idadesal.org/desalination-101/desalination-by-the-numbers/.

11. **Trieb, Franz.** *Concentrating Solar Power for Seawater Desalination.* Stuttgart : s.n., 2007.

12. **Tonner, John.** *Barriers to Thermal Desalination in the United States* . 2008.

13. **Enfrant, T y Haimiao, Yu.** *Desing challenges and operational experience of a mega MED seawater desalination plant in Tianjin.* 2013.

14. **Comisión Nacional de Energía .** *Capacidad instalada por sistema electrico nacional* . 2015.

15. **Inodu.** *Estudio de antecedentes técnicos, economicos, normativos y ambientales de tecnologías de centrales temoeléctricas y sus sitemas de refrigeración* . 2014.

16. **Rivera, Andres.** *Cambios Climaticos, los glaciares en la patagonia* . 2005.

17. **Direccion Metereológica de Chile, Sección de investigación y Meteorología aplicada.** *Analisis de los Resultados Convenio alta Direccion Pública, Director, Direccion Meteorológica de Chile, Objetivo N°3* .

18. **Nag, P K.** *Power plant engineering.* s.l. : Tata McGraw-Hill, 2008.

19. **Palazuela , Patricia , y otros.** *Steady State model for multi-effect distillation case study: Plataforma Solar de Almería MED pilot plant.* 2013.

20. **Barraza, Rodrigo.** *Solar Desalination System Research and Modeling Process* . 2011.

21. **Cengel, Yunes A y Boles, Michael A.** *Termodinámica* . s.l. : Mc Graw Hill .

6 Anexos

6.1 Tablas de capacidad instalada

Tabla 6-1 Centrales térmicas operadas con carbón o petcoke en el SIC para Febrero del año 2015

CENTRAL	AÑO	COMUNA	REGIÓN	POTENCIA BRUTA [MW]	POTENCIA NETA [MW]
Ventanas 1	1964	Puchuncaví	Valparaíso	120	113,4
Ventanas 2	1977	Puchuncaví	Valparaíso	220,0	208,6
Planta Curicó	2009	Curicó	Del Maule	2,0	2,0
Santa María	2012	Coronel	Del Biobio	370,0	342,0
Nueva Ventanas	2010	Puchuncaví	Valparaíso	272,0	249,0
Campiche	2013	Puchuncaví	Valparaíso	272,0	249,0
Bocamina	1970	Coronel	Del Biobio	130,0	122,2
Bocamina II	2012	Coronel	Del Biobio	350,0	322,5
Guacolda	1995/2010	Huasco	Atacama	608,0	561,9
Petropower	1998	San Vicente	Gral. Bdo O'higgins	75,0	63,0
				Total [MW]	2233,5

Tabla 6-2 Centrales térmicas operadas con carbón o petcoke en el SING para Febrero del año 2015

CENTRAL	AÑO	COMUNA	REGIÓN	POTENCIA BRUTA [MW]	POTENCIA NETA [MW]
CENTRAL TERMOELÉCTRICA ANDINA (CTA)	2011	Mejillones	Antofagasta	168,8	152,6
TERMOELÉCTRICA ANGAMOS 1 (ANG1)	2011	Mejillones	Antofagasta	272,6	244,3
TERMOELÉCTRICA ANGAMOS 2 (ANG2)	2011	Mejillones	Antofagasta	272,4	244,0
TERMOELÉCTRICA TARAPACÁ (CTTAR)	1999	Iquique	Tarapacá	158,0	148,5
TERMOELÉCTRICA TOCOPILLA (U12)	1983	Tocopilla	Antofagasta	85,3	79,6
TERMOELÉCTRICA TOCOPILLA (U13)	1985	Tocopilla	Antofagasta	85,5	79,8
TERMOELÉCTRICA TOCOPILLA (U14)	1987	Tocopilla	Antofagasta	136,4	127,7
TERMOELÉCTRICA TOCOPILLA (U15)	1990	Tocopilla	Antofagasta	132,4	124,1
TERMOELÉCTRICA MEJILLONES (CTM1)	1995	Mejillones	Antofagasta	165,9	154,9
TERMOELÉCTRICA MEJILLONES (CTM2)	1998	Mejillones	Antofagasta	175,0	164,0
TERMOELÉCTRICA HORNITOS (CTH)	2011	Mejillones	Antofagasta	170,1	153,9
TERMOELÉCTRICA NORGENER (NTO2)	1995	Tocopilla	Antofagasta	141,0	131,9
TERMOELÉCTRICA NORGENER (NTO1)	1995	Tocopilla	Antofagasta	136,3	127,4
TERMOELÉCTRICA TOCOPILLA (U10)	1970	Tocopilla	Antofagasta	37,5	36,0
TERMOELÉCTRICA TOCOPILLA (U11)	1970	Tocopilla	Antofagasta	37,5	36,0
DIESEL TAMAYA (SUTA)	2009	Tocopilla	Antofagasta	103,7	99,0
				Total [MW]	2103,7

Tabla 6-3 Potencia instalada de GN en el SING Febrero 2015

NOMBRE CENTRAL	AÑO	COMUNA	REGIÓN	POTENCIA NETA [MW]	CONSUMO [kg/hra]	POTENCIA DE CONSUMO [MW]	EFICIENCIA	[kg_H2O/hra]
T-TOCOPILLA (TG3)	1993	Tocopilla	Antofagasta	37,20	27,00	128,95	29%	18683,14
T-MEJILLONES (CTM3)	2000	Mejillones	Antofagasta	243,23	176,56	484,15	50%	70148,33
T-TOCOPILLA (U16)	2001	Tocopilla	Antofagasta	393,00	285,28	737,60	53%	106869,13
ATACAMA (CC2)	1999	Mejillones	Antofagasta	378,30	274,61	794,85	48%	115164,23
ATACAMA (CC1)	1999	Mejillones	Antofagasta	389,50	282,74	818,38	48%	118573,80
			TOTAL	1441,23	1046,19	2963,93	49%	429438,63

Tabla 6-4 Potencia instalada de GN en el SING Febrero 2015

NOMBRE CENTRAL	AÑO	COMUNA	REGIÓN	POTENCIA NETA [MW]	CONSUMO [kg/hra]	POTENCIA DE CONSUMO [MW]	EFICIENCIA	[kg_H2O/hra]
Nueva Renca	1997	Renca	Metropolitana	369,90	54293,39	773,00	48%	111998,98
Bio Cruz	2012	La Cruz	Valparaíso	1,80	283,23	4,03	45%	584,27
Nehuenco I	1998	Quillota	Valparaíso	361,40	51759,73	736,93	49%	106772,43
Nehuenco 9B	2002	Quillota	Valparaíso	106,92	24510,26	348,96	31%	50560,92
Nehuenco II	2003	Quillota	Valparaíso	390,29	51335,39	730,89	53%	105897,07
Candelaria	2005	Codegua	Gral. Bdo O'higgins	252,59	57647,07	820,75	31%	118917,10
San Isidro I	1998	Limache	Valparaíso	367,63	54173,11	771,29	48%	111750,86
Taltal 1	2000	Taltal	Antofagasta	123,15	27087,26	385,65	32%	55876,89
Taltal 2	2000	Taltal	Antofagasta	121,26	26670,20	379,72	32%	55016,55
Coronel	2005	Coronel	Del Biobio	46,81	9368,11	133,38	35%	19324,99
Tapihue	2009	Casablanca	Valparaíso	6,40	1007,06	14,34	45%	2077,41
Tomaval 2	2012	La Cruz	Valparaíso	1,60	251,76	3,58	45%	519,35
San Isidro II	2007-2008	Limache	Valparaíso	396,61	52857,76	752,56	53%	109037,49
			TOTAL	2546,36	411244,34	5855,09	0,43	848334,31

Tabla 6-5 Potencia instalada de GN en MAGALLANES Febrero 2015

NOMBRE CENTRAL	AÑO	POTENCIA NETA [MW]	CONSUMO [kg/hra]	POTENCIA DE CONSUMO [MW]	EFICIENCIA	[kg_H2O/hra]
Tres Puentes	1985	21,60	6002,27	85,46	25%	12381,76
	2003	13,50	2985,46	42,51	32%	6158,54
	1996	9,00	2416,39	34,40	26%	4984,64
	2006	9,45	2483,29	35,36	27%	5122,64
	2008	13,50	2874,27	40,92	33%	5929,18
	1998	2,45	467,47	6,66	37%	964,31
	1972	5,00	2672,10	38,04	13%	5512,13
Puerto Natales	2001	1,06	327,81	4,67	23%	676,23
	2006	1,06	272,61	3,88	27%	562,36
	2008	1,28	230,73	3,28	39%	475,95
	1977	0,72	300,08	4,27	17%	619,02
	1977	0,72	299,46	4,26	17%	617,75
	2012	1,27	230,09	3,28	39%	474,64
Porvenir	2003	1,06	222,96	3,17	33%	459,94
	2006	1,06	264,15	3,76	28%	544,90
	1983	0,79	177,57	2,53	31%	366,29
	2012	1,27	205,80	2,93	43%	424,53
	2010	0,81	203,89	2,90	28%	420,58
	TOTAL	85,59	22636,38	322,29	27%	46695,40

6.2 Código de modelo paramétrico de ciclo Rankine

```
m_dot_1 = m_dot_0 - m_dot_30 - m_dot_29 "Punto 30 TVC"

m_dot_29 = 0,7 "Punto 29 Steam Seal Regulator"
m_dot_0 = 214,7 [kg/s]

P_1 = 150 [bar]
T_1 = 538 [°C]
h_1=Enthalpy(Water;T=T_1;P=P_1)
s_1=Entropy(Water;T=T_1;P=P_1)

P_2 = 50 [bar]
s_2_s = s_1
h_2_s=Enthalpy(water;s=s_2_s;P=P_2)
efs_hpt = 0,9
h_2_r = h_1 + efs_hpt*(h_2_s - h_1)
s_2_r = Entropy(Water;h=h_2_r;P=P_2)
T_2=Temperature(water;P=P_2;h=h_2_r)

P_3 = 20 [bar]
s_3_s = s_1
h_3_s=Enthalpy(Water;s=s_3_s;P=P_3)
h_3_r = h_1 + efs_hpt*(h_3_s - h_1)
s_3_r = Entropy(Water;h=h_3_r;P=P_3)
T_3=Temperature(Water;P=P_3;h=h_3_r)
x_3=Quality(Water;T=T_3;P=P_3)

P_31 = 0,322 [bar] "extraccion de vapor"
s_31_s = s_4
h_31_s=Enthalpy(Water;s=s_31_s;P=P_31)
h_31_r = h_4 + efs_hpt*(h_31_s - h_4)
s_31_r = Entropy(Water;h=h_31_r;P=P_31)
T_31=Temperature(Water;P=P_31;h=h_31_r)


P_4 = 20 [bar]
T_4 = 500 [°C]
h_4=Enthalpy(Water;T=T_4;P=P_4)
s_4=Entropy(Water;T=T_4;P=P_4)

P_5 = 10 [bar]
s_5_s = s_4
h_5_s=Enthalpy(Water;s=s_5_s;P=P_5)
efs_ipt = 0,8
h_5_r = h_4 + efs_ipt*(h_5_s - h_4)
s_5_r = Entropy(Water;h=h_5_r;P=P_5)
T_5=Temperature(Water;P=P_5;h=h_5_r)

P_6 = 5 [bar]
```

```
s_6_s = s_4
h_6_s=Enthalpy(Water;s=s_6_s;P=P_6)
h_6_r = h_4 + efs_ipt*(h_6_s - h_4)
s_6_r = Entropy(Water;h=h_6_r;P=P_6)
T_6=Temperature(Water;P=P_6;h=h_6_r)

P_7 = 3 [bar]
s_7_s = s_4
h_7_s=Enthalpy(Water;s=s_7_s;P=P_7)
h_7_r = h_4 + efs_ipt*(h_7_s - h_4)
s_7_r = Entropy(Water;h=h_7_r;P=P_7)
T_7=Temperature(Water;P=P_7;h=h_7_r)

P_8 = 1,5 [bar]
s_8_s = s_4
h_8_s=Enthalpy(Water;s=s_8_s;P=P_8)
efs_lpt = 0,8
h_8_r = h_4 + efs_lpt*(h_8_s - h_4)
s_8_r = Entropy(Water;h=h_8_r;P=P_8)
T_8=Temperature(Water;P=P_8;h=h_8_r)

P_26 = 1 [bar]
s_26_s = s_4
h_26_s=Enthalpy(Water;s=s_26_s;P=P_26)
h_26_r = h_4 + efs_lpt*(h_26_s - h_4)
s_26_r = Entropy(Water;h=h_26_r;P=P_26)
T_26=Temperature(Water;P=P_26;h=h_26_r)

P_9 = 0,075 [bar]
s_9_s = s_4
h_9_s=Enthalpy(Water;P=P_9;s=s_9_s)
h_9_r = h_4 + efs_lpt*(h_9_s - h_4)
s_9_r = Entropy(Water;T=T_9;h=h_9_r)
T_9=Temperature(Water;P=P_9;h=h_9_r)
x_9=Quality(Water;P=P_9;s=s_9_s)

P_32 = 1 [bar]
x_32 = 0
T_32 = 40 [°C]
h_32=Enthalpy(Water;x=x_32;P=P_32)

P_10 = 0,075 [bar]
s_10=Entropy(Water;x=x_10;P=P_10)
h_10=Enthalpy(Water;x=x_10;P=P_10)
T_10=Temperature(Water;h=h_10;P=P_10)
x_10 = 0

P_11 = 5 [bar]
s_11_s = s_10
h_11_s=Enthalpy(Water;P=P_11;s=s_11_s)
efs_cp = 0,8
```

```
h_11_r = h_10 + (h_11_s - h_10)/efs_cp
s_11_r = Entropy(Water;T=T_11;P=P_11)
T_11=Temperature(Water;P=P_11;h=h_11_r)

P_12 = P_26
x_12 = 0
T_12= Temperature(Water;x = x_12;P=P_12)
s_12=Entropy(Water;x=x_12;T=T_12)
h_12=Enthalpy(Water;x=x_12;T=T_12)

P_13 = 5 [bar]
s_13_s= s_12
h_13_s=Enthalpy(Water;P=P_13;s=s_13_s)
efs_dp = 0,8
h_13_r = h_12 + (h_13_s - h_12)/efs_dp
s_13_r = Entropy(Water;T=T_13;h=h_13_r)
T_13=Temperature(Water;P=P_13;h=h_13_r)

dT_inter5 = 5 [°C]
P_14 = P_11
T_14 = T_12 - dT_inter5
h_14 =Enthalpy(Water;T=T_14;P=P_14)
s_14 = Entropy(Water;T=T_14;P=P_14)

P_15 = P_11
T_15= Temperature(Water;h=h_15;P=P_15)
s_15 = Entropy(Water;P=P_15;T=T_15)

P_27 = 1,5 [bar]
x_27 = 0
T_27= Temperature(Water;x=x_27;P=P_27)
h_27= Enthalpy(Water;x=x_27;T=T_27)
s_27 = Entropy(Water;x=x_27;T=T_27)

dT_inter4 = 5 [°C]
P_28 = P_11
T_28 = T_27 - dT_inter4
h_28= Enthalpy(Water;T=T_28;P=P_28)
s_28 = Entropy(Water;T=T_28;P=P_28)

P_16 = 3 [bar]
x_16 = 0
T_16 = Temperature(Water;x = x_16;P = P_16)
h_16=Enthalpy(Water;x=x_16;T=T_16)
s_16 = Entropy(Water;x=x_16;T=T_16)

dT_inter3 = 5 [°C]
P_17 = P_11
T_17= T_16 -dT_inter3
h_17=Enthalpy(Water;P=P_17;T=T_17)
s_17 = Entropy(Water;P=P_17;T=T_17)
```

```
P_18 = 5 [bar]
T_18 =Temperature(Water;P=P_18;h=h_18)
s_18=Entropy(Water;h=h_18;P=P_18)
x_18=0
h_18=Enthalpy(Water;x=x_18;P=P_18)

P_19 = P_1
s_19_s = s_18
h_19_s=Enthalpy(Water;P=P_19;s=s_19_s)
efs_bfp = 0,8
h_19_r = h_18 + (h_19_s - h_18)/efs_bfp
s_19_r = Entropy(Water;T=T_19;h=h_19_r)
T_19=Temperature(Water;P=P_19;h=h_19_r)

P_20 = 10 [bar]
x_20 = 0
T_20= Temperature(Water;x=x_20;P=P_20)
h_20=Enthalpy(Water;x=x_20;T=T_20)
s_20=Entropy(Water;x=x_20;T=T_20)

dT_inter2 = 5
P_21 = P_1
T_21= T_20 - dT_inter2
h_21=Enthalpy(Water;P=P_21;T=T_21)
s_21=Entropy(Water;T=T_21;h=h_21)

P_22 = 50 [bar]
x_22 = 0
T_22 = Temperature(Water; x=x_22;P=P_22)
h_22=Enthalpy(Water;x=x_22;T=T_22)
s_22=Entropy(Water;x=x_22;T=T_22)

dT_inter1 = 5 [°C]
P_23 = P_1
T_23= T_22 -dT_inter1
h_23=Enthalpy(Water;P=P_23;T=T_23)
s_23=Entropy(Water;h=h_23;P=P_23)

P_24 = P_1
x_24 = 0
s_24=Entropy(Water;x=x_24;P=P_24)
h_24=Enthalpy(Water;x=x_24;P=P_24)
T_24=Temperature(Water;P=P_24;x=x_24)

P_25 = P_1
x_25 = 1
s_25=Entropy(Water;x=x_25;P=P_25)
h_25=Enthalpy(Water;x=x_25;P=P_25)
T_25=Temperature(Water;P=P_25;x=x_25)
```

"Balance Heater #1"

m_dot_23 = m_dot_0
m_dot_22 = m_dot_2

m_dot_2*h_2_r - m_dot_22*h_22 + m_dot_21*h_21 - m_dot_23*h_23 = 0

"Balance Heater 2"

m_dot_19 = m_dot_0
m_dot_21 = m_dot_0

m_dot_22 +m_dot_5 - m_dot_20 = 0

m_dot_22*h_22 + m_dot_5*h_5_r + m_dot_19*h_19_r - m_dot_20*h_20- m_dot_21*h_21 = 0

"Balance Deaerator"

m_dot_18 = m_dot_0

m_dot_20 + m_dot_6 + m_dot_17 - m_dot_18 = 0

m_dot_20*h_20 + m_dot_6*h_6_r + m_dot_17*h_17 - m_dot_18*h_18 = 0

"Balance Heater 3"

m_dot_28 = m_dot_17
m_dot_16 = m_dot_7

m_dot_28*h_28 + m_dot_7*h_7_r - m_dot_17*h_17 - m_dot_16*h_16 = 0

"Balance Heater 4"

m_dot_15 = m_dot_28

m_dot_16 + m_dot_8 - m_dot_27 = 0

m_dot_16*h_16 + m_dot_8*h_8_r + m_dot_15*h_15 - m_dot_27*h_27 - m_dot_28*h_28 = 0

"Nodo entre heater 4 y 5"

m_dot_14*h_14 + m_dot_13*h_13_r - m_dot_15*h_15 =0

m_dot_14 + m_dot_13 - m_dot_15 = 0

"Balance Heater 5"

m_dot_27 + m_dot_26 - m_dot_12 = 0

m_dot_12 = m_dot_13

m_dot_11 = m_dot_14

m_dot_100 = m_dot_10 + m_dot_32

m_dot_27*h_27 + m_dot_26*h_26_r + m_dot_11*h_11_r - m_dot_12*h_12 - m_dot_14*h_14 = 0

"Balance Caldera"

m_dot_23*h_23 - m_dot_0*h_1 + m_dot_3*h_3_r - m_dot_4*h_4 + q_in = 0

"Balance turbina"

m_dot_1*h_1 + m_dot_4*h_4 - m_dot_9*h_9_r - m_dot_8*h_8_r - W_turbina - m_dot_3*h_3_r- m_dot_31*h_31_r- m_dot_2*h_2_r - m_dot_5*h_5_r - m_dot_6*h_6_r - m_dot_7*h_7_r - m_dot_26*h_26_r = 0

m_dot_31 = 0 [kg/s] "extraccion"

m_dot_32 = m_dot_31

m_dot_3 = m_dot_1 -m_dot_2

m_dot_4 = m_dot_3

m_dot_4 = m_dot_5 + m_dot_6 + m_dot_7 + m_dot_8 + m_dot_9 + m_dot_26 + m_dot_31

"Balance bombas"

"w_in_DP"

m_dot_12*(h_13_r - h_12) - W_in_DP = 0

"w_in_BFP"

m_dot_18*(h_19_r - h_18) = W_in_BFP

"w_in_tvc"

h_100*m_dot_100 = h_32*m_dot_32 + h_10*m_dot_10

T_100=Temperature(Water;P=P_10;h=h_100)

m_dot_11*(h_11_r - h_10) = W_in_tvc

ef_tvc = 0,8

m_dot_30*(h_1-h_9_r)*ef_tvc = W_in_tvc

W_dot_in = W_in_BFP + W_in_DP

"Condensador"

m_dot_10 = m_dot_9 + m_dot_29 + m_dot_30

m_dot_10*h_10 + q_out = (m_dot_9 + m_dot_29 + m_dot_30) *h_9_r

"Ciclo Rankine"

eficiencia_ciclo = (W_turbina - W_dot_in)/q_in

PP[1] = P_1
PP[2] = P_2
PP[3] = P_3
PP[4] = P_4
PP[5] = P_5
PP[6] = P_6
PP[7] = P_7
PP[8] = P_8
PP[9] = P_26
PP[10] = P_9
PP[11] = P_10
PP[12] = P_11
PP[13] = P_12
PP[14] = P_13
PP[15] = P_14
PP[16] = P_28
PP[17] = P_27
PP[18] = P_15
PP[19] = P_16
PP[20] = P_17
PP[21] = P_18
PP[22] = P_19
PP[23] = P_20
PP[24] = P_21
PP[25] = P_22
PP[26] = P_23
PP[27] = P_24
PP[28] = P_25
PP[29] = P_1

TT[1] = T_1
TT[2] = T_2
TT[3] = T_3

```
TT[4] = T_4
TT[5] = T_5
TT[6] = T_6
TT[7]= T_7
TT[8] = T_8
TT[9] =T_26
TT[10] = T_9
TT[11] = T_10
TT[12] = T_11
TT[13] = T_12
TT[14] = T_13
TT[15] = T_14
TT[16] = T_28
TT[17] = T_27
TT[18] = T_15
TT[19] = T_16
TT[20] = T_17
TT[21] = T_18
TT[22] = T_19
TT[23] = T_20
TT[24] = T_21
TT[25] = T_22
TT[26] = T_23
TT[27] = T_24
TT[28] = T_25
TT[29] = T_1

hh[1] = h_1
hh[2] = h_2_r
hh[3] = h_3_r
hh[4] =  h_4
hh[5] = h_5_r
hh[6] = h_6_r
hh[7] = h_7_r
hh[8] = h_25
hh[9] = h_26_r
hh[10] =  h_9_r
hh[11] = h_10
hh[12] =h_11_r
hh[13] = h_12
hh[14] = h_13_r
hh[15] = h_14
hh[16] = h_8_r
hh[17] = h_28
hh[18] =h_15
hh[19] = h_16
hh[20] = h_17
hh[21] = h_18
hh[22] = h_19_r
hh[23] = h_20
hh[24] = h_21
```

```
hh[25] = h_22
hh[26] = h_23
hh[27] = h_24
hh[28] = h_25
hh[29] = h_1

SS[1] = s_1
SS[2] = s_2_r
SS[3] = s_3_r
SS[4] = s_4
SS[5] = s_5_r
SS[6] = s_6_r
SS[7] = s_7_r
SS[8] = s_8_r
SS[9] = s_26_r
SS[10] = s_9_r
SS[11] = s_10
SS[12] = s_11_r
SS[13] = s_12
SS[14] = s_13_r
SS[15] = s_14
SS[16] = s_28
SS[17] = s_27
SS[18] = s_15
SS[19] = s_16
SS[20] = s_17
SS[21] = s_18
SS[22] = s_19_r
SS[23] = s_20
SS[24] = s_21
SS[25] = s_22
SS[26] = s_23
SS[27] = s_24
SS[28] = s_25
SS[29] = s_1
```