



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y BIOTECNOLOGÍA

**EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE OBTENCIÓN DE AGUA PARA RIEGO A
PARTIR DE AGUAS SALOBRES UTILIZANDO ENERGÍA SOLAR**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL QUÍMICO

FELIPE SÁNCHEZ IHL

PROFESOR GUÍA:

LEANDRO HERRERA ZEPPELIN

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

FERNANDO PUCHI THIELE

JOSÉ HERNÁNDEZ PAVEZ

SANTIAGO, CHILE

ENERO 2010

RESUMEN DEL INFORME FINAL
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL QUÍMICO
POR FELIPE SÁNCHEZ IHL
FECHA: 25/03/2010
PROF. GUÍA: SR. LEANDRO HERRERA

EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE OBTENCIÓN DE AGUA PARA RIEGO A PARTIR DE
AGUAS SALOBRES UTILIZANDO ENERGÍA SOLAR

En la actualidad existen muchos lugares en el mundo donde el agua dulce es un bien escaso y por ende, económicamente valioso. Para mejorar esta situación se plantea la instalación de una planta de desalinización con el objetivo de aumentar la disponibilidad de agua dulce en zonas donde solo existe agua salobre. El proceso de desalinización requiere gran cantidad de energía. Dicha energía se puede obtener a partir de energía solar, ya que es renovable, sustentable y evita la emisión de gases de efecto invernadero que pueden agravar el problema de carencia de agua.

Los objetivos de este trabajo fueron revisar las distintas tecnologías que existen para la desalinización y para la captura de energía solar con el fin de poder realizar una evaluación económica simplificada sobre la implementación de una planta de desalinización.

Se construyó un prototipo concentrador de radiación solar, original de inspiración Fresnel, para poder estudiar eficiencias del diseño. El prototipo consiste de secciones cónicas con un mismo foco construido con acero brillante y en el foco un receptor de radiación que transfiere calor hacia un fluido térmico. El equipo de laboratorio tuvo una eficiencia de 70% del calor transferido al fluido térmico sobre la radiación, cercano al valor teórico calculado de 77%. Con el dato de eficiencia real se pueden diseñar concentradores industriales a partir del prototipo construido.

Se realizaron tres evaluaciones económicas para distintos escenarios que se diferencian entre sí por la tecnología de desalinización y el suministro de energía. Para los tres escenarios se consideró una tasa de descuento del 10%, un horizonte de evaluación de 10 años y un requerimiento de producción de 1.000 [m³/día]. Los concentradores dimensionados para las evaluaciones son de 8 [m] de diámetro, totalizando un área de concentración de 40,81 [m²] por concentrador. Para cada escenario se evalúa el agua obtenida para riego de cultivos (tomates) y para uso sanitario.

El primer escenario usa una tecnología de destilación que requiere para su funcionamiento 442 concentradores que suman 1,8 [ha] de concentración con lo que se obtiene una eficiencia de 555,6 [(m³ de agua desalinizada)/día/(ha de concentración)] obteniéndose una capacidad de riego de cultivo de tomates de 5,23 [ha/(ha de concentración)]. Todos los escenarios expuestos son para el caso de la venta de agua para uso sanitario ya que tienen un mayor retorno. El VAN resultó ser de - \$119.000.000 (préstamo del 75%) para una inversión de \$1.243.000.000. Para el segundo escenario se utiliza una tecnología de desalinización por membrana con energía eléctrica del sistema interconectado. El VAN resultó ser \$44.000.000 (préstamo del 75%) para una inversión de \$530.000.000. El tercer escenario usa una tecnología de desalinización por membrana con energía eléctrica por parte de los concentradores. El VAN resultó ser \$212.000.000 (préstamo del 75%) para una inversión de \$796.000.000.

Se plantea realizar la evaluación técnica y económica para otros materiales reflectivos del concentrador para mejorar eficiencias y también considerar bonos de carbono para aumentar la rentabilidad de los proyectos.

Agradecimientos

Quiero agradecer en primer lugar a mi madre Helga por su apoyo incondicional sin importar las circunstancias y, por supuesto, también su cariño.

A mi abuela Nilda por estar siempre para mí en cualquier circunstancia y criarme de la mejor manera posible.

A mi hermano Toño por su aporte a mi pensamiento ingenieril y por ser una figura paterna junto a mi abuelo Walter.

A Pamela por estar a mi lado en las buenas y en las malas, aconsejándome o apoyándome durante estos maravillosos 6 años.

A mis amigos del colegio por las risas y aventuras extra-universitarias tan necesarias en esta carrera.

A mis amigos de la Universidad por enseñarme otros estilos de vida y ayudarme durante la carrera.

A Leandro Herrera por guiarme a través de esta aventura en la cual destaco el enfoque “pensar y luego actuar” que tanto hace falta en el mundo de hoy.

Índice General

Índice General	I
Índice de Figuras	IV
Índice de Tablas	VI
Nomenclatura	VII
1 Introducción	1
1.1 Justificación del uso de la Energía Solar	3
1.2 Objetivos	4
1.2.1 Objetivos Específicos:	4
2 Antecedentes	5
2.1 Características Meteorológicas	5
2.1.1 Radiación Solar	5
2.1.2 Geometría Solar y Terrestre	6
2.1.3 Nubosidad.....	9
2.2 Tránsito de Calor por Radiación	9
2.3 Tecnologías de Captura Solar	10
2.3.1 Energía Eléctrica	10
2.3.2 Energía Térmica	11
2.4 Desalinización.....	14
2.4.1 Por medio de Membranas	16
2.4.2 Por medios Térmicos.....	18
2.4.3 Comparación entre las Tecnologías Industriales	20
2.4.4 Requerimientos Energéticos	20
3 Desarrollo Teórico y Experimental.....	22
3.1 Tránsito de Calor.....	23
3.1.1 Balances Energéticos.....	24
3.1.2 Balance global	27
3.1.3 Balance en el Agua.....	27

3.2	Construcción del Prototipo	28
3.2.1	Frustums	28
3.2.2	Receptor.....	29
3.2.3	Sensores de Temperatura.....	29
3.2.4	Equipo construido.....	31
3.3	Pruebas Experimentales	31
3.3.1	Resultados para 4 frustums.....	32
3.3.2	Resultados para 2 frustums.....	33
3.3.3	Resultados para 1 frustum	34
3.4	Eficiencia Térmica.....	35
4	Evaluación Económica.....	37
4.1	Diseño de Captura de Energía	38
4.2	Costos de Captura de Energía.....	41
4.2.1	Costos de Capital.....	41
4.2.2	Costos de Operación.....	42
4.3	Costos de Desalinización	42
4.3.1	Análisis de Costos de Capital	42
4.3.2	Análisis de Costos de Operación.....	42
4.4	Costos Totales.....	43
4.5	Ingresos.....	43
4.6	VAN del Proyecto.....	43
4.7	Proyectos Alternativos.....	44
4.7.1	RO con Suministro eléctrico del Sistema Interconectado (SING)	44
4.7.2	RO con Concentradores.....	45
5	Discusiones y Conclusiones.....	46
	Bibliografía	48
	Apéndice A: Dimensiones de frustums	50
	Apéndice B: Propiedades del Agua y del Aire.....	51

Apéndice C: Radiación y Magnitud del Viento	54
Apéndice D: Flujos Volumétricos.....	57
Apéndice E: Resultados Experimentales.....	58
Apéndice F: Tamaño óptimo de Concentrador	61
Apéndice G: Cálculo Distancia Este-Oeste.....	63

Índice de Figuras

Figura 1.1: Proporción de uso de Agua por Continente [12]	2
Figura 1.2: Energía Solar en Sudamérica [26]	3
Figura 2.1: Diferencia de intensidades espectrales dentro y fuera de la atmósfera [16]	5
Figura 2.2: Radiación Especular y Radiación Difusa sobre una Superficie horizontal [15]	6
Figura 2.3: Esquema de geometría entre el Sol y la Tierra	6
Figura 2.4: Movimiento de Traslación (órbita) e inclinación de la Tierra	7
Figura 2.5: cambio en la posición del sol con respecto a un observador en la Tierra	7
Figura 2.6: Posición del sol con respecto a un observador local.....	8
Figura 2.7: Colector Pasivo: Parabólico Compuesto.....	13
Figura 2.8: Colector Activo: Cilindro parabólico (izq.), Disco Parabólico (der.).....	13
Figura 2.9: Rangos de Tamaños de partícula removidos según Técnica de Purificación [9].....	15
Figura 2.10: Crecimiento de plantas de desalinización en el mundo según tecnología [9].....	16
Figura 2.11: Esquema de Funcionamiento de Osmosis Inversa.....	17
Figura 2.12: Esquema de Proceso de desalinización por medio de RO [11]	17
Figura 2.13: Funcionamiento de Osmosis directa [6]	18
Figura 2.14: Funcionamiento de MED.....	19
Figura 2.15: Funcionamiento de MSF.....	19
Figura 2.16: Destilador Solar	20
Figura 2.17: Energía Mínima de Desalinización por RO a 25°C [8]	21
Figura 3.1: Foco óptico de un frustum	22
Figura 3.2: Sistema de frustums con un mismo foco óptico	22
Figura 3.3: Construcción de frustums	23
Figura 3.4: Dependencia con respecto al diámetro (d) del receptor y altura del foco (f).....	23
Figura 3.5: Esquema Receptor de radiación.....	24
Figura 3.6: Consideraciones para el volumen de control	24
Figura 3.7: Diseño de cortes para Prototipo	28
Figura 3.8: Unión de extremos de los Frustums.....	28
Figura 3.9: Diseño de sistema de seguimiento para Prototipo	29
Figura 3.10: Diseño interno del receptor para Prototipo	29
Figura 3.11: Diagrama de construcción de sensor de temperatura.....	30
Figura 3.12: Sensores de Temperatura	30
Figura 3.13: Equipo finalizado y Operando	31
Figura 3.14: perfiles de temperatura de pared y de salida del agua	31

Figura 3.15: der: 1 frustum, izq: 2 frustums.....	32
Figura 3.16: Perfiles de temperatura, 4 noviembre (1 ^{er} experimento).....	33
Figura 3.17: Perfiles de temperatura, 4 noviembre (4 ^{to} experimento).....	34
Figura 3.18: Perfiles de temperatura, 7 noviembre (1 ^{er} experimento).....	34
Figura 4.1: Concentrador para uso industrial	38
Figura 4.2: Sombra entre concentradores: Este-Oeste	38
Figura 4.3: Sombra entre concentradores: Dirección Norte-Sur	39
Figura 4.4: Diseño de Área de Concentradores.....	39
Figura 8.1: Cp del agua para temperaturas entre 270 y 380°K	51
Figura 8.2: μ del agua para temperaturas entre 270 y 380°K.....	52
Figura 8.3: k del agua para temperaturas entre 270 y 380°K.....	52
Figura 8.4: ρ del agua para temperaturas entre 270 y 380°K.....	52
Figura 8.5: Propiedades para temperaturas entre 270 y 380°K (izq: k, der: ρ)	53
Figura 8.6: Propiedades para temperaturas entre 270 y 380°K (izq: μ , der: Cp)	53
Figura 9.1: radiación del día 307.....	54
Figura 9.2: Magnitud del Viento del día 307	54
Figura 9.3: radiación del día 308.....	54
Figura 9.4: Magnitud del Viento del día 308	55
Figura 9.5: radiación del día 309.....	55
Figura 9.6: Magnitud del Viento del día 309	55
Figura 9.7: radiación del día 311.....	55
Figura 9.8: Magnitud del Viento del día 311	56
Figura 11.1: Perfiles de temperatura, 4 noviembre (1 ^{er} experimento).....	58
Figura 11.2: Perfiles de temperatura, 4 noviembre (2 ^{do} experimento)	58
Figura 11.3: Perfiles de temperatura, 5 noviembre (1 ^{er} experimento).....	58
Figura 11.4: Perfiles de temperatura, 5 noviembre (2 ^{do} experimento)	59
Figura 11.5: Perfiles de temperatura, 5 noviembre (3 ^{er} experimento).....	59
Figura 11.6: Perfiles de temperatura, 7 noviembre (3 ^{er} experimento).....	59
Figura 11.7: Perfiles de temperatura, 4 noviembre (3 ^{er} experimento).....	59
Figura 11.8: Perfiles de temperatura, 4 noviembre (4 ^{to} experimento).....	60
Figura 11.9: Perfiles de temperatura, 7 noviembre (2 ^{do} experimento)	60
Figura 11.10: Perfiles de temperatura, 7 noviembre (1 ^{er} experimento).....	60

Índice de Tablas

Tabla 1.1: Porcentaje de tipo de Agua sobre el total [24]	1
Tabla 1.2: Potencial Teórico y Técnico de las Energías Renovables, 2008 [5]	3
Tabla 2.1: Comparación de las tecnologías térmicas [23],[16]	14
Tabla 2.2: Rango de Concentración de sales en el Agua [3].....	14
Tabla 2.3: Comparación de tecnologías de desalinización predominantes en el mundo [8],[22]	20
Tabla 3.1: Resultados Experimentales para 4 frustums	33
Tabla 3.2: Resultados Experimentales para 2 frustums	34
Tabla 3.3: Resultados Experimentales para 1 frustum	35
Tabla 3.4: Eficiencia Térmica para 4 frustums	35
Tabla 3.5: Eficiencia Térmica para 2 frustums	36
Tabla 3.6: Eficiencia Térmica para 1 frustum.....	36
Tabla 4.1: Caudales Requeridos por Hectárea según método de Riego, 2009 [18]	37
Tabla 4.2: Costo de un Concentrador de 8 [m] de diámetro	41
Tabla 4.3: Costo del Sistema de Concentradores	42
Tabla 4.4: Costo operacional de la Planta MED	43
Tabla 4.5: Ingresos por cultivo al año, Water Footprint Network, 2001 [2]	43
Tabla 4.6: VAN de los distintos productos	44
Tabla 4.7: VAN de los distintos productos para RO.....	45
Tabla 4.8: VAN de los distintos productos para RO.....	45
Tabla 7.1: Dimensiones de los frustums	50
Tabla 7.2: Dimensiones de los frustums (Continuación)	50
Tabla 8.1: Propiedades del agua a distintas temperaturas	51
Tabla 8.2: Propiedades del aire a distintas temperaturas.....	53
Tabla 10.1: Flujos Volumétricos para el día 4 de Noviembre.....	57
Tabla 10.2: Flujos Volumétricos para el día 5 de Noviembre.....	57
Tabla 10.3: Flujos Volumétricos para el día 7 de Noviembre.....	57
Tabla 12.1: Área de Concentración [m ²] en función de altura focal y diámetro focal	61
Tabla 12.2: Costos individuales de los concentradores estimados.....	61
Tabla 12.3: Inversión de Concentradores según diámetro para 1 línea.....	61
Tabla 12.4: Inversión de Concentradores según diámetro para 26 líneas	62

Nomenclatura

A_i = Área interior de orificios del receptor.

A_c = Área del concentrador.

A_p = Área exterior del receptor por la cual se recibe la radiación.

A_{rec} = Área del receptor.

A_t = Área transversal de entrada de agua.

C = Razón de concentración.

D_t = Diámetro de los orificios.

Cp_a = Calor específico del aire a T_a .

Cp_m = Calor específico del agua a temperatura T_m .

e = Fracción de la energía emitida por el cuerpo que llega al sol.

E = Emisión de Energía por radiación.

G = Radiación recibida por el concentrador.

G_r = Radiación reflejada por el concentrador.

h_a = Coeficiente de convektividad del aire.

h_w = Coeficiente de convektividad del agua al interior de los orificios del receptor.

k_a = Conductividad del aire a T_a .

k_w = Conductividad del agua a T_m .

L_p = Largo del receptor.

M = Mega = 10^6 .

\dot{m} = Flujo másico de Agua.

Nu_w = Número de Nusselt para el agua.

Nu_a = Número de Nusselt para el aire en el sistema.

Pr_a = Número de Prandtl para el aire en el sistema.

Pr_w = Número de Prandtl para el agua en el sistema.

Q_w = Calor recibido por el agua.

Q_{ra} = Radiación desde el receptor hacia el medio ambiente.

Q_{cw} = Calor por Convección desde el receptor hacia el agua.

Q_{ca} = Calor por Convección desde el receptor hacia el medio ambiente.

$Q_{A \rightarrow S}$ = energía que irradia el cuerpo hacia el sol.

$Q_{S \rightarrow A}$ = energía que irradia el sol hacia el cuerpo.

Q_s = energía que irradia el sol.

r = Radio del sol.

R = Distancia del sol a la Tierra.

Re_a = Número de Reynolds para el aire en el sistema.

Re_w = Número de Reynolds para el agua en el sistema.

T = Temperatura del sol.

T_s = Temperatura del agua a la salida.

T_e = Temperatura del agua a la entrada.

T_p = Temperatura de pared del receptor (por dentro y por fuera).

T_0 = Temperatura del “espacio” = $T_a - 10^\circ K$ [16].

T_a = Temperatura del aire medida a la sombra.

T = Tera = 10^{12} .

V = Volumen.

W = Trabajo.

$2 \cdot \theta$ = Ángulo con el cual la radiación del sol llega a la Tierra.

v_a = Velocidad del aire.

v_w = Velocidad del agua.

α = Absorbancia del receptor.

ε = Emisividad.

ε_{Cu} = Emisividad del cobre.

π_{os} = Presión Osmótica.

ρ = Reflectividad.

ρ_{conc} = Reflectividad del concentrador.

σ = Constante de Stefan- Boltzmann.

ρ_a = Densidad del aire a T_a .

ρ_m = Densidad del agua a T_m .

μ_a = Viscosidad del del aire a T_a .

μ_m = Viscosidad del agua a T_m .

μ_p = Viscosidad del agua a T_p .

$\Delta T_{teórico}$ = Diferencia de temperaturas teórico.

ΔT_{real} = Diferencia de temperaturas real.

θ = Ángulo de inclinación máximo del sol.

Φ = Diámetro concentrador.

$x + y$ = Distancia entre concentradores.

Capítulo I

Introducción

Hoy en día el suministro de agua dulce se está convirtiendo en uno de los principales problemas de la humanidad. Para la gran mayoría de las culturas del mundo el agua dulce es un producto clave para la vida, ya que influye en los procesos básicos de sobrevivencia del ser humano, como los son la higiene y la alimentación. El acceso al agua dulce es vital para mantener un bienestar mínimo en la comunidad por lo que contar con un suministro seguro de agua dulce es una necesidad.

El agua se considera abundante en el planeta, ya que cubre 3 cuartas partes de la superficie del planeta (mayormente en océanos). Sin embargo se debe considerar que la disponibilidad de agua dulce apta para consumo humano es bastante baja en comparación a la disponibilidad de agua total existente en el planeta. La mayor parte del agua es agua salada tal como se puede apreciar en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1: Porcentaje de tipo de Agua sobre el total [24]

Reservorio	% del Total
Océanos	97
Campos de hielo, glaciares	2,2
Agua subterránea (estimado)	0,7
Lagos y ríos (estimado)	0,013
Humedad del suelo	0,013
Atmósfera	0,0009
Total	100

El agua dulce representa sólo el 2,9% del total siendo solo un 0,013% del total de agua dulce de fácil acceso en ríos o lagos. El resto del agua dulce se encuentra en napas subterráneas o en mantos de hielo por lo que se le considera de difícil acceso.

En la naturaleza la renovación del agua dulce se debe principalmente al ciclo del agua consistente en la evaporación producida por el sol en los océanos del mundo. El vapor de agua se condensa y forma las nubes que posteriormente precipitan en los continentes. Las precipitaciones alcanzan un volumen anual de 110.000 [km³] en todo el planeta. Aproximadamente el 65% de las precipitaciones constituyen “agua verde” que se define como el agua contenida en la vegetación de los bosques, pantanos, pastizales y cultivos. El restante 35% constituye “agua azul” que representa el agua de los ríos, lagos y acuíferos.

Actualmente, en el mundo, se extrae aproximadamente un 10% del total del agua azul para uso humano. Del 10% extraído se destina un 70% a la agricultura, un 20% a la industria y un 10% para uso doméstico o sanitario. Estas proporciones varían según el continente tal como se aprecia en la Figura 1.1.

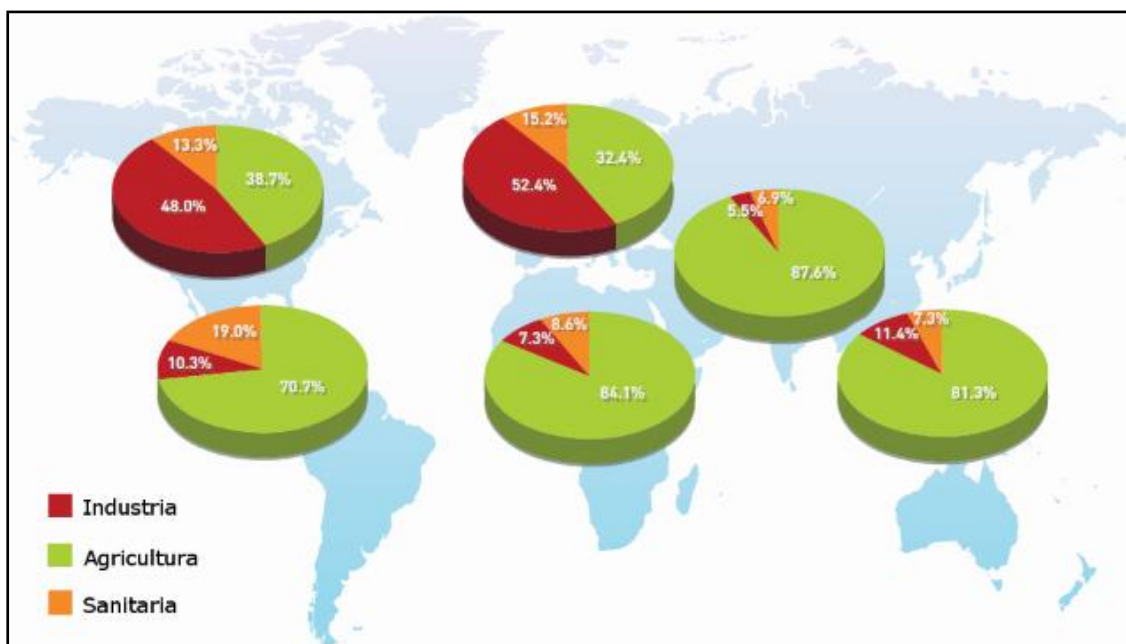


Figura 1.1: Proporción de uso de Agua por Continente [12]

Actualmente el mundo experimenta un alza constante en la demanda de agua dulce debido a varios factores interrelacionados entre sí. El factor principal para esta alza es el aumento de la población humana que provoca una mayor demanda de alimentos y también una mayor demanda de energía.

Un aumento de la demanda de los alimentos provocaría un aumento significativo en la cantidad de agua que se requiere para el crecimiento de los cultivos.

Para la generación de energía (eléctrica) se utilizan plantas termoelectricas, hidroelectricas, entre otras. Estas tecnologías requieren agua dulce para que funcionen adecuadamente, por lo que si aumentara la demanda energética, entonces aumentaría la demanda de agua dulce. También aumentaría la demanda de los combustibles para la generación de energía. En particular, para los biocombustibles de primera generación [7], uno de los insumos más importantes es el agua requerida para la irrigación de las plantaciones que se utilizan posteriormente para producir el biocombustible.

Desde un punto de vista ambiental, el constante uso de combustibles fósiles por parte de la población mundial está afectando al planeta a través del cambio climático. Se proyecta que dicho cambio influirá en las futuras precipitaciones del planeta aumentando las precipitaciones en algunas zonas, provocando inundaciones, y disminuyendo las precipitaciones en otras, provocando sequías por lo que el agua dulce en dichas zonas será más escasa.

Para poder remediar la situación de abastecimiento para el futuro es necesario contar con métodos de obtención de agua dulce a partir de aguas que normalmente no son útiles para consumo humano, regadío o uso industrial. Un método muy conocido y efectivo es la desalinización de aguas salobres, siendo el ejemplo más conocido la desalinización de agua de mar. Para poder efectuar los procesos de desalinización es necesario utilizar una notable cantidad de energía, siendo la mínima cantidad de energía teórica de 0,7 [kWh/m³] a 25°C para la Osmosis Inversa. En consecuencia el costo de la desalinización puede ser muy alto y para escenarios dados la construcción de una planta de desalinización no es rentable.

1.1 Justificación del uso de la Energía Solar

La desalinización de agua salobre requiere gran cantidad de energía y utilizar energías provenientes de combustibles fósiles no es una solución que se tomará en cuenta ya que las emisiones de gases de efecto invernadero aumentarían, provocando un cambio climático más pronunciado. Una solución aceptable es utilizar algún tipo de energía limpia y renovable. En la Tabla 1.2 se pueden apreciar los potenciales que tienen algunas de las energías renovables en el mundo.

Tabla 1.2: Potencial Teórico y Técnico de las Energías Renovables, 2008 [5]

	Potencial Teórico TW = Tera Watt	Potencial Técnico
Biomasa	8-14 [TW]	6-8 [TW]
Hidráulico	4,6 [TW]	1,6 [TW]
Geotérmico	66 [TW]	11,6 [TW]
Eólico	20 [TW]	2 [TW]
Solar	600 [TW]	60 [TW]
Oceánico	234 [TW]	Sin datos

Una alternativa es utilizar energía solar que, como se aprecia en la Tabla 1.2, tiene el potencial más grande entre las energías renovables. Además este potencial es más abundante en las zonas donde la escasez de agua es mayor por lo que la utilización de dicha energía representa la alternativa que se considerará en este trabajo.

La implementación de la tecnología que se escoja se realizará en alguna zona del país y como se aprecia en la Figura 1.2 el norte de Chile posee una alta radiación solar aprovechable, por lo que se considerará realizar el proyecto en dicha zona.

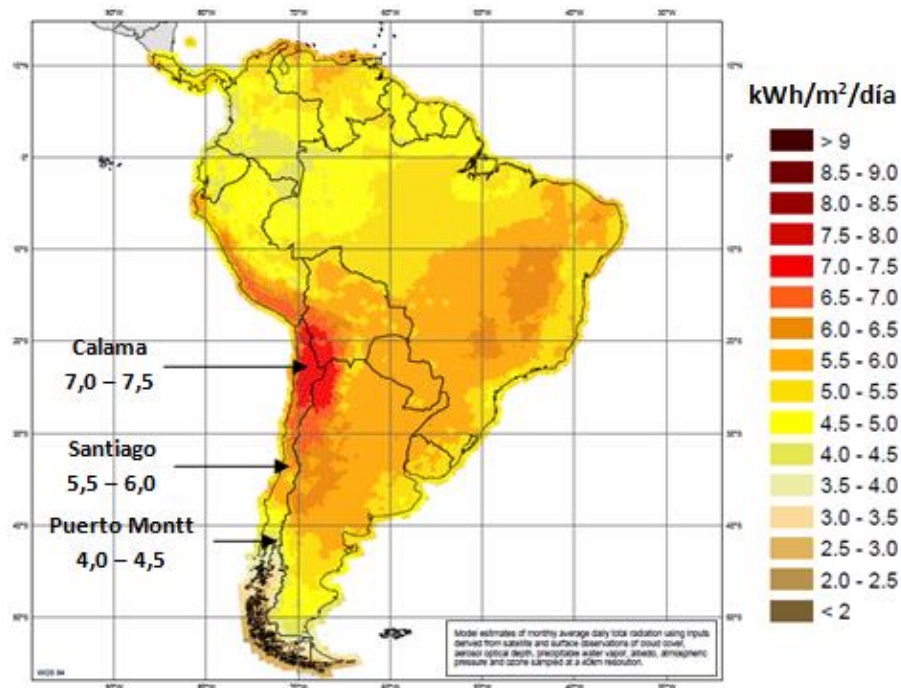


Figura 1.2: Energía Solar en Sudamérica [26]

1.2 Objetivos

Esta memoria tiene como objetivo aportar las bases de diseño y algunos parámetros experimentales de un sistema de captura de energía solar como calor útil para la desalinización de agua.

1.2.1 Objetivos Específicos:

- Analizar distintas tecnologías de desalinización de agua y de obtención de energía solar desde un punto de vista operacional, económico y ambiental.
- Construcción de un equipo concentrador solar de laboratorio para estimar eficiencia de una tecnología en particular.
- Estimar costos de inversión y rentabilidad operacional de una central de purificación de agua para riego por medio de energía solar.

Capítulo II

Antecedentes

2.1 Características Meteorológicas

Para analizar un proceso de desalinización por medio de energía solar se debe realizar antes una caracterización de los principales antecedentes que influyen en el proceso, como los son los factores climáticos. El principal factor corresponde a la radiación proveniente del sol.

2.1.1 Radiación Solar

El sol se considera a efectos prácticos como un cuerpo negro que irradia energía a una temperatura de 5780°K . Este razonamiento se debe a que la distribución espectral que posee es bastante similar a la de un cuerpo negro.

La potencia total que es capaz de producir el sol es $3,8 \cdot 10^{20}$ [MW] pero solo una fracción llega a la Tierra. Por lo tanto la radiación efectiva que llega a la tierra corresponde a $1,35$ [kW/m^2] que se conoce como la constante solar. Sin embargo, la radiación que efectivamente llega a la superficie del planeta es menor debido a efectos de absorción, dispersión y reflexión por parte de la atmósfera como puede apreciarse en la Figura 2.1.

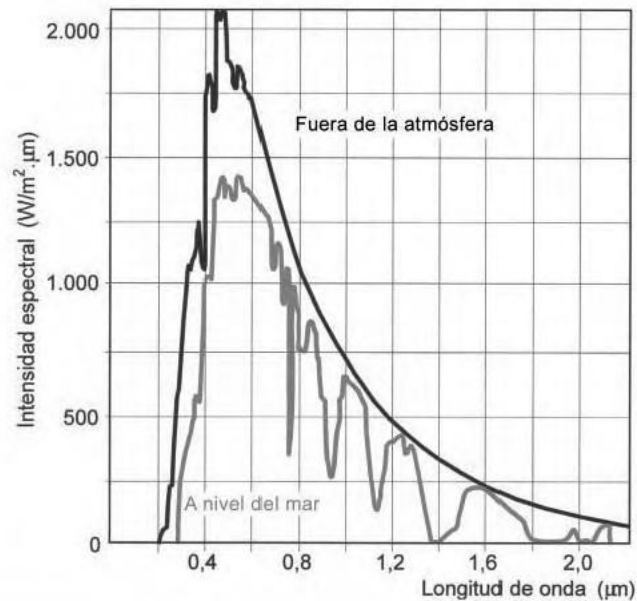


Figura 2.1: Diferencia de intensidades espectrales dentro y fuera de la atmósfera [16]

La radiación efectiva que llega a la Tierra disminuye su intensidad en relación a la constante solar y alcanza máximos en torno a los $1,2 \text{ [kW/m}^2\text{]}$. Las dispersiones y absorciones producidas en la atmósfera corresponden a un 55% de la radiación total y tan solo un 45% de la radiación llega a la superficie de la Tierra. Dependiendo de las condiciones climáticas (nubes, contaminación, etc.) la radiación total que llega a la superficie de la Tierra se puede expresar como la suma de dos componentes: radiación difusa y radiación directa (especular) [15].

- **Radiación directa:** es la radiación solar recibida en la superficie terrestre sin que haya sufrido ningún cambio de dirección en su recorrido.
- **Radiación difusa:** es la componente de la radiación solar recibida en la superficie terrestre después de que los procesos de dispersión (reflexión y difusión) por la atmósfera hayan modificado su recorrido.

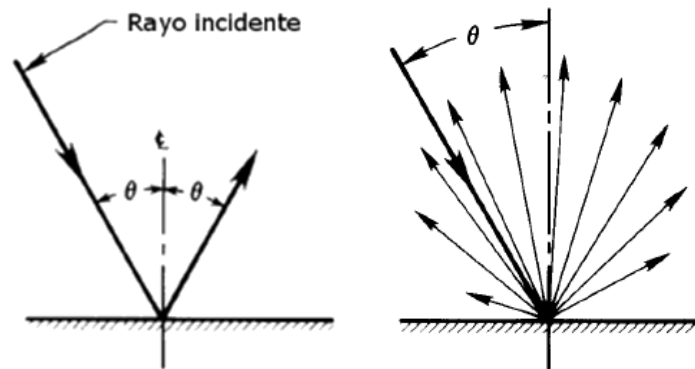


Figura 2.2: Radiación Especular y Radiación Difusa sobre una Superficie horizontal [15]

2.1.2 Geometría Solar y Terrestre

Para optimizar el uso de la energía solar es necesario conocer la posición del sol en el cielo para cualquier lugar del planeta en el que se encuentre el sistema de captura solar. Esto tiene especial importancia para el diseño de los sistemas de seguimiento solar como se podrá apreciar en el punto 2.3.

Para determinar la posición del sol se deben conocer los movimientos de la Tierra y también las formas del sol y la Tierra. En la Figura 2.3 se muestra la geometría entre el sol y la Tierra.

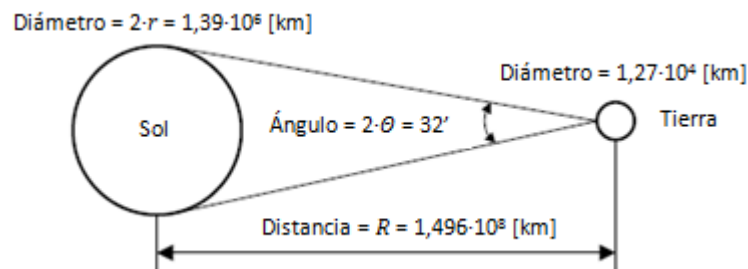


Figura 2.3: Esquema de geometría entre el Sol y la Tierra

El movimiento de traslación de la Tierra alrededor del sol tiene una forma elíptica con una excentricidad bastante pequeña por lo que se asemeja mucho a un movimiento en forma circular. El movimiento de traslación que realiza la Tierra posee una inclinación en su eje de rotación de $23,45^\circ$.

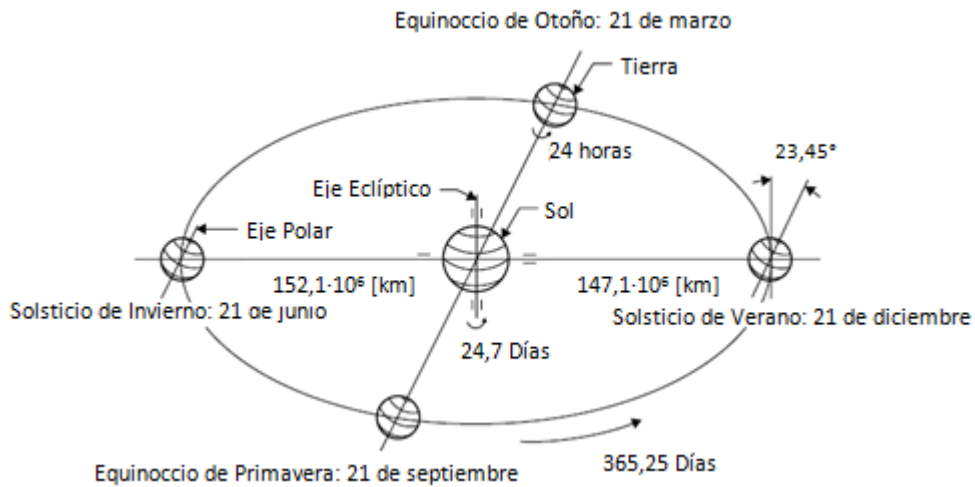


Figura 2.4: Movimiento de Traslación (órbita) e inclinación de la Tierra

Debido al ángulo de inclinación de la Tierra existe una eclíptica⁽¹⁾ variable a través del año dependiendo de la latitud en la que uno se encuentre. Esto conlleva a cambios de estacionarios en la radiación incidente sobre la Tierra.

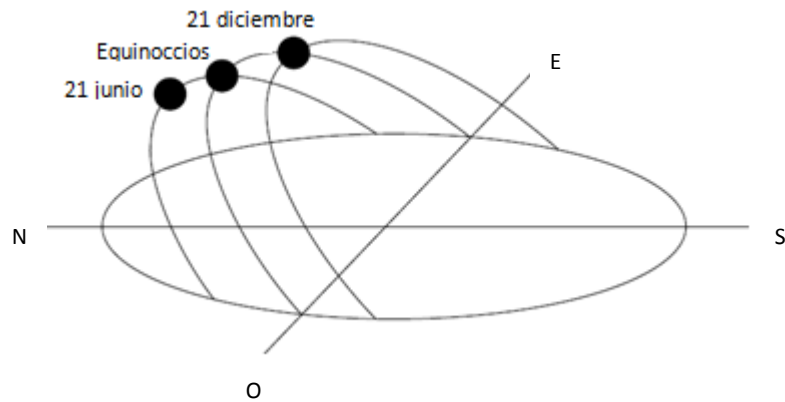


Figura 2.5: cambio en la posición del sol con respecto a un observador en la Tierra

Es posible calcular la ubicación exacta del sol para cada instante de un día determinado en una posición dada en la Tierra a través de un análisis geométrico. En la Figura 2.6 se muestran los ángulos necesarios para dicho análisis.

¹ Movimiento del Sol que se observa desde un punto fijo de la Tierra

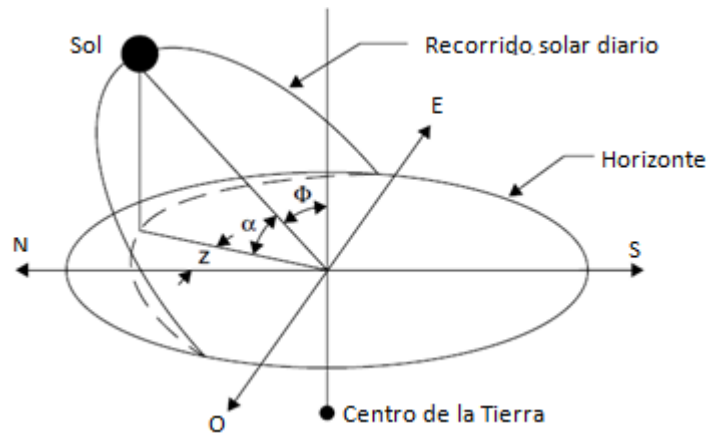


Figura 2.6: Posición del sol con respecto a un observador local

El análisis geométrico resulta en la ecuación (2.1).

$$\sin(\alpha) = \cos(\Phi) = \sin(L) \sin(\delta) + \cos(L) \cos(\delta) \cos(h) \quad (2.1)$$

- Φ : corresponde al ángulo zenit que subtiende entre la línea zenit⁽²⁾ y la línea del sol.
- z : es el ángulo azimut del sol que es formado por la proyección en el plano horizontal del rayo solar desde el Este (-180°) al Oeste (180°).

$$\sin(z) = \frac{\cos(\delta) \sin(h)}{\cos(\alpha)}$$

- α : es el complemento del ángulo zenit y corresponde al ángulo formado entre la horizontal y la línea del sol.
- h : es el ángulo de hora solar y corresponde al desplazamiento angular de Este a Oeste con respecto al meridiano local debido a la rotación de la Tierra a 15° por hora. Se toma $h = 0^\circ$ para el mediodía, siendo negativo para la mañana y positivo para la tarde.
- L : es la latitud, ángulo entre la posición del observador y el ecuador, siendo positivo hacia el norte y negativo hacia el sur.
- δ : es la declinación que corresponde al ángulo de inclinación que posee la Tierra con respecto al sol según el día del año y puede ser calculado por la ecuación de Cooper [10].

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left((284 + n) \frac{360}{365}\right)$$

- n : día del año juliano.

² Corresponde a una línea imaginaria desde el centro de la Tierra hacia el espacio, por lo que es normal a la superficie.

2.1.3 Nubosidad

Dependiendo del lugar geográfico en el cual uno se encuentre, el efecto de la nubosidad sobre el colector solar puede ser distinto. En particular, para el norte de Chile no costero, la nubosidad es bastante baja, por no decir casi nula, debido a varios factores geográficos. Esto incide directamente en la radiación difusa que es prácticamente nula.

Los factores geográficos más importantes son [10]:

- El anticiclón del pacífico: es un sistema de alta presión sobre el océano que se produce cerca de los 30° (norte o sur) que desplaza los sistemas de bajas presiones hacia el sur o hacia el norte.
- La topografía del norte de Chile consiste en dos cordilleras que limitan el altiplano, por lo que la humedad costera no logra pasar la cordillera de la costa y los sistemas de bajas presiones en la cuenca de la Amazonía no logra pasar la cordillera oriental de los Andes.
- Finalmente las costas chilenas poseen aguas frías producto de la corriente de Humboldt lo que reduce la evaporación y crea una inversión térmica que impide la formación de nubes productoras de lluvia.

2.2 Transferencia de Calor por Radiación

El fenómeno de transmisión de calor por radiación es sin duda el mecanismo de transferencia de calor más importante en el proceso de conversión de la energía solar a energía térmica. Por lo que es necesario introducir algunos conceptos básicos de radiación.

En primer lugar se puede definir la emisión de energía (E) es función de la temperatura de un cuerpo negro mediante una expresión analítica sencilla, la ley de Stefan-Boltzmann, tal y como aparece en la ecuación (2.2)

$$E = \sigma \cdot T^4 \quad (2.2)$$

Donde: $\sigma =$ constante de Stefan Boltzmann = $5,6705 \cdot 10^{-8}$ [W/(m²°K⁴)]

Sin embargo para un cuerpo real la emisión de energía es menor que la de un cuerpo negro y se puede expresar según la ecuación (2.3) utilizando el término emisividad (ε) que varía entre 0 y 1.

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2.3)$$

Por otro lado la radiación G [W/m²] es el flujo de energía radiante total que incide sobre una superficie y corresponde al resultado de las emisiones y reflexiones de otras superficies. Comprende la radiación incidente desde todas las direcciones (directa y difusa).

La radiación incidente puede ser reflejada, absorbida o transmitida por el cuerpo, tal y como se muestra en la ecuación (2.4).

$$G = G_{abs} + G_{ref} + G_{tr} \quad (2.4)$$

Dividiendo la ecuación (2.4) por la radiación total G se obtienen las proporciones de cada una de las componentes. Así es posible definir la absorbancia (α), la reflectividad (ρ) y la transmisividad (τ) de un material cualquiera.

$$\alpha = \frac{G_{abs}}{G}, \quad \rho = \frac{G_{ref}}{G}, \quad \tau = \frac{G_{tr}}{G} \quad (2.5)$$

Luego se puede escribir que la suma de tales proporciones es igual a uno:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2.6)$$

Muchos de los materiales con los que se trabaja en ingeniería son opacos por lo que la componente de transmisividad se considera normalmente como nula ($\tau = 0$). Luego las componentes se reducen a la absorbancia y a la reflectividad. En el caso particular de un cuerpo negro la cantidad de radiación que es reflejada es igual a cero ($\rho = 0$) por lo que la radiación absorbida corresponde al total de la radiación incidente en el cuerpo.

Aplicando los antecedentes antes comentados se puede obtener la máxima temperatura a la cual puede llegar un cuerpo sometido a radiación solar de superficie exterior "A" que tiene pérdidas de energía únicamente por radiación por lo que la radiación absorbida y la radiación emitida son iguales.

$$A \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{max}^4 = A \cdot \alpha \cdot G \quad (2.7)$$

$$\Rightarrow T_{max} = \left(\frac{\alpha \cdot G}{\varepsilon \cdot \sigma} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2.8)$$

2.3 Tecnologías de Captura Solar

Las tecnologías solares que existen hoy en día, pueden clasificarse en dos estrategias de captura de energía, subdivididos, a su vez, en dos grupos. Las dos estrategias actuales son energía térmica y energía eléctrica, y se subdividen en sistemas activos y sistemas pasivos. La diferencia entre los sistemas activos y los pasivos es que los sistemas activos poseen un seguimiento del sol automático de manera que aprovechan la radiación directa del sol, mientras que los sistemas pasivos se mantienen estáticos con una leve inclinación que depende de la latitud del lugar en el cual se instale. Normalmente el sistema pasivo se diseña para aprovechar la radiación difusa y al no tener sistema de seguimiento el sistema pasivo puede considerarse más económico que el sistema activo.

2.3.1 Energía Eléctrica

Esta tecnología utiliza la energía del sol para producir energía eléctrica directamente, para lo cual se utilizan celdas fotovoltaicas (celdas de acá en adelante). Las celdas son semiconductores que producen

saltos de huecos y electrones utilizando el potencial originado por una longitud de onda específica de la energía proveniente del sol lo que genera un flujo de electricidad. Este tipo de tecnología puede utilizar tanto la radiación directa como la difusa por lo que se le encuentra normalmente en el subgrupo de sistemas pasivos. Sin embargo, para grandes instalaciones (industriales), el sistema puede ser también activo si es que se busca aumentar la eficiencia de las celdas. Si bien, la eficiencia de las celdas ha aumentado bastante en los últimos años, sus costos todavía son bastante elevados.

2.3.2 Energía Térmica

Las tecnologías térmicas utilizan la radiación del sol para calentar un fluido. El principio es captar la mayor cantidad de radiación posible, transformarla a radiación de onda larga (calor) y luego transferirla al fluido. Las aplicaciones más comunes que puede tener el fluido son calentar agua para uso doméstico y calentar algún fluido para uso industrial como por ejemplo generar vapor para mover una turbina y obtener energía eléctrica.

Aplicando la ecuación (2.8) es posible calcular la temperatura que es capaz de alcanzar un cuerpo bajo radiación solar. Dicha temperatura depende de la absorbancia y emisividad de la superficie. Por ejemplo, si se considera un cuerpo gris ($\alpha = \varepsilon$) y que la radiación es 600 [W/m²] aproximadamente, entonces la temperatura máxima que alcanzaría ese cuerpo gris sería:

$$T_{max} = \left(\frac{\alpha \cdot G}{\varepsilon \cdot \sigma} \right)^{\frac{1}{4}} = \left(\frac{G}{\sigma} \right)^{\frac{1}{4}} = \left(\frac{600}{5,6705 \cdot 10^{-8}} \right)^{\frac{1}{4}} = 320,72^{\circ}K = 47,72^{\circ}C$$

Esto no considera pérdidas o ganancias por convección o conducción, por lo que esta temperatura normalmente no se alcanza para un cuerpo gris. Sin embargo si el cuerpo tiene una absorbancia alta para el espectro del sol y una emisividad baja para radiación de onda larga, entonces el cuerpo puede alcanzar temperaturas mucho más altas. Luego las tecnologías térmicas utilizan este tipo de materiales en su construcción y se buscan constantemente adelantos técnicos y económicos en dichos materiales.

Otra manera de aumentar la temperatura de los cuerpos es concentrando la radiación de un área mayor a través de reflectores. Entonces la ecuación (2.7) puede escribirse de la siguiente manera:

$$A_{rec} \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{max}^4 = A_{conc} \cdot \rho_{conc} \cdot \alpha \cdot G \quad (2.9)$$

$$\Rightarrow T_{max} = \left(\frac{A_{conc} \cdot \rho_{conc} \cdot \alpha \cdot G}{A_{rec} \cdot \varepsilon \cdot \sigma} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2.10)$$

A_c = Área del concentrador.

ρ_{conc} = Reflectividad del concentrador.

A_{rec} = Área del receptor.

La razón entre las áreas del concentrador y del receptor se llama comúnmente razón de concentración y determina la temperatura máxima a la cual puede llegar el receptor.

$$C = \frac{A_{conc}}{A_{rec}} \quad (2.11)$$

C = Razón de concentración.

La razón de concentración podría aumentar infinitamente si no se consideraran restricciones de construcción. Sin embargo la temperatura máxima que se alcanza no puede superar un límite teórico termodinámico que restringe la eficiencia de la razón de concentración (la temperatura no puede superar a la temperatura del sol por ejemplo).

El límite puede calcularse realizando un balance energético entre el cuerpo que concentra y el sol. Entonces sea Q_s la energía que irradia el sol.

$$Q_s = 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2.12)$$

r = Radio del sol.

T = Temperatura del sol.

La energía que captura el cuerpo de superficie concentradora A_{conc} se determina por

$$F = \frac{A_{conc}}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \quad (2.13)$$

$$\Rightarrow Q_{S \rightarrow A} = A_{conc} \cdot \frac{r^2}{R^2} \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2.14)$$

R = Distancia del sol a la Tierra.

Por otro lado la energía que irradia el cuerpo hacia el sol es

$$Q_{A \rightarrow S} = e \cdot A_{rec} \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2.15)$$

e = Fracción de la energía emitida por el cuerpo que llega al sol ≤ 1 .

Entonces por la segunda ley de la termodinámica se tiene que no puede haber intercambio de calor entre dos cuerpos a la misma temperatura por lo que $Q_{A \rightarrow S} = Q_{S \rightarrow A}$, entonces

$$A_{conc} \cdot \frac{r^2}{R^2} \cdot \sigma \cdot T^4 = e \cdot A_{rec} \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2.16)$$

$$\frac{A_{conc}}{A_{rec}} = e \cdot \frac{R^2}{r^2} \quad (2.17)$$

Y finalmente, como $e \leq 1$, entonces:

$$C \leq \frac{1}{\sin^2(\theta)} = \left(\frac{R}{r}\right)^2 \quad (2.18)$$

$2 \cdot \theta$ = Ángulo con el cual la radiación del sol llega a la Tierra.

Los datos anteriores pueden apreciarse en la Figura 2.3 ($r = 6,95 \cdot 10^5$ [km], $R = 1,496 \cdot 10^8$ [km]) con lo cual se obtiene una razón de concentración límite de 46.200 aproximadamente. Dicha razón de concentración es bastante alta considerando que normalmente los concentradores no llegan a valores superiores de $C = 5.000$.

Si se considera un cuerpo gris ($\alpha = \varepsilon$), una razón de concentración de 50, una reflectividad de 90% y que la radiación es de 600 [W/m^2] aproximadamente, entonces la temperatura máxima que alcanzaría ese cuerpo gris sería:

$$T_{max} = \left(\frac{C \cdot \rho_{conc} \cdot \alpha \cdot G}{\varepsilon \cdot \sigma} \right)^{\frac{1}{4}} = \left(\frac{C \cdot \rho_{conc} \cdot G}{\sigma} \right)^{\frac{1}{4}} = \left(\frac{50 \cdot 0,9 \cdot 600}{5,6705 \cdot 10^{-8}} \right)^{\frac{1}{4}} = 830,7^\circ\text{K} = 557,5^\circ\text{C}$$

La diferencia entre los distintos tipos de tecnologías térmicas es la temperatura a la cual se quiere llegar según el diseño. Para procesos de baja temperatura se utilizan concentraciones bajas o nulas que normalmente corresponden a sistemas pasivos ya que no es necesario realizar un seguimiento del sol para concentrar. Algunos ejemplos de dicha tecnología corresponden a Placas Planas y Placa Parabólica Compuesta.

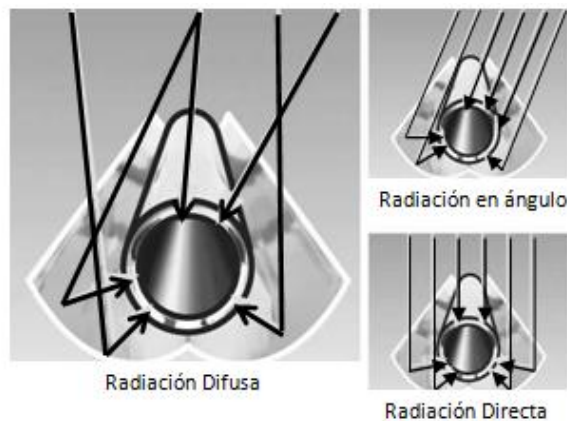


Figura 2.7: Colector Pasivo: Parabólico Compuesto

A medida que se requiere una mayor temperatura, se aumenta la concentración lo cual se logra mediante sistemas activos ya que es requisito concentrar la energía directa del sol. Entre los sistemas activos se reconocen los seguimientos en un eje y los seguimientos en dos ejes. Un ejemplo para seguimiento en un eje son los concentradores cilindro parabólicos y un ejemplo para seguimiento en dos ejes son los concentradores de disco parabólico.

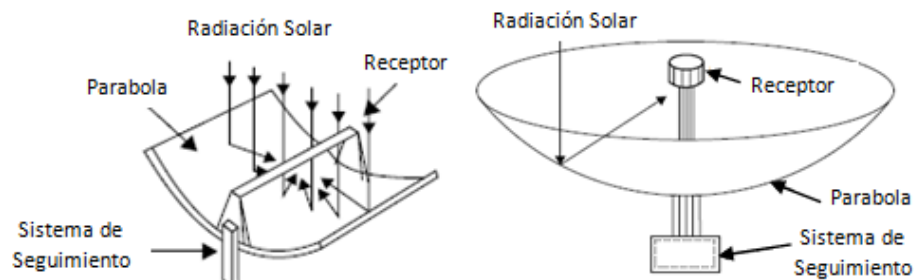


Figura 2.8: Colector Activo: Cilindro parabólico (izq.), Disco Parabólico (der.)

En la Tabla 2.1 es posible apreciar razones de concentración y rangos de temperaturas para distintas tecnologías térmicas.

Tabla 2.1: Comparación de las tecnologías térmicas [23],[16]

Seguimiento	Tipo de Colector	Razón de Concentración	Rango de Temperaturas [°C]
Pasivo	Placa Plana	1	30-80
"	Parabólico Compuesto	1-5	60-240
En un eje	Reflectores de Fresnel	10-40	60-250
"	Cilíndrico Parabólico	15-45	60-300
En dos ejes	Disco Parabólico	100-1000	1000-5000
"	Torre Central	100-1500	150-2000

2.4 Desalinización

La desalinización corresponde a un proceso de remoción de sales de aguas salobres para obtener agua apta para uso humano. Actualmente existen varias técnicas para la desalinización del agua y cada una de ellas depende, en gran medida, de la concentración de sales que contenga el agua que se quiere tratar. Normalmente se consideran cuatro niveles de concentraciones:

Tabla 2.2: Rango de Concentración de sales en el Agua [3]

Agua	Concentración [mg/l]
Dulce	Menos de 1.000
Salobre	1.000 a 3.000
Moderadamente Salada	3.000 a 10.000
Muy Salada	Sobre 10.000

Comúnmente el agua poco salada contiene una concentración de sales superior a los 1.000 [mg/l] (caso de agua salobre) pudiendo llegar, normalmente, a alrededor de 40.000 [mg/l] para el caso de agua muy salada (el mar muerto es un caso especial y posee una concentración de alrededor de 280.000 [mg/l]). Las aguas salobres caen en el rango de poco a moderadamente salada ya que contienen entre 1.000 y 10.000 [mg/l]. Por otro lado, el agua de mar posee, normalmente, una concentración dentro de un rango entre 32.000 y 37.000 [mg/l] lo que equivale a agua muy salada.

El agua apta para el consumo humano es de alrededor de 500 [mg/l] [17] por lo que el proceso de remoción de sales va a depender en gran medida de la concentración del agua a tratar. Por lo general, las aguas salobres en el continente tienen una concentración de sales más baja que el agua proveniente de alta mar.

El proceso típico de desalinización comprende cinco etapas claves:

- **Captura de agua:** este sistema dependerá principalmente de la fuente de agua a utilizar (agua de mar o agua salobre de continente). Comúnmente se utilizan bombas para enviar el agua desde su fuente a la planta de desalinización.

- **Pre-tratamiento:** proceso necesario para remover sólidos y controlar microorganismos antes del proceso de desalinización. También se requiere para controlar la corrosión y deposición de sales, entre otros.
- **Desalinización:** sistema principal del proceso dedicado a la remoción de sólidos disueltos, sales y otros compuestos inorgánicos.
- **Post-tratamiento:** Dependiendo del uso que se le quiera dar al agua obtenida, se le deben agregar aditivos para cumplir con las normas establecidas.
- **Distribución y Manejo de Desechos:** Una vez terminado el proceso de desalinización se debe almacenar y distribuir el agua. Además se debe manejar el desecho del proceso (agua con una alta concentración de sales) enviándolo nuevamente a la fuente de agua o a un proceso de neutralización. El porcentaje de desecho con respecto al flujo de entrada se determina según el diseño y normalmente fluctúa entre 30 y 60% del flujo de entrada.

Dependiendo de las características del lugar geográfico en el cual se quiera construir la planta de desalinización, se necesitarán distintas técnicas o procesos en cada una de las etapas antes mencionadas.

Con respecto al proceso de desalinización propiamente tal, existen dos métodos que se destacan: por cambio de fase (destilación) o por filtración (membrana). Como se puede apreciar en la Figura 2.9, las distintas técnicas de purificación no son todas efectivas para la desalinización del agua. Las únicas tecnologías (observables en la figura) capaces de remover las sales son la osmosis inversa en conjunto con la nano-filtración y las tecnologías de destilación. La primera técnica utiliza membranas filtrantes, mientras que la destilación utiliza energía térmica para el cambio de fase del agua.

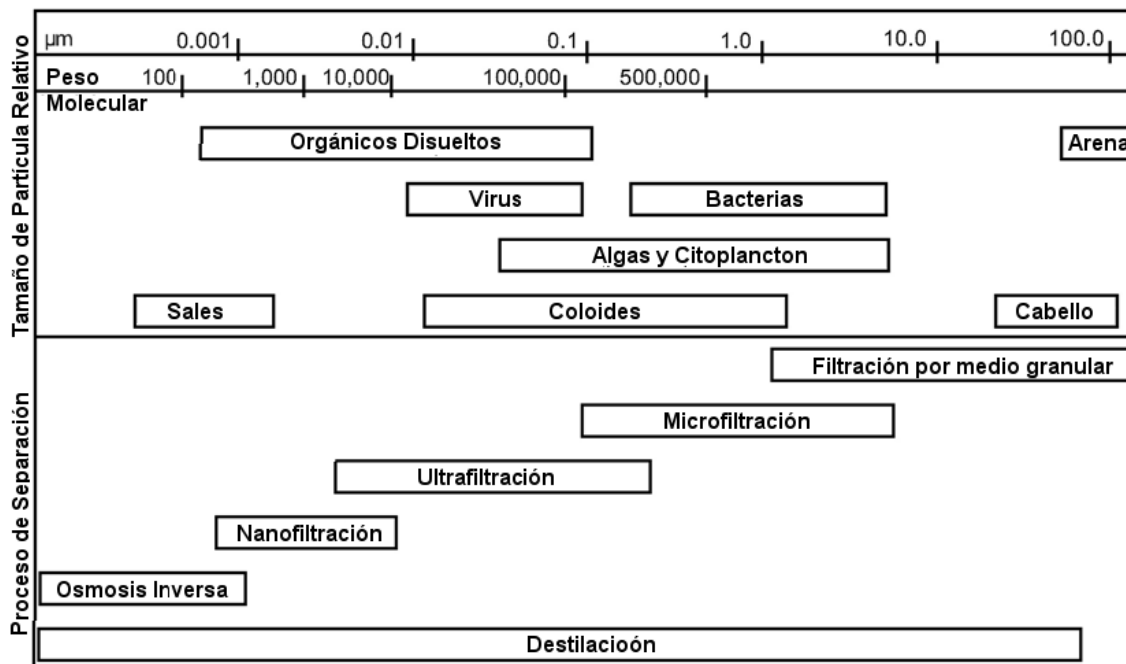


Figura 2.9: Rangos de Tamaños de partícula removidos según Técnica de Purificación [9]

La demanda de agua dulce ha aumentado provocando un aumento considerable del uso de las tecnologías de desalinización. Como se puede observar en la Figura 2.10, la tecnología más utilizada en años anteriores era la térmica, pero actualmente existen cantidades casi iguales de ambas tecnologías de planta, siendo un 46% térmica y un 56% por membrana (1% de otras tecnologías).

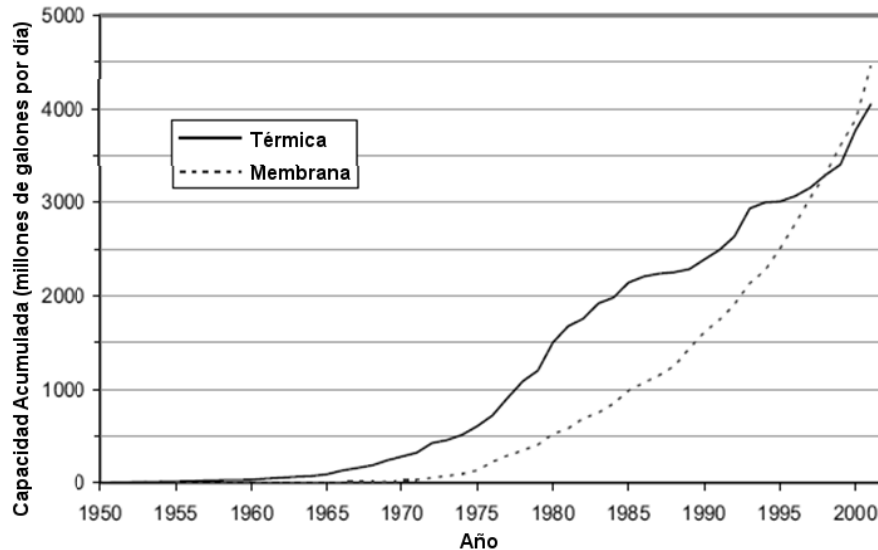


Figura 2.10: Crecimiento de plantas de desalinización en el mundo según tecnología [9]

Como ya se mencionó con anterioridad, existen dos métodos clásicos de desalinización, por medio de membranas y por medio de energía térmica. A continuación se presenta el estado del arte de las tecnologías más utilizadas para ambos métodos.

2.4.1 Por medio de Membranas

Estas técnicas utilizan una membrana para filtrar las sales del agua a través de poros con un tamaño específico según la técnica utilizada. Las membranas pueden ser diseñadas de manera que tengan propiedades selectivas al momento de permitir o restringir cierto tipo de ión incluyendo las sales. La diferencia entre las distintas técnicas de filtración por membranas recae en el tamaño de partícula que pueden filtrar y también en la energía necesaria para que opere.

Osmosis Inversa (RO):

La técnica más utilizada actualmente es la Osmosis Inversa (Reverse Osmosis: RO). Esta tecnología consiste en utilizar el fenómeno de la osmosis en forma invertida al ejercer presión sobre el sistema. La osmosis se produce al existir un gradiente de concentraciones salinas entre dos soluciones separadas por una membrana semipermeable. El agua de la solución menos concentrada pasa a través de la membrana para equilibrar las concentraciones en ambas soluciones. La presión que se produce depende del gradiente de concentraciones del sistema. En este caso el procedimiento utilizado puede observarse en la Figura 2.11 en donde la presión ejercida hacia el sistema supera la presión osmótica del agua salada

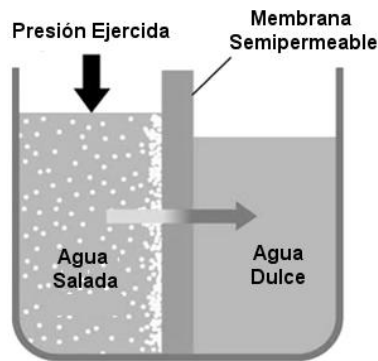


Figura 2.11: Esquema de Funcionamiento de Osmosis Inversa

En esta tecnología el tratamiento previo debe ser muy riguroso ya que las membranas son muy sensibles (por lo tanto costosas) por lo que cualquier partícula de gran tamaño debe ser removida para evitar un deterioro pronunciado de las membranas. Generalmente se utilizan otras tecnologías de filtración por membrana (Nanofiltración, ultrafiltración) antes de llegar a la RO.

La etapa de filtración necesita que la presión sea más alta que la presión osmótica para que se produzca la desalinización para lo cual se utilizan bombas de gran potencia que aumenten la presión del agua salada. Generalmente para no desperdiciar energía se añade un sistema de recuperación energética con una turbina posterior al modulo de filtración. De esta manera se aumenta la eficiencia del sistema.

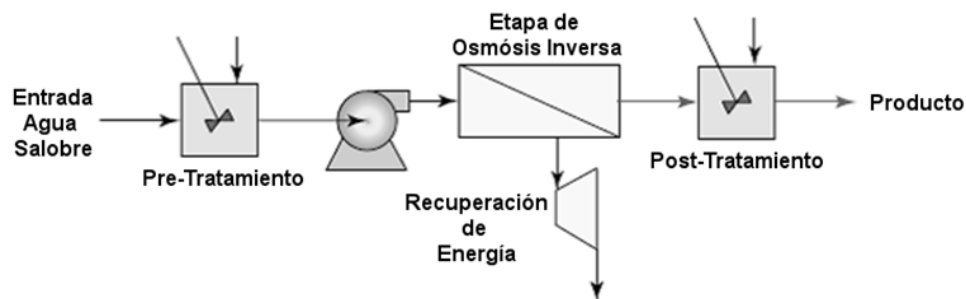


Figura 2.12: Esquema de Proceso de desalinización por medio de RO [11]

Electro Diálisis (ED):

Esta tecnología consiste en inducir una diferencia de potencial sobre el agua con lo que los iones disueltos se dirigen a través de una membrana en cada polo (electrodo) [8]. Normalmente se aplica una modificación de la técnica alternando el potencial con lo cual se disminuyen los problemas de corrosión sobre los electrodos. Esta modificación corresponde a la tecnología electro diálisis inversa (EDR).

Otras Tecnologías:

Finalmente es necesario comentar que en el mundo se está trabajando constantemente en mejorar los métodos conocidos o inventar nuevos métodos. En este ámbito se debe mencionar que, con respecto a las tecnologías por membrana, se está trabajando en la osmosis directa (Forward Osmosis (FO) o Direct

Osmosis) la cual promete reducir los costos del agua purificada. Básicamente, la operación puede ser observada en la Figura 2.13.

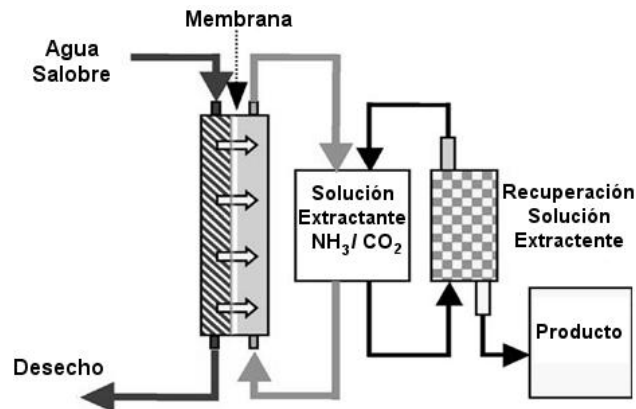


Figura 2.13: Funcionamiento de Osmosis directa [6]

Esta tecnología consiste en sustraer el agua pura desde la mezcla de agua con sal utilizando una solución con una concentración mayor (draw solution) a la del agua salada lo que aprovecha la presión osmótica. De esta manera no es necesario utilizar una gran cantidad de energía para vencer la presión osmótica (como en el caso de la RO). La solución debe de estar compuesta por alguna sal o sustrato que sea fácilmente extraíble mediante energía térmica para una separación por fases. Esta tecnología se encuentra aún en desarrollo y su operación todavía no está del todo definida por lo que aún no se comercializa. Sin embargo ya existen prototipos de desalinización que utilizan la tecnología por lo que es de esperarse que en un futuro cercano se comercialice.

2.4.2 Por medios Térmicos

La otra forma de desalinización corresponde a los procesos de destilación, los cuales se utilizan preferiblemente cuando la concentración de sales en el agua es superior a 10.000 [mg/l]. Estos procesos utilizan energía térmica para forzar un cambio de fase del agua líquida a fase vapor por lo que las sales disueltas quedan en la fase líquida. El agua en fase vapor se condensa con intercambiadores de calor con lo que se obtiene el agua dulce como producto. Como se aprecia en la Figura 2.9 este tipo de tecnología no necesita un tratamiento previo riguroso ya que la misma etapa de desalinización remueve las partículas grandes que quedan en el desecho.

Los métodos de destilación industriales más conocidos son: evaporación flash en etapas (multistage flash: MSF) y la destilación por etapas (multi effect distillation: MED). La más utilizada es la MSF aunque actualmente se está trabajando mucho con la MED [8],[9].

Multi effect Distillation (MED):

El equipo calienta un fluido térmico en una cámara con una presión baja lo que resulta en producción de vapor. Este vapor se utiliza para calentar la próxima cámara de destilación, en la cual ocurre el mismo

proceso que en la etapa anterior, con el resultado de una destilación por etapas que reutiliza el calor que se requiere para la evaporación de las distintas etapas.

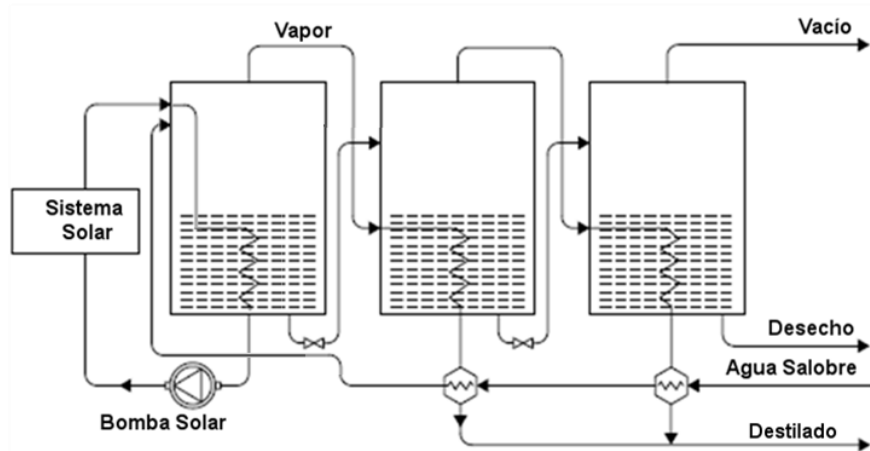


Figura 2.14: Funcionamiento de MED

Multi stage Flash (MSF):

En el año 1990 esta tecnología representaba un 80% de la producción mediante energía térmica [22]. La operación de la MSF es similar a la operación de la MED, pero a diferencia del proceso anterior, las cámaras son evaporadores Flash, los cuales funcionan a presiones más bajas y a temperaturas más altas.

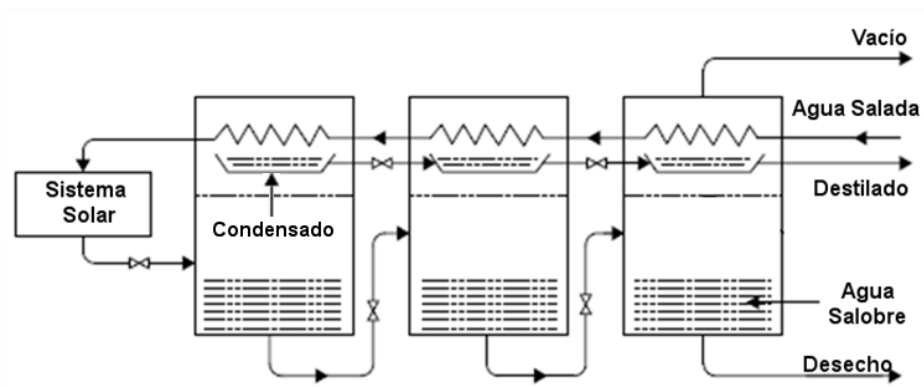


Figura 2.15: Funcionamiento de MSF

Otras Tecnologías:

Las tecnologías vistas hasta ahora se utilizan en gran escala (producciones mayores a 1.000 m³ al día). Sin embargo, para producciones menores, pueden utilizarse tecnologías de menor complejidad como lo es utilizar destiladores solares que utilizan el principio de efecto invernadero para obtener pequeñas cantidades de agua dulce⁽³⁾.

³ Más información a través de la Memoria de Daniela Peñailillo [20]

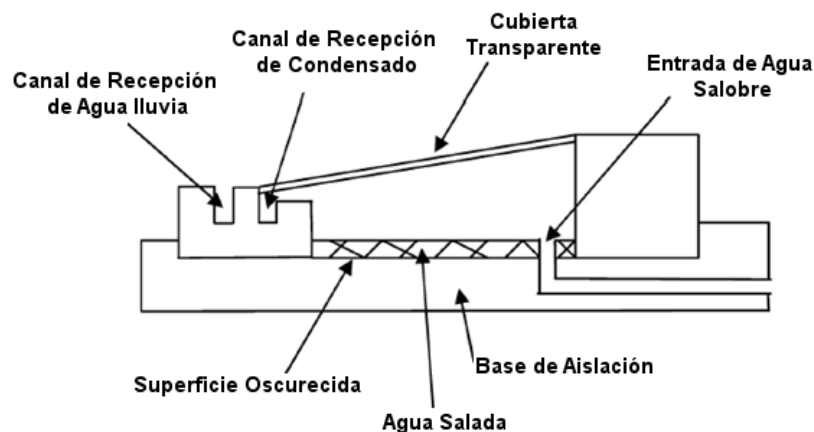


Figura 2.16: Destilador Solar

2.4.3 Comparación entre las Tecnologías Industriales

Desde un punto de vista operacional las características para los procesos más comunes de las tecnologías por membranas y térmicas pueden observarse en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3: Comparación de tecnologías de desalinización predominantes en el mundo [8],[22]

	RO	MSF	MED
Temperatura de Operación [°C]	< 45	< 120	< 70
Pre-tratamiento necesario	alto	bajo	bajo
Energía Principal	mecánica (eléctrica)	Vapor (calor)	Vapor (calor)
Consumo de Calor [kWh/m³]	-	70 – 100	40 – 100
Consumo de Electricidad [kWh/m³]	3,5 - 7	3 - 6	1,0 - 2,5
Calidad de agua producida	200 - 500	< 10	< 10
Recuperación de Agua	35 - 50 %	35 - 45 %	35 - 45 %
Confianza del Proceso	moderada	muy alta	muy alta

2.4.4 Requerimientos Energéticos

El proceso de desalinización por medio de la RO requiere de una gran cantidad de energía ya que la mezcla de agua con sal se encuentra en un estado menor de energía por lo que es más estable. La energía mínima para desalinizar [8] se puede calcular en base a la presión osmótica de la solución. De tal manera que se cumple la definición de trabajo según la termodinámica:

$$dW = \pi_{os} dV$$

π_{os} = Presión Osmótica.

W = Trabajo.

V = Volumen.

Resolviendo la ecuación anterior se obtiene que el consumo mínimo de energía teórico es $W_0 = 0,7 \text{ [kWh/m}^3\text{]}$ a una temperatura de 25°C . El consumo calculado corresponde a una recuperación de 0% de agua dulce de producto a partir de agua de mar (sobre 10.000 [mg/l]). El consumo de energía puede escribirse en base al porcentaje de agua dulce recuperada y la energía mínima:

$$W = \frac{W_0}{r} \ln\left(\frac{1}{1-r}\right)$$

r = Porcentaje de agua dulce recuperado.

Graficando la ecuación anterior se obtiene una curva de energía mínima de desalinización en función de la recuperación que se desea.

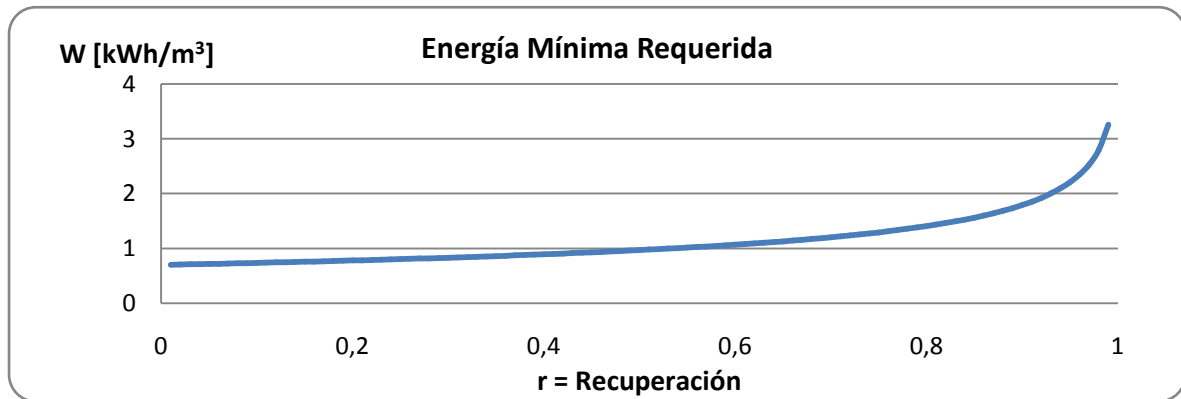


Figura 2.17: Energía Mínima de Desalinización por RO a 25°C [8]

En teoría la energía que utiliza la desalinización es alta, por lo tanto la energía que requerirá un sistema real será aún mayor. A modo de ejemplo se observa de la que para una recuperación de 40% la energía requerida sería de poco menos de $1 \text{ [kWh/m}^3\text{]}$ que es mucho menor al mínimo de energía requerida en la realidad que es de unos $2,5 \text{ [kWh/m}^3\text{]}$ (ver Tabla 2.3).

De la Tabla 2.3 puede observarse que la energía utilizada por RO es eléctrica mientras que para las otras tecnologías la energía principal es la energía térmica y la energía eléctrica se utiliza para operar los equipos auxiliares, como las bombas. Las diferencias entre los requerimientos energéticos se deben a diferencias operacionales debido a tamaños de planta distintos.

Las diferencias entre las tecnologías térmicas permiten concluir que la tecnología MED es mejor que la tecnología MSF, en particular, por el hecho de requerir una menor cantidad de energía, tanto térmica como eléctrica. Para el análisis de desalinización se empleará la tecnología MED por tener requerimientos energéticos mayormente térmicos. Sin embargo se podría realizar la evaluación de una planta de RO utilizando un generador de electricidad acoplado al sistema de captura solar.

La tecnología de captura solar será con un sistema de seguimiento en dos ejes y se diseñará de manera de que posea una baja resistencia al viento para cumplir con las condiciones ventosas del norte de Chile en donde se planea realizar la evaluación.

Capítulo III

Desarrollo Teórico y Experimental

Se consideró la construcción de un equipo prototipo de concentración solar de inspiración Fresnel el cual se puede clasificar como un sistema activo de seguimiento solar en dos ejes. El objetivo de la construcción del prototipo es realizar experiencias para estimar la eficiencia térmica que posee un equipo de laboratorio en relación a la eficiencia teórica para poder realizar un escalamiento de un equipo industrial.

En este caso el prototipo consiste en segmentos cónicos (que en adelante se les llamarán frustums) que reflejan la radiación solar directa a un receptor central. Este diseño tiene la particularidad de tener una baja resistencia al viento y de ser de fácil construcción. El manejo matemático utilizado para el diseño es propiedad de XPERT S.A. a través de su patente. En la Figura 3.1 es posible observar el diseño utilizado para el prototipo para un solo frustum.

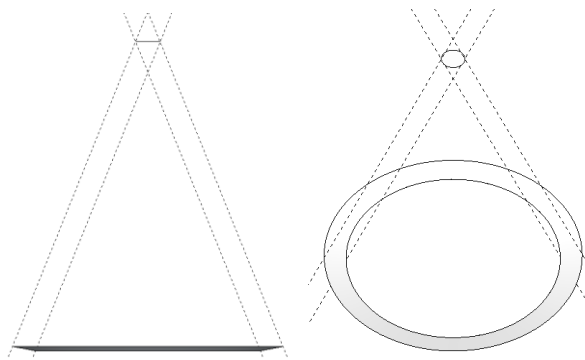


Figura 3.1: Foco óptico de un frustum

Se puede apreciar que el frustum refleja la radiación directa produciendo un área circular como foco. Se puede obtener el mismo foco para muchos frustums realizando los cálculos trigonométricos para cada caso con lo que se obtiene un sistema como el de la Figura 3.2

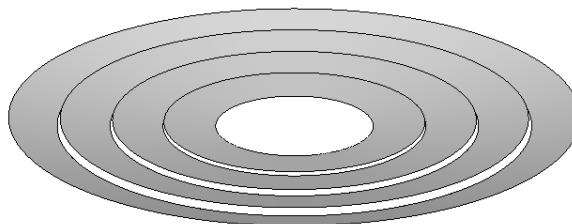


Figura 3.2: Sistema de frustums con un mismo foco óptico

Este diseño tiene características bastante simples en su construcción ya que solo se necesitan circunferencias no completas de metal reflectante para construir las secciones cónicas. A cada anillo se le retira un ángulo establecido por el cálculo de diseño de tal manera que, al juntar los extremos de cada anillo incompleto, se forma la sección cónica requerida.

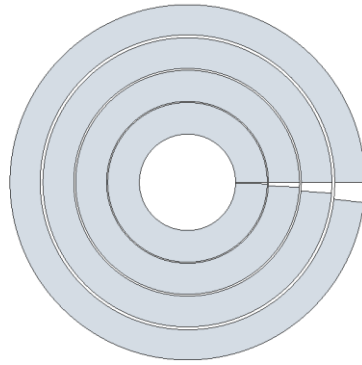


Figura 3.3: Construcción de frustums

Las dimensiones del concentrador dependen de dos variables: la altura del foco (desde los frustums) y el diámetro que se quiere para la recepción de la radiación incidente. En la Figura 3.4 se pueden observar las variables trigonométricas del sistema.

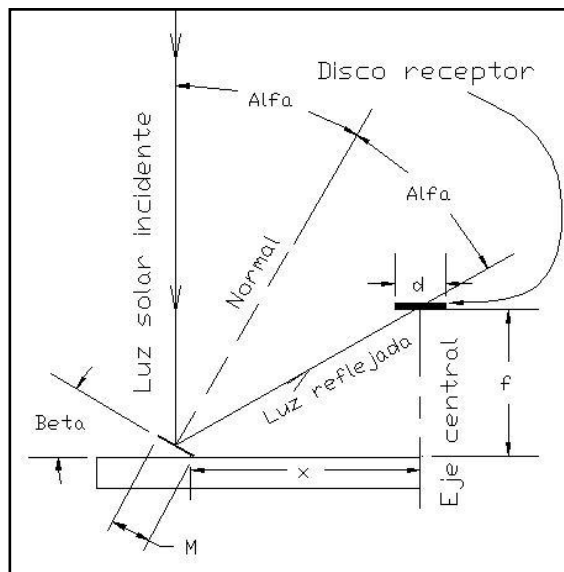


Figura 3.4: Dependencia con respecto al diámetro (d) del receptor y altura del foco (f)

3.1 Transferencia de Calor

Para el prototipo se considerará una entrada de agua a un receptor de radiación solar reflejada que funcionará como intercambiador de calor. En la Figura 3.5 se aprecia el diseño que se plantea utilizar como receptor que consiste en un bloque de material altamente conductivo atravesado por un banco de canales por donde circulará el fluido térmico. En cada uno de los extremos del receptor se instalarán canoas para facilitar la entrada y salida del fluido térmico.

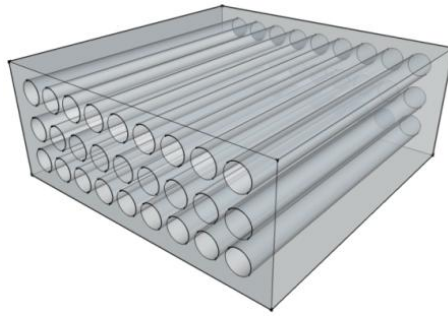


Figura 3.5: Esquema Receptor de radiación

Para realizar el balance energético en el sistema se utilizará el volumen de control que se muestra en la Figura 3.6. Como supuesto se considera que las pérdidas por convección y conducción del receptor hacia el ambiente son nulas a excepción de la sección por la cual se recibe la radiación proveniente del concentrador.

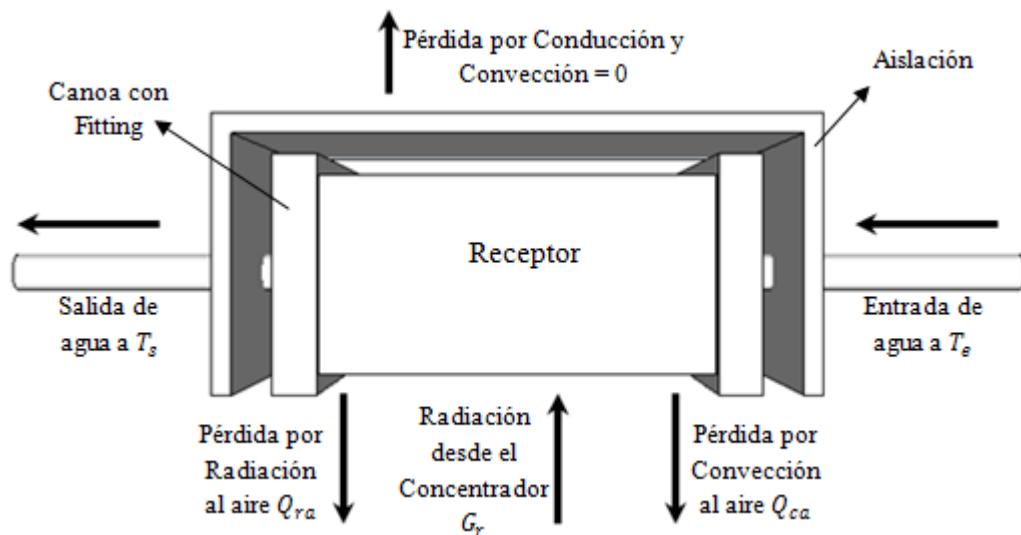


Figura 3.6: Consideraciones para el volumen de control

Además se considerará que el receptor posee una resistencia nula a la transferencia de calor por lo que las paredes interiores de los canales y la pared externa que recibe la radiación se encontrarán a una misma temperatura.

3.1.1 Balances Energéticos

Es posible escribir dos balances energéticos, uno para el sistema completo y otro para el calor recibido por el agua.

$$\alpha \cdot G_r = Q_{ra} + Q_{ca} + Q_{cw} \quad (3.1)$$

$$Q_w = Q_{cw} \quad (3.2)$$

Q_w = Calor recibido por el agua.
 Q_{ra} = Radiación desde el receptor hacia el medio ambiente.
 Q_{cw} = Calor por Convección desde el receptor hacia el agua.
 Q_{ca} = Calor por Convección desde el receptor hacia el medio ambiente.
 G_r = Radiación reflejada por el concentrador.
 α = Absorbancia del receptor = 0,95 [15].

A continuación se presentan las ecuaciones que se necesitan para poder calcular las temperaturas de pared del receptor y de salida del agua, junto con la nomenclatura necesaria.

Calor recibido por el Agua:

$$Q_w = \dot{m} \cdot C p_m \cdot (T_s - T_e) \quad (3.3)$$

\dot{m} = Flujo másico de Agua
 $C p_m$ = Calor específico del agua a temperatura $T_m = (T_e + T_s)/2$
 T_s = Temperatura del agua a la salida
 T_e = Temperatura del agua a la entrada

Pérdida por Radiación al Aire:

$$Q_{ra} = \varepsilon_{Cu} \cdot \sigma \cdot A_p \cdot (T_p^4 - T_0^4) \quad (3.4)$$

σ = Constante de Stefan- Boltzmann.
 ε_{Cu} = Emisividad del cobre = 0,89.
 A_p = Área exterior del receptor por la cual se recibe la radiación = 0,0143[m²].
 T_p = Temperatura de pared del receptor (por dentro y por fuera).
 T_0 = Temperatura del “espacio” = $T_a - 10^\circ K$ [16].
 T_a = Temperatura del aire medida a la sombra.

Calor por Convección recibido por el Agua:

$$Q_{cw} = h_w \cdot A_i \cdot \left(\frac{(T_p - T_e) - (T_p - T_s)}{\ln \left(\frac{T_p - T_e}{T_p - T_s} \right)} \right) \quad (3.5)$$

h_w = Coeficiente de convectividad del agua al interior de los orificios del receptor
 A_i = Área interior de orificios del receptor

$$h_w = \frac{Nu_w \cdot k_m}{D_t} \quad (3.6)$$

El cálculo del número de Nusselt para el agua Nu_w depende del régimen en el cual se encuentre el fluido. Las ecuaciones (3.7), (3.8) y (3.9) muestran las distintas formas para calcular los Nu_w según el régimen [14].

$$Re_w < 2.100 \quad Nu_w = 1,86(Re_w)^{1/3}(Pr_w)^{1/3} \left(\frac{D_t}{L_t}\right)^{1/3} \left(\frac{\mu_m}{\mu_p}\right)^{0,14} \quad (3.7)$$

$$2.100 < Re_w < 10^4 \quad Nu_w = 0,027(Re_w)^{0,8}(Pr_w)^{1/3} \left(\frac{\mu_m}{\mu_p}\right)^{0,14} \quad (3.8)$$

$$10^4 < Re_w \quad Nu_w = \frac{(f/8) \cdot Re_w \cdot Pr_w}{1,07 + 12,7(f/8)^{0,5}(Pr_w)^{0,66} - 1} \left(\frac{\mu_m}{\mu_p}\right)^{0,14} \quad (3.9)$$

$$f = (1,82 \log_{10}(Re_w) - 1,64)^{-2}$$

$$Re_w = \frac{v_w \cdot \rho_m \cdot D_t}{\mu_m}$$

$$v_w = \frac{\dot{V}}{A_c} = \frac{\dot{m}/\rho_m}{A_c}$$

$$Pr_w = \frac{\mu_m \cdot Cp_m}{k_m}$$

k_w = Conductividad del agua a T_m .

D_t = Diámetro de los orificios = 0,006[m].

Re_w = Número de Reynolds para el agua en el sistema.

Pr_w = Número de Prandt para el agua en el sistema.

μ_m = Viscosidad del agua a T_m .

μ_p = Viscosidad del agua a T_p .

v_w = Velocidad del agua.

ρ_m = Densidad del agua a T_m .

A_t = Área transversal de entrada de agua.

Pérdida por Convección al Aire:

$$Q_{ca} = h_a \cdot A_p \cdot (T_p - T_a) \quad (3.10)$$

h_a = Coeficiente de convektividad del aire.

$$h_w = \frac{Nu_a \cdot k_a}{L_p} \quad (3.11)$$

El cálculo del número de Nusselt para el aire Nu_a depende del régimen en el cual se encuentre el fluido. En este caso se utiliza la relación para régimen laminar [14].

$$Nu_a = 0,332(Re_a)^{1/2}(Pr_a)^{1/3}$$

$$Re_a = \frac{v_a \cdot \rho_a \cdot L_p}{\mu_a}$$

$$Pr_a = \frac{\mu_a \cdot Cp_a}{k_a}$$

Nu_a = Número de Nusselt para el aire en el sistema.

k_a = Conductividad del aire a T_a .

Cp_a = Calor específico del aire a T_a .

L_p = Largo del receptor= 0,11[m].

Re_a = Número de Reynolds para el aire en el sistema.

Pr_a = Número de Prandtl para el aire en el sistema.

μ_a = Viscosidad del del aire a T_a .

v_a = Velocidad del aire.

ρ_a = Densidad del aire a T_a .

Radiación Recibida por el Receptor

$$G_r = G \cdot A_c \cdot \rho \quad (3.12)$$

G = Radiación recibida por el concentrador.

A_c = Área del Concentrador.

ρ = Reflectividad del Concentrador = 0,83 [15].

3.1.2 Balance global

Utilizando las ecuaciones (3.2), (3.3), (3.4), (3.10) y (3.12) en (3.1) se obtiene:

$$\alpha \cdot G \cdot A_c \cdot \rho = \varepsilon_{Cu} \cdot \sigma \cdot A_p (T_p^4 - T_0^4) + h_a \cdot A_p (T_p - T_a) + \dot{m} \cdot Cp_m (T_s - T_e) \quad (3.13)$$

3.1.3 Balance en el Agua

De manera similar, utilizando las ecuaciones (3.3), (3.4) y (3.5) en (3.2) se obtiene:

$$\dot{m} \cdot Cp_m \cdot (T_s - T_e) = h_w \cdot A_t \cdot \left(\frac{(T_p - T_e) - (T_p - T_s)}{\ln \left(\frac{T_p - T_e}{T_p - T_s} \right)} \right) \quad (3.14)$$

Luego se tiene un sistema de dos ecuaciones con lo cual es posible encontrar dos incógnitas que dependerán de las condiciones en las que uno se encuentre. Para este trabajo se consideran como incógnita

la Temperatura de salida T_s y la temperatura de pared T_p , de manera de poder determinar la diferencia de temperatura entre la entrada y salida del agua para calcular el calor recibido por el agua.

3.2 Construcción del Prototipo

Para el prototipo a construir se consideró el uso de una plancha de 1[m] x 1[m], ya que normalmente las planchas de metal se venden en el comercio en rollos de 1[m] de ancho. Las variables de diseño, altura focal y diámetro focal, fueron 1[m] y 0,08[m] respectivamente. Para dichos valores las dimensiones de los anillos necesarios resultaron ser las que se muestran en la Figura 3.7. Los ángulos que se sustrajeron fueron (desde el centro hacia el exterior): $1,14^\circ$, $2,51^\circ$, $4,35^\circ$ y $6,57^\circ$.

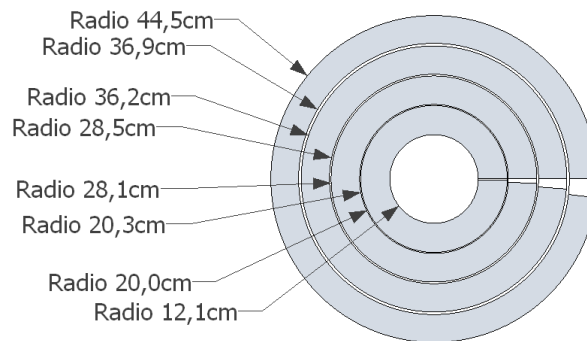


Figura 3.7: Diseño de cortes para Prototipo

3.2.1 Frustums

Se considero una plancha de acero inoxidable AISI 430 que posee una gran reflectividad (en torno al 83% [15]) y fue adquirida en Maquimetal S.A. Las dimensiones fueron de 1 x 1 x 0,0006 [m]. El corte se realizó utilizando tecnología láser en Metalmecánica Sinsay. Los anillos construidos se unieron en los extremos (Figura 3.8) con cinta adhesiva por la parte posterior dejando libre la parte anterior para no reducir la reflectividad del acero.

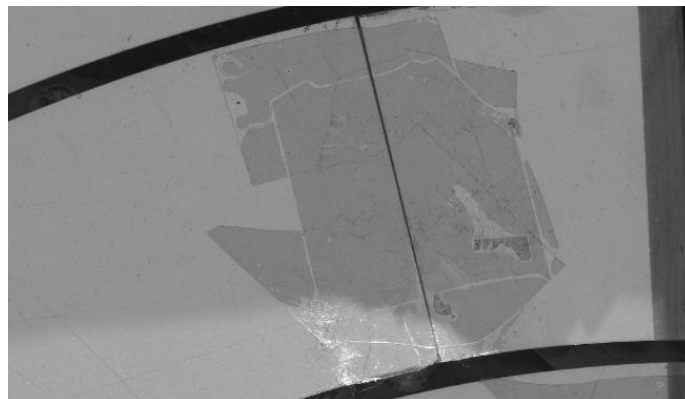


Figura 3.8: Unión de extremos de los Frustums

Para la estructura del sistema de seguimiento se considero el uso de madera (adquirida en Homecenter Sodimac) por su bajo precio, facilidad de trabajo y bajo peso. La estructura que se considero se puede observar en la Figura 3.9 para la cual el sistema de seguimiento se realiza manualmente cada 5 minutos aproximadamente ajustando la altura con cuerdas y un apoyo por la parte anterior, y la dirección moviendo el equipo en torno de sí mismo facilitado por las ruedas del soporte.

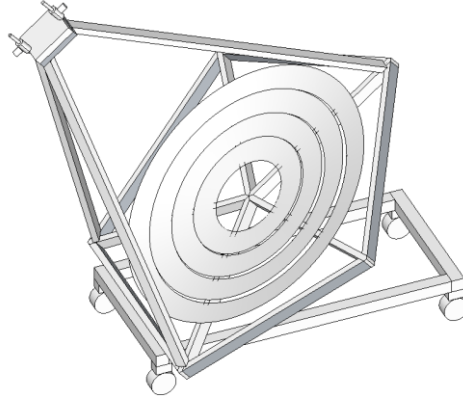


Figura 3.9: Diseño de sistema de seguimiento para Prototipo

Es preciso mencionar que la estructura base tiene forma de pentágono debido a que en un principio se pensó en utilizar el sistema de seguimiento de un concentrador que se encuentra en el sexto piso del departamento de eléctrica, el cual posee una base en forma de pentágono. Sin embargo se desechó la idea porque el sistema de seguimiento no se encontraba en buenas condiciones.

3.2.2 Receptor

El receptor fue construido con cobre y consiste en un bloque con un banco de 39 canales que lo cruzan de un extremo a otro. Los canales poseen un diámetro de 6 [mm] cada uno (ver Figura 3.10). En cada extremo se soldó una canoa con un fitting de $\frac{3}{4}$ de pulgada exterior. Por el lado que recibe la radiación se pintó de negro para aumentar la absorbancia del sistema a 0,95 aproximadamente [15]. El resto del receptor se aisló térmicamente con lana mineral de construcción.

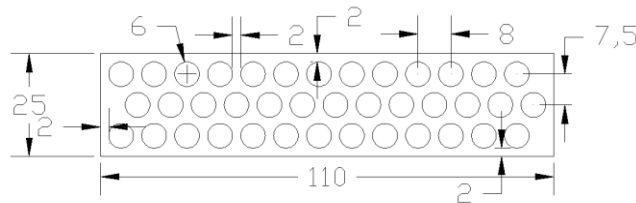


Figura 3.10: Diseño interno del receptor para Prototipo

3.2.3 Sensores de Temperatura

Los sensores de temperatura se construyeron en base al circuito integrado LM35 que poseen un voltaje de salida que es linealmente proporcional a la temperatura en grados Celsius. El circuito que se utilizó se

3.2.4 Equipo construido

El equipo finalizado puede observarse en la Figura 3.13 en donde es posible apreciar la posición de los sensores de temperatura instalados. Las dimensiones y especificaciones de los frustums pueden observarse en el apéndice A.

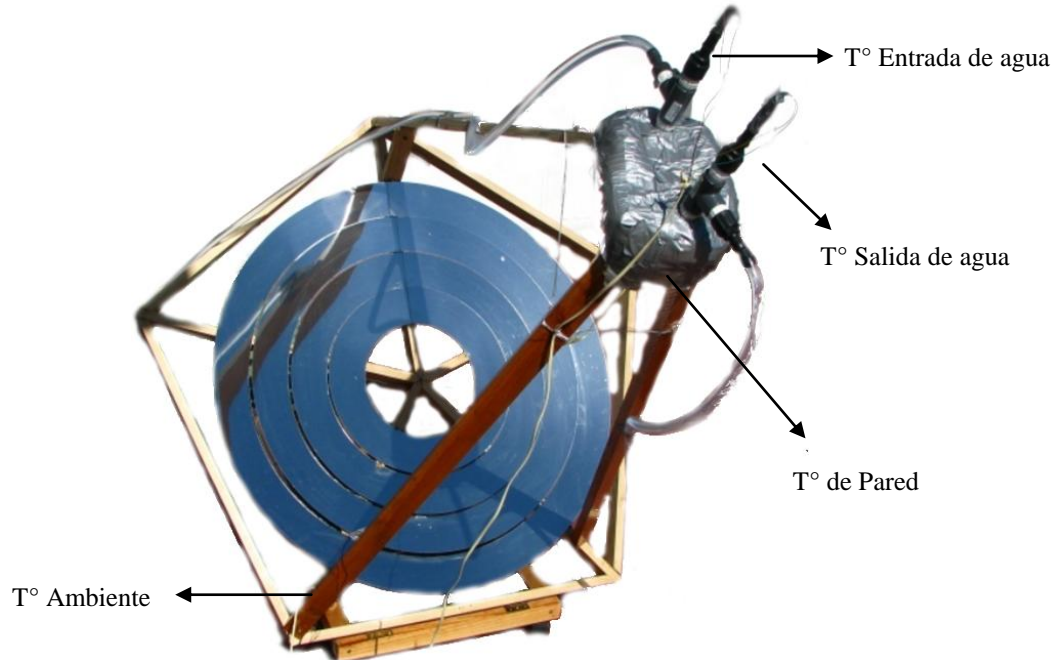


Figura 3.13: Equipo finalizado y Operando

3.3 Pruebas Experimentales

Las primeras pruebas que se realizaron fueron llevadas a cabo durante un día parcialmente nublado, en el cual las nubes bloqueaban ocasionalmente la radiación solar directa produciendo sistemas en estado transiente durante el experimento. En la Figura 3.14 se puede apreciar que la temperatura de salida es proporcional a la temperatura de pared del receptor con un leve retardo (10 segundos aproximadamente).

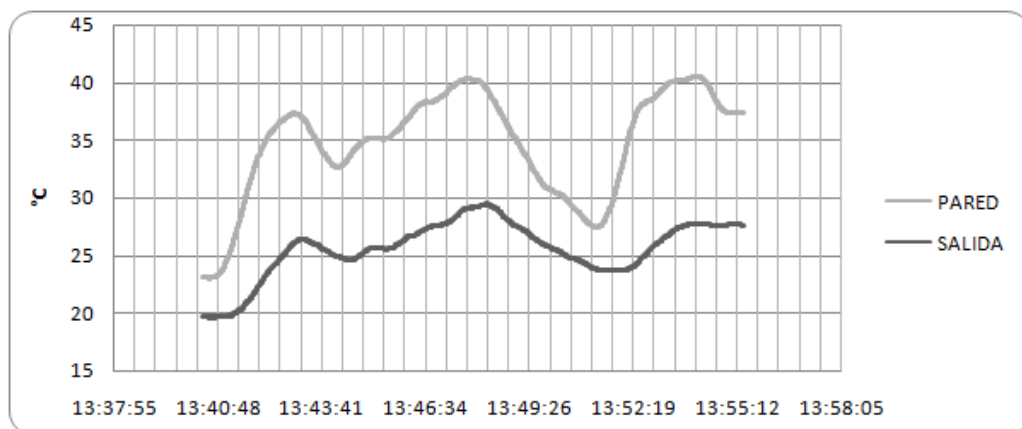


Figura 3.14: perfiles de temperatura de pared y de salida del agua

Si bien estos experimentos ayudaron a comprobar la dependencia entre la radiación y la temperatura de salida del agua, no sirven para calcular la eficiencia de transferencia de calor del equipo. Para calcular dicha eficiencia de transferencia de calor se realizaron pruebas en días despejados para los cuales es posible llegar a un estado estacionario con lo cual se obtiene la diferencia de temperatura entre la salida y entrada de agua. Esta diferencia es necesaria para calcular la cantidad total de calor que absorbe el agua que circula por el receptor.

Se contemplan distintos experimentos que se diferencian entre sí por el número de frustums utilizados. Estos experimentos son de utilidad para poder determinar la linealidad que posee el equipo frente a un aumento del área de colección, siendo que la capacidad de reflexión podría disminuir con el ángulo de incidencia de la radiación al frustum⁽⁴⁾. Debido a esto los experimentos se realizaron con 1, 2 y 4 frustums.

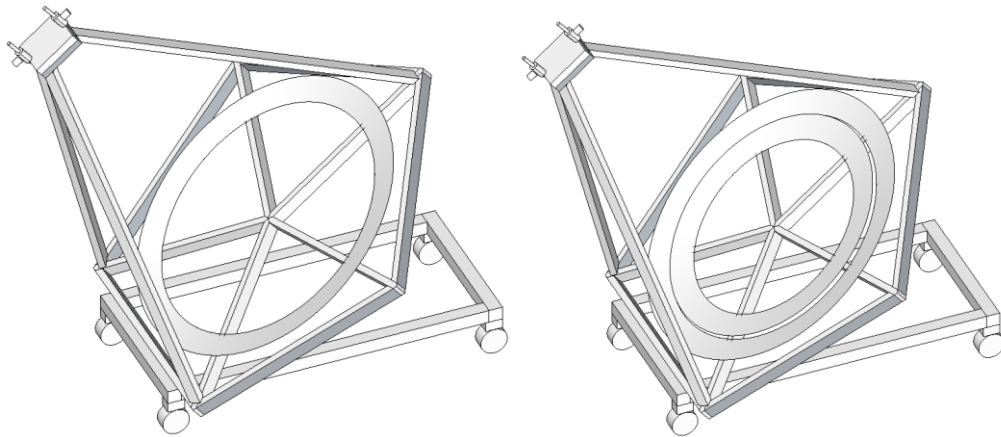


Figura 3.15: der: 1 frustum, izq: 2 frustums

3.3.1 Resultados para 4 frustums

Los experimentos con 4 frustums se realizaron los días 4, 5 y 7 de Noviembre. Tales días resultaron ser despejados en su totalidad por lo que fue posible utilizar los datos de la estación meteorológica del departamento de geofísica (apéndice C) y considerarlos iguales para el lugar en el cual se encontraba el prototipo.

Los perfiles de temperatura para cada experimento pueden observarse en el Apéndice E. Dichos perfiles tienen características similares a la Figura 3.16, en donde es posible observar un aumento de la diferencia de temperaturas a medida que el sistema está en estado transiente. Finalmente la diferencia se mantiene constante al entrar a un estado estacionario.

⁴ A mayor área, mayor ángulo de incidencia de la radiación

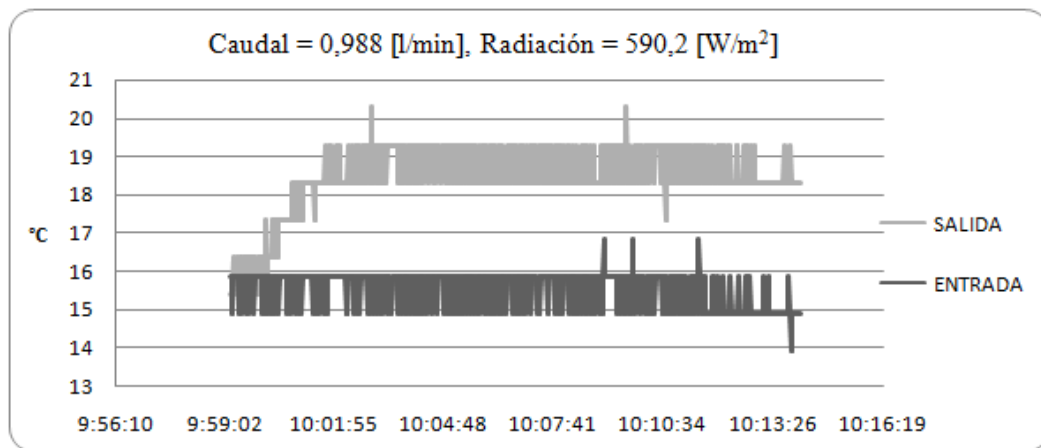


Figura 3.16: Perfiles de temperatura, 4 noviembre (1^{er} experimento)

Utilizando los perfiles de temperatura obtenidos experimentalmente⁽⁵⁾ y los cálculos del punto 3.1 se puede realizar una comparación entre los resultados reales y los resultados teóricos de temperatura que pueden ser observados en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Resultados Experimentales para 4 frustums

día	Radiación [W/m ²]	Caudal [l/min]	T ambiente [°K]	ΔT real [°K]	ΔT teórico [°K]
04-nov	590,2	0,988	295,2	3,25	3,35
04-nov	599,5	0,949	294,9	3,36	3,55
05-nov	419,7	0,424	290,6	5,27	5,52
05-nov	462,2	0,356	290,9	7,19	7,22
05-nov	499,1	0,336	292,9	7,71	8,30
07-nov	566,3	0,899	295,3	3,20	3,52

3.3.2 Resultados para 2 frustums

Del mismo modo que para el caso de 4 frustums, se realizaron pruebas con 2 frustums los días 4 y 7 de Noviembre con lo que se obtuvieron perfiles de temperatura como el que se observa en la Figura 3.17

⁵ Se debe mencionar que los cálculos consideraron el sistema en estado estacionario.

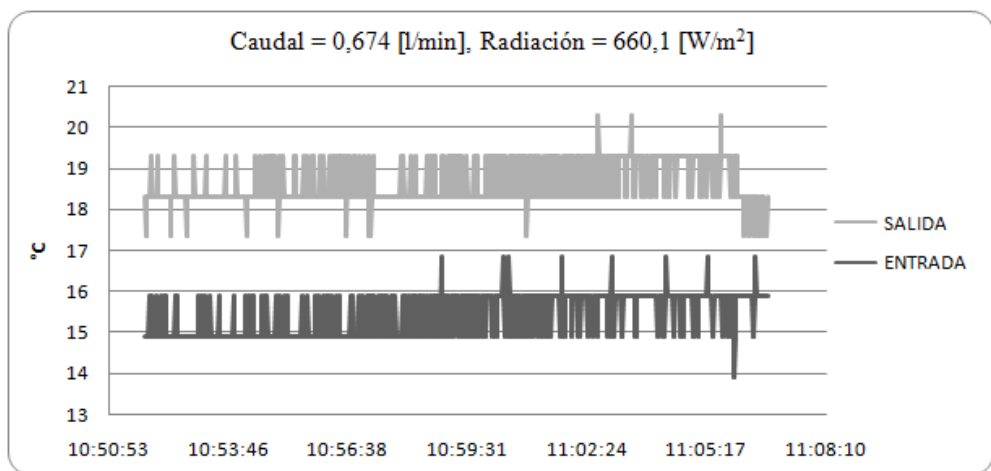


Figura 3.17: Perfiles de temperatura, 4 noviembre (4^{to} experimento)

Utilizando los perfiles de temperatura obtenidos experimentalmente y los cálculos del punto 3.1, al igual que en el caso anterior, se puede realizar una comparación entre los resultados reales y los resultados teóricos de temperatura, los cuales pueden ser observados en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Resultados Experimentales para 2 frustums

día	Radiación [W/m ²]	Caudal [l/min]	T ambiente [°K]	ΔT real [°K]	ΔT teórico [°K]
04-nov	660,1	0,791	295,6	2,86	3,03
04-nov	657,5	0,674	294,9	3,23	3,54
07-nov	545,3	0,981	294,3	1,81	2,02

3.3.3 Resultados para 1 frustum

Sólo se realizó una prueba para 1 frustum y se llevó a cabo el día 7 de Noviembre. El resultado puede observarse en la Figura 3.18.

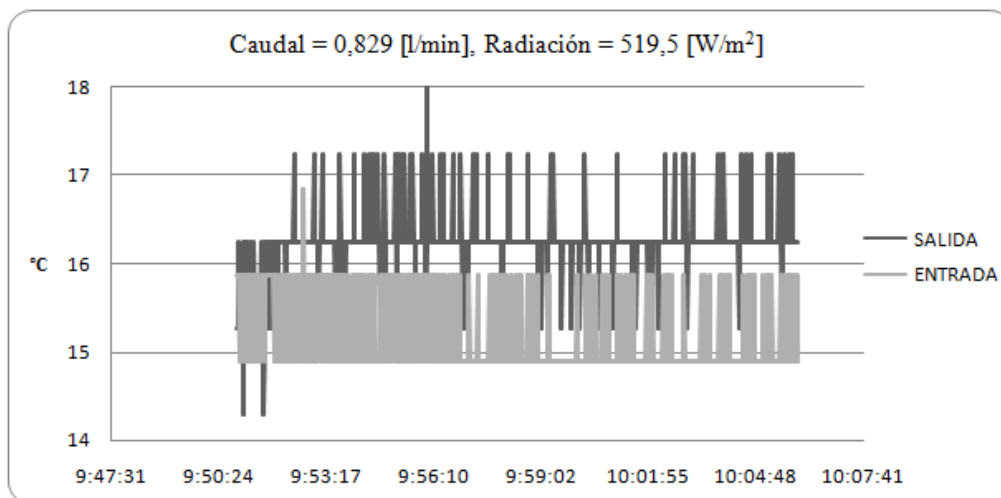


Figura 3.18: Perfiles de temperatura, 7 noviembre (1^{er} experimento)

Nuevamente se consideraron los cálculos del punto 3.1 y el resultado obtenido se puede contemplar en la Tabla 3.3

Tabla 3.3: Resultados Experimentales para 1 frustum

día	Radiación	Caudal	T ambiente	ΔT real	ΔT teórico
	[W/m ²]	[l/min]	[°K]	[°K]	[°K]
07-nov	519,5	0,829	292,6	1,13	1,26

3.4 Eficiencia Térmica

Para el diseño de los concentradores industriales se requiere conocer la cantidad de calor que se le transfiere al agua dada una cantidad de radiación conocida. A esto se le llamará eficiencia térmica y puede calcularse tanto teórica como experimentalmente. El cálculo de eficiencia teórica del equipo se realiza con el objetivo de evaluar las propiedades del concentrador (reflectividad, abosrbancia, etc.) de manera de que si se cambian tales propiedades (por cambio de materiales por ejemplo) será posible calcular una nueva eficiencia teórica.

$$\eta = \frac{Q_w}{G} = \frac{\dot{m} \cdot C p_m \cdot \Delta T}{G} \quad (3.15)$$

Entonces para la eficiencia teórica y real se pueden escribir las siguientes expresiones:

$$\eta_{teórico} = \frac{\dot{m} \cdot C p_m \cdot \Delta T_{teórico}}{G} \quad (3.16)$$

$$\eta_{real} = \frac{\dot{m} \cdot C p_m \cdot \Delta T_{real}}{G} \quad (3.17)$$

Utilizando (3.16) y (3.17) se obtienen las eficiencias teóricas y reales para cada experimento realizado.

Tabla 3.4: Eficiencia Térmica para 4 frustums

día	Caudal	ΔT real	ΔT teórico	Q real	Q teórico	η real	η teórico
	[l/min]	[°K]	[°K]	[W]	[W]	[%]	[%]
04-nov	0,9878	3,254	3,901	223,8	230,6	74,99%	77,28%
04-nov	0,9489	3,356	4,124	221,7	234,2	73,15%	77,26%
05-nov	0,4238	5,272	6,441	155,4	162,6	73,24%	76,64%
05-nov	0,3563	7,193	8,377	178,2	178,8	76,27%	76,50%
05-nov	0,3365	7,712	9,689	180,4	194,1	71,49%	76,91%
07-nov	0,8993	3,199	4,100	200,4	220,7	69,97%	77,08%

Puede observarse que la eficiencia real disminuyó al pasar los días, lo que puede atribuirse a un deterioro de la reflexión del material. Según Montes [16] la reflexión disminuye un 2% por cada día que el equipo se encuentre a la intemperie.

Tabla 3.5: Eficiencia Térmica para 2 frustums

día	Caudal	ΔT real	ΔT teórico	Q real	Q teórico	η real	η teórico
	[l/min]	[°K]	[°K]	[W]	[W]	[%]	[%]
04-nov	0,7906	2,857	3,528	157,3	167,0	72,71%	77,15%
04-nov	0,6739	3,262	4,122	153,1	166,2	71,02%	77,13%
07-nov	0,9805	1,809	2,349	123,5	137,9	69,12%	77,14%

Si se comparan estos resultados con los resultados para 4 frustums se puede observar una pequeña caída en la eficiencia real. Esto podría atribuirse a que la reflexión disminuye su capacidad a medida que el ángulo de incidencia es mayor. Sin embargo esta diferencia es bastante pequeña por lo que podría deberse únicamente a un error experimental.

Tabla 3.6: Eficiencia Térmica para 1 frustum

día	Caudal	ΔT real	ΔT teórico	Q real	Q teórico	η real	η teórico
	[l/min]	[°K]	[°K]	[W]	[W]	[%]	[%]
07-nov	0,8289	1,123	1,463	64,81	72,44	68,78%	76,87%

Nuevamente la eficiencia real es menor que para el caso de 4 frustum pero, al igual que en el caso de 2 frustums, la diferencia es bastante pequeña por lo que se puede atribuir a un error experimental.

Se puede concluir que la eficiencia real del prototipo se mantendrá en valores cercanos al 70 % y se considerará que la reflectividad disminuirá un 2% por día de exposición que equivale a un día operacional.

Para el cálculo del calor recibido por el agua se debe calcular la variación de temperatura teórica a través del sistema de ecuaciones expuesto en el punto 3.1. Sobre tal resultado se debe considerar la eficiencia real, para lo cual se multiplica por la eficiencia real y se divide por la eficiencia teórica cuyo resultado es de aproximadamente un 93% para los primeros experimentos. Se aprecia que el cociente disminuye con los días de operación a un 90% aproximadamente lo cual es consistente con una disminución de un 2% aproximadamente por día. De esta manera es posible determinar una eficiencia real en relación a una eficiencia teórica dada. Así, si se cambian los materiales de construcción del equipo se puede calcular la eficiencia real que tendrá el equipo en función de parámetros conocidos (cálculo de eficiencia teórica).

Capítulo IV

Evaluación Económica

A continuación se presenta una evaluación económica simple de un proyecto de desalinización de aguas salobres utilizando energía solar. Es necesario comentar que este análisis es bastante superficial ya que no considera honorarios y tampoco sueldos a personal que trabaje en las instalaciones. Por otro lado, la evaluación consideró en muchos aspectos el peor escenario posible por lo que se estaría sub-evaluando el proyecto. Además no se consideró el beneficio social de no emitir gases de efecto invernadero por uso de combustibles fósiles.

El proyecto se emplazará en las cercanías de Calama (cerca del río Loa) debido a que las condiciones de la zona son las requeridas por el sistema que se propone. En primer lugar la radiación es bastante alta y, debido a la poca nubosidad, consiste en su mayoría de radiación directa. Por otro lado dicha zona es desértica por lo que el agua es un bien escaso, ya que algunos afluentes del río Loa poseen agua con altos niveles de salinidad, por lo que el proceso de desalinización es necesario.

Es posible distinguir dos partes del proyecto: primero el proceso de captura de energía solar y, segundo, el proceso de desalinización de agua salobre.

El proceso de captura energética se debe escalar de tal manera de obtener la energía necesaria para realizar la desalinización del agua según el diseño que se requiera. En este caso se tomará como base de diseño la producción de 1.000 [m³/día] de agua dulce para riego. Dependiendo del cultivo que se utilice y del tipo de riego que se implemente, la cantidad de hectáreas que se pueden satisfacer por la producción de agua cambia notoriamente.

Tabla 4.1: Caudales Requeridos por Hectárea según método de Riego, 2009 [18]

Zona	Cultivo	Técnica de Riego [l/s/ha]				
		Tendido	Surcos	Aspersión	Goteo	Pivote
Calama	Ajo	-	1,34	0,8	0,67	0,67
Calama	Zanahoria	2,1	1,4	0,84	0,7	0,7
S.P. de Atacama	Duraznos	---	1,68	1,01	0,84	0,84
S.P. de Atacama	Maíz	2,63	1,75	1,05	-	0,88
S.P. de Atacama	Uva	-	1,31	-	0,66	-
Antofagasta	Lechuga	-	1,97	1,18	0,98	0,98
Antofagasta	Tomate	-	2,46	-	1,23	-

A modo de ejemplo utilizando la técnica de riego por surcos en cultivos de tomate la cantidad de hectáreas que se pueden satisfacer con la producción de 1.000 [m³/día] de agua equivale a 4.

El sistema de desalinización que se utilizará será la tecnología MED la cual opera en rangos de temperatura cercanos a 70°C y posee bajos requerimientos de energía eléctrica.

4.1 Diseño de Captura de Energía

Para el diseño de la captura de energía se considerará el diseño del prototipo visto en el presente informe. El radio del frustum mayor será de 411 [cm] aproximadamente por lo que se considerará una estructura formada por perfiles cuadrados dispuestos en manera hexagonal para facilitar su construcción. El receptor se dispondrá a 4 [m] de altura y el área focal corresponderá a un diámetro de 15 [cm]. El equipo se instalará en un soporte con un sistema de seguimiento automático el cual posee un gasto energético en torno a 20 [Wh] [23]. En la Figura 4.1 se puede apreciar el prototipo diseñado para el sistema de captura industrializado.



Figura 4.1: Concentrador para uso industrial

El área que refleja la radiación del concentrador es de $40,98 \text{ [m}^2\text{]}$, sin embargo se debe considerar que el sistema posee una estructura que soporta al concentrador de manera que produce una sombra sobre el área de colección. Esta sombra resulta ser igual a $0,17 \text{ [m}^2\text{]}$ con lo que el área efectiva de colección es de $40,81 \text{ [m}^2\text{]}$.

El siguiente paso en el diseño es considerar el efecto que produce cada concentrador sobre otro concentrador en relación a la sombra que le hace uno a otro. Como el costo del terreno y del piping no es nulo se debe considerar una convención entre el costo del suelo y la cantidad de tiempo que los concentradores tienen sombra de otro concentrador. Una convención puede ser considerar una distancia de 3 veces el diámetro del concentrador para la dirección este-oeste [16].

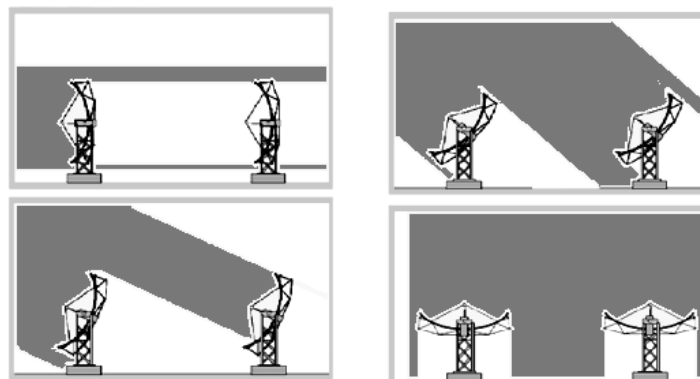


Figura 4.2: Sombra entre concentradores: Este-Oeste

Para el caso de la dirección norte-sur se puede obtener una distancia mínima para la cual los concentradores no se interpongan uno al otro. Esto puede conseguirse mediante un sencillo cálculo geométrico a partir de la Figura 4.3. El cálculo se puede observar en el apéndice G y el resultado se muestra en la ecuación (4.1).

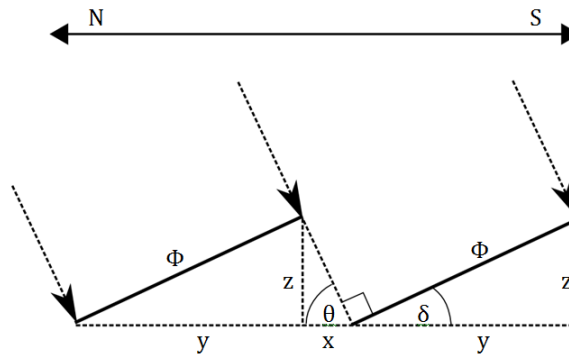


Figura 4.3: Sombra entre concentradores: Dirección Norte-Sur

$$x + y = \Phi \cdot \text{sen}(90^\circ - \theta) \left(\frac{1}{\text{tg}(\theta)} + \frac{1}{\text{tg}(90^\circ - \theta)} \right) \quad (4.1)$$

θ = Ángulo de inclinación máximo del sol en Calama = 43,75°.

Φ = Diámetro concentrador = 8,2 [m].

$x + y$ = Distancia entre concentradores.

Realizando el cálculo se obtiene una distancia entre concentradores en la dirección norte-sur de 1,44 veces el diámetro del concentrador. Como el concentrador posee un diámetro aproximado de 8 [m] entonces las distancias entre concentradores serán de 24 [m] y 11,57 [m] en las direcciones este-oeste y norte-sur respectivamente. Para el caso de la dirección norte-sur se aproximará el valor a 12 [m].

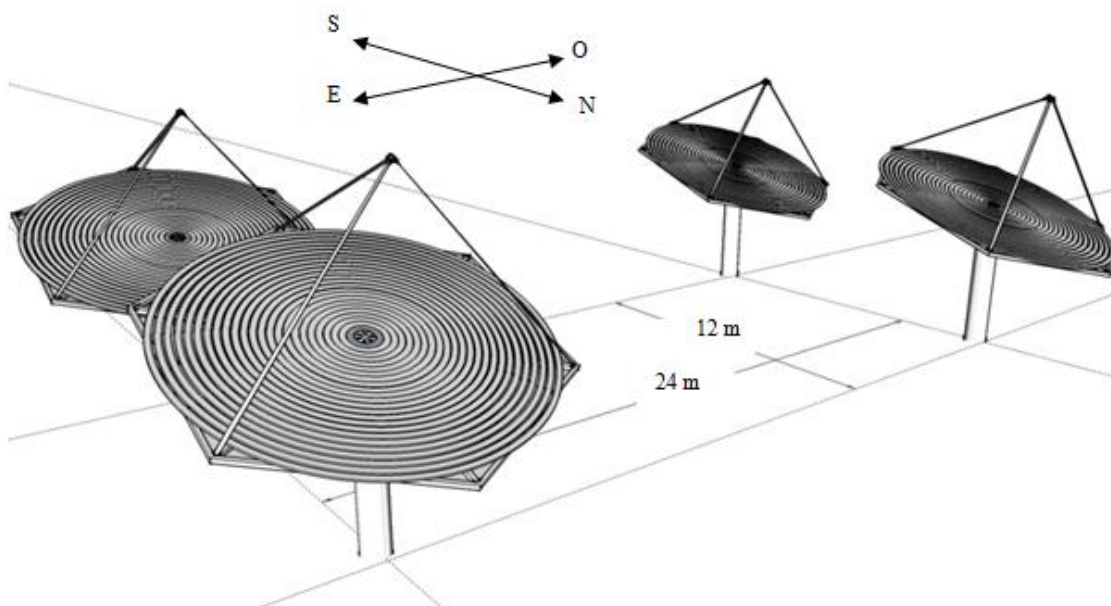


Figura 4.4: Diseño de Área de Concentradores

Con esta disposición los concentradores pueden funcionar no en su óptimo durante las mañanas y las tardes por lo que para el análisis se considerará que los concentradores funcionan solo 10 horas al día.

Como base de diseño se considera una producción de 1.000 [m³/día] utilizando una planta de Desalinización con tecnología MED con una eficiencia de 10 [(kg agua destilada)/(kg agua evaporada)] que puede ser lograda con 14 etapas aproximadamente. La energía térmica requerida será entonces 0,06278 [kWh/kg de agua dulce]⁽⁶⁾ que corresponde a 62.699 [kWh/día] (considerando 10 horas diarias de funcionamiento) para los 1.000 [m³/día]. Luego los concentradores deben ser capaces de alcanzar una cantidad mayor de energía ya que la transferencia de calor entre el fluido térmico (el agua) hacia el sistema MED no es perfecta. En ese aspecto se considerará una eficiencia de transferencia de calor de 90%. A esto se le debe añadir la eficiencia real del equipo que es de 93% en relación a la eficiencia teórica del equipo. Entonces la energía que deben suministrar los concentradores es de 74.909 [kWh /día].

Este calor corresponde a Q_w del cálculo teórico del punto 3.1, de manera que es posible calcular la cantidad de agua por día que debe calentarse.

$$Q_w = \dot{m} \cdot C p_m \cdot (T_s - T_e)$$

En este caso se considerará que los concentradores calientan el agua desde los 75°C hasta los 85°C y que el agua transfiere calor hacia el sistema MED bajando la temperatura de la misma desde los 85°C hasta los 75°C en un circuito cerrado.

Realizando el cálculo se obtiene un flujo másico de agua de 178,5 [kg/s]. Por otro lado la radiación directa de la zona es de unos 8 [kWh/día/m²] en promedio anual [25],[26] lo que equivale a 666,7 [W/m²].

Finalmente se considerará que la reflectividad de los concentradores empeora un 2% por día que no se limpia. Además se considera que la reflectividad baja en un 1% anualmente inevitablemente por deterioro (polvo que raya la superficie por ejemplo). Para efectos de estimar la cantidad de concentradores se considerará que los equipos llevan 10 años en funcionamiento y que se realizan limpiezas cada 3 días. Con estos supuestos la reflectividad del acero baja de 83% a 69,24%.

El paso siguiente es utilizar la base de cálculo del punto 3.1 para estimar la variación de temperatura que se obtiene bajo los parámetros mencionados. La solución encontrada resulta ser de 0,024°K por concentrador instalado considerando que existe una sola línea en la cual todos los equipos están en serie. Para esta situación el número de concentradores es de 419. Si se consideran 100 líneas de concentradores se necesitarán 5 concentradores por línea y la variación de temperatura aumentará a 2,078°K. En este caso la cantidad de concentradores será de 500 aumentando los costos de inversión del proyecto. Sin embargo la ventaja de muchas líneas es que se pueden realizar operaciones de mantenimiento más fácilmente y si llega a fallar alguna línea no se compromete completamente el proceso. Contemplando los últimos argumentos se realizará la evaluación económica usando 26 líneas de 17 concentradores cada una resultando una diferencia de temperaturas de 0,606°K por concentrador, totalizando 442 concentradores para el proyecto.

⁶ Requerimiento se calcula en base a la energía que necesita el agua en cambiar a fase gaseosa (540 kcal/kg)

Para los 442 concentradores requeridos el área que se debe utilizar es de 14,85 [ha] al considerar un espaciado de 12 [m] entre concentradores en dirección norte-sur y 24 [m] entre concentradores en dirección este-oeste.

El análisis anterior se realizó para 5 casos de diámetros de concentrador distintos resultando el más económico para el caso de un diámetro de 8 metros para 26 líneas de concentradores. Dicho análisis puede observarse en el apéndice F.

4.2 Costos de Captura de Energía

A continuación se presentan los costos de capital y operacionales de los concentradores solares

4.2.1 Costos de Capital

Los costos de capital se dividen en dos grupos. El primero grupo corresponde al costo de inversión de los concentradores y el segundo corresponde al costo de inversión del sistema de cañerías y accesorios para el flujo de agua como fluido térmico (cañerías, bombas, etc.).

En el primer caso se deben considerar los costos de construcción de los concentradores, que corresponden a los materiales que se deben adquirir y a los servicios que se deben contratar.

Tabla 4.2: Costo de un Concentrador de 8 [m] de diámetro

Material y/o Servicio	Costo [\$]
Receptor de Cobre	50.000
Sistema de Seguimiento	142.000
Servicio de Corte Láser	512.000
Plancha de Acero AISI 430	320.000
Estructura Soportante (perfiles de 1,5 x 25 x 25 [mm])	274.000
Mano de Obra e insumos	160.000
Total	1.458.000

Considerando la cantidad total de concentradores requeridos (442), la inversión es \$ 645.000.000 aproximadamente.

Las líneas serán alimentadas por 26 bombas de una potencia de 3 [kW] que entregan un caudal máximo de 40 [m³/h] siendo que lo requerido es 25,44 [m³/h]. Este sobredimensionamiento se contempló para no analizar las pérdidas de carga del sistema, de tal manera que tales pérdidas de carga sean absorbidas por el sobredimensionamiento. Las bombas poseen un costo aproximado de USD\$ 600 cada una. Además se considerarán 13 bombas adicionales de respaldo ante cualquier eventualidad. Se asumirá que el piping correspondería a un 13% aproximado de la inversión [27] con lo que se obtiene el total de la inversión para los concentradores.

Tabla 4.3: Costo del Sistema de Concentradores

	Costo
Concentradores	\$ 645.000.000
Bombas	\$ 13.000.000
Piping	\$ 55.000.000
Total	\$ 713.000.000

4.2.2 Costos de Operación

Existen 3 costos principales de operación: limpieza y mantenimiento de los concentradores, energía eléctrica requerida por las bombas y energía eléctrica requerida por los sistemas de seguimiento.

Para la limpieza y mantenimiento de los concentradores se considerará a 5 personas que realicen las labores durante la noche. El sueldo mensual para cada trabajador será de \$600.000 lo que totalizará \$36.000.000 al año. También se considerará un apoyo administrativo con un costo de \$5.400.000 al año.

La energía consumida por las bombas costará aproximadamente \$ 37.000.000 al año considerando un precio del [kWh] de \$ 80 (promedio según cne para el SING) y que las bombas funcionan 14 horas al día. El consumo del sistema de seguimiento es bastante bajo, 20 [Wh/día] para cada concentrador, lo que equivale a \$300.000 al año por todos los concentradores. Sumando todos los costos operacionales se obtiene \$ 79.000.000 al año aproximadamente.

4.3 Costos de Desalinización

A continuación se presentan los costos de capital y operacionales de una planta de desalinización por medio de tecnología MED con una eficiencia de 10 que se puede lograr con 14 etapas.

4.3.1 Análisis de Costos de Capital

Los costos de capital para una planta de desalinización por RO o por MED de 1.000 [m³/día] el costo de capital mínimo es de \$ 530.000.000 aproximadamente [11],[22]. Para el sistema de riego por goteo se debe considerar una inversión extra de \$20.000.000 por hectárea.

4.3.2 Análisis de Costos de Operación

A continuación se analizan los distintos costos de operación que requiere una planta MED. Como se mencionó en el punto 2.4.4, la energía eléctrica requerida es de 1 [kWh/m³] aproximadamente. Por otro lado los costos de mano de obra y mantenimiento ascienden al 2% de la inversión al año [4]. Además se deben considerar aditivos químicos para evitar corrosión e incrustaciones en los equipos los cuales tienen un costo de 6,5 [USD\$/kg] y se requieren 5.475 [kg/año]. Con los antecedentes mencionados es posible calcular el costo anual aproximado de operación de la planta MED.

Tabla 4.4: Costo operacional de la Planta MED

Servicio o insumo	Costo Anual
Energía eléctrica requerida	\$ 29.200.000
Mano de obra y mantenimiento	\$ 16.900.000
Químicos (anti-incrustante)	\$ 18.900.000
Total	\$ 66.000.000

4.4 Costos Totales

La inversión total que debe realizarse asciende a unos \$ 1.243.000.000, mientras que los costos operacionales anuales suman \$ 145.000.000

4.5 Ingresos

Los ingresos del proyecto dependerán del método de riego y del cultivo que se siembre. Para la evaluación se considerará el caso de 3 cultivos por separado: Tomates, Zanahorias y Duraznos. Además los métodos de riego que se evaluará son por surcos y por goteo. Utilizando las bases de datos de la FAO [13] y los precios de los alimentos se obtiene la Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Ingresos por cultivo al año, Water Footprint Network, 2001 [2]

Cultivos	Método de Riego	requerimiento	hectáreas regadas	Eficiencia anual	cantidad	precio	Ingreso
		[m ³ /día/ha]	[ha]	[ton/ha]	[Ton/año]	[\$/ton]	[\$/año]
Tomate	surcos	212,5	4,705	65,13	306,4	453.686	140.000.000
	Goteo	106,3	9,410	65,13	612,8	453.686	279.000.000
Durazno	surcos	145,2	6,889	15,68	108,0	486.239	53.000.000
	Goteo	72,58	13,78	15,68	216,0	486.239	106.000.000
Zanahoria	surcos	121,0	8,27	26,10	215,8	168.911	37.000.000
	Goteo	60,48	16,53	26,10	431,6	168.911	73.000.000

Si ahora se considera que no se realizan cultivos y que simplemente se vende el agua para consumo humano, entonces los ingresos son directos según el precio del m³ de agua. En Calama, según la superintendencia de servicios sanitarios (ww.siss.cl), el costo del agua es de 720 [\$/m³]. De esta manera el ingreso por venta de agua es de \$ 263.000.000 al año (haciendo el supuesto de venta total de agua).

4.6 VAN del Proyecto

La primera observación que puede realizarse es que cualquier proyecto debe satisfacer como mínimo que los ingresos sean mayores a los costos operacionales. Por lo tanto se pueden descartar los cultivos de zanahorias, de duraznos y de tomates con el sistema de riego por surcos.

El flujo de caja se construirá con un horizonte de 10 años y la depreciación de todos los equipos se considerarán constantes en el tiempo y se calcularán en base a una vida útil de 20 años. La tasa de descuento aplicada corresponde a un 10%.

Se estudiaron dos casos de financiamiento: uno con un préstamo de 50% sobre la inversión y otro con un préstamo de 75% sobre la inversión. Finalmente los resultados de dichas evaluaciones se presentan en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6: VAN de los distintos productos

Producto	VAN [\$]	
	50%	75%
Tomate (Goteo)	- 236.000.000	- 162.000.000
Agua	- 184.000.000	- 119.000.000

Ningún proyecto posee un VAN positivo siendo el precio del agua para obtener un VAN de cero igual a 784 [\$/m³] que es mayor al precio del agua en la zona (720 [\$/m³]).

Ante esta situación de VAN negativo para cada una de las alternativas se realizará un análisis para otros casos de desalinización.

4.7 Proyectos Alternativos

Se plantean dos proyectos alternativos, los dos con una planta de desalinización por medio de RO que se diferencian entre sí por el recurso energético utilizado.

4.7.1 RO con Suministro eléctrico del Sistema Interconectado (SING)

Se considerará la construcción de una planta de desalinización por osmosis inversa con suministro de energía eléctrica del sistema interconectado (del norte grande) que tiene un costo de 80 [\$/kWh] aproximadamente.

Se asumirá que el gasto energético de la planta por RO es de 4 [kWh/m³] y la inversión es la misma que para la planta por MED (\$530.000.000).

Los costos operacionales para la planta de desalinización por RO son de energía, personal y mantenimiento. El costo de la energía corresponde a un 60% del costo operacional total [1]. Para calcular el consumo de energía se multiplica la cantidad de días al año por el requerimiento energético diario y por el precio de la energía resultando ser \$115.200.000 aproximadamente. Luego los costos operacionales serán de \$192.000.000.

La inversión final será de \$530.000.000 y los costos operacionales serán \$192.000.000 con lo que es posible construir nuevos flujos de caja que resultan en nuevos VAN.

Tabla 4.7: VAN de los distintos productos para RO

Producto	VAN [\$]	
	50%	75%
Tomate (Goteo)	- 37.000.000	2.000.000
Agua	16.000.000	44.000.000

El valor del agua para el cual el VAN es cero es de 697 [\$/m³] que es menor al valor que tiene el agua en esa zona.

4.7.2 RO con Concentradores

Se considerará la construcción de una planta de desalinización por osmosis inversa con suministro de energía eléctrica por medio de los concentradores. La energía requerida será menor pero se requiere de un generador eléctrico acoplado al sistema de concentradores, lo que aumentaría la inversión. Se supondrá un costo de generador de \$100.000.000 con una eficiencia del 15% de energía eléctrica sobre energía térmica.

Se asumirá que el gasto energético de la planta por RO es de 4 [kWh/m³] y la inversión es la misma que para la planta por MED (\$530.000.000). Con estos supuestos la energía térmica que requiere el nuevo sistema es de 28.674 [kWh/día] que pueden ser generados con solo 182 concentradores de 8 metros de diámetro utilizando un área de 5,5 [ha]. Esta cantidad de concentradores tienen un costo de inversión de \$266.000.000 aproximadamente.

Los costos operacionales para la planta de desalinización por RO son de personal y mantenimiento y corresponden a un 40% de los costos operacionales del proyecto de RO con suministro energía eléctrica del SING [1]. Como los costos operacionales del proyecto anterior son \$192.000.000 entonces los costos serían de \$77.000.000 aproximadamente.

Se debe considerar, adicionalmente, los costos operacionales de los concentradores, los cuales se calcularán a partir de los costos operacionales del proyecto principal de MED ponderado por la cantidad de concentradores que hay en este nuevo proyecto. Como la cantidad de concentradores es un 41% de la cantidad del proyecto por tecnología MED entonces el costo operacional será de \$ 31.000.000 aproximadamente.

La inversión final será de \$964.000.000 y los costos operacionales serán \$108.000.000 con lo que es posible construir nuevos flujos de caja que resultan en nuevos VAN.

Tabla 4.8: VAN de los distintos productos para RO

Producto	VAN [\$]	
	50%	75%
Tomate (Goteo)	109.000.000	170.000.000
Agua	162.000.000	212.000.000

El valor del agua para el cual el VAN es cero es de 607 [\$/m³] que es bastante menor al valor que tiene el agua en esa zona.

Capítulo V

Discusiones y Conclusiones

Se realizó un breve análisis de las tecnologías vigentes tanto para la energía solar como para la desalinización. Además se analizaron las condiciones meteorológicas, medio ambientales y astronómicas que afectan a los equipos de energía solar. Dichas condiciones son muy importantes para diseñar los sistemas de seguimiento de los concentradores.

Se construyó un prototipo de concentración solar con materiales económicos y cuya construcción es bastante simple. El equipo no tuvo un costo mayor a los \$ 60.000, sin embargo se debe considerar un sistema de seguimiento que tiene un costo proporcional al tamaño del equipo lo que aumenta considerablemente el costo del concentrador.

Una vez construido el prototipo fue posible determinar experimentalmente la dependencia entre la radiación y el aumento de temperatura del agua del receptor, al realizar mediciones durante un día parcialmente nublado. El retardo medido entre que la radiación calienta la pared del receptor y el agua comienza a calentarse es de unos 10 segundos aproximadamente.

Se realizaron mediciones de temperatura a la entrada y salida del agua en el receptor de manera que fue posible estimar una eficiencia térmica real del equipo que resultó ser de un 70% (calor transferido sobre radiación que llega al receptor).

Por otro lado se pudo concluir, luego de las experiencias, que el ángulo de inclinación de los frustums exteriores (más inclinados) no afecta apreciablemente a la eficiencia del equipo por lo que al realizar un escalamiento no es necesario tomarlo en cuenta.

También se pudo comprobar que las condiciones ambientales (polvo, humedad, etc.) afectan el rendimiento del equipo al disminuir la reflectividad del equipo en un 2% por día aproximadamente lo que es consistente con la literatura consultada.

Se desarrolló un análisis teórico de la transferencia de calor sobre el receptor de radiación. De esta manera se estimó una eficiencia térmica teórica del equipo, la cual resultó ser de 77% (calor recibido por el agua sobre la radiación recibida por el concentrador). Luego se pudo lograr una relación entre las eficiencias para poder estimar el calor real transferido a partir de la eficiencia teórica calculada. La relación resultó ser de 93% (eficiencia real sobre eficiencia teórica). De esta manera es posible evaluar cambios en las propiedades del concentrador a través del cálculo de eficiencia térmica teórica si es que se cambian los materiales de construcción por ejemplo.

Con los datos de eficiencia se pudo llevar a cabo una evaluación económica de una planta de desalinización por medio de tecnología MED con una producción de 1.000 [m³/día] que se destina para riego o directamente para consumo humano. La energía requerida por el sistema de desalinización puede ser satisfecha por un número de concentradores igual a 442, los que ocupan un área de aproximada de 13,6 [ha] en el caso de concentradores de 8 [m] de diámetro.

El número de concentradores puede variar dependiendo del diámetro del concentrador, siendo el área de concentración mayor por área de concentrador utilizada a medida que el foco del concentrador es más alto. El límite de altura focal se determina por el diseño del concentrador siendo de la mitad del diámetro de concentrador escogido. Normalmente a mayor diámetro mayor eficiencia de concentración, sin embargo, para las 26 líneas de concentradores supuestas, el diámetro óptimo corresponde a 8 [m] porque la suma de las diferencias de temperatura por concentrador es más cercana a la diferencia de temperatura del diseño con lo que la cantidad de concentradores total tiene un costo menor.

Para todos los casos (excepto el riego por goteo) la inversión fue de \$1.243.000.000 con una tasa del 10% y un horizonte de 10 años. En el caso del riego por goteo es necesario considerar una inversión adicional de \$200.000.000 (\$20.000.000 por hectárea) por concepto de la instalación del sistema de riego. El VAN resultó ser negativo para todos los sistemas de riego siendo el mejor de los casos la venta directa de agua con un VAN de - \$119.000.000 para un préstamo del 75%.

Se decidió realizar dos evaluaciones extras utilizando un sistema de desalinización por medio de tecnología RO suministrando la energía eléctrica mediante el uso del sistema interconectado (SING) o el uso de los concentradores en conjunto a un generador. En ambos casos se consideró una tasa del 10% y un horizonte de evaluación de 10 años.

Para un suministro de energía eléctrica por medio del sistema interconectado se obtuvo una inversión de \$ 530.000.000 y costos operacionales de \$ 192.000.000 lo que resulta en un VAN de \$ 44.000.0000 para el caso del agua con un préstamo del 75% siendo el precio del agua 697 [\$/m³] para obtener un VAN igual a cero.

Para un suministro de energía eléctrica por medio del uso de los concentradores se obtuvo una inversión de \$ 964.000.000 considerando un generador eléctrico acoplado al sistema de concentración solar. Los costos operacionales son \$ 108.000.000, lo que resulta en un VAN de \$ 212.000.0000 para el caso del agua con un préstamo del 75% siendo el precio del agua 607 [\$/m³] para obtener un VAN igual a cero.

Estas evaluaciones son simples y no consideran, por ejemplo, beneficios sociales. Los escenarios podrían cambiar si se consideran bonos de carbono dentro del análisis o algún tipo de subsidio por parte del estado.

Por otro lado, la evaluación se realizó utilizando acero inoxidable AISI 430 que posee una buena reflectividad pero existen otros materiales que podrían sustituirlo por tener mejores propiedades reflectivas y/o una mejor tolerancia al uso. Por ejemplo el aluminio posee una reflectividad cercana al 95% lo que podría disminuir la cantidad de concentradores necesarios para cumplir con el diseño. De esa manera la inversión podría disminuir bastante, mejorando los escenarios para los otros tipos de cultivos.

El diseño del prototipo es bastante competitivo económicamente considerando que es una tecnología no muy desarrollada. Por lo tanto se esperaría que los costos de esta tecnología descendan en los próximos años si es que se comienza a comercializar. Por otro lado el diseño es bastante bueno desde el punto de vista mecánico ya que su forma le confiere una baja resistencia al viento, por lo que puede ser usada en lugares que exista un alto promedio de viento.

Bibliografía

- [1] ADRIANNE Jacques, ALARDIN Félix. Thermal and membrane processes economics: optimized selection for seawater desalination. Desalination, Elsevier. 2002
- [2] APÉNDICE IV. Global trade volumes, trade values and average world market prices of crop and livestock products in the period. 1997-2001. Water Footprint Network, University of Twente, <<http://www.waterfootprint.org/?page=files/NationalStatistics>>
- [3] ARROYO Jorge A. Texas Water Development Water Desalination. Texas Water Development Board. 2004.
- [4] BARDI Alvarado, Francisco. La desalinización de agua de mar como alternativa para la provisión de agua potable en Taltal y Tocopilla. Tesis (Ingeniero Civil Industrial). Chile, Santiago. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 1993.
- [5] BLANCO J. MALATO S. FERNÁNDEZ-IBAÑEZ P. ALARCÓN D. GERNJAK W. MALDONADO M.I. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Elsevier. 2008. Review of feasible solar energy applications to water processes.
- [6] CATH Tzahi Y. CHILDRESS Amy E., Menachem Elimelech, “Forward osmosis: Principles, applications, and recent developments”, Journal of Membrane Science, Elsevier, 2005.
- [7] COMMITTEE on Water Implications of Biofuels Production in the United States. National Research Council. Water Implications of Biofuels Production in the United States. 2008.
- [8] COMMITTEE on Advancing Desalination Technology, Water Science and Technology Board, Division on Earth and Life Studies. Desalination: A National Perspective. 2008.
- [9] COMMITTEE on Advancing Desalination Technology, Water Science and Technology Board, Division on Earth and Life Studies. Review of the Desalination and Water Purification Technology Roadmap”, 2001.
- [10] DE LA CASTILLEJA Mendoza. Diseño y Estudio de Factibilidad Técnico-Económica de una Central con Tecnología Solar Comprimida Rodrigo. Tesis (Ingeniero Civil Electricista) Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 2008.
- [11] ETTOUNEY Hisham M. EL-DESSOUKY Hisham T. Kuwait Univ. Ron S. Faibish and Peter J. Gowin, International Atomic, Energy Agency. Evaluating the Economics of Desalination.
- [12] FAO. Water at a Glance, The relationship between water, agriculture, food security and poverty. 2009.
- [13] FAO Estadísticas Alimenticias por región [en línea]: <<http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567#anchor>>

- [14] FREDERICK G. Ramón. Colaboración: COURTIN V. Sergio. Apuntes para el curso Transferencia de Calor ME43B. 2006.
- [15] LIENHARD IV John H. LIENHARD V John H. Heat Transfer Textbook. 3ª ed. 2008
- [16] MONTES P., María José. Análisis y propuestas de sistemas solares de alta exergía que emplean agua como fluido calorífero. Tesis Doctoral. 2008.
- [17] OFFICE of Water U.S. Environmental Protection Agency Washington, DC. 2006 Edition of the Drinking Water Standards and Health Advisories. 2006.
- [18] OSORIO Pereira, Luis, Caudales Requeridos por Hectárea según método de Riego. Departamento de Riego INDAP. 2009.
- [19] OTLES Semih. OTLES Serkan. Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry. Desalination Techniques. 2004.
- [20] PEÑAILILLO, Daniela. Diseño de un Destilador Solar de Mediana Escala. Tesis (Ingeniera Civil Químico) Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 2007.
- [21] PERRY'S Chemical Engineer's Handbook por Robert H. Perry "et al". 7ª ed. McGraw-Hill. 1999.
- [22] PSA, MEDESOL. Critical assessment of the state-of-the-art and bibliographic review on membrane distillation technology, solar collector technology and low-fouling heat transfer modified surfaces, 2007
- [23] QUINTEROS Grijalva Jorge. Estudio Teórico y Experimental de Colector Solar Parabólico para generación de Energía Eléctrica. Tesis (Ingeniero Civil Electricista) Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 2008.
- [24] RUTLANT José. Apuntes del curso Introducción a la Meteorología y Oceanografía GF45A. 2007.
- [25] SCHMIDT Reinhold, DÍAZ Aníbal. Informe mensual de la estación de medición de la radiación solar en Pozo Almonte. CNE. 2008.
- [26] SWERA Data Archive [en línea]: <<http://swera.unep.net/index.php?id=35&idx=336#>>
- [27] TOWLER Gavin, SINNOTT Ray. 2008. Chemical engineerin design: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design.

Apéndice A: Dimensiones de frustums

Las dimensiones calculadas de los frustums se muestran en la Tabla 7.1 y en la Tabla 7.2. Los cálculos se realizaron en base a una altura focal de 100 (cm) y un diámetro focal de 8 (cm).

Tabla 7.1: Dimensiones de los frustums

i	x_i [cm]	α_i [rad]	α_i [°]	M_i [cm]	h_i [cm]	l_i [cm]	(x_i+l_i)	x_i
0	4,000	0,040	2,287	7,981	0,318	7,975	11,975	4,000
1	12,026	0,079	4,552	7,924	0,629	7,899	19,925	12,026
2	20,076	0,118	6,769	7,832	0,923	7,778	27,854	20,076
3	28,151	0,156	8,911	7,709	1,194	7,616	35,767	28,151
4	36,247	0,191	10,962	7,559	1,437	7,421	43,669	36,247

Tabla 7.2: Dimensiones de los frustums (Continuación)

i	$d_e = 2*(x_i+l_i)$	$d_i = 2*x_i$	v_i [rad]	v_i [°]	$r_{interior, i}$ [cm]	$r_{exterior, i}$ [cm]	A_i [cm ²]
0	23,949	8,000	0,005	0,287	4,003	11,984	400,5
1	39,850	24,051	0,020	1,136	12,064	19,988	795,4
2	55,708	40,152	0,044	2,509	20,217	28,049	1179,4
3	71,534	56,301	0,076	4,346	28,495	36,204	1548,0
4	87,338	72,495	0,115	6,568	36,921	44,480	1897,9

Para el prototipo se consideraron los frustums 1 al 4 (el frustum 0 se excluyó del diseño del prototipo y del equipo industrial ya que iba a ser bloqueado por el receptor).

Apéndice B: Propiedades del Agua y del Aire

Propiedades del Agua

Las propiedades del agua se obtuvieron de [21].

Tabla 8.1: Propiedades del agua a distintas temperaturas

T [°K]	ρ [kg/m ³]	C_p [kJ/(kg°K)]	μ [N · s/m ²]	k [W/(m°K)]
273,15	1000	4,217	0,00175	0,569
275	1000	4,211	0,001652	0,574
280	1000	4,198	0,001422	0,582
285	1000	4,189	0,001225	0,59
290	999,00	4,184	0,00108	0,598
295	998,00	4,181	0,000959	0,606
300	997,01	4,179	0,000855	0,613
305	995,02	4,178	0,000769	0,62
310	993,04	4,178	0,000695	0,628
315	991,08	4,179	0,000631	0,634
320	989,11	4,180	0,000577	0,64
325	987,16	4,182	0,000528	0,645
330	984,25	4,184	0,000489	0,65
335	982,318	4,186	0,000453	0,655
340	979,432	4,188	0,00042	0,66
345	976,56	4,191	0,000389	0,665
350	973,71	4,195	0,000365	0,668
355	970,87	4,199	0,000343	0,671
360	967,12	4,203	0,000324	0,674
365	963,39	4,209	0,000306	0,677
370	960,61	4,214	0,000289	0,679
375	956,94	4,220	0,000274	0,681

Los datos se graficaron y luego se agregó una curva de tendencia para cada una de las propiedades con lo cual fue posible obtener una relación entre la temperatura y la propiedad para un rango de temperaturas entre 270 y 380°K.

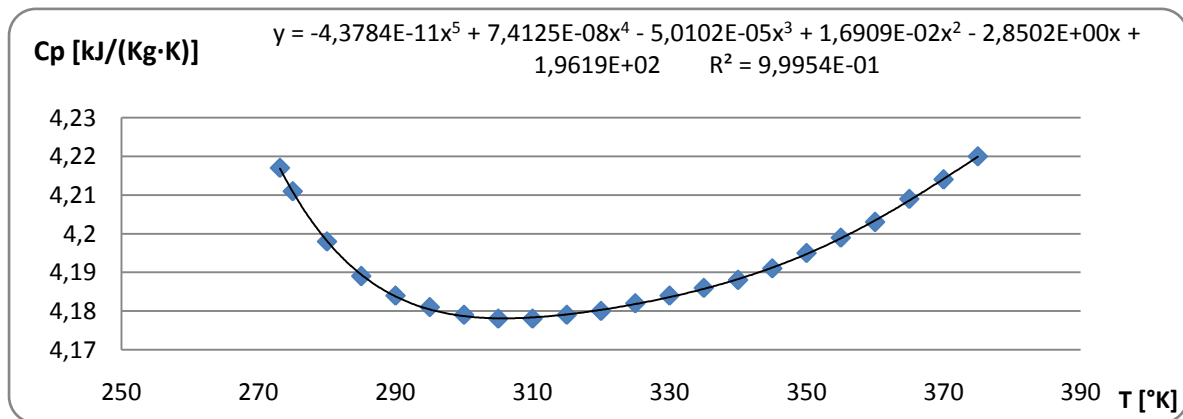


Figura 8.1: Cp del agua para temperaturas entre 270 y 380°K

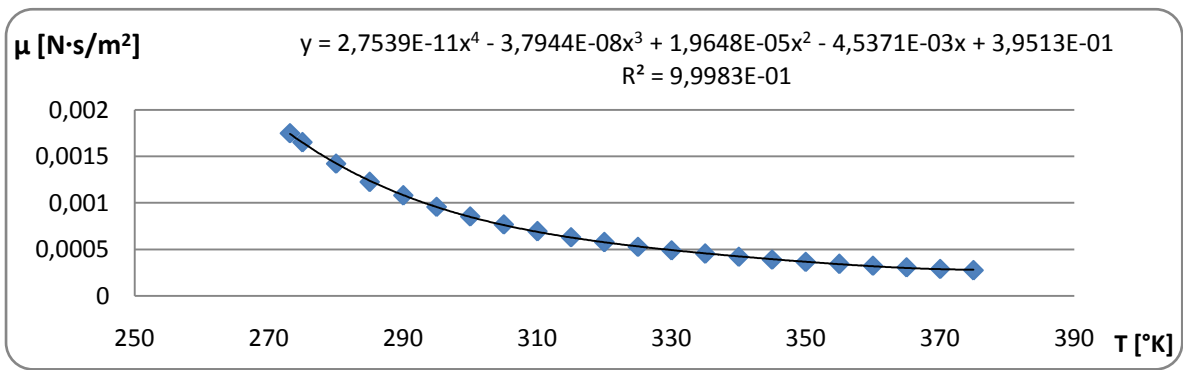


Figura 8.2: μ del agua para temperaturas entre 270 y 380°K

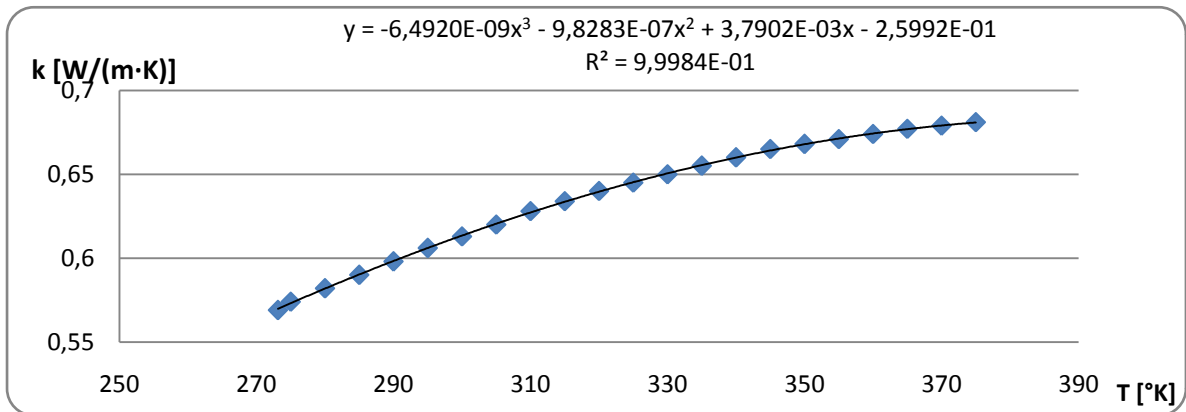


Figura 8.3: k del agua para temperaturas entre 270 y 380°K

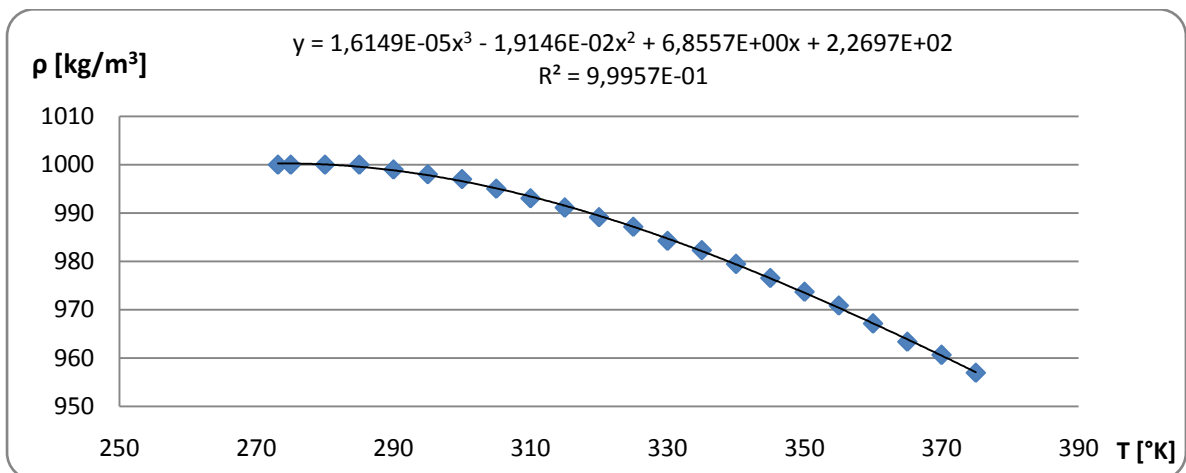


Figura 8.4: ρ del agua para temperaturas entre 270 y 380°K

Propiedades del aire

Las propiedades del aire se obtuvieron de [21].

Tabla 8.2: Propiedades del aire a distintas temperaturas

T	ρ	C_p	μ	k
[°K]	[kg/m ³]	[kJ/(kg°K)]	[N · s/m ²]	[W/(m°K)]
260	1,340483	1,006	0,0000165	0,0231
280	1,24533	1,006	0,0000175	0,0247
300	1,16144	1,007	0,0000185	0,0263
350	0,995025	1,009	0,0000208	0,0301

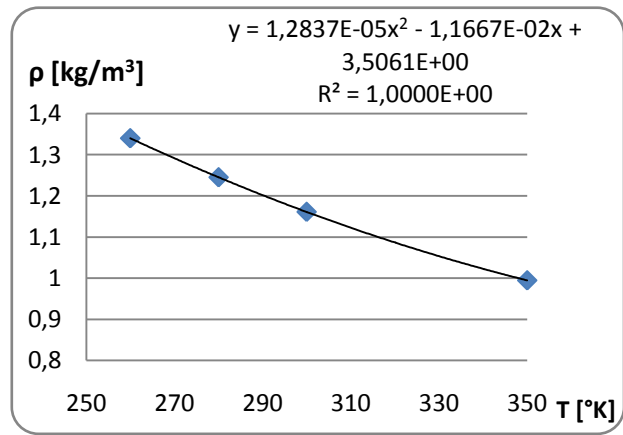
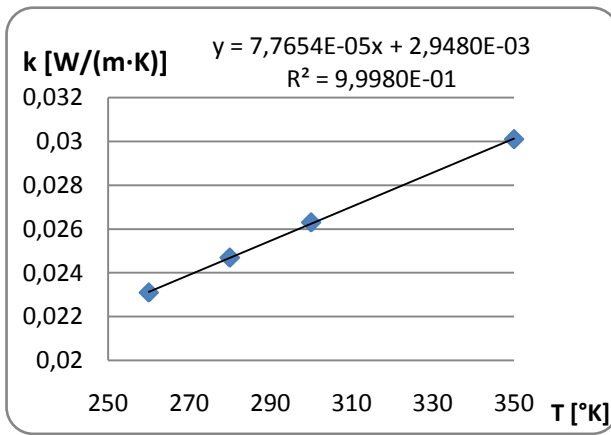


Figura 8.5: Propiedades para temperaturas entre 270 y 380°K (izq: k , der: ρ)

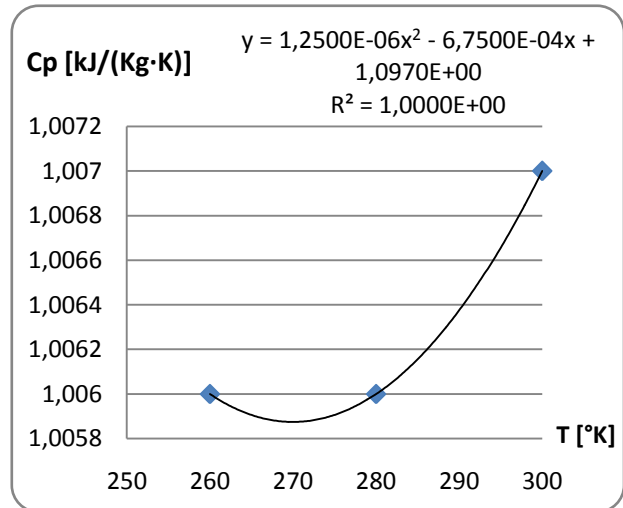
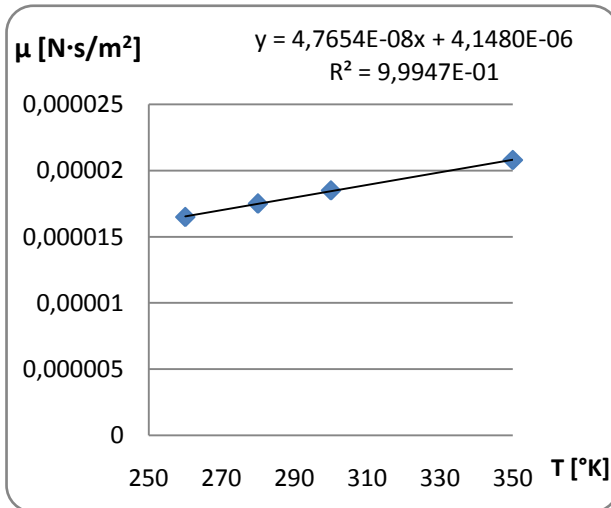


Figura 8.6: Propiedades para temperaturas entre 270 y 380°K (izq: μ , der: C_p)

Apéndice C: Radiación y Magnitud del Viento

Los datos de radiación y de Magnitud del Viento se obtuvieron a partir del Grupo de Meteorología, Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile. Los datos corresponden a los días 3, 4, 5 y 7 de Noviembre del 2009. Para acceder a ellos fue necesario utilizar la convención de días julianos (1 de Enero = 1, ..., 31 de Diciembre = 365). Entonces los días 3, 4, 5 y 7 de Noviembre corresponden a 307, 308, 309 y 311 en días julianos.

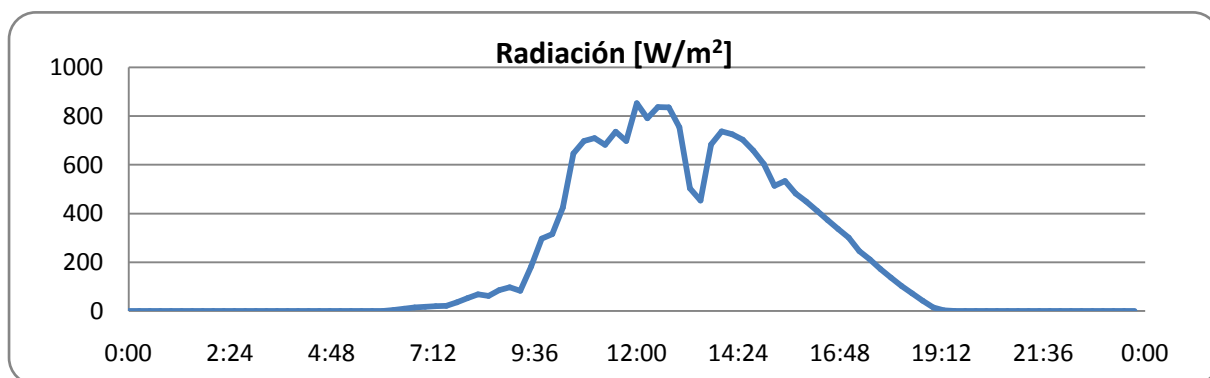


Figura 9.1: radiación del día 307

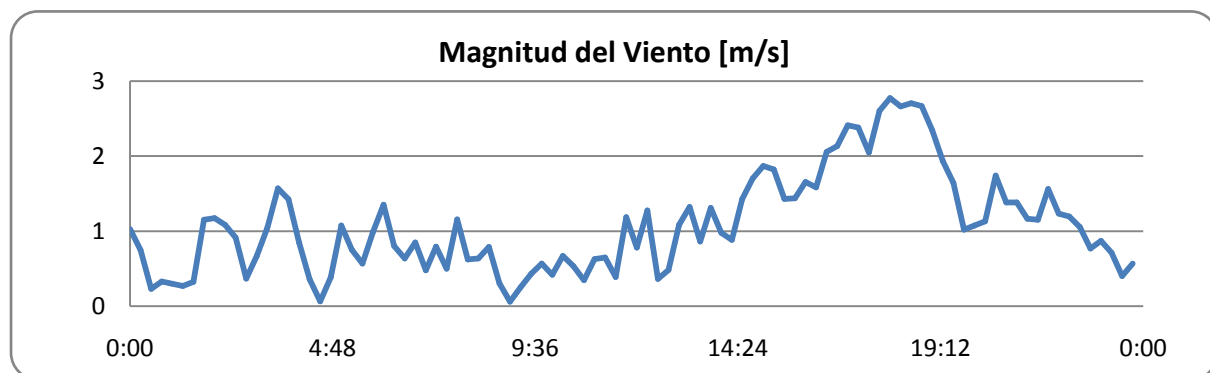


Figura 9.2: Magnitud del Viento del día 307

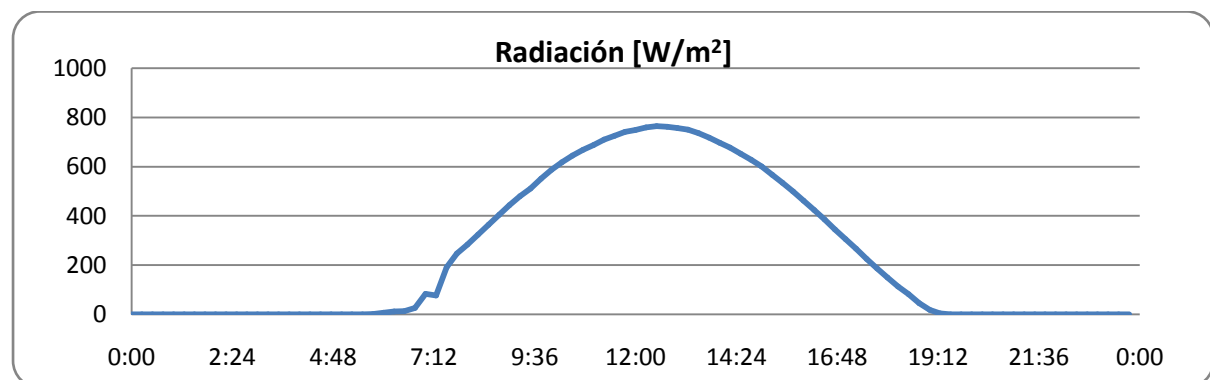


Figura 9.3: radiación del día 308

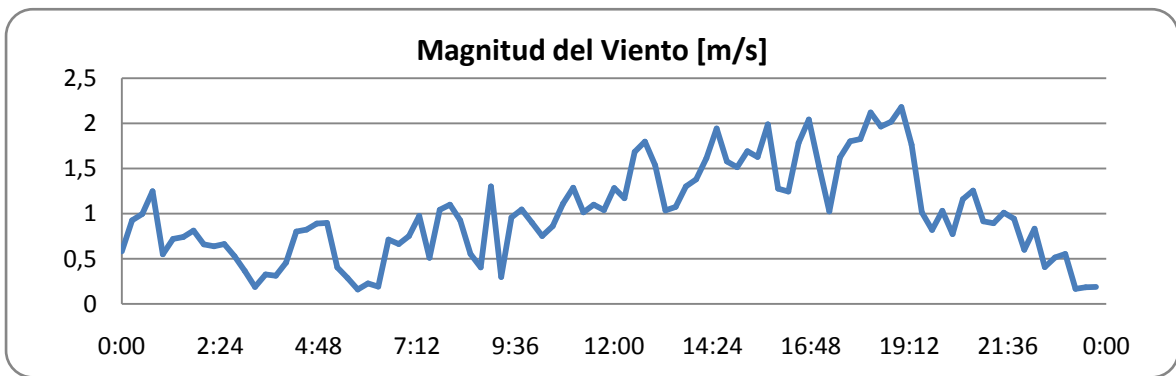


Figura 9.4: Magnitud del Viento del día 308

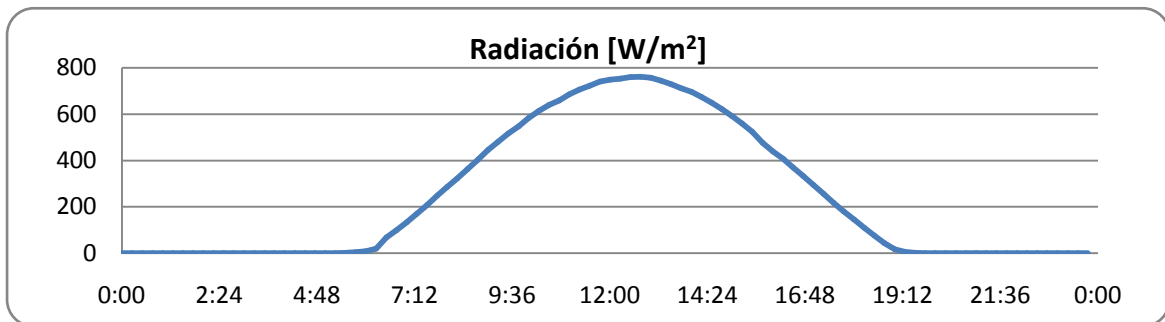


Figura 9.5: radiación del día 309

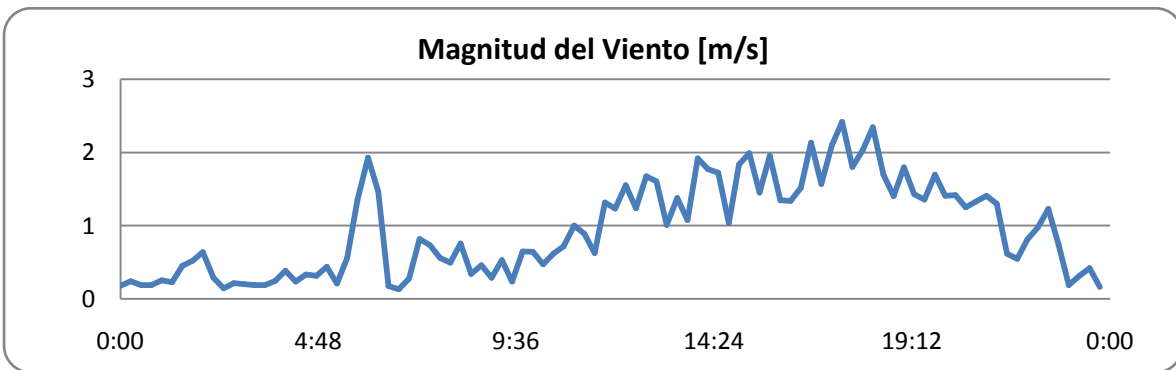


Figura 9.6: Magnitud del Viento del día 309

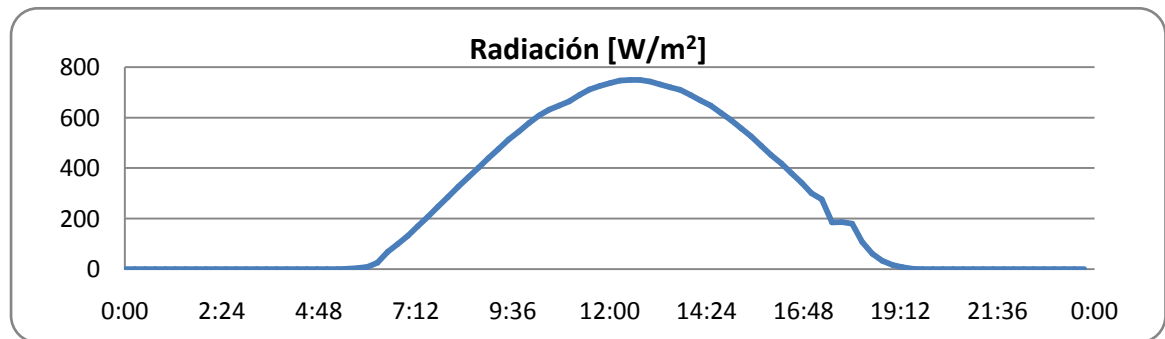


Figura 9.7: radiación del día 311

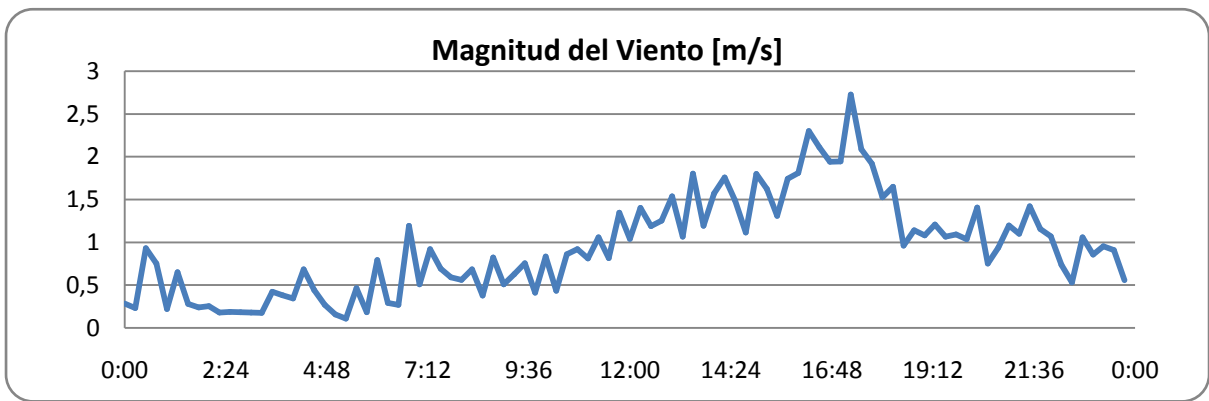


Figura 9.8: Magnitud del Viento del día 311

Apéndice D: Flujos Volumétricos

A continuación se muestran los distintos flujos volumétricos observados para cada día que se experimentó. Para cada Experimento se realizaron mediciones durante la experiencia para ya que el flujo de agua no era constante y disminuía paulatinamente a medida que pasaba el tiempo.

Tabla 10.1: Flujos Volumétricos para el día 4 de Noviembre

Experimento	Volumen [l]	Tiempo [s]	Caudal [l/min]	Promedio [l/min]
1°	1	60	1	
	1	60	1	
	1	61	0,98360	
	1	62	0,96774	0,98783
2°	1	62	0,96774	
	1	63	0,95238	
	1	63	0,95238	
3°	1	65	0,92307	0,94889
	1	72	0,83333	
	1	75	0,8	
	1	77	0,77922	
4°	1	80	0,75	0,79063
	1	83	0,72289	
	1	88	0,68181	
	1	91	0,65934	
	1	95	0,63157	0,67390

Tabla 10.2: Flujos Volumétricos para el día 5 de Noviembre

Experimento	Volumen [l]	Tiempo [s]	Caudal [l/min]	Promedio [l/min]
1°	1	129	0,46511	
	1	138	0,43478	
	1	147	0,40816	
	1	155	0,38709	0,42378
2°	1	162	0,37037	
	1	167	0,35928	
	1	171	0,35087	
	1	174	0,34482	0,35633
3°	1	176	0,34090	
	1	178	0,33707	
	1	181	0,33149	0,33649

Tabla 10.3: Flujos Volumétricos para el día 7 de Noviembre

Experimento	Volumen [l]	Tiempo [s]	Caudal [l/min]	Promedio [l/min]
1°	1	69	0,86956	
	1	71	0,84507	
	1	73	0,82191	
	1	77	0,77922	0,82894
2°	1	59	1,01694	
	1	60	1	
	1	62	0,96774	
3°	1	64	0,9375	0,98054
	1	65	0,92307	
	1	66	0,90909	
	1	67	0,89552	
	1	69	0,86956	0,89931

Apéndice E: Resultados Experimentales

Perfiles de Temperatura para 4 frustums

Se realizaron experimentos con 4 frustums los días 4, 5 y 7 de Noviembre. Los perfiles de temperatura para cada experimento pueden observarse de la Figura 11.1 a la Figura 11.10.

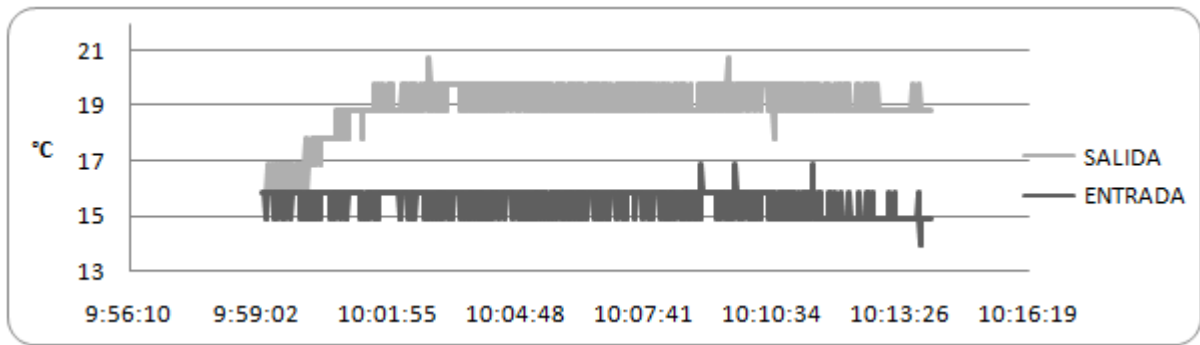


Figura 11.1: Perfiles de temperatura, 4 noviembre (1^{er} experimento)

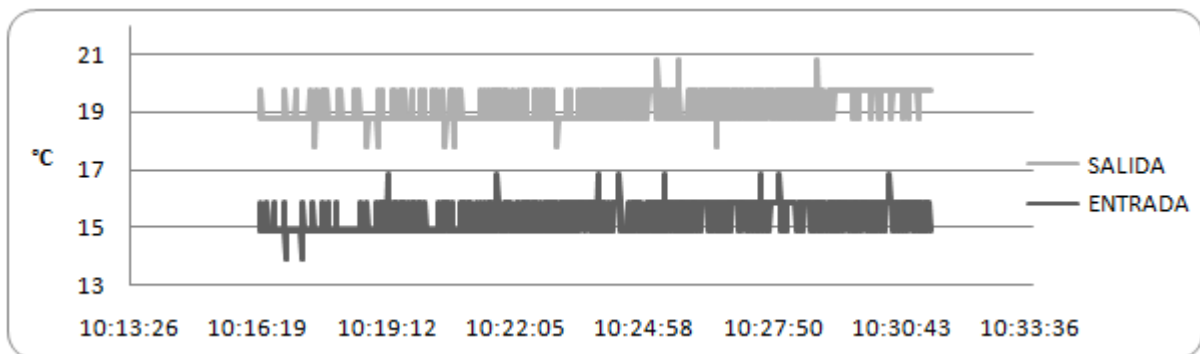


Figura 11.2: Perfiles de temperatura, 4 noviembre (2^{do} experimento)

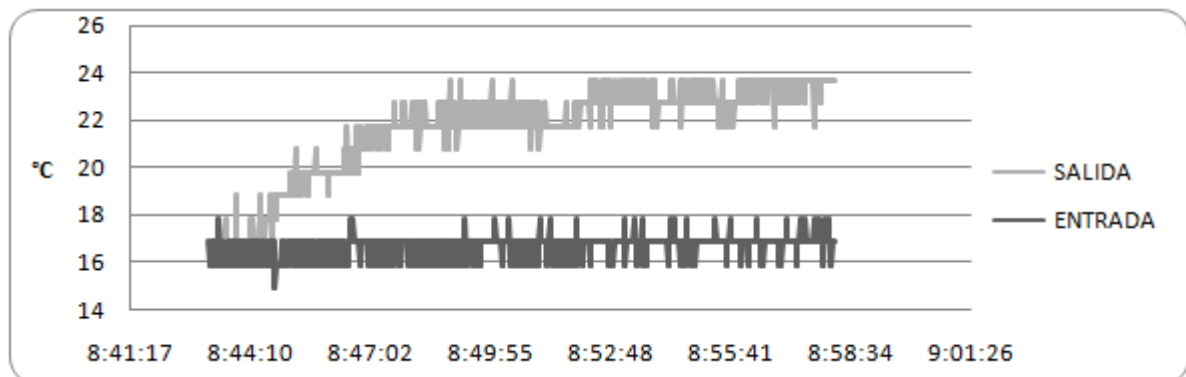


Figura 11.3: Perfiles de temperatura, 5 noviembre (1^{er} experimento)

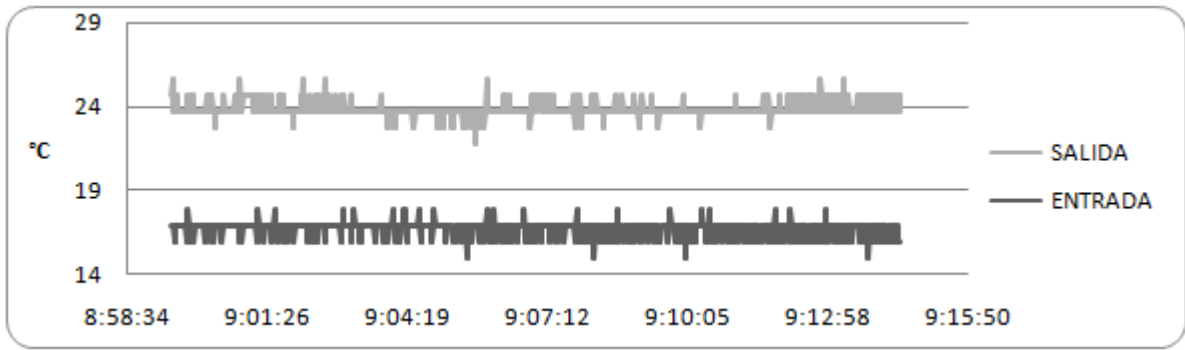


Figura 11.4: Perfiles de temperatura, 5 noviembre (2^{do} experimento)

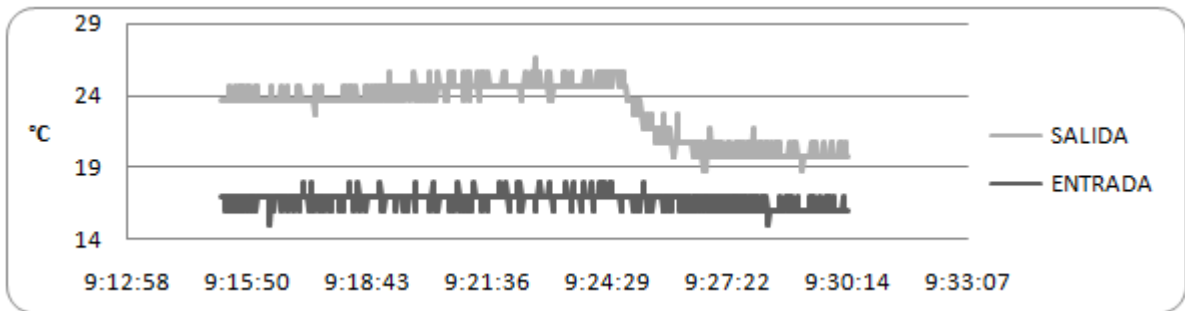


Figura 11.5: Perfiles de temperatura, 5 noviembre (3^{er} experimento)

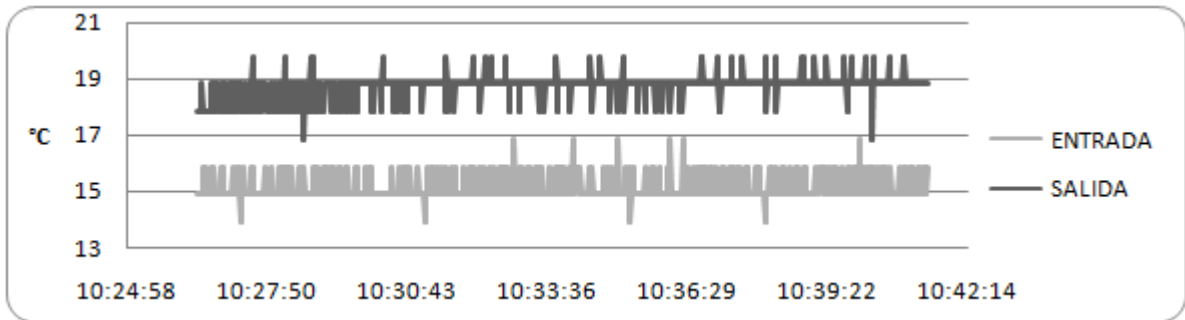


Figura 11.6: Perfiles de temperatura, 7 noviembre (3^{er} experimento)

Perfiles de Temperatura para 2 frustums

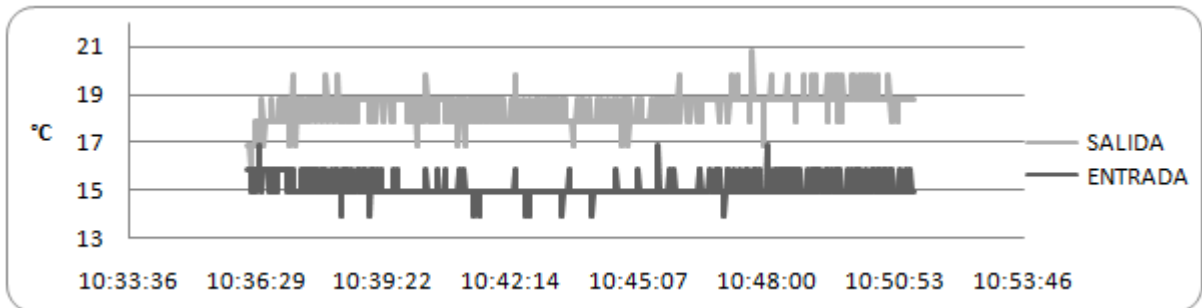


Figura 11.7: Perfiles de temperatura, 4 noviembre (3^{er} experimento)

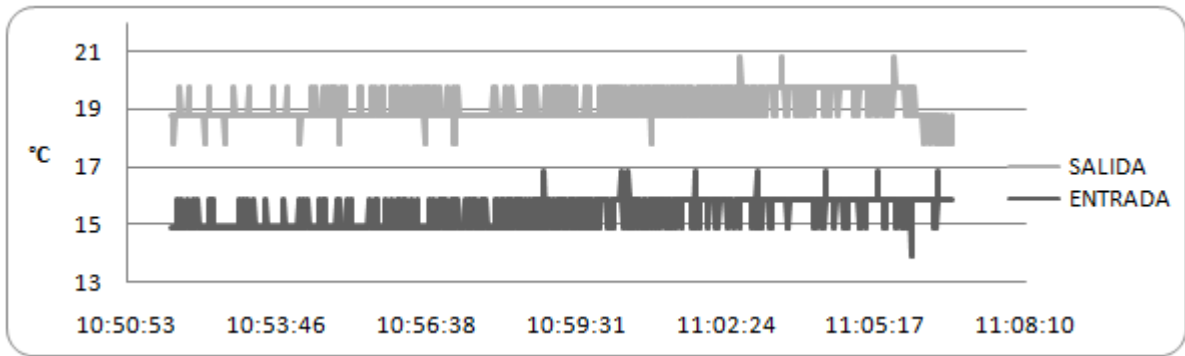


Figura 11.8: Perfiles de temperatura, 4 noviembre (4^{to} experimento)

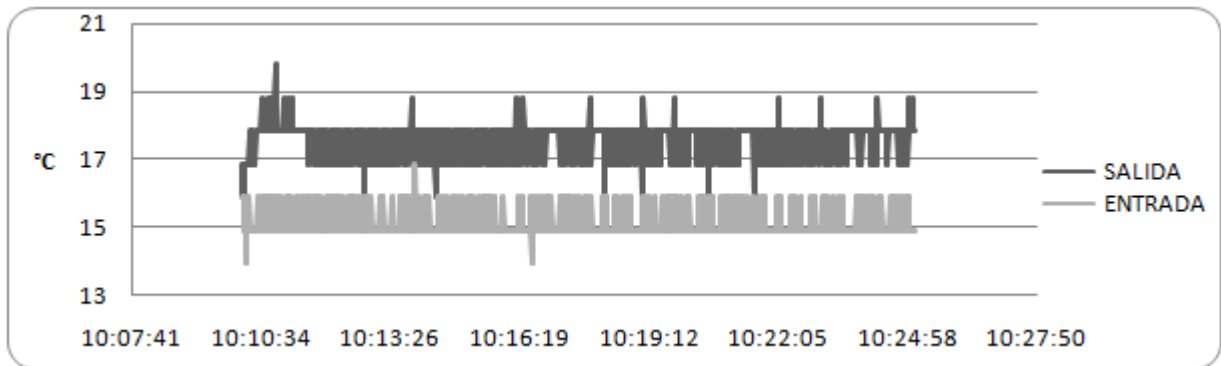


Figura 11.9: Perfiles de temperatura, 7 noviembre (2^{do} experimento)

Perfiles de Temperatura para 1 frustum

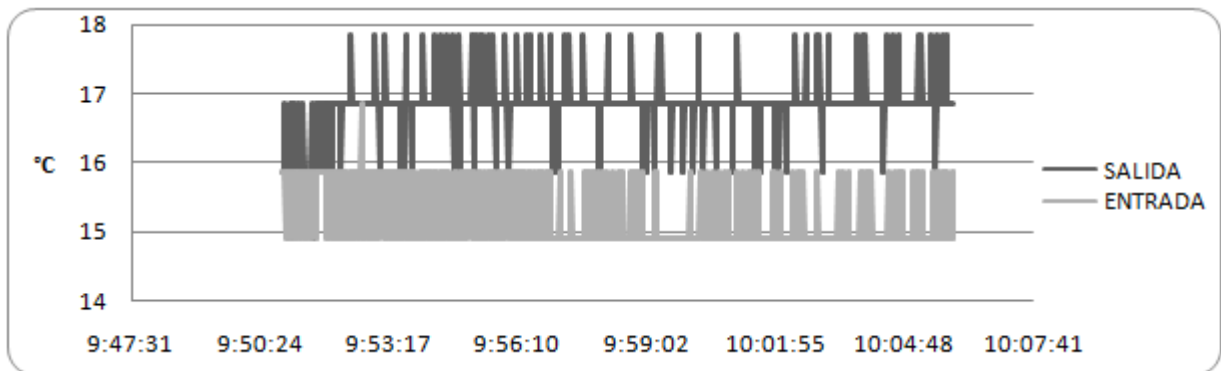


Figura 11.10: Perfiles de temperatura, 7 noviembre (1^{er} experimento)

Apéndice F: Tamaño óptimo de Concentrador

El primer paso fue encontrar el diámetro focal óptimo para lo cual se calcularon las áreas de concentración para distintos valores de alturas focales y diámetros focales. El diámetro óptimo corresponderá a aquel que posea un área de concentración más grande. El área de concentración se calcula a 1 metro de radio para normalizar los datos obtenidos.

Tabla 12.1: Área de Concentración [m²] en función de altura focal y diámetro focal

		Altura Focal [cm]				
		200	250	300	350	400
Diámetro Focal [cm]	30	2,536	2,589	2,619	2,638	2,650
	25	2,911	2,975	3,011	3,034	3,049
	20	3,020	3,080	3,115	3,136	3,150
	15	3,162	3,225	3,261	3,282	3,297
	10	3,060	3,111	3,141	3,159	3,171

Se aprecia que el diámetro óptimo corresponde 15 [cm] y que a mayor distancia focal, mayor es el área. Por lo que el criterio de óptimo para la distancia focal será económico. En la Tabla 12.2 se aprecian los costos individuales de los concentradores que se calcularon de la misma manera que para la Tabla 4.2, haciendo la diferencia entre el costo del sistema de seguimiento, cantidad de material para la estructura y el concentrador, mano de obra y servicio de corte laser según el diámetro analizado.

Tabla 12.2: Costos individuales de los concentradores estimados

Diámetro Concentrador [m]	Costo
2	\$ 242.000
4	\$ 485.000
6	\$ 890.000
8	\$ 1.458.000
10	\$ 2.188.000

Para la construcción de los equipos se asumirá que el límite de altura focal corresponderá a la mitad del diámetro del concentrador. Si bien no se ha realizado ningún cálculo de resistencia de materiales, se asumirá que esta convención es correcta.

Realizando el análisis de inversión requerida del punto 4.2.1 para una sola línea de concentradores se obtienen las inversiones para cada caso.

Tabla 12.3: Inversión de Concentradores según diámetro para 1 línea

Diámetro	Costo Individual	Cantidad	Inversión
2	242.000	5.353	1.296.000.000
4	485.000	1.822	884.000.000
6	890.000	742	661.000.000
8	1.458.000	430	627.000.000
10	2.188.000	272	596.000.000

Se aprecia que a mayor diámetro menor es la inversión requerida, lo cual es consistente con tener una altura focal mayor.

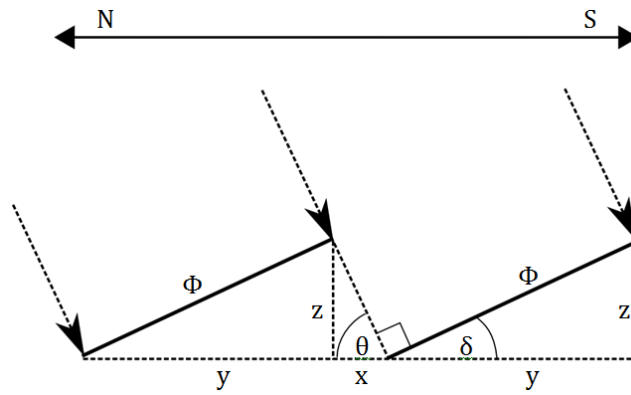
Para el análisis no se considera una sola línea, si no 26 ya que el sistema tiene menos riesgo de paralizarse por alguna falla. Para esas 26 líneas el número de concentradores cambia bastante ya que el rango de temperaturas de 10°C requerido se sobrepasa en todos los casos por lo que existe un sobredimensionamiento desde un punto de vista energético. Entonces aquel sistema que se acerque más al rango de temperatura de 10°C tendrá un sobredimensionamiento menor y por ende se requerirá una inversión menor. Es necesario calcular nuevamente la inversión.

Tabla 12.4: Inversión de Concentradores según diámetro para 26 líneas

Diámetro	Costo Individual	Cantidad	Inversión
2	242.000	5.382	1.303.000.000
4	485.000	1.846	896.000.000
6	890.000	754	672.000.000
8	1.458.000	442	645.000.000
10	2.188.000	312	683.000.000

En este caso la inversión menor corresponde a los concentradores de 8 [m] de diámetro que son finalmente los que se utilizan en el análisis económico del presente informe.

Apéndice G: Cálculo Distancia Este-Oeste



$$\delta = 90^\circ - \theta$$

$$\operatorname{tg}(\theta) = \frac{z}{x} \quad \Rightarrow \quad x = \frac{z}{\operatorname{tg}(\theta)}$$

$$\operatorname{tg}(\delta) = \frac{z}{y} \quad \Rightarrow \quad y = \frac{z}{\operatorname{tg}(\delta)} = \frac{z}{\operatorname{tg}(90^\circ - \theta)}$$

$$\operatorname{sen}(\delta) = \frac{z}{\Phi} \quad \Rightarrow \quad z = \Phi \cdot \operatorname{sen}(\delta) = \Phi \cdot \operatorname{sen}(90^\circ - \theta)$$

$$\Rightarrow \quad x + y = \frac{\Phi \cdot \operatorname{sen}(90^\circ - \theta)}{\operatorname{tg}(\theta)} + \frac{\Phi \cdot \operatorname{sen}(90^\circ - \theta)}{\operatorname{tg}(90^\circ - \theta)}$$

$$\Rightarrow \quad x + y = \Phi \cdot \operatorname{sen}(90^\circ - \theta) \left(\frac{1}{\operatorname{tg}(\theta)} + \frac{1}{\operatorname{tg}(90^\circ - \theta)} \right)$$