

Universidad Técnica Federico Santa María  
Departamento de Mecánica



# Desalinizador solar de múltiples efectos a alta temperatura

Autor:

Ing. Eduardo Antonio Gálvez Soto

Tesis para optar al grado de  
Doctor en Ingeniería Mecánica

Profesor Tutor:

Dr. Ing. Pedro Roth Urban

2001



Desalinizador solar  
de múltiples efectos  
a alta temperatura


**Jurado:**

Dr. Ing. Pedro Roth Urban



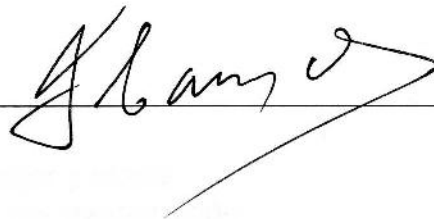
---

Dr. Ing. Jürgen Rheinländer



---

Dr. Ing. Fernando Carvajal Guerra



---

## Indice General

### “Desalinización Solar de Múltiples Efectos a Alta Temperatura”

	Página
<b>Preliminares:</b>	
Resumen	i
Abstract	ii
Definición de Parámetros	iii
Introducción	v
Objetivos	vii
 <b>CAPITULO I Generalidades:</b>	
1.1 Desalinización solar en Chile	1
1.2 Desalinizador de múltiples efectos	3
1.3 Niveles de producción de destilado, eficiencia	7
 <b>Aspecto científico</b>	
 <b>CAPITULO II Modelo Matemático</b>	
2.1 Análisis térmico	12
2.1.1 Funcionamiento del sistema desalinizador	12
2.1.2 Componentes del sistema	13
2.1.3 Formas de energía	15
2.1.4 Balance de energía	17
2.2 Ecuaciones de transferencia de calor	19
2.2.1 Calor por evaporación	19
2.2.2 Calor por convección	20
2.2.3 Calor por conducción	20
2.2.4 Calor por radiación	21
2.2.5 Calor sensible	21
2.2.6 Calor por fugas	22
2.3 Coeficientes de transferencia de calor y masa	22
2.3.1 Coeficiente de transferencia por evaporación	22
2.3.2 Coeficiente por convección	23
2.3.3 Coeficiente por convección forzada	23

**CAPITULO III Simulación computacional**

3.1	Generalidades	24
3.2	Ventana principal	24
3.3	Componente $w_T$ , fondo del desalinizador	27
3.3.1	Cálculo de la Temperatura $T_{wT}$	29
3.3.2	Cálculo del Calor Sensible y de fuga	31
3.3.3	Cálculo del Calor por Conducción	33
3.3.4	Cálculo del Calor por Radiación	35
3.3.5	Cálculo del Calor por Evaporación	37
3.3.6	Cálculo del Calor por Convección	39
3.4	Componente B1, Primera Bandeja	41
3.4.1	Componentes B2, B3, B4, B5. Segunda a Quinta Bandejas	43
3.5	Componente Tapa, Techo del Desalinizador	44
3.6	Entradas del Programa	46
3.6.1	Entrada de energía	46
3.6.2	Entrada de datos	48
3.7	Salidas del Programa	51

**Aspecto Tecnológico****CAPITULO IV Diseño y construcción de Prototipo**

4.1	Generalidades	52
4.2	Dimensiones generales	52
4.2.1	Dimensiones del desalinizador	53
4.2.2	Dimensiones del estanque de alimentación	53
4.2.3	Sistema de control de agua de alimentación	54
4.2.4	Colector solar	56
4.2.5	Estanque de expansión	57
4.2.6	Estructura soporte del desalinizador	58
4.2.7	Estructura soporte del colector solar	59
4.2.8	Tuberías de conexión colector-desalinizador	59
4.2.9	Sistema de acumulación de condensado	60
4.3	Aspectos generales de diseño	61
4.3.1	Bandejas	61
4.3.2	Canaletas	62
4.3.3	Tubos de nivel	62
4.3.4	Materiales	62
4.4	Sistema de desalinización solar	64
4.5	Construcción e instalación de prototipo	65
4.6	Programa de mantención	76

## Aspecto Social

### CAPITULO V Proyecto de aplicación para caleta pesquera aislada

5.1	Datos del proyecto	81
5.2	Resumen ejecutivo	83
5.3	Descripción del proyecto	84
	5.3.1 Problema central	84
	5.3.2 Línea basal	84
	5.3.3 Población objetivo	84
	5.3.4 Descripción y metas	85
	5.3.5 Misión y objetivos	85
	5.3.6 Entorno	86
5.4	Relevancia del proyecto	87
	5.4.1 Mérito innovador	87
	5.4.2 Externalidades	87
	5.4.3 Impacto	88
	5.4.4 Resultados esperados	88
	5.4.5 Contribución a la solución del problema central	88
5.5	Viabilidad del proyecto	89
5.6	Metodología	90
5.7	Matriz de Planificación del Proyecto	91
5.8	Estructura organizativa del proyecto	92
5.9	Presupuesto analítico	93
5.10	Evaluación económica y análisis beneficio-coste	94
	5.10.1 Situación con y sin proyecto	94
	5.10.2 Beneficios del Proyecto	95
	5.10.3 Cuantificación de los Beneficios	96
	5.10.4 Costos del Proyecto	97
	5.10.5 Cuantificación de los Costos	97
	5.10.6 Rentabilidad del proyecto	97
	5.10.7 Elasticidad	97
5.11	Cronograma de actividades, plan operativo y plan de monitoreo.	101
	5.11.1 Cronograma de actividades.	101
	5.11.2 Plan operativo.	101
	5.11.3 Plan de monitoreo del proyecto	104

**CAPITULO VI Resultados**

6.1	Resultados y validación experimental	106
6.2	Medición de Temperaturas	108
6.3	Medición de Condensado	110
6.4	Error de medición	115
6.5	Radiación solar	119
6.6	Mecanismos de transferencia	121
6.7	Rendimiento	127
6.8	Validación con datos de la UTFSM	133
6.9	Validación con datos del SIJ	139

**CAPITULO VII Optimización de parámetros**

7.1	Generalidades	144
7.2	Efecto sobre el condensado y temperatura del agua	144
7.3	Área de evaporación	149
7.4	Separación de Bandejas	150
7.5	Volumen de agua	151

**Finales:**

Análisis general	152
Conclusiones generales	158
Literatura referencial	160

## Apéndice

A1	Costo de los sistemas desalinizadores	163
	A1.1 Generalidades	163
	A1.2 Costos	164
	A1.3 Inversión	164
	A1.4 Amortización	165
	A1.5 Costos de operación	166
	A1.6 Costos totales	167
	A1.7 Cálculo del costo del agua para la desalinización de solar	169
	A1.8 Costos para el nuevo equipo desalinizador	170
A2	Calidad de aguas	171
	A2.1 Acceso al agua potable	171
	A2.2 Consumo de agua	173
	A2.3 Escasez de agua	174
	A2.4 Calidad del agua destilada y de mar	174
A3	Colector solar	176
	A3.1 Generalidades	176
	A3.2 Conversión térmica a baja temperatura	177
	A3.3 Conversión térmica a temperaturas medias	179
	A3.4 Conversión térmica a alta temperatura	180
	A3.4.1 Razón de concentración	181
	A3.5 Orientación y ángulo de inclinación de colectores solares	183
	A3.6 Balance de energía en un colector solar plano	184
	A3.7 Coeficiente total de pérdidas de calor	186
	A3.8 Calor útil	189
	A3.8.1 Factor de eficiencia de la aleta, F1	189
	A3.8.2 Factor de eficiencia de la sección, F2	190
	A3.8.3 Factor de eficiencia global, F3	190
A4	Programa de capacitación	192
	A4.1 Conceptos básicos de Energía solar	193
	A4.2 Proceso de desalinización del agua	202
	A4.3 Destilador solar	205
A5	Termocuplas	207
A6	Datalogger	212

## Resumen

En este trabajo de Tesis se desarrolla un proyecto de investigación amplio en el que se mezclan aspectos científicos, tecnológicos y sociales. Para esto se ha realizado un estudio de un nuevo modelo de desalinizador solar de múltiples efectos que trabaja a alta temperatura.

El desalinizador en estudio consta de 5 efectos con una área de evaporación de  $0.49 \text{ m}^2$  con una bandeja de doble fondo para el intercambio de calor y 5 bandejas principales que actúan como evaporador y condensador a la vez. La energía se obtiene a través de un colector solar de  $2 \text{ m}^2$  con superficie selectiva. El fluido térmico utilizado en el colector es una mezcla de agua destilada Etilen Glicol

Se ha desarrollado un programa computacional que a través de un modelo matemático, muestra el comportamiento de funcionamiento del equipo. Este programa ha sido elaborado utilizando Matlab-Simulink® con el apoyo del software biblioteca Carnot® que ha desarrollado el Solar-Institut Jülich de la Fachhochschule de Aachen en Alemania.

Se ha diseñado y construido un prototipo del desalinizador solar. El diseño del equipo ha sido orientado a satisfacer las necesidades de agua de comunidades de pescadores artesanales aisladas en el norte de Chile. Sus características básicas son: compacto, modular, de bajo costo, manutención sencilla, vida útil significativa y de alta eficiencia.

Para la complementación del buen funcionamiento del equipo desalinizador, se propone un programa de manutención, un programa de capacitación.

De acuerdo al programa de simulación y al análisis estadístico, la variación promedio máxima de los valores de temperatura y producción de condensado simulados y experimentales son de  $2.23 \text{ }^\circ\text{C}$  con una desviación estándar máxima de  $3.46 \text{ }^\circ\text{C}$  y de  $2.49$  litros con una desviación estándar de  $4.8$  litros respectivamente.

Los resultados demuestran que la producción de agua supera con creces la producida por sistemas solares convencionales. El nivel alcanzado por este equipo supera los  $20 \text{ lt/d}$  y su coeficiente de operación es del orden de  $2.0$ .

### Palabras claves:

Desalinización, múltiples efectos, energía solar, colector solar, análisis térmico, coeficiente de evaporación, simulación computacional, diseño, construcción de destilador,

## Abstract

In this work of Thesis a project of wide investigation is developed in where they mix scientific, technological and social aspects. It for this have been carried out a study of a new model of solar distiller of multiple effects that works to high temperature.

The distiller in study consists of five effects with an area of evaporation of  $0.49 \text{ m}^2$  with one tray of double fund for the exchange of heat and five main trays that they act like evaporator and condenser at the same time. The energy is obtained through a solar collector of  $2 \text{ m}^2$  with selective surface. The thermal fluid used in the collector is a mixture of water distilled and Ethilen Glycol.

A computer program has been developed through a mathematical model, it show the behavior of operation of the equipment. This program has been elaborated using Matlab-Simulink® with the support of the software Carnot® library that has developed in the Solar-Institut Jülich of the Fachhochschule of Aachen in Germany.

We have designed and built a prototype of the solar distiller. The design of the equipment has been guided to satisfy the necessities of water of handmade fishermen's communities isolated in the north of Chile. Their basic characteristics are: compact, to modulate, of low cost, simple maintenance, significant useful life and of high efficiency.

For the complementation of the good operation of the equipment distiller, it proposes a program of maintenance and a program of training.

According to the program of simulation and to the statistical analysis, the variation average maxim of the values of temperature and production of condensing simulate and experimental they are of  $2.23 \text{ }^\circ\text{C}$  with a deviation standard maxim of  $3.46 \text{ }^\circ\text{C}$  and of  $2.49$  liters with a standard deviation of  $4.8$  liters respectively.

The results demonstrate that the production of water overcomes amply her produced by conventional solar systems. The level reached by this equipment overcomes the  $20 \text{ lt/d}$  and their coefficient of operation is of the order of  $2.0$ .

### Key words:

Distillation, multiple effects, solar energy, solar collector, thermal analysis, coefficient of evaporation, simulation, design, construction of solar distiller,

**Definición de parámetros:**

<u>Nomenclatura</u>	<u>Definición</u>	<u>Unidades</u>
Ac	: Area de condensación	(m <sup>2</sup> )
A <sub>c</sub>	: Area efectiva del colector	(m <sup>2</sup> ),
A <sub>e</sub>	: Area de evaporación	(m <sup>2</sup> )
C	: Razón de concentración	(%)
COP	: Coeficiente de operación	(%)
c <sub>p</sub>	: Calor específico	(J/kg K)
dss	: Distancias entre bandejas	(m)
dT/dt	: Rapidez de cambio de temperatura / tiempo	(K/s)
F <sub>12</sub>	: Factor de forma radiativa	( )
F <sub>f</sub>	: Factor de fuga	( )
GOR	: Razón de capacidad ganada	(%)
Gr	: Número de Grashoff	( )
hc	: Coeficiente de convección	(W/m <sup>2</sup> K)
he	: Coeficiente de evaporación	(W/m <sup>2</sup> K)
H <sub>T</sub>	: Energía solar incidente	(W/m <sup>2</sup> )
I	: Radiación solar	(W/m <sup>2</sup> )
K <sub>1</sub>	: Conductividad térmica de la placa interior	(W/m K)
Le	: Número de Lewis	( )
M	: Peso molecular	(kg/kmol)
m <sub>t</sub>	: Masa acero inoxidable y agua contenida	(kg)
m <sub>w</sub>	: Masa de agua en la bandeja	(kg)
mCp	: Capacidad calorífica del fluido	(J/°C)
m <sub>D</sub>	: Producción de agua diaria específica	(kg/m <sup>2</sup> d)
P	: Presión	(Pa)
Pr	: Numero de Prandtl	( )
Q <sub>c</sub>	: Calor por convección	(W)
Q <sub>colector</sub>	: Calor proporcionado por el colector solar	(W)
Q <sub>e</sub>	: Calor por evaporación	(W)
Q <sub>especifico</sub>	: Energía específica	(J/kg)
Q <sub>especificoWR</sub>	: Energía específica con recuperación de calor	(J/kg)
Q <sub>f</sub>	: Calor transferido por fuga de vapor	(W)
Q <sub>fc</sub>	: Calor por conducción por los lados del destilador	(W)
Q <sub>perdidas</sub>	: Calor debido a pérdidas no consideradas	(W)
Q <sub>piso</sub>	: Calor por Conducción por el piso	(W)
Q <sub>r</sub>	: Calor por radiación térmica	(W)
Q <sub>se</sub>	: Calor sensible del agua de alimentación	(W)
Q <sub>sol</sub>	: Radiación solar	(W/m <sup>2</sup> )
Q <sub>ss</sub>	: Calor sensible del destilado	(W)
Q <sub>techo</sub>	: Calor por Conducción por el techo	(W)
Q <sub>util</sub>	: Energía utilizada del colector	(W/m <sup>2</sup> )
r	: Calor latente de vaporización	(J/kg)
T <sub>t</sub>	: Temperatura de la bandeja	(K)
T <sub>w</sub>	: Temperatura del agua	(K)
U <sub>g</sub>	: Coeficiente global de transferencia	(W/m <sup>2</sup> K)

$U_L$	: Coeficiente global de pérdidas	(W/m <sup>2</sup> K)
$v_w$	: Velocidad del viento	(m/s)
$\beta$	: Coeficiente de dilatación térmica	(1/K)
$\delta_1$	: Espesor de la placa interior	(m)
$\Delta T$	: Variación de temperatura	(K)
$\varepsilon$	: Emisividad	( )
$\eta_{etapa}$	: Rendimiento de etapa	(%)
$\eta_{sistema}$	: Rendimiento del sistema	(%)
$\eta_{WR}$	: Eficiencia del sistema con recuperación de calor	(%)
$\Theta$	: Angulo subtendido	(°)
$\mu$	: Viscosidad dinámica	(Pa s)
$\rho$	: Densidad	(kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_d$	: Reflectancia difusa	( )
$\sigma$	: Constante de Stefan-Boltzmann	(W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )
$\tau_a$	: Transmitancia - Absortancia	( )

## Introducción

Los problemas energéticos del mundo así como la denominada crisis del petróleo son situaciones que se vienen arrastrando desde varias décadas y hoy en día se hace mucho más notorio. Si a esto se le agregan los problemas de contaminación de la atmósfera, fuentes de agua y la forma de cómo se puede proteger el medio ambiente, el aporte de investigaciones que colaboren en este sentido adquiere una relevancia fundamental.

En nuestro país ya en los años 60 había preocupación por este echo y es así como se definen algunas políticas que dan una importancia relativa al tema de las fuentes alternativas de energía. La energía solar y la energía eólica toman fuerza a partir de esos años, con investigaciones en el campo de la destilación solar y mapas eólicos. Lo más relevante era tener la información mas completa de datos meteorológicos en Chile, como por ejemplo, los niveles de radiación solar, las velocidades del viento y las temperaturas ambientales en todas las zonas posibles. Además se desarrollan investigaciones en el ámbito de la energía solar fotovoltaica.

En la actualidad cobra aun mayor relevancia el uso de las energías renovables ratificando las visiones de los años 60. En este sentido se han desarrollado algunas investigaciones en el campo de la desalinización de agua de mar utilizando como fuente de energía, la solar.

En vista de la escasez de agua en muchas zonas áridas de la tierra, se han desarrollado numerosos procedimientos tecnológicos para la desalinización de agua de mar y de agua salobres. Los procedimientos térmicos, por ejemplo los de varias etapas y destiladores de múltiple efecto, figuran con aproximadamente 74% del total de la producción del mercado para la instalación de desalinizadores. Las instalaciones de osmosis reversa suman 22% aproximadamente, con tendencia a subir. El resto, 4% son plantas de condensación de vapor.

Debido al alto nivel de inversión y al alto costo de mantención, el uso de estas instalaciones de grandes tecnologías no es posible construirlas ni implementarlas en muchas zonas rurales costeras de los países en desarrollo. Para esto existe una demanda de pequeñas instalaciones en muchos lugares, con mantenimiento sencillo, que sean económicas y eficaces. El uso de la energía solar o el calor residual puede ser usado aquí para la desalinización de agua de mar o agua salobre.

De acuerdo a lo anterior, este trabajo de Tesis propone desarrollar un proyecto de investigación amplio en el que se mezclan aspectos científicos, tecnológicos y sociales. Para esto se ha realizado un estudio de un nuevo modelo de desalinizador solar de múltiples etapas de cinco efectos, que trabaje a alta temperatura.

En el aspecto científico, se desarrolla un modelo matemático que a través de un programa computacional, muestra el comportamiento de funcionamiento del equipo. Este programa es elaborado utilizando Matlab-Simulink con el apoyo del software biblioteca Carnot que ha desarrollado el Solar-Institut Jülich de la Fachhochschule de Aachen en Alemania.

En el aspecto tecnológico, se diseña y construye un prototipo del desalinizador solar. El diseño del equipo está enfocado a un equipo compacto, modular, de bajo costo, mantención sencilla, vida útil significativa y de alta eficiencia.

El aspecto social considera el desarrollo de esta tecnología aplicada a comunidades de pescadores artesanales aisladas y la elaboración de un programa de capacitación.

## **Objetivos**

### **Objetivos generales**

Proponer un modelo matemático para la desalinización solar de múltiples efectos a alta temperatura.

Elaborar un programa computacional para la simulación de un desalinizador solar de múltiples efectos a alta temperatura.

Proponer un equipo de desalinización optimizado usando el programa de simulación.

Desarrollar la tecnología que permita la construcción de un nuevo equipo de desalinización solar compacto, modular, de bajo costo, mantención sencilla, vida útil significativa y de alta eficiencia.

### **Objetivos específicos**

Validar el programa de simulación con datos de funcionamiento en terreno.

Construir planos de fabricación del equipo desalinizador.

Confeccionar programas de mantención.

Elaborar un programa de capacitación

## CAPITULO I Generalidades

### 1.1 Desalinización solar en Chile

Las investigaciones sobre destilación solar en Chile datan de mucho tiempo y comienzan con la Planta de destilación de agua de las Salinas en la segunda región cerca de Antofagasta, construida por Carlos Wilson e instalada en 1872, considerada la primera planta de destilación solar del mundo.

En el año 1960 se inician las investigaciones en el Laboratorio de Energía Solar de la Universidad Técnica Federico Santa María en Valparaíso, diseñando construyendo e instalando diferentes tipos de destiladores como los de batea y los de paño.

Entre los años 1967 y 1968 se instala una planta experimental de bateas de concreto diseñadas por Germán Frick, en el pueblo de Quillagua entre la primera y segunda Región del norte de Chile.

Todos estos trabajos sobre destilación solar presentaron producciones entre 2 y 4 (lt/m<sup>2</sup> día) para una radiación diaria de 18000 (kJ/m<sup>2</sup>).

Estos antecedentes se pueden encontrar en las diferentes publicaciones realizadas por los autores. Como ejemplo se tiene: Hirschmann, J. "Evaporadores y destiladores solares en Chile". United Nations conference on new sources of energy, 1961, Hirschmann, J. "Project of solar desalination plant for the North of Chile". Proc. First International symp. on water desalination, Washington DC, 1965, Frick, G y Hirschmann, J. "Theory and experience with solar still in Chile". Solar energy 14(4), 405-413, 1973.

En los años 80 la Universidad de Tarapacá desarrolla algunas experiencias en el área, destacándose el "Diseño de un sistema modular desalinizador de agua de mar usando energía solar, Maturana, L. Caiconte, C Ezequiel A., 1983 y el "Análisis y experimentación de la evaporación y calentamiento del agua de mar, Muñoz, C. Urzua, R., 1987. También en este periodo, la Universidad Santa María sigue en la línea desarrollando los trabajos de Destilación solar 1 y 2 de Roth, P. Escobar F., Perez G. Valenzuela U., 1980-1986 y Destiladores Híbridos de Cordero, F. Roth P, 1984

En los 90 se destacan los avances en encontrar nuevas formulaciones matemáticas, nuevos modelos teóricos con el fin incrementar los niveles de producción, rendimientos de los equipos, reducir los costos de instalación, optimizar el uso de materiales y se trabaja, debido al avance tecnológico, en las simulaciones computacionales. También cobra fuerza la aplicación de los

sistemas de desalinización solar bajo una perspectiva social orientando algunos estudios a satisfacer las necesidades de localidades aisladas.

Es así como se desarrollan estudios como por ejemplo: "Modelo matemático de la destilación en vacío con energía solar. Fuentes R., UTFSM, 1997. "diseño, instalación, evaluación y optimización de destiladores solares para el abastecimiento de agua en localidades aisladas, Farias G Rodríguez, G. UTA, 1997, "Desalinización de agua para aplicaciones hidropónicas mediante sistema de energía solar en Villa Frontera, Comuna de Arica". Schmidt R., UTA, 1997, "Diseño y evaluación de modelo experimental de destilador solar en vacío multietapas", Fuentes R., UTA, 1998, "Aspectos teóricos para la destilación solar de agua en presiones reducidas", Fuentes R., SENESE X. Punta Arenas. 1998.

Debido a la relevancia que tienen estos sistemas aplicados a localidades aisladas, el Tema de Tesis Doctoral aquí presentado enfoca el análisis a satisfacer una demanda significativa en primer lugar de las comunidades pesqueras aisladas donde la demanda de agua es baja, donde no existe energía eléctrica, donde la radiación solar es alta y donde no existe agua propia para consumo en el lugar. A la vez se pretende desarrollar un nuevo modelo matemático que muestre el comportamiento de un nuevo desalinizador de múltiples etapas que trabaja a alta temperatura.

## 1.2 Desalinizador de múltiples efectos

Un desalinizador de múltiples efectos es por definición un equipo de alto rendimiento en que produce una gran cantidad de destilado para una radiación dada en una misma área que para un desalinizador simple. Esto se cumple utilizando el calor latente liberado por la condensación del vapor de agua, el cual es liberado a la atmósfera, para calentar mayor cantidad de agua salina a más baja temperatura. Así, uno tiene un sistema de múltiples fases en el que cada fase produce menor cantidad de agua en forma sucesiva. Sin embargo el total de la producción es lo que hace interesante el uso de estos sistemas.

Un destilador de múltiples efectos opera esencialmente bajo el mismo principio que los destiladores convencionales de batea. La energía solar transmitida es absorbida en la placa absorbidora. El agua en contacto con el absorbedor es calentada y luego parte de esta es evaporada. La cubierta transparente del destilador está mas fría que la placa absorbidora o agua salina y por lo tanto el vapor se condensa en la cubierta. El calor latente liberado debido a la condensación es disipado mediante un complejo mecanismo de transferencia de calor involucrando la conducción, la convección y la radiación.

En general los sistemas de múltiples fases requieren de un diseño algo mas sofisticado y operan eficientemente sólo a temperatura alta en comparación con los sistemas de simple efecto.

Estos sistemas de múltiples etapas son apropiados para ser instalados en regiones áridas, donde el terreno ocupado por unidad de destilado sea favorable tanto económicamente como estéticamente.

El costo de inversión inicial de los desalinizadores de múltiples efectos es algo mayor comparativamente con los de simple efecto, pero la compensación es, por supuesto, la mayor cantidad de destilado que se produce por metro cuadrado de superficie [4].

Si bien es cierto que los tipos de destiladores de simple efecto presentan algunas ventajas, los rendimientos no alcanzan valores mayores a los ya encontrados, esto es, no superan los (4 lt/m<sup>2</sup>/dia). Otro aspecto que es importante considerar, es el aprovechamiento del Calor Latente que se pierde en los sistemas simples, esto es, el uso de mas de una etapa. Algunos autores han iniciado la búsqueda de nuevas alternativas para mejorar la capacidad de destilado y la reutilización del Calor Latente y aquí nacen los diferentes sistemas de destilación alternativos como lo son los destiladores por difusión, los destiladores en vacío, los destiladores de múltiples efectos tipo chimenea y los de dos o de tres efectos. Claro, cada uno con sus propias deficiencias como lo es el caso de los destiladores por difusión [5] el cual tiene problemas en la operación y en la mantención en terreno pues no se adaptan bien en esas

condiciones o bien los del tipo en vacío que requieren sofisticados equipos y condiciones para establecer el vacío requerido.

Estudios al respecto muestran que los destiladores de múltiples efectos presentan mejores condiciones de funcionamiento [5] que los del tipo básico. En 1990, Fernández y Chargoy publican algunos datos de un destilador solar de múltiples etapas e indica que este tipo de destilador presenta un gran potencial.

En el proceso de destilación de múltiples efectos el vapor que proviene desde el primer evaporador se condensa en el segundo y el calor de esta condensación sirve para evaporar el agua salina de este último. Por consiguiente el segundo evaporador actúa como condensador del vapor del primero y la tarea de este vapor es como el calor que recibe el primero, esto es, a través de un sistema solar u otro alternativo. En forma similar, el tercer evaporador actúa como condensador del segundo y así sucesivamente. Cada evaporador en esta serie es denominado efecto.

La cantidad de agua fresca producida por unidad equivalente de vapor calentado se incrementa en forma casi proporcional al número de efectos. Por otro lado el incremento del número de efectos tiene mayores costos de inversión.

Al considerar las ventajas comparativas de un desalinizador de múltiples efectos y teniendo en cuenta las condiciones de donde puede ser instalado, esto es, en caletas pesqueras aisladas en el norte de Chile, es que se propone introducir un nuevo modelo de desalinizador de múltiples efectos que utilice la energía solar como fuente de alimentación para su funcionamiento.

La cantidad de cinco efectos que se propone es de acuerdo a los niveles de entrega de energía y considerando un equipo compacto, modular, de bajo costo, manutención sencilla y de alta eficiencia. Además de haber considerado las investigaciones realizadas en el Solar-Institut Julich.

Las ventajas del sistema del nuevo desalinizador de múltiple efectos que se propone, pueden resumirse como sigue:

- Un equipo sencillo y económico en su construcción
- Posibilidad de ampliación modular del sistema
- Utilización de un colector de bajo costo como fuente de calor
- Ausencia de agua salada o partícula de suciedad en el ciclo del colector (sistema cerrado)
- Funcionamiento por termosifón. No es necesario energía para una bomba durante el ciclo del colector
- Posibilidad de usar otra fuente de energía (Utilización de calor residual)
- Posibilidad de uso de materiales de bajo costo (Materiales usados)
- Posibilidad de cambio, reparación o limpieza de cada etapa

- Mantenimiento simple
- Significativa vida útil de la instalación.

Al desarrollar un balance energético de un modelo de desalinizador de múltiples etapas, se establecen las ecuaciones que rigen el comportamiento energético para cada mecanismo de transferencia de calor. Aquí se desprende que lo más relevante de un análisis de esta naturaleza radica en determinar los diferentes coeficientes de transferencia de calor y masa, y que es parte del trabajo que se desarrollará en esta Tesis.

Muchos investigadores, desde Dunkle, en los años 60, Malik en los años 80 y Clark en los años 90 desarrollaron algunas correlaciones [1] que han permitido el avance en este campo.

Se han usado numerosas relaciones empíricas para poder predecir los coeficientes de transferencia de calor y los coeficientes de transferencia de masa para así determinar la capacidad de producción de destilado y el comportamiento de la temperatura a través del tiempo, esto es en el caso de los modelos de simulación. La mayoría de las relaciones que se han usado están basadas en estudios de simulación, como lo es por ejemplo, las relaciones semi-empíricas formuladas por R. V. Dunkle (1961) [1] para la transferencia de calor y masa interna en un destilador, cuyos valores de las constantes  $C$  y  $n$  son de 0.075 y  $1/3$  respectivamente para un  $Gr > 3.2e5$ . Sin embargo estas relaciones presentan algunas limitaciones [14] como son:

- Solamente válidas para un rango de temperaturas de operación de alrededor de  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  y una diferencia de temperatura equivalente de aproximadamente  $-1^{\circ}\text{C}$ .
- Independientes de la capacidad volumétrica, es decir, de la distancia promedio entre las superficies de evaporación y condensación.
- Presentan un buen comportamiento para flujos de calor hacia arriba en espacios cerrados en forma horizontal.

Otro ejemplo de formulación fue presentado por Clark (1990) [2] el cual desarrolló un modelo para rangos de temperatura de operación mayores o iguales a  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ , en condiciones simuladas para pequeña inclinación de la superficie de condensación. Él encontró que los valores de los coeficientes de transferencia de masa y convectivos se reducen a la mitad que los presentados por Dunkle. Esto está basado en el hecho que la razón de evaporación es igual a la razón de condensación en una condición ideal. Esta condición es llevada a cabo usando un ventilador a través de la cubierta de condensación la cual no es una solución práctica para sistemas de destilación solar operando en terreno.

En el año 1991 Tiwari y Lawrence intentan incorporar el efecto de la inclinación de la superficie de condensación tomando las mismas constantes propuestas por Dunkle. Posteriormente en el año 1995 Adhikari trata de modificar el valor de estos coeficientes en condiciones simuladas [2].

Adhikari R. S. [1] en el año 1990 muestra diferentes correlaciones de  $C$  y  $n$  para determinar la masa evaporada utilizando los trabajos desarrollados por Mull-Reiher, Vaander Held, De Graaf -Vaander Held y Jakob-Rupta, además realiza estimaciones de masa evaporada utilizando diferentes relaciones del coeficiente de transferencia evaporativo basándose en trabajos de Baum-Bairamov, Clark y Lewis. Con este trabajo, Adhikari propone un coeficiente para usar en las relaciones de  $C$  y  $n$  en función del rango de temperatura usado, esto es 40, 60 y 80 °C.

La mayoría de las investigaciones en el tema de desalinización solar utilizan correlaciones empíricas o semi-empíricas que son válidas a temperaturas de operación bajas, menores de 60 °C. Es por esto que se requiere desarrollar un modelo matemático que pueda mostrar en forma adecuada el comportamiento del desalinizador de múltiples etapas a alta temperatura.

Investigaciones realizadas en el Solar-Institut Jülich de la Fachhochschule de Aachen en Alemania, en la India, en Bahrain y en México, año 1998 [3], en relación con desalinización solar para pequeños consumidores indican que los desalinizadores de múltiples fases tienen y mantienen un gran potencial. Aquí ya se han desarrollado destiladores de hasta cuatro etapas que han proporcionado un incremento del rendimiento en la tercera etapa con un factor de 2.5.

El trabajo a alta temperatura del equipo quiere decir que su temperatura de operación está sobre los 80 °C para todas las etapas y con esto se pretende lograr incrementar significativamente los niveles de producción de agua en comparación con los sistemas convencionales de destiladores solares.

### 1.3 Niveles de producción de destilado, eficiencia

La producción de agua diaria específica  $m_D$  de un destilador solar simple en (kg/m<sup>2</sup>d) se estima a través de la siguiente expresión:

$$m_D = \frac{\text{Energía utilizada del colector}}{\text{Energía específica para la producción de 1 kg de agua}}$$

Es decir,

$$m_D = \frac{Q_{Util}}{q_{especifico}} = \frac{\eta_{sistema} * Q_{sol}}{r + c_w * \Delta T}$$

Al considerar la recuperación de calor, se aplica para la razón de producción  $m_{D,WR}$

$$m_D = \frac{\eta_{sistema} * Q_{Sol}}{q_{especificoWR}} = \frac{\eta_{sistema} * Q_{sol}}{(r + c_w * \Delta T) * (1 - \eta_{WR})}$$

Como valor de comparación de la productividad así como la efectividad se consulta normalmente el valor del COP (Coeficiente de funcionamiento). Para el valor del COP sin calor de recuperación es válido:

$$COP = \frac{m_D * r}{Q_{Sol}} = \frac{\eta_{sistema} * m_D * r}{Q_{Util}}$$

Con calor de recuperación con n etapas, se mejora el valor del COP a un valor  $COP_{WR}$ , esto es:

$$COP_{WR} = COP * \frac{\eta_{etapa}^n - 1}{\eta_{etapa} - 1}$$

La figura 1.1 muestra el potencial teórico de una instalación de desalinización de múltiples etapas dependiendo del número de etapas para dos grados de eficiencia

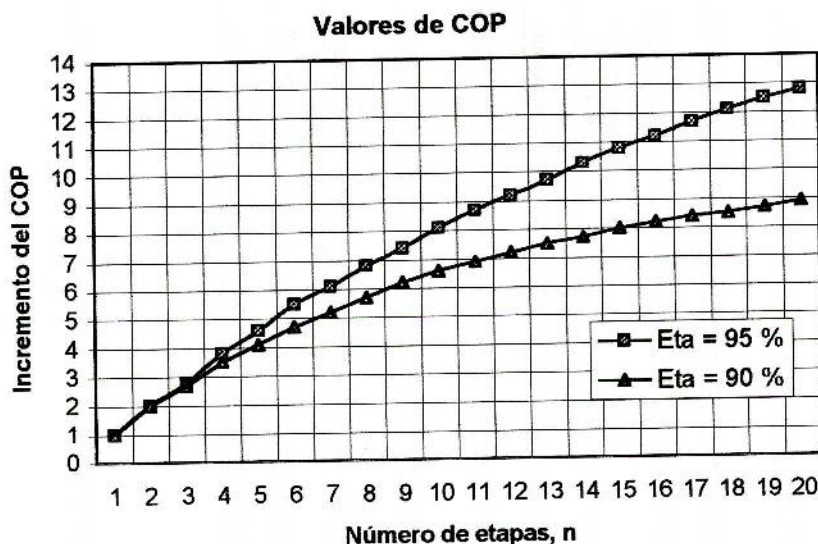


Figura 1.1 Corrige los valores del COP como función del número de etapas con diferentes grados de eficiencia

Los resultados de investigaciones con diferentes equipos de desalinización solar para los pequeños consumidores son comparados en la Tabla 1.1. Esto muestra que el nuevo equipo de desalinización de múltiple fase mantiene un potencial muy grande en sí mismo.

La muy baja producción del campo de experimentación en México se atribuye a defectos de implementación de la instalación. Como los autores confirman en su informe el sistema no estaba cerrado al vapor.

Las investigaciones hasta ahora realizadas han mostrado el posible potencial del nuevo desalinizador de múltiples etapas. Para otros desarrollos y optimizaciones del sistema, está la preparación de un completo modelo multi-dimensional con quien puede tomarse la influencia de los parámetros importante, como la inclinación de las superficies de condensación, tipo de depósitos de calor, así como diferentes acoplamientos para el flujo de calor. Las mediciones sistemáticas del sistema así como la validación de los modelos matemáticos sobre la base del resultado de las mediciones permitirá adicionalmente una práctica útil de interpretación.

La comparación de la Tabla 1.1 clarifica también el factor GOR calculado (Relación de capacidad ganada). El factor GOR para la n-etapa de un destilador múltiple se define como:

$$GOR_n = \frac{\sum (m_{D,n} * r_n)}{m_1 * r_1}$$

Tabla 1.1 Investigaciones sobre instalaciones de desalinizadores solares [3]

Tipo de Desalinizador	Producción	Radiación incidente kWh/m <sup>2</sup> d	Coeficiente de funcionamiento COP = $m_D^*r_i/Q_{sol}$	Razón de producción ganada $GOR = \frac{m_D^*r_i}{m_i^*r_i}$ (Etapas mayor)	Tipo de Investigación	Institución	año
Invernadero	4.5 kg/m <sup>2</sup> d	7.5	0.38	0.38	Mediciones en campo de experimentación con placa absorbadora de 1 m <sup>2</sup> , Creta, Marzo de 1994	Solar-Institut Jülich	1994
Invernadero + economizador	5.15 kg/m <sup>2</sup> d	7.5	0.43	0.43	Mediciones en campo de experimentación con placa absorbadora de 1 m <sup>2</sup> + colector externo de 1 m <sup>2</sup> , Creta, Marzo de 1994	Solar-Institut Jülich	1994
Cascada con recuperación de calor	3.5 kg/m <sup>2</sup> d	4.8	0.37	Sin información	Mediciones en campo de experimentación con placa absorbadora de 1 m <sup>2</sup> y radiación a través de doble vidrio, Jülich, Mayo de 1995	Solar-Institut Jülich	1995
Cascada sin recuperación de calor	4.8 kg/m <sup>2</sup> d	6.8	0.44	0.44	Mediciones en campo de experimentación con placa absorbadora de 1 m <sup>2</sup> , Jülich, Mayo de 1995	Solar-Institut Jülich	1995
Principio de aire húmedo	13.96 kg/m <sup>2</sup> d	7.26	1.21	4.25	Mediciones en campo de experimentación con colectores planos en vacío de 6 m <sup>2</sup> , Fuerteventura, Abril de 1993	Fuerteventura	1993
Multiefecto de 3 etapas	6.9 kg/m <sup>2</sup> d	7.4	0.59	2.25	Mediciones en campo de experimentación con placa absorbadora de 1 m <sup>2</sup> , Jülich, Mayo de 1995	Solar-Institut Jülich	1995
3 etapas, grupo de cubetas	24 kg/m <sup>2</sup> d	6.2	2.43	Sin información	Simulación con datos de verano de Nueva Delhi (sin información del colector)	Centro de Energía Solar, Nueva Delhi	1991
3 etapas, grupo de cubetas	12.2 kg/m <sup>2</sup> d	3.2	2.39	Sin información	Simulación con colector de 1 m <sup>2</sup> + 1 m <sup>2</sup> externo, 3 etapas, datos de Junio de Bahrein, 1989	Universidad de Bahrein	1992
7 etapas, grupo de cubetas	4.25 kg/m <sup>2</sup> d	Sin información	Sin información	Sin información	Campo de experimentación con 20 m <sup>2</sup> con colector de doble vidrio, Baja California México, Septiembre de 1990	Universidad de México, Coyoacan	1995
4 etapas, grupo de cubetas	1.17 l/h (pasado 6 h)	Energía eléctrica	Sin información	2.24	Investigación de laboratorio con fuente de energía constante de 360 W	Solar-Institut Jülich	1995
3 etapas, grupo de cubetas	1.14 l/h (pasado 6 h)	Energía eléctrica	Sin información	2.23	Investigación de laboratorio con fuente de energía constante de 350 W	Solar-Institut Jülich	1995
3 etapas, grupo de cubetas	0.68 l/h (pasado 6 h)	Energía eléctrica	Sin información	Sin información	Investigación de laboratorio con fuente de energía constante de 358 W, cubeta aislada	Centro de Energía Solar de Nueva Delhi	1991

Investigaciones realizadas en el laboratorio del Solar-Institut Julich en Alemania, muestran que el grado de recuperación de calor  $\eta_{st}$  de etapa en etapa es de aproximadamente 90 - 95%, estas investigaciones fueron implementadas para la evaluación de nuevos procedimientos energéticos. Las pérdidas de calor se originan por flujo de calor a través de la aislación de la pared exterior y a través del calor remanente en el flujo de condensado.

A través de la recuperación de calor, la razón de desalinización para una instalación de dos etapas, se incrementa aproximadamente en un factor 1.8 a 1.9; para una instalación de tres etapas el grado de desalinización es aproximadamente un factor 2.5 a 2.6 mayor que en una instalación simple.

En la tabla 1.2 están las mediciones de razón de producción en g/h para una condición estacionaria para un equipo de 1, 2 y 3 etapas. La eficiencia de una etapa simple es de 90%. A través de una mejor aislación y una óptima recuperación de calor permite por si mismo, aumentar el grado de eficiencia.

Mientras mayor sea el número de etapas, menor será el aporte de calor en la última etapa y menor será el rendimiento del equipo.

Experiencia	Número de etapas	flujo de condensado (g/h)	Utilización del calor (%)	Incremento del rendimiento en relación con una etapa
1	1	500	90	1
2	2	900	162	1.8
3	3	1260	227	2.52

Tabla 1.2: Comparación de la razón de condensado con diferentes etapas de un destilador múltiple (entrada de calor a través de un calefactor con una potencia de 350 W)

La figura 1.2 muestra la producción de condensado de etapas individuales como función del tiempo para el experimento de cuatro fases. El incremento de la razón de producción a través de las cuatro etapas se aprecia claramente. Se observa además que en la etapa mayor la producción es menor, dando así un índice claro respecto al número de etapas óptimo en un destilador de esta naturaleza. En esta experiencia se utilizó una energía de 4.1 kWh.

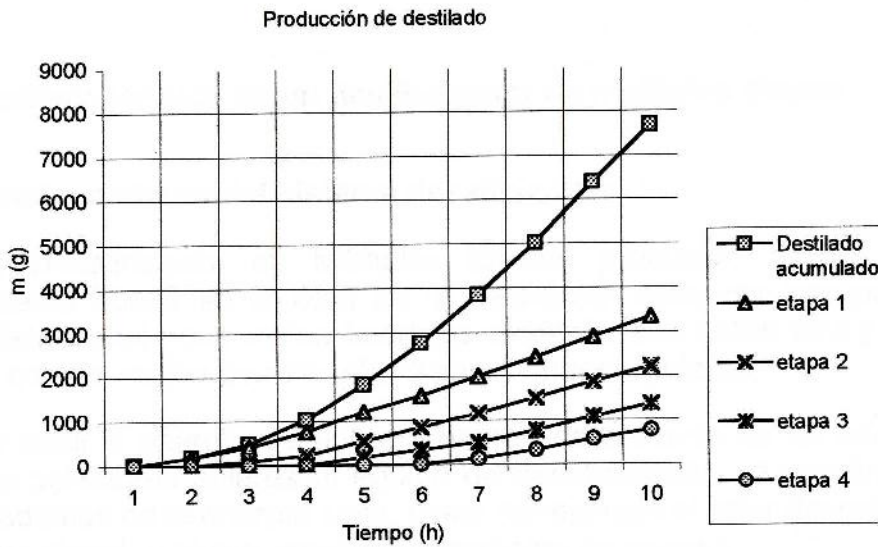


Figura 1.2 Aumento de la producción de condensado a través de un destilador de 4 etapas

### Definición de parámetros:

$M_D$	: Producción de agua diaria específica ( $\text{kg}/\text{m}^2\text{d}$ )
$Q_{\text{util}}$	: Energía utilizada del colector ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
$q_{\text{especifico}}$ ( $\text{J}/\text{kg K}$ )	: Energía específica para la producción de 1 kg de agua
$\eta_{\text{sistema}}$	: Rendimiento del sistema (%)
$Q_{\text{sol}}$	: Radiación solar ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
$r$	: Calor latente de vaporización ( $\text{J}/\text{kg}$ )
$C_w$	: Calor específico ( $\text{J}/\text{kgK}$ )
$\Delta T$	: Variación de temperatura (K)
$Q_{\text{especificoWR}}$	: Energía específica para la producción de 1 kg de agua con recuperación de calor ( $\text{J}/\text{kg}$ )
$\eta_{\text{WR}}$	: eficiencia del sistema con recuperación de calor (%)
$\eta_{\text{etapa}}$	: Rendimiento de etapa (%)
COP	: Coeficiente de operación (%)
GOR	: Razón de capacidad ganada (%)

## CAPITULO II Modelo Matemático

### 2.1 Análisis térmico de un desalinizador de múltiples etapas

#### 2.1.1 Funcionamiento del sistema desalinizador

El Desalinizador de Múltiples Efectos propuesto es un desarrollo relativamente nuevo en el área de la destilación solar con recuperación de calor. Este trabaja con varias bandejas ubicadas una sobre otra y utilizan el calor de condensación de cada etapa para el paso siguiente.

El calor o energía de entrada es llevado a través de un colector o un grupo de colectores solares al equipo de desalinización. También se puede utilizar, además de la energía solar, como por ejemplo el calor desechado de un generador diesel, u otro proceso de generación de energía.

El colector solar es un equipo que trabaja con un fluido térmico capaz de conseguir temperaturas superiores a los 100 °C, fácilmente los 120 °C. Este fluido se hace circular por el interior de la bandeja de doble fondo ubicada en la parte inferior del equipo desalinizador. Se realiza pues un intercambio de calor entre el fluido térmico y el agua de mar. La separación entre los fluidos es una placa de acero inoxidable de 1 mm de espesor.

A través de la entrada de calor, el agua salada recibe en la etapa más baja aproximadamente 90 - 95 °C, se calienta y evapora (convección libre del aire húmedo). El vapor en el ascenso del aire húmedo se condensa en la parte inferior de la próxima etapa del desalinizador. El condensado se desliza, ayudado por la fuerza de gravedad, a través de la inclinación de la pared del condensador, se recoge y se lleva a través de canaletas. Estas canaletas, debido también a su inclinación, permiten la salida del agua al exterior del destilador a través de un conducto conectado a un depósito de condensado.

No todo el vapor que se condensa llega a la canaleta, claro existe una pequeña cantidad que cae nuevamente al agua dentro de las bandejas. Este factor es difícil de determinar y por tanto, se asume a través de un factor de retorno. En el equipo propuesto, se han incorporado además otras canaletas con el fin de coleccionar el condensado de las paredes laterales.

El agua salada es ingresada desde arriba hacia abajo en forma descendente, contraria al flujo de calor proporcionado. Se ha dispuesto un estanque con agua de mar en la parte superior del equipo. El estanque tiene un sistema de control de nivel conectado a la bandeja de doble fondo. Aquí se controla la entrada de agua de mar, es decir, si el nivel de agua de la bandeja

de doble fondo baja, entonces se acciona el sistema de control del estanque permitiendo el ingreso del agua de mar hacia la bandeja superior.

Cada bandeja dispone de un sistema de rebalse que permite que cuando se llegue al nivel de agua deseado el agua fluya hacia la bandeja que está en un nivel mas bajo. Cuando se llene la bandeja superior, el agua rebalsa hacia la bandeja siguiente, luego cuando se llene esa bandeja rebalsará para llenar la siguiente, así sucesivamente hasta llegar a la bandeja de doble fondo. Cuando se llene esta bandeja el sistema de control cerrará el paso del agua. Este sistema permite una alimentación continua dependiente de la cantidad de agua producida.

A través de la condensación se libera la entalpía de vaporización que se entrega a la etapa que está encima y calienta el agua salada contenida en esa etapa. Eso lleva de nuevo a la evaporación y condensación de la etapa que está mas arriba. Esto se repite hasta llegar a la última etapa.

## **2.1.2 Componentes del sistema**

El nuevo desalinizador de múltiples efectos consta de una estructura de vigas de madera de 70x70x1400, rigidizada con planchas de maderas de 700x1400x10, aislada térmicamente por una capa de lana mineral y una cubierta de aislapol. Está revestida, en su interior, con una cubierta de acero inoxidable AISI 316L de espesor de 1 mm.

Las bandejas son de acero inoxidable del mismo tipo con un espesor de 1 mm. En ellas se encuentra la canaleta principal con una inclinación para colectar el condensado desde la superficie inclinada de la bandeja superior.

En la parte inferior se encuentra la bandeja de doble fondo, recipiente que contiene el agua de mar y fluido térmico proveniente del colector solar, denominado Wärmetausche (WT), caja térmica.

La bandeja de doble fondo está diseñada para incorporar un sistema de colector solar, sin embargo es posible adaptar otro tipo de fuente de calor.

En cada bandeja existe una entrada del agua de alimentación así como una salida para el condensado a través de un tubo conectado a la canaleta principal. La capacidad de cada bandeja es de 35 lt y la de doble fondo de 30 lt. Las dimensiones generales del destilador de múltiples efectos son de 882x882x1400.

El esquema propuesto muestra la forma del nuevo destilador de múltiples etapas. Aquí se puede apreciar su forma y los materiales que lo componen.

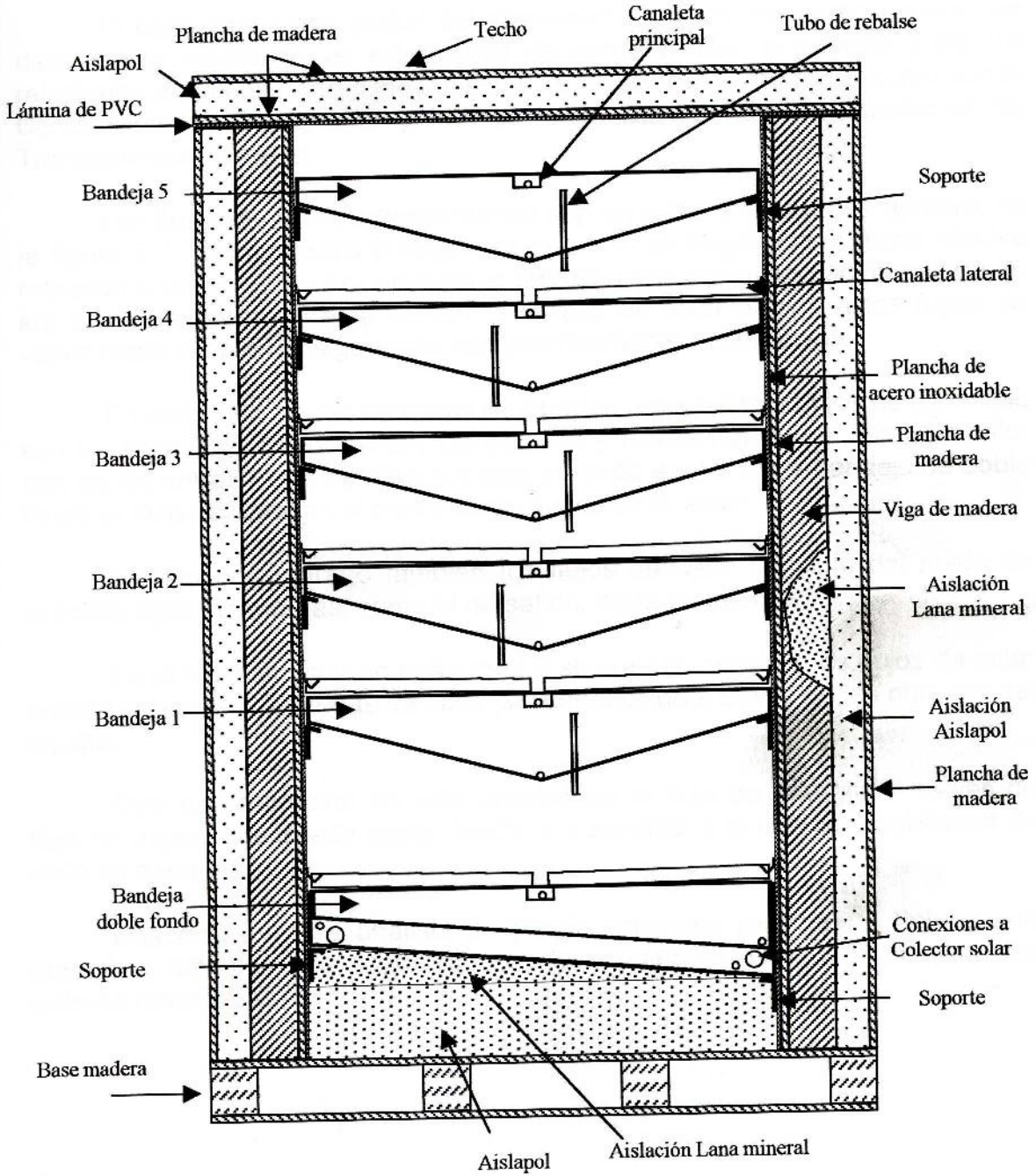


Figura 2.1 Esquema Destilador

### 2.1.3 Formas de Energía

El comportamiento global del destilador de múltiples efectos puede ser descrito por medio de las ecuaciones de conservación de energía y por las relaciones de los diferentes mecanismos de transferencia de calor, como son la Conducción, la Convección y la Radiación, además de las relaciones de Transferencia de masa.

Los flujos de energía involucrados son variados y se pueden apreciar en la figura 2.2. Existen flujos energéticos que son de mayor importancia relativa respecto a otros. Como por ejemplo el flujo de calor por evaporación es uno de los más relevantes en este estudio y el flujo de calor debido a las fugas de vapor hacia las etapas siguientes son prácticamente despreciable.

En cada una de las bandejas se pueden apreciar tres flujos de calor que son los debido a Evaporación, Convección y Radiación. Estos flujos de calor son los de entrada a la bandeja superior en cada etapa. En la bandeja de doble fondo el flujo de calor es el proveniente del colector solar.

Se han considerado también los flujos de calor sensible del fluido de entrada, agua de mar, así como el de salida, agua desalinizada.

En el lado derecho de la figura 2.2 se pueden apreciar los flujos de calor correspondiente a las fugas de calor por conducción a través de las paredes del equipo.

Otra consideración en este análisis es el flujo de energía, a través de flujo de vapor, que puede pasar desde una bandeja a la otra por problemas de sello en cada etapa.

Basados en este análisis se puede entonces realizar un balance de energía y establecer la ecuaciones correspondientes para la modelación del sistema desalinizador.

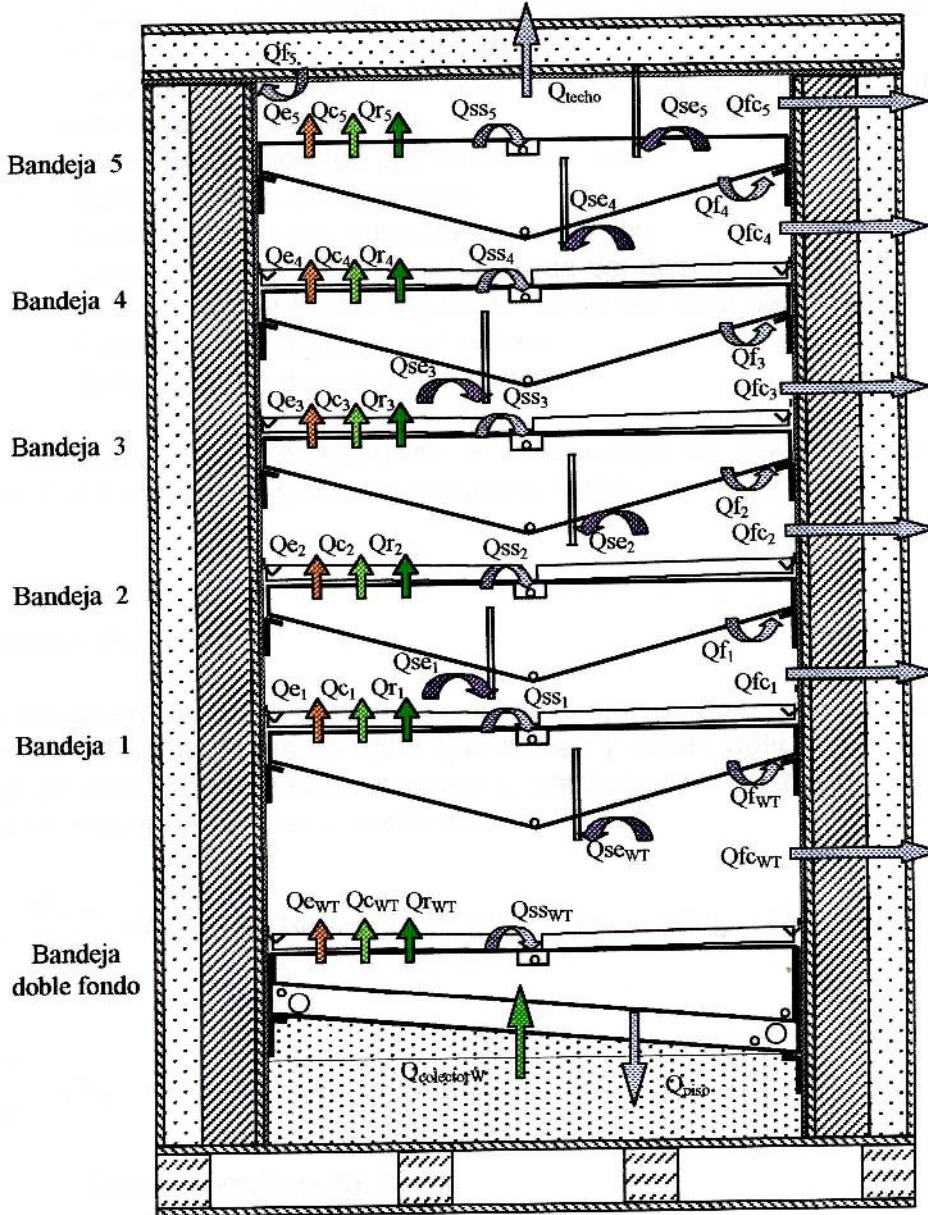


Figura 2.2 Flujos de Energía

## Definición de flujos de energía en el desalinizador

$Q_e$	: Calor por evaporación entre el agua y la placa inferior exterior primera etapa
$Q_c$	: Calor por convección entre el agua y la placa inferior exterior primera etapa
$Q_r$	: Calor por radiación térmica entre el agua y la placa inferior exterior primera etapa
$Q_{colector}$	: Calor proporcionado por el colector solar
$Q_{ss}$	: Calor sensible del destilado
$Q_{se}$	: Calor sensible del agua de alimentación
$Q_{fc}$	: Calor por conducción por los lados del destilador
$Q_f$	: Calor transferido a la siguiente etapa por fuga de vapor
$Q_{piso}$	: Calor por Conducción por el piso
$Q_{techo}$	: Calor por Conducción por el techo

El subíndice WT corresponde a la bandeja de doble fondo y los subíndices 1 al 5 corresponden a las bandejas 1 al 5.

## 2.1.4 Balance de Energía

La ecuación de conservación de energía, que relaciona la variación de energía interna con los flujos de calor que entran y salen, aplicada al agua, en la bandeja de doble fondo y en la bandeja 1, para el acero inoxidable y el agua contenida en ella, se muestran a continuación:

$$m_{w,WT} * c_{pw} \frac{dT_{w,WT}}{dt} = Q_{colector} + Q_{se_{WT}} - Q_{e_{WT}} - Q_{r_{WT}} - Q_{c_{WT}} - Q_{fc_{WT}} - Q_{piso} - Q_{f_{WT}} - Q_{ss_{WT}}$$

$$m_t * c_{pt} \frac{dT_t}{dt} = Q_{e_{WT}} + Q_{r_{WT}} + Q_{c_{WT}} + Q_{se_t} - Q_{perdida} - Q_{ss_t}$$

$C_{pw}$	: Calor específico del agua
$C_{pt}$	: Calor específico del acero inoxidable
$m_w$	: Masa de agua en la bandeja de doble fondo
$m_t$	: Masa del acero inoxidable en intercambio térmico y agua contenida en la bandeja 1
$Q_{perdidas}$	: Calor debido a pérdidas no consideradas
$T_w$	: Temperatura del agua en la bandeja de doble fondo
$T_t$	: temperatura de la bandeja 1

El subíndice  $t$  indica lo relativo a la bandeja 1 en la superficie de acero inoxidable.

Estas mismas ecuaciones aplicadas a cada una de las etapas, con la precaución de considerar solamente los flujos de calor involucrados en cada una de ellas, nos entrega el modelo matemático para el nuevo desalinizador de múltiples etapas.

Este análisis nos permite determinar la temperatura del agua en la bandeja de doble fondo, la cual depende de la temperatura de la bandeja 1. Al aplicar el análisis a la segunda etapa, es decir, entre la bandeja 1 y la bandeja 2, se puede determinar la temperatura de la bandeja 1 la cual a su vez depende de la temperatura de la bandeja 3. El análisis se aplica a cada una de las etapas en forma sucesiva, existiendo siempre una dependencia de las temperaturas.

Para determinar la temperatura de la bandeja de doble fondo, el modelo determina la temperatura de la última bandeja luego la temperatura de la penúltima y así sucesivamente hasta llegar en definitiva a la temperatura deseada.

Para el análisis de la energía que fluye a través del techo se considera la energía que proporciona la bandeja 5 y la convección exterior del equipo. La bandeja 5 debe mantener una temperatura más baja que todo el sistema. Por esta razón no se debe utilizar aislamiento en el techo.

## 2.2 Ecuaciones de transferencia de calor

### 2.2.1 Ecuaciones para el Calor por Evaporación

La transferencia de calor por evaporación es una transferencia de calor asociada a la transferencia de masa, es decir, a la evaporación y condensación del agua.

Existen varias formas para determinar el calor por evaporación, dependiendo de las condiciones que se presenten.

**i.- Forma Newtoniana.** Se puede considerar como transferencia de calor convectiva, debido a que es este el mecanismo responsable de que se produzca., esto a través de la ecuación

$$Q_e = h_e * A_w * (T_w - T_t)$$

**ii.- Kumar y Tiwari (1996)** utilizan una expresión que relaciona la diferencia de presiones parciales del agua con el coeficiente de transferencia convectivo.

$$\dot{Q}_e = 0.016273 * (P_w - P_g) * h_c$$

**iii.- O. Headley** utilizan una expresión de Howe y Tleimat (1977) que relaciona el calor por evaporación con el calor por convección, la diferencia de temperaturas y la diferencia de presiones parciales del agua.

$$\dot{Q}_e = 6.8742 * 10^{-9} * \left[ \frac{\dot{Q}_c}{T_w - T_t} \right] * (P_w - P_t) * L$$

**iv.- E Sartori (1996)** utilizando las relaciones de Dunkle establece la siguiente expresión para el calor por evaporación expresadas en el sistema internacional

$$\dot{Q}_e = 60.78 * 10^{-7} * \left[ T_w - T_t + \left( \frac{P_w - P_t}{267.7 * 10^3 - P_w} \right) * (T_w + 273.15) \right]^{1/3} * (P_w - P_t) * L$$

### 2.2.2 Ecuaciones para el Calor por Convección

La ecuación que caracteriza la convección newtoniana es  $Q_c = h A \Delta T$  por lo que la expresión para el calor por convección es.

$$\dot{Q}_c = hc * A_w * (T_w - T_i)$$

### 2.2.3 Ecuaciones para el Calor por Conducción

La transferencia de calor por conducción es caracterizada por la ecuación de conducción de Fourier, que para el caso de pared plana es  $Q_{cond} = k A \Delta T / \Delta x$ .

Para el caso de conducción a través de la pared del destilador, considerando además la convección forzada producida en el exterior, se utiliza la siguiente expresión:

$$\dot{Q}_f = U_g * A_f * (T_w - T_i)$$

$$U_g = \frac{1}{\frac{\delta_1}{K_1} + \frac{\delta_2}{K_2} + \frac{\delta_3}{K_3} + \frac{\delta_4}{K_4} + \frac{1}{h_{cf}}}$$

Las ecuaciones para el Calor por Conducción por el piso

$$\dot{Q}_{piso} = U_{piso} * A_{piso} * (T_w - T_{piso})$$

$$U_{piso} = \frac{1}{\frac{\delta_1}{K_1} + \frac{\delta_2}{K_2} + \frac{\delta_3}{K_3} + \frac{\delta_4}{K_4} + \frac{\delta_5}{K_5}}$$

$U_g$ : Coeficiente global de la conducción y convección en conjunto.

$\delta_1$ : Espesor de la placa interior

$\delta_2$ : Espesor de la lana mineral

$\delta_3$ : Espesor del aislapol

$\delta_4$ : Espesor de la placa exterior

$\delta_5$ : Espesor a considerar del piso

$K_1$ : Conductividad térmica de la placa interior

$K_2$ : Conductividad térmica de la lana mineral

$K_3$ : Conductividad térmica del aislapol

$K_4$ : Conductividad térmica de la placa exterior

$K_5$ : Conductividad térmica del piso

### 2.2.4 Ecuaciones para el Calor por Radiación

La transferencia de calor por radiación está caracterizada por la forma de Kirchoff de la ecuación de Stefan-Boltzmann

$$Q_{r12} = \frac{\sigma * (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2} + \frac{1}{A_1 F_{12}}}$$

$\sigma$ : Constante de Stefan-Boltzmann

$\varepsilon$ : Emisividad

$F_{12}$ : Factor de forma radiativa entre las superficies  $A_1$  y  $A_2$

Para dos superficies grandes enfrentadas, despreciando los efectos de borde, el factor de forma es igual a 1, es decir,  $F_{12} = 1$ , resultando la expresión

$$Q_{r12} = \frac{\sigma * \varepsilon_1 * A_1 * (T_1^4 - T_2^4)}{1 + \frac{\varepsilon_1 * A_1}{\varepsilon_2 * A_2} * (1 - \varepsilon_2)}$$

Para nuestro caso se utilizan las siguientes expresiones:

$$Q_r = \varepsilon_{wg} * \sigma * A_w * (T_w^4 - T_i^4)$$

$$\varepsilon_{wg} = \frac{\varepsilon_w}{1 + \frac{\varepsilon_w * A_w * (1 - \varepsilon_g)}{\varepsilon_g * A_g}}$$

### 2.2.5 Ecuaciones para el Calor por Calor Sensible

El calor transferido por flujos de masas que entran y salen del destilador se pueden describir por la ecuación de entalpía del flujo de masa correspondiente. El flujo de calor para estos flujos de masa es del tipo

$$\dot{Q}_{se} = m_{we} * c_{pwe} * T_{we}$$

$$\dot{Q}_{ss} = m_{ws} * c_{pws} * T_{ws}$$

## 2.2.6 Ecuaciones para el Calor por Fugas

Se ha considerado que el Calor por fugas hacia la siguiente etapa es dependiente de la cantidad de vapor generado o bien de la cantidad de condensado por un factor de fugas, esto es:

$$\dot{Q}_{f1} = F_f * \dot{m}_{we} * L$$

Donde  $F_f$  es el factor de fugas que depende de la construcción del destilador.

## 2.3 Coeficientes de Transferencia de Calor y Masa

### 2.3.1 Coeficientes de transferencia de calor por evaporación

El coeficiente de transferencia de calor por evaporación puede ser determinado por la siguiente expresión [7]:

$$h_e = \frac{\dot{Q}_e}{A_w (T_w - T_t)}$$

Donde  $Q_e$  es el calor por evaporación y se determina usando la expresión:

$$\dot{Q}_e = 0.016273 * (P_w - P_g) * \frac{K_{wa}}{d_{ss}} * 0.0538 * (Gr * Pr)^{0.384}$$

$$9.898e6 < Gr < 9.128e6$$

Esta expresión es desarrollada por Kumar y Tiwari (1996)

$$Gr = \frac{\beta' \rho^2 d_{ss}^3 \Delta T'}{\mu^2}$$

$$Pr = \frac{\mu * c_p}{K_{aw}}$$

$$\Delta T' = (T_w - T_t) + \left[ \frac{(P_w - P_g)(T_w + 273.15)}{268.9 * 10^3 - P_w} \right]$$

Muchas expresiones usadas en la determinación de los coeficientes de transferencia por evaporación están limitadas en cuanto a la temperatura de trabajo como son las expresiones propuestas por Malik, esto es, válidas sólo hasta aproximadamente los 90 °C. Las expresiones aquí presentadas no tienen esa restricción.

### 2.3.2 Coeficientes de transferencia de calor por convección

También considerando expresiones sin limitaciones de temperatura es que los autores Shawaqfeh y Farid desarrollan las siguientes expresiones que relaciona los coeficientes de transferencia de calor evaporativo y convectivo. Esto puede extender el análisis hasta temperaturas sobre los 90 °C a presión atmosférica a hasta la cercanía de la temperatura de saturación para presiones distintas a la atmosférica.

$$hc = 2 * \frac{M_{mix} * c_{p_{mix}}}{M_w * L} * \frac{1}{\frac{1}{(P_a)_w} + \frac{1}{(P_a)_g}} * he$$

$$M_{mix} = \frac{M_a P_a + M_w P_w}{P}$$

$$c_{p_{mix}} = \frac{c_{p_a} P_a + c_{p_w} P_w}{P}$$

Los mismos autores mencionan la relación de Coulson y Richardson (1977), analogía de Chilton-Colburn, donde se incorpora el Número de Lewis (Le) y el logaritmo medio de la presión parcial del aire,  $(P_a)_{LM}$ .

$$he = \frac{M_w * L}{M_{mix} * c_{p_{mix}}} \frac{Le^{-2/3}}{(P_a)_{LM}} hc$$

### 2.3.3 Coeficientes de transferencia de calor por convección forzada

Este tipo de coeficiente es usado en el cálculo del efecto combinado de la convección y conducción en el destilador. Este coeficiente toma en cuenta la velocidad del aire ambiental,  $v_w$ . [8]

$$h_{cf} = 2.8 + 3.0 * v_w$$

## CAPITULO III Simulación Computacional

### 3.1 Generalidades

Se ha desarrollado un programa computacional para realizar la simulación de un desalinizador de múltiples efectos. Este programa ha sido realizado utilizando el ambiente Matlab Simulink® y el software de biblioteca Carnot® desarrollado en el Solar-Institut Julich, Alemania.

El modelo matemático que se ha desarrollado plantea la búsqueda de soluciones para una serie de ecuaciones diferenciales en las cuales la variable principal es la temperatura de cada una de las etapas. El programa utiliza el método de paso variable Bogacki-Shampine ode23 que es un método basado en Runge-Kutta (2,3).

El programa consta de una ventana principal o de entrada en donde se distinguen claramente los bloques que representan las etapas del desalinizador y los elementos necesarios para la entrada y salida de datos. Cada uno de los bloques es una subrutina desarrollada en forma independiente, pero que es dependiente de los otros bloques.

Existe una gran flexibilidad del programa, lo que permite la modificación, de una forma muy clara, de sus subrutinas, condiciones de entrada y salida como así sus parámetros. Si bien se pueden modificar los parámetros en las ventanas de entrada de datos, estos pueden ser cambiados sin mayores inconvenientes cambiando el block de parámetros. Esta flexibilidad permite al programa adecuarse a las condiciones de un desalinizador en particular.

### 3.2 Ventana principal

El programa está compuesto por 7 sub-sistemas principales, cinco representan a cada una de las etapas del desalinizador, otro lo que es el fondo y uno final que representa la tapa. Además cuenta con una serie de componentes para la salida adecuada de los resultados como son archivos de datos y gráficos.

La ventana inicial o ventana principal contiene todos los bloques o sub-sistemas mencionados anteriormente designados con las letras WT, B1, B2, B3, B4, B5 y Tapa, en que cada uno de ellos representa un modelo matemático en particular.

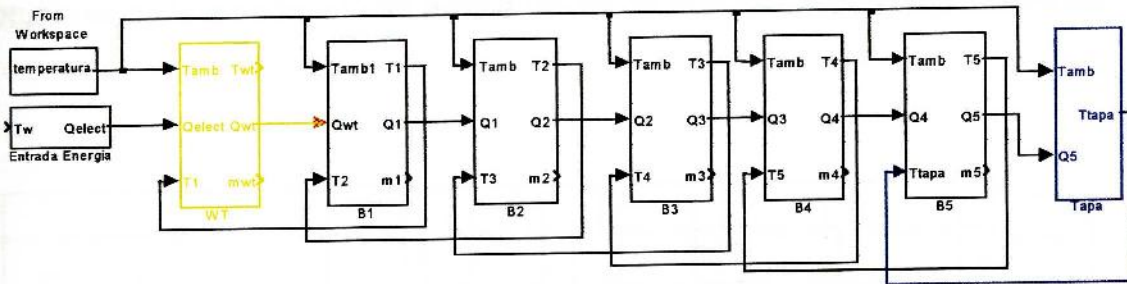


Figura 3.1 Esquema de Etapas

Se dispone además de dos bloques que representan la entrada de energía desde el colector solar y la lectura, a través de una base de datos, de la temperatura ambiental.

En la figura 3.1 se muestran las diferentes formas de salida de datos ya sea a base de datos o bien directamente a gráficos. Los gráficos que se obtienen son los relativos al transiente de temperatura, condensado y energía para cada una de las etapas. Además de la comparación de las curvas modeladas con las experimentales.

Antes de iniciar el programa se deben cargar las bases de datos denominadas *masa.dat* y *temperatura.dat*, que son los datos experimentales de masa y temperaturas tomados para cada una de las etapas.

Como se puede apreciar en la figura 3.1, la temperatura  $T_1$  que se determina en el bloque B1 es una de las entradas del bloque WT. Si observamos las entradas del bloque B1, este requiere la temperatura  $T_2$  que se obtiene en el bloque B2. El bloque B2 requiere como entrada la temperatura  $T_3$ , que se obtiene en el bloque B3. El bloque B3 requiere como entrada la temperatura  $T_4$ , que se obtiene en el bloque B4. El bloque B4 requiere como entrada la temperatura  $T_5$ , que se obtiene en el bloque B5. Finalmente el bloque B5 requiere como entrada la temperatura  $T_{tapa}$  que es la temperatura del techo del desalinizador la cual es obtenida en el bloque Tapa.

Lo anterior muestra la dependencia que existe entre un bloque y otro respecto a la temperatura.

La energía que se determina en el bloque WT es una de las entradas del bloque B1. La energía que se determina en el bloque B1 es la energía de entrada al bloque B2. Así, la energía que se requiere en un bloque determinado

es proporcionada por el bloque que le precede. Esto muestra la otra relación importante que debe existir entre los bloques.

Cada uno de los bloques requiere de la temperatura ambiental y ésta es proporcionada a cada uno de ellos a través de la base datos *Temperatura.dat*

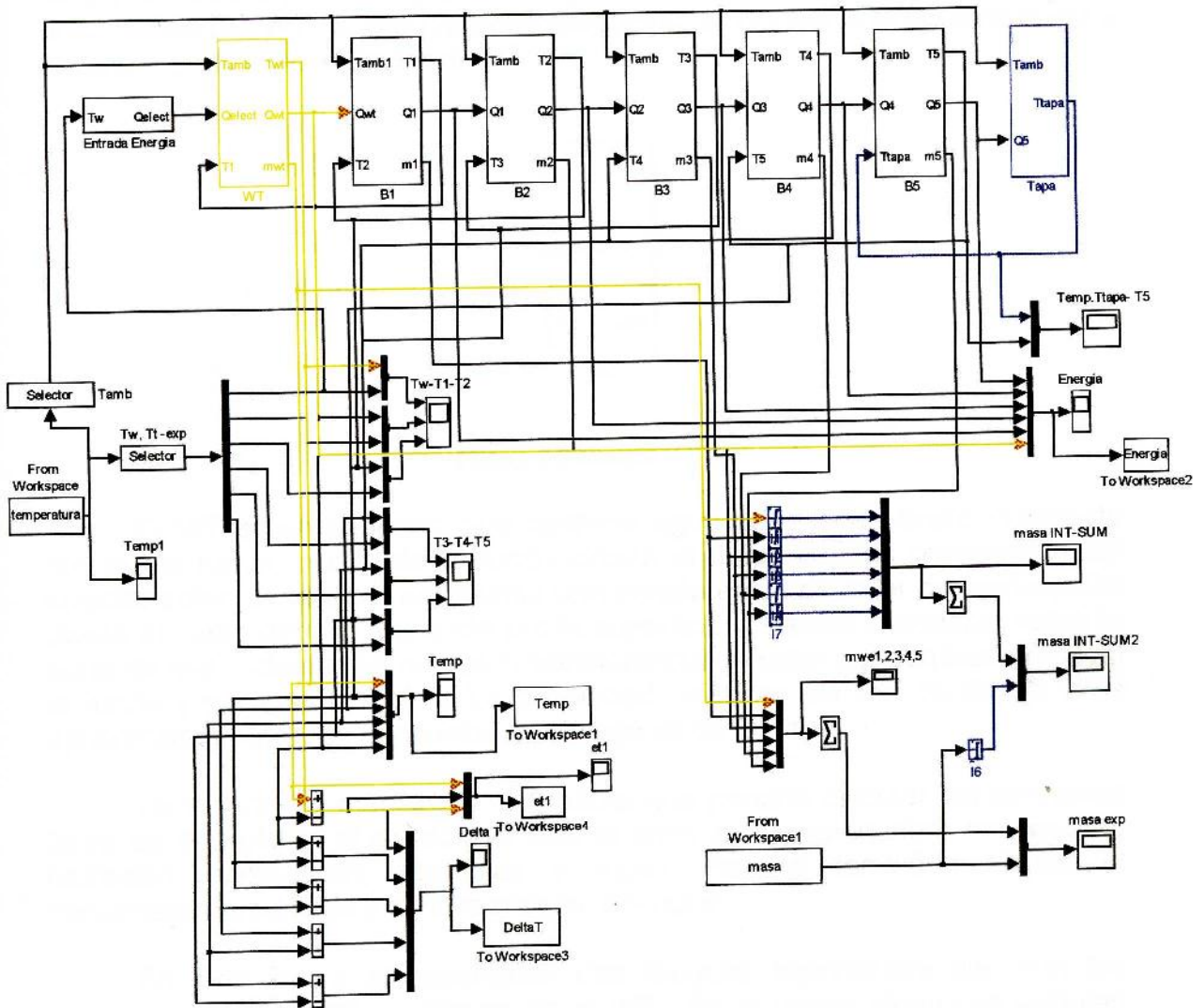


Figura 3.2 Ventana Principal

### 3.3 Componente WT, Fondo del Desalinizador

WT : Bloque que representa un sub-sistema para el fondo del desalinizador (Waermetausche). Este componente recibe el calor proveniente del Colector Solar.

Este bloque requiere para su funcionamiento, como se indica en la figura 3.3, el ingreso de la temperatura ambiente, la energía de entrada, y la temperatura del agua en la primera etapa. Como datos de salida se obtienen la temperatura del WT, la energía generada desde el WT hacia la primera etapa y el condensado producido por el WT.

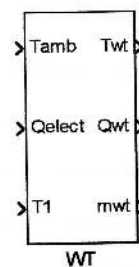


Figura 3.3 Bloque WT

El WT es un depósito, que contiene agua de mar, de acero inoxidable con doble fondo, por el doble fondo circula el fluido térmico proveniente del colector solar, se realiza por lo tanto una transferencia de calor por convección desde el fluido térmico, pasando por la superficie de acero inoxidable hasta el agua de mar. Además se realiza la transferencia de calor por conducción hacia el fondo y paredes laterales. La capacidad máxima del WT es de 32 litros aproximadamente y su capacidad de trabajo es de 28 litros.

La Figura 3.4 muestra la sub-rutina que permite calcular los diferentes tipos de energía involucrados ya sea el calor por evaporación, convección, radiación, conducción, sensibles y fugas. Permite también calcular el condensado producido y la temperatura del agua.

En esta figura se distinguen dos bloques importantes que son los denominados "calores" y "Temp. Agua WT". En el primer bloque se calculan los diferentes tipos de energía ya mencionados anteriormente y en el segundo bloque se determina la temperatura del agua del WT.

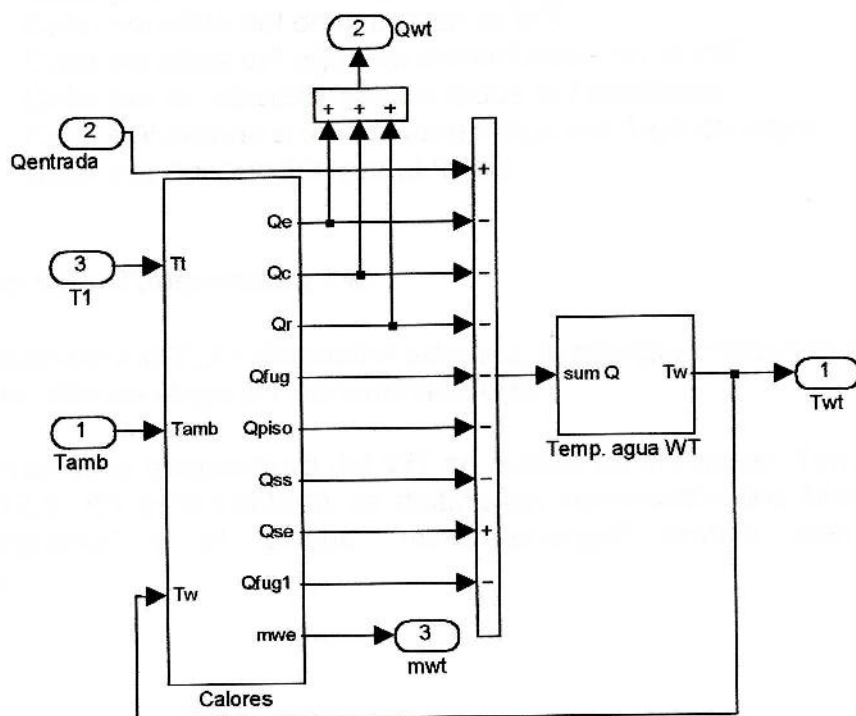


Figura 3.4 Sub-rutina WT

El bloque "Calores" requiere para su funcionamiento la entrada de la temperatura de la primera etapa, ambiental y la del WT. La temperatura WT es determinada por el bloque "Temp. Agua WT", la temperatura de la primera etapa T1 es determinada en otro Bloque correspondiente a la subrutina B1 y la temperatura ambiente, Tamb, es leída desde una base de datos del bloque "Temperatura" en la ventana principal.

La salida del bloque "Calores" calcula los diferentes tipos de energía generados al interior del desalinizador. Además calcula la cantidad de condensado producido entre el WT y la primera etapa B1.

Los calores calculados son:

- Qe** : Calor por evaporación entre el agua de mar y la placa inferior exterior de la primera etapa, B1
- Qc** : Calor por convección entre el agua de mar y la placa inferior exterior de la primera etapa, B1

<b>Qr</b>	: Calor por radiación térmica entre el agua de mar y la placa inferior exterior de la primera etapa, B1
<b>Qentrada</b>	: Calor proporcionado al agua de mar por el Colector Solar
<b>Qss</b>	: Calor sensible del destilado en el WT
<b>Qse</b>	: Calor sensible del agua de alimentación en el WT
<b>Qf</b>	: Calor por conducción por los lados del destilador
<b>Qf1</b>	: Calor transferido a la siguiente etapa por fuga de vapor
<b>Qpiso</b>	: Calor por conducción por el fondo

### 3.3.1 Cálculo de la Temperatura $T_w$

En la subrutina WT, se determina además, la energía producida y que es entregada a la primera etapa B1 denominada  $Q_w$ .

El cálculo de la temperatura del WT se realiza en el bloque "Temp. Agua WT" figura 12.5. En esta ventana se distinguen claramente dos bloques, el bloque "Integrador" y el bloque "masa energía" ambos íntimamente relacionados.

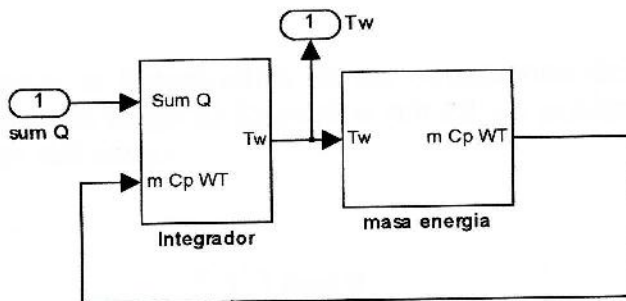


Figura 3.5 Bloque "Temp. Agua WT"

En la figura 3.6 se muestra la subrutina que determina la cantidad de masa-energía utilizada en el WT. En este caso la energía se transfiere al agua contenida en el WT y al recipiente que la contiene. Este es el concepto de masa-energía que se determina por el producto de la masa y el calor específico de los elementos involucrados. Aquí, por ejemplo, el calor específico del agua se determina utilizando la subrutina *heat-capacity* que trae la biblioteca Carnot® y en donde las entradas a este bloque son la presión y temperatura a la cual se encuentra el agua, además de indicar el tipo de fluido usado así como la mezcla con otro tipo de fluido.

Por otro lado, el concepto de masa-energía involucra al recipiente que contiene el agua, esto es, la masa y el calor específico de la bandeja de acero inoxidable.

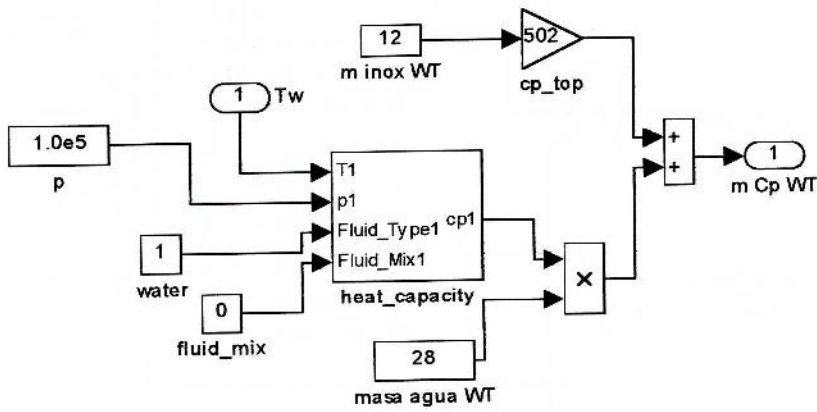


Figura 3.6 Cálculo de masa-energía

Al despejar la temperatura en las ecuaciones del balance de energía y utilizando el método Bogacki-Shampine ode23, se pueden encontrar los valores de  $T_w$  a través del tiempo

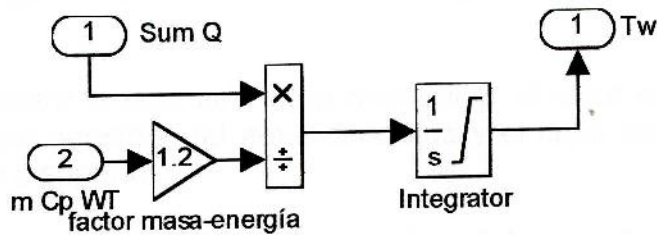


Figura 3.7 Cálculo de la temperatura  $T_w$

### 3.3.2 Cálculo de los calores Sensibles y de Fuga

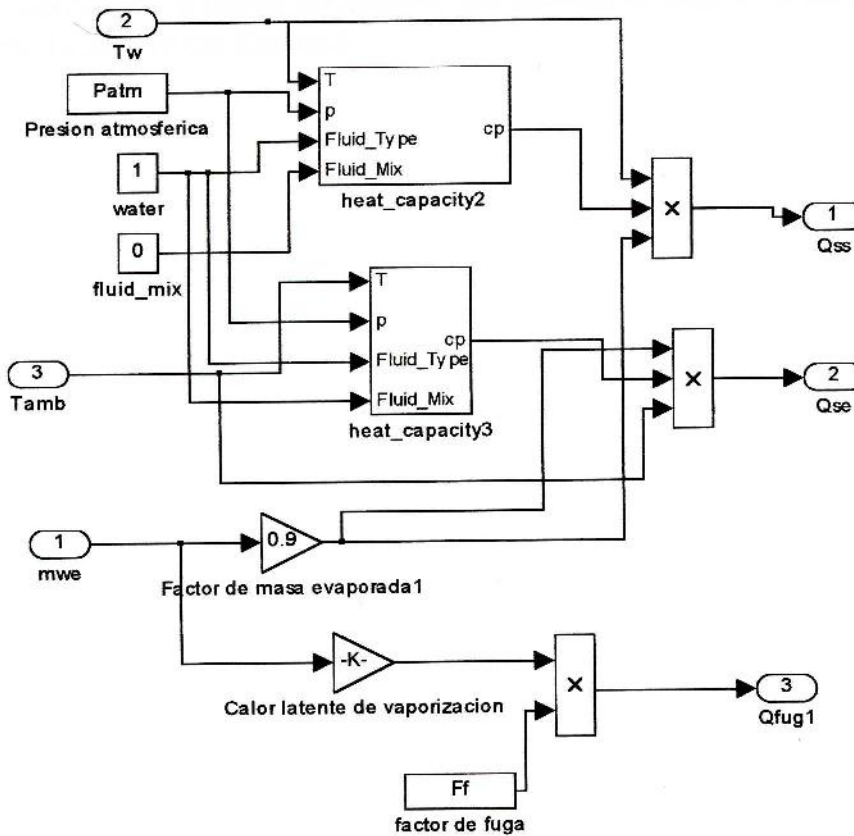


Figura 3.8 Calor Sensible y calor por fuga

La figura 3.8 muestra la subrutina para determinar el calor sensible del agua de entrada, el calor sensible del agua de salida y el calor debido fugas hacia la etapa siguiente o superior.

Para determinar el calor sensible del agua de salida se calcula el calor específico del agua a la temperatura del agua  $T_w$  y a la presión  $P_{atm}$ , luego se multiplica por la temperatura  $T_w$ , asumiendo que el calor sensible a cero grados Celcius es cero. La misma operación se realiza para el calor sensible de entrada, pero considerando la temperatura ambiente. En ambos casos la masa considerada no es igual a la masa evaporada, sino que se considera un 10 % menor debido a que no toda el agua evaporada es condensada y no toda el agua condensada es llevada hacia el exterior. Lo que sí se asume es que la cantidad de agua condensada es igual a la cantidad del agua de alimentación.

El calor por fugas hacia la etapa superior es difícil de determinar y depende exclusivamente de la construcción del equipo con relación al sello

entre las bandejas de las diferentes etapas. Para esto se ha asumido un factor de fuga que es una fracción muy pequeña de la masa de condensado.

Los calores específicos se determinan usando la subrutina *heat\_capacity* que contiene la biblioteca Carnot®

### 3.3.3 Cálculo del calor por Conducción

La figura 3.9 muestra el bloque para el cálculo del calor por conducción. En este caso el calor por conducción a través del piso y el cálculo por conducción a través de las paredes laterales.

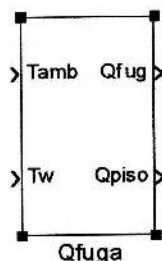


Figura 3.9 Bloque para el calor por conducción

Al abrir este bloque aparece una ventana en donde se debe introducir la información que se solicita. Estos datos pueden ser modificados dependiendo de las condiciones de trabajo.

Parameter	Value
Conductividad térmica de piedras piso tierra, W/mK	1.25
Conductividad térmica de madera, W/mK	0.35
Conductividad térmica del aislant., W/mK	0.04
Conductividad térmica de lana mineral, W/mK	0.04
Conductividad térmica del inox int., W/mK	15.5
Espesor placa inox int., (mm)	1
Espesor aislant., (mm)	50
Espesor lana mineral, (mm)	75
Espesor madera, (mm)	10
Área conductiva W/T agua, (m <sup>2</sup> )	0.189

Figura 3.10 Ventana de Datos. Calor por Conducción

El interior del bloque, figura 3.9, contiene una subrutina para el cálculo del calor por conducción, figura 3.11.

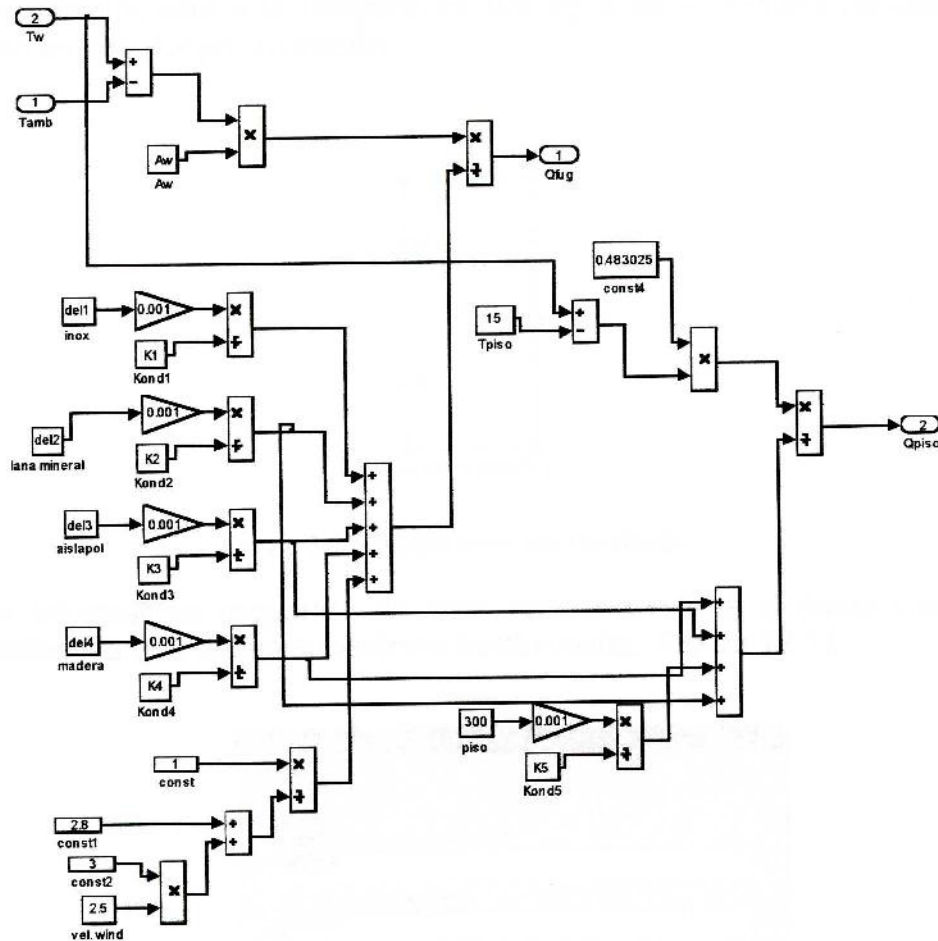


Figura 3.11 Calor por Conducción a través de piso y paredes laterales

En esta ventana se presenta la subrutina para el cálculo de la conducción a través de las paredes y el piso. Se considera la convección en el exterior del desalinizador.

Las paredes del desalinizador son paredes compuestas de planchas de acero inoxidable en su interior, plancha de madera, lana mineral y plancha de aislapol, cada uno con diferentes espesores, luego en esta subrutina se determina el coeficiente global de transferencia y por tanto los calores por conducción.

### 3.3.4 Cálculo del calor por Radiación

La figura 3.12 muestra el bloque usado para el cálculo del calor por radiación. Aquí las entradas son solamente las temperaturas del agua en el fondo del desalinizador y la temperatura del agua de la primera bandeja. La salida sólo es el calor por radiación.

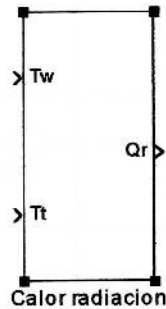


Figura 3.12 Bloque calor por Radiación

La información requerida en este caso se refiere a datos como las emisividades y áreas de las superficies involucradas. Figura 12.13

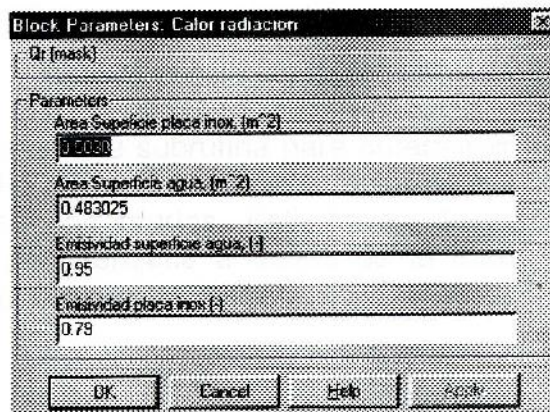


Figura 3.13 Ventana de Datos Calor por Radiación

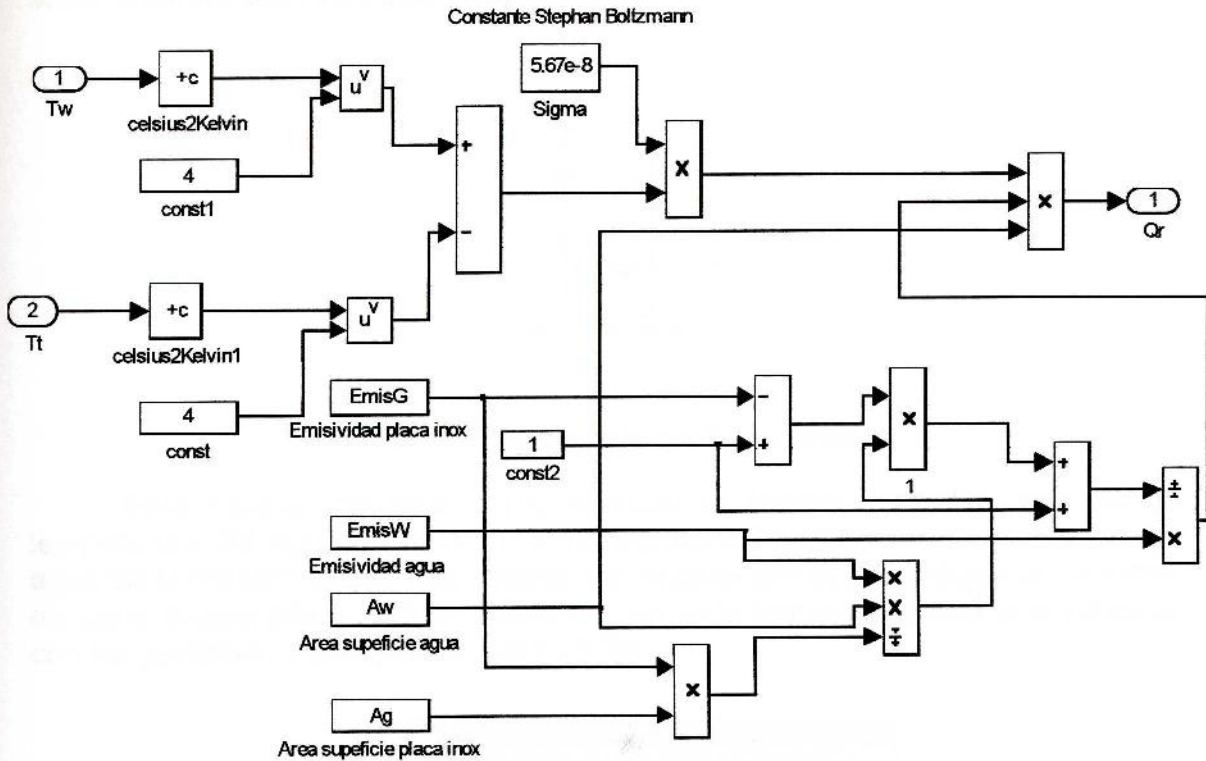


Figura 3.14 Calor por Radiación

La figura 3.14 muestra la subrutina para determinar el calor debido a la radiación en donde se ha considerado que el factor de forma es igual a 1 para dos superficies grandes enfrentadas. Esta forma de cálculo del calor por radiación es la forma característica a través de la forma de Kirchoff de la ecuación de Stefan-Boltzmann.

### 3.3.5 Cálculo del calor por Evaporación

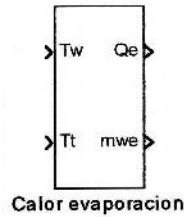


Figura 3.15 Bloque Calor por Evaporación

Este bloque requiere como entrada la temperatura  $T_w$ , que es la temperatura del agua en el WT y la temperatura  $T_t$ , que es la temperatura del agua de la primera etapa. Las salidas son el calor por evaporación y la cantidad de agua evaporada. Al hacer doble clic en este bloque aparece una ventana con los parámetros requeridos, figura 3.16.

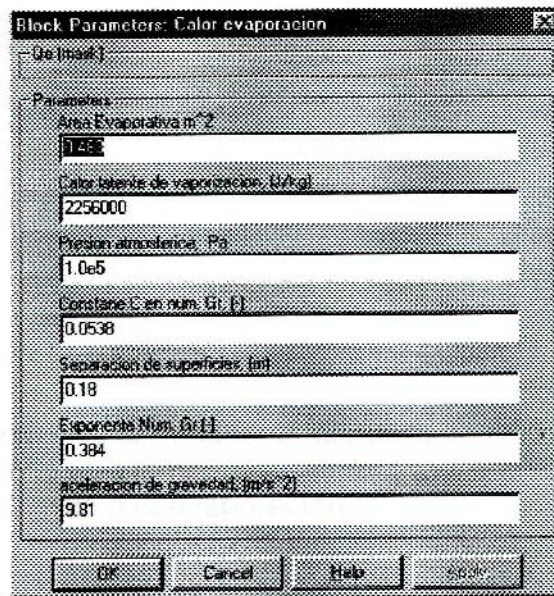


Figura 3.16 Ventana de Datos. Calor por Evaporación

En el interior del bloque, figura 3.15, se encuentra la subrutina que calcula las salidas antes mencionadas. La subrutina es la que se muestra en la figura 3.17 Calor por Evaporación y Cálculo del Destilado

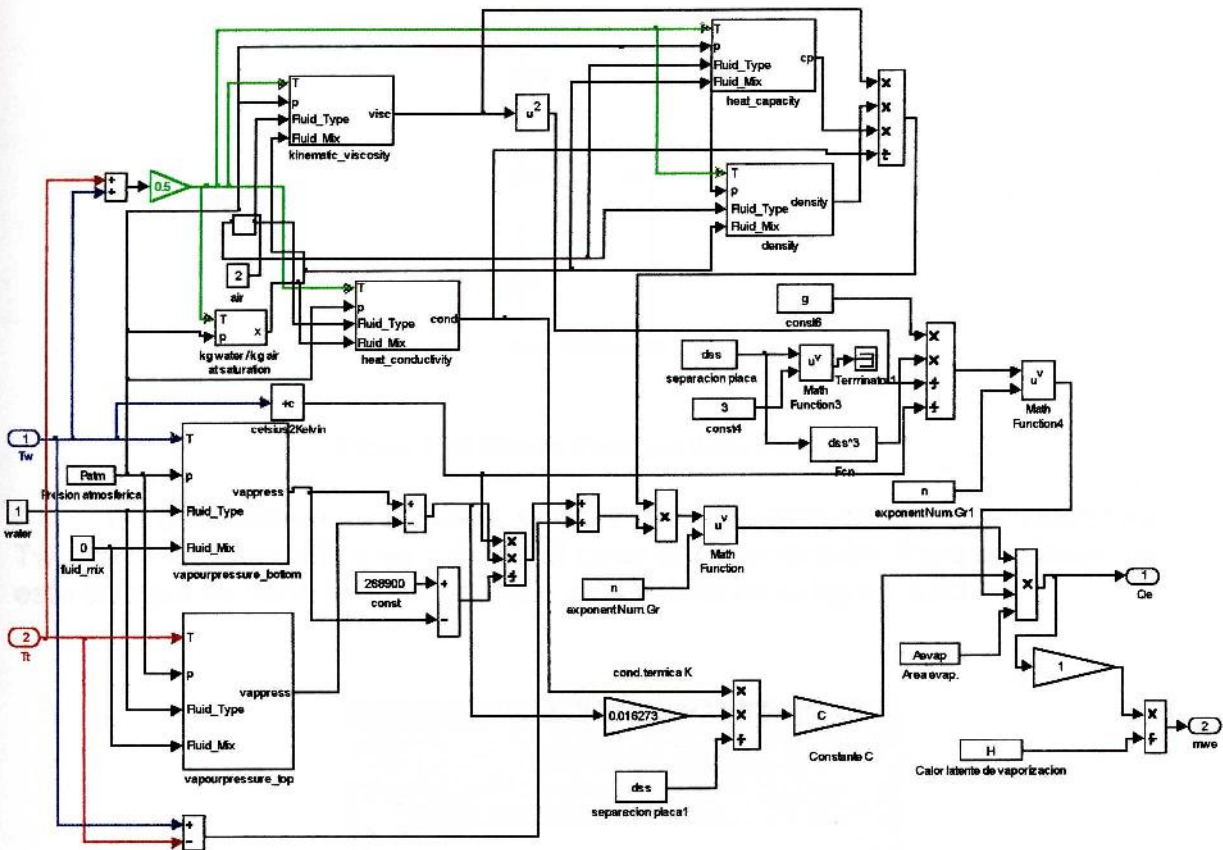


Figura 3.17 Calor por Evaporación y Cálculo del Destilado

Esta ventana muestra el método usado para determinar el coeficiente de transferencia por evaporación,  $h_e$ , que es lo fundamental del cálculo de la energía,  $Q_e$ , el calor debido a la evaporación

Esta subrutina puede ser modificada para incorporar otras ecuaciones para el cálculo del coeficiente de transferencia por evaporación

En esta subrutina se han utilizado bloques que son a la vez otras subrutinas para el cálculo de algunas propiedades como son: la viscosidad cinemática a través del bloque "kinematic\_viscosity", la densidad a través del bloque "density", la presión de vapor a través del bloque "vapourpressure\_top" o "vapourpressure\_bottom", la conductividad térmica a través del bloque "heat\_conductivity" y el calor específico a través del "heat\_capacity". Todos estos bloques extraídos desde la biblioteca Carnot.

### 3.3.6 Cálculo del calor por Convección

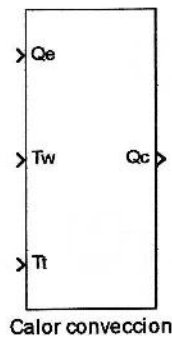


Figura 3.18 Bloque Calor por Convección

En este bloque se requiere el calor por evaporación  $Q_e$ , la temperatura  $T_w$  y la temperatura  $T_t$  y se obtiene el calor por convección. Para el cálculo de esta energía se tiene la subrutina que se muestra en la figura 3.20.

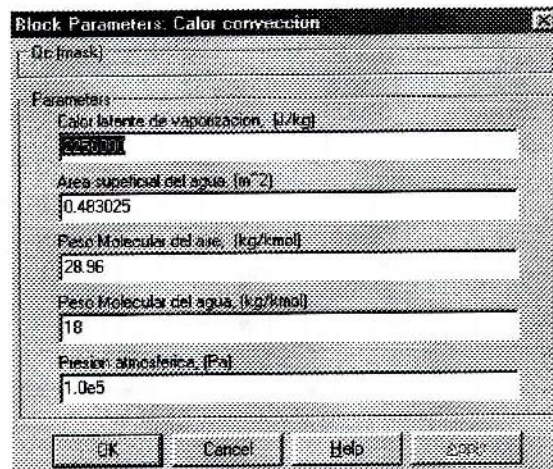


Figura 3.19 Ventana de Datos. Calor por Convección

Los datos requeridos son los mostrados en la figura 3.19 en donde se pueden variar los valores de acuerdo a las condiciones de trabajo.



### 3.4 Componente B1, Primera Bandeja

El modelo de la primera etapa es muy similar al desarrollado para el WT. Aquí las entradas para el bloque B1 son: la temperatura ambiente,  $T_{amb}$ , la temperatura de la segunda etapa,  $T_2$ , y la energía proporcionada por el WT,  $Q_{wt}$ . Las salidas son: la temperatura de la primera etapa,  $T_1$ , el calor producido en la primera etapa,  $Q_1$  y la cantidad de condensado generado en la primera etapa.

La temperatura calculada en esta etapa es requerida por el programa en el bloque del WT. Por tanto existe la dependencia requerida y necesaria entre el bloque WT y el bloque B1.

La figura 3.21 muestra las entradas y salidas del bloque B1

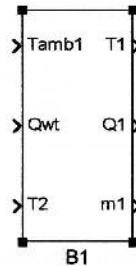


Figura 3.21 Bloque Primera Etapa

En el interior de este bloque se detallan las diferentes formas de energía involucradas en la primera etapa, B1. En la figura 3.22. se puede apreciar que los calores ahora calculados son similares a los calculados en la subrutina para el WT, pero ahora se consideran las condiciones para esta primera etapa. Por ejemplo no se considera, obviamente, la conducción a través del piso y la cantidad de agua que puede contener esta etapa es mayor que la del WT.

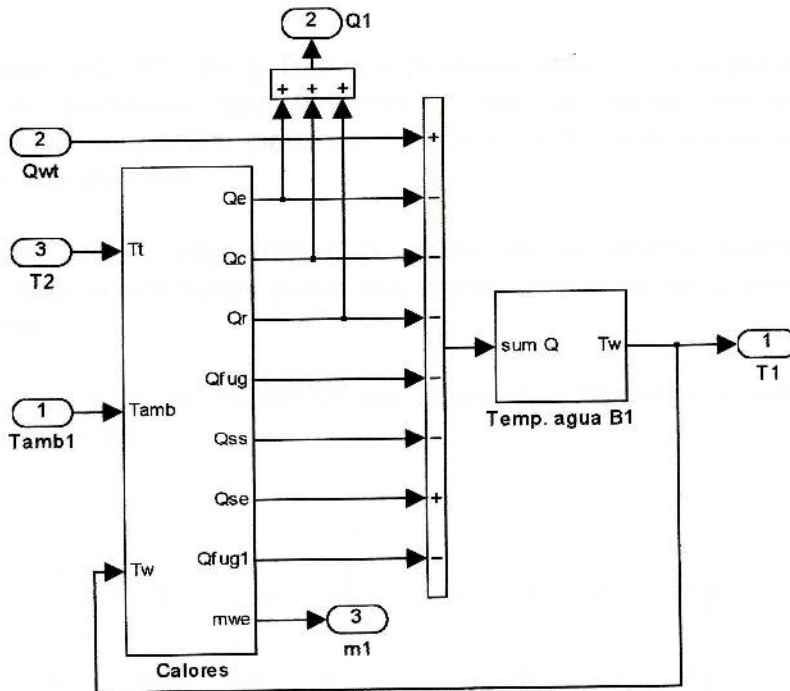


Figura 3.22 Subrutina primera etapa, B1

En este caso las variables del bloque "Calores" en la figura 3.22 son:

- Qe** : Calor por evaporación entre el agua de mar de la bandeja B1 y la placa inferior exterior de la segunda bandeja, B2
- Qc** : Calor por convección entre el agua de mar de la bandeja B1 y la placa inferior exterior de la segunda bandeja, B2
- Qr** : Calor por radiación térmica entre el agua de mar de la bandeja B1 y la placa inferior exterior de la segunda bandeja B2
- Qentrada** : Calor proporcionado al agua de mar por desde la bandeja B1
- Qss** : Calor sensible del destilado en la bandeja B1
- Qse** : Calor sensible del agua de alimentación en la bandeja B1
- Qf** : Calor por conducción por las paredes laterales entre la bandeja B1 y la bandeja B2
- Qf1** : Calor transferido a la siguiente etapa por fuga de vapor

### 3.5 Componentes, B2, B3, B4 y B10.5. Segunda, Tercera, Cuarta y Quinta Bandejas

Las etapas B2, B3, B4 y B5, que corresponden a la segunda, tercera, cuarta y quinta bandejas respectivamente, son similares, en cuanto a la programación, a la etapa B1, pero considerando las condiciones propias que presenta cada una de ellas.

La etapa B5 es algo diferente pues es la última etapa y deben considerarse otras condiciones pues sobre esta etapa se encuentra el Techo del desalinizador.

En la figura 3.23 se muestran las diferentes entradas y salidas de las etapas B2, B3, B4 y B5.

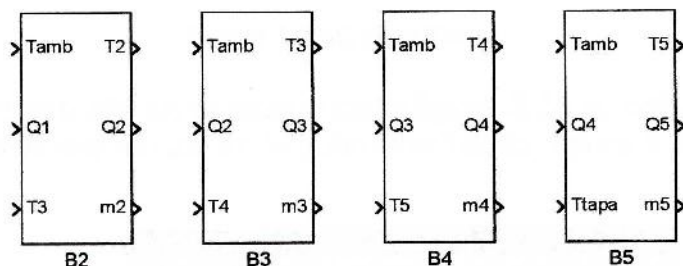


Figura 3.23 Bloques para etapas B2, B3, B4 y B5

### 3.6 Componente Tapa. Techo del Desalinizador

En este bloque se presentan las entradas y salidas para la tapa o techo del desalinizador. Se requieren en este bloque la temperatura ambiente y la energía producida en la bandeja B5. Como salida sólo se tiene la temperatura del techo, la cual es requerida por el bloque B5

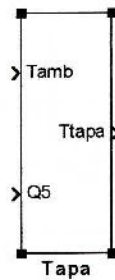


Figura 3.24 Bloque Techo

Al hacer doble clic en el bloque de la figura 3.24 se obtiene una ventana con los parámetros requeridos en la subrutina Techo, figura 3.25

Block Parameters: Tapa	
Subsystem (mask):	
Parameters:	
Espejor Aislapoli (mm)	10
Espejor de madera (mm)	10
Espejor inox (mm)	0
Espejor plástico (mm)	0.25
Conductividad Térmica del Aislapoli (W/mK)	0.04
Conductividad Térmica de la madera (W/mK)	0.13
Conductividad Térmica del inox (W/mK)	15.5
Conductividad Térmica del plástico (W/mK)	0.24
<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Cancel"/> <input type="button" value="Help"/> <input type="button" value="Apply"/>	

Figura 3.25 Ventana de Datos Techo del Desalinizador

La subrutina para calcular la temperatura del techo se muestra en la figura 3.26.

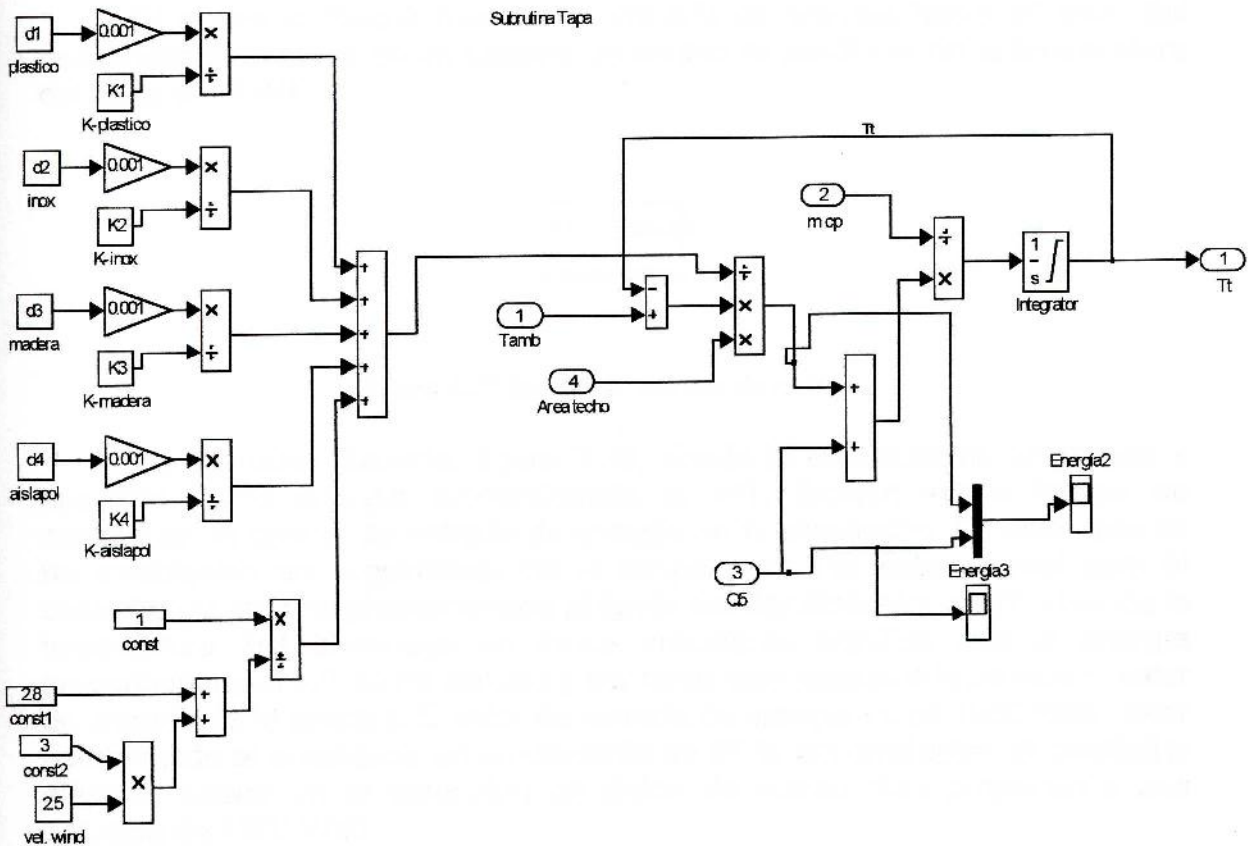


Figura 3.26 Subrutina Techo

En esta subrutina se determina la temperatura del techo del desalinizador, requerida en la quinta etapa B5. De esta forma se relaciona tanto el comportamiento que tiene el techo como el comportamiento del fondo del desalinizador, a través de las diferentes temperaturas en cada uno de los bloques.

Se considera además, un coeficiente global de transferencia de calor que considera la conducción a través del techo y paredes laterales, esto es entre la bandeja B5 y el techo y la convección exterior.

### 3.7 Entradas del Programa

#### 3.7.1 Entrada de energía

El siguiente bloque muestra la entrada de energía hacia el fondo del desalinizador a través de un sistema de control dependiente de la temperatura del agua en el WT.

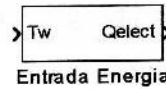


Figura 3.27 Bloque de entrada de energía

La subrutina utilizada, figura 3.28, simula la condición de encendido y apagado de la energía proporcionada al WT. Existen varias formas de establecer un control de entrada de energía en la simulación. En este caso se ha establecido un seguimiento de la temperatura  $T_w$  experimental para el control de la energía proporcionada al fondo del desalinizador o WT. Cuando la temperatura  $T_w$  disminuye en forma importante significa que la energía proporcionada al WT se ha cortado y por tanto esta subrutina hace cero el valor de entrada de la energía. El valor de entrada de energía es de 1050 Watt, valor determinado al considerar un rendimiento de 87.% del calefactor. El calefactor eléctrico usado en la obtención de datos de cuatro días proporciona una potencia de 1200 Watt.

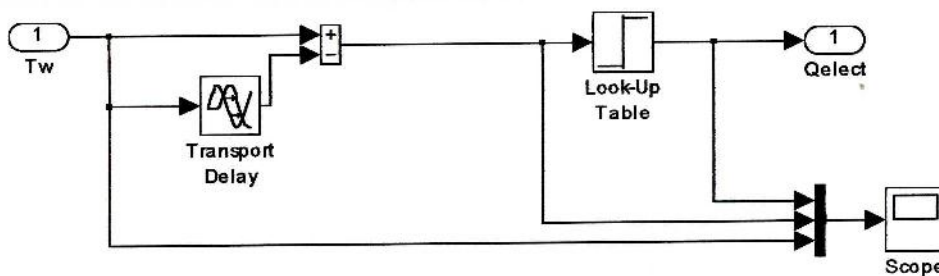


Figura 3.28 Subrutina entrada de energía

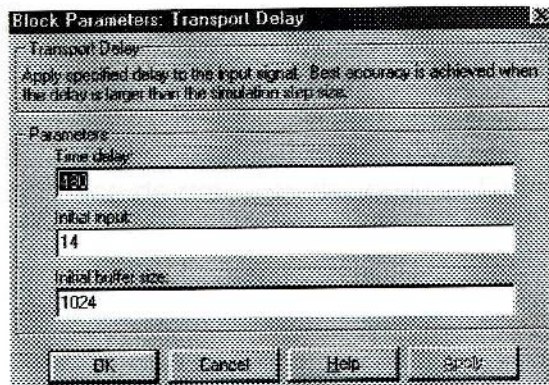


Figura 3.29 Ventana de Datos Control Delay

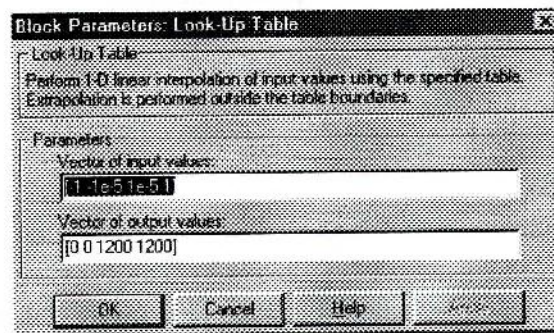


Figura 3.30 Ventana de Datos Control de Interpolación

Los valores de potencia se puede modificar en esta ventana dependiendo de la potencia entregada al WT

### 3.7.2 Entrada de datos

La figura 3.31 muestra los bloques utilizados para la entrada de la temperatura ambiental hacia cada una de las diferentes etapas y muestra además la forma de salida de las temperaturas experimentales desde una base de datos. En este caso la base de datos se denomina "Temperatura.dat".

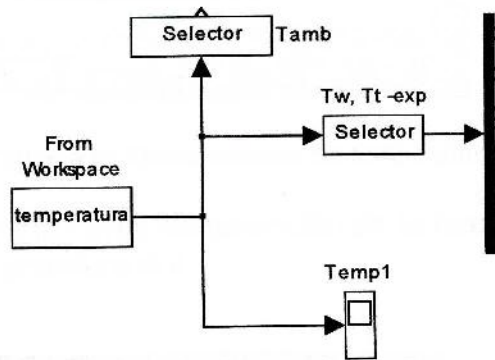


Figura 3.31 Bloques de entrada y salida de temperaturas

Al hacer doble clic en el bloque "Temperatura" aparece una ventana en donde se llama a la base de datos Temperatura.dat., figura 3.32

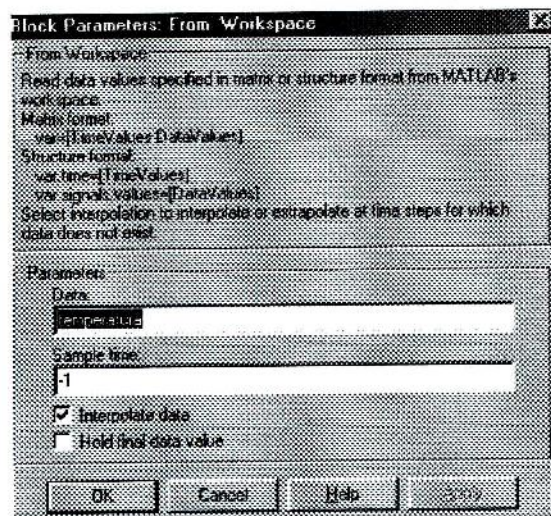


Figura 3.32 Ventana de Datos. Entrada de Base de datos

La figura 3.33 muestra la forma de selección de los elementos del vector temperatura desde la base de datos para las diferentes etapas.

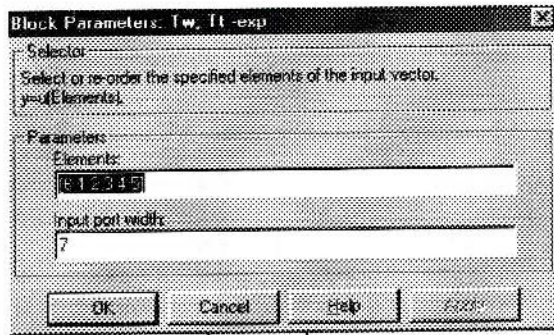


Figura 3.33 Ventana de Datos Selector de temperaturas

La figura 3.34 muestra la forma de selección de la temperatura ambiente desde la base de datos Temperatura.dat

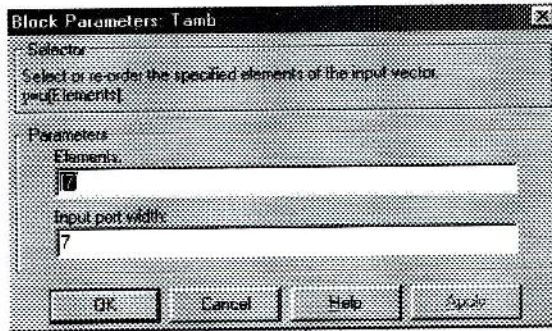


Figura 3.34 Ventana de Datos Selector de temperatura ambiente

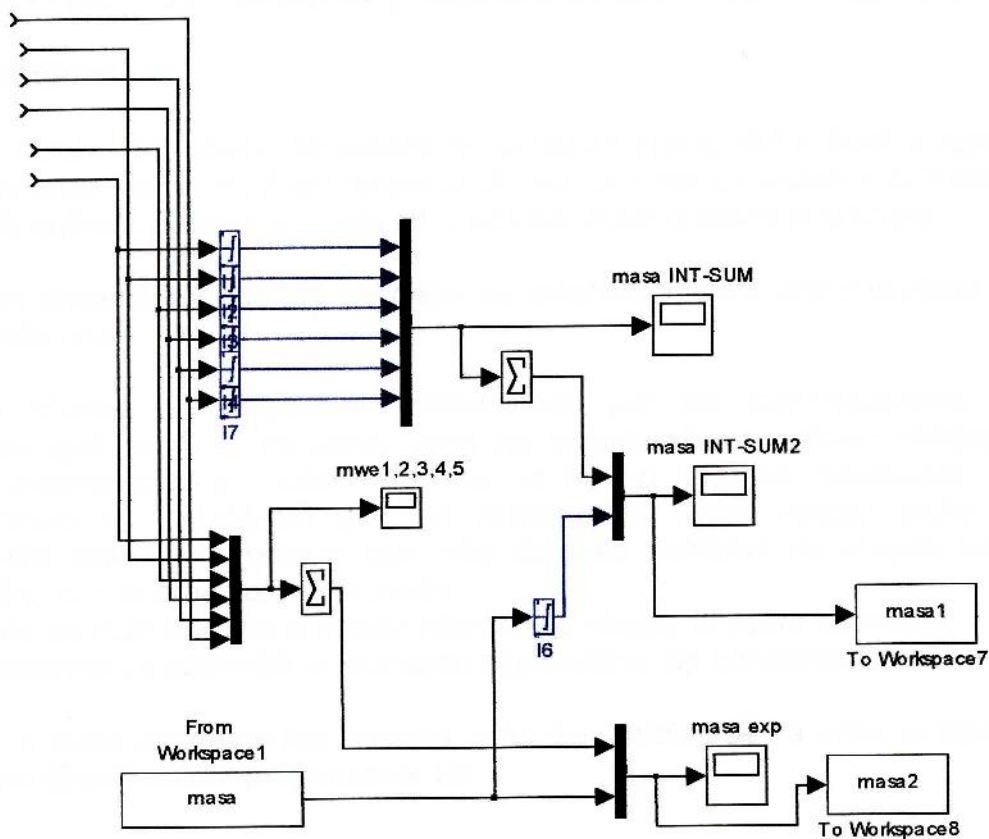


Figura 3.35 Entrada y salidas de datos de masa de destilado

La figura 3.35 muestra la forma de entrada de valores desde una base de datos de masa de destilado y la forma en que el programa los agrupa para sus salidas, ya sea a partir de datos o a gráficos.

### 3.7 Salidas del programa

El programa es sumamente flexible lo que permite realizar cambios de los parámetros de cada una de las etapas y modificaciones a las subrutinas desarrolladas. Con esto se pueden desarrollar nuevos modelos y usar nuevas formulaciones sin mayores problemas.

Las salidas del programa pueden ser modificadas como el usuario lo requiera o bien de las necesidades que se tenga en la simulación. Estas salidas pueden ser directamente a gráficos o bien a archivos de base de datos.

Las salidas que se han considerado importante en esta simulación son:

- El gráfico de comportamiento de la temperatura de las diferentes etapas a través del tiempo.
- Los gráficos de producción de condensado ya sea en forma individual por cada etapa o la suma de todos ellos.
- Los gráficos de energía a través del tiempo

Con las salidas anteriormente mencionadas se pueden realizar variadas formas de presentación de datos o información pertinente al comportamiento del desalinizador. Como por ejemplo la eficiencia del desalinizador en forma parcial o total, variaciones de la diferencia de temperatura en cada etapa, etc.

## **CAPITULO IV Diseño y Construcción de Prototipo**

### **4.1 Generalidades**

El diseño del equipo se realiza en conjunto con el Solar Institut Julich, (SIJ) pensando en un equipo compacto al cual puedan conectarse diferentes formas de entrada de energía, esto es, eléctrica, solar o gases residuales.

Las dimensiones de las bandejas se establecen para una superficie de  $0.5 \text{ m}^2$  cada una.

El número de etapas es determinado por las investigaciones ya realizadas que hasta el momento eran de cuatro. No se habían realizado muchas experiencias y sólo en el SIJ se tenían escasos resultados. En consecuencia se estableció que un número de cinco etapas sería de importancia estudiar y mostrar que más de esta cantidad de etapas sería innecesario con el área ya determinada. Importante es recordar que a mayor número de etapas el costo es mayor, y no necesariamente se obtendrá un aumento significativo del condensado.

Con estos antecedentes básicos y fundamentales se da inicio al diseño del equipo desalinizador propiamente tal.

### **4.2 Dimensiones Generales**

La forma del equipo se propone como un recipiente de sección cuadrada en que su interior satisfaga el área requerida de  $0.5 \text{ m}^2$ . La altura, que dependerá además del número de etapas, de la distancia entre ellas, será del orden de 1.4 m.

El sistema general de desalinización estará compuesto por:

- 1.- Desalinizador
- 2.- Estanque de alimentación
- 3.- Sistema de control de alimentación
- 4.- Colector solar
- 5.- Estanque de expansión
- 6.- Estructura soporte de desalinizador
- 7.- Estructura soporte de colector solar
- 8.- Tuberías conexión colector- desalinizador
- 9.- Sistema de acumulación de condensado
- 10.- Sistema de registro de temperaturas

En el siguiente detalle se darán algunas nociones de las dimensiones generales para la construcción del equipo.

### 4.2.1 Dimensiones del Desalinizador

Las dimensiones del desalinizador son en su interior de 700x700x1400 como se muestra en la figura 4.1.

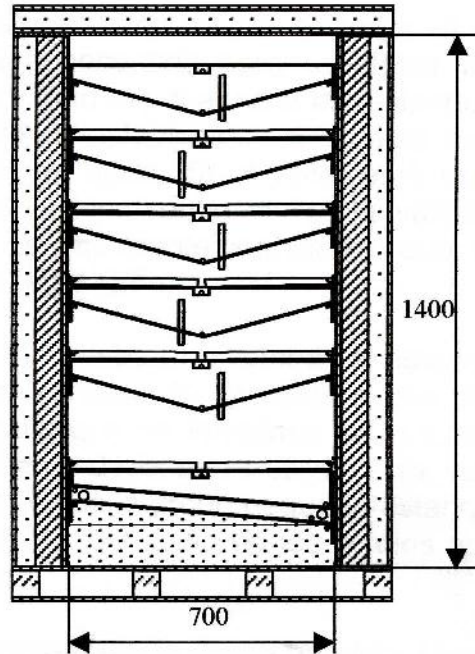


Figura 4.1 dimensiones del Desalinizador

### 4.2.2 Dimensiones del Estanque de alimentación

El estanque de alimentación que se encuentra apoyado en la parte superior del desalinizador tiene una capacidad de 200 litros. Sin embargo esta capacidad puede ser distinta, dependiendo de las condiciones locales de abastecimiento de agua y de la renovación de ésta.

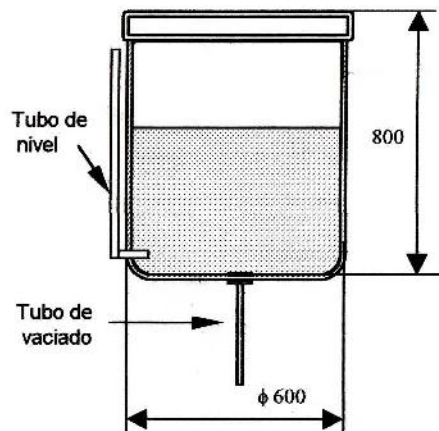


Figura 4.2 Dimensiones del estanque de alimentación

### 4.2.3 Sistema de control de agua de alimentación

El sistema aquí propuesto, es un sistema mecánico de muy fácil construcción, pero que requiere de algo de tiempo para su ajuste.

La función de este sistema es de entregar el agua proveniente del estanque de alimentación necesaria para satisfacer los requerimientos del estanque de doble fondo. Esto es, si el nivel del estanque de doble fondo está por debajo del límite inferior establecido, el sistema de control debe abrir la válvula para dejar pasar el agua. Si el nivel está sobre el límite superior establecido, entonces el sistema debe cerrar la válvula. Así se controla la alimentación de agua. Es importante mencionar que existe una inercia de llenado lo que dificulta la regulación.

El sistema consta de una barra pivoteada al estanque que en uno de sus extremos está conectada a través de un cable a una válvula de guía cónica. Esta válvula tiene una guía que se introduce en el tubo de alimentación del estanque. En el otro extremo de la barra se conecta, también a través de un cable, un flotador que se deposita en un pequeño estanque de control de nivel del estanque doble fondo. La variación de los niveles es bastante pequeña lo que dificulta la regulación.

El agua ingresa primero por la última bandeja. Una vez que se llena esta bandeja, llena la penúltima por trasvasije. Así sucesivamente hasta llenar la bandeja de doble fondo, la cual esta conectada con el flotador en un pequeño recipiente de control de nivel.

En la figura 4.3 se pueden apreciar algunos detalles de construcción del sistema de alimentación de agua, pivote y válvula. No se han puesto dimensiones en este caso pues pueden ser variables dependiendo de la ubicación y capacidad del estanque.

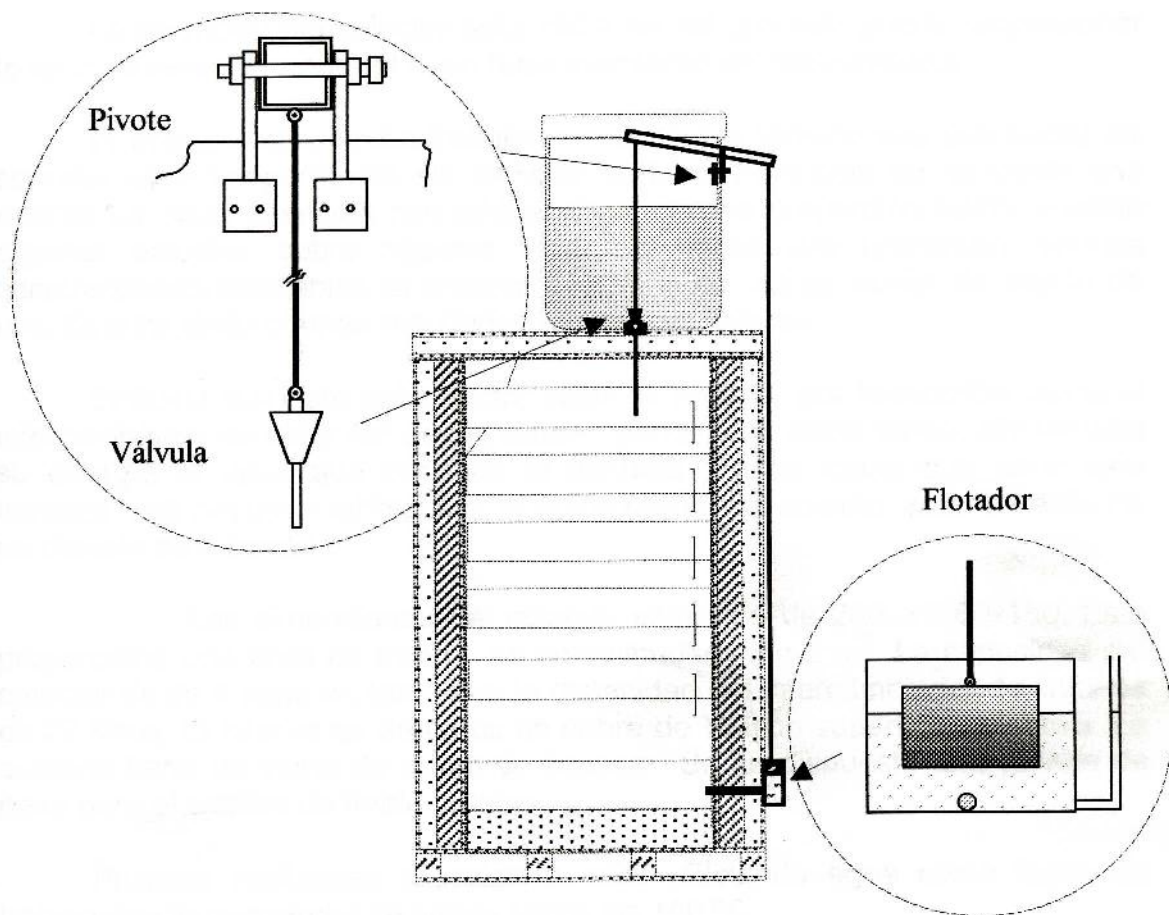


Figura 4.3 Sistema de alimentación de agua

#### 4.2.4 Colector solar

La selección del colector solar debe ser tal que éste pueda proporcionar la energía necesaria para el buen funcionamiento del desalinizador.

El colector solar debe trabajar con un fluido térmico que sea capaz de soportar altas temperaturas sin cambiar su fase. Para esto se ha usado una mezcla de agua destilada con etileno glicol en una proporción 60/40. Existen algunos estudios sobre algunos fluidos térmicos que presentan algunas características favorables al respecto como lo es utilizar aceite de pepita de uva. Este ha dado buenos resultados en cocinas solares.

El fluido que sale del colector solar es llevado, por termosifón, hacia el intercambiador de calor del desalinizador, bandeja de doble fondo. Ahí entrega su energía al agua que contiene la bandeja. Por la forma que tiene esta bandeja, una pequeña inclinación, el fluido regresa al colector solar a través de un circuito de tuberías.

Las dimensiones del colector solar son de 2000x1000x150. Esto proporciona una área de trabajo de aproximadamente 2 m<sup>2</sup>. La capacidad del colector es de 4 litros en tanto que la capacidad del intercambiador de calor es de 22 litros. El interior es de tubos de cobre de ¼" con superficie selectiva. La cubierta tiene un vidrio de 4 mm de espesor. Se ha dispuesto una válvula de paso para el cambio de fluido térmico.

Pruebas realizadas al colector solar utilizando agua como fluido de trabajo dan temperaturas de salida sobre los 100 °C.

En relación con la ubicación en la instalación general, es importante destacar que la salida del colector debe ubicarse, en relación con el nivel más bajo del intercambiador, a una distancia mínima de 30 cm. Se han realizado pruebas al respecto para determinar la distancia óptima de funcionamiento del colector solar.

La distancia y forma de la unión entre el colector solar y la entrada del intercambiador de calor debe ser tal que se evite lo más posible las pérdidas de carga. La unión desde la salida del intercambiador de calor y la entrada al colector solar no está sujeta a esta restricción, sólo se debe ubicar el menor trayecto y mantener una estética del sistema.

La inclinación y orientación que debe tener el colector solar depende de varios factores como lo son, por ejemplo, la latitud, lugar de instalación y la estación del año en que se trabaje. En este caso se ha utilizado una inclinación de 30 ° orientado hacia el norte.

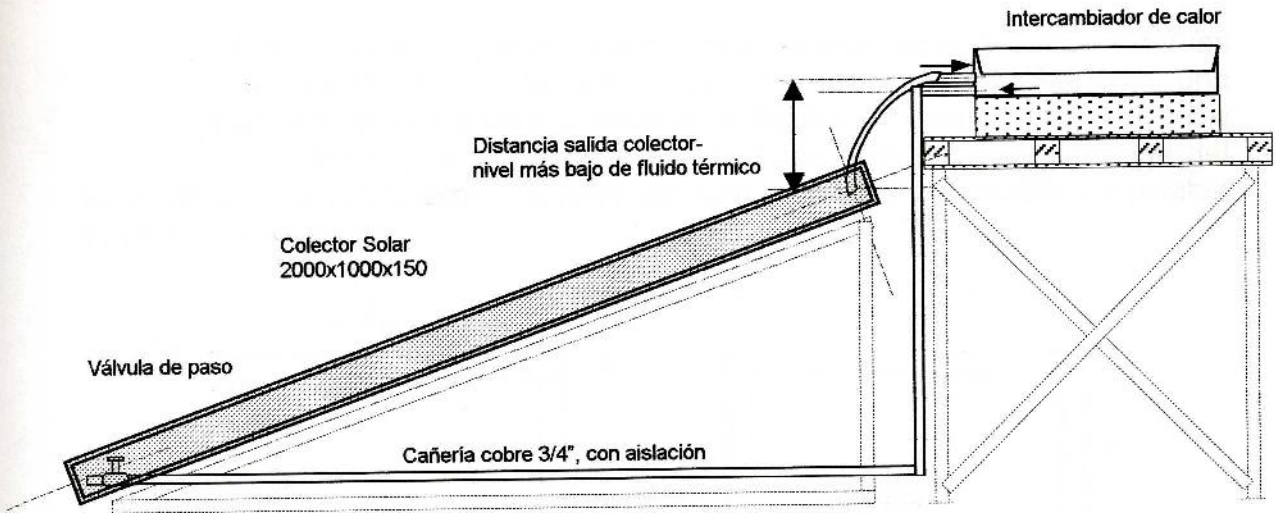


Figura 4.4 Sistema Colector solar – Intercambiador de calor

#### 4.2.5 Estanque de expansión

El estanque de expansión es un depósito para proteger al sistema colector solar- intercambiador de calor de las fluctuaciones de volumen que experimenta el fluido térmico al aumentar la temperatura. Este ha sido sobredimensionado por efectos de se cambiará el fluido de trabajo. Además permite la liberación del aire acumulado y el llenado del sistema.

La capacidad de este estanque se determina con la ecuación de expansión volumétrica

$$V = V_0(1 + \beta \Delta T)$$

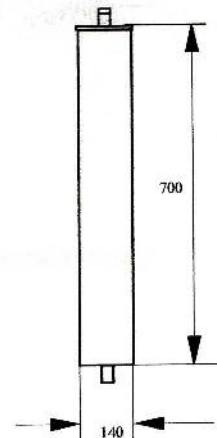


Figura 4.5 Esquema de estanque de expansión

Debe ser ubicado en la parte más alta de la instalación de tuberías a la salida del colector solar.

#### 4.2.6 Estructura soporte de desalinizador

Se debe considerar que el colector solar necesariamente debe estar mas bajo que el desalinizador. Por esta razón en este se ha propuesto una estructura soporte metálica para conseguir el objetivo de distancia mínima entre la salida del colector y el nivel mas bajo de fluido térmico. Esto depende del lugar de la instalación. En un terreno con una inclinación favorable, es posible evitar esta estructura.

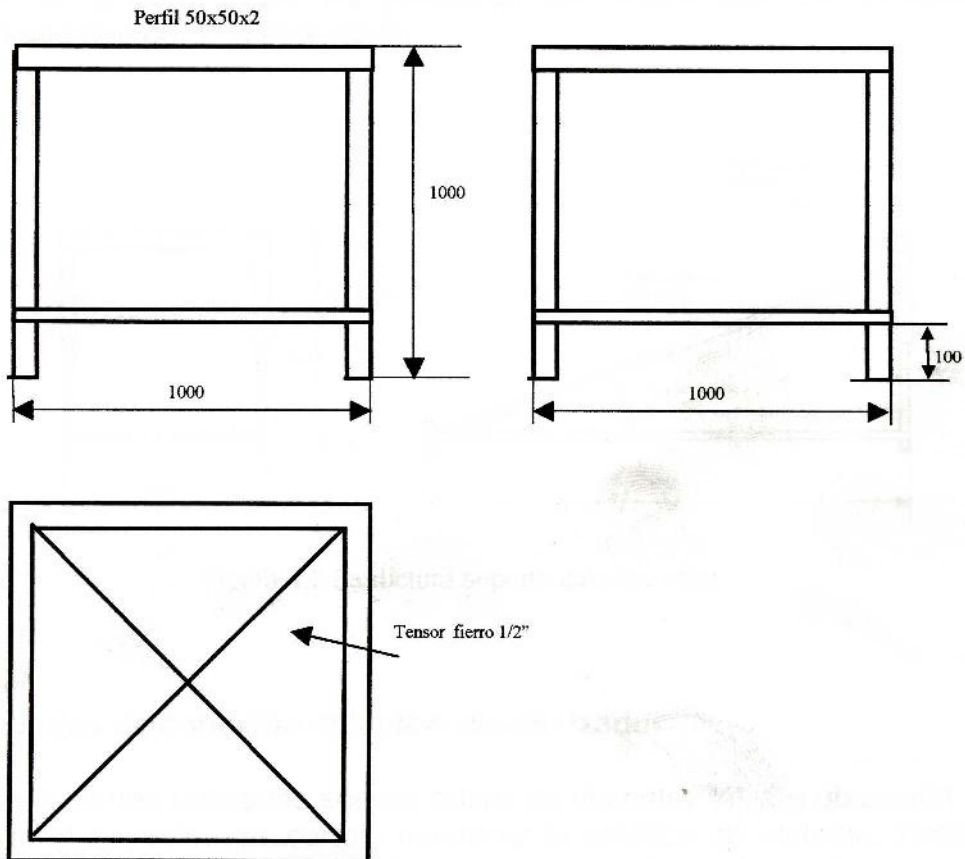


Figura 4.6 Esquema de estructura soporte del desalinizador

#### 4.2.7 Estructura soporte colector solar

Dado que se debe dar una inclinación al colector solar se hace necesario una estructura que lo sostenga. Como la inclinación es dependiente del lugar de instalación, se propone una estructura en la cual se pueda variar dicho ángulo.

Esta forma de soportar el colector solar también puede no ser considerada, dependiendo de la ubicación de este en terreno. Se puede construir en el mismo sitio una pendiente para sostenerlo con los cuidados correspondientes para su protección.

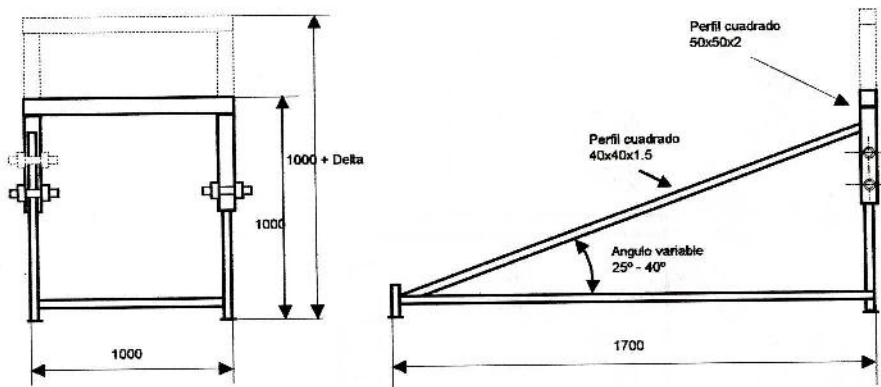


Figura 4.7 Estructura soporte colector solar

#### 4.2.8 Tuberías de conexión colector- desalinizador

Las tuberías utilizadas son de cobre de diámetro  $\frac{3}{4}$ ". Su ubicación debe considerar el trayecto más corto y mantener la estética del sistema. Todas las tuberías que transportan el fluido térmico deben estar aisladas térmicamente. Para estos se ha utilizado una espuma de aislación de 10 mm. de espesor de diámetro interior  $\frac{3}{4}$ ".

Las dimensiones del largo de las tuberías dependen de la ubicación en terreno. Ver figura 4.4

#### 4.2.9 Sistema de acumulación de condensado

Cada una de las etapas tiene una salida para la acumulación del condensado. Estas salidas son tubos de 10 mm de diámetro a los cuales se les ha adaptado una manguera la cual hace llegar el condensado a los diferentes depósitos de acumulación.

Es importante destacar que los conductos que llevan el condensado deben presentar la mínima resistencia. Por esta razón se deben ubicar en forma directa desde la salida de cada etapa hacia los depósitos. El depósito debe estar abierto a la atmósfera para evitar resistencia al paso del fluido.

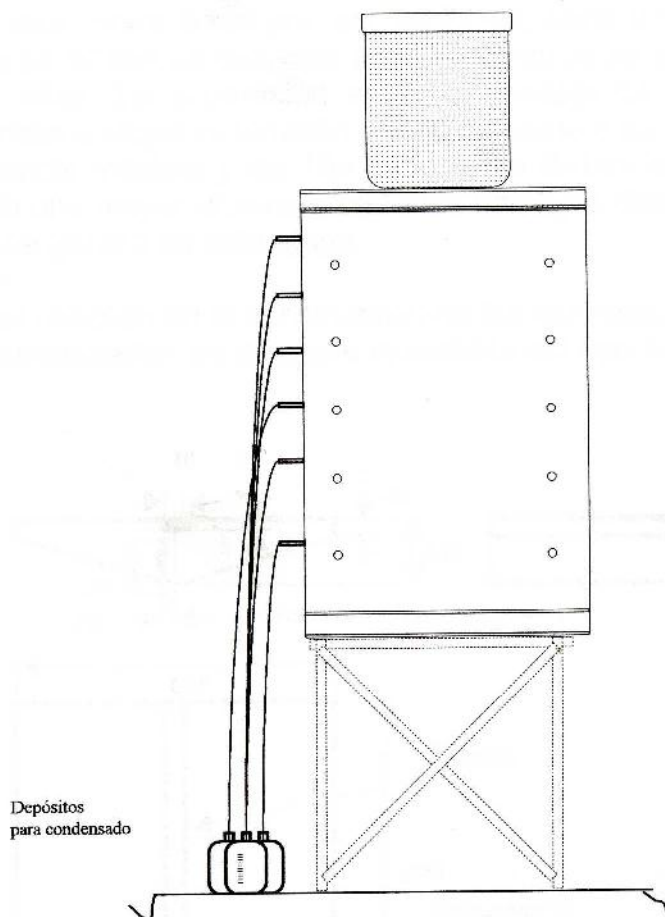


Figura 4.8 Acumuladores de condensado



### 4.3 Aspectos generales de Diseño

#### 4.3.1 Bandejas

Las bandejas de cada una de las etapas tiene una capacidad máxima de 45 litros con la excepción de la bandeja de doble fondo que tiene una capacidad máxima de 35 litros. Esto permite cumplir las funciones de evaporador y condensador a la vez.

La forma inclinada de las bandejas permite la condensación de del vapor generado en la bandeja que le precede. Se ha propuesto una inclinación de  $15^\circ$ . Esto permite que el condensado fluya por la superficie inclinada y conducida a las canaletas de salida.

La separación entre bandejas, por su forma, tiene una máximo de 160 mm y un mínimo de 60 mm La distancia para los cálculos se ha estimado en un promedio entre ellas. La separación entre la bandeja de doble fondo y la bandeja de la primera etapa es también variable debido a su forma y es de 250 mm. en su distancia máxima y de 150 mm. en su distancia mínima. En este caso se ha dado una mayor distancia entre las bandejas debido al mayor nivel de energía que se genera en esta etapa.

El material utilizado en la construcción de las bandejas, así como en todo el interior del desalinizador, es de acero inoxidable del tipo AISI 316L de 1 mm. de espesor.

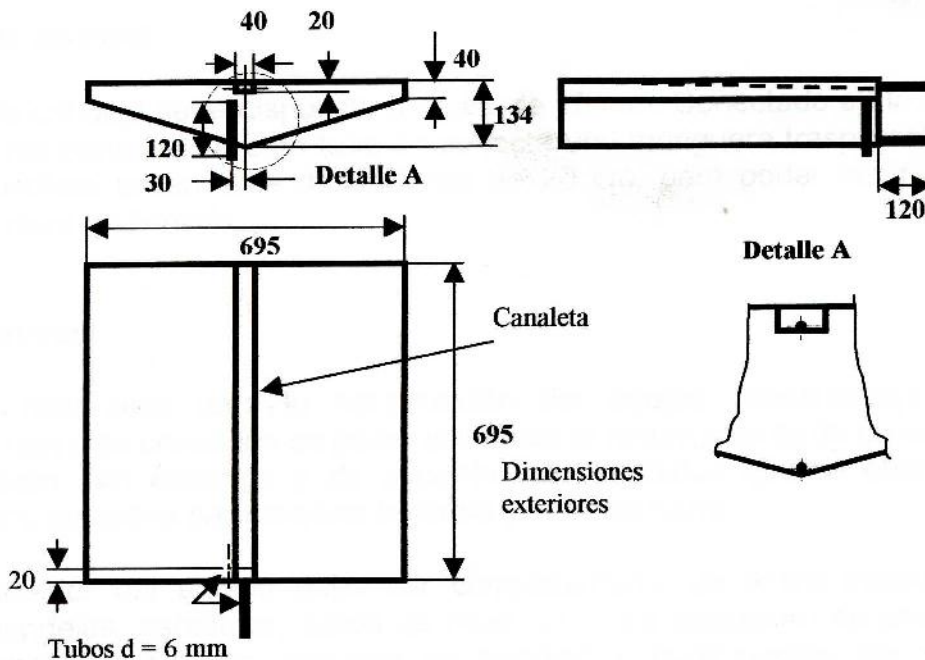


Figura 4.9 Esquema de Bandeja Principal

### 4.3.2 Canaletas

La misión de las canaletas es coleccionar el condensado y llevarlo hacia la salida del desalinizador. Se han dispuesto dos tipos de canaletas, la canaleta principal, que tiene forma de U e inclinación como se muestra en la figura 4.9 y la canaleta secundaria o canaleta lateral.

Las canaletas laterales sirven para coleccionar el condensado que se produce en las paredes laterales del equipo. Con esto se pretende optimizar la producción del desalinizador. La forma de estas canaletas se muestra en la figura 4.10.

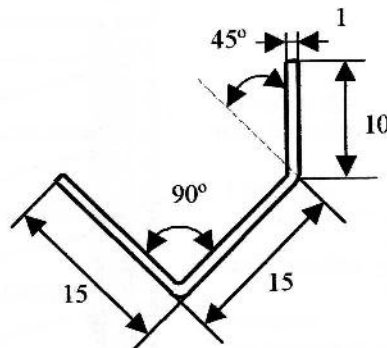


Figura 4.10 Perfil de canaleta lateral, posición de trabajo

### 4.3.3 Tubos de nivel

Cada bandeja tiene dispuesto un tubo de 10 mm. Conectado en la parte inferior de las bandejas. A este tubo se conecta una manguera transparente en dirección vertical ascendente de un largo de 20 cm, para poder controlar y verificar el nivel de llenado

### 4.3.4 Materiales

Los materiales para la construcción del equipo desalinizador son variados y han sido pensados en poder satisfacer el requerimiento de un equipo de bajo costo. Sin embargo y de acuerdo los resultados que se obtengan pueden ser cambiados para mejorar la forma y su estructura.

El interior del equipo debe ser completamente de acero inoxidable, paredes bandejas, canaletas, tubos de nivel, etc. La estructura se propone completamente de madera, paredes de terciado a continuación del acero inoxidable, vigas de pino con uniones apernadas, techo de pino, que pueda soportar el peso del estanque de alimentación y fondo del mismo material.

El equipo desalinizador requiere de aislación para su funcionamiento. Para esto se ha determinado el uso de lana mineral y de poliuretano expandido de baja densidad. Las dimensiones de los diferentes aislantes son: 50 mm de espesor para el poliuretano de baja densidad y de 70 mm para la lana mineral. El equipo se debe cubrir completamente con la aislación propuesta. En la figura 4.11 se distinguen los diferentes materiales y ubicación de ellos en el desalinizador.

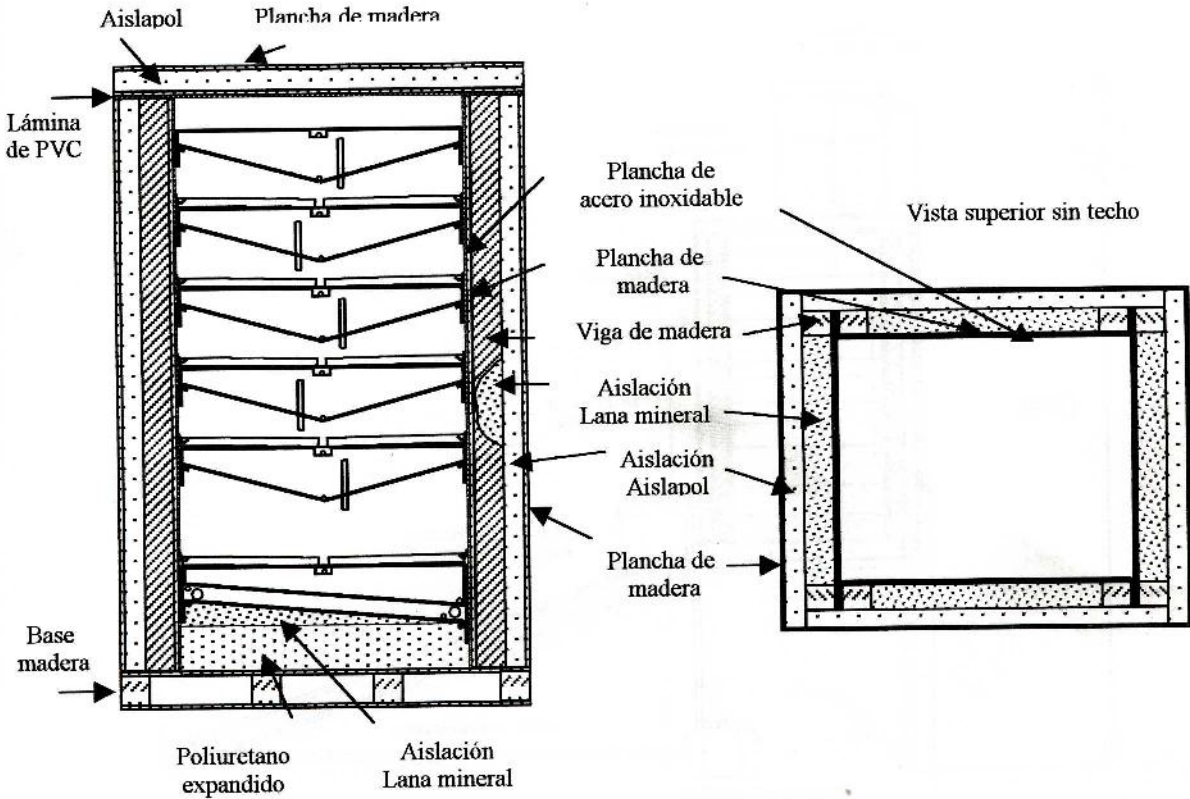


Figura 4.11 Materiales del desalinizador

#### 4.4 Sistema de desalinización solar

Al considerar todos los aspectos antes mencionados en relación con el diseño de los diferentes componentes del equipo desalinizador se ha llegado a establecer las dimensiones y formas de ubicación de cada uno de ellos.

En la siguiente figura se muestra el esquema y dimensión general del desalinizador solar.

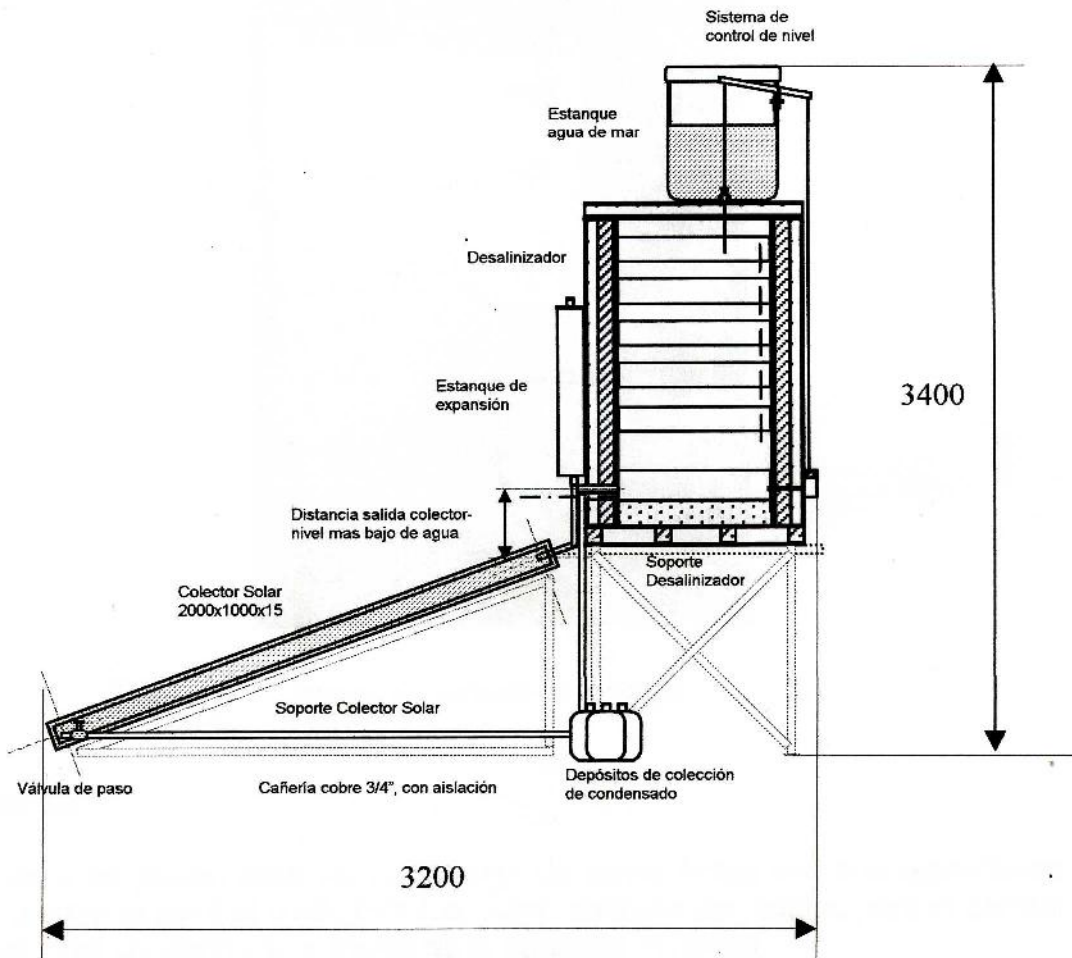


Figura 4.12 Esquema general de desalinizador solar

#### 4.5 Construcción e instalación de prototipo

A continuación se muestran algunas imágenes de las etapas de construcción e instalación del prototipo

##### Imagen 4.1

En esta imagen se puede apreciar la etapa de montaje de las diferentes bandejas y la ubicación de los tubos de salida



Imagen 4.1 Armado de bandejas

##### Imagen 4.2

Aquí se puede apreciar la bandeja de doble fondo con sus respectivas salida y entrada para el fluido térmico, como también las salidas para el control de nivel y del condensado a través de la canaleta principal.

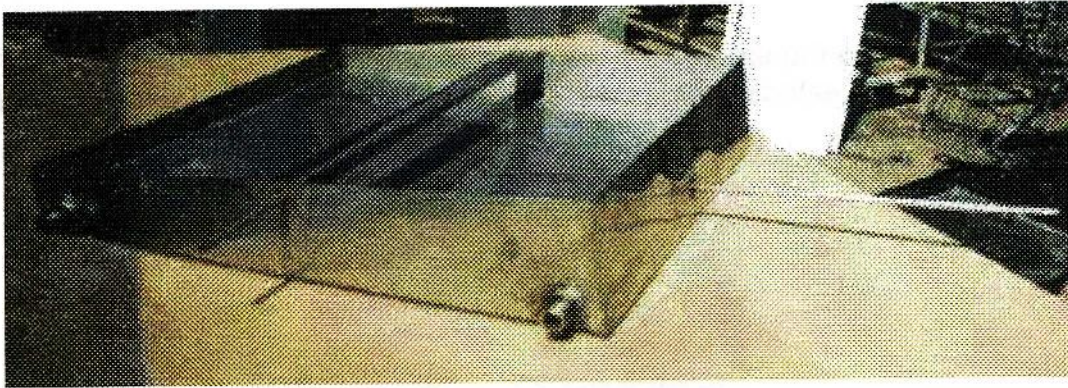


Imagen 4.2 Bandeja de doble fondo

### Imagen 4.3

La bandeja principal con sus respectivas salidas para el control de nivel y salida de condensado.

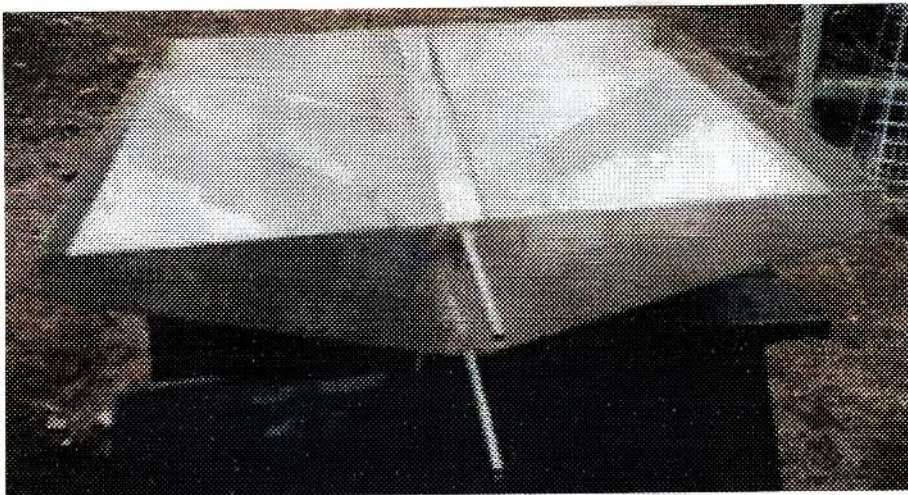


Imagen 4.3 Bandeja principal

**Imagen 4.4**

En esta imagen se destacan la forma de la canaleta principal con el tubo de salida para el condensado, como también el tubo de rebalse.

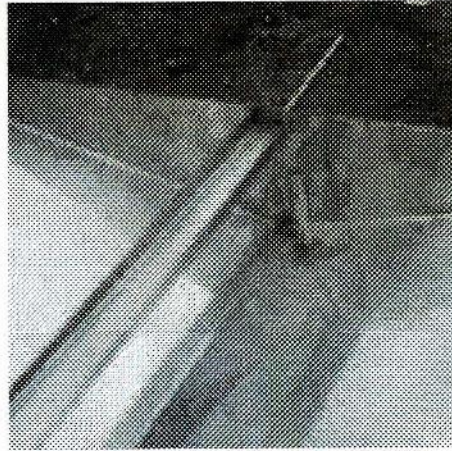


Imagen 4.4 Detalle canaleta principal

**Imagen 4.5**

La llegada al Laboratorio de Energía Solar del Universidad Técnica Federico Santa María. Aquí se aprecia el equipo desalinizador junto al colector solar antes de la instalación de tuberías y accesorios.

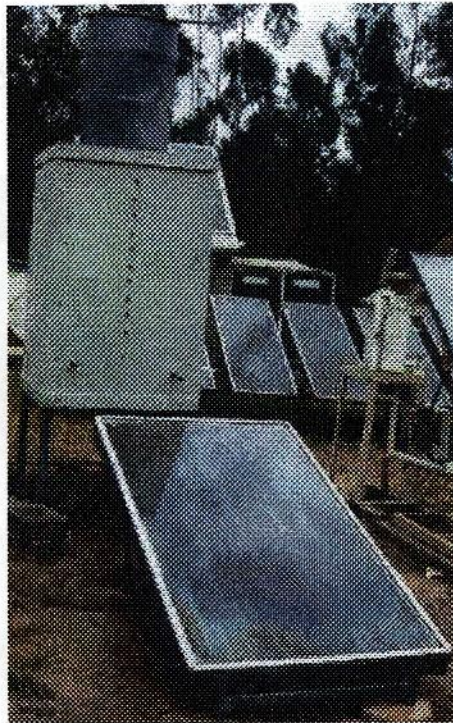


Imagen 4.5 Desalinizador-Colector antes de instalación

### Imagen 4.6

Instalando las tuberías del circuito colector solar y el Intercambiador de calor.



Imagen 4.6 Instalación tuberías colector

### Imagen 4.7

Se aprecia la instalación de las tuberías del colector antes de realizar la aislación térmica.

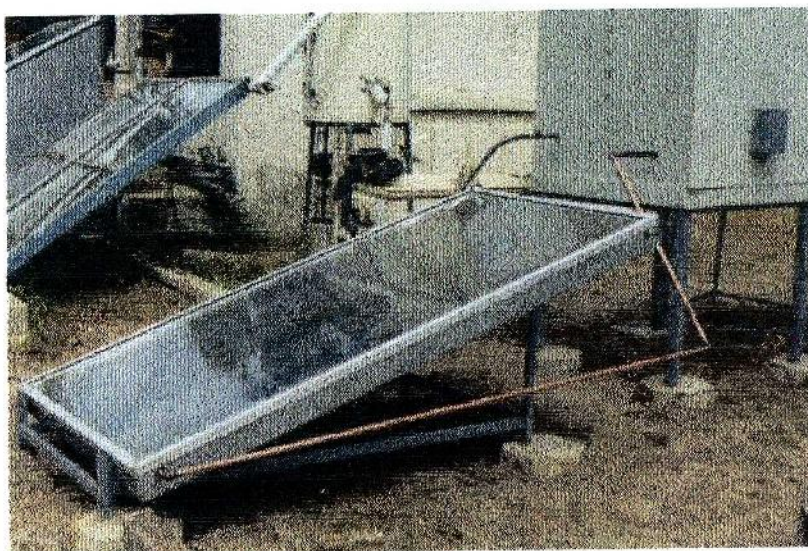


Imagen 4.7 Colector solar

**Imagen 4.8**

Vista general del sistema de desalinización solar en donde se destaca la instalación del estanque de expansión y la válvula de vaciado en el colector solar.

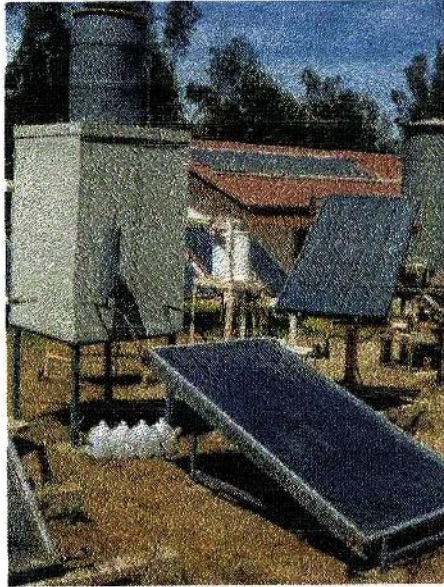


Imagen 4.8 ubicación del estanque de expansión

**Imagen 4.9**

Vista general posterior en donde se puede apreciar la ubicación de las bandejas en el interior del desalinizador.

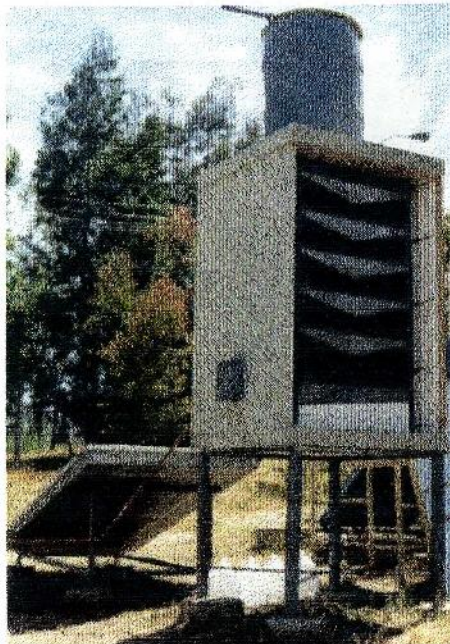


Imagen 4.9 Vista posterior

**Imagen 4.10**

Instalación del sistema de control del agua de alimentación. Se aprecia la barra pivoteada al estanque de alimentación y en el extremo la piola conectada al flotador

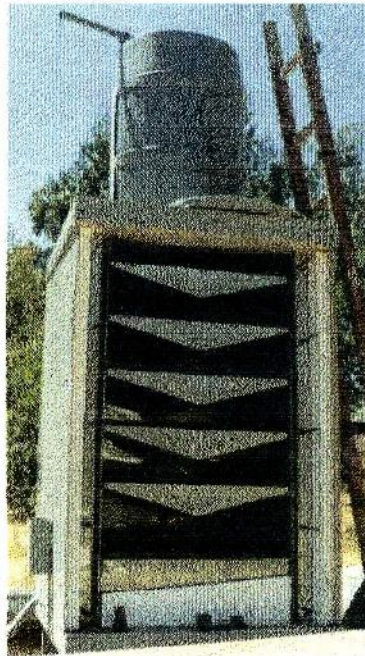


Imagen 4.10 Instalación del sistema de control del agua de alimentación

**Imagen 4.11**

Detalle de la piola conectada al flotador en el pequeño estanque de nivel de la bandeja de doble fondo.

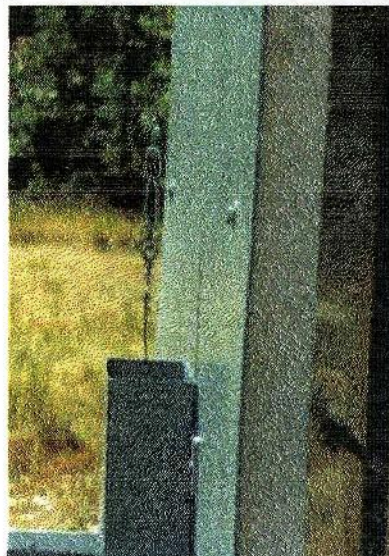


Imagen 4.11 Detalle sistema control de agua de alimentación

### Imagen 4.12

Sistema de desalinización con tuberías aisladas térmicamente e instalación de mangueras de salida de condensado.

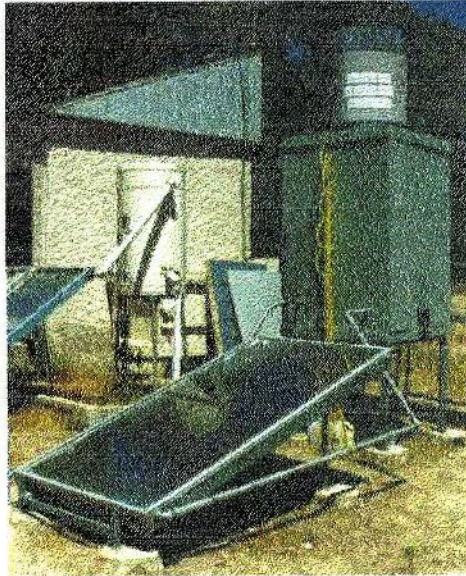


Imagen 4.12 Aislación de tuberías

### Imagen 4.13

Vista posterior del desalinizador en donde se muestra la ubicación de sellos en las bandejas.



Imagen 4.13 Ubicación de sellos de bandejas

**Imagen 4.14**

Prueba de llenado de agua del sistema. El agua de alimentación es ingresada por la parte superior y por rebalse se llenan las demás bandejas.

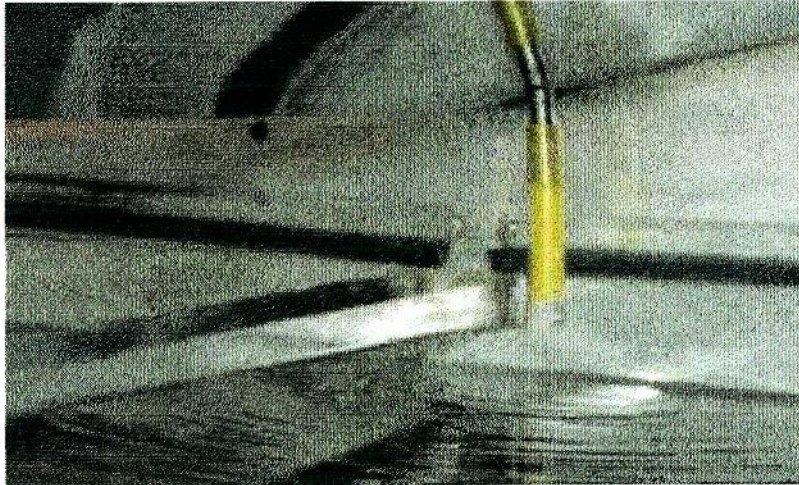


Imagen 4.14 Prueba de llenado

**Imagen 4.15**

Prueba de escurrimiento de las gotas de condensado en la superficie posterior de las bandejas.



Imagen 4.15 Escurrimiento de gotas de condensado

**Imagen 4.16**

Inspección de la termocupla ubicada en el estanque de expansión. Aquí se puede apreciar la aislación del estanque.



Imagen 4.16 Estanque de expansión

**Imagen 4.17**

Como se aprecia en la imagen, se han dispuesto 6 depósitos para la acumulación del condensado. Se realiza la medición de cada una de los depósitos.

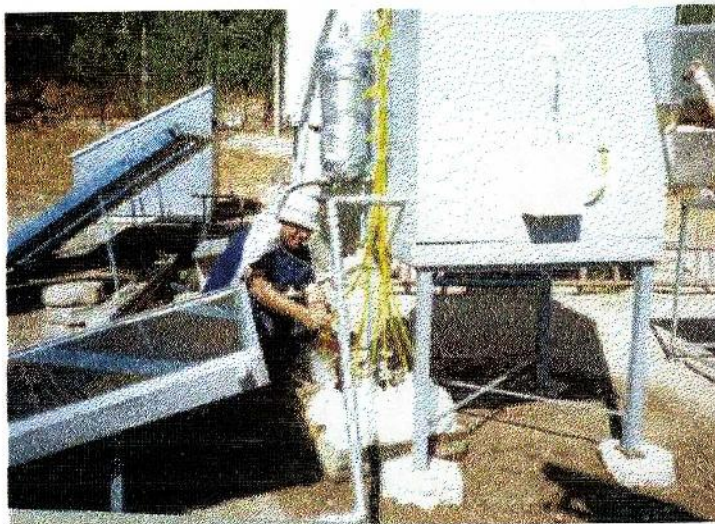


Imagen 4.17 Extracción de condensado

**Imagen 4.18**

Ajuste del sistema de alimentación

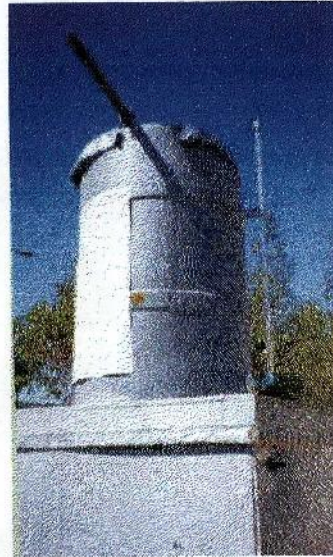


Imagen 4.18 Ajuste del sistema de alimentación

**Imagen 4.19**

Lectura de datos de temperatura en terreno. La información es recibida por un computador.

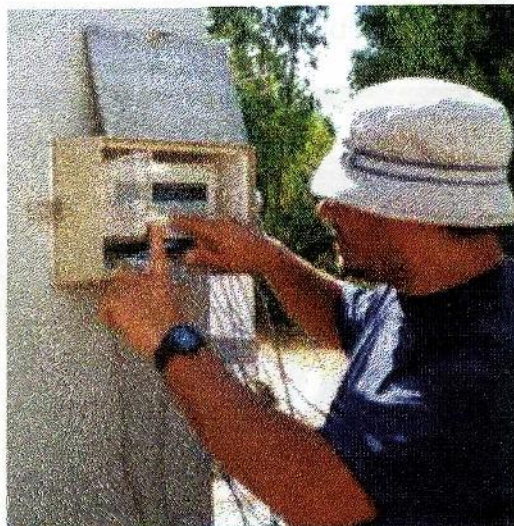


Imagen 4.19 Datalogger

**Imagen 4.20**

Detalle del Datalogger con la conexión de sus termocuplas

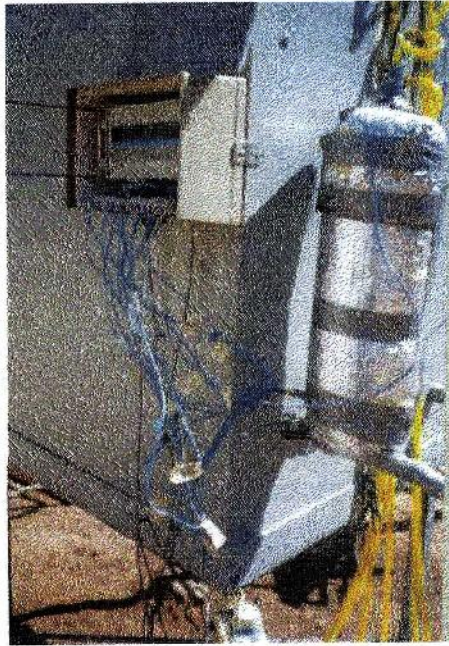


Imagen 4.20 Datalogger y Estanque de expansión

**Imagen 4.21**

Vista posterior del colector solar en donde se puede apreciar la estructura soporte y la tubería de entrada de fluido al colector



Imagen 4.21 Colector solar

## **4.6 Programa de Manutención**

En general el sistema de desalinización solar propuesto no requiere de grandes cuidados y su manutención es bastante sencilla. Sin embargo es importante mantener un cierto nivel de control para su correcto funcionamiento.

Por este motivo, se propone un programa de manutención y cuidado del equipo desalinizador con el fin de protegerlo de agentes externos que puedan dañarlo y de mantener un control de buen funcionamiento.

Las actividades a realizar para desarrollar el programa de manutención se resumen en la tabla 4.1 y se detallan a continuación:

### **1.- Limpieza de Colector Solar**

Para un adecuado funcionamiento del colector, la cubierta de éste, debe estar siempre limpia de agentes externos, como por ejemplo, polvo. Para esto se recomienda limpiar diariamente el vidrio de la cubierta con un paño afranelado húmedo.

### **2.- Inspección de fugas**

Para verificar que el sellado en las diversas uniones, tanto del equipo desalinizador como en las tuberías de conexión, están en forma correcta, se debe, mediante una inspección visual verificar si existen o no fugas, tanto de vapor como de fluido térmico.

Si existieran fugas de fluido térmico, pueden estar dañadas las tuberías de conexión, o la unión al estanque de expansión. Si la fuga es leve puede sellarse con un adhesivo o soldadura plástica. Si la fuga es mayor, entonces se debe reemplazar la pieza.

Si se verifican fugas de vapor en el equipo de desalinización, entonces los sellos de éste no están bien ajustado o bien el sello ha perdido su capacidad. En el primer caso se debe ajustar los pernos de apriete. En el segundo caso reemplazar el sello.

Este tipo de problemas no es muy probable, sin embargo se recomienda controlarlo una vez por mes.

### **3.- Inspección de Aislación**

Es importante que no se pierda energía en las tuberías, razón de por qué es importante que éstas estén térmicamente aisladas. La aislación puede sufrir deterioro debido a los cambios climáticos en el lugar o debido a agentes externos. Por este motivo, se recomienda inspeccionarla por lo menos una vez al mes.

La inspección se realiza en forma visual y en caso de encontrar alguna zona dañada, se debe reemplazar.

### **4.- Control de nivel del fluido térmico**

Debido a la alta radiación solar, el fluido térmico experimentará una baja en su nivel debido a la evaporación. Por este motivo, se recomienda controlar el nivel de éste por medio de una varilla de nivel, introduciéndola en el interior del estanque de expansión.

Si el nivel está por debajo del recomendado, se debe rellenar con el fluido térmico en uso.

El nivel de evaporación del fluido térmico no es demasiado alto, por lo que se recomienda realizar esta inspección cada 2 meses.

### **5.- Control de nivel de Estanque**

La producción de condensado está directamente relacionada con el nivel del estanque de alimentación y el nivel de éste con el tamaño del propio estanque. Para mantener un buen funcionamiento del sistema de alimentación se debe mantener el nivel del estanque en el rango recomendado. Este rango depende del tamaño del estanque y del ajuste en terreno del sistema alimentación.

Se propone que se realice una inspección visual del nivel del estanque por lo menos una vez por semana. Si el nivel está bajo el rango recomendado, se debe rellenar el estanque.

### **6.- Limpieza de Estanque**

El depósito de agua de alimentación se debe proteger de suciedad del medio ambiente y de la propia agua. Si bien es cierto que el estanque se debe cubrir con una malla fina y una tapa, existe la posibilidad de encontrar suciedad en éste que pueda obstaculizar el paso a través de los tubos de rebalse. Se recomienda realizar una limpieza cada 2 meses.

## 7.- Limpieza de ductos de salida de bandejas

Los ductos de salida de las bandejas, tanto los de salida de condensado como los de control de nivel, pueden presentar alguna obstrucción al paso del fluido debido a elementos de suciedad y debido al depósito de las sales que contiene el agua. En los ductos de control de nivel, este hecho perjudica la visión del nivel del agua.

La limpieza se puede realizar desconectando las mangueras de los ductos, limpiando su interior con una escobilla. Esta operación se recomienda sea por lo menos cada mes.

## 8.- Control de nivel de bandejas

Como una forma de verificar si el sistema está funcionando en forma correcta, los niveles de cada una de las bandejas debe mantenerse en los límites previamente establecidos. Si algún nivel está por encima o por debajo de los límites establecidos, puede deberse a algún elemento extraño en el interior de alguna de las bandejas. Por este motivo se recomienda revisar por lo menos una vez por semana los niveles.

Si se presenta algún problema en este sentido, se debe realizar una limpieza de ductos de salida como se especifica en el ítem anterior.

## 9.- Limpieza de Bandeja

Debido a la alta concentración de sales o salinidad en el agua, después de un periodo importante de tratamiento del agua de mar o bien debido a la acumulación de depósitos o incrustaciones, es importante realizar una limpieza de las bandejas.

Una estimación de la salinidad máxima permitida para un buen funcionamiento del sistema es considerar el aumento de salinidad en la bandeja de mayor producción de condensado hasta llegar al valor de la solubilidad del NaCl en el agua, esto es, 35 gr/100 gr agua.

Como se muestra en la figura 4.13 la estimación se puede hacer basándose en la proyección del aumento de la salinidad utilizando la ecuación de la recta

$$S = 3.8984 t + 23.24$$

Asumiendo una salinidad inicial del agua de mar de 23.4 gr/l, el tiempo para alcanzar la salinidad de 350 gr/l es de 83.8 días, alrededor de 12 semanas.

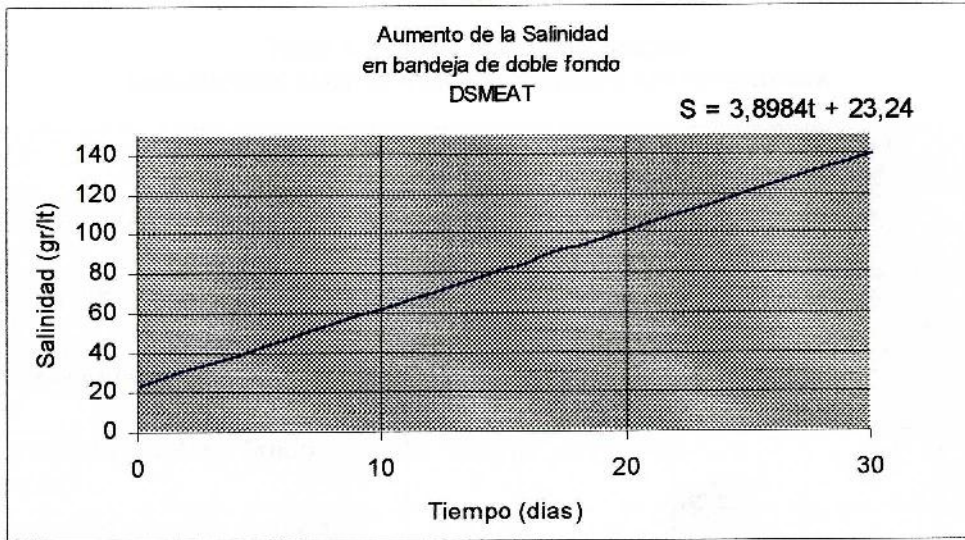


Figura 4.13 Aumento de salinidad

La limpieza de las bandejas que se ha estimado cada 3 meses se puede realizar de dos formas:

1<sup>ero</sup> Vaciar el agua altamente salina por los ductos de control de nivel de cada una de las bandejas o bien,

2<sup>do</sup> Debido a la acumulación de depósito del agua tratada, es importante realizar una limpieza de las bandejas. Para lograr el acceso a las bandejas, se debe abrir el equipo. Esto significa un alto en la producción de agua, pero se evita que el equipo baje su rendimiento debido a la modificación de los coeficientes de transferencia por concepto de grandes espesores de depósito.

Por lo menos cada 3 meses es importante realizar esta operación.

## 10.- Limpieza de tubos de rebalse en bandejas

Si se tiene el equipo abierto, es importante realizar una inspección global del interior de éste, limpiar, por ejemplo, los tubos de rebalse y canaletas laterales. Esta operación se debe realizar cada tres meses al igual que la limpieza de las bandejas, ítem 9.

Tabla 4.1 Programa de Mantenimiento  
Desalinizador solar de múltiples efectos a alta temperatura

Item	Actividad	Cada 1 día	Cada 1 semana	Cada 1 mes	Cada 2 meses	Cada 3 meses
1	Limpieza de Colector Solar	✓	-	-	-	-
2	Inspección de Fugas	-	-	✓	-	-
3	Inspección de aislación	-	-	✓	-	-
4	Control de nivel del fluido térmico	-	-	-	✓	-
5	Control de nivel de Estanque	-	✓	-	-	-
6	Limpieza de Estanque	-	-	-	✓	-
7	Limpieza de ductos de salida de bandejas	-	-	✓	-	-
8	Control de nivel de bandejas	-	✓	-	-	-
9	Limpieza de Bandeja	-	-	-	-	✓
10	Limpieza de tubos de rebalse en bandejas	-	-	-	-	✓

## CAPITULO V

### Proyecto de aplicación en caleta pesquera aislada

Se presenta a continuación una propuesta de proyecto de investigación aplicado a Caletas pesqueras aisladas en el norte de Chile. La base de este proyecto claramente tiene relación con el trabajo de Tesis desarrollado aquí y puede servir como base para la presentación a organismos públicos o privados que puedan financiarlo.

#### 5.1 Datos del proyecto

- **Título:** Desalinizador solar de agua de mar de múltiples efectos para caletas pesqueras aisladas: su diseño, simulación, construcción e instalación en el Norte de Chile

- **Empresas o instituciones ejecutoras**

Departamento de Mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa María  
Departamento de Mecánica de la Universidad de Tarapacá

- **Instituciones o empresas asociadas o colaboradoras**

Solar-Institut Juelich de la Fachhochschule de Aachen, Alemania, (SIJ)

- **Resultados e impactos:**

Se espera **desarrollar la tecnología** para poder solucionar los problemas de abastecimiento de agua para el consumo humano de pequeñas caletas de pescadores del Norte de Chile. Para los pobladores de una caleta definida se entregará una cantidad adecuada de agua, utilizando para ello un equipo de **desalinización solar de múltiples etapas, compacto, modular**, de alta producción y de bajo costo, desarrollado a través de un diseño optimizado, modelación, simulación y ensayos.

Se espera disponer de **una teoría y los modelos de simulación** adecuados para este tipo de desalinizador, que pueda mostrar el comportamiento de los parámetros tanto a bajas temperaturas (menor de 50°C), como a altas temperatura (mayor de 80 °C).

El proyecto presentado propone una **alternativa de suministro de agua**, frente al empleo de camiones aljibe usado en la actualidad en el norte de Chile. Puede reducir significativamente el costo del agua y hacer innecesario el

transporte desde los lugares con disponibilidad de él, hasta las localidades aisladas, mejorando así el actualmente deficiente abastecimiento de agua (1).

Incorpora la **energía solar**, renovable y no contaminante, para lograr suministrar agua para consumo humano y asegura así un suministro seguro, independiente y regular de agua.

La **incorporación activa de los pescadores artesanales** de las caletas al proyecto se logrará a través de un programa de capacitación, específicamente en las actividades de operación y mantenimiento del equipo de desalinización.

- **Montos absolutos y relativos**

<b>Monto total del proyecto</b>
<b>Total: \$20.613.936</b>

<b>MONTOS ABSOLUTOS Y RELATIVOS, \$</b>					
<b>ITEM</b>	<b>FUENTE DE FINANCIAMIENTO</b>				<b>TOTAL</b>
	<b>FONDO</b>	<b>UTFSM</b>	<b>SIJ</b>	<b>DAAD</b>	
Actividades	4.000.000	0	0	0	4.000.000
Personal	7.065.600	967.680	345.600	253.440	8.632.320
Equipos	200.000	1.800.000	0	0	2.000.000
Materiales	400.000	2.800.000	1.800.000	0	5.000.000
	<b>11.665.600</b>	<b>5.567.680</b>	<b>2.145.600</b>	<b>235.440</b>	<b>19.632.320</b>
	<b>59.42 %</b>	<b>28.36 %</b>	<b>10.93 %</b>	<b>1.29 %</b>	

<b>MONTO SOLICITADO AL FONDO, \$</b>	
Total parcial	11.665.600
5% total proyecto para evaluadores	981.65
<b>Total solicitado al FONDO</b>	<b>12.647.25</b>

- **Duración del proyecto**

Se estima una duración del Proyecto de 24 meses

## 5.2 Resumen ejecutivo

En muchas comunidades de **pescadores artesanales** de localidades aisladas en el norte de Chile, la cantidad de **agua** adecuada para el consumo humano **disponible** es insuficiente, lo que limita su desarrollo. Este panorama no es exclusivo del norte de Chile, sino que afecta a muchas localidades similares alrededor del mundo.

Existen varios procedimientos para la desalinización del agua, como por ejemplo, el sistema de **osmosis reversa, la electrodiálisis y la destilación**. Por lo general, presentan costos de inversión muy elevados y están orientados a requerimientos de mayores volúmenes, diferentes a las necesidades de una caleta pesquera.

La desalinización de agua de mar puede utilizar energía convencional o bien energía solar, siendo esta última una gran posibilidad para las zonas del Norte de Chile, pues se dispone de una alta radiación solar. Los sistemas solares son por lo general modulares, lo que permite adaptarlos a requerimientos crecientes en el tiempo, sin perder la inversión original. Su operación y mantención es sencilla, lo que permite hacerlo con una capacitación inicial mínima.

El proyecto trata del **diseño de un desalinizador solar de agua de mar** utilizando un **sistema de múltiples etapas**. Este equipo, que será diseñado, modelado, simulado, construido, evaluado e instalado, será capaz de proporcionar una adecuada cantidad de agua para el consumo humano, en localidades donde no se disponga de ella o bien sea escasa o salobre, como lo son, por ejemplo, muchas de las caletas pesqueras del Norte de Chile.

El diseño del equipo estará enfocado a un **equipo compacto, modular, de bajo costo, mantención sencilla y de alta eficiencia**.

Este proyecto enfatiza en primer lugar el diseño de un equipo de desalinización solar, considerando aspectos como su forma, dimensiones, materiales, análisis estructural y térmico de sus componentes, además de métodos de optimización de los diseños propuestos. Como segundo elemento, se considera la **modelación matemática** del sistema que comprende incorporar modelos teóricos de transferencia de calor y masa, así como termodinámicos. Como tercer elemento se considera la realización de una **simulación computacional**, contemplando varios modelos para la optimización del proceso. Otra etapa trata de la **construcción de un prototipo real**, de acuerdo al diseño propuesto y las mejoras incorporadas durante el proceso. Un nuevo elemento trata de la **evaluación del equipo** en laboratorio, proporcionando una retroalimentación de información para lo anteriormente realizado. Después se realizará la **instalación del equipo en una caleta pesquera del norte de Chile**. Se finaliza con la **evaluación de funcionamiento en terreno y capacitación de los usuarios**.

Se tendrá finalmente un **sistema desalinizador funcionando en terreno** y la **tecnología optimizada** para la construcción de más ejemplares para instalar en otros lugares con requerimientos similares.

### 5.3 Descripción del proyecto

#### 5.3.1 Problema central

Una cantidad importante de comunidades de **pescadores artesanales** (caletas pesqueras) en el norte de Chile **no cuentan con agua potable suficiente** para su consumo. Esto se debe a que no existe agua dulce en dichas zonas, que su ubicación geográfica es aislada y de un acceso relativamente difícil. El agua con que ellos cuentan, es proporcionada por las municipalidades a través de camiones aljibes, y es considerada por ellos de insuficiente [2]. A menudo, si falla un camión, incluso **no puede efectuarse** el suministro.

#### 5.3.2 Línea basal

Como se ha planteado en el problema central del proyecto, la situación de insuficiencia de agua en las caletas un problema gravísimo. Los antecedentes aquí planteados son producto de investigaciones realizadas en algunas localidades, como por ejemplo, caleta **Camaronés en la primera Región** [2] y **Caleta Maitén en la cuarta** [3]. Para conocerlos en su real dimensión, el proyecto plantea establecer un **catastro** de las diferentes localidades y determinar de manera exacta las necesidades de cada una de ellas.

#### 5.3.3 Población objetivo

La población objetivo es principalmente el **conjunto de comunidades pesqueras artesanales aisladas**, en las cuales el suministro de agua es insuficiente, que no cuentan con energía eléctrica de la red y que tienen alta radiación solar. Estos serán los beneficiarios directos del proyecto. Como beneficiarios indirectos, puede considerarse eventuales **pequeñas y medianas empresas** que aprovechen la tecnología desarrollada y fabriquen, instalen y mantengan equipos de desalinización, además de las instituciones participantes y sus investigadores: se fortalece la **investigación en la universidad**, creando equipos de trabajo de instituciones nacionales y extranjeras.

Este proyecto **plantea aumentar la cantidad de agua de consumo** para una de las localidades, que no supere una población de 50 personas. De esta población se pretende beneficiar al 100 %.

### 5.3.4 Descripción y metas

**El proyecto consiste en el diseño, simulación, construcción, evaluación e instalación de un equipo desalinizador solar de agua de mar, construido con la tecnología desarrollada para ello.**

Como metas parciales se plantea poder desarrollar un **diseño óptimo** del equipo, teniendo en consideración aspectos de forma, costos, materiales, ubicación óptima de sistemas de almacenamiento de agua de mar como también la captación y almacenamiento del condensado, además de los aspectos funcionales directamente involucrados.

En relación con la modelación, se plantea realizar un **modelo matemático** que represente el comportamiento del equipo, en especial su transiente de temperatura y la capacidad de condensado y permita obtener información relativa a su eficiencia en comparación con otros modelos y las posibilidades de mejorarla.

A partir del modelo matemático se realizará una **simulación** cuyos resultados se **contrastarán con datos experimentales** adquiridos una vez construido el equipo y realizada la etapa de evaluación. Para esto se dispone de la colaboración **de investigadores del Solar-Institut Juelich de la Fachhochschule de Aachen en Alemania**, los cuales cuentan con un software de biblioteca que permitirá avanzar en forma más rápida en esta etapa.

De acuerdo al diseño y las optimizaciones propuesto, se confeccionarán los **planos de fabricación del equipo** y se realizará la **construcción del equipo**.

Una vez construido, se procederá a realizar las **pruebas de funcionamiento en laboratorio**, midiendo los parámetros más representativos, como, p.ej. la temperatura, y el condensado de cada una de las etapas, temperatura del medio ambiente, energía calórica necesaria, etc.

**La instalación del equipo en terreno** es una de las etapas fundamentales de este proyecto, pues si bien es cierto que se desarrollará una investigación importante en el diseño, modelación y simulación del equipo, la instalación proporciona el aporte del proyecto hacia la gente, además de permitir obtener información valiosa para la investigación de post-evaluación y de **operación en terreno con todos los factores sociales involucrados**

### 5.3.5 Misión y objetivos

El proyecto tiene como finalidad **desarrollar la tecnología** que permita, aumentar la cantidad de agua para consumo humano de las personas que habitan en pequeñas caletas pesqueras aisladas del norte de Chile, a través, de un equipo de **desalinización solar de agua de mar**, permitiendo mejorar la calidad de vida de sus habitantes. Complementará otras tecnologías de

obtención de agua potable, que no se prestan para pequeñas localidades por costos de inversión o complejidad de operación.

Una de las misiones importantes de este proyecto es el de introducir una nueva tecnología en área de desalinización, utilizando para ello un desalinizador de múltiples etapas, utilizar energía no contaminante, usando un sistema de colector solar, además de incorporar a la gente en el cuidado, uso y mantención del equipo.

### 5.3.6 Entorno

Este equipo desalinizador utilizará un sistema de múltiples etapas, capaz de lograr producciones muy superiores a los ya tradicionales desalinizadores solares de batea (**20-30 l/m<sup>2</sup>-día** en vez de **4-6 l/m<sup>2</sup>-día**).

Los agentes involucrados en este proyecto son fundamentalmente la **Universidad Técnica Federico Santa María** a través de su Departamento de Mecánica, el **Solar-Institut Juelich** del país federal de **Nordrhein Westfalen** y la Fachhochschule de Aachen en Alemania y apoyo del Instituto Agrícola de **Weihenstephan de la Universidad Técnica de Munich**.

Se pretende incorporar y acercar la **investigación** en la Universidad al **desarrollo social** y a problemas reales del país. En una primera etapa se trabajará en la Universidad incorporando a académicos, investigadores y estudiantes tanto de Chile como de Alemania. Posteriormente, se incorporará a la gente directamente beneficiada, las personas de las caletas pesqueras, las cuales se encargarán del cuidado y mantenimiento del equipo.

La elección de la localidad donde se instalará el equipo es parte del trabajo de este proyecto; se definirá a partir de un estudio de las diferentes localidades.

La mayoría de las caletas pesqueras no cuentan con agua para consumo humano propia, sino que es llevada a través de camiones cisterna. Es el caso de Caleta Camarones, primera Región, caleta Puerto Oscuro en la cuarta Región, caleta Puerto Viejo y criadero de ostiones Bahía Salada en la tercera Región[5,6].

## 5.4 Relevancia del proyecto

### 5.4.1 Mérito innovador

Se desarrollará un nuevo modelo teórico que represente adecuadamente el comportamiento real de un **desalinizador solar de múltiples etapas**, lo que permite desarrollar y construir equipos de alta eficiencia y de bajo costo.

La instalación del equipo en las caletas pesqueras aisladas, donde no se cuenta con energía eléctrica proveniente de la red, no se disponga de agua suficiente para la población y donde la radiación solar es suficientemente alta para lograr buenos resultados, definitivamente ayudará a satisfacer una **necesidad básica**, como lo es el consumo de agua, aportando a mejorar la calidad de vida de las personas. Igualmente **acerca la investigación universitaria a problemas reales del país**.

El incorporar un **nuevo producto** en el mercado como será el destilador propuesto, una vez realizada la post-evaluación en terreno, permitirá contar con un **nuevo equipo de destilación**, eficiente y de bajo costo que podrá ser comercializado e instalado en otras localidades similares a las descritas.

El incorporar empresas del rubro térmico al área solar provocará una demanda significativa de los elementos que componen el equipo, ya que dará a conocer estos equipos aumentando la demanda también para otras aplicaciones solares (calentamiento de agua, calefacción, secado, etc.).

El proyecto permitirá el desarrollo de actividades de titulación, memorias y/o tesis de grado para estudiantes de ingeniería y estudiantes de postgrado y la publicación de resultados en revistas especializadas.

Se utilizará en Chile, un nuevo software computacional del área térmica, desarrollado en el Solar-Institut Juelich, de la Fachhochschule de Aachen.

### 5.4.2 Externalidades

Se formará un **equipo de trabajo**, incluyendo investigadores nacionales y extranjeros, así como las personas de las localidades directamente beneficiadas, aumentando así la capacidad investigadora del proyecto y la de recoger nuevas problemáticas, factibles de solucionar por este equipo u otros similares.

Se fomentará la creación de empresas a partir de los resultados obtenidos al realizar la post-evaluación del desalinizador, proponiendo un nuevo equipo de desalinización solar.

Se obtendrá una cantidad de agua adecuada para el consumo humano, orientado a las personas que habitan las caletas pesqueras en el norte de Chile, utilizando un equipo de desalinización solar de múltiples etapas.

#### 5.4.3 Impacto

Frente a las usuales formas de obtener agua para consumo mediante camiones [1,2,3,4], el proyecto propone una **alternativa** de suministro de agua, el **desalinizador solar de múltiples etapas**, que puede reducir significativamente el costo del agua para localidades aisladas.

Incorpora la **energía renovable**, no contaminante, para lograr suministrar agua para consumo humano en caletas pesqueras aisladas.

**Integra a los pobladores** al proyecto en la etapa de cuidado y mantenimiento del equipo de desalinización, proporcionándoles un entrenamiento adecuado.

#### 5.4.4 Resultados esperados

El resultado esperado es poder entregar una **cantidad adecuada de agua** a los pobladores de una caleta pesquera utilizando para ello un equipo de desalinización solar de múltiples etapas, de alta producción y de bajo costo, desarrollado a través de un óptimo diseño, modelación, simulación y construcción.

Un resultado más general será la **disponibilidad de una teoría y de la tecnología adecuada** para fabricar desalinizadores solares para ser usados en otras localidades.

Para realizar una evaluación del impacto social, se establecerán algunos criterios, que van desde lo más negativo a lo más positivo. Estos criterios serán desarrollados considerando lo que a la gente le satisface o no le satisface. Criterios como por ejemplo: No le sirve, innecesario, baja producción, le conviene, lo necesita, satisfactorio, etc..

Se establecerán, además algunos criterios para la evaluación del equipo: modular, económico, práctico, fácil de instalar, fácil mantenimiento, etc..

#### 5.4.5 Contribución a la solución del problema central

La incorporación, desarrollo, construcción, instalación y operación de un equipo de desalinización solar como el propuesto, será una **contribución a la solución del problema de escasez del recurso agua** en las pequeñas caletas pesqueras en el norte de Chile. **Complementa** otras soluciones que son apropiadas para localidades más grandes pero poco prácticas para pequeños poblados.

## 5.5 Viabilidad del proyecto

No se dispone o bien no se ha desarrollado un sistema de desalinización solar de múltiples etapas en Chile y además no se cuenta con una modelación adecuada para este tipo de destiladores, lo que hace que este proyecto sea un **aporte tecnológico** significativo.

Soluciones basadas en **energías alternativas** desarrolladas para Chungungo, Quillagua, Caleta Maitén etc., demuestran que es factible basarse en este tipo de energías para satisfacer necesidades elementales de la población, como el agua potable o la electricidad, por lo menos a pequeña y mediana escala.

La demanda por un equipo de desalinización sencillo y eficiente, se presenta en todas las caletas pesquera y localidades afines (como por ejemplo, el cultivo de ostiones en Bahía Salada), que presenten las características de falta o escasez de agua, zona costera y una adecuada radiación solar que permita el buen funcionamiento del equipo. Determinar la demanda real será parte de este proyecto, que incluye la confección de un catastro de los lugares que puedan ser aptos para su instalación.

La viabilidad de este proyecto se basa en el apoyo del Departamento de Mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa María, del Solar-Institut Juelich de la Fachhochschule de Aachen en Alemania, ambos con amplia experiencia en la utilización de energías renovables en forma realista [6,7]. Sus investigadores están activos ya por mucho tiempo en el área de la desalinización [8]. También son decisivas la incorporación de instituciones públicas, como por ejemplo, las municipalidades y las características del equipo a desarrollar, que entre otras cosas debe ser de bajo costo lo que significa que la inversión no es significativamente alta y lo que las experiencias previas realizadas indican factible de lograr [9].

Criterios de evaluación de la viabilidad del proyecto, pueden ser:

Apoyo de instituciones:	insuficiente, adecuado, importante
Experiencia de investigadores:	insuficiente, adecuado, importante
Nivel de inversión:	alto, medio, bajo

El proyecto comprende **una parte importante de investigación**, en la cual se realizarán las etapas de diseño, modelación, simulación, fabricación de prototipo, evaluación, instalación, operación y de post-evaluación, que también propondrá un plan de cuidado y mantenimiento, desarrollando un **programa de capacitación dirigido a los pobladores**. Con esto, además de incorporarlos activamente al proyecto, se pretende **augmentar la vida útil** del equipo (típico 20 años como valor de referencia), es decir, se aumenta la capacidad del proyecto de mantenerse en el largo plazo. La incorporación de las municipalidades permitirá un control y cuidado de los sistemas, además de fomentar la incorporación de la solución desarrollada en otras localidades.

El programa de capacitación, además de una introducción básica al funcionamiento de equipos solares, contemplará el tratamiento de posibles fallas típicas, lo referente a repuestos como cantidad y lugares de venta, cambio de accesorios y las herramientas necesarias.

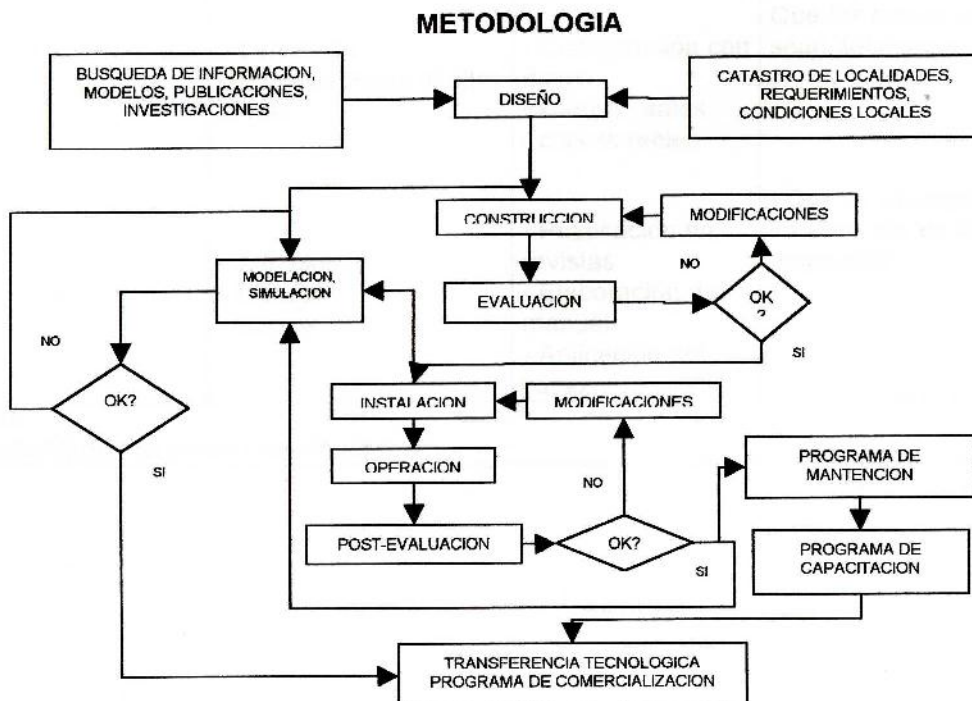
La ejecución del presente proyecto será realizada por instituciones e investigadores que cuentan con una **vasta experiencia** en el área de investigación sobre **destilación solar** en Chile, reforzado con el valioso aporte del **Solar-Institut Juelich**, que representa uno de los centros de investigación más importantes de Alemania en el área solar.

## 5.6 Metodología y matriz de planificación del proyecto

La metodología que se desarrollará en este proyecto, se presenta esquemáticamente a continuación. En ella se distinguen tres fases importantes, las que se refieren al diseño y construcción propiamente tal, la modelación y simulación, y lo que se refiere al mantenimiento, la capacitación y transferencia tecnológica.

La matriz de Planificación del proyecto se presenta a continuación del esquema metodológico.

Dentro de las posibles complicaciones que se estima podría tener el desarrollo del proyecto está la no-existencia de materiales, equipos, instrumentos o accesorios en el país, lo que hará necesario adquirirlos en el extranjero, con los problemas de tiempo y mayor costo en su adquisición. Para prevenirlo, se desarrollará un adecuado programa de cotizaciones y compra.





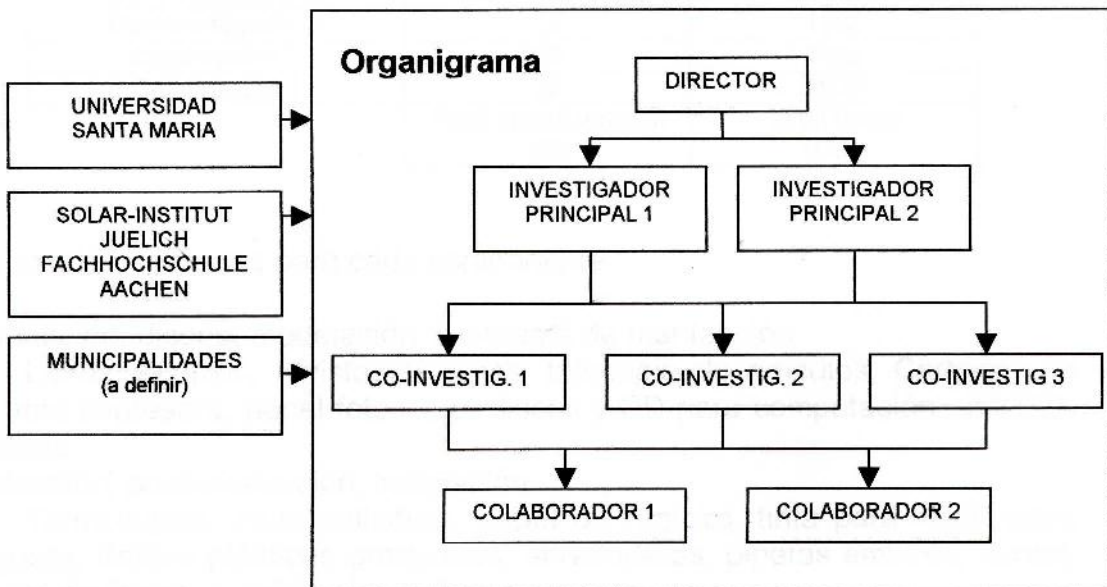
## 5.8 Estructura organizativa del proyecto

### a) Organigrama del proyecto, cargos y funciones

Se propone la siguiente estructura organizativa del proyecto, ordenadas en orden jerárquico. Además se indican las funciones de cada cargo

- 1.- Director del proyecto (D): Administración general del proyecto, control y evaluación general de las etapas, contactos internacionales, presupuesto y difusión.
- 2.- Investigador Principal (IP): Desarrollo de etapas, supervisión y apoyo de tareas específicas, coordinación y control de avances de etapas y tareas, encargado de compras, difusión.
- 3.- Co-investigador (CI): Desarrollo de etapas y tareas específicas.
- 4.- Colaborador (C): Apoyo en el desarrollo de etapas y tareas específicas.

A continuación se muestra un esquema de un organigrama del proyecto.



### b) Equipo Líder, responsabilidades

- Director, (D): Administración general del proyecto, control y evaluación general de las etapas, presupuesto y difusión.
- Investigador Principal 1 (IP1): Modelación, transferencia tecnológica, comercialización.
- Investigador Principal 2 (IP2): Diseño, simulación, construcción, programa de capacitación, compras.
- Co-Investigador 1 (CI1): Evaluación, publicaciones
- Co-Investigador 2 (CI2): Post-evaluación, publicaciones.
- Co-Investigador 3 (CI3): Instalación, operación, post-evaluación.

- Colaborador 1 (C1): Información, programa de mantención, capacitación, instalación
- Colaborador 2 (C2): Información, programa de mantención, cotización, evaluación.

## 5.9 Presupuesto analítico

a) Tiempo de dedicación a cada actividad de cada integrante del Equipo Líder.

Tiempo de dedicación		
Integrante	Dedicación horas/semana	Tiempo total Período, horas
Director	12	1152
Investigador principal 1	6	576
Investigador principal 2	20	1920
Co-Investigador 1	6	576
Co-Investigador 2	6	576
Co-Investigador 3	12	1152
Colaborador 1	20	1920
Colaborador 1	20	1920
	Total horas/semana	Total horas
	102	9792

b) Insumos necesarios para cada componente

- Información, diseño, modelación, programa de mantención

Libros técnicos, revistas técnicas, fotocopia de artículos, Cartridge de tinta para impresora, papel fotocopia, discos y CD para computación, artículos de oficina.

- Evaluación, post-evaluación, instalación

Termocuplas, cinta selladora, papel de registro, tinta para registrador, manguera, Baldes plásticos graduados, abrazaderas, pipetas embudo, cordel, artículos de limpieza, teflón, grasa, herramientas.

- Simulación

Software matlab, simulink, carnot

- Programa de capacitación, publicaciones

Libros técnicos, revistas técnicas, fotocopia de artículos, Cartridge de tinta para impresora, papel fotocopia, discos y CD para computación, artículos de oficina, transparencias, lápices para transparencias, cardtrige para impresora a color, lápices para pizarra blanca, rollos fotográficos y diapositivas.

## c) Distribución de costos fijos en proporción al peso de cada componente

Distribución de costos fijos		
Componente	Costo, \$	Peso del componente
Antecedentes	150.000	3.7 %
Simulación	200.000	5.0 %
Instalación	500.000	12.5 %
Diseño	850.000	21.3 %
Visita a terreno	1.000.000	25.0 %
Programas	1.300.000	32.5 %
	<b>Total \$4.000.000</b>	

## 5.10 Evaluación económica y análisis beneficio-coste

### 5.10.1 Situación con y sin proyecto

Como se ha mencionado anteriormente el proyecto está orientado en primer término al abastecimiento de agua potable de caletas pesqueras, aunque también puede ser utilizado en asentamientos humanos con problemas de abastecimiento y que se encuentren cercanos a fuentes de aguas salobres, como es el caso de comunidades aledañas a ríos salados, criaderos de ostiones, etc.

La situación sin proyecto puede ser reflejada como la situación actual. Ésta involucra:

1. El abastecimiento de las caletas pesqueras mediante camiones aljibes.
2. Un camión típico es de 4 [m<sup>3</sup>] y cubre la demanda de 50 personas.
3. El abastecimiento se realiza en promedio 1 vez por semana.

Los problemas más relevantes que implica este sistema son:

1. Las Municipalidades deben absorber los costos de producción de agua y de transporte desde el centro abastecedor más cercano.
2. Si bien existe un itinerario regular de entrega de agua, también existe una tasa de falla de los camiones repartidores, lo cual implica que las personas quedan sin este vital elemento por 1 o 2 días.
3. Dado el período de abastecimiento se debe contar con contenedores de agua. El agua detenida tiene tendencia a presentar la proliferación de microorganismo que afectan la salud de las personas, y los contenedores suelen presentar problemas de oxidación y mal manejo, lo cual aumenta la probabilidad de ocurrencia de enfermedades infecto parasitarias.

Anteriormente la situación con proyecto ya ha sido descrita, por lo cual se destaca en este punto los beneficios asociados:

1. Los ahorros monetarios obtenidos por la disminución de producción y transporte de agua son de mayor cuantía que el costo involucrado en la compra de los equipos.

2. El agua producida es de alta calidad y no es necesario almacenarla, lo cual implica una disminución de la probabilidad de la ocurrencia de las enfermedades mencionadas.

Respecto de la evaluación cabe destacar que dadas las características de localizaciones denotadas como demanda potencial se establecieron ciertos supuestos:

- 1.- Demanda: se verificó la existencia de 100 posibles localizaciones demandantes, pero se considero como demanda a cubrir a sólo 50 de ellas. Esto debido a que algunas ya cuentan con algún tipo de equipo recolector de agua y otras consideraciones.
- 2.- Población: Se estableció una población promedio de 50 personas por caleta y se realizó una estimación de la distribución poblacional considerándose 20 trabajadores(pescadores) y 3 niños menores de 6 años por caleta.
- 3.- Equipos: la producción de agua se estimó contemplando factores climáticos y rendimientos asociados. También se considero la instalación de 3 equipos por caleta y se estableció un programa de tareas, tal que la totalidad de los equipos fuesen instalados en un rango de 5 años.
- 4.- Precios: se tomaron como base los precios al año 2000, y se actualizaron en base al IPC promedio años:1998,1999,2000(estimación). Resultando un valor de 4,1%.
- 5.- Tasa de descuento: se utilizó una tasa de 13% la cual considera estimaciones de las tasas bancarias(8%) y una tasa de riesgo(5%).

### 5.10.2 Beneficios del Proyecto

Aunque los beneficios asociados a este proyecto son claramente identificables, muchos de ellos son de difícil cuantificación. Es por ello que este punto de subdividirá en dos partes. Primeramente se indicarán cuales son estos beneficios y se realizará una breve justificación de porque son considerados beneficios. Seguidamente se procederá a la cuantificación de algunos de estos beneficios.

- Descripción de los beneficios
  - a) Mejoramiento en la calidad de vida de todas las personas pertenecientes a la localidad abastecida. Esto se asocia con la salud producto de que:
    - El agua consumida es de mejor calidad o más sana, esto beneficia en primer lugar a los pequeños, ya que, niños más saludables hoy permitirán hombres más productivos mañana. Las personas adultas también se ven favorecidas ya que disminuyen las posibilidades de enfermarse por aguas contaminadas con microbios u óxidos.
    - Existe un aumento de la oferta de agua existente, dado que actualmente algunas de las caletas presentan problemas por escasez de agua.
  - b) Mejoramiento de la productividad de los pescadores(trabajadores) dada la disminución de los días no trabajados producto de enfermedades.

- c) Liberalización de los recursos destinados a la producción y transporte de agua potable permitiendo una redistribución de recursos.
- d) Disminución de los costos asociados a gastos médicos. Dada la lejanía de algunas caletas cuando una persona se enferma solo suele ser llevada a la posta más cercana cuando se considera que el problema es grave, esto provoca un deterioro en su salud y en su calidad de vida. En el caso de los niños esto puede ser crítico, incluso hasta causa de muerte.

### 5.10.3 Cuantificación de los Beneficios

Se define:

P	: asociado a precio de los ítems o a salarios según corresponda.	\$ año respectivo/(m <sup>3</sup> , h, años)
B	: Beneficio	\$ año respectivo
E	: Agua producida por los desalinizadores.	m <sup>3</sup> /año
H	: Horas liberadas.	
N	: población asociada a un ítem en particular.	
T	: este valor equivale al número de años estimados como productivos y a la tasa de valoración de las aseguradoras.	

Transporte	Este ítem considera un 60% del ahorro derivado del transporte de agua, el 40% restante se contempla como aumento del consumo actual. $B_T = P_T * E * 0.6$
Agua	Este ítem considera un 60% del ahorro derivado de la producción de agua, el 40% restante se contempla como aumento del consumo actual. $B_A = P_A * E * 0.6$
Productividad	Se contempla en este punto la mejora en los ingresos de las familias producto de la disminución de las horas no trabajadas por motivos de salud. $B_P = P_P * H * N_P$
Vida Niños menores de 6 años	Se considera el valor de la vida como beneficio, asociado a las mejores probabilidades y a las mejoras en la calidad de vida de los niños y de sus perspectivas futuras. Se considero en este ítem la valoración de 1 niño por cada dos localizaciones, esto como parámetro de la contabilización de la pérdida que produce al país un niño muerto o convaleciente por las enfermedades mencionadas. $B_V = P_V * T * N_V$

### 5.10.4 Costos del Proyecto

Respecto de los desembolsos del proyecto completo se pueden establecer 3 ítems concretos:

- Inversión Inicial: contempla los recursos necesarios para el diseño, la construcción e instalación de un desalinizador solar piloto.
- Compra de equipos desalinizadores por parte de las Municipalidades para cubrir la demanda de las caletas demandantes.
- Costos de instalación de los equipos en las distintas localidades especificadas.

### 5.10.5 Cuantificación de los Costos

Inversión Inicial	: 20.613.936	\$ año 2000
Equipos	: 500.000	\$ año 2000/unidad
Instalación	: 50.000	\$ año 2000/unidad

### 5.10.6 Rentabilidad del proyecto

Para el estudio de la rentabilidad del proyecto se han calculado 2 indicadores y se ha sensibilizado el proyecto respecto de 4 variables críticas: el costo del equipo, el costo de transporte del agua, el costo de producción del agua y el salario promedio estimado de los pescadores.

#### Resumen

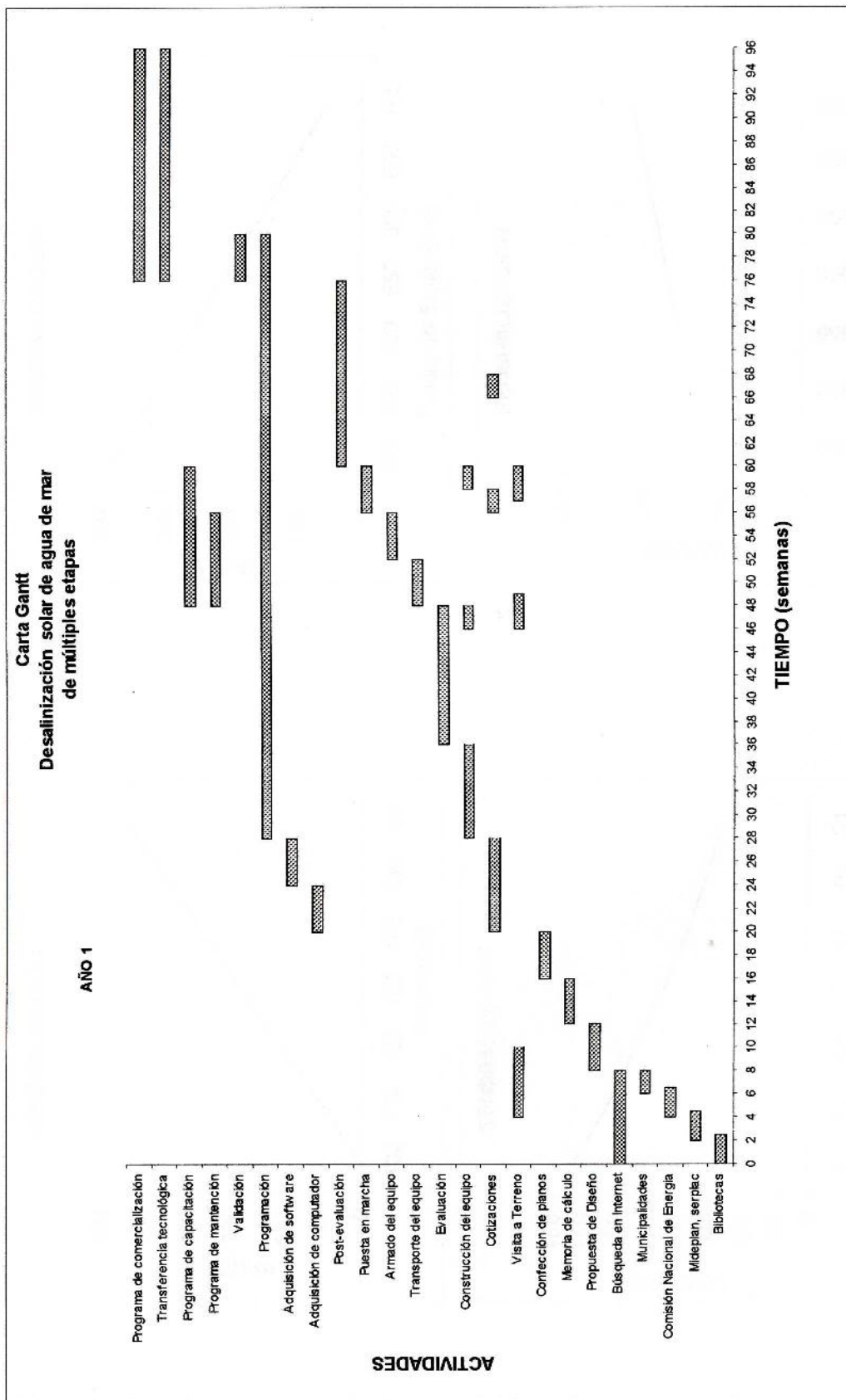
VAN	: 27.299.707	\$ año 2000
R <sub>B/C</sub>	: 2,007	

Respecto de la sensibilización, se observa que el proyecto permanece rentable a pesar de las alteraciones de los valores de las diferentes variables consideradas. Se presenta a continuación el valor de las elasticidades respectivas:

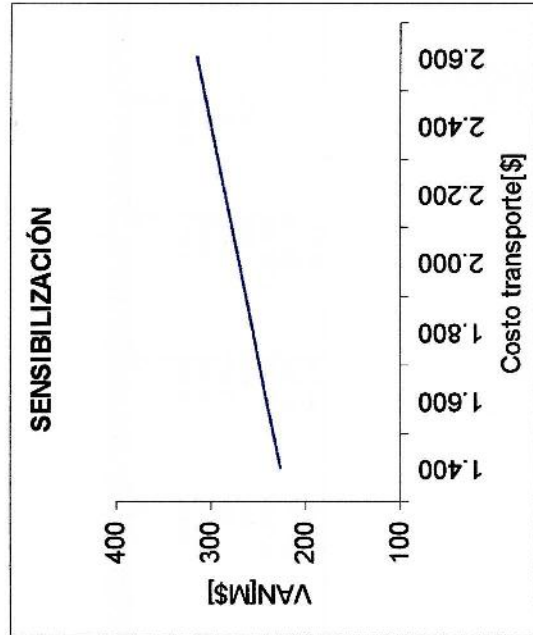
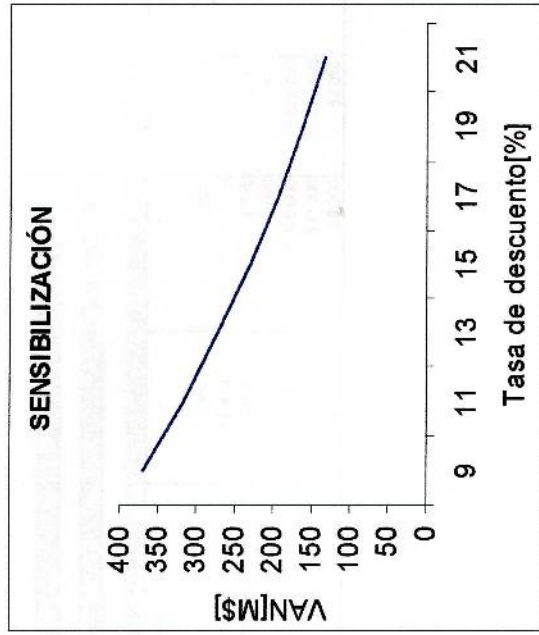
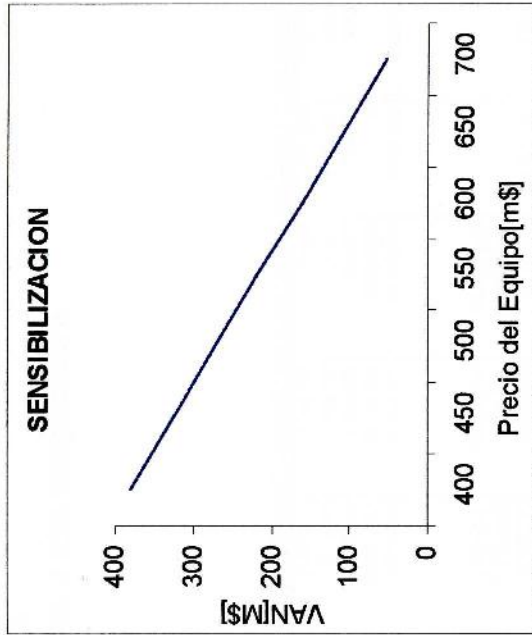
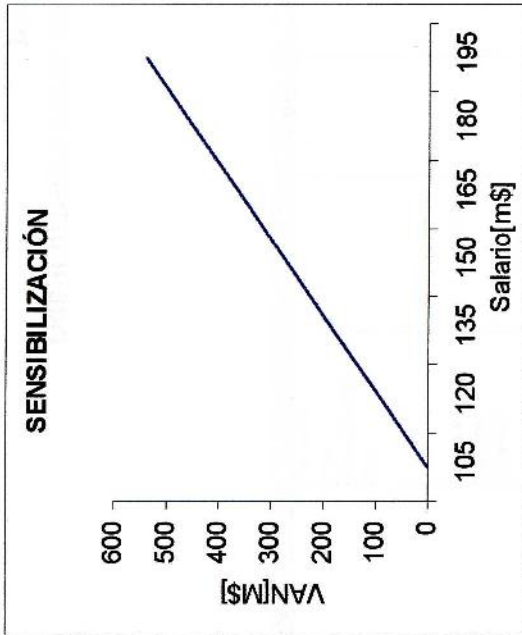
### 5.10.7 Elasticidades

Transporte	0,074
Salario	5,965
Precio del Equipo	-1,0923
Tasa de descuento	-20,447

Como conclusión del presente análisis se establece que **el proyecto es rentable**. Cabe destacar, que existen beneficios que siendo mencionados no fueron cuantificados, dada la dificultad de su transformación a términos monetarios, pero que vendrían a fortalecer la rentabilidad de este proyecto.



Análisis de Sensibilidad  
Desalinizador solar de múltiples efectos a alta temperatura



**Análisis Económico**  
**Desalinizador solar de múltiples efectos a alta temperatura**

	2.000	2.001	2.002	2.003	2.004	2.005	2.006	2.007	2.008	2.009
<b>Beneficios</b>										
Transporte			847.966	1.737.894	2.699.371	3.736.767	4.524.090	4.709.578	4.902.670	5.103.660
Agua			211.992	434.474	674.843	894.192	1.131.022	1.177.394	1.225.688	1.275.920
Productividad			1.250.401	2.793.502	4.336.115	5.824.488	734.213	764.316	795.653	828.275
Vida			23.680.597	24.651.502	25.662.213	26.714.364	27.809.653	0	0	0
			25.960.956	29.557.372	33.372.542	37.309.812	34.198.979	6.651.288	6.923.991	7.207.875
<b>Costos-inversión</b>										
Proyecto	(20.613.936)	0	(17.338.896)	(18.049.791)	(18.789.832)	(19.560.215)	(13.362.683)	0	0	0
Equipos	0	0	(1.733.880)	(1.804.979)	(1.878.983)	(1.956.022)	(1.336.268)	0	0	0
Instalación			6.916.171	9.702.602	12.703.727	15.793.575	19.500.027	6.651.288	6.923.991	7.207.875
<b>Flujo de caja</b>										
Tasa de Descuento										
Caja acumulada			47.913.643							
<b>VAN</b>			27.299.797							

**Flujo de Ingresos-Costo** 2.007

	2.000	2.001	2.002	2.003	2.004	2.005	2.006	2.007	2.008	2.009
<b>Programa de instalación de equipos</b>										
Oferta actual de agua	u	9.600	9.600	9.600	9.600	9.600	9.600	9.600	9.600	9.600
Producción de Equipos	m <sup>3</sup> /año	0	652	1.284	1.915	2.547	2.962	2.962	2.962	2.962
Costo Transporte(1 camión)	\$/m <sup>3</sup>	2.082	2.167	2.256	2.349	2.445	2.545	2.650	2.758	2.871
Costo Agua	\$/m <sup>3</sup>	521	542	564	587	611	636	662	680	718
Sueldo	\$/año	1.873.800	1.950.526	2.030.601	2.113.856	2.200.524	2.290.746	2.384.666	2.482.438	2.584.218
Costo Equipos	\$/u	520.500	541.841	564.056	587.182	611.257	636.318	662.438	688.632	715.875
Costo Instalación	\$/u	50.000	54.184	58.406	62.718	67.128	71.728	76.528	81.528	86.728

## **5.11 Cronograma de actividades, plan operativo y plan de monitoreo.**

### **5.11.1 Cronograma de actividades.**

(Ver carta Gantt. "Proyecto de desalinización solar de agua de mar de múltiples etapas")

### **5.11.2 Plan operativo.**

#### **i. Actividades y sub-actividades**

**Búsqueda de información:** Visitas a Bibliotecas, centros de especializados, Municipalidades, Mideplan, Corfo, Serplac, Comisión Nacional de Energía, Internet, libros técnicos, revistas especializadas, memorias, tesis de grado, publicaciones, trabajos de investigación, etc.

**Diseño:** Propuesta de alternativas de diseño, formas, materiales, estructura, dimensiones, confección de planos generales y de fabricación.

**Cotización:** Cotización de materiales, instrumentos, equipos, y accesorios tanto en el ámbito nacional como internacional.

**Visita a terreno:** Se hace necesario visitar las localidades, seleccionas con la información recopilada de la etapa de búsqueda de información, para la elección adecuada del lugar en donde será instalado el equipo. Entrevista con pobladores, medición de datos meteorológicos, ubicación óptima del lugar.

**Construcción:** El equipo se construirá en una empresa a definir, en la cual se garantice su adecuada fabricación. Supervisar su construcción.

**Evaluación:** Selección y calibración de instrumentos de medición, instalación de sensores y accesorios necesarios, montaje de equipos, puesta en marcha del equipo en laboratorio, mediciones de parámetros.

**Modelación:** Teoría de desalinización, modelos matemáticos usados, análisis térmico, condiciones locales, optimización de modelos, propuesta.

**Simulación:** Adquisición de computadora, software de simulación, desarrollo del programa computacional, contrastación con datos experimentales, validación con datos reales.

**Instalación:** Transporte de los equipos, instalación de accesorios, armado de los componentes.

**Operación:** Puesta en funcionamiento o marcha blanca.

Post-evaluación: Instalación de equipos y sensores de medición, registro de información.

Mantenición: Elaboración de un programa de mantención.

Capacitación: Elaboración de un programa de capacitación, aplicación del programa

Transferencia tecnológica: Desarrollo de publicaciones, participación en congresos, seminarios, cursos.

Comercialización: Desarrollo de una estrategia de comercialización del equipo

## ii. Resultados intermedios.

En el periodo de ejecución del proyecto se obtendrán algunos resultados intermedios que a continuación se detallan.

- El diseño del equipo desalinizador; el cual deberá terminarse en el periodo estipulado en la carta Gantt.
- La construcción del equipo; aquí en definitiva se dispondrá de un equipo desalinizador ya armado y dispuesto para iniciar la siguiente fase de evaluación en el laboratorio.
- La modelación y simulación; es una actividad que se llevará en forma paralela a la construcción del equipo. La simulación se presenta en un periodo bastante prolongado, debido a que se debe esperar concluir la etapa de post-evaluación para así poder validar el modelo con datos reales de terreno.
- Selección de la localidad; elección óptima del lugar al evaluar las diferentes alternativas.
- Mantenición; se inicia junto con el proceso de instalación, en donde se instruirá a las personas de las caletas pesqueras sobre el funcionamiento cuidado y mantención del equipo y además de incorporarlos activamente al proyecto.

Las metas fijadas se pueden observar en la carta Gantt, la cual muestra los plazos establecidos para realizar cada una de las etapas.

## iii. Desarrollo cronológico y marcos temporales.

(Ver carta Gantt. "Proyecto de desalinización solar de agua de mar de múltiples etapas")

## iv. Responsabilidad para la ejecución de las actividades.

Las responsabilidades para la ejecución de las actividades están a cargo de los diferentes integrantes del equipo Líder, (ver 6 b) equipo Líder, responsabilidades).

v. Asignación de recursos.

### Actividades

<b>PRESUPUESTO POR ACTIVIDAD</b>		
<b>Componentes</b>	<b>Actividades</b>	<b>Cantidad, \$</b>
Antecedentes	Búsqueda de información	150.000
Diseño	Memoria de cálculo	150.000
	Confección de planos	100.000
	Construcción	400.000
	Evaluación	200.000
Instalación	Transporte	200.000
	Armado	100.000
	Post-evaluación	200.000
Simulación	Programación	200.000
Programas	Mantenimiento	200.000
	Capacitación	500.000
	Publicaciones	300.000
	Comercialización	300.000
Visita a terreno	Visita a terreno	1.000.000
		<b>TOTAL: \$4.000.000</b>

### Equipos.

<b>Asignación de recursos en Equipos</b>		
<b>Equipo</b>	<b>Cantidad, \$</b>	<b>Fuente de financiamiento</b>
Colector solar	200.000	FONDO CONCURSABLE
Computadora	800.000	UTFSM
Impresora	150.000	UTFSM
Scanner	100.000	UTFSM
Datalogger	750.000	UTFSM
		<b>Total: \$2.000.000.-</b>

### Materiales

<b>Asignación de recursos en Materiales</b>		
<b>Materiales</b>	<b>Cantidad, \$</b>	<b>Fuente de financiamiento</b>
Desalinizador	400.000	FONDO CONCURSABLE
Software matlab	1.300.000	UTFSM
Software Simulink	1.500.000	UTFSM
Software Carnot	1.800.000	SIJ FACH
		<b>Total: \$5.000.000.-</b>

## Personal.

Asignación de recursos en Personal							
Integrante	Relación de jerarquía, %	Valor hora, \$	Sueldo mensual, \$	Fuente de financiamiento			
				FONDO	UTFSM	SIJ	DAAD
Director	35	1.400	67.200	40 %	60 %	-----	-----
Investigador principal 1	30	1.200	28.800	50 %	-----	50 %	-----
Investigador principal 2	30	1.200	96.000	100 %	-----	-----	-----
Co-Investigador 1	22	880	21.120	100 %	-----	-----	-----
Co-Investigador 2	22	880	21.120	50 %	-----	-----	50 %
Co-Investigador 3	22	880	42.240	100 %	-----	-----	-----
Colaborador 1	13	520	41.600	100 %	-----	-----	-----
Colaborador 1	13	520	41.600	100 %	-----	-----	-----
				<b>Total sueldo mensual: \$359.680.-</b>			
				<b>Total asignación: \$8.632.320.-</b>			

## 5.11.3 Plan de monitoreo del proyecto

## i. Monitoreo de procesos

Monitoreo de procesos					
Componentes	Indicadores	Frecuencia de monitoreo	Fuente	Encargados	Responsables
Búsqueda de antecedentes	Cantidad de entidades consultadas Información confiable	Semanalmente	Bibliotecas, Mideplan, Corfo, CNE, etc.	C1, C2	D, IP1
Diseño	Estado de avance, % Número de cotizaciones Tiempo de medición	Mensualmente	Literatura Empresas Visitas de inspección Registros	IP2, CI1, C2	IP2
Instalación	Seguridad Bajo costo Control de avance, % Mediciones	Mensualmente	Empresas, Visitas, registradores	IP2, CI1, C1, C2	IP2
Simulación	Estado de avance, %. Comparaciones, % de similitud	Mensualmente	Literatura, gráficos, resultados, registros reales	IP1, IP2	IP1, IP2
Programas	Estado de avance %. Manuales Aplicación de programa Publicaciones	Mensualmente	Literatura, resultados del proyecto	IP1, IP2, CI1, C1, C2	IP1

## ii. Monitoreo de Resultados

<b>Monitoreo de Resultados</b>		
<b>Componentes</b>	<b>Resultados Intermedios</b>	<b>Indicadores de resultado</b>
Búsqueda de antecedentes	Información para diseño	Confiable, actual
	Catastro	Confiable, actual
Diseño	Planos generales	Estado de avance, %
	Construcción de equipo	Estado de avance, %
	Evaluación	Registros
Instalación	Armado de sistema	Estado de avance, %
	Post-evaluación	Registros
Simulación	Modelo	Estado de avance, %
	Programa	Estado de avance, %
	Gráficos	Comparación con datos experimentales
Programas	Manual de mantención	Estado de avance, %
	Curso de capacitación	Aplicación
	Publicaciones	Artículos publicados
	Programa de comercialización	Aplicación

## CAPITULO VI Resultados

### 6.1 Resultados y Validación Experimental

Los resultados de este trabajo de Tesis son variados y se pueden encontrar separadamente en cada uno de los capítulos tratados.

Son importantes los resultados de la simulación computacional en donde se tienen curvas que representan el comportamiento del desalinizador en bajas y altas temperaturas. Esto se puede apreciar en las curvas de salida del programa tanto para el comportamiento de las temperaturas, los niveles de energía utilizado en cada uno de los efectos, así como, las curvas en donde se muestra el comportamiento de la producción de condensado.

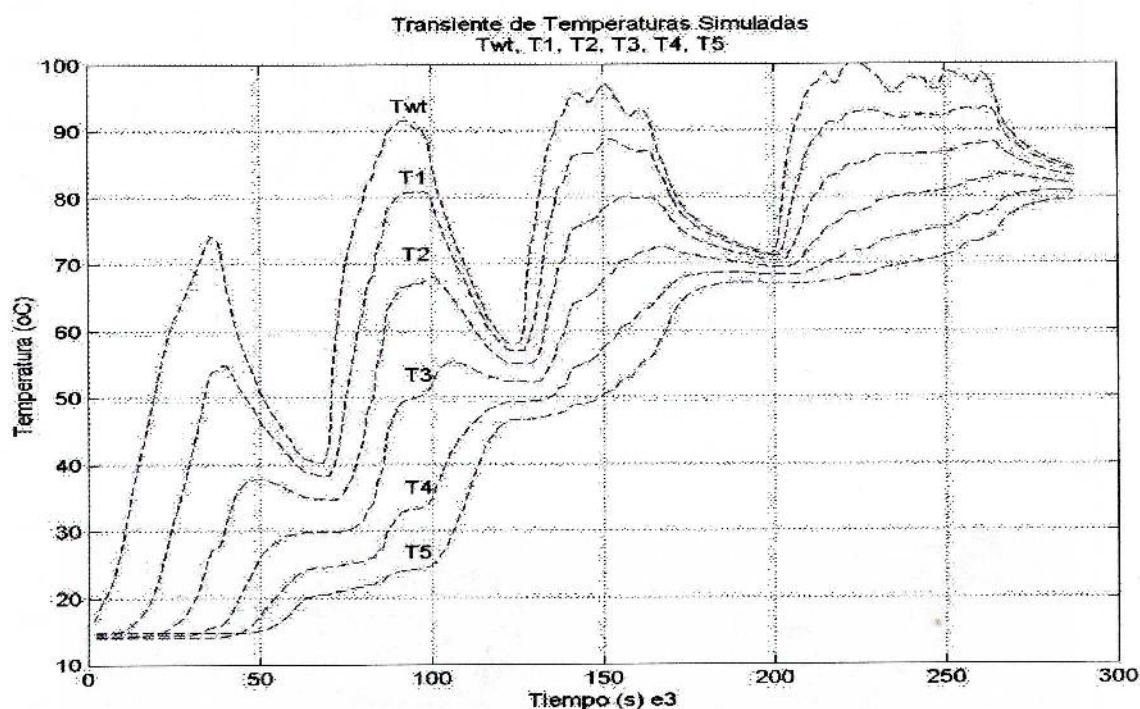


Figura 6.1 Temperaturas simuladas

Todo esto tiene una validez relativa, si no se contrasta con valores experimentales reales, ya sea de los diferentes comportamientos tanto de temperaturas como del condensado.

En la figura 6.1 se aprecia el comportamiento simulado de las temperaturas en el desalinizador

En la figura 6.2 se muestran los niveles de energía utilizados en las diferentes etapas del desalinizador

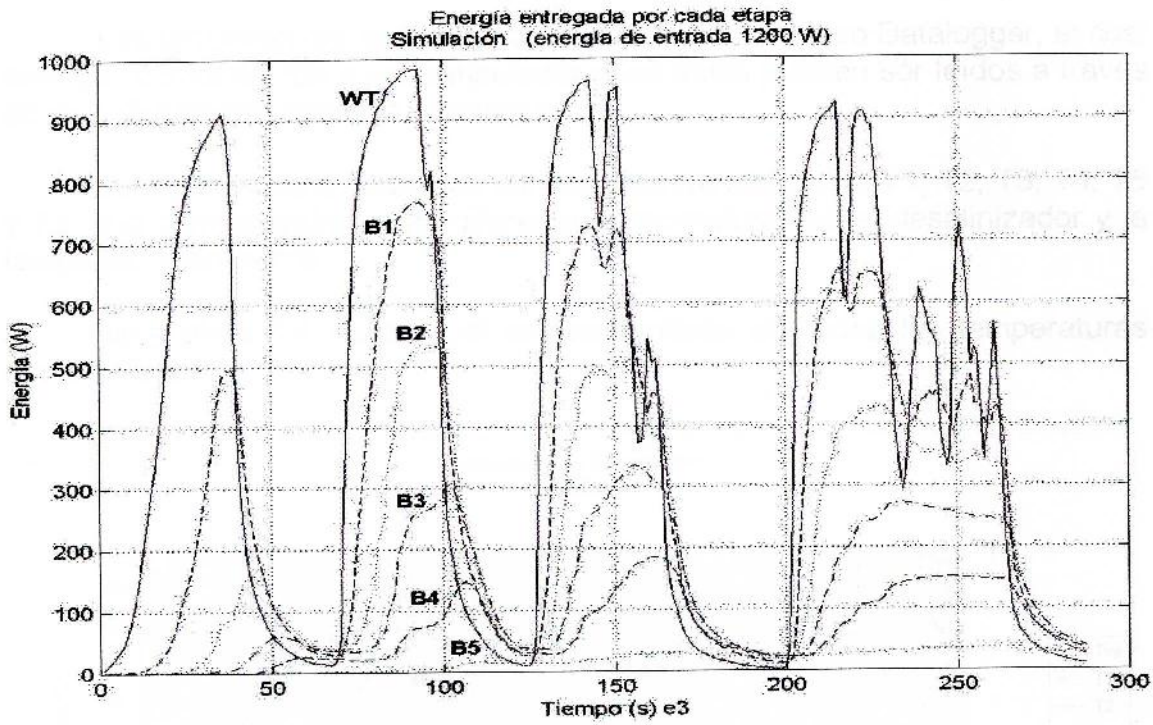


Figura 6.2 Energías simuladas

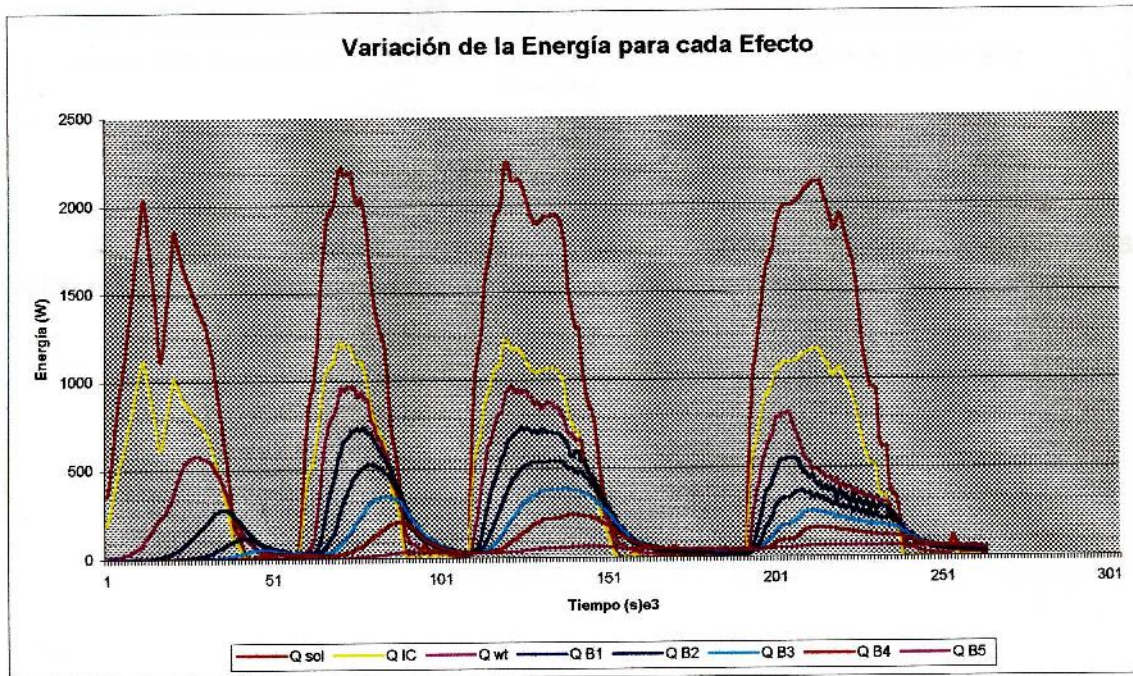


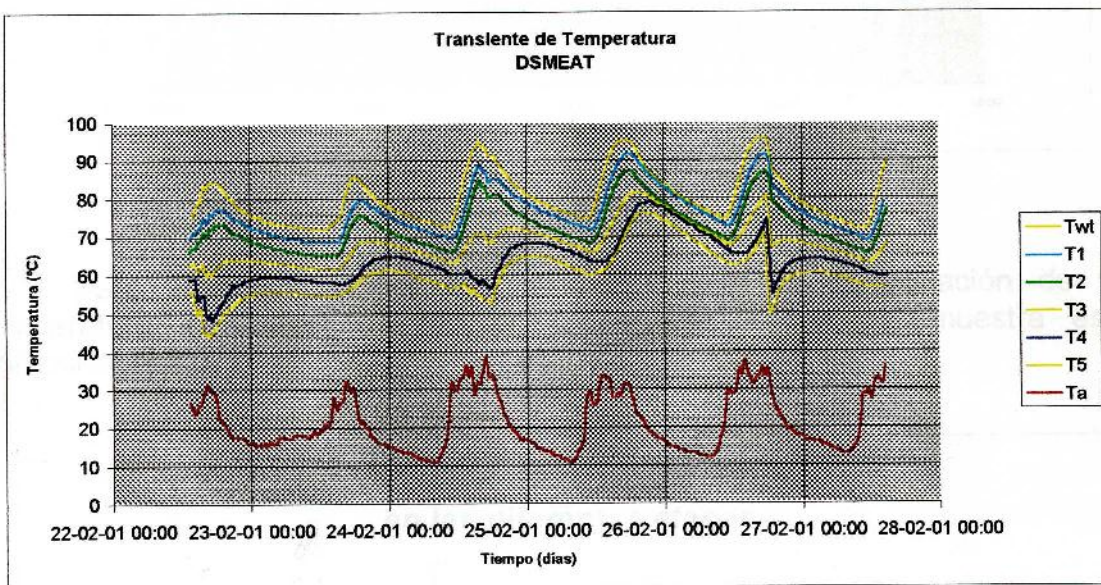
Figura 6.3 Variación de la energía en las etapas

## 6.2 Medición de Temperaturas

Las temperaturas se han medido utilizando un equipo Datalogger, el cual entrega la información a un computador y los datos pueden ser leídos a través de un software denominado Scanlog v1.5 .

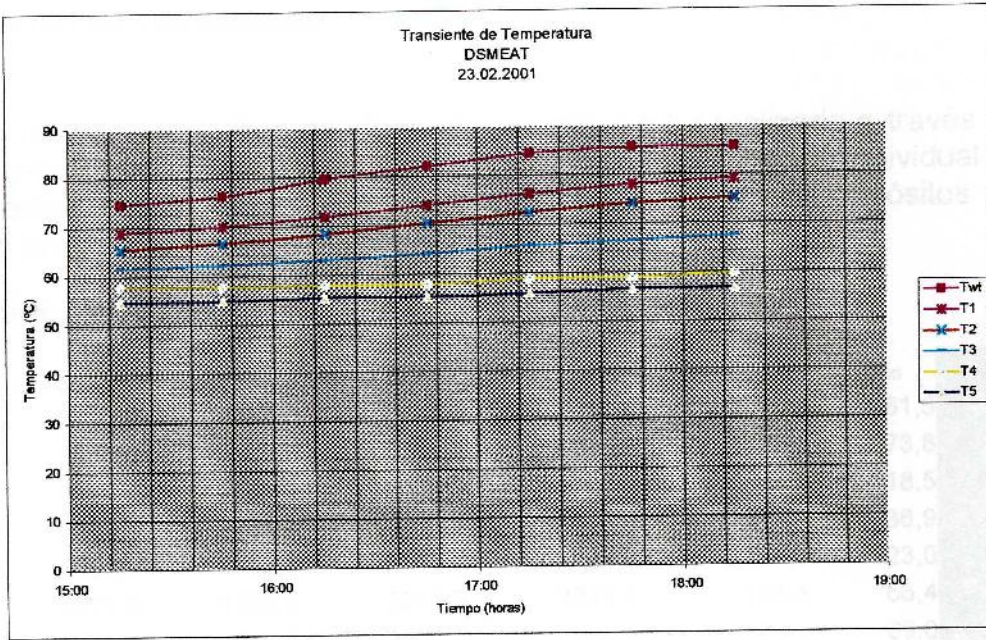
Las temperaturas medidas son las denominadas Twt, T1, T2, T3, T4, T5 y Ta, que corresponden a las diferentes temperaturas en el desalinizador y la temperatura ambiente.

La gráfica 6.4 muestra el comportamiento de todas las temperaturas antes señalada.



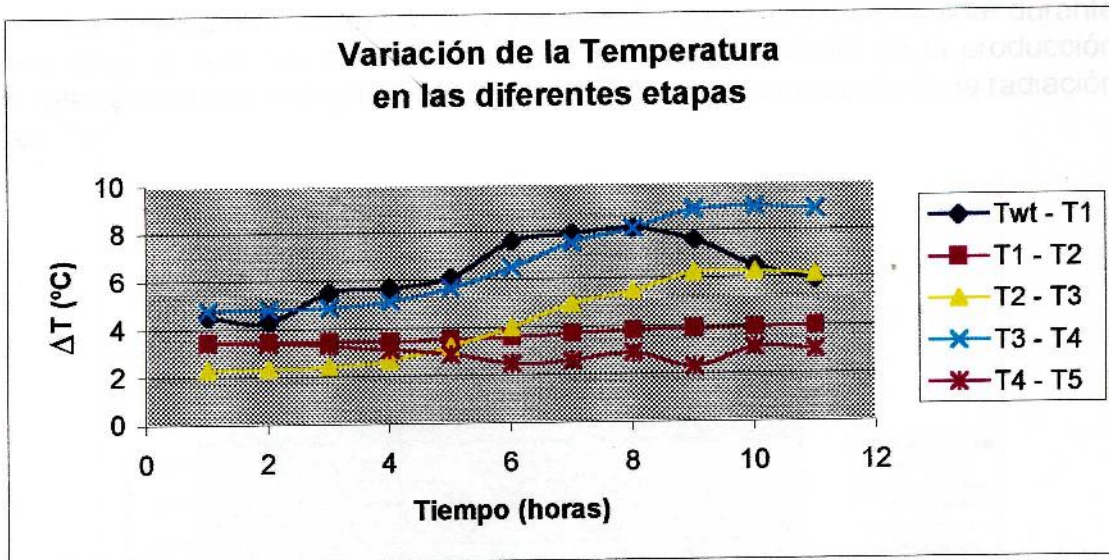
Gráfica 6.4 Transiente de temperaturas

Para mostrar la variación de temperatura entre cada una de las etapas, se ha resumido el comportamiento de ésta para un día al azar. Ver gráfica 6.5.



Gráfica 6.5 Transiente de temperatura en unas horas

Para tener una visión del comportamiento de la variación de la temperatura en cada una de las etapas, el gráfico 6.6 muestra ese comportamiento.



Gráfica 6.6 Variación de temperatura

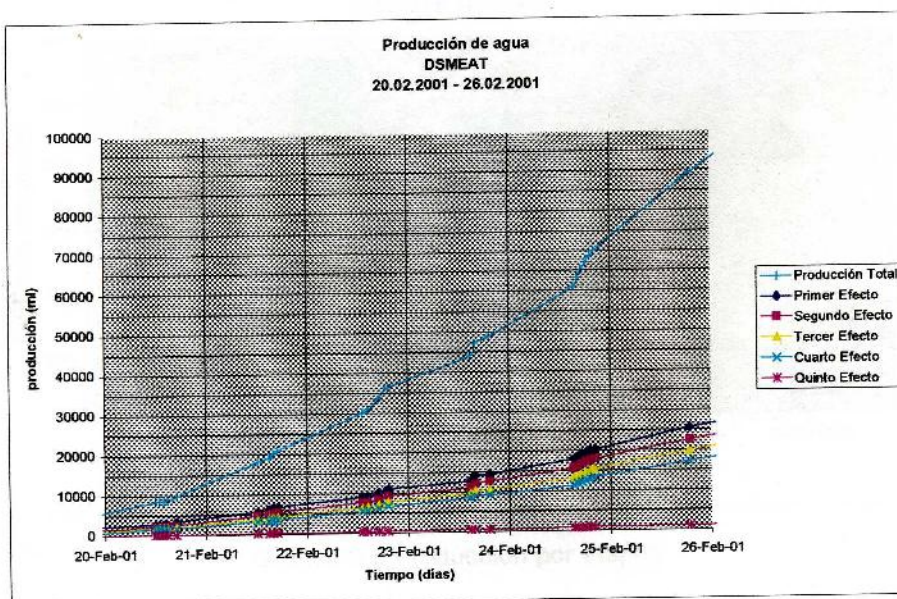
### 6.3 Medición de condensado

La medición del agua condensada extraída se ha realizado a través de método simple, que consiste en medir cada una hora la producción individual de las diferentes etapas del equipo. Para esto, se disponen de depósitos de colección graduados en cada una de las bandejas.

Tabla 6.1 Datos de Condensado, ml

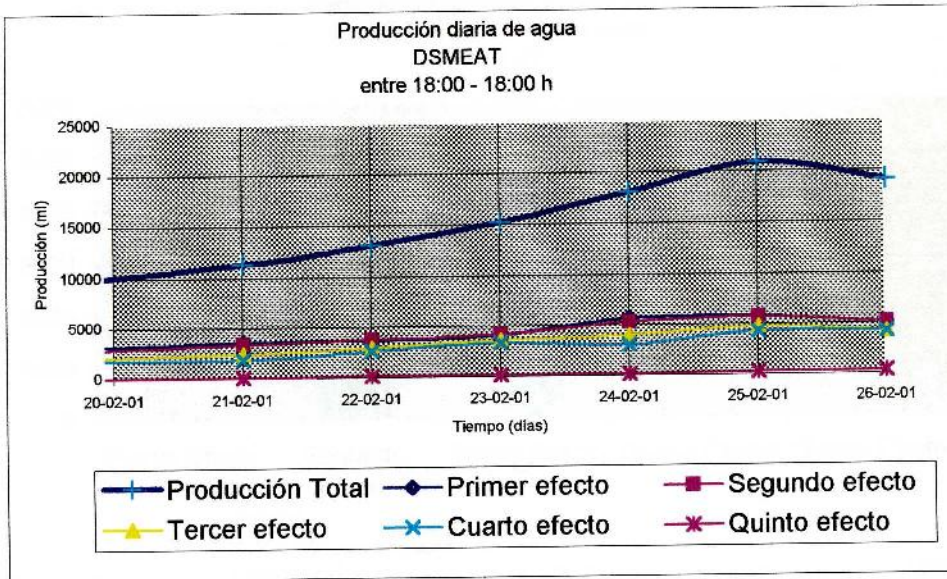
Fecha	Primer Efecto	Segundo Efecto	Tercer Efecto	Cuarto Efecto	Quinto Efecto	Techo	
13-02-01	3690,0	2952,0	2460,0	2091,0	61,5	61,5	1816,0
14-02-01	3382,5	2952,0	2398,5	1845,0	123,0	73,8	10774,8
19-02-01	3032,0	2690,0	2020,9	1768,7	44,3	18,5	9574,3
21-02-01	3524,0	3364,1	2423,1	1845,0	115,6	36,9	1608,6
22-02-01	3603,9	3702,3	2878,2	2583,0	189,4	123,0	6079,8
23-02-01	4071,3	4120,5	3517,8	3253,4	153,8	66,4	15183,1
24-02-01	5627,3	5233,7	3905,3	2995,1	166,1	69,0	18066,2
25-02-01	5756,4	5658,0	4735,5	4243,5	295,2	221,4	20910,0
26-02-01	5067,6	5043,0	4182,0	4182,0	399,8	248,5	19122,8
Promedio desde 23.02.01	560,6	506,8	4085,1	3668,5	253,7	168,8	18320,5
	5130,6	5013,8				151,3	total

La gráfica 6.7 muestra una producción de agua acumulada durante varios días, la cual nos permite visualizar el comportamiento de la producción con relación al nivel energético de los días. Esto es dependiendo de la radiación solar.



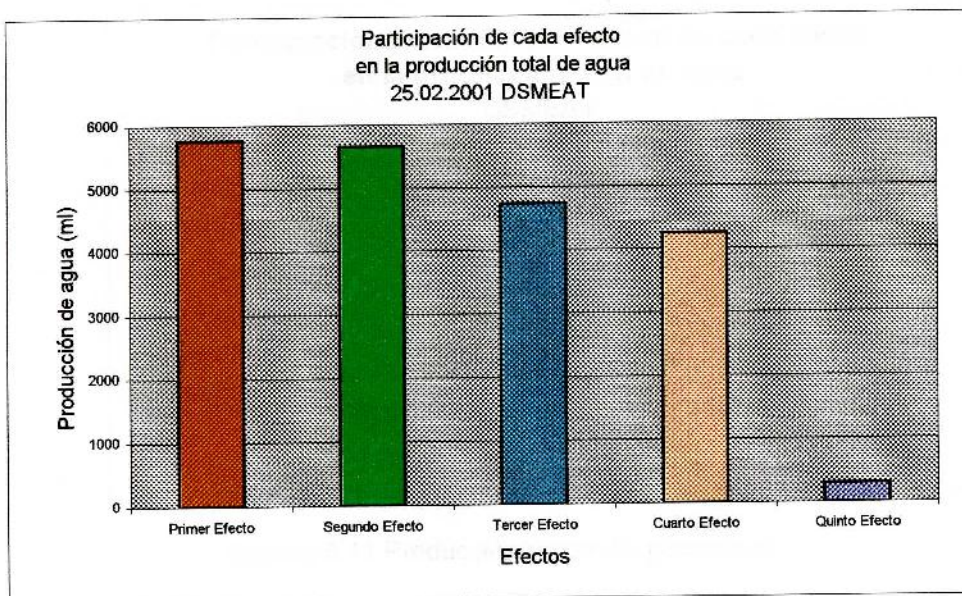
Gráfica 6.7 Producción de condensado

En la gráfica 6.8 se muestra la producción acumulada diaria desde la puesta en marcha del equipo, el cual requiere de 3 a 4 días para llegar a su estado óptimo de operación. El tiempo de puesta en marcha depende, obviamente del nivel de radiación que se disponga diariamente.



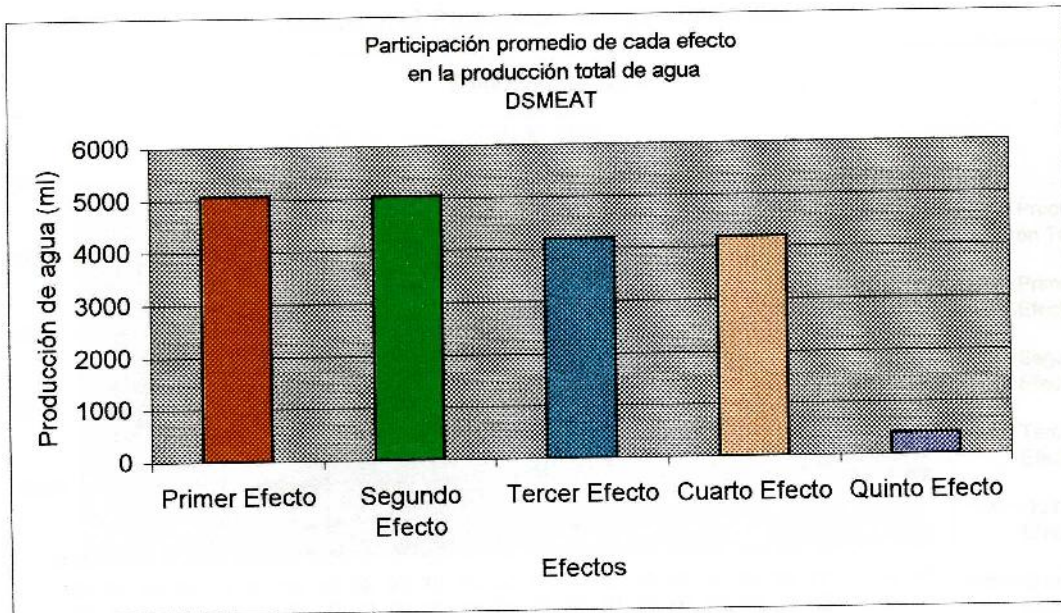
Gráfica 6.8 Producción diaria de condensado

La gráfica 6.9 nos muestra la participación de cada etapa en la producción total de condensado. Estos datos fueron seleccionados para un día determinado en operación normal.



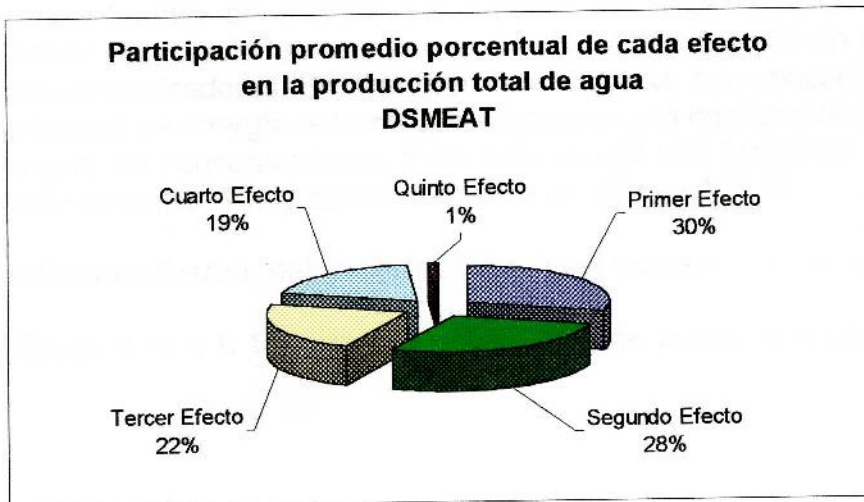
Gráfica 6.9 Producción por etapas

La gráfica 6.10 entrega, en forma similar a la gráfica 6.9, la participación de cada etapa en la producción total, pero ahora considerando un promedio de varios días de producción en la etapa de puesta en marcha.



Gráfica 6.10 Producción por etapas

La gráfica 6.11 nos entrega la participación promedio porcentual de cada una de las etapas en la producción total.

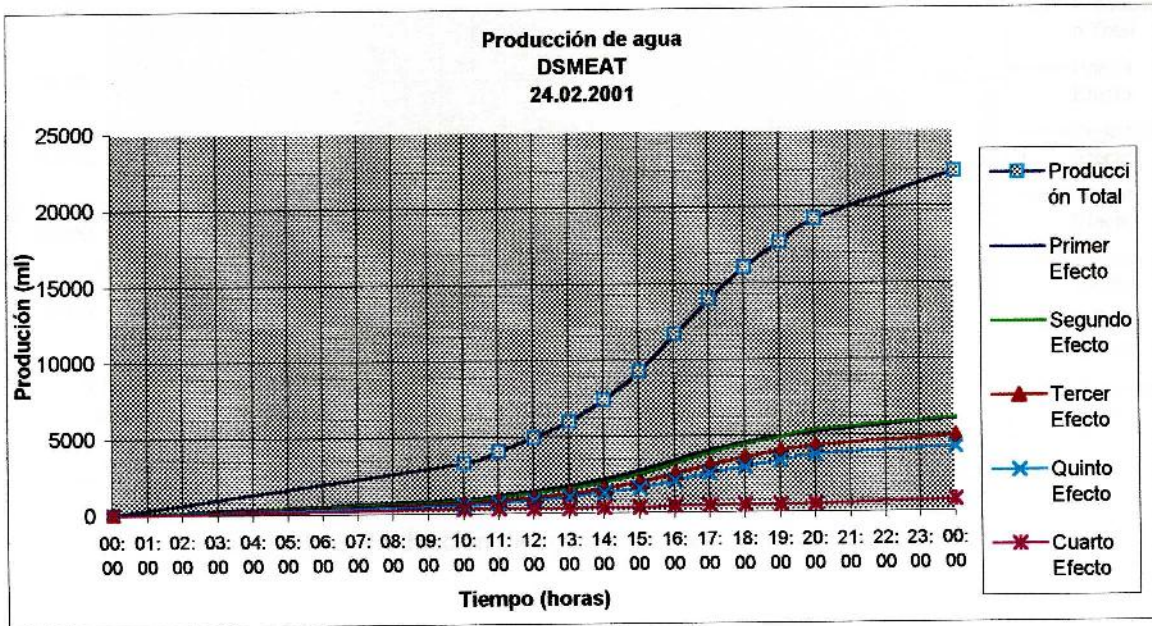


Gráfica 6.11 Producción promedio porcentual

La gráfica 6.12 muestra la producción de condensado extraído en un día completo. Esta gráfica puede considerarse una de las más relevantes de este

trabajo, debido a que entrega la producción diaria máxima de un día y nos entrega el nivel de producción del equipo.

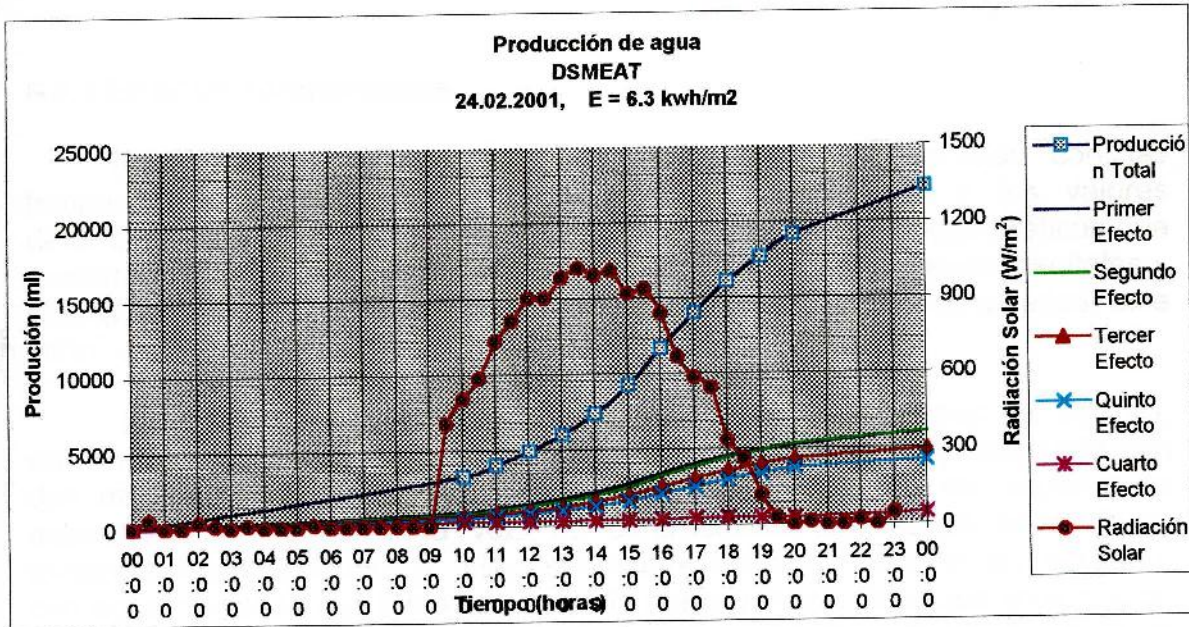
Gráfica 6.12 Producción de agua en un día



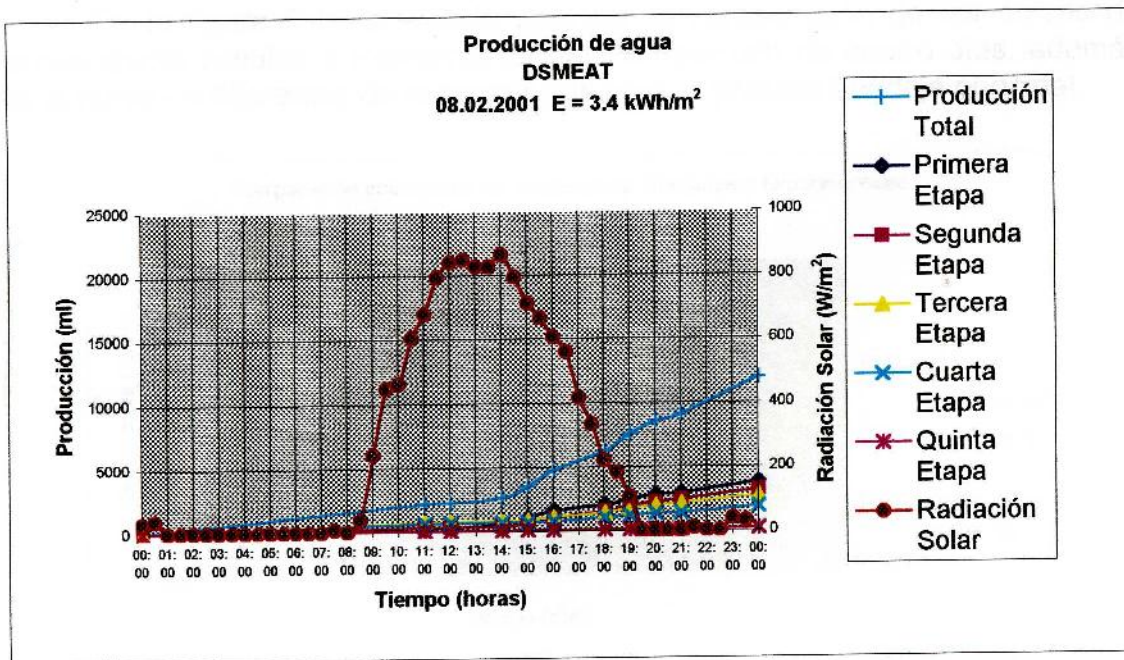
Para realizar una comparación entre los niveles de producción de agua respecto al nivel de energía incidente, es que se han realizado algunos ensayos con dos diferentes fuentes de energía que simulan dos tipos de colectores. El primero es usando un colector solar plano y el segundo es usando un colector solar plano con concentradores. Se simuló el colector solar con concentradores utilizando una fuente de energía externa que entregara una cantidad similar a la que proporcionaría los concentradores. Para esto se uso una fuente de energía eléctrica variable de entre 100 y 500 W variando de 100 en 100 W.

Las mediciones fueron realizadas para un nivel de radiación solar similar

Las gráficas 6.13 y 6.14 muestran los niveles de producción para cada caso.



Gráfica 6.13 Producción de agua con colector + fuente externa



Gráfica 6.14 Producción de agua con colector

## 6.4 Error de medición

### 6.4.1 Error en Temperaturas

Para mostrar la exactitud de los resultados en relación con las temperaturas encontradas en el programa de simulación y los valores determinados en las evaluaciones del equipo, se entregan algunas gráficas que muestran de una forma visual el acercamiento de las curvas experimentales y simuladas. La Tabla 6.2 entrega la información necesaria para caracterizar este hecho.

En relación con el error del equipo utilizado para las mediciones, esto es, DIGI-SENSE 12-CHANNEL SCANNING THERMOMETER, éste se ha contrastado con dos medidores de temperaturas digitales y un termómetro de columna de mercurio todos juntos a la vez. La contrastación se realizó midiendo la temperatura del agua a 0 °C a la presión atmosférica de 1 bar, en un recipiente con agua destilada con hielo en forma de nieve verificándose que coexistieran las dos fases. También se midió la temperatura del agua a 100 °C, esto es manteniendo el agua hirviendo a la misma presión atmosférica. Todos los instrumentos utilizados verificaron las dos temperaturas en cuestión y así se pudo contrastar el equipo. Con esto se asume que el error del equipo no supera el error de resolución del equipo, esto es,  $\pm 0.5$  °C.

En la figura 6.15 se puede apreciar la comparación de las curvas de temperaturas simuladas y experimental para un periodo de cuatro días, además de la curva de diferencia de temperaturas para la primera bandeja principal.

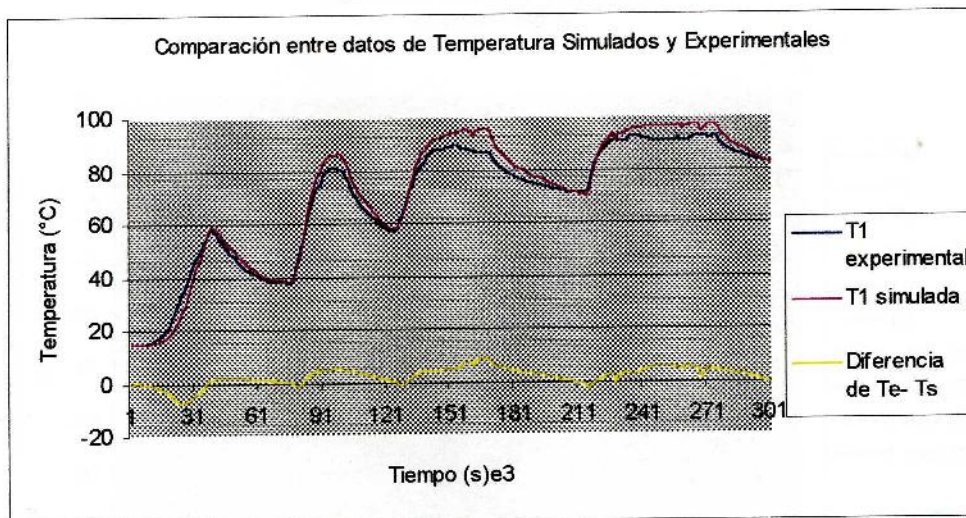


Figura 6.15 Comparación de Temperaturas simulada y experimental

Una visión más cercana de la diferencia de temperaturas, en donde se aprecia en mejor forma los rangos de variación se muestra en la figura 6.16

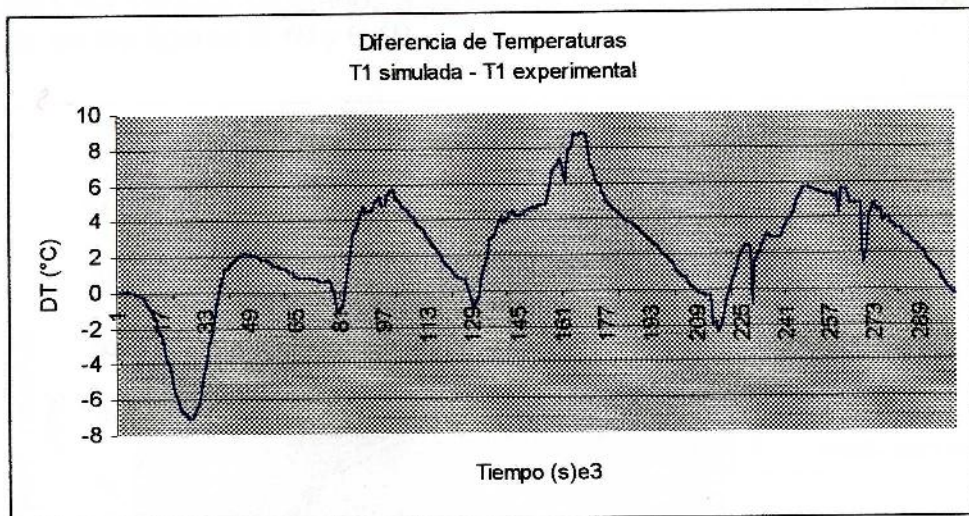


Figura 6.16 Diferencia de temperatura

Al agrupar todas las curvas de diferencia de temperaturas de todas bandejas se puede apreciar el rango total de variación de ellas. Existen valores que se escapan a la tendencia general y es debido a problemas de regulación del agua de alimentación en la toma de datos experimentales. Estos datos no han sido considerados en el análisis estadístico del comportamiento de los datos.

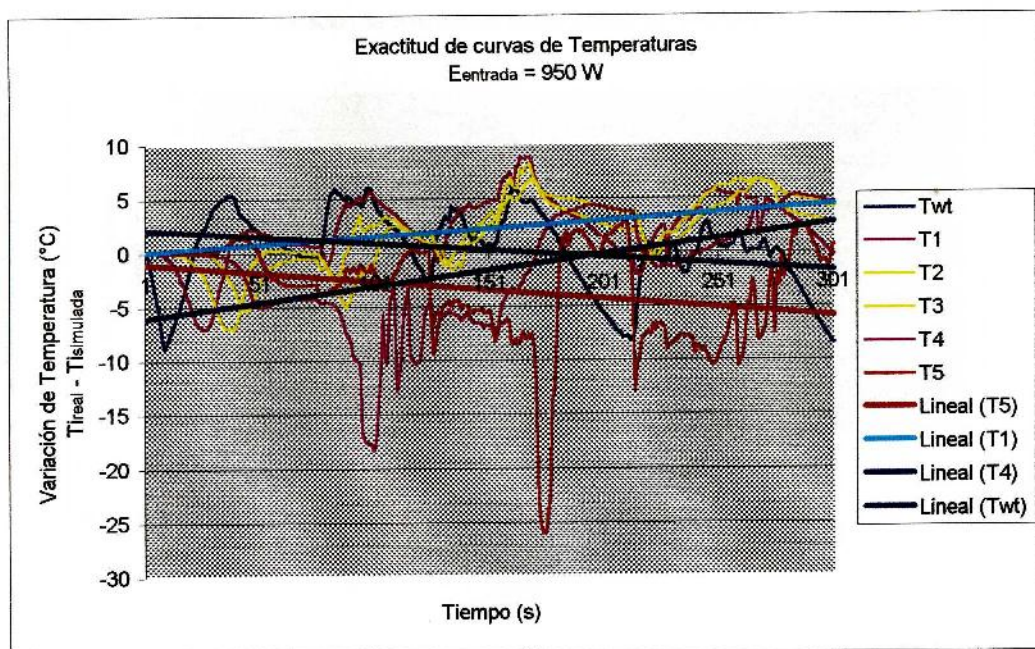


Figura 6.17 Exactitud de curvas de temperaturas

### 6.4.2 Error en la producción de condensado

El error existente entre los datos de producción de condensado reales medidos y los valores simulados a través del programa computacional se puede apreciar en las figuras 6.18 y 6.19.

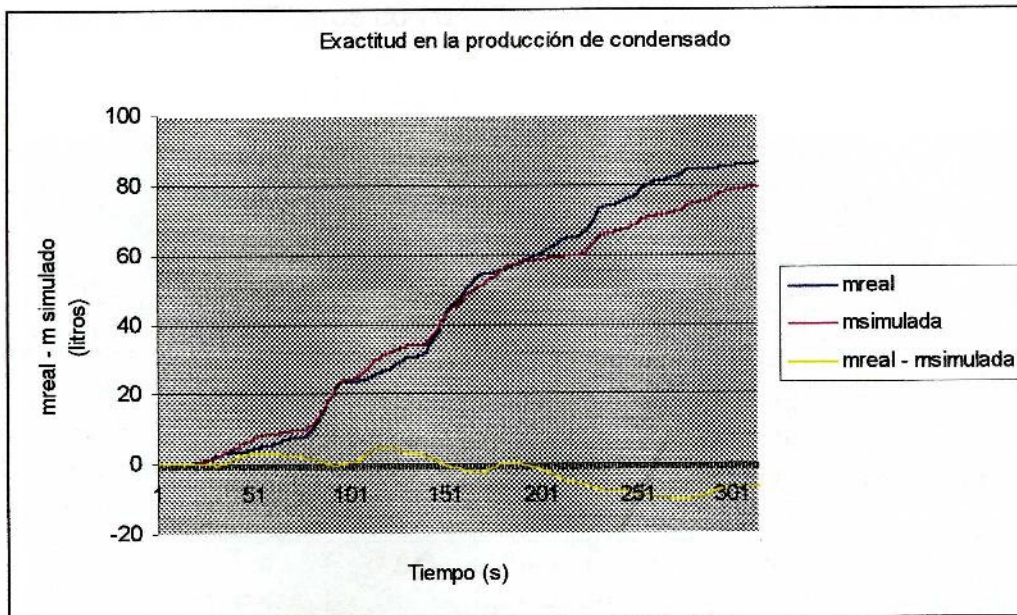


Figura 6.18 Exactitud de curvas de condensado

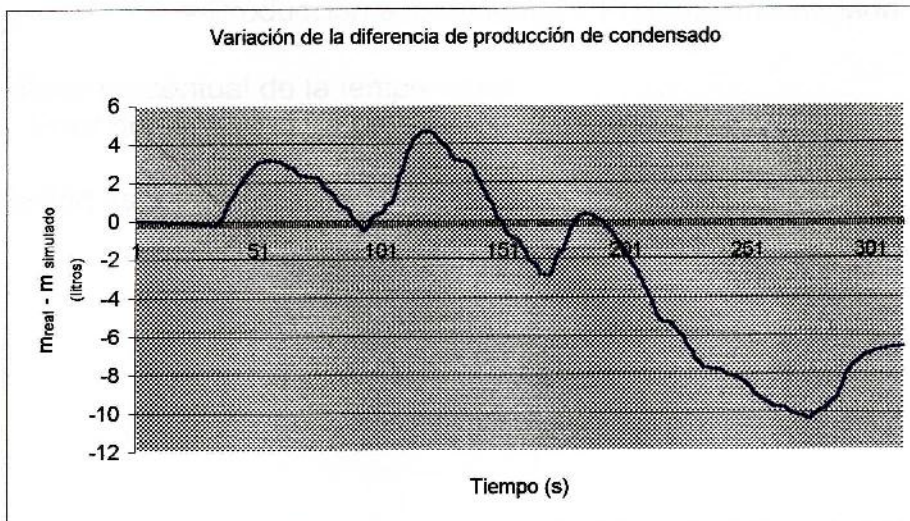


Figura 6.19 Diferencia de producción de condensado

El análisis estadístico realizado al comportamiento de las temperaturas y producción de condensado experimental y simulado se resumen en la tabla 6.1. Este análisis nos indica que la variación promedio máxima de las temperaturas experimental y simuladas es de 2.23 °C con una desviación estándar máxima de 3.46 °C y que la variación promedio máxima de la producción de condensado es de 2.49 litros con una desviación estándar de 4.8 litros.

**Tabla 6.2 Error entre Datos Experimentales y Simulados**  
(Período de medición: 4 días)

	$\Delta T$ promedio	$\sigma \Delta T$	$\Delta T / T_R$ promedio	$\sigma \Delta T / T_R$	$\Delta T$ máximo °C
$T_{WT}$	- 2.04 °C	3.46 °C	4.01 %	8.51 %	- 10.78 / 3.46
$T_1$	2.23 °C	2.98 °C	1.71 %	6.48 %	- 7.12 / 8.86
$T_2$	0.6 °C	2.56 °C	- 1.42 %	6.73 %	- 7.61 / 6.66
$T_3$	0.26 °C	2.41 °C	- 1.6 %	5.76 %	- 5.05 / 4.94
$T_4$	- 1.58 °C	3.27 °C	- 5.65 %	9.38 %	- 9.91 / 2.98
$T_5$	- 1.04 °C	1.41 °C	- 3.03 %	5.91 %	- 4.11 / 2.06
	$\Delta m$ promedio	$\sigma \Delta m$	$\Delta m / m_R$ promedio	$\sigma \Delta m / m_R$	$\Delta m$ máximo kg
$m_c$	2.49 kg	4.8 kg	- 0.43 %	23.6 %	- 4.63 / 11.2

$\Delta T = T_R - T_S$  = Temperatura experimental – Temperatura simulada  
 $\Delta m = m_R - m_S$  = Producción experimental – Producción simulada

$\Delta T / T_R$ : Error porcentual de la temperatura  
 $\Delta m / m_R$ : Error porcentual de la producción de condensado

$\sigma$ : Desviación estándar

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

## 6.5 Radiación Solar

Las figuras 6.20 y 6.21 muestran el comportamiento de la radiación solar en la zona de Quilpue en Viña del mar ( $33.1^{\circ}\text{S}$   $71.5^{\circ}\text{W}$ ), para los días 15 a 26 de febrero del 2001. Aquí se puede observar que los niveles alcanzados presentan una variación significativa en cada día.

Después de varios días de funcionamiento para el desalinizador, se ha establecido que se requieren de por lo menos cuatro días de radiación alta para alcanzar una buena puesta en marcha del equipo y lograr una producción adecuada de condensado.

Como se aprecia en la figura 6.20 los días 20, 21, 22 y 23 presentan muy baja radiación solar del orden de 3 a 4 kWh, valores que no son buenos para lograr producciones altas de condensado. Los días 24, 25 y 26 presentan un buen nivel de radiación solar con valores entre 6.3 a 6.8 kWh que fueron los valores utilizados para construir las curvas de producción de condensado.

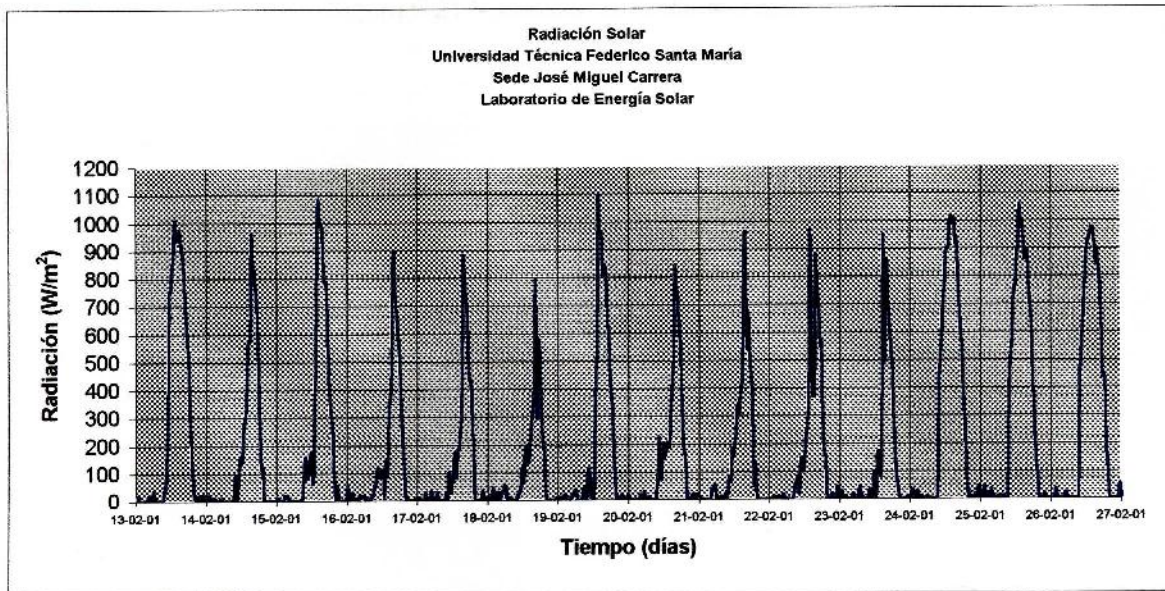


Figura 6.20 Radiación solar en Viña del Mar

En la siguiente figura se puede apreciar en mejor forma la variación de energías que puede proporcionar la radiación solar al sistema de desalinización

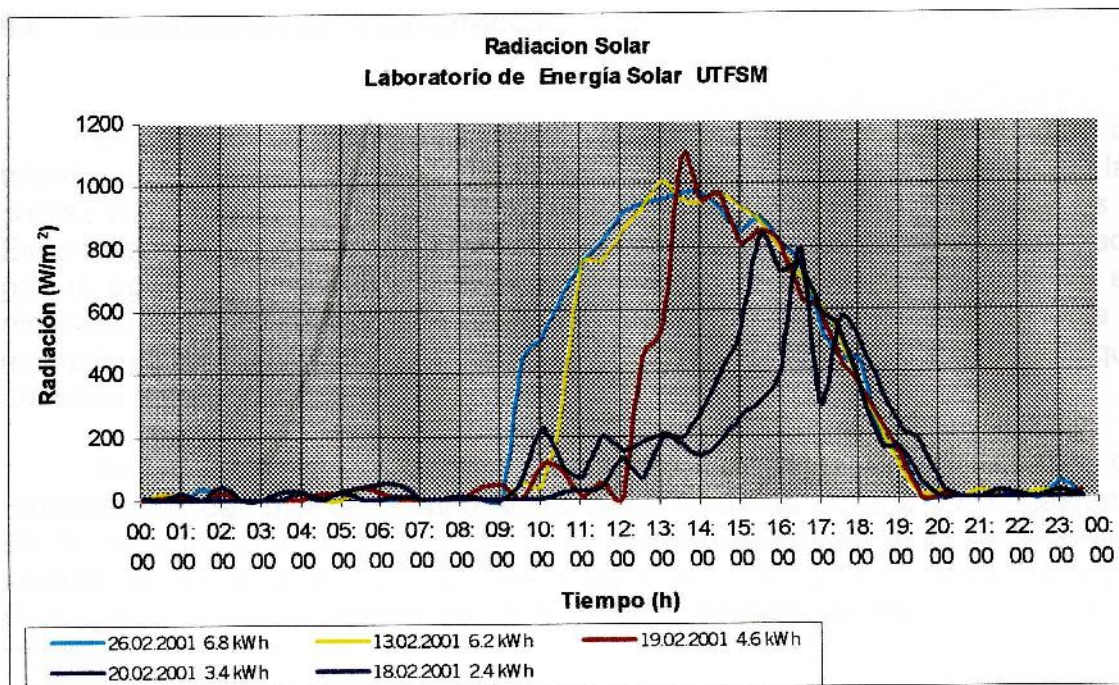


Figura 6.21 Variación de Radiación solar

## 6.6 Mecanismos de Transferencia

Una forma de visualizar los efectos de los diferentes mecanismos de transferencia de calor en cada efecto del Desalinizador es que se entregan las curvas siguientes. Aquí se puede apreciar que el mecanismo dominante es la Evaporación y en aumento a medida que aumenta la temperatura alcanzada por el agua. El segundo mecanismo relevante es la Radiación que va en disminución a medida que se aumenta la temperatura y en tercer lugar está el mecanismo de Convección que presenta una disminución notable a medida que aumenta la temperatura del agua.

En el primer efecto se puede destacar que el Mecanismo de transferencia de calor por Evaporación aumenta de un 40 % a 20 °C hasta un 94 % cuando se llega a los 96 °C. El mecanismo por Radiación presenta valores de 37 % a 20 °C llegando a un 4 % a 96 °C y el mecanismo por Convección presenta valores de 23 % a 20 °C llegando a menos de 1 % a 96 °C.

Esto puede ser explicado debido a que el aire contenido al inicio de la operación de desalinización en cada efecto va siendo expulsado fuera del equipo por el vapor generado y por lo tanto disminuye el mecanismo por Convección y aumentando el mecanismo por Evaporación.

Este comportamiento es similar para cada efecto del desalinizador con algunas variaciones de retardo, en los mecanismos respecto a los anteriores efectos y las temperaturas alcanzadas en cada uno de ellos.

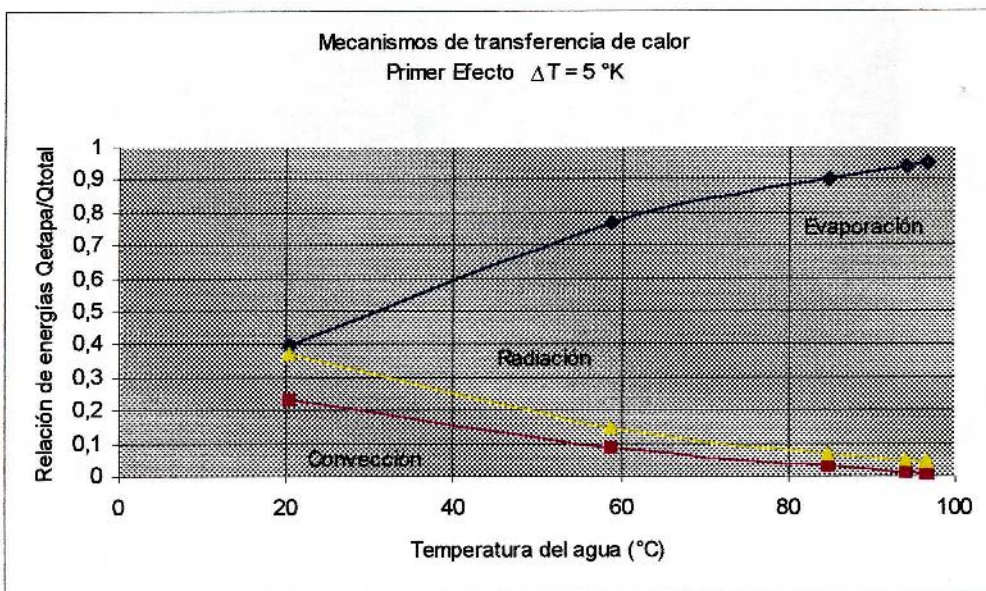


Figura 6.22 Mecanismos de transferencia de calor, Primer efecto

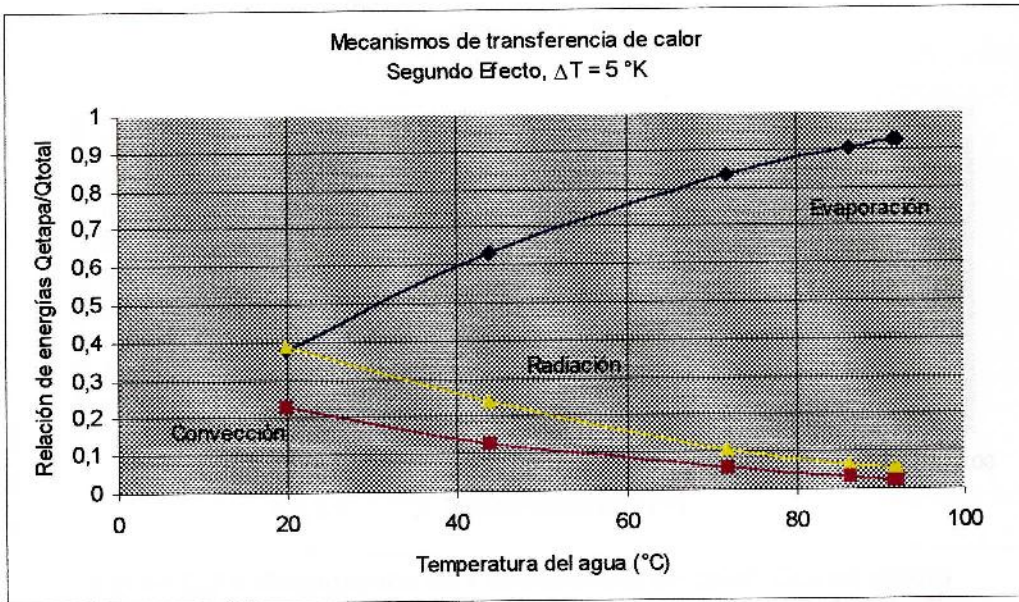


Figura 6.23 Mecanismos de transferencia de calor, Segundo efecto

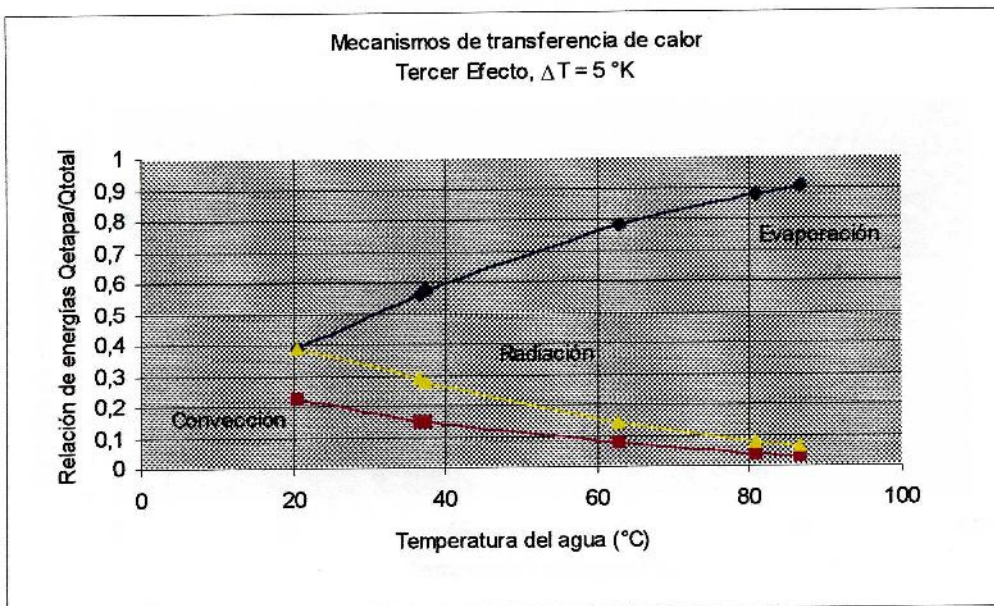


Figura 6.24 Mecanismos de transferencia de calor, Tercer efecto

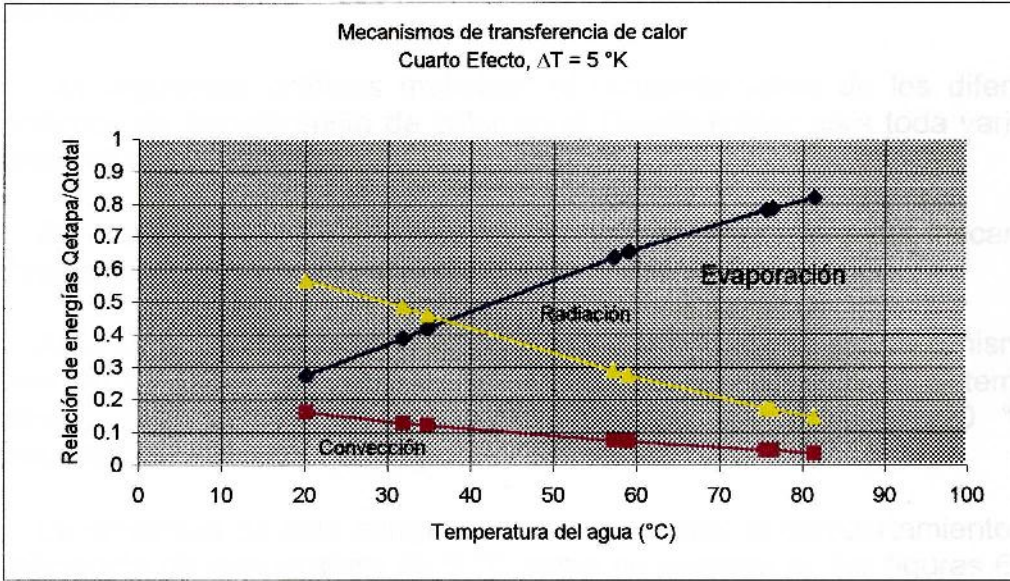


Figura 6.25 Mecanismos de transferencia de calor, Cuarto efecto

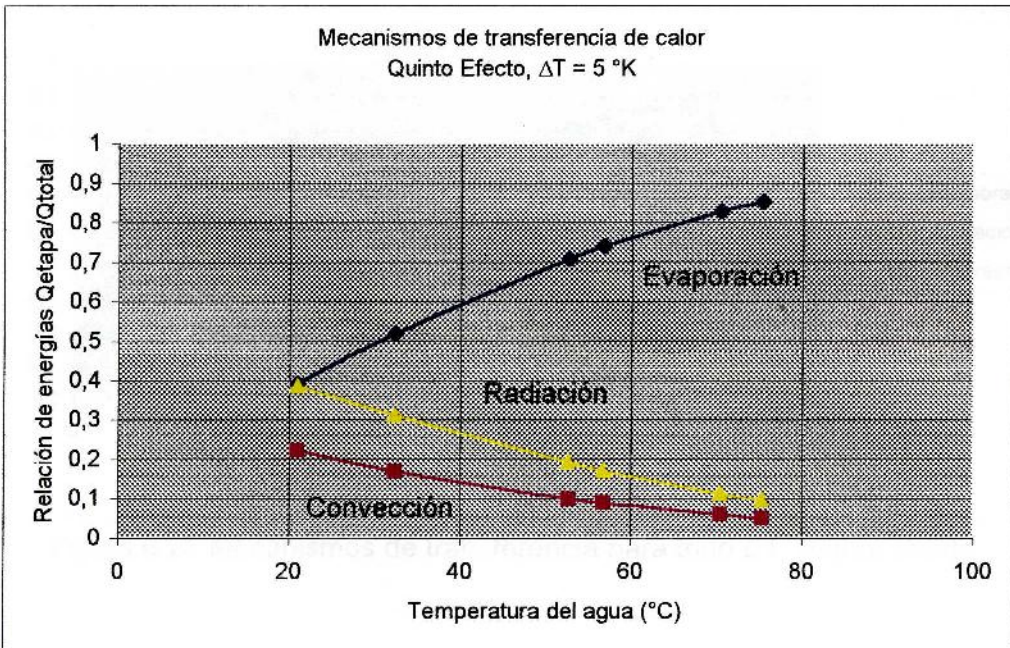


Figura 6.26 Mecanismos de transferencia de calor, Quinto efecto

### 6.6.1 Mecanismos de Transferencia de calor para toda variación de temperatura

Las siguientes gráficas muestran el comportamiento de los diferentes mecanismos de transferencia de calor en el Desalinizador para toda variación de temperatura entre los diferentes efectos.

Se puede apreciar una clara tendencia del predominio del mecanismo por Evaporación seguido por el de Radiación y del de Convección.

Aquí se puede observar, en forma mas clara, el efecto del mecanismo de Convección al inicio del proceso de desalinización respecto al sistema en operación. Esta convección es mayor al inicio del proceso (20 °C) y despreciable al alcanzar una temperatura sobre 80 °C.

La tendencia de este comportamiento es similar al comportamiento para una diferencia de temperatura de 5 °C como se muestra en las figuras 6.27 a 6.31.

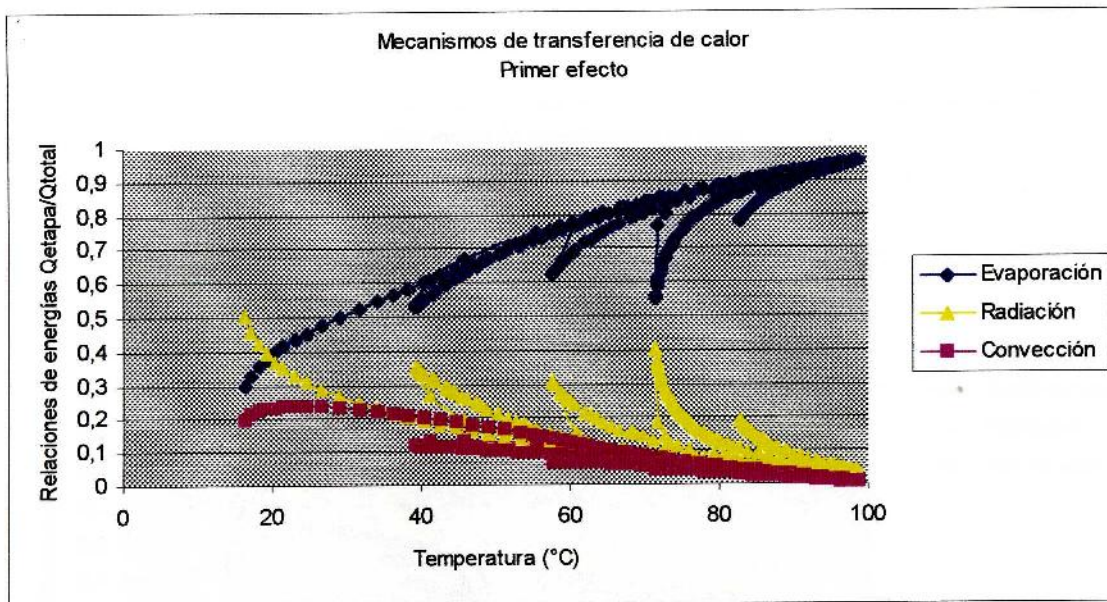


Figura 6.27 Mecanismos de transferencia para todo  $\Delta T$ , Primer efecto

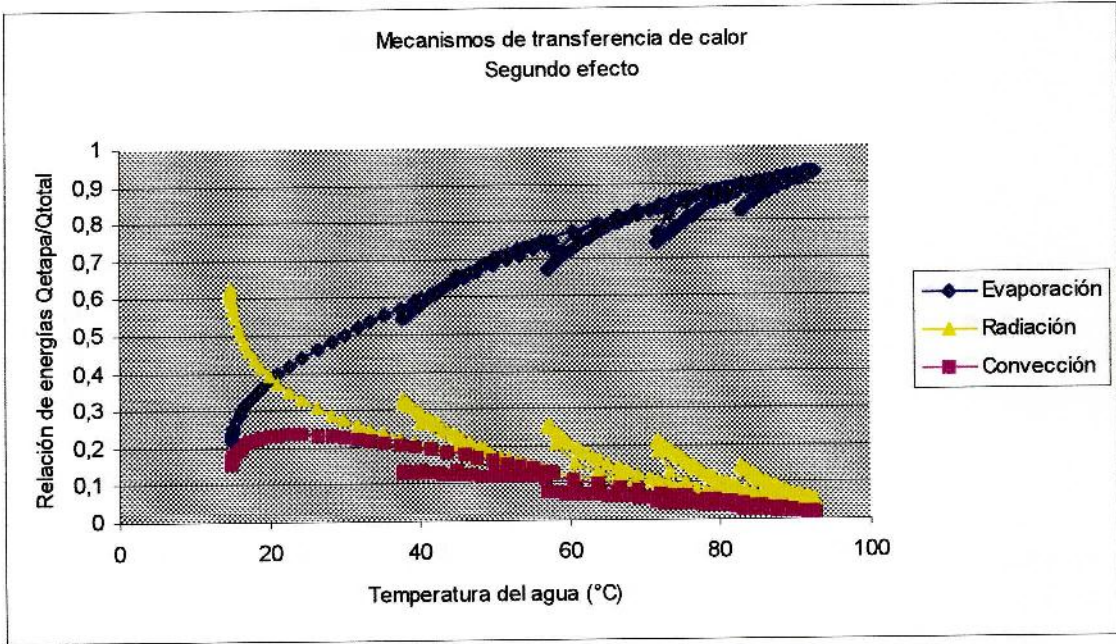


Figura 6.28 Mecanismos de transferencia para todo  $\Delta T$ , Segundo efecto

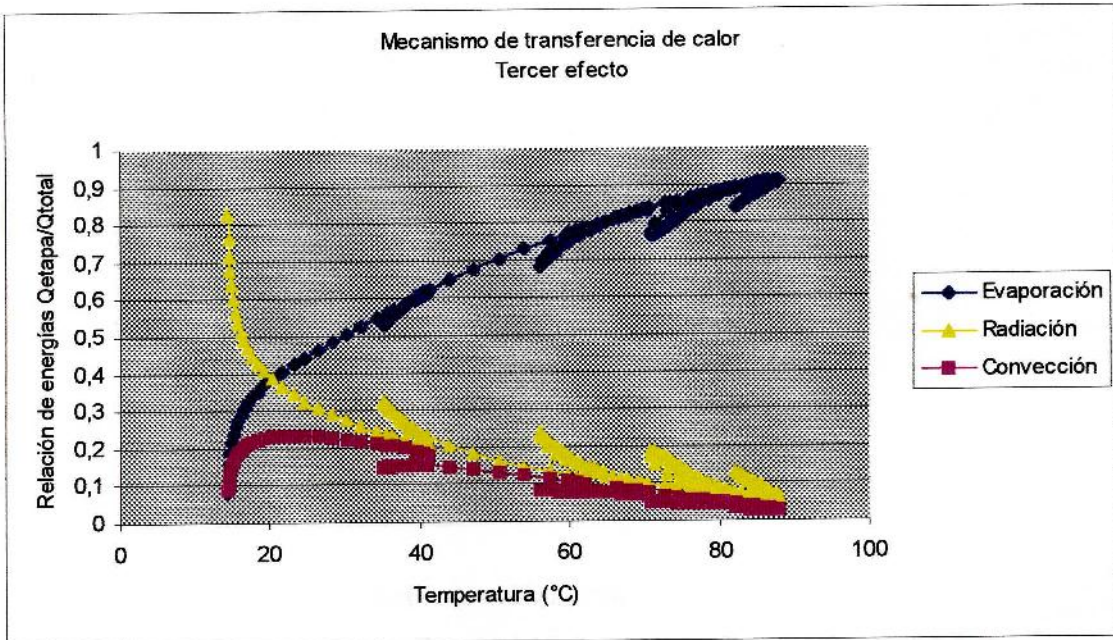


Figura 6.29 Mecanismos de transferencia para todo  $\Delta T$ , Tercer efecto

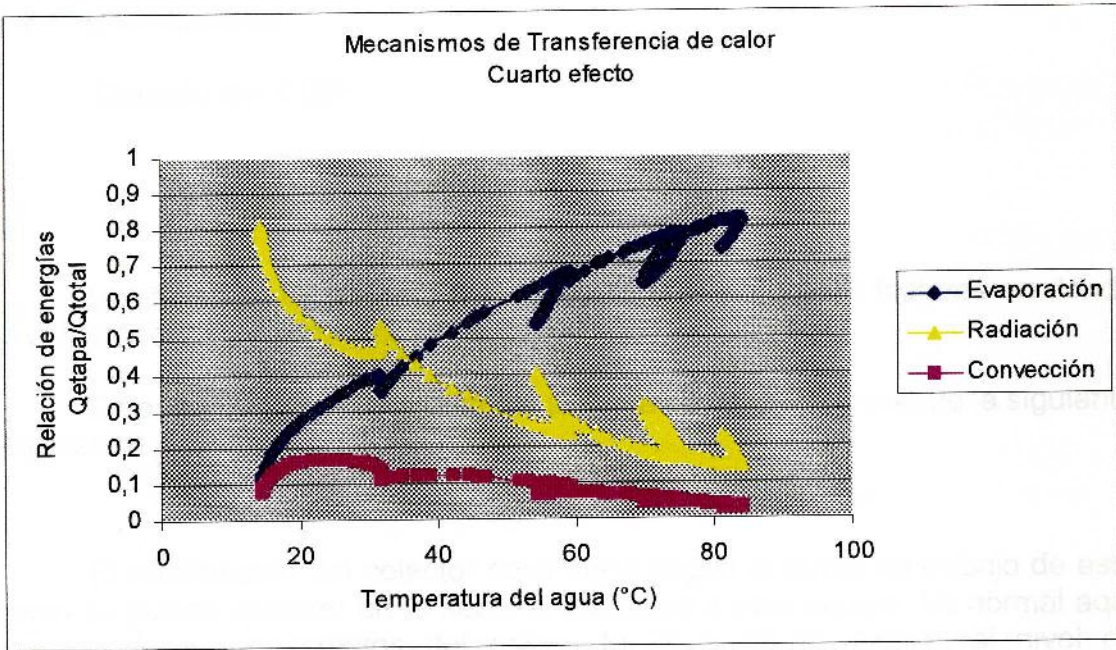


Figura 6.30 Mecanismos de transferencia para todo  $\Delta T$ , Cuarto efecto

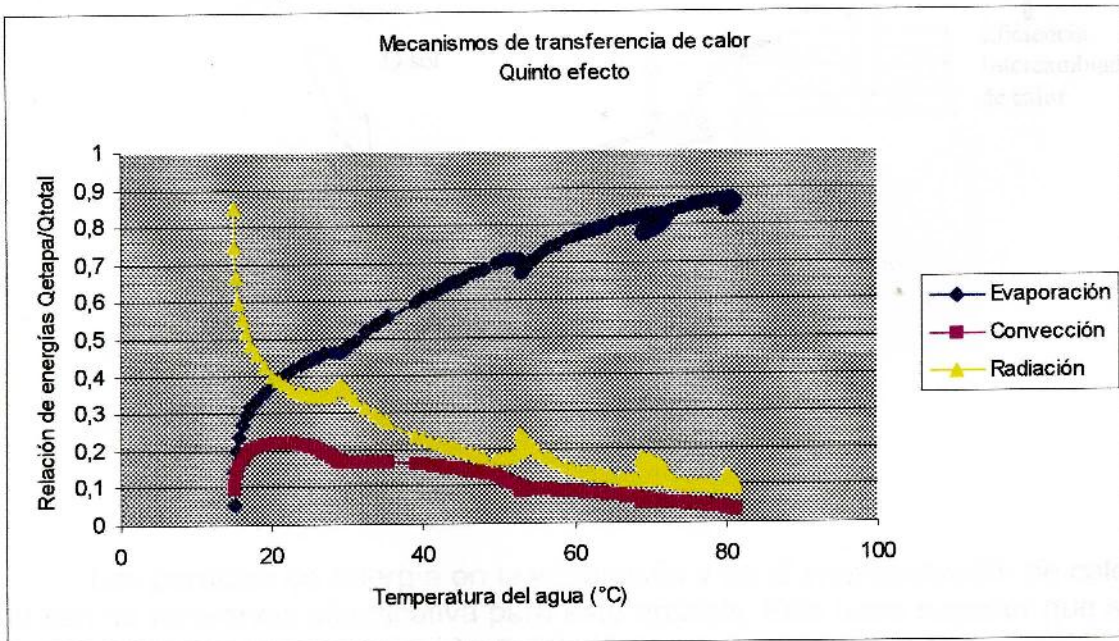


Figura 6.31 Mecanismos de transferencia para todo  $\Delta T$ , Quinto efecto

## 6.7 Rendimiento

### Cálculo del COP:

$$COP = \frac{\eta_{sistema} * m_D * r}{Q_{util}}$$

La eficiencia de sistema está condicionada por varios factores en donde el colector solar juega un rol fundamental.

En este caso el rendimiento del sistema se determina usando la siguiente expresión:

$$\eta_{sistema} = \eta_{colector} * \eta_{instalación} * \eta_{intercambiador}$$

El rendimiento del colector solar varía según la forma de trabajo de este como se puede apreciar en la sección dedicada a este equipo. Lo normal aquí es considerar rendimientos del orden de 20 a 40 %, debido al nivel de temperaturas de trabajo y a la curva de rendimiento del mismo.

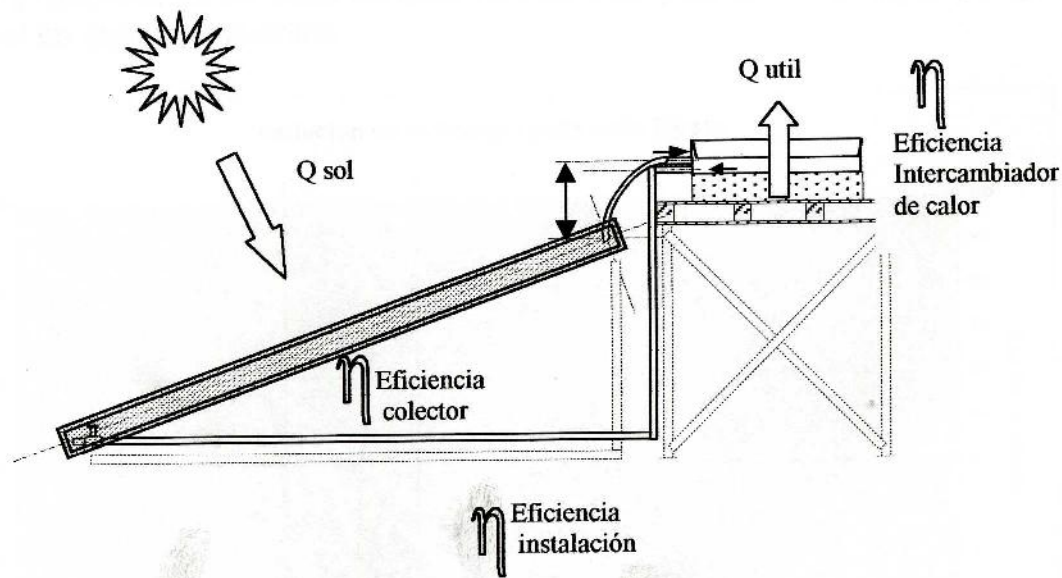


Figura 6.32 Energías en el colector

Las pérdidas de energía en la instalación y en el intercambiador de calor no son de relevancia significativa para este análisis. Esto hace suponer que se ha construido un buen sistema de conexión y una buena aislación.

Con esto se llega a determinar que el Coeficiente de funcionamiento, COP es igual a 2.

## Cálculo del GOR

De acuerdo a la expresión del GOR que relaciona las energías para la producción total respecto a la producción de la etapa mayor. Se obtiene un  $GOR = 3.96$

La figura 6.33 muestra la variación de las energías utilizadas como energía de entrada a cada bandeja. Esta es variable respecto al tiempo y depende directamente de la radiación solar. La variación de las temperaturas alcanzadas en las diferentes bandejas es más estable que la variación de las energías.

Los valores alcanzados de energía van en disminución a medida que aumenta el número de efectos y con un desplazamiento mayor al comienzo de la puesta en marcha respecto a los días posteriores.

Al considerar un tiempo determinado, como por ejemplo, para  $t = 122000$  s que corresponde a las 16:00 h del día 26.02.2001, se puede determinar una eficiencia energética de cada bandeja, como lo muestran las figuras 6.33 y 6.34. Aquí la eficiencia varía desde un 76.96 % a un 39.78 %. Esta variación se debe a que la temperatura en cada bandeja es diferente y en aumento dependiendo del nivel en que se encuentre.

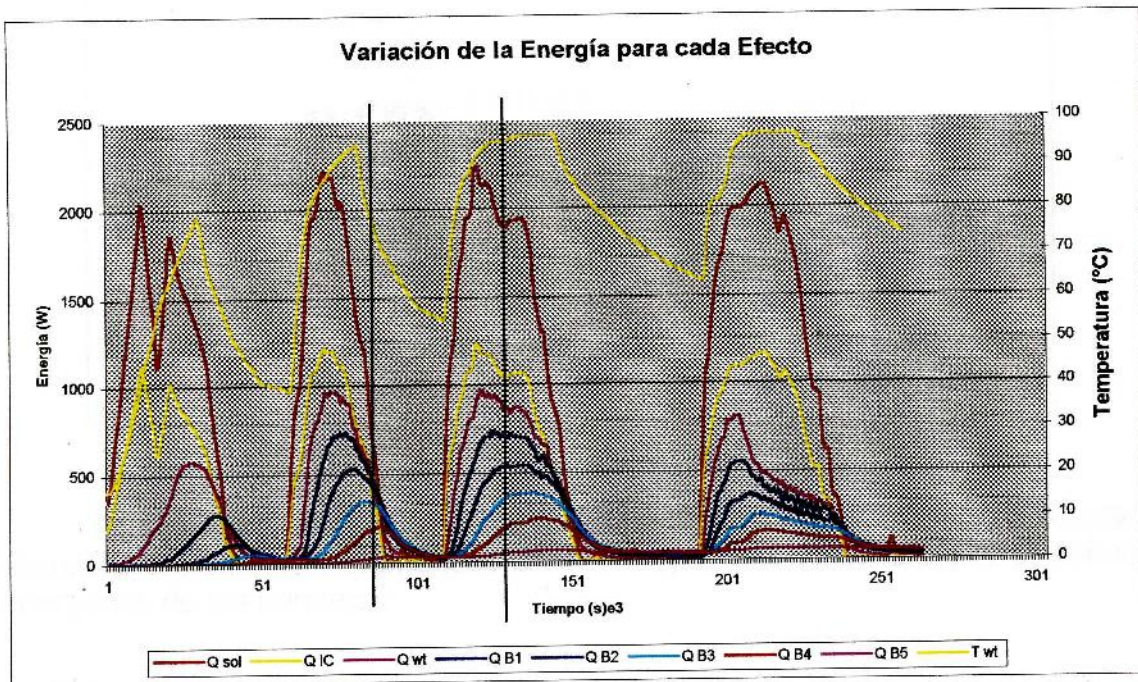


Figura 6.33 Variación de la energía en las etapas

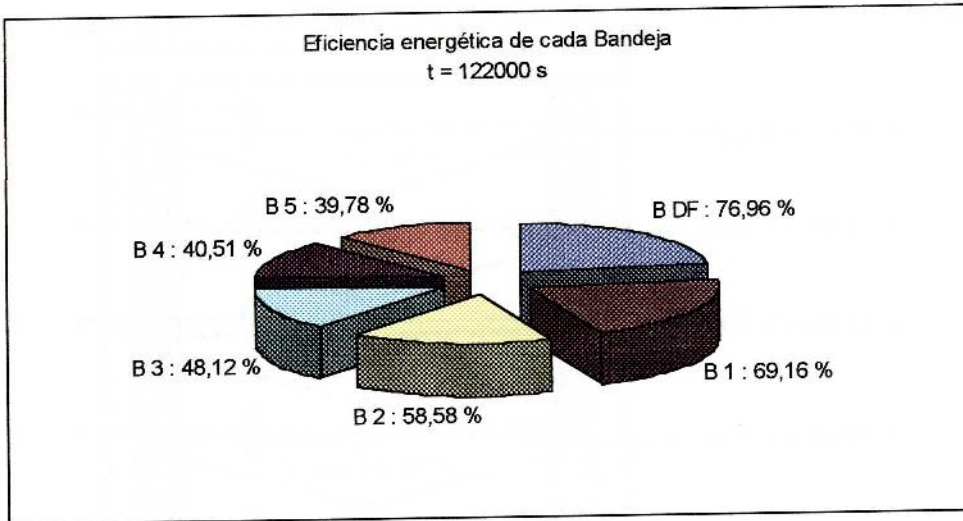


Figura 6.34 Eficiencia energética de bandejas

La figura 6.35 muestra una variación diferente respecto a la eficiencia de las bandejas, esto es, para un tiempo diferente. La variación es menos estable debido a que se dispone de menor energía en las últimas bandejas.

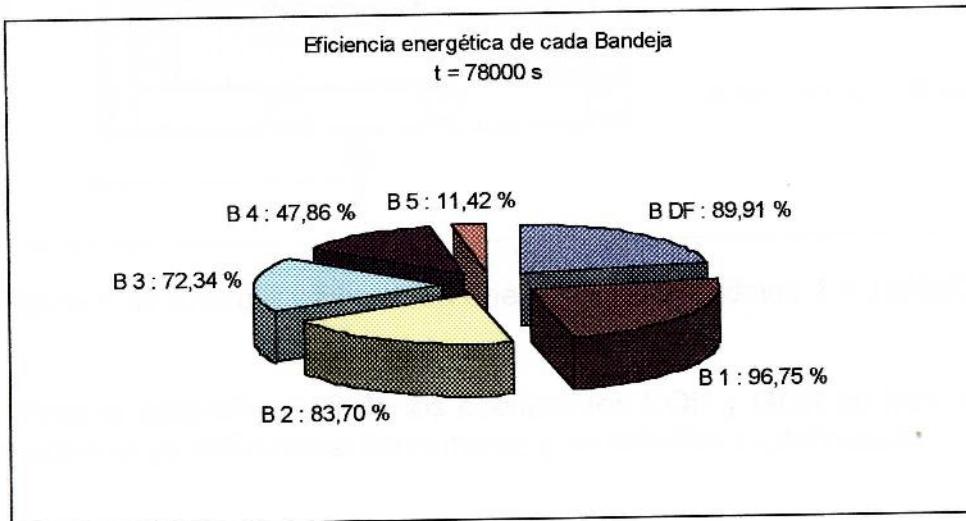


Figura 6.35 Eficiencia energética de bandejas

El siguiente esquema puede ser más aclaratorio en donde se pueden visualizar los valores instantáneos de la energía, la temperatura y la eficiencia energética de las bandejas

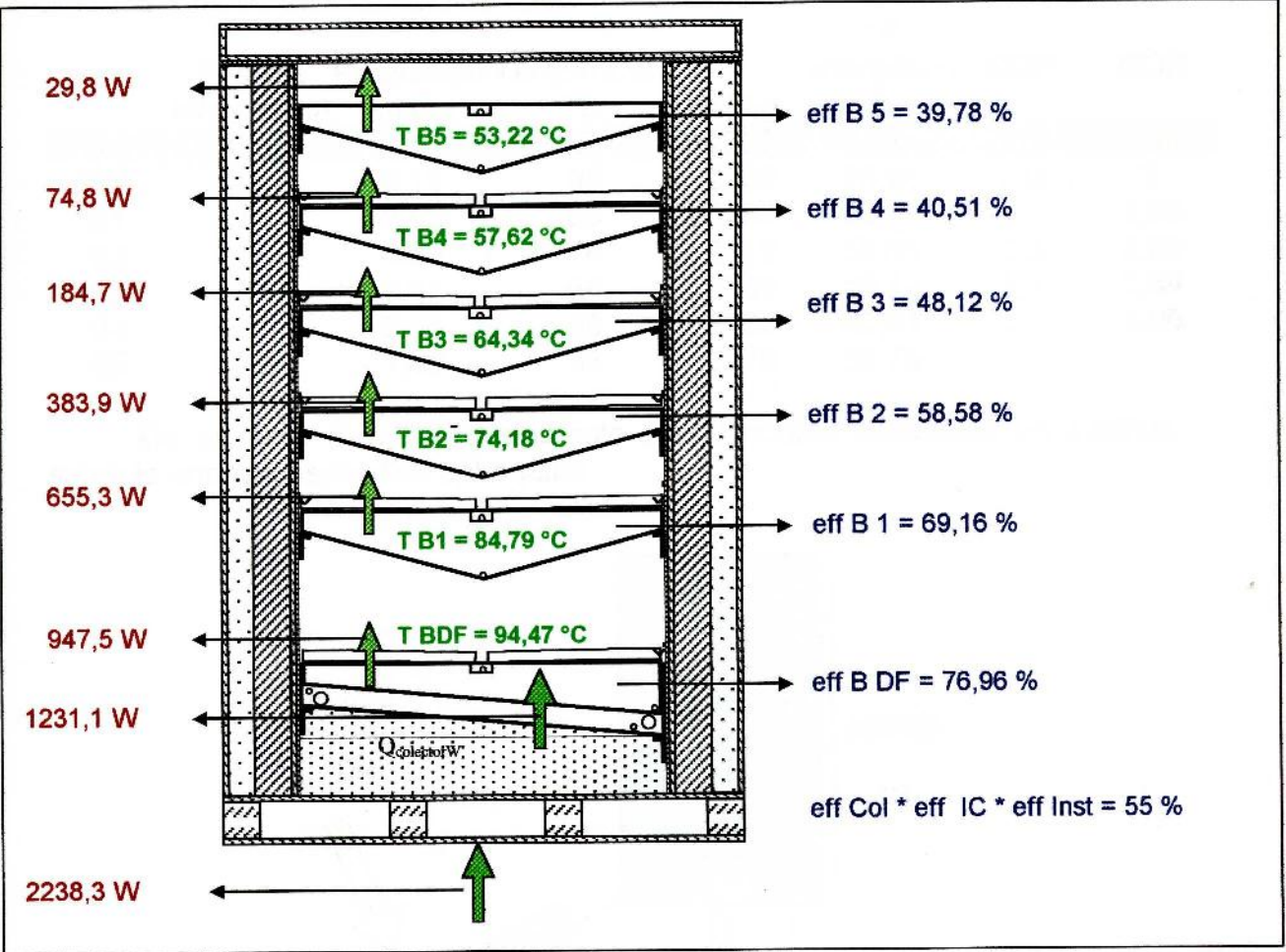


Figura 6.36 Energía y Eficiencia energética de bandejas,  $t = 122000$  s

Para la determinación de los coeficientes COP y GOR se han utilizado las ecuaciones ya definidas anteriormente y se detallan a continuación:

$$COP = \frac{m_D * r}{Q_{\text{útil}}}$$

$$GOR = \frac{m_{D1} * r_1 + m_{D2} * r_2 + m_{D3} * r_3 + m_{D4} * r_4 + m_{D5} * r_5}{m_{D1} * r_1}$$

Tabla 6.3 Datos para cálculo de eficiencia

	Energía kWh/m <sup>2</sup> día	Producción kg/día	Temperatura °C	r kJ/kg	eff energética %	COP	GOR
Sol	6,3	20	80	2305	55	2,0	3,96
BDF	4,1	5,13	95	2269	76,96	0,8	1
B1	2,8	5,03	85	2293	69,16	1,1	1,99
B2	2,6	4,08	74	2319	58,58	1,0	2,80
B3	2,1	3,67	64	2348	48,12	1,1	3,54
B4	1	2,53	58	2363	40,51	1,7	4,06
B5	0,5	1,68	53	2376	39,78		

De acuerdo a la figura siguiente se ha podido establecer un análisis sobre la energía específica del equipo.

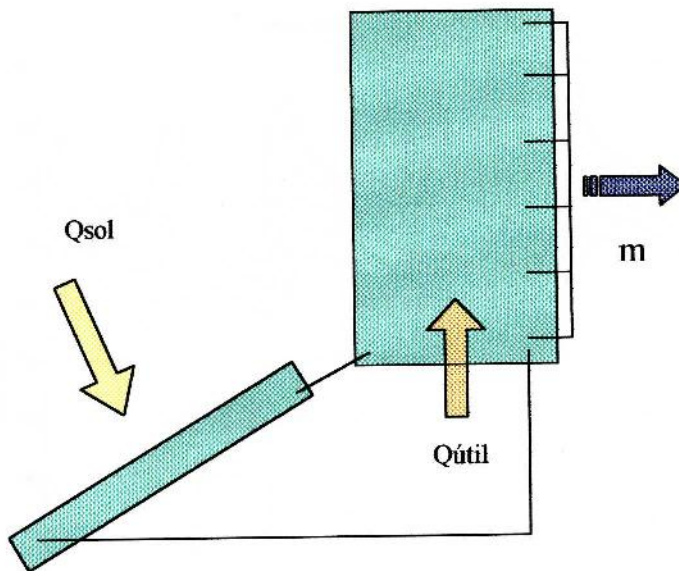


Figura 6.37 Esquema para análisis energético

Considerando una  $Q_{sol}$  de 6.3 kWh/m<sup>2</sup>día, una eficiencia energética de un 55 % y una producción de 20 kg/día, se puede determinar la energía específica  $q_{esp.} = 346 \text{ kWh/m}^3$

Si se aumenta la producción a 30 kg/día para un mismo nivel energético la energía específica será del orden de 231 kWh/m<sup>3</sup>.

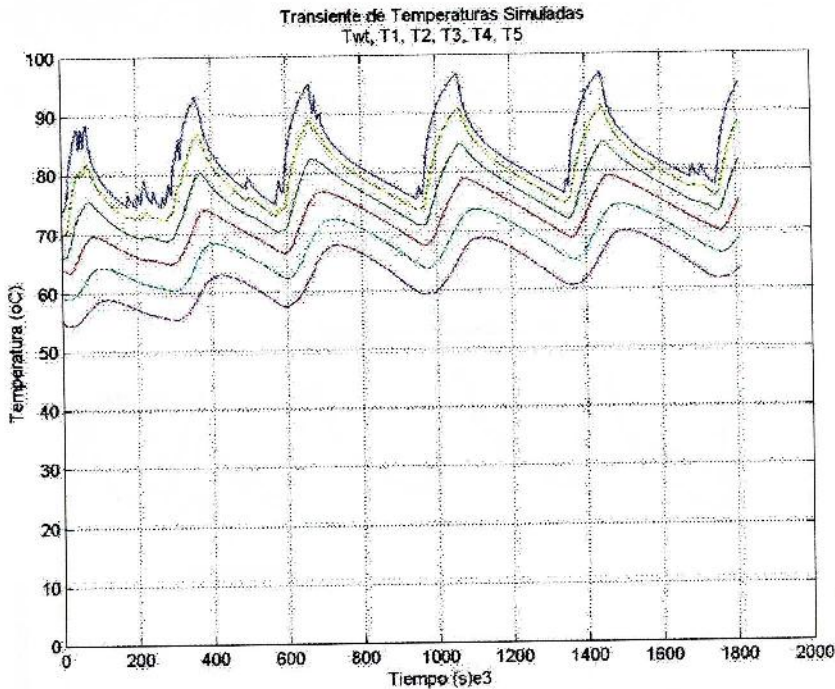
Para poder estimar el costo específico del equipo, la valoración del kWh en términos de energía térmica para energía renovable puede variar entre 5 a 10 \$/kWh, luego el costo específico para el equipo se estima entre 1155 a 3460 \$/m<sup>3</sup>.

## 6.8 Validación con datos de UTFSM

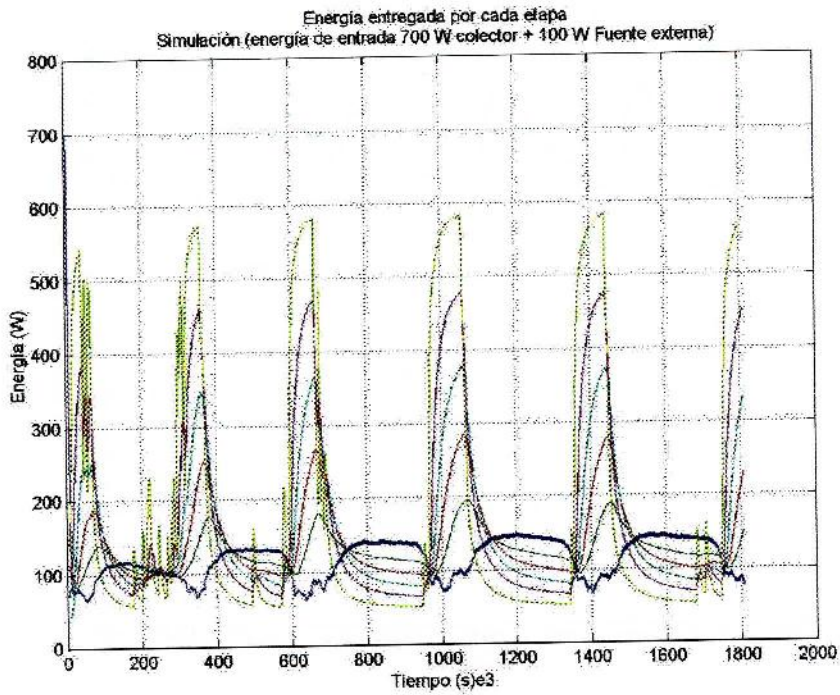
El programa al trabajar con una nueva base de datos, esto es, datos obtenidos en el Laboratorio de Energía Solar de la Universidad Técnica Federico Santa María ubicada al interior de Viña del Mar y a la entrada de la comuna de Quilpue.

Los datos fueron registrados entre los días 20 al 27 de Febrero, donde la radiación solar permitió un buen funcionamiento del equipo.

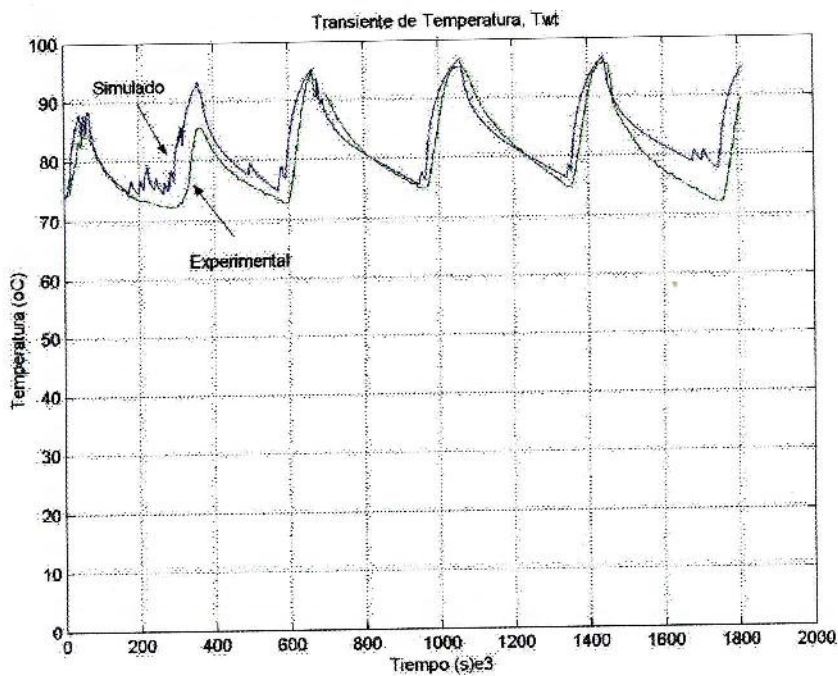
Como salida del programa se entregan dos gráficas que muestran que el programa se comporta bastante bien frente al cambio de nuevas situaciones. Es importante hacer notar que el programa es flexible y permite cambiar los parámetros y las condiciones de funcionamiento del equipo.



Gráfica 6.38 Transiente de Temperatura Simuladas

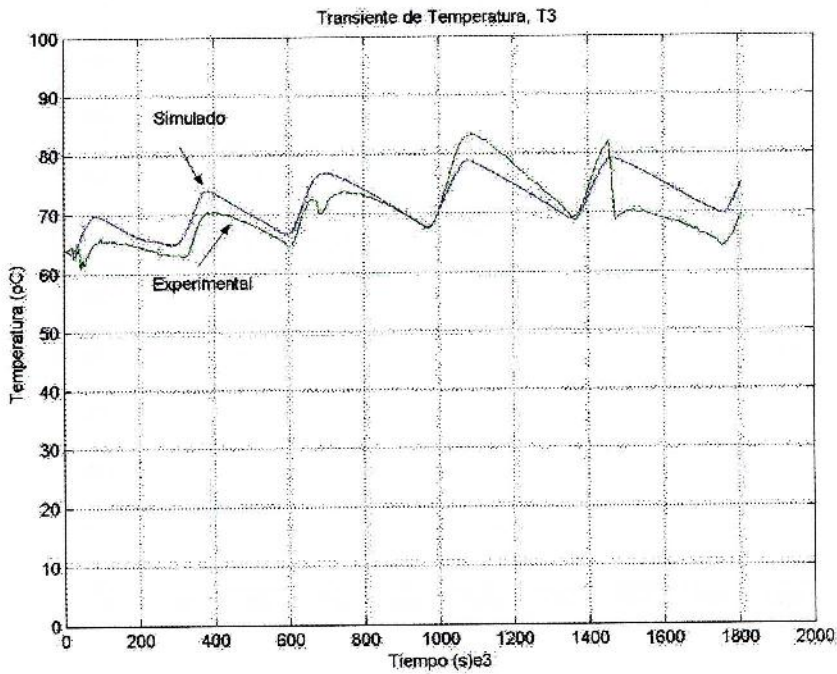


Gráfica 6.39 Energías simuladas

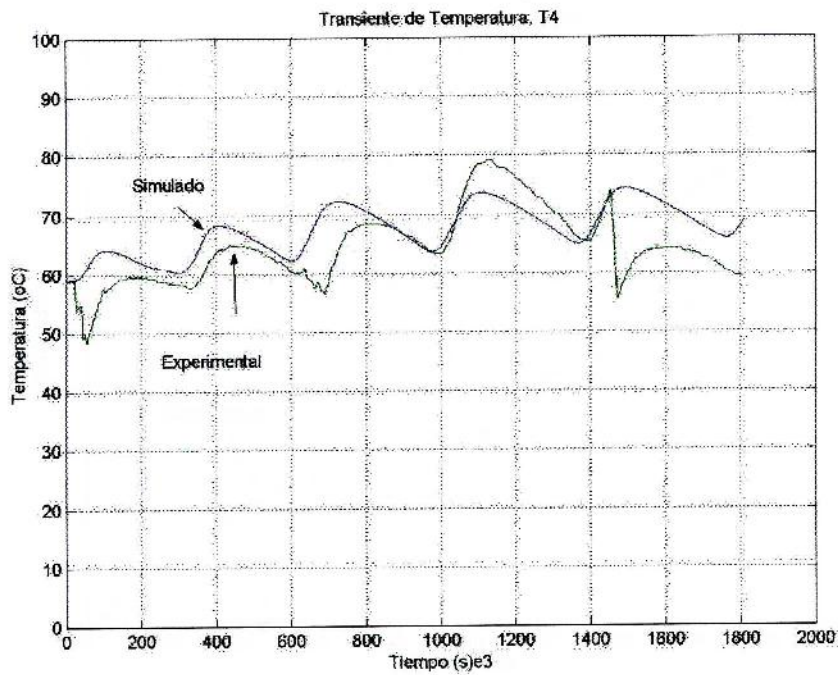


Gráfica 6.40 Contrastación de temperatura Twt, simulada y experimental

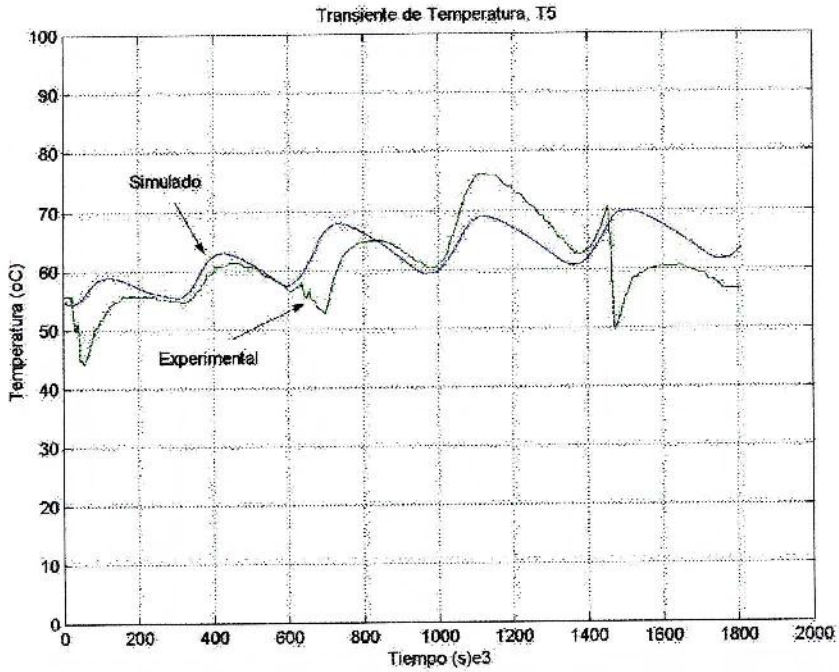




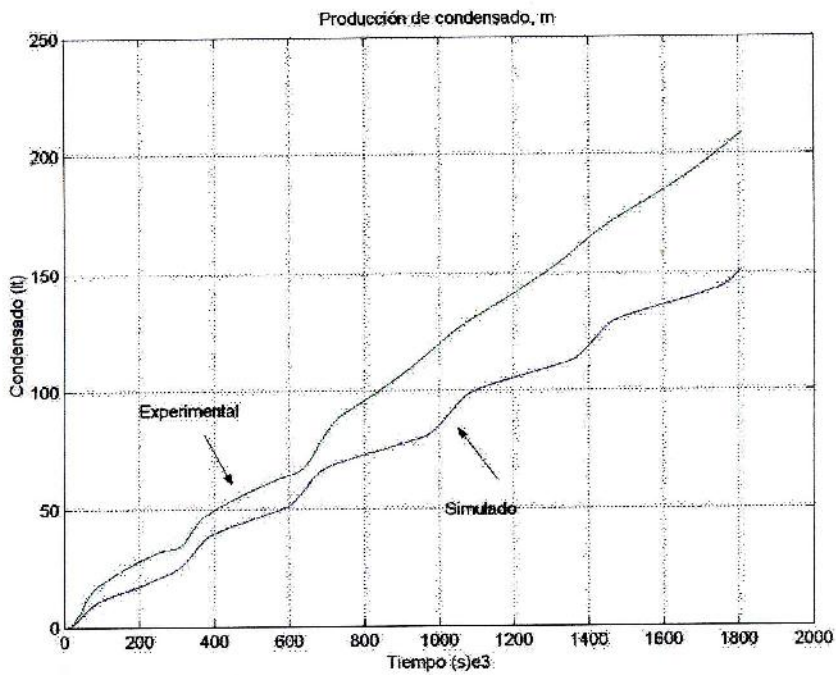
Gráfica 6.43 Contrastación de temperatura T3, simulada y experimental



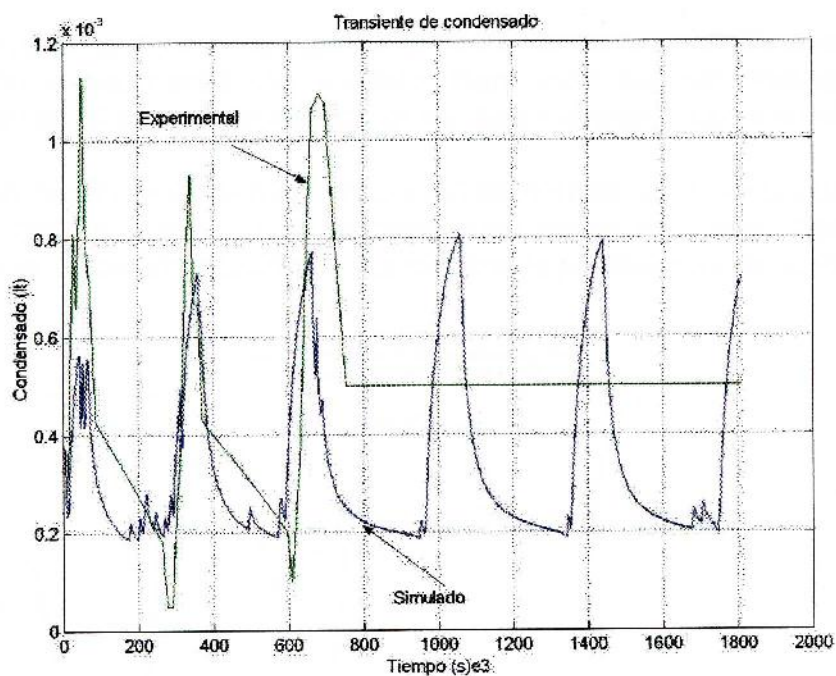
Gráfica 6.44 Contrastación de temperatura T4, simulada y experimental



Gráfica 6.45 Contrastación de temperatura T5, simulada y experimental



Gráfica 6.46 Contrastación de producción de condensado, simulada y experimental

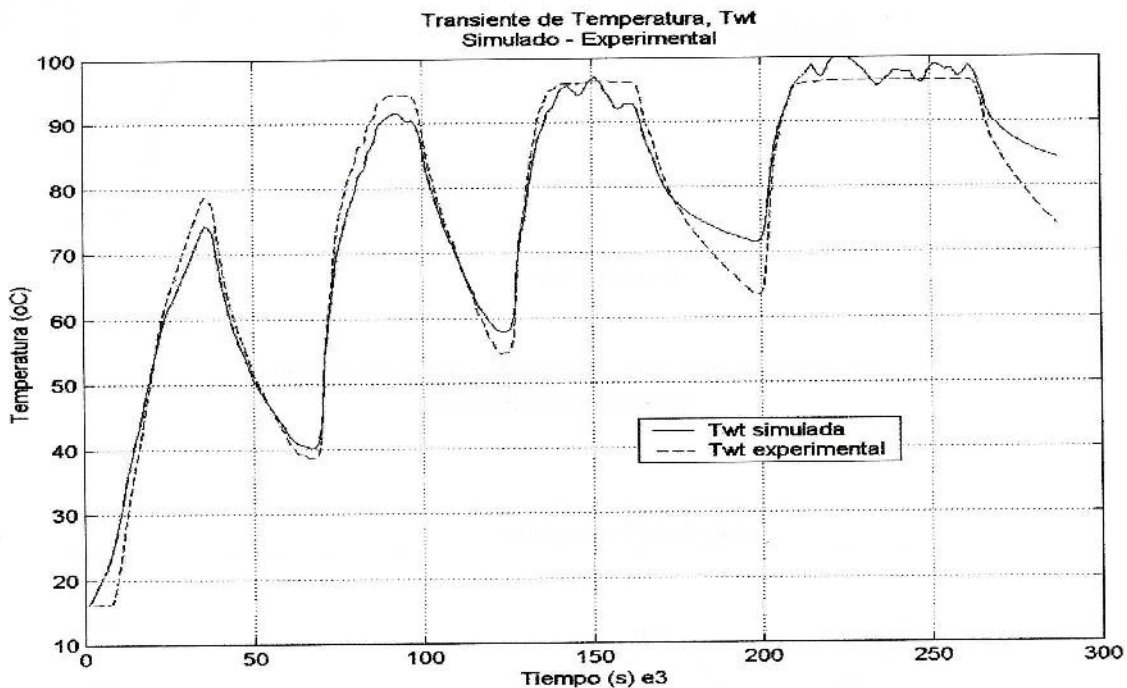


Gráfica 6.47 Contrastación de transiente de condensado, simulada y experimental

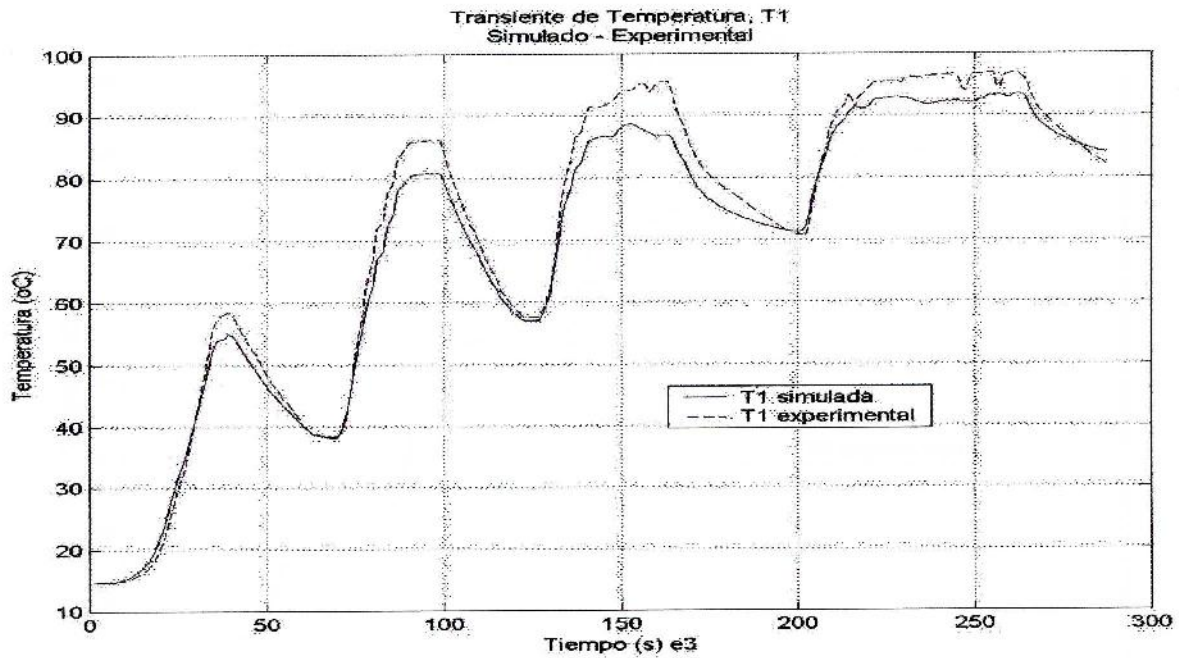
## 6.4 Validación con datos del SIJ

Como se ha mencionado en párrafos anteriores se hace necesaria una validación experimental del modelo. Para esto se han tomado datos experimentales en el equipo desalinizador del Solar –Institut Julich en Alemania.

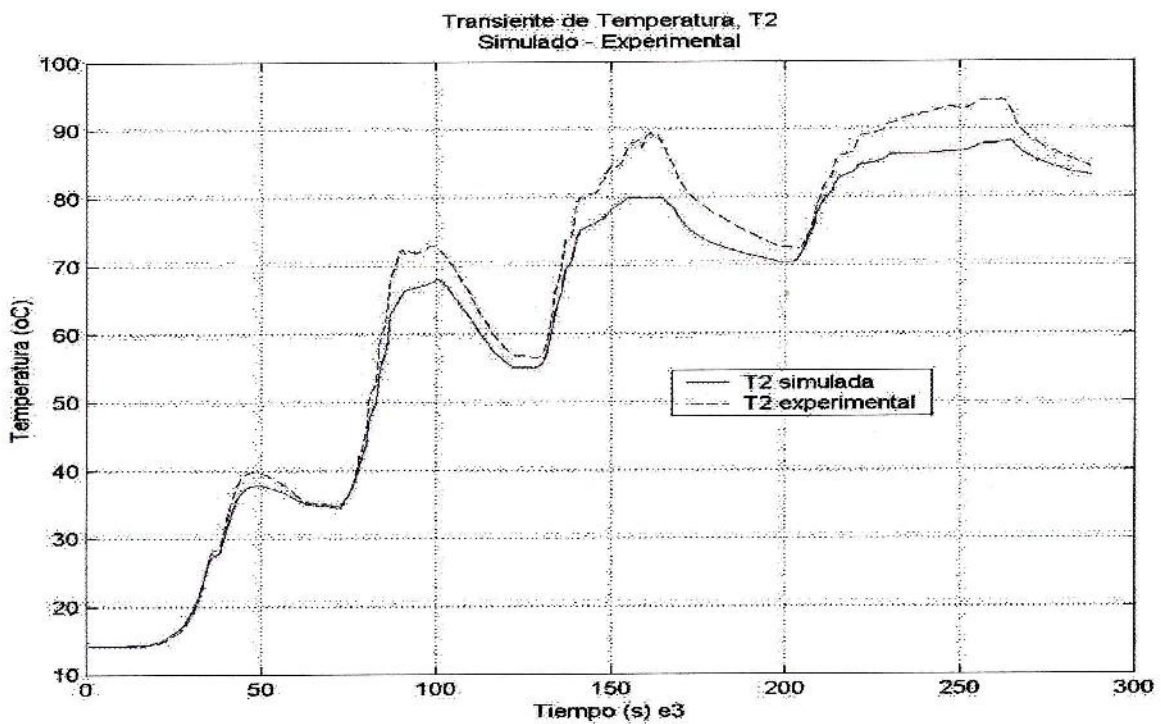
A continuación se presentan las curvas de comparación de las diferentes temperaturas de las etapas con su respectiva curva simulada, Además se entregan curvas de contrastación de los niveles de producción de condensado.



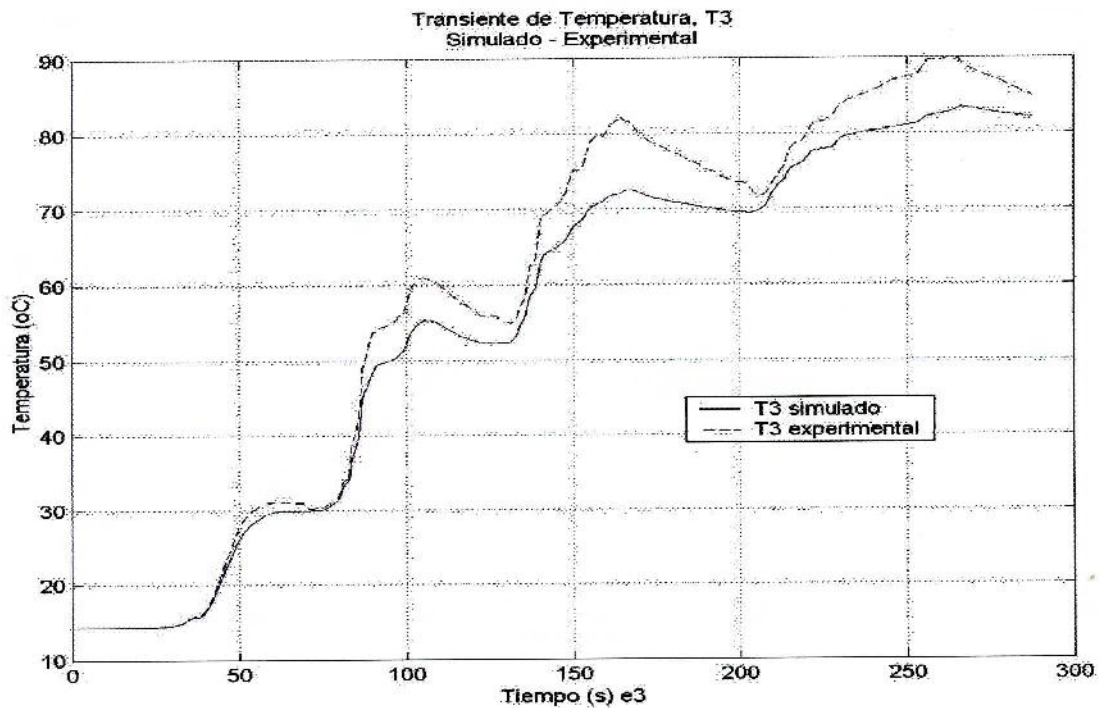
Gráfica 6.48 Comportamiento de la Temperatura Twt del fondo del Desalinizador



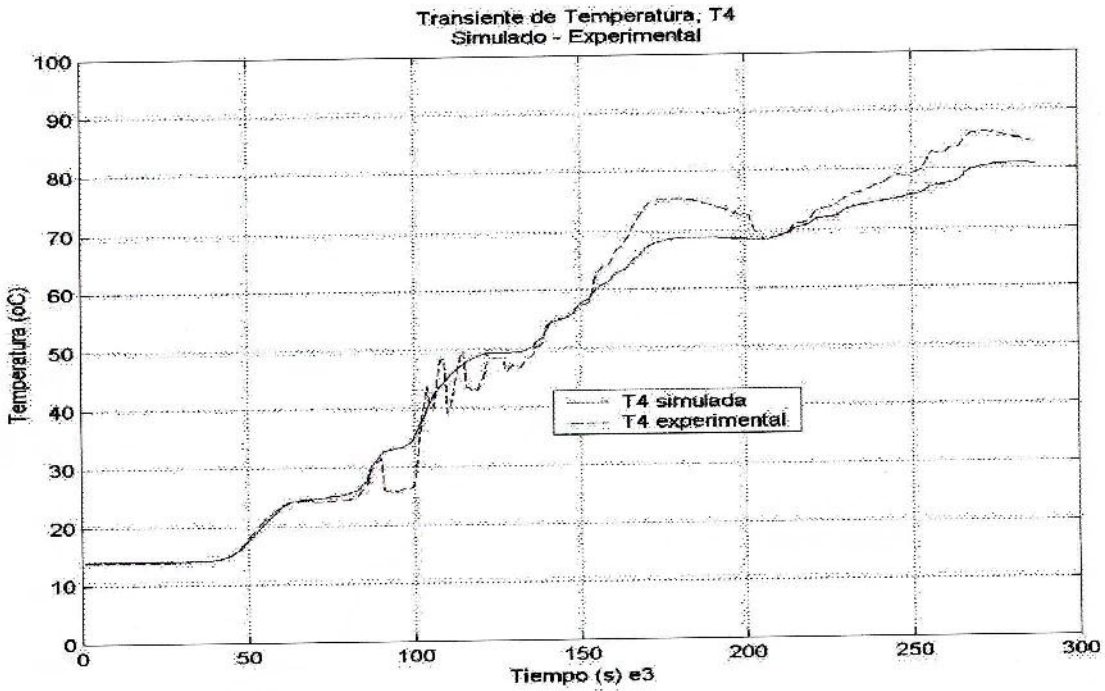
Gráfica 6.49 Comportamiento de la Temperatura T1 de la Primera Bandeja



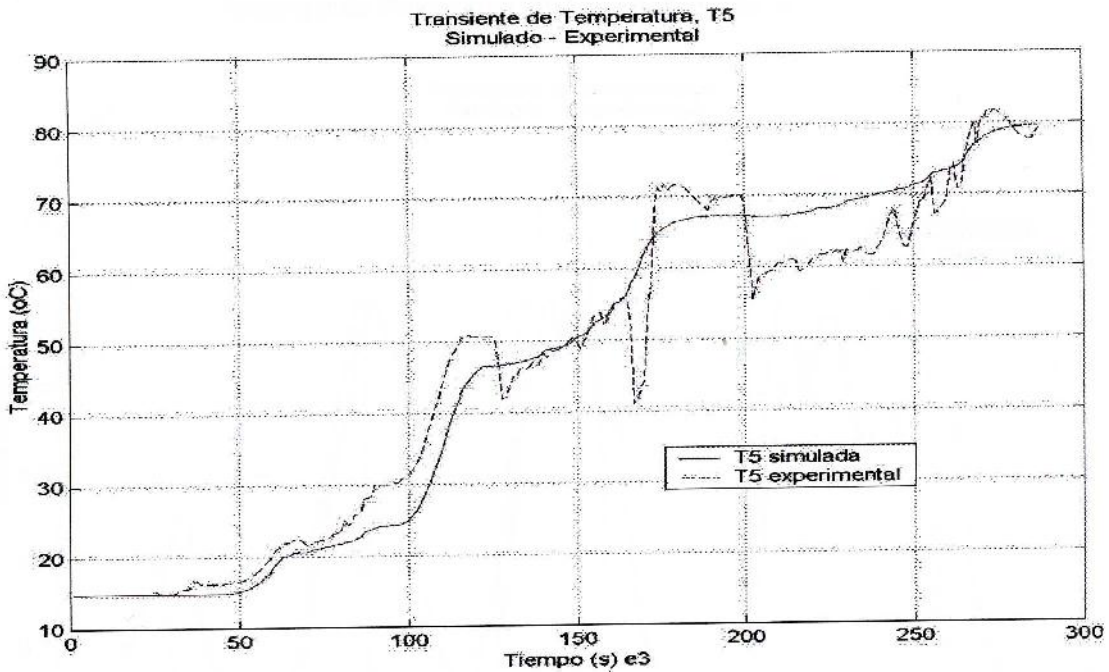
Gráfica 6.50 Comportamiento de la Temperatura T2 de la Segunda Bandeja



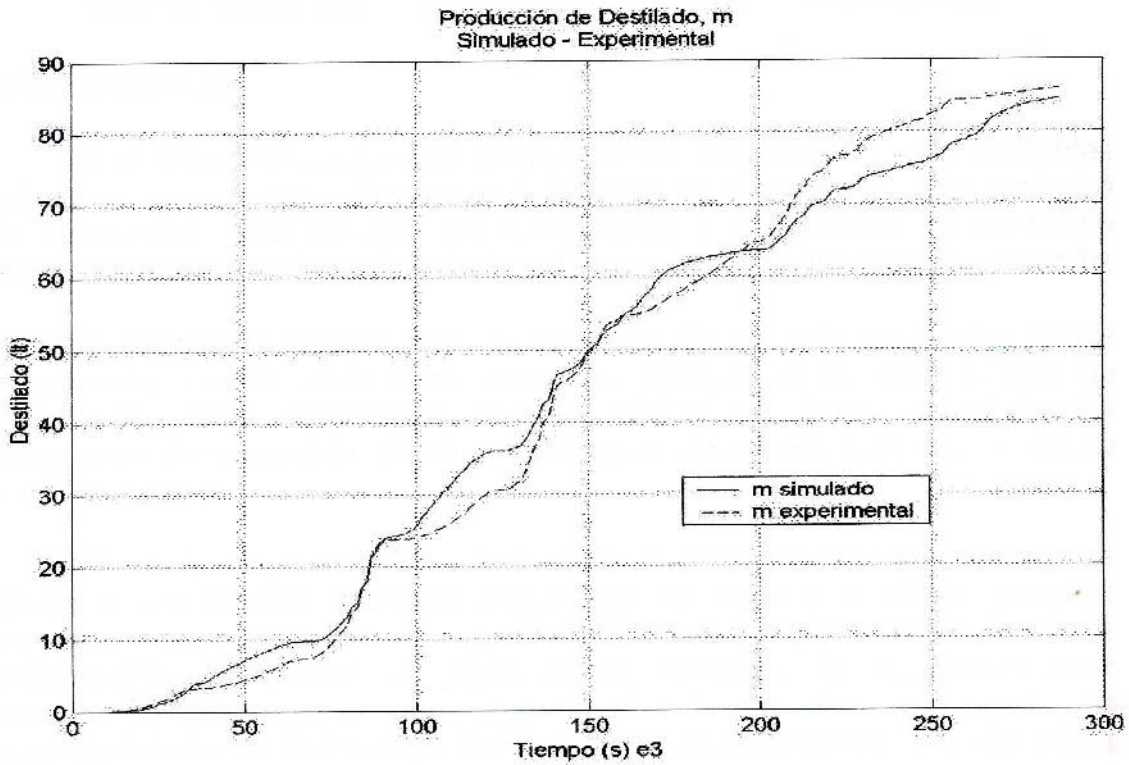
Gráfica 6.51 Comportamiento de la Temperatura T3  
de la Tercera Bandeja



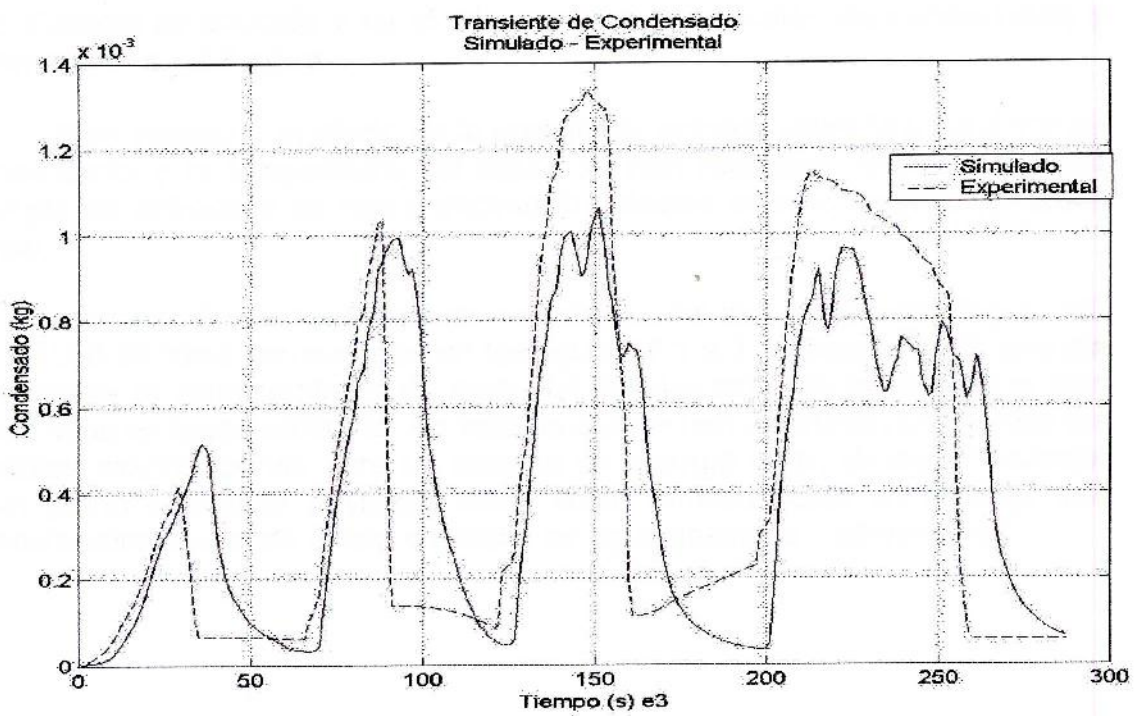
Gráfica 6.52 Comportamiento de la Temperatura T4 de la Cuarta Bandeja



Gráfica 6.53 Comportamiento de la Temperatura T5 de la Quinta Bandeja



Gráfica 6.54 Producción total de condensado m



Gráfica 6.55 Comportamiento de la producción de condensado m

## **CAPITULO VII Optimización de Parámetros**

### **7.1 Generalidades**

En el siguiente capítulo se analizarán las variaciones de los diferentes parámetros que regulan el funcionamiento del desalinizador. Se optimizarán los más relevantes y así entregar las dimensiones y condiciones de operación óptimas de acuerdo al funcionamiento del programa de simulación desarrollado.

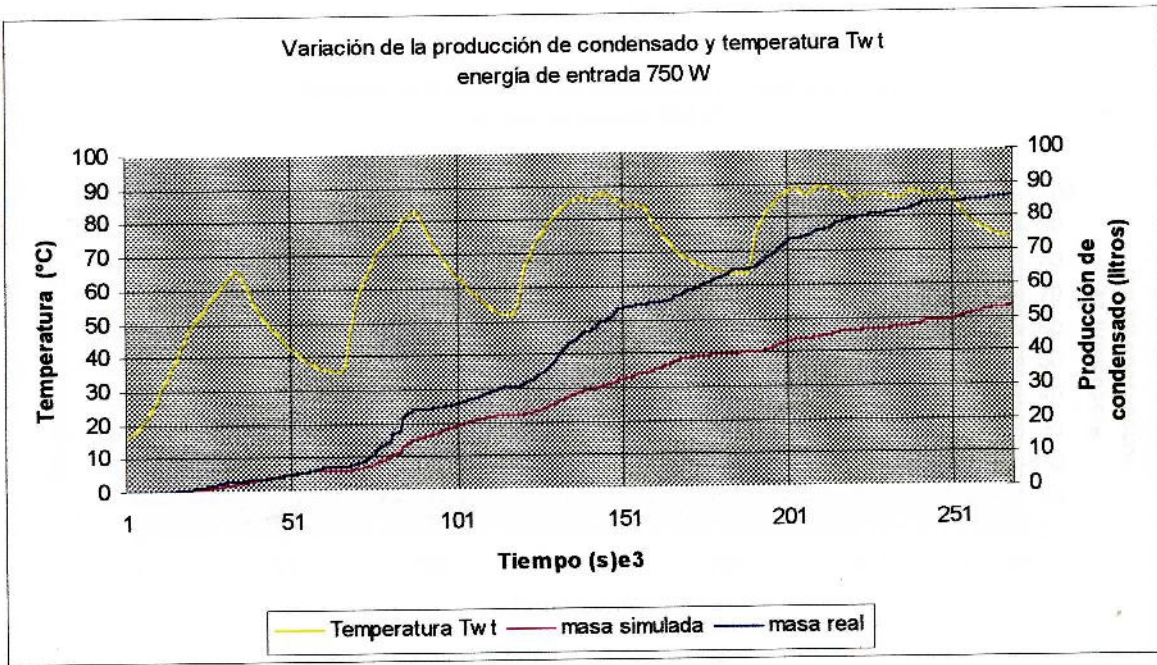
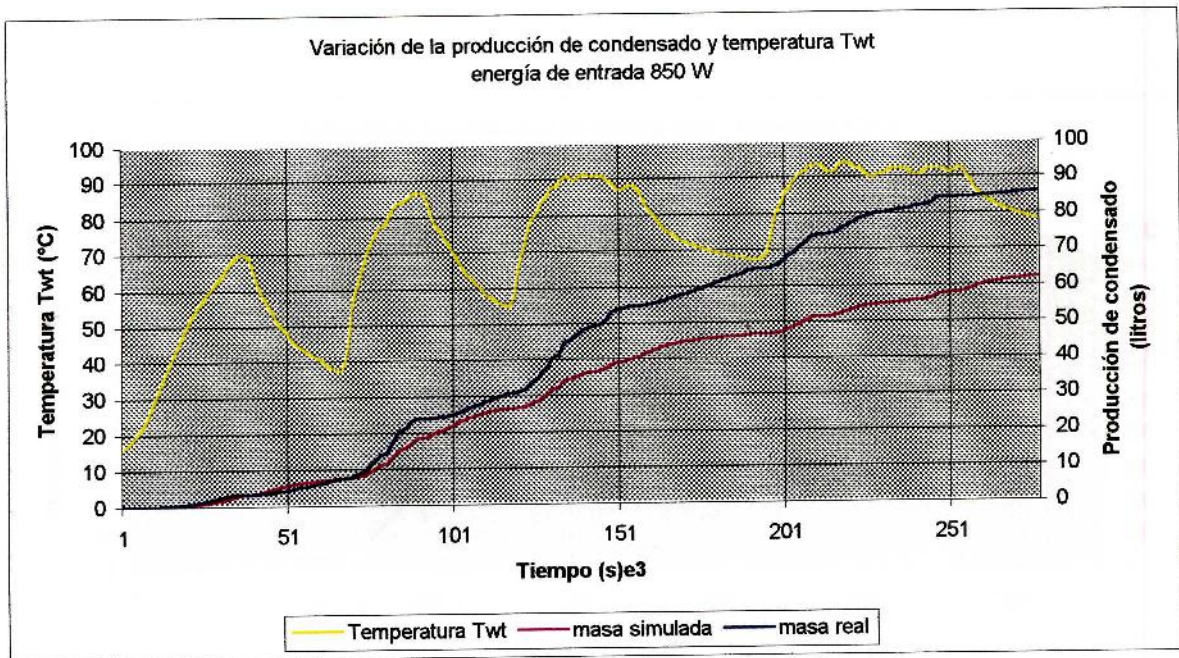
Es importante destacar de la variación de un solo parámetro afecta directamente a otros parámetros, como por ejemplo, si se varía el área de evaporación, debe entenderse que se afecta en forma inmediata las dimensiones de la bandeja, el volumen de agua, el peso de la bandeja y el área de condensación.

Dentro de los parámetros relevantes se pueden mencionar: la energía de entrada y sus efectos sobre la producción de agua y el efecto sobre la temperatura alcanzada por el agua, el área de evaporación, el área de condensación, el volumen de agua en las bandejas, la separación entre bandejas, la diferencia de temperatura entre la superficie del agua y la superficie inferior de la bandeja, los espesores de aislamiento, el peso de las bandejas y el tipo de materiales utilizados.

### **7.2 Energía de entrada y su efecto sobre la producción de condensado y la temperatura del agua**

Para visualizar el efecto de la energía de entrada sobre la producción de condensado y la temperatura del agua, se han realizado variaciones de la energía de entrada y se han graficado los efectos para la bandeja de doble fondo.

La variación de la energía de entrada que ha sido modificada desde 750 W a 1250 W como se muestran en las figuras 7.1 a 7.6, representa la energía de entrada al intercambiador de calor del desalinizador. Si bien ésta ha sido modificada en forma arbitraria, los valores que se han asignado representan las posibles modificaciones para un sistema de energía solar, desde un colector solar plano con agua destilada como fluido térmico hasta un colector con concentradores usando aceite o mezcla de agua destilada – ethilenglicol.

Figura 7.1 Producción de agua  $E_e = 750$  WFigura 7.2 Producción de agua  $E_e = 850$  W

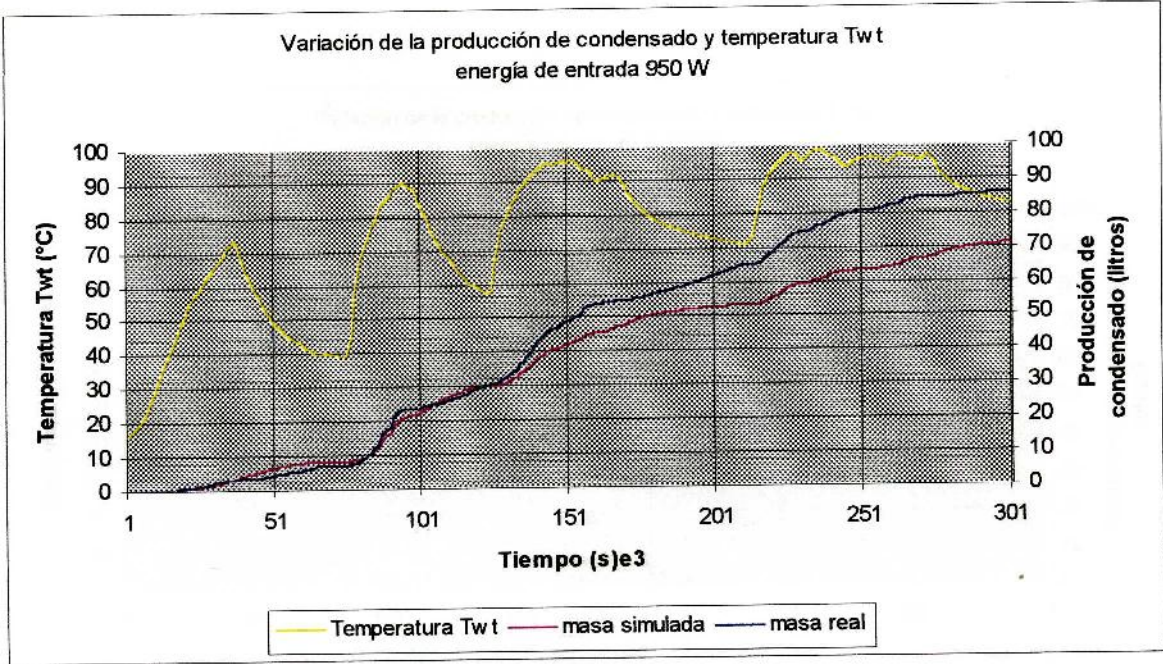


Figura 7.3 Producción de agua  $E_e = 950 \text{ W}$

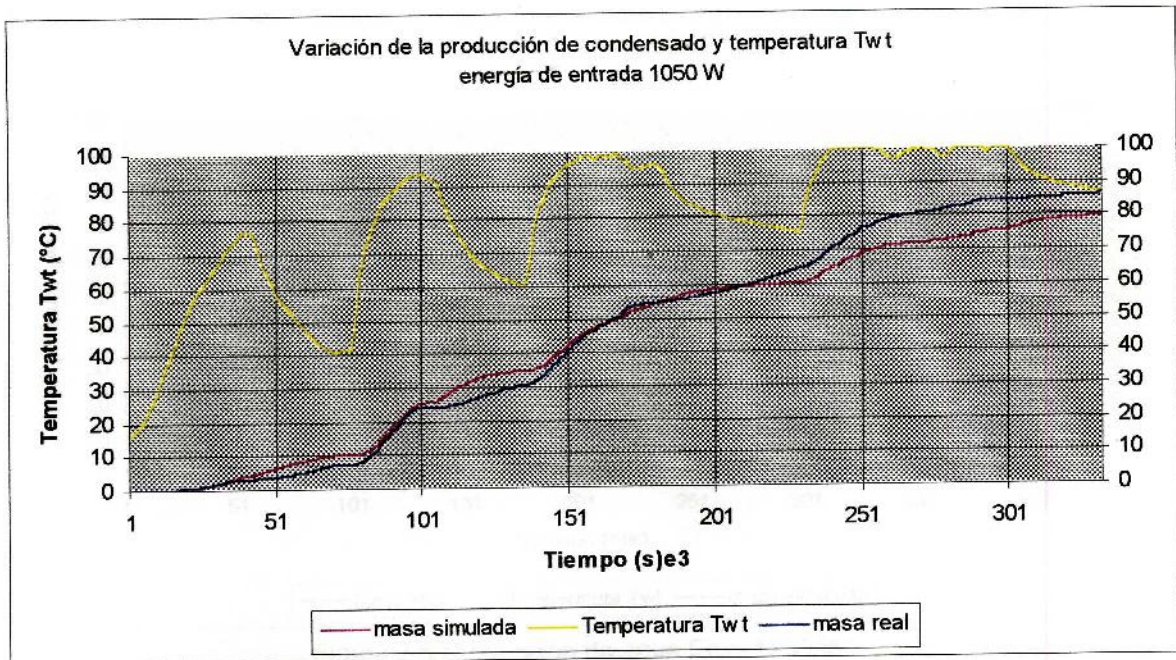
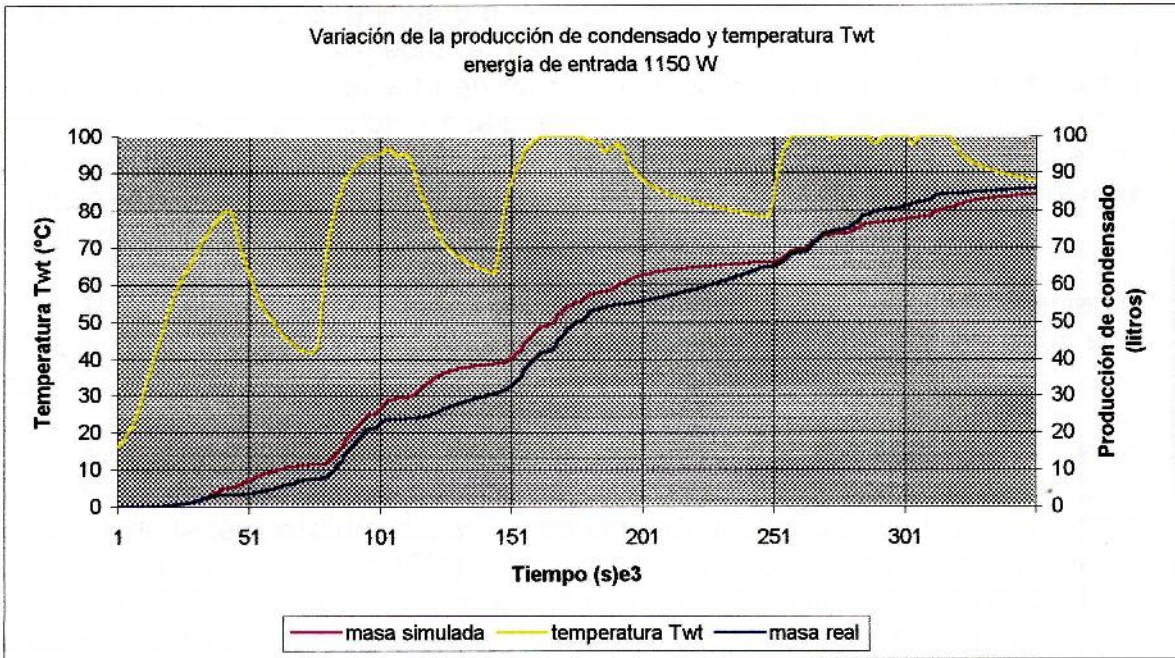
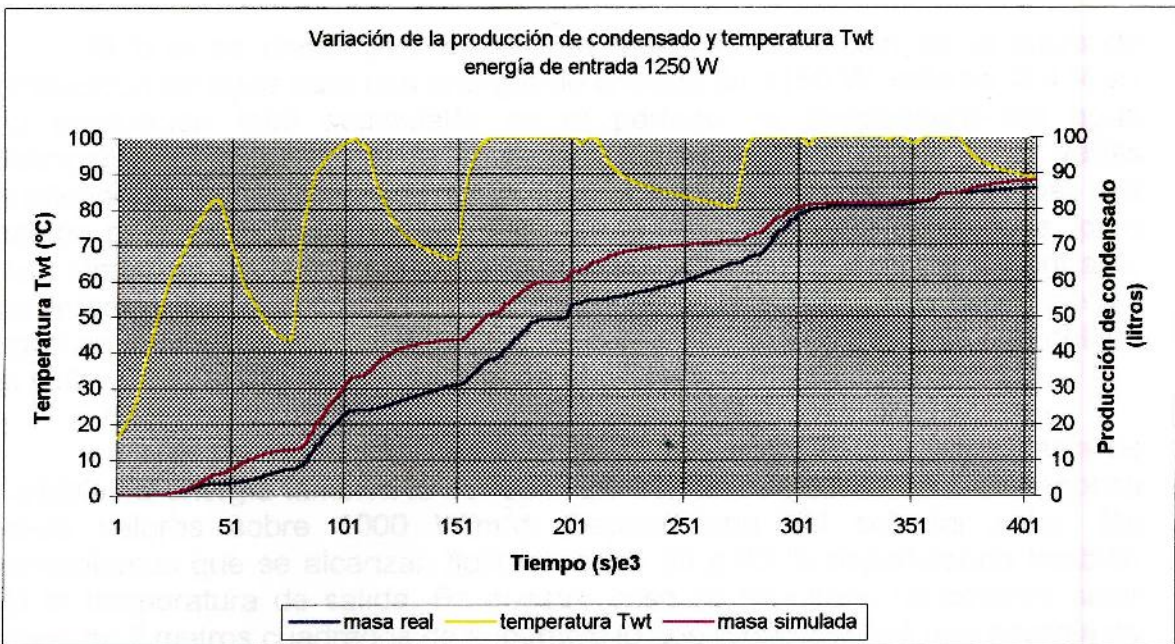


Figura 7.4 Producción de agua  $E_e = 1050 \text{ W}$

Figura 7.5 Producción de agua  $E_e = 1150$  WFigura 7.6 Producción de agua  $E_e = 1250$  W

De las curvas expuestas se puede indicar que a medida que se aumenta la energía suministrada al intercambiador del desalinizador, la producción de condensado aumenta desde 13.75 lt/d hasta 21.2 lt/d. Por tanto existe una relación directa entre el aumento de energía y la producción de agua. Existen además limitaciones respecto a este aumento de la energía ya que la temperatura del agua aumenta en forma significativa lo que hace que el agua entre en la fase de ebullición. En la práctica este fenómeno no es recomendable debido a la contaminación del agua desalinizada por las burbujas que se originan. Además hay que tener presente las limitaciones de entrega de energía por el colector solar.

Para la construcción de las curvas se ha considerado el comportamiento de la bandeja de doble fondo. Aquí es en donde las temperaturas del agua son mayores y cercanas a los 100 °C.

Las diferentes gráficas muestran claramente el aumento global de la producción de agua en un periodo de cuatro días, así como, la variación y aumento de la temperatura del agua, de acuerdo a esto es que si se considera una energía de entrada de 1050 W, el comportamiento del condensado es del orden de 20 lt/d, valor que está bastante cerca del comportamiento real de funcionamiento del desalinizador, esto es, 21.5 lt/d, es decir, un 7 % error.

Con este nivel de energía la temperatura no sobrepasará la temperatura de ebullición del fluido.

Si bien es cierto que, existe una mejor aproximación de la curva de producción de agua para una energía de entrada de 1150 W, esto es, 3.4 % en su producción total acumulada en el periodo, la temperatura del agua sobrepasa la temperatura de ebullición. Esta situación, puede tener varias implicancias, como son: que se puede aumentar el número de etapas del equipo para así aprovechar de mejor forma la energía que se dispone, pero esta razón no es suficiente para seguir aumentando la energía de entrada, recordemos que la salida de condensado está muy próxima a la superficie del agua en la bandeja y su probabilidad de contaminación es bastante alta debido al salto y colapso de las burbujas en la ebullición del fluido en la bandeja.

La energía disponible depende de la radiación solar y, como esta es variable, la energía también lo es. Sus valores fluctúan desde cero en la noche hasta valores sobre 1000 W/m<sup>2</sup>d. Dependiendo del colector solar, los rendimientos que se alcanzan fluctúan entre 30 a 60 % dependiendo también de la temperatura de salida. En nuestro caso se ha usado un colector solar plano de 2 metros cuadrados de superficie lo que proporcionará una energía de 2000 W/d y utilizando una eficiencia de un 52 % se tiene una energía a la entrada de 1050 W.

### 7.3 Área de evaporación

La variación del área de evaporación del equipo necesariamente requerirá de la modificación de las dimensiones de éste. Como por ejemplo, el área de condensación, el volumen de agua y la distancia entre bandejas.

En el siguiente cuadro se entregan algunos valores del efecto de la variación del área de evaporación en el equipo. Todo esto utilizando el programa de simulación propuesto.

Según estos resultados, se puede inferir que al aumentar el área evaporativa del desalinizador se modifican también otros parámetros como lo son las dimensiones lineales de las bandejas y el volumen de agua contenida en proporciones diferentes. Esto significa que cualquier cambio en el equipo no mantiene una proporción lineal en sus dimensiones ni en los niveles energéticos necesarios para su funcionamiento. Por ejemplo, si se aumenta el área de evaporación de  $0.5 \text{ m}^2$  a  $1.0 \text{ m}^2$ , el nivel de energía necesario, para un funcionamiento con un error de  $\pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$  en los niveles de exactitud de las temperaturas alcanzadas, tiene un factor de 2.7. Esto quiere decir que se requieren unos 2900 W para conseguir lo anterior. Esto implica que se necesitarán a lo menos 3 paneles de  $2 \text{ m}^2$  cada uno.

En relación con el nivel de producción de condensado y tomando en cuenta que se dispone ahora de un volumen de agua con factor del orden de 2.7 a 3.4, dependiendo del tipo de bandeja, se puede inferir que se obtendrá una aumento en un factor de 2.8, esto es, un aumento de 180 %.

En términos de la variación de las dimensiones lineales del desalinizador, se puede decir que estas aumentan en un factor de 1.4. Para un área de evaporación de  $0.5 \text{ m}^2$  se tiene una altura de 1.4 m y para un área de  $1 \text{ m}^2$  se tiene una altura de 2 m.

Importante es mencionar que la determinación de estos parámetros se basa en la mejor exactitud lograda en el programa de simulación respecto de la aproximación de las curvas de temperatura con base de datos reales, es decir, a un mínimo error.

Tabla 7.1 Variación de parámetros Equipo Desalinizador

Area evaporativa	Energía de entrada	Error de Temperatura	Producción de condensado	Volumen Bandeja doble fondo	Volumen bandeja principal	Factor dimensional	Factor de Energía	Factor de producción
$0.5 \text{ m}^2$	750 W	$\pm 8 \text{ }^\circ\text{C}$	7 lt/d	25 lt	30 lt	1	0.7	0.7
$0.5 \text{ m}^2$	1050 W	$\pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$	20 lt/d	25 lt	30 lt	1	1	1
$1.0 \text{ m}^2$	2900 W	$\pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$	56 lt/d	71 lt	102 lt	1.4	2.7	2.8
$1.0 \text{ m}^2$	3200 W	$\pm 7 \text{ }^\circ\text{C}$	52 lt/d	71 lt	102 lt	1.4	3	2.6

## 7.4 Separación de Bandejas

La distancia entre superficies se debe establecer de tal manera que pueda permitir la libre circulación del vapor desde la de evaporación hacia la de condensación, permitir el acceso mínimo bajo un aspecto netamente de fabricación, para realizar la mantención y la instalación de sensores.

La intuición hace pensar que a menor distancia de separación, se obtendrá una mayor energía hacia el efecto siguiente y que la temperatura será algo mayor en comparación con una distancia mayor.

En la práctica se han utilizado diversos valores para la separación de entre las superficies. Valores que van desde 12 mm [1] hasta 155 mm [2], la distancia depende de las condiciones de funcionamiento de los equipos.

La distancia entre la superficie de evaporación y la superficie de condensación utilizada en las relaciones de transferencia de calor del modelo matemático es variable debido a la forma de las bandejas desde 0.08 m a 0.25 m. El valor que se ha utilizado es el promedio entre las distancias de las bandejas superior e inferior. Esta distancia ha sido modificada dentro y fuera del rango mencionado.

De acuerdo a esto último se puede inferir que al disminuir la distancia entre superficies desde 0.5 m hasta 0.02 m, la energía por radiación, para el primer efecto, experimenta un aumento de un 25 %. Para una variación desde 0.25 m a 0.15 m se experimenta un aumento de la energía por radiación de un 4.7 %. Los otros mecanismos de transferencia involucrados no experimentan aumentos significativos.

La variación de la distancia, entre el rango de trabajo de 0.25 m a 0.16 m, entre superficies no provoca cambios fundamentales en el nivel energético de los diferentes efectos. El cambio más relevante es el aumento de la temperatura en rangos pequeños del orden de 1.5 °C. Esto hace mejorar la exactitud de las curvas de temperaturas simuladas respecto a las reales.

La distancia óptima para el primer efecto se establece en el límite inferior del rango, esto es, 0.15 m.

De la misma forma, para los efectos siguientes, esto es, entre las bandejas principales, se producen los mismos efectos, destacándose el aumento de la temperatura en 1.2 °C al disminuir la distancia a su rango inferior. Con esto se logra un mejor ajuste de las curvas de temperaturas. La distancia óptima para este caso es de 0.1 m.

## 7.5 Volumen de agua

De acuerdo a las dimensiones establecidas en el diseño del equipo y tomando en cuenta la experiencia desarrollada en el Solar-Institut Julich es que se establecen volúmenes límites. La capacidad de la bandeja de doble fondo es de 35 lt con un volumen máximo de 25 lt y un volumen mínimo de 20 lt.

El agua no debe sobrepasar el nivel máximo debido a que existirá un rebalse por las canaletas principales contaminando el agua condensada. Tampoco se debe bajar del límite mínimo porque la superficie de contacto se reduce debido a la inclinación de la bandeja. El diseño de las bandejas no permite grandes variaciones de la cantidad de agua.

Las bandejas principales poseen una mayor capacidad de almacenamiento de agua y es porque cumplen una función doble, esto es, actúan como evaporador y condensador a la vez, lo que las hace bastante singulares, teniendo ventajas y varias desventajas al momento de la variación o modificaciones de parámetros o diseño.

La inclinación de las bandejas principales tiene  $15^\circ$  por cada lado, permitiendo así hacer fluir el condensado hacia las canaletas principales. Con esta inclinación se aumenta además el área de condensación.

La capacidad de estas bandejas es de 45 lt, con un nivel máximo de 35 lt y un nivel mínimo de 25 lt. El nivel mínimo permite cubrir con agua toda la superficie de condensación logrando mantener una temperatura menor para que condense el vapor que viene de la etapa anterior. El nivel máximo se controla con los tubos de rebalse ubicados en el interior de cada bandeja y el nivel mínimo se controla con los tubos de nivel ubicados en el exterior del equipo.

La bandeja 5 que corresponde al quinto efecto se debe mantener con un volumen mayor cercano al límite máximo. Esto permite mantener la temperatura mas baja respecto al efecto que le antecede.

Manteniendo los niveles de energía y al utilizar los niveles mínimos de agua en cada una de las bandejas, la temperatura del agua aumenta y sobrepasa los  $100^\circ\text{C}$ . Este aumento es entre  $6^\circ\text{C}$  y  $12^\circ\text{C}$  en relación con los datos reales de funcionamiento. Este aumento en la temperatura se ve traducido en un aumento del condensado en un 4 % respecto a un aumento de nivel máximo. Aquí se comprueba nuevamente de que la producción de condensado está relacionada en forma directa con el nivel energético que se le proporciona. Se reducen además las áreas de evaporación.

Al aumentar la cantidad de agua al nivel máximo se experimenta una disminución de la temperatura, respecto a la base de datos, entre  $4^\circ\text{C}$  y  $5^\circ\text{C}$  provocando una disminución del condensado.

## **Análisis General**

Este trabajo de Tesis, como se menciona al principio de este libro, pretende abarcar tres aspectos relevantes como lo son el aspecto científico, tecnológico y el social. Considerando estos aspectos es que se ha desarrollado un trabajo de investigación dinámico en el que se mezclan los diferentes aspectos antes mencionados.

La aplicación del desalinizador solar aquí propuesto está fundamentalmente orientada a comunidades rurales aisladas que no poseen agua potable, que no disponen de energía eléctrica convencional de la red y de una densidad poblacional baja. Es importante ubicarse en este contexto pues no se debe perder la perspectiva de los objetivos de este trabajo.

En razón de lo anterior y fundamentalmente considerando el ámbito social, se han incluido en este trabajo, algunos aspectos sobre costos de los sistemas desalinizadores para dar una noción y perspectiva y ubicarse en el contexto antes señalado. Es así como se incluyen además los problemas de acceso al agua potable como los de calidad de las aguas.

Para conseguir los objetivos de este trabajo, sin olvidar los aspectos sociales que lo inspiran, es necesario desarrollar la tecnología para la construcción de un equipo bajo una perspectiva científica. Es así como se ha desarrollado un modelo matemático que puede modelar el comportamiento y funcionamiento de un equipo de desalinización.

El ámbito científico requiere una dedicación especial para la formulación de un modelo que considere todos los fenómenos que ocurren y pudiesen ocurrir en un equipo desalinizador de múltiples efectos. Del análisis térmico realizado se pudieron determinar expresiones no muy sencillas que requieren de tecnología de punta para encontrar soluciones adecuadas. Es aquí donde el apoyo de investigadores del Solar-Institut Julich se hace fundamental al desarrollar un software biblioteca para la determinación de las diferentes propiedades y parámetros de los fluidos. Este software permite disminuir los tiempos computacionales en la elaboración del programa de simulación que se ha realizado.

La construcción del equipo requiere información y visiones desde el punto de vista social y científico. Esto no es un punto fácil de conseguir pues cada aspecto es independiente y tiene sus propios objetivos. Aquí es en donde no se debe perder la perspectiva del tema. La misión entonces es como poder compatibilizar los tres aspectos para poder conseguir el objetivo.

Los niveles de producción de agua de este tipo de desalinizadores son de baja escala, por esto la incorporación de este equipo no pretende ser comparado con sistemas de alta producción como los de osmosis reversa por

ejemplo, sino que es una alternativa que puede ser implementada hacia las comunidades antes señaladas.

### **De los aspectos constructivos y de diseño**

El diseño del equipo desalinizador propuesto ha presentado una cantidad importante de inconvenientes a la hora de realizar su construcción y montaje. Sin embargo ha cumplido con su objetivo.

Se requiere realizar algunas modificaciones y mejoramientos a algunos sistemas o parte de sistemas que en la práctica no han resultado ser muy eficientes. Como ejemplo:

#### *a) Sistema de control de alimentación de agua*

El sistema de control de alimentación de agua, si bien es cierto ha funcionado, debe ser mejorado. Es importante mencionar que al considerar que el equipo no utilice ningún tipo de energía externa, el sistema mecánico propuesto cumple dicha función, sin embargo el control de la cantidad de agua que debe ingresar al desalinizador es dificultoso y está sujeta a condiciones ambientales locales (vientos) y está expuesta a agentes externos (aves, insectos). Si bien estas dificultades pueden solucionarse fácilmente (cubriéndolo), el problema mayor es la regulación del sistema. Este requiere el ingreso de agua cada vez que la bandeja de doble fondo llegue al nivel mínimo determinado, pero a la vez se debe considerar que las bandejas superiores también requieren alimentación y que existe una inercia de llenado considerable. No se debe ingresar mas agua que la debida pues el sistema se rebalsa y puede colapsar. Los materiales utilizados deben ser capaces de soportar las variaciones climáticas. Si el tensor se dilata o contrae, entonces se requiere regular el sistema nuevamente.

#### *b) Colector Solar*

La ubicación de la tubería de salida del colector solar respecto al nivel de agua mínimo en el intercambiador de calor es un aspecto que adquiere una relevancia importante, pues una buena ubicación aumenta la eficiencia del sistema termosifón que se utiliza. Para una distancia óptima se deben realizar pruebas de funcionamiento y determinar la distancia mínima para la mejor operación. Se realizaron dos pruebas, basados en estudios realizados en el laboratorio de energía solar de la UTFSM. La primera con una distancia de 16 cm y la segunda con 35 cm. La segunda opción resultó ser mas adecuada para el sistema termosifón.

Uno de los elementos de la tubería de salida del colector solar que ha resultados ser fundamental, es el tanque de expansión. El fluido térmico

utilizado ha experimentado dilataciones importantes que ha absorbido en excelente forma este estanque.

El tipo de colector utilizado, si bien ha funcionado muy bien, no ha permitido entregar la energía suficiente para la obtención de los niveles de agua esperado. Por esto se requiere utilizar un colector con concentradores laterales.

### *c) Estructura del equipo desalinizador*

Los materiales utilizados en la construcción de la estructura del equipo han sido básicamente de madera, los cuales han presentado algunas dificultades en cuanto a dilataciones debido a los cambios frecuentes de temperaturas. Esto a traído dificultades en la extracción de la tapa para abrir el equipo. Se propone realizar un cambio del sistema de cierre del equipo para facilitar la extracción de la tapa puerta. Además de usar, por ejemplo una estructura metálica combinada con planchas de madera.

El diseño propuesto ha permitido la construcción de un equipo que ha funcionado en buena forma. La puesta en marcha y las condiciones prácticas permiten visualizar los elementos de cambio necesarios para la optimización del sistema.

## **Programa de simulación computacional**

El programa que se ha desarrollado para simular el comportamiento del desalinizador de múltiples efectos se ha comportado en buena forma. Este es bastante flexible lo que permite modificar sus componentes para adecuarlo a las condiciones de cada equipo en particular. Esto lo demuestra el écho de haber utilizado condiciones de dos equipos con características y condiciones locales diferentes. X

Se requiere tener precaución al utilizar el método de resolución de las ecuaciones diferenciales. Pues un método es más exacto que otro y debido a la sensibilidad que experimenta el programa puede no resultar adecuado un método.

Las salidas básicas del programa son: las temperaturas del agua en cada una de las etapas, la energía aportada por cada etapa a la etapa superior y la producción de condensado. Con estos tres elementos se pueden realizar una serie de salidas, dependiendo de las necesidades y requerimientos del usuario.

Se puede decir entonces que el programa de simulación desarrollado cumple con las expectativas planteadas.

## Aspectos sociales

El desarrollo de este trabajo ha sido pensado en poder entregar a las comunidades pesqueras aisladas una alternativa de suministro de agua, pensando en lo vital de este elemento y en las carencias de dichas personas. Para esto se propone en detalle un proyecto que pueda ser presentado a entidades con fuente de financiamiento como municipalidades o particulares. Se ha desarrollado la tecnología necesaria para la construcción de equipos desalinizadores.

Conjuntamente con la tecnología se ha desarrollado un plan de capacitación orientado a las comunidades pesqueras. De tal manera de complementar la instalación de equipos desalinizadores y potenciar el uso de fuentes renovables de energía.

Si bien este trabajo ha sido pensado para utilizarlo en comunidades pesqueras aisladas, puede usarse en otras aplicaciones en donde se requieran los niveles de producción que el equipo es capaz de proveer. En este sentido existe una empresa que requiere de un equipo de esta naturaleza para instalarlo en el norte de Chile con fines de obtención de agua destilada para uso en laboratorio de análisis de cobre.

El agua condensada del sistema desalinizador es de alta calidad lo que para algunos es de mayor importancia. Para nuestro caso se requiere potabilizar el agua producida y una manera fácil y práctica es agregarle concha de ostiones molida en proporción de 20-30 mg/lit.

## Análisis de Resultados

### a) Simulación

La figura 6.1 muestra el transiente de temperaturas simuladas para cada una de los efectos aquí se puede observar que el equipo, de acuerdo al programa de simulación, requiere de entre 3 a 4 días para llegar a su punto de funcionamiento óptimo. Esto se puede comprobar al observar la gráfica 6.48 "Comportamiento de la Temperatura Twt del fondo del Desalinizador", que muestra el comportamiento experimental de un equipo de desalinización.

Cada día la temperatura aumenta hasta llegar a un máximo y luego descende. El valor mínimo de temperatura en el descenso se incrementa al paso de los días. Con esto se llega a una forma de trabajo que se denomina "a alta temperatura".

Las figuras 6.2 y 6.3 muestran la energía entregada por cada etapa a su etapa superior respectiva. Se puede deducir que de la energía proporcionada por el intercambiador de calor, la bandeja de doble fondo recibe 80 %

aproximadamente la primera bandeja un 63 %, la segunda bandeja un 44 %, la tercera bandeja un 25 %, la cuarta bandeja un 12 % y la última bandeja recibe cerca del 1 %. Esto nos puede llevar a pensar que el quinto efecto es prácticamente innecesario. Esto no significa que se deba prescindir de él y diseñar un equipo con cuatro efectos, pues el último efecto de un posible nuevo equipo tendrá probablemente el mismo comportamiento.

#### a) *Experimental*

La gráfica 6.4 nos muestra el comportamiento de la temperatura al realizar la evaluación del equipo instalado en el Laboratorio de Energía Solar de la UTFSM. Los datos están tomados durante un periodo de 6 días aproximadamente y con el equipo ya en funcionamiento. Estas curvas describen el funcionamiento del equipo en cuestión. Claramente se puede apreciar que los niveles de temperatura no han llegado a su máximo lo que se debe al nivel de energía entregado.

La gráfica 6.6 nos entrega la variación de la temperatura de cada una de las etapas. Aquí se desprende que la variación para la primera etapa es entre 4 a 8 °C, para la segunda entre 3 a 4 °C, para la tercera entre 2 a 6 °C, para la cuarta entre 4 a 8 °C y para la quinta entre 2 a 3 °C. Esto nos indica que una variación aceptable entre etapas es del orden de 4°C. Si se mantiene esta o una mayor variación se consigue un buen funcionamiento del equipo y una cantidad importante de condensado.

La gráfica 6.7 muestra la producción de condensado por etapas y total acumulado en un periodo de 6 días. Cada día el nivel de producción aumenta debido a que el equipo va adquiriendo su punto óptimo de funcionamiento. Esto se puede apreciar también en la gráfica 6.8 en donde el punto mas alto indica el mayor nivel de producción de condensado.

Las gráficas 6.9 y 6.10 muestran la participación de cada efecto en la producción total del condensado. La primera en un día en particular y la segunda como promedio de los 6 días de evaluación. Se puede distinguir que las dos primeras etapas son las que proporcionan la mayor cantidad de condensado y que la última proporciona una cantidad muy baja. Aquí nuevamente se destaca el hecho de que un quinto efecto puede ser innecesario. \*

La gráfica 6.11 nos entrega la participación porcentual de cada efecto en la producción total de condensado extraído. Esta nos indica que el primer efecto aporta aproximadamente un 30 %, el segundo un 28 %, el tercero un 22 %, el cuarto un 19 % y el último alrededor del 1 %.

La gráfica 6.12 es la más relevante gráfica de la etapa de evaluación pues nos entrega la producción de un día del condensado colectado. El nivel de producción real supera los 20 litros/día, lo que hace realmente interesante el nuevo equipo propuesto. La evaluación se realiza en un día con una radiación

solar de  $6.3 \text{ kWh/m}^2\text{día}$  lo que es una radiación bastante buena. El periodo de medición es de las 10:00 hasta las 20:00 horas. Es importante destacar el hecho que el equipo tiene una producción también en periodos de radiación baja o nula, esto es, de noche, y por lo tanto se ha construido una curva que entrega la producción desde las 0:00 hasta las 10:00 horas y desde las 20:00 hasta las 24:00 horas.

Cada producción de condensado en las diferentes etapas es para una superficie de evaporación cercana al medio metro cuadrado. Esto nos permite afirmar que el nivel de producción de condensado extraído supera los 40 litros por metro cuadrado de superficie evaporativa por día.

Cuando se habla de condensado extraído quiere decir que existe una cantidad de condensado que no puede extraerse y por lo tanto el nivel de producción puede llegar a superar la cantidad antes mencionada. También es importante mencionar que no todo el vapor se condensa y si se llegara a condensar, aumentaría aun más la cantidad de condensado.

#### d) Rendimiento

La figura 6.32 muestra un esquema básico de energía del colector y el intercambiador de calor. Aquí se hace notar que la eficiencia del colector solar juega un papel fundamental en el sistema. Los niveles de eficiencia de los colectores en general son bajos, mas aún cuando se trabaja a temperaturas altas. Si se considera que el sistema está compuesto por el colector solar, la instalación y el intercambiador de calor, entonces la eficiencia del sistema será el producto del rendimiento del colector, el rendimiento de la instalación y el rendimiento del intercambiador. Así, si nos aseguramos una buen intercambiador de calor y una buena aislación de la instalación, entonces el colector debe aportar lo más posible a la entrega de energía.

#### e) Condensado

La gráfica 6.46 sobre comparación de producción de condensado, simulada y experimental en el Laboratorio de Energía Solar de la UTFSM, muestra una concordancia sólo hasta los dos primeros días debido a que se disponía solamente datos para esos días. La curva crece a partir de los dos primeros días debido a que conserva el último valor. No se debe pensar que la experimentación logró ese nivel de condensado. Esto se puede ver en mejor forma en la gráfica 6.47 en donde el último valor permanece constante a partir del segundo día.

## Conclusiones Generales

Tomando en cuenta todo el trabajo realizado hasta el momento y al considerar los aspectos científicos, tecnológicos y sociales que lo han inspirado, se puede disponer ahora de un equipo desalinizador de agua de mar de múltiples efectos que proporciona una importante cantidad de agua tratada en comparación con los sistemas convencionales.

Se ha podido desarrollar un programa computacional que simula, el comportamiento de un desalinizador solar de múltiples efectos, de una manera bastante cercana a la realidad, esto es, con una variación promedio máxima de las temperaturas experimental y simuladas de  $2.23\text{ }^{\circ}\text{C}$  con una desviación estándar máxima de  $3.46\text{ }^{\circ}\text{C}$  y con una variación promedio máxima de la producción de condensado de 2.49 litros con una desviación estándar de 4.8 litros.

De acuerdo a este trabajo se ha podido determinar que la participación promedio de las etapas 1, 2, 3, 4, 5, en la producción total de agua es de 30 %, 28 %, 22 %, 19 % y 1 % respectivamente. Esto indica que el quinto efecto es de poca relevancia y es necesario investigar cual es el efecto sobre el equipo, si se disminuye el número de etapas.

El nivel de producción de agua del equipo desalinizador puede superar los 20 lt/d. El COP es de 2.0 considerando la energía incidente y el GOR de 3.96.

La producción de agua está relacionada directamente con el nivel de energía aportado. Se hace necesario el uso de un colector solar con concentradores para aumentar la capacidad energética del sistema y mejorar la producción de agua.

Los resultados en términos de producción y comparativamente con resultados anteriores en un equipo desalinizador de cuatro etapas indican que se ha logrado un aumento de un 163 % al proponer un equipo desalinizador de cinco etapas con similares niveles de energía útil.

Para mejorar la operación del desalinizador es importante modificar el sistema de control de alimentación de agua y mejorar el diseño de su estructura y puerta.

En el transcurso de este trabajo, se ha podido conseguir satisfacer los objetivos planteados como son el proponer un modelo matemático para la desalinización solar de múltiples efectos a alta temperatura, elaborar un programa computacional para la simulación de un desalinizador solar de múltiples efectos a alta temperatura, desarrollar la tecnología que permita la construcción de un nuevo equipo de desalinización solar compacto, modular, de bajo costo, mantención sencilla, vida útil significativa y de alta eficiencia, validar

el programa de simulación con datos de funcionamiento en terreno, construir planos de fabricación del equipo desalinizador y confeccionar programas de mantenimiento y capacitación.

De acuerdo al análisis en relación con la optimización de parámetros del equipo desalinizador se puede establecer que el nivel de energía útil necesario para obtener una producción relevante de agua debe ser superior a 850 W. Sin embargo no debe superar los 1200 W. Esto para un área evaporativa de 0.5 m<sup>2</sup>. El área de 0.5 m<sup>2</sup> es una área adecuada para este nivel energético y que corresponde al uso de un colector solar de 2 m<sup>2</sup>. Las dimensiones del equipo son las óptimas para la producción de agua encontrada y el nivel energético utilizado

#### Propuestas para investigar en el equipo desalinizador

- 1.- Ubicar un mayor número de sensores de temperatura, para monitorear en forma mas completa el equipo en: Superficie inferior de la bandeja, superficie del agua, ambiente entre bandeja, interior del agua, entrada de colector, salida del colector. Todo esto para cada efecto, haciendo un total de 26 sensores.
- 2.- Trabajar en el colector solar con un fluido térmico diferente al utilizado. Se propone trabajar con aceite de pepita de uva.
- 3.- Diseñar un nuevo sistema de alimentación de agua que permita un mejor control de la entrada de agua a las diferentes bandejas.
- 4.- Usar nuevos materiales en la estructura del equipo. Se propone una estructura metálica.
- 5.- Mejorar el sistema de cierre del equipo. Se propone diseñar una puerta de fácil apertura y cierre con bisagras en uno de sus lados.

**Literatura referencial**

- 1.- Dunkle R. V.  
**Solar water destillation: The roof type still and a multiple effect diffusion still**  
Commonwealth scientific and industrial resear organization, C.S.I.R.O., 108, Victoria, Australia, 1961
- 2.- Kumar, Sanjay y Tiwari, G. N  
**Estimation of convective mass transfer in solar distillation systems**  
Solar Energy, 57(6), 459-464, 1996
- 3.- Solar Institut Julich, Fachhochschule Aachen Abt. Julich  
**Untersuchungen Zur Optimierung einer neurtigen Meherstufendestille zur solarthermischen Meer- und Brackwasserentsalzung fur Einsatz in Chile**  
Forschungsantrag im Rahmen des DFG-Programes, 1998
- 4.- Ribeiro Jacqueline  
**Desalination Technology, Survey and Prospects**  
European Commission, Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies, 1996
- 5.- Adhikari, R. S. y Sootha, G. D  
**Simulation studies on a multi-stage stacked try still**  
Solar Energy, 54(5), 317-325, 1995
- 6.- Malik, M. A. S., Tiwari, G. N., Kumar, A., Sodha, M. S.  
**Solar Distillation**  
Pergamon Press, 1982
- 7.- Shawaqfeh, Ahmad Taleb y Farid, Mohammed Mehdi.  
**New development in the theory of heat and mass transfer in solar stills**  
Solar Energy, 55(6), 527-535, 1995
- 8.- Headley Oliver  
**Renewable energy technoogies in the Caribbean**  
Solar Energy, 59(1-3), 1-9, 1997

- 9.- Sartori Ernani  
**Solar still versus solar evaporator: a comparative study between their thermal behaviors**  
Solar Energy, 56(2), 199-206, 1996
- 10.- Mowla D y Karimi G.  
**Mathematical modelling of solar still in Iran**  
Solar Energy, 55(5), 389-393, 1995
- 11.- Bemporad G. A  
**Basic hydrodynamic aspect of solar energy based desalination process**  
Solar Energy, 54(2), 125-134, 1995
- 12.- Duffie, J. A.; Beckmann, W  
**Solar Engineering of Thermal Processes**  
New York, Chichester: John Wiley & Sons, 1980
- 13.- Heitmann, Hans-Günter  
**Saline Water Processing**  
VCH, 1990
- 14.- Mathworks  
**Mathworks Simulink Handbuch**  
Jan. 1997
- 15.- Ajona José I  
**Desalination with thermal solar systems: Technology assessment and perspectives**  
CIEMAT, 1992
- 16.- Wagner, Walter  
**Wärme-übertragung**  
Vogel Fachbuchh, 1993
- 17.- Scholz, Andreas  
**Optimierung einer neuartigen Mehrstufendestille zur rack- und Meerwasserentsalzung**  
Solar-Institut Jülich, 1999
- 18.- VDI-Wärmeatlas  
**Berechnungsblätter für den wärmeübergang**  
1997

### **Direcciones electrónicas**

- 19.- <http://www.bancomundial.org>
- 20.- <http://members.tripod.com/~fotografia/textos/main.htm>
- 21.- <http://www.um.es>
- 22.- <http://www.customw.com/ecoweb>
- 23.- <http://www.rayosol.es>
- 24.- <http://www.caddet.co.uk>
- 25.- <http://www.word-wide-water.com>
- 26.- <http://www.maestro.unep.or.jp>
- 27.- <http://www.tripowersystems.com>
- 28.- <http://www.water-saving.com>
- 29.- <http://www.unesco.or.uy>
- 30.- <http://www.geocities.com>
- 31.- <http://www.asades.org>
- 32.- <http://www.cepal.org>
- 33.- <http://www.cepis.org>

## **A1.- Costo asociado a los sistemas desalinizadores**

### **A1.1 Generalidades**

En las siguientes páginas se presentan solamente antecedentes sobre los costos asociados a sistemas desalinizadores de alta producción bajo una perspectiva general, costos, equipos, nivel de inversiones, sin embargo, se entregan para dar una visión global que sirva para extrapolarlos a los sistemas de baja producción.

La utilización de destiladores solares como una fuente de agua potable, para la industria y agricultura en una pequeña escala estará esencialmente determinada por la viabilidad económica. Un destilador, para ser económicamente justificable debe, dentro de su vida útil, retribuir más que todo el dinero invertido en él y ser preferentemente el menor capital de las alternativas para el suministro de agua fresca en una región dada.

La destilación de agua de mar o de agua salobre para suministro de agua potable es solo para aquellas regiones, obviamente, que no disponen de este recurso. Las principales técnicas para destilación, las cuales son técnicamente viables son: La destilación flash multietapa (MSF), el proceso de compresión de vapor (VC), la electrodiálisis (ED), la osmosis reversa (RO), dentro de esta, la osmosis reversa para agua salobre (BWRO) y la osmosis reversa para agua de mar (SWRO), la destilación solar con los sistemas de múltiples efectos (MED) y algunos sistemas híbridos como por ejemplo MSF/SWRO o MED/SWRO. Dependiendo de las condiciones existentes en una región en particular una de estas puede ser más económica que otra.

En el momento de la decisión pueden ser tomadas en cuenta las siguientes consideraciones:

- 1.- Calidad del agua requerida y uso final
- 2.- Disponibilidad de fuentes de agua, tales como estanque o pozos
- 3.- Proximidad a las fuentes de aguas frescas más cercanas
- 4.- Disponibilidad de energía eléctrica en el sitio en las cercanías
- 5.- Costo de suministro de agua fresca por otros métodos
- 6.- Costo y disponibilidad de mano de obra en la región
- 7.- Mantenimiento y requerimientos operacionales diarios
- 8.- Vida útil del sistema de suministro de agua
- 9.- Valoración económica de la región

## A1.2 Costos

El costo de desalinización está principalmente determinado por el proceso y la fuente de agua cruda, pero es también determinado por los requerimientos de calidad de agua fresca, este escenario condiciona el agua cruda de entrada y los precios de la energía. En la discusión y comparación de costos de desalinización, se debe distinguir claramente, sin embargo, el hecho que sea agua de mar o agua salobre.

Las estimaciones de los costos varían mucho debido a los problemas en el fondo de inversiones, pero también debido a las variables supuestas, como por ejemplo, el precio de la electricidad o la tasa de interés. El precio del agua generalmente no es controlado por el mercado y depende de la política que opera (subsidios o no).

## A1.3 Inversión

Las inversiones típicas incluyen equipos para la entrada de agua cruda, pre-tratamiento del agua, descarga de la salmuera y agua fría, y también puede incluirse post-tratamiento del agua, almacenamiento del agua y otros trabajos de obras civiles. Sin embargo no hay un acuerdo común acerca de qué equipos deben ser incluidos en la inversión de la planta. Por ejemplo, a veces el post-tratamiento del agua y el almacenamiento es considerado una inversión de la comunidad y más allá de la inversión de la planta de proceso. Por ejemplo, también la inversión de la succión de agua cruda es influenciada mucho más por condiciones locales del agua cruda y litoral que por el tipo de proceso y puede distorsionar estimaciones de la inversión para un proceso dado. Con esto se puede inferir que los rangos de inversión son bastante amplios. Además, las inversiones son sensibles a los balances económicos y puede darse que una instalación pequeña sea mas cara.

La tabla A1.1 resume las inversiones totales estimadas de los diferentes procesos de desalinización para agua de mar y de agua salobre.

Tabla A1.1 Rangos de costos de inversión de desalinización de agua de mar y agua salobre

Procesos	Inversión <sup>(1)</sup> US\$/(m <sup>3</sup> /día)
Agua de mar	
MSF	1180 – 2350
MED	1060 – 2115
VC	1060 – 2935
SWRO	950 – 1880 <sup>(2)</sup>
MED/SWRO	1000 – 1300
Agua salobre	
BWRO	235 – 590
ED	315 – 385

(1) Los rangos de capacidad son 10000 - 20000 m<sup>3</sup>/día para todos los procesos, excluyendo VC: 2000 - 4000 m<sup>3</sup>/día.

(2) Para ilustrar el efecto de economía de escala: una planta SWRO de sólo 1500 m<sup>3</sup>/day, por ejemplo costaría 2200 US\$/(m<sup>3</sup>/day).

Para ilustrar la influencia de la capacidad sobre la inversión de una planta, las estimaciones pueden ser hechas usando factores de capacidad; la inversión para una nueva capacidad se calcula de la inversión conocida para una capacidad conocida y usa una ecuación exponencial simple:

$$I_2 = I_1 * \left( \frac{Q_2}{Q_1} \right)^b$$

con

$I_2$ : inversión de nueva capacidad  $Q_2$ , (US\$)

$I_1$ : inversión conocida de capacidad conocida  $Q_1$ , (US\$)

$b$ : factor de capacidad [%]

En plantas de procesos químicos 0.7 se sugiere como un factor de capacidad conveniente para toda la planta. Sin embargo, para los procesos de configuración modular como RO y VC la suposición es que el factor de capacidad puede ser más alto, entre 0.8 y 0.9. La razón es, que después de alcanzar el tamaño máximo de la unidad, se vuelve una instalación "repetida" así que la economía de escala llega a ser ineficaz.

#### A1.4 Amortización

Por definición la amortización depende fuertemente de los supuestos económicos realizados, es decir, el tiempo asumido para los pagos (reembolsos) y la tasa de interés.

Esta influencia se demuestra en la tabla A1.2 para los diferentes procesos de desalinización y basados en los rangos de inversión dados en la tabla A1.1. La amortización específica expresada en US\$/m<sup>3</sup> es la amortización anual dividida por la producción de agua fresca anual asumiendo 347 días de funcionamiento por año, basado en una disponibilidad de la planta de 95%. Se asume un tiempo de amortización de 20 años con una tasa de interés de 5 y 10% respectivamente.

Tabla A1.2 Rangos de amortización estimada para variaciones de la tasa de interés <sup>(1)</sup>

Proceso	Amortización, US\$/m <sup>3</sup>	
	Tasa de Interés	
	5 %	10 %
Agua de mar		
MSF	0.27 – 0.54	0.40 – 0.80
MED	0.25 – 0.49	0.35 – 0.72
VC	0.25 – 0.68	0.35 – 1.00
SWRO	0.21 – 0.37	0.32 – 0.63
MED/SWRO	0.23 – 0.29	0.34 – 0.43
Salobre		
BWRO	0.06 – 0.14	0.08 – 0.20
ED	0.07 – 0.09	0.11 – 0.13

<sup>(1)</sup> los rangos de capacidad son 10000 - 20000 m<sup>3</sup>/día para todos los procesos excluyendo VC: 2000 - 4000 m<sup>3</sup>/día

### A1.5 Costos de operación

Los costos de operación están compuestos de: costos por energía, mano de obra, tratamiento químico del agua (pre-tratamiento para el agua cruda), la limpieza química, reemplazo y lavado de la membrana y mantenimiento.

Los costos de **energía** están menos influenciados por el tamaño de la capacidad de la planta que por el tipo de proceso.

Tabla A1.3 : Estimación de Costos de Energía de Desalinización

Proceso	Costo de energía, US\$/m <sup>3</sup>	
	Precio de la electricidad	
	0.05 US\$/kWh	0.09 US\$/kWh
Agua de mar		
MSF	0.35 – 0.53	0.70 – 1.06
MED	0.22 – 0.33	0.45 – 0.66
VC	0.33 – 0.71	0.66 – 1.40
SWRO	0.19 – 0.36	0.38 – 0.75
MED/SWRO	0.15 – 0.16	0.31 – 0.33
Salobre		
BWRO	0.02 – 0.12	0.05 – 0.23
ED	0.04 – 0.12	0.066 – 0.23

El costo específico de **mano de obra** será ligeramente mas bajo para las plantas más grandes. En plantas pequeñas, los requisitos de mano de obra están ligeramente mas bajo para los procesos de destilación que para la ósmosis inversa, sin embargo, éstos llegan a ser iguales para las plantas más

grandes. La indagación de expertos da una estimación de 0.035 - 0.235 US\$/m<sup>3</sup> para todos los procesos.

El consumo de productos químicos (**consumibles**) estará fuertemente influenciado por los contaminantes mineral y biológicos presentes en el agua cruda. Si es agua de mar abierto, hay un riesgo alto de contaminación biológica. Si el agua se obtiene por medio de un pozo costero, tiene la ventaja que el agua se filtraría naturalmente y ningún tratamiento químico extenso sería necesario. Los procesos de la destilación generalmente requieren menos productos químicos para el pre-tratamiento que la osmosis reversa.

Tabla A1.4 Rango de costos estimados para consumibles del proceso (Químicos, membranas, etc.)

Procesos	Costo específico de consumibles US\$/m <sup>3</sup>
Agua de mar	
MSF	0.04 - 0.11
MED	0.02 - 0.18
VC	0.02 - 0.18
SWRO	0.11 - 0.29
MED/SWRO	0.11 - 0.14
Agua salobre	
BWRO	0.06 - 0.15
ED	0.06 - 0.15

Las necesidades de **mantenimiento** son muy dependientes de la habilidad con que una planta es operada. Aunque en general, se puede considerar que el costo de mantención es del orden del 1% de las inversiones para todos los procesos.

## A1.6 Costos totales

Tabla A1.5 resume los costos de desalinización para los cuatro diferentes procesos para agua de mar y dos procesos de agua salobre. Los rangos muestran los valores más bajos estimados y asumen una tasa de interés de amortización de 5% y el precio de la electricidad de 0.05 US\$/kWh y de acuerdo con los valores más altos basados en 10% y 0.09 US\$/kWh respectivamente. Los costes son para un tamaño de la planta típico entre 10000 - 20000 m<sup>3</sup>/día con la excepción de VC que existe en el rango debajo de 2400 m<sup>3</sup>/día.

Tabla A1.5: Costos totales específicos de desalinización, US\$/m<sup>3</sup>

Procesos	Amortización	Energía	Consumibles	Mano de obra	Mantenimiento	TOTAL
Agua de mar						
MSF	0.27 - 0.80	0.35 - 1.06	0.04 - 0.11	0.04 - 0.23	0.02 - 0.07	0.72 - 2.26
MED	0.25 - 0.72	0.22 - 0.66	0.02 - 0.18	0.04 - 0.23	0.02 - 0.07	0.55 - 1.85
VC	0.25 - 1.00	0.33 - 1.40	0.02 - 0.18	0.04 - 0.23	0.02 - 0.09	0.66 - 2.91
SWRO	0.21 - 0.63	0.19 - 0.75	0.11 - 0.29	0.04 - 0.23	0.02 - 0.06	0.56 - 1.97
MED/RO	0.23 - 0.43	0.15 - 0.33	0.11 - 0.14	0.04 - 0.23	0.02 - 0.05	0.55 - 1.19
Agua salobre						
BWRO	0.06 - 0.20	0.02 - 0.23	0.06 - 0.15	0.04 - 0.23	0.005 - 0.02	0.18 - 0.84
ED	0.07 - 0.13	0.04 - 0.23	0.06 - 0.15	0.04 - 0.23	0.007 - 0.01	0.21 - 0.76

De estos antecedentes se puede inferir lo siguiente:

- Para los procesos de agua de mar y salobres, los costos totales para un tamaño de planta dado son muy comparables si los costos de energía se omiten. Los costes de energía pueden constituir 50% de los costos totales. El mayor potencial de ahorro de costos está por consiguiente en el ahorro y consumo de energía.
- El proceso de MED tiene la ventaja de ser más barato que el proceso de MSF. Para las instalaciones grandes donde la destilación será usada, MED podría ofrecer por consiguiente una ventaja decisiva.
- VC, a pesar de que es caro comparado con SWRO puede ser adecuado para plantas pequeñas y en casos donde la condición de agua cruda no es adecuada para un proceso de membrana.
- Los costos de desalinización de agua salobre, sin embargo, están en el orden de 60 – 70 % mas bajo que la desalinización de agua de mar.

### A1.7 Cálculo del costo del agua para la desalinización solar

Una de las materias más relevantes en el análisis económico de la destilación es el costo del agua fresca disponible en cualquier lugar. Para una unidad de destilación el mayor ítems de costo por año podría ser:

- El costo fijo total como un porcentaje anual del capital invertido
- Costos de suministro de agua salina al destilador, y
- Los gastos de supervisión, operación y mano de obra

La suma de estos gastos dividido por la capacidad anual de agua destilada del destilador más la colección de agua lluvia sería el costo de producción de la planta de la destilación. Si toda la cantidad de agua fresca producida es lucrativamente utilizada, entonces esto podría ser también el costo del agua suministrada; por otra parte las pérdidas debido al derroche también se reflejarían en el costo del agua suministrada. Así, si  $IA$ ,  $MR$  y  $TI$  representan el valor medio de la vida útil estimada de la instalación, el costo del agua fresca estaría dado por:

$$C = \frac{10I * (IA + MR + TI) + 1000 * (O * C + S)}{A * (Yd + Yr)}$$

- $C$ : Costo del agua (US\$/1000galones)  
 $I$ : Inversión total (US\$)  
 $IA$ : Razón anual de intereses y amortización (% porcentaje de la inversión)  
 $MR$ : Mantenimiento anual, reparación y materiales (% porcentaje de la inversión)  
 $TI$ : Impuestos anuales y cargos de seguros (% porcentajes de la inversión)  
 $O$ : Mano de obra anual (horas hombres)  
 $C$ : Salario de mano de obra (US\$/horas hombre)  
 $Yd$ : Producción anual de agua destilada por unidad (galones /m<sup>2</sup>)  
 $Yr$ : Producción anual de agua lluvia colectada (galones /m<sup>2</sup>)  
 $A$ : Area del destilador sobre el cual la producción está basada (m<sup>2</sup>)  
 $S$ : Costo total (fijo y de operación) del suministro del agua salada (US\$)

### **A1.8 Costos para el nuevo equipo desalinizador de múltiples efectos**

Los costos presentados anteriormente muestran una noción bastante clara de los niveles de inversión que requiere cada uno de los procesos de desalinización. Es importante destacar que todos estos procesos son para rangos altos de producción.

En el caso del proyecto de desalinización de múltiples etapas utilizando un equipo nuevo, como el que se desarrolla en este trabajo de Tesis, los niveles de inversión no superan los 3.000 US\$ con una producción estimada de 30 lt/día, recordando que el equipo es un diseño pensado en producciones bajas para pequeñas localidades aisladas.

Como antecedente y para formarse una idea del nivel de inversión solamente para el equipo de osmosis reversa con una producción diaria de 5 m<sup>3</sup>, esta es del orden de los 200.000 US\$. Estos antecedentes muestran de una forma bastante clara que la opción que se plantea de introducir un nuevo equipo desalinizador es bastante acertada cuando se piensa en localidades aisladas de baja densidad poblacional y donde no existe posibilidad de adquisición de equipos de alto costo.

Un análisis económico y un estudio sobre beneficio-costos del nuevo desalinizador propuesto se encuentran en el capítulo 14 aspectos sociales.

## **A2.- Calidad de aguas**

A continuación se entregan algunos antecedentes respecto a la problemática mundial del agua y la influencia, desde una perspectiva más global, que tiene en la realización de este trabajo de Tesis.

### **A2.1 Acceso al agua potable**

El acceso a agua potable se mide por el número de personas que pueden obtener agua potable con razonable facilidad, expresado como porcentaje de la población total. Es un indicador de la salud de la población del país y de la capacidad del país de conseguir agua, purificarla y distribuirla. En las zonas urbanas, el acceso "razonable" significa que existe una fuente pública o un grifo a menos de 200 metros del hogar. En las zonas rurales significa que los integrantes del hogar no tienen que pasar demasiado tiempo todos los días en ir a buscar agua. El agua es potable o no dependiendo de la cantidad de bacterias que contenga. Por lo general, una persona necesita unos 20 litros de agua por día para satisfacer sus necesidades metabólicas, higiénicas y domésticas.

El agua es esencial para la vida. Sin embargo, en 1995, más de 1.000 millones de personas de países de ingreso bajo y mediano y otros 50 millones de personas de países de ingreso alto no tenían acceso a agua potable para beber, para el aseo personal y para uso doméstico.

Sin agua potable, la gente no puede llevar una vida sana y productiva. Por ejemplo, se calcula que cada año 900 millones de personas sufren de enfermedades diarreicas relacionadas con el agua, y mueren por estas causas aproximadamente 2 millones de personas por año. La mayoría de estas personas, pero no todas, viven en países de ingreso bajo y mediano, y los que se encuentran más expuestos a ese riesgo son los niños y los ancianos.

Las mejoras en los servicios de abastecimiento de agua y saneamiento por lo general llevan a mejoras en la salud de la población y en la calidad de vida.

El acceso a agua potable también es crucial para las economías y los ecosistemas, y la escasez de agua potable puede afectar directamente las perspectivas a largo plazo del desarrollo sostenible. Sin un abastecimiento adecuado de agua, las fábricas que dependen de este líquido pueden tener que cerrar temporalmente; puede bajar el rendimiento de los cultivos; los trabajadores enfermos pueden ser improductivos, y pueden destruirse las pesquerías. La destrucción de la vida acuática no sólo afecta la economía sino que también daña el ecosistema. Además, la falta de un sistema fiable de agua corriente puede hacer que la gente cave sus propios pozos y agote las fuentes de agua dulce. La calidad de la atmósfera también puede verse afectada por la escasez de agua potable. Cuando la gente hierva el agua para matar bacterias

peligrosas, el combustible que utiliza puede contaminar el aire. Y cuando utiliza leña o carbón como combustible, pueden destruirse los bosques, lo que ocasiona más problemas ambientales, como la erosión y la pérdida de la capa arable del suelo.

Además de que algunas regiones del mundo son naturalmente áridas, las necesidades cada vez mayores de agua, entre las que a veces hay que elegir cuál satisfacer, están reduciendo el abastecimiento en todo el mundo. Muchos ríos y cuencas hidrográficas están contaminados por productos de desechos industriales, de la agricultura y de origen humano, en tanto que otras se están secando porque la gente está utilizando más agua de la que puede reponer la naturaleza. En zonas de mucha lluvia o con sistemas de riego, las personas pueden desperdiciar el agua porque les parece que es abundante o barata, y no saben cuánto cuesta tratar el agua una vez que es utilizada.

Conseguir agua es más difícil - y a menudo más caro - para las personas más pobres. En las zonas rurales de los países en desarrollo, muchas mujeres y niños pasan horas --en casos extremos, hasta seis u ocho horas-- todos los días acarreado agua de ríos o pozos. En las ciudades, muchas personas pobres no tienen agua corriente en sus casas y deben comprarla u obtenerla de otras fuentes.

Tabla A2.1 Acceso a agua potable en América del sur [19]

			1		2		3		4		5		6		7		8	
			Población total		Crecimiento de la población		PNB per cápita		Acceso a agua potable		Acceso a servicios de saneamiento							
			millones		tasa media de crecimiento anual (%)		US\$		PPA*		% de la población		% de la población					
			1995	2010	1980-95	1995-2010	1995	1995	1989-95	1989-95								
M	101	Argentina	35	40	1,4	1,0	8.030	8.310	64	89								
M	102	Bolivia	7	10	2,2	2,1	800	2.540	60	44								
M	103	Brasil	159	190	1,8	1,2	3.640	5.400	92	73								
M	104	Chile	14	17	1,6	1,1	4.160	9.520	96	71								
M	105	Colombia	37	45	1,8	1,3	1.910	6.130	96	70								
M	106	Ecuador	11	15	2,4	1,7	1.390	4.220	70	64								
M	107	Paraguay	5	7	2,9	2,1	1.690	3.650	8	30								
M	108	Perú	24	30	2,1	1,6	2.310	3.770	60	47								
M	109	Uruguay	3	3	0,6	0,6	5.170	6.630	83	82								
M	110	Venezuela	22	28	2,5	1,7	3.020	7.900	88	55								

\* PPA es la paridad del poder adquisitivo.

M. País de ingreso mediano.

**País de ingreso mediano**

Es un país con un producto nacional bruto (PNB) per cápita anual equivalente a más de US\$765 pero menos de US\$9.386 en 1995. El nivel de vida es más alto que en los países de ingreso bajo y la población tiene acceso a más bienes y servicios, pero aun así muchas personas todavía no pueden satisfacer sus necesidades básicas. Actualmente existen alrededor de 67 países de ingreso mediano con poblaciones de 1 millón o más. La población del conjunto de estos países es de más de 1.500 millones.

**Paridad del poder adquisitivo (PPA)**

Es un método para medir el poder adquisitivo relativo de las monedas de diferentes países respecto de los mismos tipos de bienes y servicios. Como los bienes y servicios pueden costar más en un país que en otro, la PPA nos permite efectuar comparaciones más exactas de los niveles de vida en los distintos países. En los cálculos de la PPA se utilizan comparaciones de precios de productos similares pero como no existe un producto exactamente equivalente en todos los países y en todo momento, los cálculos no siempre son significativos.

**A2.2 Consumo de agua**

El hombre utiliza el agua para diversas actividades: obtención de agua potable, procesos industriales, generación de energía eléctrica, actividad minera, agricultura y ganadería.

En Chile, el mayor consumo de agua corresponde a las actividades agrícolas (riego), con un 89,2 por ciento del total. Para obtener sólo una tonelada de trigo, se requieren un millón y medio de litros de agua. En otras palabras, cada vez que comemos un kilo de pan hemos utilizado en forma indirecta alrededor de 1.500 litros de agua.

Tabla A2.2 Consumo estimado del agua en Chile

Consumo	Demanda (m <sup>3</sup> /seg)	Porcentaje del total
Agrícola	620	89,2
Doméstico	38	5,5
Minero-industrial	37	5,3
TOTAL	695	100

Una persona que vive en una ciudad utiliza, en promedio, 250 litros de agua al día:	
En la ducha (cinco minutos)	100 litros
En la descarga del baño	50 litros
En lavado de ropa	30 litros
En lavado de loza	27 litros
En el jardín	18 litros
En lavar y cocinar alimentos	15 litros

### A2.3 Escasez de agua

En el siglo XX han desaparecido más de la mitad de las zonas que regulan el agua dulce del planeta. El Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF, en sus siglas en inglés) ha alertado de que, en los próximos 25 años, habrá serios problemas de abastecimiento en 60 países. Un informe de esta entidad indica que 2.000 millones de personas sufren ya la falta de agua y prevé que dos tercios de la población podrían verse afectados en el próximo cuarto de siglo. "Hay que tomar medidas para evitar una nueva catástrofe".

Las razones del fenómeno son diversas. Zonas pantanosas, ríos y lagos han sido aprovechados con más intensidad para la agricultura, la urbanización y la industria. El volumen de agua para el riego en las zonas rurales, por ejemplo, se ha multiplicado por 10 en los últimos 100 años.

"El agua no es un recurso inagotable. Es indispensable preservar su ciclo natural, y ello exige la conservación de los humedales. Los humedales cubren un 6% de la superficie terrestre y albergan innumerables especies animales y vegetales. "Las zonas preservadas cubren sólo una superficie ligeramente inferior al territorio de Francia.

Los problemas a escala mundial son enormes. Por ejemplo, Estados Unidos ha perdido unos 87 millones de hectáreas, es decir, el 54% de sus zonas húmedas originales, principalmente en beneficio de la agricultura. En Europa, los países más castigados son Italia e Irlanda, con más de un 90% de pérdidas de sus zonas húmedas. El humedal europeo más emblemático es el coto de Doñana

## A2.4 Calidad del agua destilada y de mar

El agua obtenida por destilación solar, carece de sales, y se sugiere la reposición de esas sales hasta alcanzar el límite mínimo aceptable a las condiciones fisiológicas del hombre. Este tema resulta sumamente importante si se considera la escasez de agua potable en las regiones áridas y semiáridas del mundo.

La conversión del agua salobre en agua potable se obtiene a través de dos procesos básicos: separación de una parte del agua, de las sales disueltas; y remoción de las sales disueltas, del agua salina. El proceso más recomendado para el agua de mar, es el de separación de una parte del agua, de las sales disueltas. El consumo de energía se estima de 2.8 KWh para producir 3.8 litros de agua destilada.

El agua de mar está sujeta a su no-aceptación en los sistemas de abastecimiento de agua debido tanto a su sabor como a sus efectos fisiológicos. El "U.S. Public Health Service Drinking Water Standards, 1946" especifica que los sólidos totales generalmente no pueden exceder los 500 mg/l, pero admite hasta 1,000 mg/l. En las regiones áridas, algunas veces se considera satisfactorio 2,500 mg/l; y en algunas aguas potables del suroeste de los Estados Unidos se ha encontrado 4,000 mg/l. El agua de mar tratada, con concentraciones de 500 mg/l, es relativamente tóxica, y su uso continuo es perjudicial para la salud humana. Personas ya acostumbradas pueden consumir de 2,500 a 3,000 mg/l, siempre y cuando tomen las precauciones del caso para la eliminación de ciertos componentes tóxicos como el bario y el boro.

Uno de los métodos que ha sido utilizado con bastante éxito en la corrección del contenido de sales del agua de mar tratada, es la incorporación de conchas de ostras calcinadas y molidas.

Tabla A2.3 Concentraciones promedio de los elementos contenidos en el agua de mar, destilada, y de lluvia

ELEMENTO		UNIDADES	AGUA DE MAR	AGUA DESTILADA	AGUA DE LLUVIA
1. Calcio	Ca	mg/l	272.23	1.43	2.21
2. Magnesio	Mg	mg/l	1,044.86	0.54	0.83
3. Potasio	K	mg/l	352.97	0.39	0.36
4. Sodio	Na	mg/l	8,347.31	2.17	2.46
5. Cloruro	Cl	mg/l	11,712.13	0.93	4.40
6. Bromuro	Br	mg/l	26.73	0.00	2.70
7. Fluoruro	F	mg/l	0.85	0.00	0.00
8. Dureza	mg/l/	CaCO <sub>3</sub>	4,982.53	4.50	8.36
9. Alcalinidad	mg/l/	CaCO <sub>3</sub>	65.33	5.33	5.00
10. Salinidad		mg/l	25,150.67	35.48	40.93
11. Oxígeno Disuelto		mg/l	5.53	5.86	8.47
12. pH		-	6.60	5.33	5.00
13. Temperatura		°C	24.43	33.67	19.85

## A3 Colector solar

### A3.1 Generalidades

Un colector solar es una especie de intercambiador de calor que transforma la energía radiante en calor. La transferencia de energía se hace desde una fuente radiante (sol), hacia un fluido (agua o aire generalmente) que circula por los tubos o ductos del colector. El flujo de energía radiante que finalmente intercepta el colector, proviene básicamente del rango visible del espectro solar (longitudes de onda entre 0.29 y 2.5  $\mu\text{m}$ ) y es por naturaleza variable con el tiempo. En condiciones óptimas podemos esperar como máximo, flujos de 1100  $\text{W}/\text{m}^2$ . De esta forma, un análisis de colectores solares presenta problemas relacionados con radiación y flujos de energía pequeños y variables.

Dentro de los diversos tipos de colectores solares, los colectores solares planos son los más comunes. Estos pueden ser diseñados y utilizados en aplicaciones donde se requiere que la energía sea liberada a bajas temperaturas, debido a que la temperatura de operación de este tipo de colectores, difícilmente pasa los 100 °C.

Las ventajas que podemos obtener de este tipo de colectores con respecto a los colectores de enfoque, que concentran la radiación solar; es que éstos utilizan la energía solar directa y difusa, no requieren movimiento continuo para dar seguimiento al sol, prácticamente no necesitan mantenimiento y son mecánicamente de construcción más simple que los colectores concentradores. Las principales aplicaciones de estos dispositivos son en el campo del calentamiento de agua a nivel doméstico e industrial, acondicionamiento calorífico de edificios y secado de fruta y granos.

### A3.2 Conversión térmica de baja temperatura

El colector solar tiene como misión captar y transferir el calor y está compuesto generalmente por los siguientes elementos:

- Superficie captadora de la radiación solar
- Circuito por donde circula el fluido que transfiere el calor captado
- Cubierta transparente
- Aislamiento térmico
- Caja protectora que acopla el conjunto al resto de la instalación

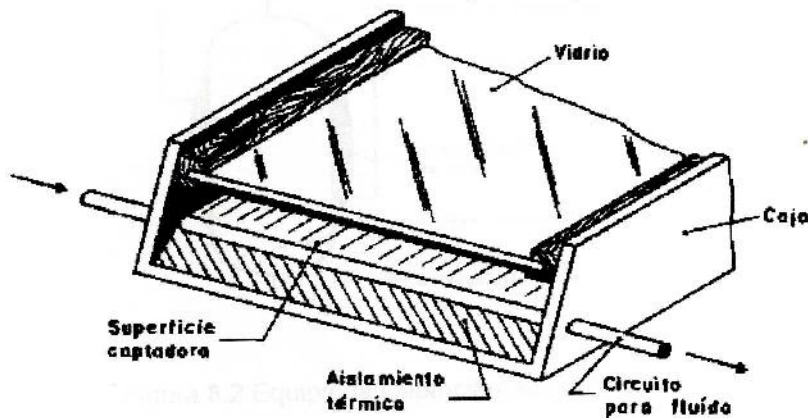


Figura 8.1 Componentes de un colector

#### ¡Error! Marcador no definido.

La placa captadora es el elemento principal que recoge la radiación solar y transmite el calor que ésta transporta. Está construida de material metálico negro, o plástico cuando la temperatura es inferior a 50 °C. Se orienta hacia el Norte con una inclinación igual a la latitud geográfica del lugar.

Esta placa debe absorber la máxima radiación posible para convertirla en energía térmica con el mayor rendimiento y transferir la mayor cantidad posible de calor al fluido portador. Para mejorar estas placas se emplean los llamados "recubrimientos selectivos", productos de máxima absorción de radiación y mínima emisión.

El circuito por donde circula el fluido que transporta el calor puede ser:

- Pasivo o por circulación natural (termosifón)
- Activo o por circulación forzada (bombeo)

A su vez, el circuito puede ser también:

- Abierto: utiliza agua de la red general, que se hace pasar por el colector; este sistema presenta problemas de corrosión e incrustaciones

- Cerrado: emplea agua tratada en un circuito que cede el calor al agua de consumo en un intercambiador de calor

La Figura 8.2 muestra como ejemplo un equipo de captación-acumulación de energía solar en circuito cerrado con bombeo, uno de los sistemas más usados en la actualidad.

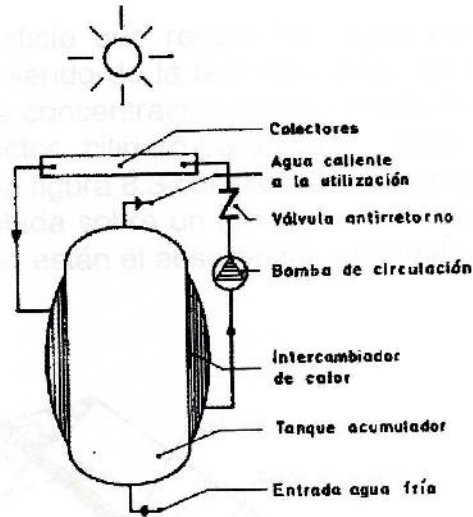


Figura 8.2 Equipo de Captación-acumulación

El rendimiento del colector aumenta utilizando una cubierta transparente que protege la placa colectora y produce un efecto invernadero al atrapar el calor incidente. Estas cubiertas son de vidrio, plásticos o combinaciones de estos materiales; la elección del material y del número de cubiertas suele depender del coste y del aumento del rendimiento obtenido.

El aislamiento térmico reduce las pérdidas de calor, utilizándose como tal lana de vidrio o corcho sintético.

La caja protege todos los elementos del colector y permite ensamblar sus diferentes componentes, solándose presentar en variados aspectos y materiales. Sus superficies se suelen tratar con pinturas resistentes al ambiente en que va a ser instalada.

Finalmente, para mejorar el rendimiento de los colectores de placa plana se puede eliminar el aire del espacio situado entre la superficie absorbente y la cubierta transparente. A este tipo de colector se le conoce con el nombre de "colector de vacío", cuyo coste es más del doble del de los convencionales, pero que permite obtener temperaturas muy próximas a los 100 °C.

### A3.3 Conversión térmica a temperaturas medias

Para obtener temperaturas superiores a los 100 °C se debe concentrar la radiación solar, para lo que se pueden utilizar lentes o espejos. Canalizando la radiación hacia un punto o una superficie llamado "foco", éste eleva su temperatura muy por encima de la alcanzada en los colectores planos.

Aunque la superficie que recibe los rayos concentrados puede tener cualquier forma dependiendo de la técnica usada, en la actualidad la solución más favorable para una concentración de tipo medio (temperaturas menores de 300 °C) es el "colector cilindro-parabólico". Este colector, representado esquemáticamente en la figura 8.3 consiste en un espejo cilindro-parabólico que refleja la radiación recibida sobre un tubo de vidrio dispuesto en la línea focal. Dentro del tubo de vidrio están el absorbedor y el fluido portador del calor. Dentro del tubo de vidrio están el absorbedor y el fluido portador del calor.

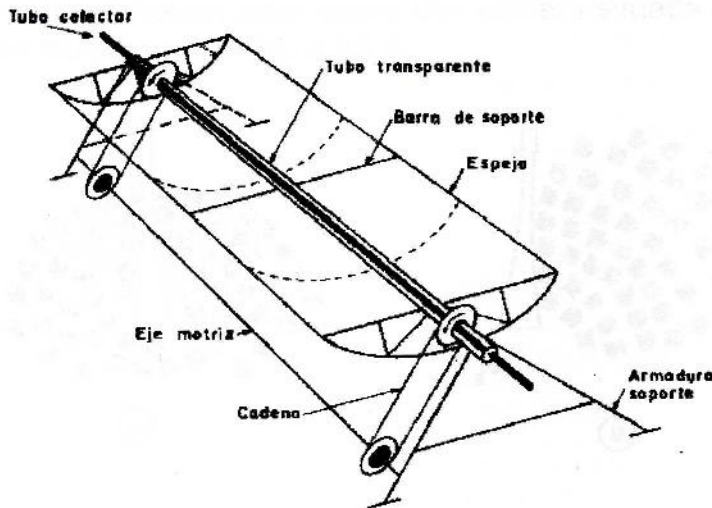


Figura A3.3 Colector cilindro parabólico

Para que se puedan concentrar los rayos solares, estos colectores se montan igual que los planos, es decir, mirando al Norte y con una inclinación igual a la latitud del lugar. Además necesitan un dispositivo que vaya haciendo girar los espejos a lo largo del día, sincronizado con el movimiento aparente del Sol.

Los colectores cilindro-parabólicos, aparte de poder operar a temperaturas superiores a las de los planos, tienen la ventaja de requerir depósitos de acumulación más pequeños y de tener menores superficies de absorción y menores pérdidas de calor. No obstante, son más caros.

Aunque los colectores cilindro-parabólicos son aplicables en la misma gama de necesidades que los paneles planos, al poder desarrollar temperaturas considerablemente superiores tienen interesantes posibilidades de utilización industrial. Así, se están usando asociaciones de un cierto número de estos colectores en las llamadas "granjas solares", pudiendo ser utilizados para la producción de calor o electricidad. La energía así obtenida se aplica a procesos térmicos industriales, desalinización de agua de mar, refrigeración y climatización.

### A3.4 Conversión térmica a altas temperaturas

Para conversiones térmicas superiores a los 300 °C, encaminadas a la producción de energía eléctrica a gran escala, es necesario concentrar la radiación solar mediante grandes paraboloides o un gran número de espejos enfocados hacia un mismo punto. El sistema más extendido es el de receptor central, formado por un campo de espejos orientables, llamados "heliostatos", que concentran la radiación solar sobre una caldera situada en lo alto de una torre, según se muestra en la figura A3.4.

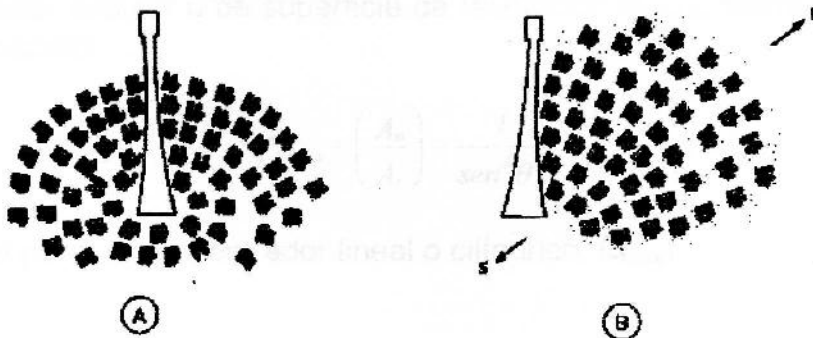


Figura A3.4 Sistema Heliostato

El calor captado en el absorbedor es cedido a un fluido portador circulando en circuito cerrado y que, debido a las altas temperaturas que ha de soportar (superiores a 500 °C) suele ser sodio fundido o vapor de agua a presión. Este fluido primario caliente se hace pasar a un sistema de almacenamiento, para luego ser utilizado en un sistema de generación de vapor, que se alimenta a una turbina. Esta actúa sobre un alternador, que permite obtener energía eléctrica.

La tecnología de las centrales solares se encuentra actualmente en fase de pleno desarrollo. Las instalaciones existentes se pueden considerar sólo como plantas de experimentación que permiten obtener, de momento, una rentabilidad en forma de innovación tecnológica. Por lo tanto, estas centrales están aún muy lejos de resolver el problema energético, aunque se pueden

considerar válidas como un modesto complemento de las centrales térmicas convencionales.

### A3.4.1 Razón de Concentración

Una manera de saber que temperaturas se pueden obtener en este tipo de colectores concentradores, es a través de la razón de concentración,  $C$ . Esta se define como la relación entre el área efectiva de apertura  $A_a$ , y el área del receptor  $A_r$ . El área efectiva de apertura se refiere al área proyectada no sombreada del sistema óptico. Así,

$$C = \frac{A_a}{A_r}$$

Esta razón de concentración tiene un límite máximo que depende de si la concentración se hace en un concentrador circular como un paraboloide o en uno lineal como un concentrador cilíndrico parabólico. Así, mediante un análisis basado en la segunda ley de la termodinámica aplicada al intercambio radioactivo entre el sol y el receptor, obtenemos que la razón de concentración máxima para un concentrador circular o de superficie de revolución  $C_{\max,c}$ , viene dada por la siguiente ecuación:

$$C_{\max,c} = \left( \frac{A_a}{A_r} \right) = \frac{1}{\text{sen}^2 \theta_s}$$

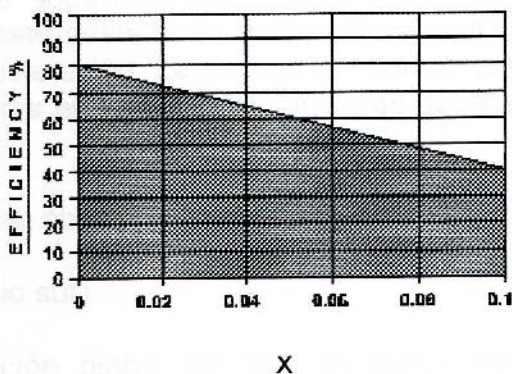
mientras que para un concentrador lineal o cilíndrico,  $C_{\max,l}$  es igual a:

$$C_{\max,l} = \left( \frac{A_a}{A_r} \right) = \frac{1}{\text{sen} \theta_s}$$

donde  $\theta_s$  es la mitad del ángulo subtendido por el sol y es igual a  $0.27^\circ$ . Así, para un concentrador circular, la razón máxima de concentración posible es de 45,000; mientras que para un concentrador lineal el máximo es sólo de 212.

Entre más alta es la temperatura a la cuál la energía necesita ser liberada, más alta debe ser la razón de concentración y también más precisos deben ser los componentes ópticos del concentrador y receptor y del mecanismo de seguimiento del sol.

A continuación se presentan ejemplos de curvas de eficiencia para la selección de colectores solares.



$T_m$  = Temperatura media,  $(T_{salida} + T_{entrada}) / 2$ .

$T_a$  = Temperatura ambiente.

$I$  = Radiación solar,  $W/m^2$

$X = \frac{T_m - T_a}{I}$ ,  $(m^2 \cdot ^\circ K/W)$

Figura A3.5 Curva de eficiencia para un colector Solar Chromagen CR-100

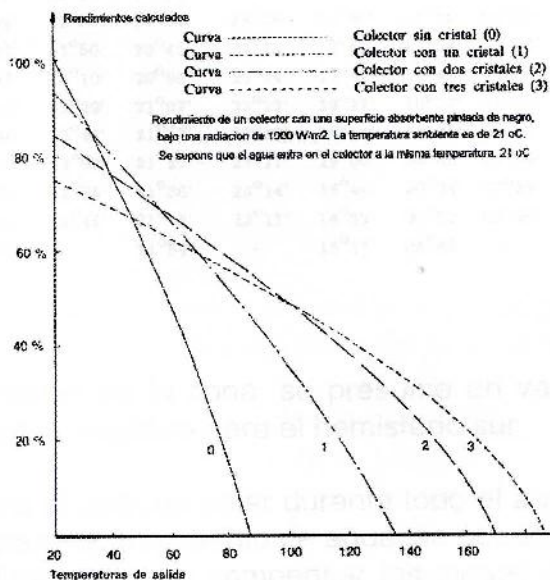


Figura A3.6 Curva de Eficiencia para un colector solar con diferentes cantidades de cristales

### A3.5 Orientación y ángulo de inclinación de los colectores solares planos

El colector solar de superficie plana debe estar orientado con su eje longitudinal en dirección este-oeste, y su inclinación depende de la época del año y de la latitud de la instalación. La inclinación óptima diaria de un colector solar ( $\alpha$ ) se puede determinar en función del ángulo de declinación diaria del sol ( $\delta$ ) y de la latitud ( $\Phi$ )

$$\alpha = \Phi - \delta \quad (\text{en el hemisferio norte})$$

$$\alpha = \delta - \Phi \quad (\text{en el hemisferio sur})$$

Los ángulos de declinación diaria del sol, en todos los meses del año, aparecen en el Cuadro 8.1.

Cuadro 8.1 Angulos de declinación diaria del sol

Dia	M E S											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Octub.	Nov.	Dic.
15	-21°19'	-13°03'	-02°10'	09°44'	18°51'	23°18'	21°32'	14°05'	03°04'	-08°29'	-18°28'	-23°16'
16	-21°08'	-12°42'	-01°47'	10°05'	19°05'	23°21'	21°23'	13°46'	02°41'	-08°51'	-18°43'	-23°19'
17	-20°57'	-12°22'	-01°23'	10°27'	19°18'	23°23'	21°15'	13°27'	02°18'	-09°13'	-18°58'	-23°21'
18	-20°45'	-12°01'	-00°59'	10°48'	19°32'	23°24'	21°03'	13°08'	01°54'	-09°35'	-19°12'	-23°23'
19	-20°33'	-11°40'	-00°35'	11°08'	19°45'	23°25'	20°52'	12°48'	01°31'	-09°57'	-19°26'	-23°25'
20	-20°21'	-11°18'	-00°12'	11°29'	19°58'	23°26'	20°41'	12°29'	01°08'	-10°18'	-19°40'	-23°26'
21	-20°08'	-10°57'	-00°12'	11°50'	20°10'	23°26'	20°29'	12°09'	00°45'	-10°40'	-19°54'	-23°26'
22	-19°55'	-10°35'	00°36'	12°10'	20°22'	23°26'	20°18'	11°49'	00°21'	-11°01'	-20°07'	-23°26'
23	-19°42'	-10°13'	00°59'	12°30'	20°34'	23°26'	20°06'	11°29'	-00°02'	-11°22'	-20°19'	-23°26'
24	-19°28'	-09°52'	01°23'	12°50'	20°45'	23°25'	19°53'	11°08'	-00°26'	-11°43'	-20°32'	-23°25'
25	-19°15'	-09°29'	01°47'	13°10'	20°56'	23°24'	19°41'	10°48'	-00°49'	-12°04'	-20°04'	-23°24'
26	-18°59'	-09°07'	02°10'	13°29'	21°07'	23°22'	19°27'	10°27'	-01°12'	-12°25'	-20°55'	-23°22'
27	-18°44'	-08°45'	02°34'	13°48'	21°17'	23°20'	19°14'	10°06'	-01°36'	-12°45'	-21°07'	-23°20'
28	-18°29'	-08°22'	02°57'	14°07'	21°27'	23°17'	19°00'	09°45'	-01°59'	-13°05'	-21°17'	-23°17'
29	-18°13'	-08°00'	03°21'	14°26'	21°36'	23°14'	18°46'	09°24'	-02°22'	-13°26'	-22°28'	-23°14'
30	-17°57'	-	03°44'	14°45'	21°45'	23°11'	18°32'	09°02'	-02°46'	-13°45'	-21°38'	-23°10'
31	-17°41'	-	04°07'	-	21°54'	-	18°17'	08°41'	-	-14°05'	-	-23°06'

Respecto a la latitud de la zona, se presume un valor positivo para el hemisferio norte y un valor negativo para el hemisferio sur.

Cuando se utiliza el colector solar durante todo el año, como ocurre con los colectores planos para calentamiento de agua, se puede aumentar en 10° el ángulo óptimo de inclinación, para compensar los meses de menor radiación solar incipiente.

La cara inclinada del colector, de acuerdo con la convención adoptada para esa latitud, deberá estar vuelta al norte, si el colector está en el hemisferio sur, o al sur, si está en el hemisferio norte.

### A3.6 Balance de energía en un colector solar plano.

En estado estable, el funcionamiento de un colector solar plano se puede describir mediante un balance de energía. Este se puede representar de manera sencilla mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{abs} = Q_u + Q_L + du/dt$$

donde  $Q_{abs}$  es el calor total incidente absorbido por unidad de tiempo en el colector (W),  $Q_u$  el calor útil que finalmente se transfiere al fluido de trabajo (W),  $Q_L$  las pérdidas de calor hacia los alrededores por radiación, convección y conducción (W) y  $du/dt$  la rapidez de el cambio de energía interna almacenada en el colector (W). El valor del último término es muy pequeño y generalmente se desprecia.

Haciendo un desglose más detallado de los términos de la ecuación anterior, encontramos que cada uno de ellos puede ser representado por otra ecuación. Así,

$$Q_{abs} = H_T A_c (\tau \alpha)$$

$$Q_u = m C_p dT/dt$$

$$Q_L = U_L A_c (T_{p,m} - T_a)$$

donde

$$(\tau \alpha) = \frac{\tau \alpha}{1 - (1 - \alpha) \rho_d}$$

$H_T$  : es la energía solar incidente ( $W/m^2$ ),

$A_c$  : el área efectiva del colector ( $m^2$ ),

$(\tau \alpha)$  : el producto de la transmitancia del vidrio y la absorptancia de la placa colectora que representa la fracción de la radiación solar que es absorbida por el colector

$m C_p$  : la capacidad calorífica del fluido de trabajo ( $J/^\circ C$ )

$dT/dt$  : la rapidez de cambio de temperatura con respecto al tiempo ( $^\circ C/s$ )

$U_L$  : el coeficiente global de pérdidas de calor por radiación, convección y conducción ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ),

$T_{p,m}$  : la temperatura media de la placa de absorción ( $^\circ C$ )

$T_a$  : la temperatura del aire ambiente ( $^\circ C$ )

$\rho_d$  : la reflectancia difusa.

El valor de  $\rho_d$  toma diferentes valores según el número de cubiertas que se utilicen. Así, para 1, 2, 3 y 4 cubiertas, los valores de  $\rho_d$  son aproximadamente 0.16, 0.24, 0.29 y 0.32, respectivamente.

Sustituyendo algunas ecuaciones y reordenando, tenemos que:

$$Q_u = A_c [ S - U_L (T_{p,m} - T_a) ]$$

donde  $S = H_T(\tau\alpha)$ , o sea la energía absorbida en el colector por unidad de área.

Esta ecuación es fundamental en el análisis del funcionamiento de un colector solar. El único problema es que el calor útil queda como función de la  $T_{p,m}$  que es difícil de calcular o medir, debido a que ésta es función del diseño del colector y de variables que cambian continuamente con el tiempo como la radiación solar incidente y la temperatura del fluido de trabajo al entrar al colector.

Por otro lado, tenemos que la forma de medir el funcionamiento del colector es mediante la eficiencia de colección ( $\eta_c$ ). Esta se define como la relación entre el calor útil y la energía solar incidente sobre el colector en un mismo período de tiempo. Analíticamente se representa,

$$\eta_c = \frac{Q_u}{H_T A_c}$$

De la ecuación anterior, vemos que se hace necesario conocer el calor útil para poder calcular la eficiencia del colector. Si se quiere conocer  $Q_u$  por medio de la ecuación mas arriba descrita, primero se tienen que conocer las pérdidas de calor, que son función del coeficiente total de pérdidas de calor,  $U_L$ . Conociendo alguno de estos dos términos,  $Q_u$  o  $U_L$ , podemos resolver la ecuación del balance de energía, dado que el calor absorbido lo podemos obtener por medición experimental y conociendo las características ópticas ( $\tau\alpha$ ) de los materiales utilizados en la construcción del colector.

### A3.7 Coeficiente total de pérdidas de calor.

Aunque aparentemente la ecuación que representa las pérdidas de calor, es sencilla; la evaluación numérica del coeficiente total de pérdidas de calor ( $U_L$ ) requiere de un análisis detallado. Debido a que es indispensable conocer el valor de  $U_L$  para poder evaluar el calor útil o las pérdidas de calor, a continuación se presenta un modelo matemático de cómo obtenerlo. El modelo toma en cuenta cómo contribuyen las distintas pérdidas de calor al coeficiente total, dando la oportunidad de analizar cada una por separado, y además hace los siguientes supuestos:

- El colector opera en estado estable.
- Los cabezales proveen un flujo uniforme por los tubos.
- La absorción de la energía solar en las cubiertas es despreciable.
- El flujo de calor a través de las cubiertas y el fondo del colector es unidimensional.
- Las cubiertas son opacas a la radiación infrarroja.
- La irradiación sobre la superficie del colector es uniforme.
- El firmamento se comporta como un cuerpo negro que emite radiación infrarroja a una temperatura equivalente.

El proceso para calcular  $U_L$  se basa en un circuito térmico de un colector solar que utiliza dos cubiertas de vidrio,  $c1$  y  $c2$ . La energía absorbida en el colector ( $S$ ) a través de la placa absorbidora ( $p$ ), que se encuentra a la temperatura  $T_p$ ; parte se convierte en calor útil ( $Q_u$ ) y parte tiende a disiparse hacia los alrededores que se encuentran a la temperatura ambiente  $T_a$ , a través de las cubiertas de vidrio que se encuentran respectivamente a las temperaturas  $T_{c1}$  y  $T_{c2}$ . Esto también ocurre a través del fondo y lados del colector que se encuentran a una temperatura  $T_b$ . La cantidad de energía disipada depende de las diversas resistencias del equipo.

Las resistencias  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  y  $R_5$ , son a la vez resistencias equivalentes que representan la oposición a las pérdidas de calor por convección ( $1/h$ ) y radiación ( $1/h_r$ ) a través de la parte superior y posterior del colector.  $R_4$  constituye la resistencia a la conducción a través del aislante térmico por la parte posterior y lados del colector. La  $R_5$  es usualmente muy pequeña y por lo tanto despreciable. La idea es tratar de obtener una resistencia equivalente ( $R_{eq}$ ). Esta resistencia es igual al inverso del coeficiente total de pérdidas de calor,  $R_{eq} = 1/U_L$ .

Podemos decir entonces, que  $U_L$  es la suma de varios coeficientes de pérdidas de calor, que se pueden expresar también como el inverso de sus resistencias, así:

$$U_L = U_t + U_b + U_e$$

donde  $U_t$  es el coeficiente total de transferencia de calor para la parte superior del colector, y es igual al inverso de la suma de las primeras tres resistencias,

$$U_t = \frac{I}{R_1 + R_2 + R_3}$$

y  $U_b$  y  $U_e$ , son los coeficientes de pérdida de calor por conducción por el fondo y lados respectivamente, que tienen que ver con  $R_4$ . Además, estos coeficientes también tienen relación con las dimensiones del colector y el tipo y grosor del aislante utilizado, de manera que podemos escribir las siguientes relaciones:

$$(U_b + U_e) = \frac{I}{R_4}$$

donde, por otro lado,

$$U_b = \frac{k_a}{l}$$

y

$$U_e = \frac{k_a M P}{l' A_c}$$

En estas ecuaciones,  $k_a$  es la conductividad térmica del aislante,  $l$  y  $l'$  los espesores del aislante por el fondo y lados respectivamente,  $P$  el perímetro del colector y  $M$  la altura del mismo. En estas dos últimas ecuaciones, todas las variables pueden ser conocidas de manera que se pueden obtener los valores de  $U_b$  y  $U_e$ .

Para calcular el valor de  $U_t$ , se considera que las pérdidas de calor por la parte superior, son el resultado de la convección y radiación entre dos placas paralelas con una inclinación de  $45^\circ$ . Otra manera de obtener un valor semejante del coeficiente de pérdidas de calor por la parte superior, es utilizando diversas gráficas de  $U_t$  en función de la temperatura promedio de la placa absorbadora, para diferente número de cubiertas, para diversos valores de el coeficiente de pérdidas de calor por convección debida a la velocidad del viento ( $hw$ ) y para diferentes valores de la emisividad de la placa absorbadora ( $\epsilon_p$ ).

La ecuación simplificada del procedimiento matemático para obtener  $U_t$  para un colector que tiene una inclinación de  $45^\circ$ , se presenta a continuación:

$$U_t = \left( \frac{N}{(344/T_p)(T_p - T_a)/(N + f)^{0.31} + \frac{1}{h_w}} \right)^{-1} + \left( \frac{\sigma(T_p + T_a)(T_p^2 + T_a^2)}{[\varepsilon_p + 0.0425N(1 - \varepsilon_p)] J^{-1} + \frac{(2N + f - 1)}{\varepsilon_c} - N} \right)$$

donde

$$f = (1 - 0.04 h_w + 0.0005 h_w^2)(1 + 0.058N)$$

y  $h_w$  que es el coeficiente de transferencia de calor por convección debido al aire soplando sobre la cubierta de vidrio y es igual a:

$$h_w = 5.7 + 3.8(v)$$

donde  $v$  es la velocidad del viento.

Los demás parámetros en estas ecuaciones son los siguientes:  $N$  que es igual al número de cubiertas de vidrio,  $\varepsilon_p$  la emitancia infrarroja de la placa,  $\varepsilon_c$  la emitancia infrarroja de la cubierta interior y  $\sigma$  la constante de radiación de Stefan-Boltzmann ( $5.6697 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ ).

Para calcular el valor de  $U_t$  a cualquier ángulo  $s$ , se utiliza la ecuación:

$$\frac{U_t}{U_{t,45^\circ}} = 1 - (s - 45)(0.00259 - 0.00144 \varepsilon_p)$$

### **A3.8 Calor útil**

Con el análisis de las pérdidas de calor hecho hasta ahora, podemos calcular  $U_L$ ,  $Q_L$  y por consiguiente  $Q_u$ . Esta manera de calcular  $Q_u$  no es muy correcta debido a que para hacerlo se supone una temperatura fija media de la placa absorbidora ( $T_{p,m}$ ), cuando en realidad la temperatura de entrada y salida del colector son bastante diferentes. Además, la temperatura de la placa absorbidora está cambiando con el tiempo, debido a que es función de variables que también cambian constantemente con el tiempo, como temperatura ambiente y radiación solar, por mencionar algunas.

Lo que se presenta ahora es una ecuación de  $Q_u$  modificada, que nos permite calcular a éste de una manera más correcta. Esta ecuación queda en función de un factor de eficiencia global ( $F_3$ ) y de la temperatura del fluido al entrar al colector ( $T_i$ ). Así, la ecuación para  $Q_u$  se transforma en,

$$Q_u = A_c F_3 [S - U_L(T_i - T_a)]$$

que es la ecuación más importante debido a que el factor de eficiencia global,  $F_3$ , involucra específicamente todas las partes de la placa absorbidora, así como la temperatura del fluido y los flujos de masa pasando a través de los tubos del colector; en lugar de simplemente suponer una temperatura promedio en la placa de absorción.

Para poder evaluar  $F_3$ , primeramente tendremos que evaluar otros dos factores de eficiencia como son el factor de eficiencia de la aleta  $F_1$ , y el factor de eficiencia de la sección  $F_2$ .

#### **A3.8.1 Factor de Eficiencia de la Aleta, $F_1$**

Haciendo un balance de energía en una placa de absorción, se encuentra que el calor por unidad de longitud que fluye por conducción a lo largo de la aleta hacia el tubo ( $q'_{cond}$ ), es igual a

$$q'_{cond} = (W - D)[S - U_L(T_b - T_a)] \frac{\tanh [m(W - D)/2]}{m(W - D)/2}$$

donde

$$F_1 = \frac{\tanh [m(W - D)/2]}{m(W - d)/2}$$

y

$$m = \sqrt{\frac{U_L}{k \delta}}$$

donde  $W$  es el espaciamiento entre tubos,  $D$  el diámetro exterior de los tubos,  $T_b$  la temperatura de la placa en la vecindad del tubo,  $k$  la conductividad térmica de la aleta y  $\delta$  el espesor de la aleta. Todas las variables se refieren al diseño y por lo tanto se puede calcular  $F_1$ , para pasar luego a calcular la eficiencia de la sección.

### A3.8.2 Factor de Eficiencia de la Sección, $F_2$

Este factor de eficiencia está relacionado con el calor útil por unidad de longitud ( $q'_u$ ) que eventualmente debe ser transferido al fluido de trabajo y que es la suma del calor de conducción, más el calor por radiación solar que el tubo recibe directamente.

$$F_2 = \frac{\frac{I}{U_L}}{W \left[ \frac{I}{U_L [D + (W - D) F_1]} + \frac{I}{\pi D_i h_f} \right]}$$

Aquí,  $D_i$  es el diámetro interior del tubo y  $h_f$  el coeficiente de transferencia de calor por convección en la interfase tubo-fluido.

### A3.8.3 Factor de Eficiencia Global del Colector, $F_3$

Haciendo un balance de energía en el propio fluido de trabajo y desarrollando una expresión que calcule la temperatura del fluido en cualquier posición del tubo en dirección del flujo, podemos encontrar, que  $F_3$  queda representada por la siguiente ecuación:

$$F_3 = \frac{mC_p}{A_c U_L} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{U_L F_2 A_c}{mC_p}\right) \right]$$

donde  $m$  es el flujo de masa por cada tubo y  $C_p$  la capacidad calorífica del fluido de trabajo.

En la siguiente figura se puede apreciar un balance energético de un colector solar respecto a la radiación solar incidente.

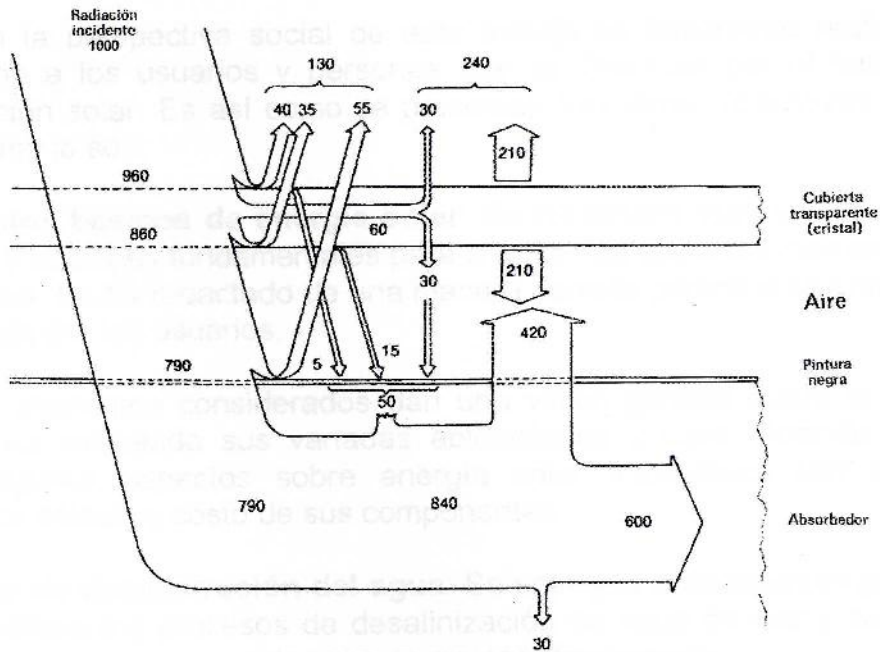


Figura A3.7 Análisis de los intercambios por radiación en el efecto invernadero

## PROGRAMA DE CAPACITACIÓN

### A4 Programa de Capacitación

Bajo la perspectiva social de este trabajo es importante realizar una capacitación a los usuarios y personas que se interesen por el tema de la desalinización solar. Es así como se presentan tres temas relevantes en este trabajo, como lo son:

a) **Conceptos básicos de energía solar:** Se ha desarrollado un resumen de conceptos y nociones fundamentales para conocer los aspectos más relevantes de este tema. Se ha redactado de una manera sencilla para que sea fácilmente comprendida por los usuarios.

Los elementos considerados dan una visión general sobre la energía solar térmica indicando sus variadas aplicaciones y usos. Además se han incluido algunos aspectos sobre energía solar fotovoltaica con ejemplos prácticos de cálculo y costo de sus componentes.

b) **Proceso de desalinización del agua:** Se entregan antecedentes generales sobre los diferentes procesos de desalinización de agua de mar y salobre de una manera bastante resumida para un mejor entendimiento.

c) **Destilador Solar:** Aquí se presentan algunas nociones de destiladores solares simples, su modo de funcionamiento y los elementos que lo componen.

Con estos tres temas se espera complementar una capacitación a los usuarios del equipo desalinizador. Se incluyen además los programas de mantenimiento y diseño y construcción del equipo.

## A4.1 Conceptos básicos de energía solar

### A4.1.1 Radiación solar

El sol es una masa de materia gaseosa caliente que irradia a una temperatura efectiva de unos 6000°C. La distribución espectral de la radiación de esta fuente de energía, medida fuera de la atmósfera terrestre, se indica, se indica por una línea de trazos continuo en la figura 1, y de ella aproximadamente la mitad esta en la región visible del espectro, cerca de la otra región visible del espectro, cerca de la otra región infrarroja y un pequeño porcentaje de la región ultravioleta. El sol esta a una distancia de 149490000 kilómetros de la Tierra, y la constante solar, esto es, la intensidad media de radiación medida fuera de la atmósfera en un plano normal la radiación es aproximadamente 1.94 cal/min. cm<sup>3</sup>.

El aprovechamiento de la energía solar básicamente se puede realizar de dos formas diferentes: para producir **electricidad** y para obtener **calor**. En el primer caso hablamos de energía solar **fotovoltaica** y en el segundo caso de **energía solar térmica**. Se trata, de dos procesos tecnológicamente distintos, no comparten ninguna característica entre sí ni en su aplicación, ni en sus respectivas tecnologías de producción, sus direcciones en cuanto a investigación y desarrollo.

La intensidad de la radiación solar que llega a la superficie de las Tierra se reduce por varios factores variables, entre ellos, la absorción de la radiación, en intervalos de longitud de onda específicos, por los gases de la atmósfera, dióxido de carbono, ozono, etc., por el vapor de agua, por la difusión atmosférica por la partículas de polvo, moléculas y gotitas de agua, por reflexión de las nubes y por la inclinación del plano que recibe la radiación respecto de la posición normal de la radiación.

Tabla A4.1 Radiación solar

Localidad y sus latitudes	Diciembre Kilocal/m <sup>2</sup>	Junio Kilocal/m <sup>2</sup>	Promedio anual
San Juan, Puerto Rico, 18° N	4.177	5.425	5.262
El Paso, Texas, 32° N	3.274	7.408	5.525
Fresno, California, 37° N	1.655	7.106	4.502
Madison, Wisconsi, 43° N	1.220	5.398	3.309
Seattle, Washington, 47° N	624	6.184	3.146
Londres, Inglaterra, 52° N	488	4.720	2.387
Mesina, Sudáfrica, 22° S	6.293	3.635	5.086
Buenos Aires, Argentina, 35° S	7.188	2.075	4.286
Mt. Stronlo, Australia, 35° S	6.374	2.048	4.258

La intensidad de la radiación medida en la superficie de la Tierra varia de 1.6 a 0.

El total de la energía solar que llega a la Tierra es enorme. En un día de sol de verano, la energía que llega al tejado de una casa de tipo medio sería mas que suficiente para satisfacer las necesidades de energía de esa casa por 24 hora. En la tabla A4.2 se dan valores típicos de la radiación que se recibe en la superficie de la Tierra.

La distribución espectral de la radiación en la superficie de la tierra ha sido extensamente estudiada y se ha propuesto una serie de curvas a modo de patrón, para diferentes masa de aire. La masa de aire,  $m$ , se define como la radiación y el espesor cuando el sol esta en el cenit y el observador a nivel del mar.

La tabla A4.2 indica la distribución de energía transmitida en tres intervalos de longitud de onda, para diversas masas de aire,  $m$ , y se basa en la constante solar de 1.896 cal/min. cm.

Tabla A4.2 Distribución de energía

Intervalo de longitud de onda, m	Energía transmitida, cal./(min.)(cm <sup>2</sup> )					
	$m = 0$	1	2	3	4	5
Ultravioleta, 0.29-0.40	0.136	0.057	0.029	0.014	0.008	0.004
Visible, 0.40-0.70	0.774	0.601	0.470	0.371	0.295	0.235
Infrarrojo, por encima de 0.70	0.986	0.672	0.561	0.486	0.427	0.377
Totales Calorías por minuto, por cm <sup>2</sup>	1.896	1.330	1.060	0.871	0.730	0.616

### A4.1.3 La energía solar térmica

Mucho más experimentado y avanzado está el estado actual de desarrollo de la energía solar térmica, de hecho, el calor producido por este sistema ya puede competir plenamente con cualquier otra fuente de calor. Hay un sin fin de aplicaciones para este sistema de energía solar, todas ellas comparten la característica de hacernos la vida cotidiana más cómoda y barata.

La primera gran aplicación, es la de producir agua caliente sanitaria, tanto para uso doméstico como industrial. La instalación térmica esta compuesta principalmente de dos elementos: el captador solar y el depósito acumulador. Su funcionamiento básico sería el siguiente: El fluido (agua fría) procedente del depósito acumulador pasa por el interior de los captadores solares (serpentín), este se calienta utilizando el calor captado por su absorbedor, entrando al depósito por la parte media superior de este, donde se almacena para su posterior utilización. La salida del agua caliente para el consumo siempre se encuentra situada en la parte superior del depósito donde se encuentra más caliente, debido a la tendencia natural de cualquier liquido o gas a subir en el proceso de su calentamiento (efecto termosifón). Así el consumidor siempre dispone del agua más caliente posible.

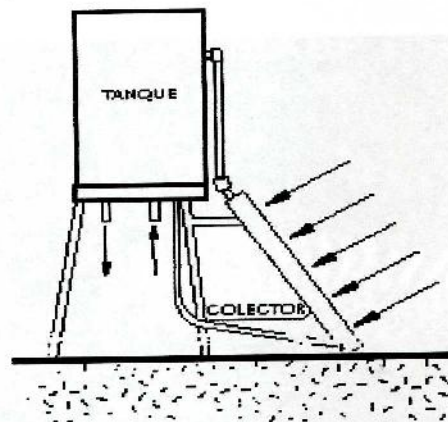


Figura A4.1 Efecto termosifón

En países con mucho sol, como es el caso de España, este sistema es el modo más económico de obtener agua caliente. Adquirir una instalación de energía solar térmica, no es tan elevado y está al alcance de una familia de clase media, viéndose de este modo eliminados totalmente los costes por consumo de combustible. Un hogar familiar compuesto de 4 personas podría así ahorrar unas \$ 250.000. anuales. Por eso no es de extrañar que en Grecia, un país mediterráneo bien soleado, la mayoría de las viviendas y los grandes

edificios disponen de instalaciones de energía solar térmica, apoyado por una adecuada política fiscal y de subvenciones que la favorecen.

La segunda gran aplicación, que tiene estrecha relación con la primera, es la calefacción de espacios cubiertos, como viviendas, escuelas, hospitales, hoteles, fábricas, edificios de despachos, etc. En esta aplicación se hace circular el agua caliente por emisores térmicos como pueden ser suelo radiante, radiadores o climatizadores.

Por último se puede aplicar la energía solar térmica en la agricultura, como invernaderos solares consiguiendo de esta manera mayores y más tempranas cosechas; los secaderos agrícolas consumen mucha menos energía si se combinan con un sistema solar y además pueden funcionar plantas de purificación o desalinización de aguas sin consumir ningún tipo de combustible.

Un sistema de calefacción solar siempre debe ser complementado por un sistema convencional de apoyo para periodos de baja radiación solar. No obstante, en zonas mediterráneas, áridas y tropicales se limitan estos periodos a algunas semanas por año, de modo que es la instalación solar la que nos suministra las necesidades de agua caliente.

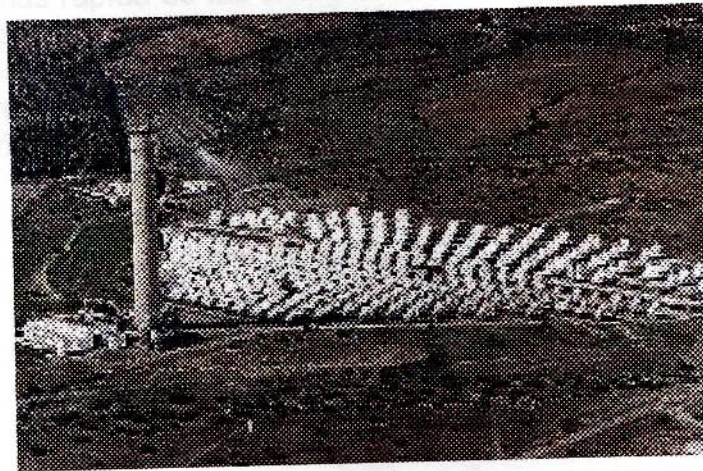


Figura A4.2 Plataforma Solar de Almería: Central Termosolar de Almería (CESA-1) central de pruebas de producción de energía solar de 1 MWatt

## Aplicaciones de la energía solar

En una lista parcial de posibles usos de la energía solar, figuran:

Calefacción doméstica, Refrigeración  
Calentamiento de agua, Destilación  
Generación de energía, Fotosíntesis  
Hornos solares, Cocinas  
Evaporación, Acondicionamiento de aire  
Control de heladas, Secado

Se han ensayado todos los usos citados de la energía solar en escala de laboratorio, pero no se han llevado a la escala industrial. En muchos casos, el costo de la realización de estas operaciones con energía solar no puede competir con el costo cuando se usan otras fuentes de energía por la gran inversión inicial que es necesaria para que funcionen con energía solar y por ello la mayor parte de los estudios de los problemas de utilización de esta energía está relacionado con problemas económicos.

a) **Calentamiento de agua:** Usar energía solar para calentar agua doméstica es la remuneración más rápida de las energías alternativas. Está estimado que hasta un 90% de gas en un hogar típico es usado para calentar el agua del baño, lavandería y lavado de platos. El calentador solar de agua doméstica puede mostrar un reembolso anual aproximado de un 20%. A ese nivel el sistema se pagará sólo, en 5 años.

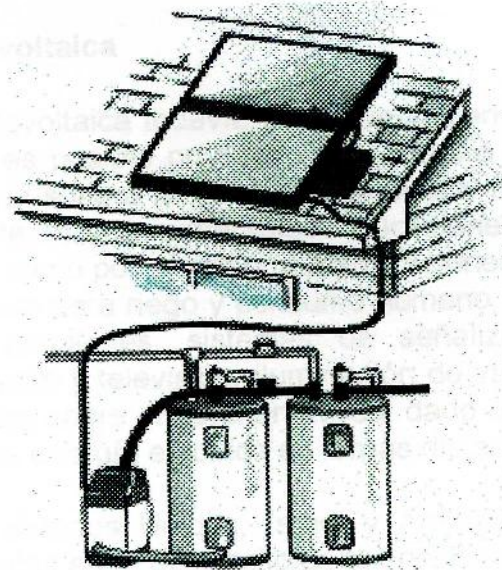


Figura A4.3 Calentamiento de agua

**b) Calefacción Doméstica:** Calefacción irradiada uniformemente del suelo es el tipo de calefacción más cómodo que existe hoy en día. Este método opera en el principio que el suelo de concreto puede guardar efectivamente y dejar libre el calor cuando es necesario. Los paneles solares calientan agua que esta circulando por el sistema de entubamiento instalado en el suelo.

Este sistema puede ser instalado en una casa en construcción, o adaptarlo en una casa ya existente.

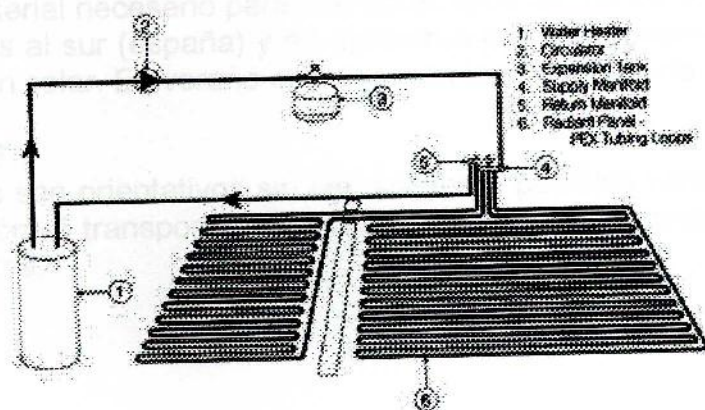


Figura A4.4 Losa radiante

#### A4.1.4 Energía solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica todavía se encuentra en una fase de lento desarrollo. Técnicamente es posible producir electricidad a través de energía solar, pero su coste todavía supera la obtenida por utilizar fuentes de energía convencional. No obstante, hay innumerables aplicaciones prácticas de la energía solar fotovoltaica, como por ejemplo: Electrificaciones de viviendas tipo rurales, sistemas de bombeo para riego y consumo humano, naves ganaderas, depuradoras de aguas residuales, sistemas de señalización marítima y terrestre, repetidores de radio y televisión, iluminación de vallas publicitarias y carreteras, con clara ventaja sobre otras alternativas, dado el elevado coste de distribución de las redes de energía eléctrica en largas distancias.

España junto con Estados Unidos, Israel y Australia, es uno de los grandes inversores mundiales en el desarrollo de la energía solar para producir electricidad. En Andalucía, muy cerca del pueblo almeriense de Tabernas, se encuentra la Plataforma Solar de Almería, una de las centrales de investigación y desarrollo de la energía solar fotovoltaica más grandes de Europa.

La energía solar fotovoltaica es una energía limpia, sin ruidos, para disfrutar de total autonomía durante muchos años o bien si está abonado a una compañía eléctrica, podrá vender la energía sobrante a ésta. Casi sin mantenimiento en zonas alejadas de la red eléctrica, una instalación de energía solar fotovoltaica es más económica en comparación a un grupo electrógeno a pocos años vista. Si además valoramos el impacto ambiental, la contaminación, residuos y ruidos por supuesto que siempre es más rentable.

Para calentar agua y calefacción son más eficientes los colectores térmicos en lugar de paneles fotovoltaicos. Los siguientes ejemplos son a modo orientativo del material necesario para diferentes tipos de instalaciones, con los paneles orientados al sur (España) y en diciembre por ser el momento del año de menor radiación solar. En verano el sol proporciona el doble de energía.

### EJEMPLOS

Los precios son orientativos sin IVA, sujetos a posibles variaciones y no incluyen instalación ni transporte. Hay diferentes tipos de subvenciones para energías renovables.

#### Ejemplo 1

Ejemplo orientativo de energía solar fotovoltaica para una vivienda aislada de la red y un consumo permanente.

Necesidades que puede cubrir esta instalación a 220 c.a.

- Una nevera de bajo consumo (menos de 1 Kw/24 horas)
- 15 luces electrónicas de bajo consumo (23 w = 100w)
- TV color y equipo de música
- Lavadora en frío, pequeños electrodomésticos
- En el caso de zonas donde hay suficiente viento, >20 Km/h. , se puede complementar con un aerogenerador ya que en invierno hay más horas de viento que de sol. Esta instalación puede cubrir un consumo de 10 Kw/h a la Semana.

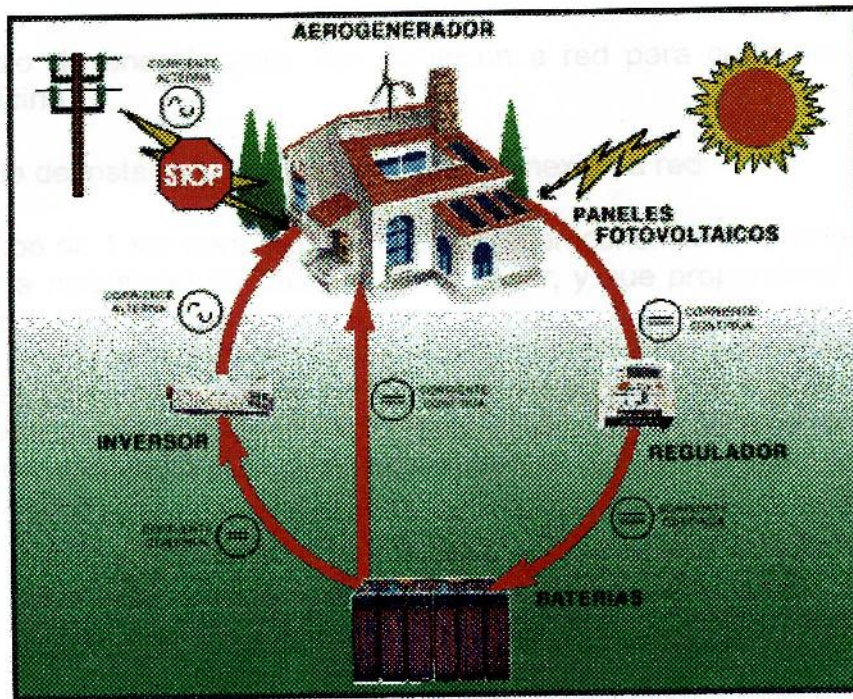
12 Paneles fotovoltaicos a 60Wp

1 Regulador 40 A

1 Batería 1200 Ah (C 100)

1 Inversor 1000 w (3 Kw pico)

Precio total aproximado del material: 8.900 US\$



### Ejemplo 2

Ejemplo de energía solar fotovoltaica para vivienda aislada de la red y de fin de semana

Necesidades que puede cubrir esta instalación a 220 V.

- 8 luces electrónicas de bajo consumo 23 w,
- TV y pequeños electrodomésticos

Material necesario:

Unidades	Descripción
2	Paneles fotovoltaicos a 60Wp
1	Regulador 8 A
1	Batería 210 Ah (C 100)
1	Inversor 600 w (1.8 Kw pico)

Precio total aproximado del material: 1540 US\$

}

### Ejemplo 3

Ejemplo de energía solar con conexión a red para cualquier tipo de vivienda u oficina

Ejemplo de instalación fotovoltaica para conexión a red:

-Instalación tipo de 1 Kw para lugares que ya tienen conexión a la red eléctrica evitando así la necesidad de baterías y regulador, y que proporciona energía gratis durante las horas de Sol.

-Para cualquier tipo de vivienda u oficina que tenga un tejado bien orientado.

-Con éste ejemplo usted puede vender la energía producida a 0.5 US\$. el kW/h, ahorrando emitir hasta 365 m<sup>3</sup> de gases de efecto invernadero a la atmósfera. (Superficie necesaria para los paneles: 9 m<sup>2</sup> por kW instalado)

-Material necesario:

Unidades	Descripción
9	Paneles fotovoltaicos 120Wp
1	Inversor de conexión a red de 1000Wp

-Precio total aproximado del material: 8500 US\$

## A4.2 Proceso de desalinización del agua

Las enormes reservas de agua del mar y aguas salubres de distintas procedencias, al mismo tiempo que las dificultades planteadas en muchos países ante la escasez de agua dulce, han obligado a tomar en consideración las posibilidades de su tratamiento económico, y actualmente existe una corriente de interés en la realización de programas de estudio relativos a los distintos métodos de desalinización.

Los procedimientos de desalinización son numerosos y responden a técnicas muy diversas; sin embargo, pueden dividirse en dos grandes grupos:

- Grupo 1.- El agua cambia de estado en el curso del tratamiento:

a) Pasando por una fase gaseosa (destilación):

- \*Procedimiento por compresión de gases;
- \*Procedimiento térmico de múltiple efecto;
- \*Procedimiento térmico "multiflash" (expansiones múltiples)

b) Pasando por una fase sólida:

- \*Congelación
- \*Formación de hidratos (Procedimiento en fase de

laboratorio).

- Grupo 2.- El agua no cambia de estado en el curso del tratamiento (procedimientos con membranas):

- \*electrodialisis
- \*ósmosis inversa.

## Destilación

La destilación se aplica especialmente en la desalinización del agua de mar. Existen diferentes métodos de destilación, que pueden agruparse según dos sistemas fundamentales: procesos térmicos y procesos por compresión.

En el primer caso, la energía necesaria se suministra, en su mayor parte, en forma de calor y, en el segundo, exclusivamente en forma de trabajo, puesto que el vapor se comprime para obtener la diferencia de temperatura necesaria para el intercambio de calor. Los procedimientos técnicos, a su vez, pueden realizarse llevando el agua a ebullición (destilación de múltiple efecto), o bien impidiendo la ebullición y obteniéndose la evaporación por disminución de presión (sistema "flash"). Actualmente entre los métodos de destilación indicados, la destilación "multiflash" es la más utilizada.

## Congelación

La congelación del agua del mar (-1.9 C) suministra cristales de hielo puro que se separan de la solución, la cual, a su vez, se concentra en sales. Existen dos procedimientos de congelación directa:

a) *Por expansión del agua* (congelación en vacío). El agua de mar se congela parcialmente a una presión absoluta de 3mm de mercurio, a -4 C. A esta presión se produce una evaporación, acompañada del enfriamiento correspondiente, que es el que provoca la congelación. Para mantener el vacío necesario es preciso aspirar de continuo el vapor de agua formado, pudiendo realizarse esta operación bien por un compresor mecánico, o por absorción en una solución higroscópica. En la práctica, los problemas de compresión del gran volumen de vapor producido a baja presión son considerables.

b) *Congelación con ayuda de un agente refrigerante*. Se utiliza un refrigerante auxiliar cuya tensión de vapor sea netamente superior a la del agua y que no sea miscible con ella. El butano satisface estas condiciones. El agua de mar se congela parcialmente por la expansión del butano. Este procedimiento evita los problemas de compresión de la congelación del vacío.

## Electrodialisis

La electrodiálisis consiste en el paso de iones a través de membranas permeables selectivas, bajo el efecto de una corriente eléctrica. Se colocan, en forma alternativa, una serie de membranas catiónicas y aniónicas, entre dos electrodos, entre los cuales circula el agua a tratar. Las membranas, permeables sólo a los cationes o los aniones, limitan la migración de los iones entre los dos electrodos, recogiéndose así, separadamente, una corriente de agua desmineralizada y otra enriquecida en iones.

## Ósmosis inversa

Este método se basa en el empleo de membranas semipermeables que permiten el paso del agua, pero no el de las sales disueltas. Si se separan por una membrana semipermeable dos compartimentos abiertos a la atmósfera, uno de los cuales contiene agua pura y el otro una solución acuosa de sales, se comprueba que el agua atraviesa la membrana hacia la solución y que la presión del lado de la solución aumenta hasta alcanzar un cierto valor (presión osmótica) suficiente para anular el caudal de agua que atraviesa la membrana. Este fenómeno constituye la ósmosis directa y se da, en forma general, entre dos soluciones acuosas de diferentes concentraciones.

osmosis solar básico

El fenómeno de ósmosis es reversible. Por lo tanto, aplicando a la solución una presión suficiente elevada, no solamente se anula el paso del agua a través de la membrana semipermeable a la solución, sino que se conseguirá un paso de agua prácticamente pura en sentido inverso, desde la solución que se va empobreciendo en agua, hacia el otro lado de la membrana. Gracias a la ósmosis inversa puede obtenerse agua pura a partir de agua de mar.

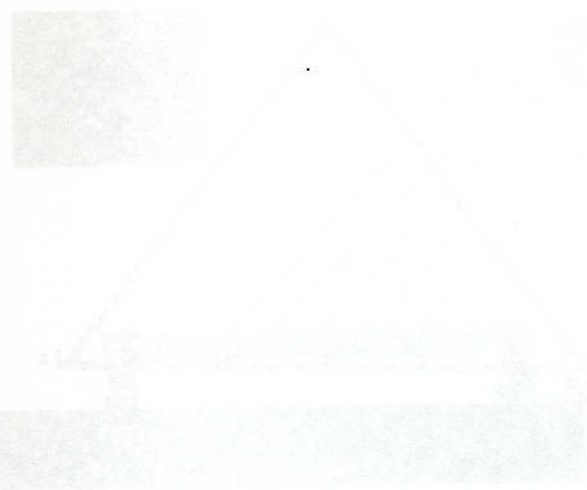


Figura 17.3. Principio de la ósmosis inversa

Para la construcción de un sistema de ósmosis inversa se requieren los siguientes materiales:

- Tablas de madera
- Tubos de plástico grueso
- Membrana negra
- Muebles de goma
- Manguera de plástico transparente
- Agua
- Sal
- Agua de mar
- Agua de río
- Agua de lluvia
- Agua de mar
- Agua de río
- Agua de lluvia

### A4.3 Destilador solar básico

Funcionamiento: La radiación solar atraviesa el metacrilato transparente (1) y calienta el agua sucia contenida en la bandeja negra (2), que se va evaporando. El vapor de agua condensa en pequeñas gotitas al entrar en contacto con las paredes del invernadero, que están más frías que el ambiente interior del destilador. Estas gotas van resbalando por los laterales inclinados del destilador, yendo a caer en la bandeja de aluminio (3). Esta bandeja de recogida del agua limpia (3), está inclinada de manera que todas las gotas confluyan en el tubo de salida (4).

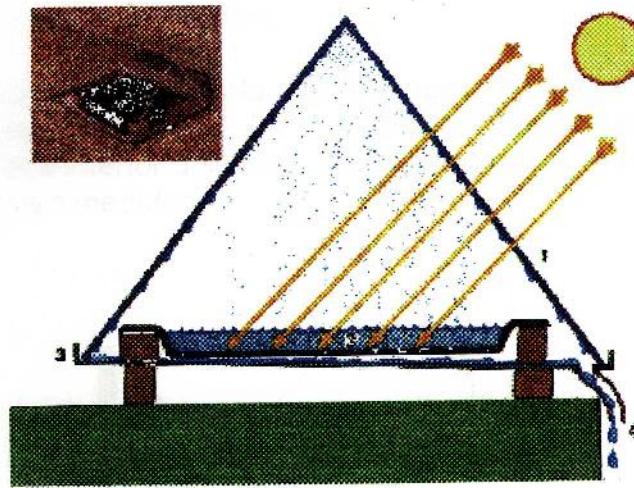


Figura 17.5 Destilador solar de 2 vertientes

Para la construcción de un destilador básico se requieran los siguientes elementos:

- Tablas de madera
- Bandejas de plástico blancas
- Pintura negra
- Tapones de goma
- Chapa de plástico transparente (5 mm)
- Vidrio
- Burlete Adhesivo
- Codos y llave de plástico (12 mm)
- Vaso medidor de 500 ml
- Tornillos
- Espejo
- Agua salada

Se construye con las tablas de madera una estructura que permita soportar en su interior una de las bandejas de plástico (de unos 40 x 25 x 5 cm), colocada con una ligera inclinación respecto a la horizontal (unos 10). Sobre esta bandeja se coloca la otra, más pequeña y pintada de negro, a la que se le ha pegado por debajo los tapones de goma, que le permiten descansar en posición horizontal. Sobre la estructura se apoya el vidrio con un ángulo de 45, que descansa en uno de los lados más largos de la bandeja grande. Los laterales de la caja se cierran con sendos triángulos de plástico transparente, sobre cuyas hipotenusas se pega el burlete adhesivo para que se produzca un buen cierre del sistema. La bandeja grande se conecta con el exterior por medio de la tubería y los accesorios de plástico.

Construido el aparato se llena la bandeja negra con agua salada hasta una altura de 1 cm y se coloca al sol. La radiación hará evaporar el agua, que condensará sobre la cara interior del vidrio, resbalando hasta la bandeja grande y reuniéndose en el vaso medidor.

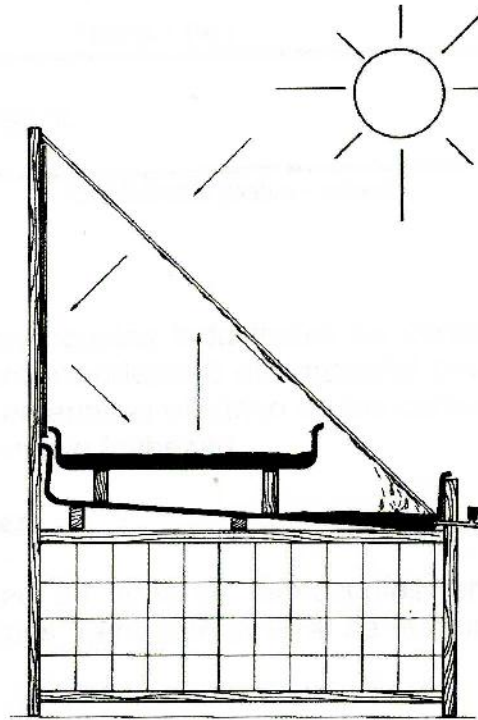


Figura 17.6 Destilador básico

## A5 TERMOCUPLAS

### A5.1 Termocuplas

Las termocuplas son el sensor de temperatura más común utilizado industrialmente.

Una termocupla se hace con dos alambres de distinto material unidos en un extremo (soldados generalmente). Al aplicar temperatura en la unión de los metales se genera un voltaje muy pequeño (efecto Seebeck) del orden de los milivolts el cual aumenta con la temperatura.

Por ejemplo, una termocupla "tipo J" está hecha con un alambre de hierro y otro de constantán (aleación de cobre y nickel)

Al colocar la unión de estos metales a 750 °C, debe aparecer en los extremos 42.2 milivolts.



Normalmente las termocuplas industriales se consiguen encapsuladas dentro de un tubo de acero inoxidable ú otro material (vainas), en un extremo está la unión y en el otro el terminal eléctrico de los cables, protegido adentro de una caja redonda de aluminio (cabezal).

### A5.2 Tipos de termocuplas

Existen una infinidad de tipos de termocuplas, en la tabla aparecen algunas de las más comunes, pero casi el 90% de las termocuplas utilizadas son del tipo J ó del tipo K.

### A5.3 Usos típicos en la Industria

Las termocuplas tipo J se usan principalmente en la industria del plástico, goma (extrusión e inyección) y fundición de metales a bajas temperaturas (Zamac, Aluminio).

La termocupla K se usa típicamente en fundición y hornos a temperaturas menores de 1300 °C, por ejemplo fundición de cobre y hornos de tratamientos térmicos.

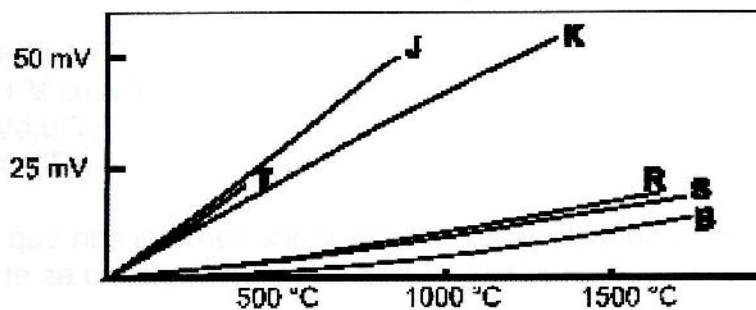
Las termocuplas R, S, B se usan casi exclusivamente en la industria siderúrgica (fundición de acero)

Finalmente las tipo T eran usadas hace algún tiempo en la industria de alimentos, pero han sido desplazadas en esta aplicación por los Pt100.

Termocupla	CABLE + ALEACION	CABLE - ALEACION	RANGO (MIN, MAX) °C	VOLTS MAX mV
J	Hierro	cobre/níquel	-180 - 750	42.2
K	Níquel /Cromo	níquel/aluminio	-180 - 1372	54.8
T	Cobre	cobre/níquel	-250 - 400	20.8
R	87 % Platino 13 % Rhodio	100% platino	0 - 1767	21.09
S	90 % Platino 10 % Rhodio	100% platino	0 - 767	18.68
B	70 % Platino 30 % Rhodio	94% platino 6% rhodio	0 - 1820	13.814

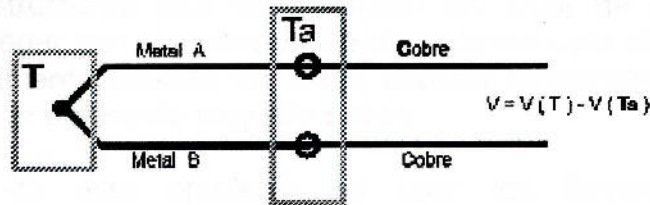
#### A5.4 Linealización

La dependencia entre el voltaje entregado por la termocupla y la temperatura no es lineal (no es una recta), es deber del instrumento electrónico destinado a mostrar la lectura, efectuar la linealización, es decir tomar el voltaje y conociendo el tipo de termocupla, ver en tablas internas a que temperatura corresponde este voltaje.



El principal inconveniente de las termocuplas es su necesidad de "compensación de cero". Esto se debe a que en algún punto, habrá que empalmar los cables de la termocupla con un conductor normal de cobre.

En ese punto se producirán dos nuevas termocuplas con el cobre como metal para ambas, generando cada una un voltaje proporcional a la temperatura de ambiente ( $T_a$ ) en el punto del empalme.



Antiguamente se solucionaba este problema colocando los empalmes en un baño de hielo a cero grados para que generen cero voltaje ( $T_a = 0$  y luego  $V(T_a) = 0$ ).

Actualmente todos los instrumentos modernos miden la temperatura en ese punto (mediante un sensor de temperatura adicional) y la suman para crear la compensación y obtener así la temperatura real.

El punto de empalme (llamado "unión ó juntura de referencia") es siempre en el conector a la entrada del instrumento pues ahí está el sensor de temperatura. De modo que es necesario llegar con el cable de la termocupla hasta el mismo instrumento.

La termocupla, hecha de metal A y metal B está sometida a una temperatura  $T$ . En los extremos de la termocupla se coloca un voltímetro con puntas de prueba de cobre a temperatura de ambiente  $T_a$ .

Recorriendo el circuito se encuentra el voltaje  $V$  que marca el voltímetro:

$$\begin{aligned}
 V &= V_{cu,a}(T_a) + V_{a,b}(T) + V_{b,cu}(T_a) \\
 V &= [ V_{b,cu}(T_a) + V_{cu,a}(T_a) ] + V_{a,b}(T) \\
 V &= V_{b,a}(T_a) + V_{a,b}(T) \\
 V &= V_{a,b}(T) - V_{a,b}(T_a)
 \end{aligned}$$

El voltaje que nos interesa saber para conocer el valor de la temperatura  $T$  es  $V_{a,b}(T)$ , este se consigue despejandolo:

$$V_{a,b}(T) = V + V_{a,b}(T_a)$$

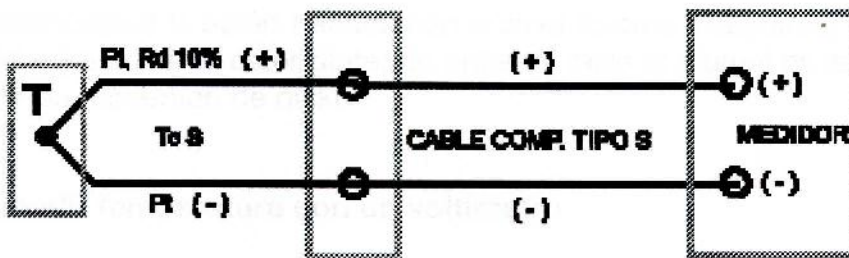
Luego conociendo  $T_a$  se busca en la tabla de la termocupla el valor de  $V_{a,b}(T_a)$  y se suma a  $V$  medido en el voltímetro con lo que se obtiene  $V_{a,b}(T)$ . Ahora con este valor se busca en la tabla el valor de  $T$ .

Los instrumentos para TC miden  $T_a$  en su conector y suman esta cantidad  $V_{a,b}(T_a)$  automáticamente para hacer la compensación de cero.

### A5.5 Cables compensado

Cuando el instrumento está muy retirado del lugar de medición, no siempre es posible llegar con el mismo cable de la termocupla al instrumento. Esto ocurre especialmente cuando se están usando termocuplas R, S ó B hechas con aleación de platino de muy alto precio.

La solución de este problema es usar los llamados "**cables compensados**" para hacer la extensión del cable. Estos exhiben el mismo coeficiente de Seebeck de la termocupla (pero hechos de otro material de menor precio) y por lo tanto no generan termocuplas parásitas en el empalme.



Los cables compensados tienen una polaridad de conexión (+) y (-) que al conectarse con la termocupla se debe respetar.

Un error típico, es conectar al revés el cable en la termocupla y en el instrumento, de esta forma se genera un error en la lectura del orden de la temperatura de ambiente en el empalme.

En el caso particular de las lanzas usadas en la fundición de aceros, la termocupla se conecta en la punta con un cable compensado forrado en asbesto, que va por dentro de la lanza hasta el lado del mango. Ahí se empalma con otro cable compensado con revestimiento de goma más flexible que llega hasta la entrada del instrumento.

Es importantísimo que estos dos cables compensados sean para el tipo de termocupla que se está usando y además estén conectados con la polaridad correcta (+) con (+) y (-) con (-). De otra forma será imposible obtener una medición sin error.

Siempre se debe consultar al proveedor ó fabricante del cable compensado por los colores que identifican los cables (+) y (-), pues las normas de estos colores varían con el tipo de termocupla y país de procedencia del cable.

### **A5.6 Para verificar el funcionamiento de un instrumento.**

Para verificar que un instrumento de termocupla funciona correctamente, es conveniente hacer un corto ó puente en la entrada de modo que  $V = 0$ , entonces el instrumento deberá marcar la temperatura de ambiente  $T_a$  que hay en el conector trasero donde se hizo el puente.

### **A5.7 Para identificar una termocupla J y una K**

Una  $T_c$  tipo J está hecha con un alambre de hierro y otro de constantán. El alambre de hierro se puede reconocer con un imán, además el hierro es gris opaco aunque algunas veces estos alambre se recubren con una delgada capa de cobre para evitar oxidación. El constantán (cobre-nickel) es también magnético pero muy levemente, se reconoce mejor porque es plateado brillante.

Las termocuplas K están hechas con cromel (cromo - aluminio) y alumel (aluminio -nickel) ambos de color plateado brillante pero el alumel es levemente magnético por su contenido de nickel.

### **A5.8 Como medir temperatura con un voltímetro**

Se debe medir con el voltímetro el voltaje que entrega la termocupla y luego buscar en la tabla para la termocupla, a que temperatura corresponde el voltaje.

Finalmente sumarle a esta temperatura encontrada en la tabla, la temperatura de ambiente (temperatura del contacto de las puntas del voltímetro con los cables de la termocupla) para hacer la compensación de cero.

Por ejemplo:

Se mide en una termocupla J un voltaje de 10.84 mV.

En la tabla de termocupla J se encuentra que para 10.84 mV, lo más aproximado es 10.832 mV que corresponden a 201 °C.

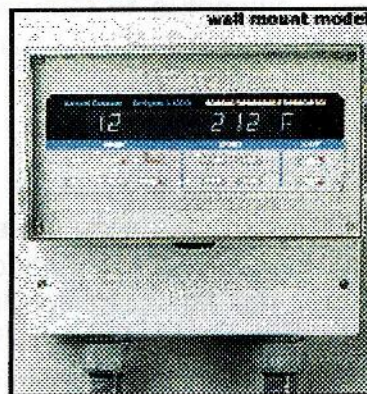
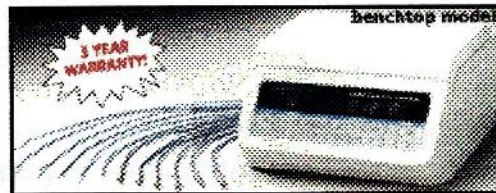
Si la temperatura de ambiente en los contactos es 25 °C aprox., entonces la temperatura medida es 226°C ( 25°C + 201°C ).

## A6 DIGI-SENSE 12-CHANNEL SCANNING THERMOMETER

**Accommodates J, T, E, or K Thermocouples**  
**Automatic/Manual/Selective Scanning**  
**Field Calibration:  $\pm 0.1\%$  accuracy**  
**Memory Storage; 225 readings/channel**  
**RS-232C output to data logger/printer**  
**Isolated Inputs to 250V**  
**Benchtop or NEMA 12 enclosures**  
**Real Time clock**  
**Non volatile**

### BENCHTOP MODELS

Benchtop models feature an attractive and functional housing. Display and keypad are set at a 45 degree angle for ease of use. Miniconnectors allow quick



hookup and

changing of thermocouples. Audible alarm 50 db. signals when temperature exceeds set point.

## **WALL MOUNT MODELS**

Wall mount models feature a dust and spray resistant NEMA type 12 housing. Hard wire your inputs to screw terminal strip. The loud alarm, 95 dB is ideal for noisy industrial environments. High and low SPDT are rated for 110VAC. 5A or 220VAC. 2.5<sup>a</sup>

## **UNIQUE AND VERSATILE DESIGN**

These scanning Thermocouple Thermometers monitor and display up to 12 temperature inputs and also allow you to output the results to your printer or computer. Unique features include: flexible scanning and logging rates, field sensor calibration, selectable thermocouple types, resolution to 0.1°F or °C, settable alarms, memory data storage of up to 255 readings/channel, and complete electrical isolation between all sensor channels relative to derived output signals. One output signal is analog (0 to 1 VDC for bench models, 4 to 20 mAmps for wall mount). The other is an RS-232 output port which is used to transfer elapsed time and temperature data to a serial printer or computer serial port.

## **PROGRAMMABLE**

Program set-up parameters from the front panel keypad, select thermocouple type, channels displayed, scan rate, resolution, temperature scale, and high/low alarm set points. Set alarm for manual or automatic - alarm can be manually disabled for noncritical applications.

## **EASY TO USE**

The bright 12 character, vacuum fluorescent display indicates current channel, temperature reading, and temperature units - warns you of open probes or out of range readings, internal clock monitors elapsed time. HOLD feature freezes all 12 inputs - ideal when simultaneous readings are required. STORE feature transfers current reading of all 12 channels to memory for later retrieval. PEAK and VALLEY features display maximum/minimum values of your run for each channel.

## **AUTO CALIBRATION**

The "Auto Calibration" feature compensates for probe error - system error approaches instrument accuracy. Each channel can be calibrated separately eliminating variation from probe to probe. Calibration and parameter setup are stored in nonvolatile memory - allows easy start-up without reprogramming.

**USE AS A DATA LOGGER**

All models feature RS-232-C output of temperature readings along with the elapsed time recorded in a tabular format. Up to 255 sets of readings can be automatically logged. Using the Scanning Thermometer as a computer based temperature logger has advantages over PC data acquisition board.

1. No computer disassembly is required to install and wire sensor leads. No commitment to a board slot in the computer and the need to reconfigure the PC software system.
2. Stand-alone operation is possible.
3. Simple thermocouple interfacing, recorder and alarm outputs available, 250V electrical isolation between all channels and more.
4. Superior accuracy and cold junction compensation.

**ORDERING INFORMATION**

Cat No	Style	Dimensions	Voltage	Shpg Wt
692-8010	Benchtop	9"W x 5"H x	115 VAC, 60 Hz	6 lbs
692-8015	Benchtop	9"D	230 VAC, 50 Hz	(2.7 kg)
692-8110	Wall mount	83/8"W x 71/4"H	115 VAC, 60 Hz	6 lbs
692-8115	Wall mount	x 41/4"D	230 VAC, 50 Hz	(2.7 kg)

**Printer and serial adapter**

Dot-matrix printer with serial adapter works with all Digi-Sense 12-channel scanners. Features 213 cps draft speed and 40 cps in near-letter-quality mode. Accepts single 8-10" wide sheets or fan-fold tractor feed paper. Not equipped with buffer - recommended for continuous printing of readings only:

83249-10	Dot-matrix printer. Shpg wt 13 lbs (5.9 kg)
83249-70	Serial interface kit required for dot-matrix printer. Shpg wt 1 lb (0.5 kg)

**Cables (for sending data to a printer or computer)****For benchtop units:** BD9F from scanner

Cat no.	Description	Length
692-8050	To DB25M serial printer	6 ft
692-8052	To DB9F computer serial port	6 ft
692-8054	To DB25F XT computer serial port	6 ft

**For wall-mount units:** two-wire from scanner

Cat no.	Description	Length
692-8060	To DB25M serial printer	20 ft
692-8062	To DB9F computer serial port	20 ft
692-8064	To DB25F XT computer serial port	20 ft

**SPECIFICATIONS****Ranges:****J:** -310 to 1832°F (-190 to 1000°C)**K:** -418 to 2507°F (-250 to 1375°C)**T:** -418 to 752°F (-250 to 400°C)**E:** -418 to 1652°F (-250 to 1000°C)**Resolution:** 0.1°/1° selectable up to 999.9.0°, 1° above 1000°**Accuracy:** ±0.1% of rdg. ±1.8°F (1.0°C) above -238°F (-150°C)**Display:** 12 character vacuum fluorescent**Display update rate:** 3 sec/channel**Scan rate:** from 4 sec/12 channels to 99 min 59 sec/12 channels**Recorder output:** (for any channel, scalable)**Benchtop units:** 0 to 1 VDC. Wall-mount units: 4 to 20 mA loop. (external power supply required for 4 to 20 mA loop)**Alarm output:** (wall-mount units only) high and low relays: 5A at 115 VAC or 2.5A at 230 VAC**Digital output:** RS232-C: ASCII format: 9600 baud rate**Operating ambient:** 32 to 122°F (0 to 50°C)