© Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Biblioteca Digital, 2004

UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE PROCESOS



TESIS DOCTORAL

ESTUDIO DE PROCESOS DE EVAPORACIÓN PARA SU APLICACIÓN EN DESALACIÓN DE AGUAS

JOSÉ MIGUEL VEZA IGLESIAS

Las Palmas de Gran Canaria, Mayo de 1990



UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE PROCESOS

ESTUDIO DE PROCESOS DE EVAPORACION PARA SU APLICACION EN DESALACION DE AGUAS

Memoria que presenta Jose Miguel Veza Iglesias para optar al grado de Doctor Ingeniero Industrial



Escuela Tecnica Superior de Ingenieros Industriales

Las Palmas Mayo 1990



UNIVERSIDAD DE SEVILLA

Avda, de Reina Mercedes, s/n E - 41012 Sevilla Tolof., 954 - 61 11 50 Tlx.; 73167 AICIA E

Informe del Director de la Tesis Doctoral "Estudio de procesos de evaporación para su aplicación en desalación de aguas", Prof. Dr. Valeriano Ruiz Hernández.

La tesis doctoral "Estudio de procesos de evaporación para su aplicación en desalación de aguas", realizada por el Ingeniero Industrial D. José Miguel Veza Iglesias y dirigida por mí ha sufrido diversos avatares por circunstancias personales del doctorando pero al momento presente y después de grandes esfuerzos de todo tipo ha resultado un trabajo de mérito y que supone un avance sustancial en el conocimiento de los procesos básicos que tienen lugar en las aplicaciones térmicas de la energía solar y flujos energéticos de baja temperatura para desalinización de aguas salobres.

Por todas esas razones el que suscribe autoriza el pase a defensa oral de la citada tesis doctoral.

Sevilla, 30 de Abril de 1.990





UNIVERSIDAD POLITECNICA DE CANARIAS

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES



Tafira Baja - 35071 Las Palmas de Gran Canaria - Islas Canarias - España - Teléf. (928) 35 35 00 - Telex 96215 - Fax (928) 35 39 00

CATEDRA DE TERMODINAMICA Y FISICOQUÍMICA

Prof. Juan Ortega

Juan Ortega Saavedra. Catedrático de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria y tutor del trabajo de Tesis Doctoral "Estudio de procesos de evaporación para su aplicación en la desalación de aguas" realizado por el Ingeniero Industrial Don José Miguel Veza Iglesias y del que es Director el Prof. Dr. Don Valeriano Ruiz Hernández. Catedrático de la Universidad de Sevilla. informa:

Que el trabajo realizado es de un gran aporte científico para las futuras aplicaciones que se realicen sobre procesos de desalación de aguas, destacando su originalidad y sobre todo el enorme esfuerzo que ha supuesto el diseño e instalación de un equipo experimental, construido expresamente para este trabajo de investigación. Asimismo, destacar el esfuerzo personal realizado por el doctorando, que con dedicación y entrega ha adquirido importantes conocimientos durante su formación, capacitandole suficientemente para el desarrollo de tareas de investigación.

Por todo ello, el que suscribe procede a **ratificar** la autorización realizada por el Director de la Tesis Doctoral para su presentación y defensa.

Las Palmas de Gran Canaria, a dos de Mayo de mil novecientos noventa.



En el tiempo que he pasado en la Universidad ha habido muchas personas que han apoyado mi trabajo. De entre ellas me permito destacar al Prof. Dr. D. J. Alejandro Ortega Saavedra, al Prof. Dr. D. Antonio Gómez Gotor y al fallecido Prof. Dr. D. Joaquín Ocón Garcia que siempre me han animado incluso mas allá de lo que yo podría esperar. El Prof. Dr. D. Francisco Rubio Royo me ha distinguido con su confianza. Todos ellos me enseñaron la Universidad con otra visión y desde otra perspectiva.

Al Director de esta Tesis, Prof. Dr. D. Valeriano Ruiz Hernández, con quien he establecido con el paso del tiempo una relación distinta de la académica y mas cercana a la amistad.

A todos ellos y a los compañeros del Departamento les estoy agradecido.

El trabajo experimental fue financiado por Unión Eléctrica de Canarias SA mediante fondos del Plan de Investigación Electrotécnica. El entusiasmo de Javier Alday me ayudó enormemente en aquella fase.

José Luis Saavedra me introdujo en las posibilidades de la informática y Antonio Ocón me ayudó con los problemas gráficos.

En toda mi familia y en mis amigos he encontrado siempre comprensión y ánimo.

ESTUDIO DE PROCESOS DE EVAPORACION PARA SU APLICACION EN DESALACION DE AGUAS

CAPITULO 1. INTRODUCCION	13
1.1.PROBLEMATICA HIDRAULICA Y ENERGETICA DE LAS ISLAS	S
CANARIAS	13
1.1.1.Agua	14
1.1.2.Energía	16
1.2.REVISION BIBLIOGRAFICA	18
1.2.1. Evaporador convencional	19
1.2.1.1. Variantes	21
1.2.1.2.Estudio paramétrico	21
1.2.1.3. Evaporador de multiefecto	23
1.2.1.4. Evaporador inclinado	23
1.2.1.5.0tras propuestas alternativas	24
1.2.1.6.Resumen	25
1.2.2.Aprovechamiento indirecto de la energía solar	25
1.2.2.1.Estanques o piscinas solares	26
1.2.2.2.Captadores planos convencionales	28
1.2.2.3.Captadores planos de tubo evacuado	29
1.2.2.4.Captadores de concentración	30

1.2.2.5.Conversión-generacióntermoeléctrica.	
Sistemas distribuidos	3:
1.2.2.6.Conversión-generacióntermoeléctrica.	
Receptor central	3 2
1.2.2.7.Conversión fotovoltaica	3 2
1.2.2.8.Programa SOLERAS	3 4
1.2.2.9. Nociones sobre costos	3 4
1.2.2.10.Resumen	35
1.3.CONSIDERACIONES SOBRE LA OPORTUNIDAD DE ESTE TRABAJO 3	<i>€</i>
1.4.OBJETO	; 7
REFERENCIAS	8
CAPITULO 2.PROCESOS DE DESALACION SOLAR	4
2.1.GENERALIDADES SOBRE LA APLICACION DE ENERGIA SOLAR A LA	
DESALACION DE AGUAS	4
2.1.1.Distribución superficial de la energía solar 4	5
2.1.2.Utilización de grandes superficies y limitación	
de capacidad 4	6
2.1.3.Concentración de la radiación 40	б
2.1.4.Condiciones de aplicación 48	8
2.2.DESCRIPCION DE LOS SISTEMAS DE DESALACION SOLAR . 49	

2.3.APROVECHAMIENTO DIRECTO DE LA ENERGIA SOLAR. PROCESOS D	E
CONVECCION NATURAL	50
2.3.1.Evaporador convencional	50
2.3.1.1.Descripción	50
2.3.1.2.Eficiencia solar	53
2.3.2. Evaporador de multiefecto	54
2.3.3.Evaporador inclinado	55
2.3.4.Combinación con invernadero	55
2.4.APROVECHAMIENTO INDIRECTO DE LA ENERGIA SOLAR	56
2.4.1. Estanques o piscinas solares	56
2.4.2. Captadores planos convencionales. Temperaturas	s
bajas	57
2.4.3. Captadores planos de tubo evacuado	58
2.4.4. Captadores de concentración	58
2.4.5.Conversión-generación termoeléctrica. Sistemas	s
distribuidos	59
2.4.6.Conversión- generación termoeléctrica. Receptor	r
central	60
2.4.7.Conversión fotovoltaica	60
2.4.8.Proyecto SOLERAS	61
2.4.9.Resumen	64
2.5.DESCRIPCION GENERAL DEL PROCESO DE CONVECCION FORZADA	65
2.5.1.Antecedentes	67
2.5.1.1.Experiencias en Atlanta	68

3

2.5.1.2.Planta de El Cotillo, Fuerteventura.	72
2.5.1.3.0tras experiencias	72
REFERENCIAS	74
CAPITULO 3. DESTILACION SOLAR POR CONVECCION FORZADA	75
3.1.DESCRIPCION DEL PROCESO	75
3.1.1.Canal	75
3.1.2.Condensador	76
3.2. MODELOS DE SIMULACION. MODELO SIMPLIFICADO	77
3.2.1.Consideraciones generales	77
3.2.2. Descripción del modelo simplificado	79
3.2.3.Expresiones analíticas	80
3.2.3.1.Agua	,80
3.2.3.2.Aire húmedo	81
3.3.MODELO GENERAL DE SIMULACION	85
3.3.1.Descripción general	85
3.3.2.División en zonas	86
3.3.3.Zona I. Cubierta	86
3.3.4.Zona II. Flujo de aire	88
3.3.4.1.Balance de materia	89
3.3.4.2.Balance de energía	89
3.2.5.Zona III. Piso del canal. Flujo de agua	91
	91
3.2.5.2.Balance de energía	92

3.4.ANALISIS DEL MODELO GENERAL	95
3.4.1.Radiación solar	95
3.4.2. Resolución del sistema	96
3.4.3.Condiciones iniciales	99
3.4.4.Coeficientes de transmisión de calor	99
3.4.4.1.Coeficientes de convección	100
3.4.4.2.Coeficientes globales	102
3.4.5.Resolución del modelo	103
3.5.INDICADORES DE RESULTADOS	104
3.5.1.Introducción. Variables indicadoras	104
3.5.2. Eficiencia energética simple	105
3.5.3. Eficiencia energética compuesta	106
3.5.4.Análisis de la exergía	107
3.5.4.1.Formulación	108
3.5.4.2. Eficiencia exergética. (Efectividad)	
	109
3.5.4.3.Expresiones analíticas	110
3.5.4.4.Eficiencia exergética (eficiencia e	de
segunda ley)	112
3.5.5.Criterio de comparación	112
REFERENCIAS	114

CAPITULO 4. ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO TEORICO Y RESULTADOS 115

4.1.APLICACION DEL MODELO SIMPLIFICADO		
4.1.2.Resultados	4.1.APLICACION DEL MODELO SIMPLIFICADO	115
4.2.APLICACION DEL MODELO GENERAL DE SIMULACION	4.1.1.Aplicación	115
4.2.1.Aplicación	4.1.2.Resultados	116
4.2.1.1.Proceso de calculo	4.2.APLICACION DEL MODELO GENERAL DE SIMULACION	117
4.2.1.2.Valores constantes e iniciales	4.2.1.Aplicación	117
4.2.2.Resultados del modelo	4.2.1.1.Proceso de calculo	118
4.2.3.Análisis de sensibilidad. Variables a considerar	4.2.1.2. Valores constantes e iniciales	118
considerar	4.2.2.Resultados del modelo	119
4.3.RESULTADOS DEL MODELO GENERAL. CANAL LISO	4.2.3.Análisis de sensibilidad. Variables	a
4.3.1.Parámetros de entrada	considerar	121
4.3.2.Resultados	4.3.RESULTADOS DEL MODELO GENERAL. CANAL LISO	121
4.3.2.1.Temperatura del agua en el canal	4.3.1.Parámetros de entrada	122
4.3.2.2.Temperatura del aire	4.3.2.Resultados	123
4.3.2.3. Humedad del aire	4.3.2.1. Temperatura del agua en el canal	123
4.3.2.4.Producción de agua	4.3.2.2. Temperatura del aire	123
4.3.2.5.Eficiencia energética y exergética . 125 4.3.2.6.Horas de funcionamiento en el día . 126 4.3.3.Comparación modelos simplificado y general 126 4.4.ANALISIS DEL MODELO GENERAL. CANAL CON FONDO DE PICON 127 4.4.1.Antecedentes	4.3.2.3. Humedad del aire	124
4.3.2.6. Horas de funcionamiento en el día . 126 4.3.3. Comparación modelos simplificado y general 126 4.4. ANALISIS DEL MODELO GENERAL. CANAL CON FONDO DE PICON 127 4.4.1. Antecedentes	4.3.2.4. Producción de agua	124
4.3.3.Comparación modelos simplificado y general 126 4.4.ANALISIS DEL MODELO GENERAL. CANAL CON FONDO DE PICON 127 4.4.1.Antecedentes	4.3.2.5.Eficiencia energética y exergética .	125
4.4.ANALISIS DEL MODELO GENERAL. CANAL CON FONDO DE PICON 127 4.4.1.Antecedentes	4.3.2.6.Horas de funcionamiento en el día	126
4.4.ANALISIS DEL MODELO GENERAL. CANAL CON FONDO DE PICON 127 4.4.1.Antecedentes	4.3.3.Comparación modelos simplificado y general	126
4.4.2. Evolución comparada del canal con piso de picón		
4.4.2. Evolución comparada del canal con piso de picón	4.4.1.Antecedentes	127
	o liso	

4.5.RESULTADOS	DEL	MOD	ELO	GEN	ERA	L.	CO	NDE	NSA	7D0	R	EN	ſ	CIC	LO
ABIERTO .		• •			•			•		•	•	•	•		129
4.5.1.Intr	coduco	ción	•		•			•		•	•	•	•	•	129
4.5.2.Efic	cienci	ias			•			•		•	•	•		•	130
4.5.3.Pará	imetro	s ut	tili:	zado	s	: .		•			•	•	•	•	130
4.5.4.Resu	ıltado	s			•			•		•	•	•	•	•	131
4.6.RESULTADOS	DEL	MODI	ELO	GEN	ERA	L.	CO	NDE	NSA	DO	R	EN	•	CIC	ĹO
CERRADO .					•		•		• •	•	•	•	•	•	132
4.6.1.Resu	ıltado	s			•			•		•		•	•	•	132
4.7.RESULTADOS	DEL I	MODE:	LO G	ENEF	AL.	. с	OND	ENS	ADO	DR	RE	FR	IG	ERAI	00
POR AIRE					•		•	•		•	•	•	•	•	134
4.7.1.Resu	ıltado	s			•			•		•				•	134
4.8.ANALISIS DE	LAE	EFICI	ENC	IA.	SEN	SIE	BILI	DA	D	•	•		•	•	135
4.8.1.Sens	ibili	.dad	de 1	a ef:	ici	enc	ia	a d	ive	rsa	as	va:	ri	able	: S
• •					•			•		•		•		•	135
4.8.2.Sens	ibili	.dad	a 1	a lo	ngi	tud	l de	1 0	can	al		•		•	136
4.8.3.Sens	ibili	.dad	a la	a an	chu	ra	de	cai	nal		•	•	•	•	136
4.8.4.Sens	ibili	.dad	a la	a al	tur	a d	lel	cai	nal		•	•	•	•	137
4.8.5.Sens	ibili	.dad	al o	caud	al	de	air	e:	•	•		•		•	138
4.8.6.Sens	ibili	.dad	al d	cauda	al	de	agu	ıa a	al	car	nal	-		•	139
4.8.7.Sens	ibili	.dad	al	caud	al	de	agı	ua	de	re	fr	ig	er	acio	ón
• •					•		. •	•						•	140
4.8.8.Sens	ibili	.dad	a la	a ex	pos	ici	.ón	ene	erg	éti	ica	ı			141
4.8.9.Sens	ibili	.dad	a	la	te	empe	erat	tur	a	de	1	aç	gu:	a d	le
refri	gerac	ión.			•		•	•			•	•	•	•	142

4
2004
9
"
=
jeit
0
œ
bliotec
*
₽
P
m
anaria.
.00
=
anar
<u>e</u>
C
Œ
Las Palmas de Gran (
~
ŏ
-
Ġ.
Ε
E
a
"
ď
_
Œ
C
2
4
×
2
٩
€
in C
=

amplental	• 143
4.8.11. Sensibilidad respecto a la temperatura ambien	nte
• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	144
4.8.12. Sensibilidad al área del condensador	145
4.8.13. Sensibilidad respecto del coeficiente	de
transmisión de calor en el condensador	146
4.8.14. Variación respecto a una temperatura fija	de
entrada de agua	147
4.9.RESUMEN	148
REFERENCIAS	151
CAPITULO 5. PLANTA EXPERIMENTAL. EXPERIENCIAS	152
5.1.0BJETIVOS Y PLANTEAMIENTO DE LA EXPERIENCIA	152
5.2.DESCRIPCION DE LA PLANTA	153
5.2.1.Toma de agua de mar	154
5.2.2.Canales de evaporación	154
5.2.3.Condensador	155
5.2.4.Instrumentos de medida en el canal	156
5.2.5.Depósitos de agua producto	156
5.2.6.Instrumentación meteorológica y de proceso	156

5.3. EXPERIENCIAS OBTENIDAS	158
5.3.1.Toma de agua	158
5.3.2.Condensadores	158
5.4.RESULTADOS EXPERIMENTALES	159
5.4.1.Datos obtenidos	159
5.4.2. Análisis de los datos	160
5.4.2.1.Radiación solar	160
5.4.2.2. Temperatura del agua en el canal	161
5.4.2.3. Temperatura del aire en el canal	161
5.4.2.4. Humedad del aire en el canal	162
5.4.2.5. Producción de agua	162
5.4.2.6.Comparación dos canales	163
5.5. DISCUSION DE LOS RESULTADOS	164
5.6.APROXIMACION DE MODELOS A LOS RESULTADOS	
EXPERIMENTALES	165
5.6.1.Modelo general	165
5.6.2. Modelo simplificado	166
REFERENCIAS	167
	107
CAPITULO 6. CONDICIONES OPTIMAS DE FUNCIONAMIENTO	168
6.1.RESUMEN ANTERIOR. CONCLUSIONES PREVIAS SOBRE SENSIBILIDA	4D
• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	_ 168

6.2. ALTERNATIVA DE FUNCIONAMIENTO	.70
6.2.1. Alternativa de separación del captador solar y la	Į.
cámara de humidificación 1	.70
6.3.CAUDAL DE AIRE OPTIMO 1	71
6.3.2. Relación caudal de aire - longitud 1	75
6.4.ANALISIS DE LA EFICIENCIA	77
6.5.DISEÑO PROPUESTO	79
6.5.1.Introducción	79
6.5.2.Aplicaciones	79
6.5.3.Diseño óptimo	80
6.5.3.1.Características geométricas 1	80
6.5.3.2.Condiciones de operación 1	81
Resumen de características	82
6.6. PROYECCION DE RESULTADOS	84
6.6.1.Temperatura del agua	84
6.6.2. Temperatura del aire	85
6.6.3. Humedad especifica y relativa 18	85
6.6.4.Producción horaria	86
6.6.5.Eficiencias	86
CAPITULO 7. RESUMEN Y CONCLUSIONES	88
7.1.RESUMEN	88
7.2.CONCLUSIONES	90

CAPITULO 1. INTRODUCCION

1.1. PROBLEMATICA HIDRAULICA Y ENERGETICA DE LAS ISLAS CANARIAS.

El Archipiélago Canario presenta serias deficiencias en lo que se refiere a dos recursos naturales de utilización imprescindible en la actividad humana: agua dulce y energía convencional. En cuanto al agua, sobre una situación general preocupante, destaca el hecho de que en las islas orientales y desde hace años ya se considera normal la producción de agua por medios industriales muy alejados de los métodos tradicionales de captación, por falta de suficientes recursos hidráulicos.

Respecto a la energía, no se dispone en las islas de absolutamente ninguno de los combustibles tradicionalmente utilizados (los llamados fósiles, como carbón, petróleo o gas), ni mucho menos de uranio. Tan solo podemos considerar como recursos energéticos propios a los hidráulicos - en cantidades mínimas y muy localizadas - y a los renovables - energía solar, eólica, biomasa, etc-. La consecuencia de ello es la absoluta dependencia energética del exterior en la práctica.

Un breve repaso a estos dos aspectos nos dará una idea mas precisa de la situación.

1.1.1.Aqua.

Los recursos hidráulicos en Canarias son notablemente mas escasos que en otras zonas. Así en la tabla 1.1. se incluye una comparación de cifras para la Comunidad Europea, Península y Canarias, observándose como en las Islas se llega escasamente a una quinta parte de la media europea.[1.1]

Tabla 1.1.Comparación de recursos de agua (Valores en m³/persona/año.)

Comunidad	Península	Canarias	Gran Canaria
Europea			
2500	3000	500	140

El consumo de agua en zonas urbanas, incluida la demanda turística, supone un 46 % del total en Gran Canaria, mientras que en Tenerife es del 36 %. [1.2] La dotación urbana media en Gran Canaria es menor de 100 litros/persona/día (L/p/d), siendo la de la Ciudad de Las Palmas la mayor, con 160 L/p/d.

Vemos por tanto que los caudales de agua disponible son bajos, pero casi es mas preocupante el hecho de que en buena parte, como se deduce del Balance anual y volumenes aprovechados (Tabla 1.2),

estos volumenes exceden en algunos casos a la recarga del subsuelo por infiltración. Esto nos lleva a la conclusión de que parte del agua que consumimos procede de las reservas, lo cual explica el descenso de los niveles freáticos. Particularmente agobiante es la situación en Gran Canaria, donde la escasez de agua es un fenómeno con el que estamos acostumbrados a convivir.

Tabla 1.2. Balance anual y volumen aprovechado

(Gran Canaria, 1978, millones m³/año)

Precipitación	Evapotranspiración	Infiltración	Extracción
	+ escorrentía		subterránea
576	481	95	126

La agricultura, por ejemplo, ha reducido su consumo en los últimos doce años a la mitad, debido en parte a la introducción de nuevas técnicas de riego (goteo, aspersión) pero también a una reducción importante de las superficies de cultivo. Esto último a su vez causado por la falta de agua y por el alto precio que alcanza en los mercados.

Para el agua de abastecimiento municipal, por ejemplo, el metro cúbico tenia un precio medio en España de 31 pesetas mientras que en la provincia de Santa Cruz de Tenerife era de 53 PTA/m³ y en la de Las Palmas de 116 PTA/m³.[1.1]

Todos estos datos, expuestos aquí de forma resumida, no hacen sino situarnos en la perspectiva del interés que tiene en estas Islas todo lo que se refiere a la captación, producción, tratamiento y abastecimiento de aguas.

En esta situación resulta de fundamental importancia la producción de agua mediante plantas de desalación de agua de mar, que en la ciudad de Las Palmas aportan del orden del 50 % de la demanda, mientras que en las islas de Lanzarote y Fuerteventura la práctica totalidad del consumo es de agua producida por desalación.

El suministro básico a poblaciones ha mejorado notablemente, estando en marcha un Convenio de Julio de 1988 en que se acordó entre el Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo y la Consejería de Obras Públicas, Vivienda y Agua del Gobierno de Canarias un Plan de nuevas desaladoras, que incluye un total de 11 plantas, con capacidad total de 48000 m³/día y presupuesto de inversión de 10000 millones PTA, de los cuales el Ministerio aporta el 75 % y el resto se distribuye entre la Consejería, Consorcios Insulares de Agua y Ayuntamientos.

Otra alternativa que se ha barajado como aportación extraordinaria de caudales es el transporte de agua dulce en buques desde el exterior, si bien los proyectos en este sentido nunca han llegado a materializarse.

1.1.2.Energía.

En cuanto al tema energético, en la actualidad todos los recursos utilizados provienen del exterior. Prácticamente todo son derivados del petróleo, puesto que en el balance global son insignificantes la energía hidroeléctrica - 0.8 MW frente a 791 MW eléctricos de origen térmico en 1988 - y las instalaciones de aprovechamiento de energías renovables.

Todo el consumo de energía se realiza en base a combustibles o crudos de petróleo importados. La refinería de Santa Cruz de Tenerife trató en 1988 un total de 3.2 millones de toneladas de crudo, de los cuales 1.8 millones de toneladas se consumieron en el mercado interior canario, además de las importaciones directas de productos, fundamentalmente para navegación.

Una característica diferencial del consumo de combustibles en Canarias es la distribución del consumo entre los distintos combustibles. De la tabla 1.3. puede deducirse que el consumo de gas es doble en la Península (debido al peso del sector industrial), el de gasolinas equilibrado, el de gasoli también doble (también por la industria) y en cambio el de fueloil es mas del doble en Canarias ya que casi toda la generación eléctrica es de este origen.[1.3.] y [1.4].

Tabla 1.3.Distribución de combustibles en Península y Canarias (Año 1988, miles de toneladas)

	Península	%	Canarias	%
Gas licuado	2405	8.8	82	4.7
Gasolinas	6978	25.7	381	21.7
Gasoil	12263	45.1	350	19.9
Fueloil	5548	20.4	945	53.7

Por otro lado es importante señalar que el peso del consumo en el sector transporte es determinante en Canarias, mucho mas que en la Península debido a los suministros a buques y aeronaves en puertos y aeropuertos.

Estas consideraciones no modifican en absoluto el hecho básico de que el Archipiélago es totalmente dependiente del exterior en lo que se refiere a su consumo energético.

1.2.REVISION BIBLIOGRAFICA

En este apartado se realizará un análisis de la bibliografía existente y a la que se ha tenido acceso sobre desalación solar, a fin de conocer la situación de las tecnologías utilizadas o propuestas para la producción de agua dulce a partir de aguas saladas y utilizando la energía solar como aportación principal o exclusiva, según los casos.

A efectos de ordenar la bibliografía, pueden clasificarse las instalaciones de desalación solar según el modo de aprovechamiento de la energía :

- -Directa o en sistemas pasivos.
- -Indirecta o en sistemas activos.

En el primer caso, la radiación solar es aplicada de forma inmediata a la producción de agua por evaporación y condensación, en sistemas que son propiamente de destilación solar, en los evaporadores clásicos (solar stills) en forma de canales cerrados, también llamados de tejado. En adelante los denominaremos "evaporadores convencionales" (EC). La denominación de sistemas pasivos obedece al hecho de que los flujos de masa y energía se deben a medios naturales, sin impulsiones forzadas.

En el caso del aprovechamiento indirecto la energía solar se utiliza de forma previa o como apoyo al proceso de desalación en si, que en esta última variante ya no es necesariamente de destilación. Al aprovechamiento indirecto se le suele también referir como desalación solar asistida, y requiere la concentración o captura de la energía como fase previa. En estos casos los flujos de masa y energía suelen ser forzados con intervención de bombas y ventiladores.

Aquí se presenta una gama de posibilidades que incluyen las siguientes:

-Precalentamiento del agua salada con captadores planos o de concentración.

- -Generación termoeléctrica y posterior desalación
- -Generación fotovoltaica y posterior desalación
- -Generación eólica. Por extensión de la solar, aunque no se va a estudiar aquí.

En la tabla 1.4. aparece un cuadro resumen de las distintas posibilidades expuestas, que se describirán en detalle en el capítulo 2. A continuación se va a analizar la bibliografía disponible sobre el particular.

Tabla 1.4. Resumen de posibilidades de aprovechamiento de energías renovables para desalación solar.

Evaporador convencional

Aprovechamiento térmico

directo

Captadores planos o de concentración Precalentamiento en usos térmicos

Generación termoeléctrica

Procesos electromecánicos

Generación fotovoltaica

Procesos

electromecánicos

1.2.1. Evaporador convencional

Los sistemas clásicos de destilación solar y sus modificaciones han sido ampliamente tratados en la literatura [1.5] a [1.11] y en ellos se estudia principalmente el sistema clásico o evaporador convencional, del que se aportan diversos ejemplos y casos estudiados.

Las características básicas de este sistema son las de una gran simplicidad, uso de materiales comunes, productividad de agua baja, del orden de 3 a 4 kg de agua por m² y día, y en general capacidades de producción pequeñas.

La valoración de los resultados obtenidos se suele hacer en la literatura por la productividad del sistema, medida en kg de agua/m²/día. Como se estudiará con detalle mas adelante, esta es una forma muy poco rigurosa de análisis puesto que la producción depende de la radiación solar entre otros factores, de modo que como mínimo habría que relacionar las dos variables por medio del equivalente energético necesario para destilar el agua.

Las bases analíticas para el estudio del proceso vienen dadas en el trabajo original de Dunkle [1.13] utilizado posteriormente por Morse y Read [1.14]. Consisten en un sistema de ecuaciones correspondientes a los balances de materia y energía con el que se trata de determinar las temperaturas de la cubierta, agua y piso. El sistema se resuelve por sucesivas iteraciones de prueba y error.

Malik [1.12] añade un análisis en el tiempo del sistema dando por supuesta una variación periódica de la radiación solar, incluyendo los armónicos superiores y la solución a la ecuación de conducción térmica.

Además del estudio analítico citado que incluye las ecuaciones básicas de transferencia de masa y energía, existen otras aproximaciones mediante analogía de circuito térmico y diagramas de Sankey para la utilización de la energía [1.15].

En todo el análisis de destiladores solares tiene particular interés la revisión realizada por Malik et al [1.12], en la que se describe no sólo el sistema básico sino diversas modificaciones que se analizan a continuación.

1.2.1.1. Variantes

Con objeto de intentar prolongar la producción a lo largo de todo el día, hay propuestas como la de Tiwari y otros [1.16] que se refiere a un evaporador tubular, con la variante de precalentamiento del agua de alimentación utilizando calores residuales de proceso.

Una modificación del canal clásico en el sentido de operar con agua corriente aporta las siguientes conclusiones:

-La producción diaria aumenta con la temperatura del agua de entrada.

-Según sea la relación entre temperaturas se dimensionará la longitud y profundidad del evaporador.

-Asimismo es de interés el funcionamiento con agua en continuo en el sentido de prevención de incrustaciones.

1.2.1.2.Estudio paramétrico

Un estudio paramétrico para identificar el efecto ó la influencia de las diversas variables lleva a las conclusiones que se detallan a continuación:

-Cubierta de plástico. No se han llevado a cabo pruebas rigurosas. Aparentemente con ventajas sobre las de cristal, pero con algunos inconvenientes como son la fragilidad, sobrecalentamiento fusión, У falta de humidificación consiguiente reducción de la transmisión solar, mezcla ocasional de producto y salmuera.

-Variables meteorológicas y del canal. La velocidad del viento tiene una influencia favorable sobre la producción, aumentando ésta a mayores velocidades. Este efecto sin embargo es menos significativo a velocidades altas.

La temperatura ambiente en general mejora la eficiencia, pues al mantenerse altas las temperaturas en general del sistema los coeficientes de transmisión mejoran.

La radiación solar es sin duda el parámetro mas significativo, y la variación de la productividad es casi lineal con aquella.

La distribución de la insolación a lo largo del día es de menor influencia cuando se analiza el comportamiento diario.

Un coeficiente de pérdidas creciente tiene un efecto lógicamente negativo sobre la producción

El establecer una doble cubierta resulta desfavorable, pues ello impide el rechazo de calor al exterior ya que la cubierta es de hecho el condensador del sistema. El factor que controla el proceso es básicamente la diferencia de temperaturas entre el aire y la cubierta.

Por último hay que señalar que el efecto de la capacidad térmica del conjunto no es primordial, aunque tiene cierto efecto marginal. Es recomendable que la profundidad del agua se mantenga en un mínimo, lo que por otra parte implica que las variaciones en su temperatura son mas bruscas que si la capa de agua fuera mas profunda.

Además de los evaporadores convencionales se pueden considerar las siguientes variantes:

- -Multiefecto.
- -Inclinados y de tela mojada.
- -Limpieza rotativa.
- -De calentamiento indirecto.
- -Combinación con invernaderos.

1.2.1.3. Evaporador de multiefecto.

La recopilación de Malik recoge varias propuestas destiladores multiefecto, como las de evaporador de difusión, el tipo chimenea, el de cabeza caliente, los de doble etapa y triple etapa inclinadas. Un análisis comparado teórico-experimental (realizado por Lobo y citado por Malik) para un doble efecto permite obtener una ganancia de hasta un 40 % de producción sobre el evaporador clásico de simple efecto. Por su parte un triple efecto realizado por Cooper y Appleyard [1.55] obtuvo unas productividades de hasta 10 kg/m₂/día con 13000 kJ/m₂/día de exposición energética, lo que mejora notablemente la de un simple efecto. Este evaporador estaba inclinado 45 grados, con una superficie de 0.56 m², y su construcción lógicamente es mas compleja.

Además hay algunas propuestas mas recientes de Toyama et al [1.17 y 1.18] referentes a un sistema de varios efectos en vertical. Unas placas porosas separan los diferentes niveles o efectos. En este caso la producción de agua llega a 21 kg/m²/día con exposición de 25900 kJ/m²/día.

1.2.1.4. Evaporador inclinado.

En este caso el objetivo de lograr mayor eficiencia o productividad mediante una inclinación del captador adecuada para

recibir la máxima radiación, o colocar la cubierta paralela a la superficie del agua para reducir las pérdidas por reflexión, o exponer menor cantidad de agua al sol para aumentar la temperatura máxima a la que aquella se calienta (reducir la inercia).

En un diseño propuesto por Sodha et al [1.19] con varias capas de tela se verificaron las relaciones de Dunkle para este tipo de evaporadores, y se comprobaron eficiencias similares a los casos anteriores de simple efecto, del orden del 30 %, medida como la relación entre la entalpía necesaria para destilar el agua y la energía solar recibida. Este diseño tiene sin embargo la particularidad de que el costo es del orden de la mitad y puede orientarse el captador en cualquier ángulo de elevación.

Toyama et al [1.20] han realizado experiencias de laboratorio relativas a la distribución de agua con una placa inclinada en cuya cara inferior hay una tela mojada, con resultados que mejoran el procedimiento de alimentación al captador.

1.2.1.5.0tras propuestas alternativas

Kudish [1.21] propone un nuevo diseño que substituye los muros de hormigón por plancha de hierro galvanizado, sin que ello afecte a la producción del evaporador, pero reduciendo un 20 % el costo del material y en consecuencia el del agua.

Dobrevsky [1.22] experimenta el uso de una placa porosa flotante en el agua del evaporador, que aumenta la superficie de transmisión e intensifica la evaporación en un 20 %.

Dhiman [1.23] estudia analiticamente el comportamiento transitorio de un evaporador esférico, llegando a conclusiones de mejora en la eficiencia de hasta 30 %.

El precalentamiento del agua de alimentación al evaporador para poder operar de noche es analizado por Tiwari et al [1.16] y Sartori [1.24]. De ellos se desprende que la utilización de energía residual para precalentar el agua de alimentación permite el funcionamiento nocturno, pues mejora la producción al aumentar la temperatura del agua de entrada. Desde otro punto de vista no está claro que sea económicamente interesante incrementar el equipo de la planta con captadores solares clásicos, a pesar del incremento de producción a menos que se disponga de calor residual de proceso.

Existe un análisis de los diversos materiales de cubierta realizado por Tinaut [citado en 1.12] por el que se seleccionaron diversos polietilenos y metacrilatos.

1.2.1.6.Resumen.

A modo de resumen de lo expuesto hasta ahora hay que concluir que las aplicaciones del uso directo de la energía solar térmica han sido limitadas,

ya que las capacidades en plantas de producción han sido pequeñas. No son sistemas de uso muy extendido.

Sin embargo es de destacar que se han desarrollado análisis detallados de simulación de los Evaporadores Convencionales. En estos no se realizan estudios de eficiencia, limitandose en el mejor de los casos a relacionar el equivalente energético de la producción con la energía solar recibida.

1.2.2. Aprovechamiento indirecto de la energía solar

Realizaremos aquí una revisión de la bibliografía y estado de la tecnología de uso indirecto.

De nuevo pueden clasificarse estas instalaciones en relación con la forma en que realizan la captación de energía :

a-Estanques solares. (Solar pond)

b-Captadores planos convencionales (baja temperatura)

c-Captadores de media y alta temperatura - pueden a su vez dividirse en

c1-Captadores planos de tubo evacuado

c2-Captadores de concentración

d-Conversión- generación termoeléctrica- sistemas distribuidos e-Conversión- generación termoeléctrica- receptor central f-Conversión fotovoltaica

Delyannis ha publicado [1.25] una interesante síntesis de la situación de estos procesos. En ella se estudian los diversos tipos, su nivel de desarrollo y sus rendimientos operativos.

1.2.2.1. Estanques o piscinas solares.

Esta puede ser una manera muy interesante de captar y utilizar la energía solar, pues resuelve algunos de los problemas de los captadores clásicos, tal como recoge Al-Zubaidi [1.26].

Guy y Ko [1.27] realizaron un estudio sobre la viabilidad técnica y económica de la combinación de estanques solares y plantas de desalación, térmicas o de membranas. En concreto analizaron cuatro posibles casos combinando plantas de destilación MSF o de membranas OI con alimentación de energía proveniente de estanque solar, de motor diesel o de energía eólica. Los resultados desde el punto de vista económico en lo que se refiere a la tasa de retorno son mejores en el caso de la alimentación diesel o eólica.

Una reciente aportación es la contenida en el estudio de Tleimat y Howe [1.28] que combina estanques solares con desalacion por destilación multiefecto (ME), y que tiene su

origen en la reutilización de drenajes de riego mediante desalación por ósmosis inversa (OI), cuya energía eléctrica proviene de un ciclo Rankine de vapor. Este a su vez toma vapor procedente de estanque solares a los que se aporta salmuera del agua de riego.

El estudio se centra en un análisis paramétrico en que se determina el costo de dicho sistema en relación a varios criterios, entre ellos el de la relación del coeficiente global de transmisión de calor en el evaporador al coste de este evaporador por unidad de superficie de transmisión de calor, relación U/C. Otros parámetros son el número de efectos, temperatura del estanque solar y coste del vapor que procede de éste.

En un estudio previo de los autores se había determinado el coste del vapor procedente de estanques solares, que resulta ser función de la temperatura de la salmuera en la zona baja del estanque y de la diferencia entre las temperaturas de las zonas baja y alta. En este otro estudio se analiza la utilización de ese vapor en plantas de desalación tipo ME. El análisis se realiza para seis escenarios diferentes que combinan dos formas de obtener la salmuera del estanque, disolución de sal en agua o aprovechamiento de salmuera de la planta MED, a diferentes costos en cada caso. Concretamente se estudian costos de la sal de 0, 40 y 200 \$/t y salmuera procedente de una planta ME de economía 20, 10 ó 5.

Las conclusiones indican que los mejores resultados económicos se obtienen con diferencias de temperatura entre las zonas baja y alta de unos 40 °C, naturalmente con sal obtenida de forma gratuita. Asimismo es mas favorable usar altos coeficientes de transmisión de calor, que implican menores costes de capital y de operación además de la ventaja añadida de que aportan mayores caudales de salmuera al estanque favoreciendo que el gradiente salino se obtenga mas rápidamente.

Por su parte Posnansky [1.29] hace referencia a un estanque solar de 250000 m² construido en 1987 cerca del Mar Muerto, a \$ 24/m² y que podría producir 3000 m³/día de agua, con un coste de energía equivalente a \$ 14.5 /barril de petróleo. En una comparación entre costos de producción de agua por ósmosis inversa o con estanques solares para una planta de 10000 m³/día de capacidad, el metro cúbico de agua producida en estanque costaría \$ 1.84 mientras que por ósmosis inversa el costo sería de \$ 2.18/m³.

1.2.2.2. Captadores planos convencionales.

Este grupo incluye una serie de casos en los que el aprovechamiento de la energía solar se lleva a cabo a través de captadores planos sencillos, sin concentración, generalmente combinados con procesos clásicos de desalación. La eficiencia de captación dificilmente supera el 50 % y las temperaturas

alcanzadas en los captadores son tipicamente de unos 60 °C, lo cual obliga a desalar a baja temperatura o a utilizar el aporte solar como precalentamiento, que ha de ser complementado con otra energía adicional.

Crul [1.30] propone una planta basada en captadores planos con almacenamiento de calor con superficie total de 5115 m^2 , y desalación a base de un sistema combinado ME-MSF con capacidad para 600 m^3/d . El análisis económico muestra costos de \$ 3.9/ m^3 , algo mas altos que otros sistemas de destilación solar.

Sousa [1.31] analiza un evaporador de multiefecto basado en humidificación /deshumidificación (así llamada torre de lluvia), cuya energía térmica viene recogida en captadores planos que al operar a menores temperaturas resultan mas eficientes. La productividad en este caso es de 6.5 kg/m²,día para una exposición de 16200 kJ/m²/día, frente a sólo dos kg/m² de evaporadores convencionales, aunque el costo del sistema propuesto se estima en el doble del clásico.

Palacios [1.32] también estudia un sistema de destilación basado en un multiefecto de humidificación, asimismo asistido por captadores planos. El sistema consiste en un conjunto de entre 7 y 14 bandejas dispuestas una sobre otra, y la productividad alcanzada es de 16 litros al día por metro cuadrado de colector plano (no de evaporador, que es la referencia habitual).

1.2.2.3. Captadores planos de tubo evacuado.

En este tipo de captadores se ha eliminado el aire del espacio entre la cubierta y la superficie absorbente y trabajan en vacío, reduciendo así las pérdidas de calor. De esta manera se alcanzan mayores eficiencias y temperaturas de 150 a 200 °C.

Gerofi et al [1.33] desarrollaron captadores de tubo evacuado con intención de probarlos en desalación en una planta que debía producir $12 \text{ m}^3/\text{d}$, con 400 m^2 de captador y 40 m^3 de almacenamiento, aunque la fase final del proyecto fue cancelada.

El-Nashar [1.34 y 1.35] presenta los resultados de operación de una planta con 1862 m² de superficie de captadores evacuados, un sistema de almacenamiento de 300 m³ y un evaporador de multiefecto apilado (MES) con capacidad de 120 m³, cuya producción efectiva fue habitualmente mayor de la prevista con el programa de simulación.

En el caso de Gunzbourg [1.36] se trata de una planta entonces en construcción en el Caribe de 670 m^2 de captador, almacenamiento de 100 m^3 y evaporador multiefecto apilado (MES) de 40 m^3/d .

1.2.2.4. Captadores de concentración

En este grupo se incluyen las instalaciones cuya fuente de alimentación energética esta constituida por captadores de

concentración. Estos paneles alcanzan temperaturas de hasta 400 °C.

El precalentamiento del agua salada antes de pasar a una planta de desalación es una técnica sencilla que mejora la eficiencia energética del conjunto, aunque exige la instalación de extensiones considerables de captador plano, o bien estanques solares. Una experiencia concreta en este terreno se llevó a cabo en Gran Canaria en 1980, concretamente en Arinaga [1.37], con resultados de producción coincidentes con los de proyecto (10 m³/día), aunque con mayor consumo eléctrico del previsto, debido a que una capacidad tan baja de planta impedía ninguna economía de escala.

Moustafa et al [1.38] informan de una instalación en Kuwait cuya toma de energía esta constituida por 220 m² de captadores concentradores lineales (4 unidades de 160 captadores cada una), que aportan calor a una planta MSF de 10 m³/d.

Otra experiencia es la que se esta desarrollando en la Plataforma Solar de Almería consistente en una planta multietapa (14 etapas) cuya aportación energética principal proviene de un campo de captadores curvos. La planta tiene una capacidad de producción de 3 m³/h, con una recuperación de 37.5 %, y consumo eléctrico de 2 kWh/m³ de producto, operando entre 70 y 33 °C. El campo de captación tiene una superficie de 2647 m², con una potencia máxima disponible de 1.2 MW térmicos. Se dispone de una

capacidad de almacenamiento por calor sensible de 5 MWh térmicos, mediante aceite entre 295 y 120 °C. [1.54]

En esta planta se desarrollan tests de tres tipos, para realizar un modelizado de la misma, para determinar el óptimo de operación y para estudiar el comportamiento de la planta fuera de las condiciones nominales de operación.

1.2.2.5.Conversión-generación termoeléctrica. Sistemas distribuidos.

En este caso cada captador tiene su receptor de calor cuya energía se lleva a un almacenamiento central que sirve de foco caliente en una posterior generación eléctrica.

Existe una planta de cogeneración en Sulaibiya, Kuwait, [Moustafa et al, 1.39] con 56x18.3 m² de captadores parabólicos de foco puntual y turbina de tolueno, con producción de 100 kW. y 700 kW., que supone autonomía energética para una explotación agrícola. Se incluyen una planta de ósmosis inversa de 20 mcd, una de MSF de 25 mcd, así como aire acondicionado, pozo, etc. Se desarrolló un modelo para predicción de funcionamiento que permite deducir expresiones analíticas para la producción en función de temperaturas del agua y consumo específico de calor. Asimismo de desarrolló una estrategia operacional para las diversas condiciones de irradiación solar, de modo que dependiendo de la cantidad de radiación captada y por tanto del

agua y energía eléctrica disponible se distribuye en cantidades variables en cada época del año.

Por otra parte Tanaka et al [1.40] informan de un sistema de energía total o cogeneración en Japón que incluye captadores planos inversos mejorados (192 m²), dos tipos de captadores cilindro-parabólicos (216 m² de cada uno) y turbinas de vapor y de freón. La producción es de 15 kW además de 45 kW térmicos mediante vapor a 200 °C. Dependiendo de la climatología y del estado de los acumuladores de calor, el sistema puede operar en tres situaciones: normal, baja insolación y en stand-by. Los resultados son satisfactorios, ya que el sistema funciona correctamente en cualquiera de las situaciones.

1.2.2.6.Conversión-generación termoeléctrica. Receptor central.

Aquí la captación solar se lleva a cabo en heliostatos planos o curvos, que dirigen toda la energía a la torre que actúa como receptor central, cuyo foco puede alcanzar hasta 1900 °C y del cual parte el ciclo convencional de vapor para generación eléctrica.

Esta tecnología se esta usando para desalación en uno de los proyectos que componen el programa SOLERAS, que se comentará mas adelante.

1.2.2.7.Conversión fotovoltaica.

En este caso se produce energía eléctrica mediante paneles fotovoltaicos y posteriormente se emplea en un proceso que puede ser de ósmosis inversa o de electrodiálisis.

Se han instalado dos plantas de ósmosis inversa en Jeddah y Qatar, respectivamente, en ambos casos movidas por paneles fotovoltaicos [Boesch, 1.41]. La primera con una potencia de 8 kW pico en 106 m² y una producción de 5.7 m³/d mientras que la segunda tiene 149 m², 11.2 kW de pico y puede producir 22.7 m³/d. Debido a la alta salinidad del agua de alimentación la conversión (porcentaje obtenido como agua dulce) es muy bajo, lo cual implica altos costos de energía. Por ello y a pesar de la pequeña capacidad, se instaló una bomba de desplazamiento positivo para recuperación de la energía del rechazo de las plantas. En ambos casos se dispone de almacenamiento en baterías de plomo.

Por su parte Kuroda [1.42] ha desarrollado una planta de demostración por electrodiálisis de 10 m³/día para agua de mar operando desde 1986 sobre un suministro fotovoltaico de 25 kW pico. Esta instalación tiene la particularidad de que elimina sales del agua en cantidad variable, dependiendo de la potencia eléctrica disponible de las células fotovoltaicas, y aprovechando la circunstancia de que el rendimiento en términos de producción en un proceso de electrodiálisis depende de la intensidad aplicada, para una tensión fija.

Otro sistema mas pequeño se ha instalado en el desierto indio del Thar, con 0.18 m² con 450 W pico y 1 m³/d de producción, con alimentación salobre de unas 5000 ppm [Adiga 1.43]. En este caso se ha prescindido de baterías para abaratar el costo del sistema, de modo que el funcionamiento es variable según la potencia aportada por las células fotovoltaicas y sólo opera de día. Específicamente la calidad del agua producto empeora cuando la potencia disminuye.

Dentro del Programa de Demostración de Energía de la Comunidad Europea se aprobó en 1986 una instalación de desalación por ósmosis inversa movida por energía fotovoltaica, en Isleta del Moro, Almería. Aún pendiente de instalación, el proyecto incluye 648 modulos fotovoltaicos con una potencia de 23500 Wp a 220 Vcc; una planta de ósmosis inversa de 2.5 m³/hora de producción tratando agua de 7000 ppm y con un consumo de 6.75 kW y un acumulador electroquímico de 2260 Ah a 220 Vcc. La propuesta fué presentada por Gomar SL, con la participación de AEG, Junta de Andalucía y Ministerio Federal de Investigación y Tecnología.

1.2.2.8.Programa SOLERAS

El programa SOLERAS responde a un acuerdo entra los Estados Unidos y Arabia Saudí para desarrollo de tecnología solar en varias facetas. Comprende un amplio programa de cooperación en

energía solar, y no solo en desalación. En esta aplicación especifica hay cinco grandes proyectos.

Es de notar que uno de los proyectos del programa [1.44 y 1.45] utiliza la congelación como método de producción de agua, ya que hasta ahora no se conocen instalaciones comerciales de dicha tecnología a pesar de su interés desde el punto de vista de bajo consumo de energía. Esto es debido a problemas de separación entre los cristales de hielo formados y la salmuera en que nadan. En el caso de referencia se presentaron problemas con la captación solar por malfuncionamiento del sistema de seguimiento, lo cual obligó a aportar una cantidad de energía fósil que en muchos meses fue mayor que la solar.

Por otra parte en este proyecto se han efectuado análisis de eficiencia energética y exergética (Primera y Segunda Leyes de la Termodinámica), lo cual aporta una interesante información ya que no es habitual en la literatura [1.42]. Como resultado de dicho análisis se determinan eficiencias exergéticas para cada subsistema que varían entre 25 % para el reflector del colector y de 97 % para el sistema de distribución. Para el sistema de desalación por congelación en concreto la eficiencia exergética es de 81 a 85 % dependiendo de la temperatura de trabajo, es decir de la época del año.

1.2.2.9. Nociones sobre costos.

A título meramente informativo puede decirse que para los costos de evaporadores convencionales se dan cifras que oscilan entre $$16.5/m^2$ y $$35/m^2$, ambos citados en [1.21].

En cuanto a sistemas indirectos, los termoeléctricos oscilan entre \$ 10000 y 30000 /kWe. Los estanques solares alrededor de \$ 4200 /kWe y las instalaciones fotovoltaicas unos \$ 12000 /kWe.

Es difícil hacer una comparación de costos. Habría que hacerla en base a costo por unidad de energía producida. Andujar y Genthner [1.56] producen una comparación en términos de costo exergético, concluyendo que en capacidades por debajo de 100 m³/día la energía solar puede ser competitiva frente a otros procesos.

1.2.2.10.Resumen.

De esta revisión se desprende que existe un creciente interés por algunos de estos sistemas de uso indirecto; en general estos procesos tienen productividades de agua mas altas y además se diseñan para mayores capacidades, aunque con un carácter mas centralizado.

Una consideración que si puede hacerse de forma general para los sistemas vistos hasta ahora es que no hay un parámetro de comparación energético ni económico que sea válido para todos. Otro tipo de plantas lo tienen, aún cuando no sean del todo comparables (relación de economía en las plantas térmicas o consumo eléctrico específico en procesos electromecánicos). En consecuencia resulta conveniente disponer de un índice de comparación que en procesos fuertemente dependientes de la energía debe estar basado en la eficiencia de uso de aquella.

1.3.CONSIDERACIONES SOBRE LA OPORTUNIDAD DE ESTE TRABAJO

Los comentarios a la escasez de recursos esbozados en los párrafos anteriores nos llevan a suponer que en principio puede ser oportuno desarrollar líneas de investigación que pretendan proponer soluciones técnicas al problema de la poca disponibilidad de agua mediante procesos de desalación, en particular si pueden utilizarse como fuentes de energía los únicos recursos de que disponemos prácticamente en las Islas: las energías renovables. Resulta atractivo estudiar y conocer las posibilidades de producir agua utilizando, en este caso, la energía solar como aportación exclusiva ó al menos predominante.

Esta línea de actuación se entronca con la idea, hoy día generalmente aceptada, de que la Universidad debe situarse lo mas cerca posible de las necesidades de su entorno, de forma que pueda colaborar en la medida de sus posibilidades a la solución de los problemas planteados al medio social en que se inserta.

En este caso, el del agua es un problema enormemente complejo y polémico, que ha provocado fuertes conflictos. A pesar de sus limitaciones, la institución universitaria debe aportar su esfuerzo para aliviar al menos esas tensiones.

En esa misma línea de actuación, la Universidad no debe operar sola y aislada de otros entes, sino que por el contrario debe integrarse con organizaciones con las que pueda colaborar de una u otra manera. En el trabajo al que hacemos referencia en esta Memoria, se ha colaborado con una Sociedad pública con plena actividad en el campo de la energía, y por los aspectos que puedan haber en común, en la producción de agua.

Por último señalar que, por las razones de enorme interés social y carácter polémico de los estudios sobre abastecimiento de agua, parece conveniente anotar desde un principio las limitaciones propias de este trabajo. Y la fundamental en este caso es que, por motivos que se explican con detalle mas adelante, la capacidad de producción de agua en sistemas basados en energía solar es siempre limitada en relación con la superficie,

La orientación es mas bien hacia aplicaciones de demanda reducida, o usos específicos agrarios donde no sea posible o aconsejable el uso de otros sistemas.

1.4.OBJETO

El objeto del trabajo que da origen a esta Memoria es fundamentalmente el de valorar las posibilidades de la destilación solar, revisando una serie de procesos y analizando sus características. Mas en particular se ha entrado en una variante de la destilación, evaluando su interés teórico y práctico, con idea de proponer un sistema que se considere óptimo dentro de su ámbito de posibilidades.

REFERENCIAS

- [1.1] Jiménez, J, El agua en Canarias: Recursos hidráulicos municipales, Jornadas municipales de abastecimiento de aguas, Telde, Octubre 1988.
- [1.2] Avances de Planes Hidrológicos Insulares, Tenerife y Gran Canaria, 1989. [1.3] Boletín Mensual de Hidrocarburos, INH.
- [1.4] Evolución del consumo interior de combustibles, Consejería de Industria y Energía del Gobierno de Canarias.
- [1.5] G.O.G. Löf, Solar distillation, en Principles of desalination, segunda ed, editado por K.S. Spiegler y A.D.K. Laird, Academic Press, 1980.
- [1.6] F. Kreith y W. Luft, An overview of solar desalination technologies, Proceedings Solar Desalination Workshop, vol I, p 13, Solar Energy Research Institute, Denver, Colorado, 1981.
- [1.7] G.G. Fenton, Solar distillation, en Desalination technology, Developments and practice, editado por A. Porteous, Applied Science, 1983.
- [1.8] A. Delyannis y E. Delyannis, Recent solar distillation developments, Desalination, vol 45, p 361, 1983.
- [1.9] S.G Talbert, J.A Eibling y G.O.G. Löf, Manual on solar distillation of saline water, R&D Report 546, Office of Saline Water, US Department of the Interior, 1970.

- [1.10] Tecnología para aprovechar la energía solar, ONUDI, Nueva York, 1979.
- [1.11] A.I.D Desalination manual, IDEA, Washington, 1981.
- [1.12] M.A.S.Malik, G.N.Tiwari, A.Kumar, M.S.Sodha, Solar distillation, Pergamon Press, 1982.
- [1.13] R.V. Dunkle, Solar water distillation; the roof type still and a multiple effect diffusion still, ASME International Conference on Heat Transfer, University of Colorado, part V, p 895, 1961.
- [1.14] R.N. Morse y W.R.W. Read, A rational basis for the engineering development of a solar still, Solar Energy, vol 12, p5, 1968.
- [1.15] G. Frick y J. Hirschmann, Theory and experience with solar stills in Chile, Solar Energy, vol 14, p 405, 1973.
- [1.16] G.N. Tiwari y A. Kumar, Nocturnal water production by tubular solar stills using waste heat to preheat brine, Desalination, vol 69, no 3, p 309, 1988.
- [1.17] S. Toyama, T. Aragaki, K. Murase y K. Tsumura, Simulation of a multi
- effect solar distillation, Desalination vol 45, p 101, 1983.
- [1.18] S. Toyama, T. Aragaki, H.M. Salah y K. Murase, Dynamic characteristics of a multistage thermal diffusion type solar distiller, Desalination, vol 67, p 21, 1987.
- [1.19] M.S. Sodha, A. Kumar y G.N. Tiwari, Utilization of waste hot water for distillation, Desalination, vol 37, 1981.

- [1.20] S. Toyama, M. Nakamura, H.M. Salah, S. Futamura y K. Murase, Laboratory test of solar distillator with a heat penetrating plate having a bend, Desalination, vol 67, p 67, 1987.
- [1.21] A.I. Kudish, J. Gale e Y. Zarmi, A low cost design solar desalination unit, Energy Convers Mgmt, vol 22, p 269, 1982.
- [1.22] I. Dobrevsky y M. Georgieva, Some possibilities for solar evaporation intensification, Desalination, vol 45, p 93, 1983.
- [1.23] N.K. Dhiman, Transient analysis of a spherical solar still, Desalination, vol 69, no 1, p 47, 1988.
- [1.24] E. Sartori, On the nocturnal production of a conventional solar still using solar pre-heated water, Proceedings ISES Solar World Congress 1987, vol 2, Pergamon Press, 1988.
- [1.25] E.E. Delyannis, Status of solar assisted desalination: a review. Desalination, vol 67, p 3-19, 1987.
- [1.26] A.A. Al-Zubaidi, Seawater distillation utilising salt-gradient solar pond energy systems- A review paper. IDA Magazine, vol 1, no 5, 1987, p 17.
- [1.27] D.B. Guy y A. Ko, The technical and economic feasibility of using solar gradient ponds as an energy source for thermo and membrane desalting plants, Technical Proceeding, vol 1, Water Supply Improvement Association, 10th Annual Conference, Honolulu, 1982.
- [1.28] M.C. Tleimat y E.D. Howe, The use of energy from saltgradient solar ponds for reclamation of agricultural drainage

water in California: Analysis and cost prediction, Solar Energy, vol 42, num 4, p 339-349, 1989.

- [1.29] M. Posnansky, Technical and economical aspects of solar desalination with particular emphasis on solar pond powered distillation plants, Desalination, vol 67, p 81, 1987.
- [1.30] B.A. Crul y P.R. Bom, New aspects in solar powered seawater distillation, Desalination, vol 55, p 55, 1985.
- [1.31] H.J.T. Sousa y V. Janish, Solar desalination based on the multi-cycle concept, Desalination, vol 67, p 75, 1987.
- [1.32] L. Palacios y J.L. Fernandez, Pilot solar facility for sea water distillation based on vapor-pressure principle, Proceedings ISES Solar World Congress 1987, Pergamon Press, vol 2, 1988.
- [1.33] J.P. Gerofi, The Sydney University solar desalination pilot plant design, Desalination, vol 45, p 375, 1983.
- [1.34] A.M. El-Nashar y A.M. ElBaghdadi, Seawater distillation by solar energy, Desalination, vol 61, p 49, 1987.
- [1.35] A.M. El-Nashar, Summer and winter performance of the solar desalination plant of abu Dhabi. UAE, IDA Magazine, vol 1, no 4, p 17, 1987.
- [1.36] J. de Gunzbourg y T. Froment, Construction of a solar desalination plant (40 mcd) for a French Caribbean island, Desalination, vol 67, p 53, 1987.
- [1.37] Planta desaladora de agua de mar con energia solar de Arinaga, Centro de Estudios de la Energía, 1982.

- [1.38] S.M.A. Moustafa, D.I. Jarrar y H.I El-Mansy, Performance of a self regulating solar multistage flash desalination system, Solar Energy, vol 35, no 4, p 333, 1985.
- [1.39] S.M.A. Moustafa, H. El-Mansy, A. Eliman y H. Zewen, Operational strategies for Kuwait's 100 kW. / 0.7 MW. solar power plant, Solar Energy, vol 34, no 3, p 231, 1985.
- [1.40] T. Tanaka, I. Tsuda y T. Tani, Development of a solar total energy system in Japan, Solar Energy, vol 37, no 1, p 55, 1986.
- [1.41] W.W. Boesch, Solar powered seawater reverse osmosis systems design considerations, Proceedings 10 WSIA Conference, vol 1, 1982.
- [1.42] O. Kuroda, S. Takahashi, S. Kubota, K. Kikuchi, Y. Eguchi, Y. Ikenaga, N. Sohma, K. Nishinoiri, S. Wakamatsu y S. Itoh, An electrodialysis sea water desalination systems powered by photovoltaic cells, Desalination, vol 67, p 33, 1987.
- [1.43] M.R Adiga, S.K. Adhikary, P.K. Narayanan, W.P. Harkare, S.D. Gomkale y K.P. Govindan, Performance analysis of photovoltaic electrodialysis desalination plant at Tanote in thar desert, Desalination, vol 67, p 59, 1987.
- [1.44] G. Hamad, Yanbu solar-powered seawater desalination pilot plant-problems encountered and experience gained, Proceedings ISES Solar World Congress 1987, vol 2, Pergamon Press, 1988.
- [1.45] A.R. Al-Ibrahim, H.A. Gari y M.C. Gupta, Performance characteristics of the dual-tank thermal storage subsystem of the

- solar-powered water desalination pilot plant at Yanbu, Proceedings ISES Solar World Congress 1987, vol 2, Pergamon Press, 1988.
- [1.46] G. Hamad, Second law analysis of a solar-powered seawater desalination pilot plant, Proceedings ISES Solar World Congress 1987, vol 2, Pergamon Press, 1988.
- [1.47] W.N. Grune, y I. Zandi, Improved solar still process for desalting sea and brackish waters, Journal AWWA, p 993, ago 1960.
- [1.48] W.N. Grune, R.B. Hughes y T.L. Thompson, Operating experiences with natural and forced convection solar stills, Water & Sewage Works, p 378, 1961.
- [1.49] W.N. Grune, R.B. Hughes y T.L. Thompson, Forced-convection, multiple effect solar still for desalting sea and brackish waters, UN Conference on New sources of energy, Rome, p 205, 1961.
- [1.50] W.N. Grune, R.B. Hughes y T.L. Thompson, Natural and forced convection solar stills, Journal of the Sanitary Eng. Div., Proceedings ASCE, p 3036, 1962.
- [1.51] W.N. Grune, R.A.Collins, R.B. Hughes y T.L. Thompson, Development of an improved solar still, Office of Saline Water R&D report no 60, US Department of the Interior, 1962.
- [1.52] P.H. Koske, N.P. Schmidt, An economic foil-based solar still for seawater desalination. Design concept and operating results, Proceedings ISES Solar World Congress 1987, vol 2, Pergamon Press, 1988.

- [1.53] K. Ruess, Sea water desalination and irrigation with a mixture of air and water vapour, Comunicación personal, 1989.
- [1.54] Segundas Jornadas sobre Tratamiento y Suministro de Agua, Plataforma Solar de Almería, Julio 1989.
- [1.55] P.I. Cooper, Appleyard, The construction and performance of a three effect, wick type, tilted solar still, Sun at Work, vol 12, (1), p 4, 1967.
- [1.56] J.M. Andujar, K. Genthner, Analysis of the solar thermal desalination process: potential for competitiveness. Segundas Jornadas sobre Tratamiento y Suministro de Agua, Plataforma Solar de Almería, Julio 1989.

CAPITULO 2.PROCESOS DE DESALACION SOLAR

En este capítulo se realizará una descripción de los procesos existentes para desalación solar, estudiando las características generales y algunos ejemplos concretos de los sistemas que hasta ahora se han utilizado o han sido propuestos para la producción de agua dulce a partir de aguas saladas y utilizando la energía solar como aportación principal o exclusiva, según los casos.

2.1.GENERALIDADES SOBRE LA APLICACION DE ENERGIA SOLAR A LA DESALACION DE AGUAS.

Las razones para el uso de energías renovables (no fósiles) en la producción de agua son variadas:

- Costos en general elevados, y de carácter muy variable, de los combustibles fósiles.
 - Falta de suministro energético en algunas zonas aisladas.
- Interés de aprovechar los recursos propios o lo que es lo mismo, conservar los recursos fósiles en la medida de lo posible.
 - Ventajas añadidas de una menor incidencia medioambiental.

Por otra parte, aunque pueda parecer que las instalaciones necesarias para el aprovechamiento en desalación de las energías renovables son muy simples, lo cierto es que tienen cierta complejidad, particularmente en la interfase captación energética - desalación, dado el carácter naturalmente cambiante con el tiempo de la fuente de energía.

La utilización de energía solar (E.S.) para la producción de agua dulce esta sometida a las limitaciones que en general se imponen a cualquier aplicación de dicha fuente, y que son derivadas de su carácter enormemente distribuido.

Dadas las dificultades que aparecen en el aprovechamiento de las energías renovables, la tecnología de uso está lejos de ser sencilla si se compara con otras fuentes energéticas. En el objetivo de obtener resultados similares en términos de eficiencia con unas energías variables, poco controlables y difíciles de captar se esconde el auténtico reto de aplicación de estas fuentes.

2.1.1.Distribución superficial de la energía solar.

El Sol puede considerarse a efectos de radiación como un cuerpo negro a temperatura de 5777 K y emitiendo una enorme potencia de unos 60 MW/m². Esta radiación esta concentrada en la región de baja longitud de onda del espectro térmico, entre 0.2 y 3 micras, y con el máximo a 0.5 micras, de acuerdo con la distribución de

Planck. De la potencia emitida solo se reciben en el nivel extraterrestre 1367 W/m² y en el suelo alcanzamos máximos entre 800 y 1000 W/m² en las horas de mediodía. La notable disminución de la potencia se debe a absorción por los gases atmosféricos (ozono, oxígeno, vapor de agua y dióxido de carbono entre otros), y a redireccionamiento de la radiación por choques con particulas en la atmósfera.

En consecuencia la potencia que se recibe tiene un nivel bajo de concentración superficial, lo cual implica en principio un aprovechamiento escaso de la energía solar. Para mejorar la eficacia de aprovechamiento se pueden disponer varias soluciones: la mas evidente sería la de ampliar el área de captación o bien limitar la capacidad de la aplicación. Por otra parte hay que pensar en métodos de concentración de la radiación, además de intentar mejorar en todo caso la eficiencia de los procesos.

2.1.2. Utilización de grandes superficies y limitación de capacidad.

Cualquier proceso de utilización de E.S. es fuertemente dependiente de la superficie de captación puesta en juego. La mejora de capacidad global del sistema de que se trate puede basarse en ampliar la superficie captadora. Con esto se consigue naturalmente mayor producción a costa de utilización de mas terreno. Sin embargo en el caso de la destilación solar directa

la ampliación de superficie captadora plana a partir de un determinado nivel no tiene mayores ventajas, puesto que la economía de escala no tiene especial incidencia.

Por otra parte y dado que existe un máximo de aportación energética por unidad de superficie, se produce una limitación a la producción de agua también por unidad de superficie. Ambas magnitudes vendrán relacionadas fundamentalmente por el valor de la entalpía de evaporación necesaria, o en general del consumo específico de energía, según el proceso que se esté utilizando. Con una determinada cantidad de energía por metro cuadrado solo es posible producir un cierto volumen de agua. Volumen de agua que a su vez quedará afectado por la eficiencia de captación y utilización de la energía recibida. La producción unitaria depende en definitiva del nivel de radiación y de la eficiencia energética del proceso.

2.1.3. Concentración de la radiación.

Otra de las alternativas para la mejora de la utilización de energía solar es la instalación de captadores curvos o heliostatos (planos o curvos), que disponen de una superficie relativamente amplia de apertura a la radiación que es reflectante o refractante y que concentran el flujo incidente sobre una zona mas pequeña, llamada área de captación. El factor de concentración, como índice de medida y comparación, se define

precisamente como la relación entre las superficies de apertura y la de captación. Esta última suele ser un foco lineal o puntual, y puede estar totalmente iluminada o no. Los factores de concentración varían entre 10 y 5000. Para conseguir una mayor captación de energía se hace necesario disponer un mecanismo que permita a la superficie de captación seguir a la dirección de la radiación solar a lo largo de todo el día.

Desde este punto de vista los captadores se suelen agrupar en tres grandes familias:

- -Planos, con factor de concentración uno.
- -Con factor de concentración bajo, entre 2 y 10, que no requieren seguimiento.
- -Con factor de concentración mayor de 10, que requieren seguimiento.

Mas específicamente se pueden clasificar los captadores atendiendo a tres criterios:

- -Temperatura de operación.
- -Nivel de seguimiento : intermitente o continuo.
- -Tipo de seguimiento : en un solo plano o en dos.

Los tipos de captadores son:

- -concentradores parabólicos de canal PTC
- -lentes o espejos de Fresnel
- -concentrador parabólico compuesto CPC
- -captadores tubulares evacuados (de vacío)

-heliostatos que dirigen la radiación hacia un punto determinado

En la tabla 2.1. aparecen los diversos tipos de captadores concentradores con sus características.

Tabla 2.1. Características de diversos captadores solares

			· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
Tipo	Factor de	Temperatura	Eficiencia
	concentración		
Cilindro-parabólico	20 a 100	60 a 350	60
Lente Fresnel lineal	10 a 40	60 a 350	60
Lente Fresnel puntual	100 a 1000		
Parabólico	100 a 5000		
Heliostato	< 1000		

2.1.4. Condiciones de aplicación.

Dados los condicionantes expuestos hasta ahora, pueden resumirse dos aspectos del problema.

a) Existe un máximo de producción unitaria que depende de la radiación solar recibida (exposición energética) y de la eficiencia con que se lleve a cabo la conversión de energía, incluyendo en este punto la concentración de la radiación.

b) Por razones económicas, no se puede aumentar indefinidamente la superficie de captación, lo cual establece a su vez un límite a la capacidad de producción de las instalaciones proyectadas.

En consecuencia las circunstancias y características de utilización de energía solar para producción de agua dulce serían:

-Climatología adecuada.

-Capacidad limitada, al menos cuando las formas de captación son las clásicas (conversión directa). De hecho no se han construido plantas de más de 100 m³/día de producción. Para capacidades mayores se ha recurrido hasta ahora a procesos de utilización indirecta.

-Disponibilidad de terrenos a costo razonable en zonas de costa.

-En los casos de destilación directa, mano de obra poco cualificada, utilización de materiales comunes y falta de energía eléctrica barata.

Hay otra aplicación que puede modificar estas consideraciones y es la de utilizar terrenos de cultivo para producción de agua de riego, aprovechando los propios invernaderos.

2.2. DESCRIPCION DE LOS SISTEMAS DE DESALACION SOLAR

Los sistemas de desalación solar que se van a describir y estudiar aquí corresponden a la clasificación utilizada en el Capítulo 1 y que es la siguiente:

- -Desalación directa o en sistemas pasivos.
- -Desalación indirecta o en sistemas activos.
- -Precalentamiento del agua salada con captadores planos o de concentración.
 - -Generación termoeléctrica y posterior desalación
 - -Generación fotovoltaica y posterior desalación

Naturalmente que todos los procesos que se van a comentar, deben ajustarse al esquema básico de los fenómenos de separación, con las transferencias asociadas de masa y energía. En efecto, todo proceso de producción de agua dulce supone la separación del agua salada (alimentación) en dos fases: agua dulce (producto) y salmuera (rechazo) donde se concentran todas las sales. Para efectuar esta separación se requiere la aportación de la energía correspondiente, en cantidad mayor que la mínima termodinámica.

2.3.APROVECHAMIENTO DIRECTO DE LA ENERGIA SOLAR. PROCESOS DE CONVECCION NATURAL.

2.3.1. Evaporador convencional

2.3.1.1.Descripción

El proceso mas antiguo de destilación de agua es el que llamamos de convección natural (o de tejado, y al que nos referiremos como Evaporador Convencional, EC.). En esencia consiste en reproducir el ciclo natural del agua, que incluye evaporación desde el agua salada por efecto de la insolación, y posterior condensación para recoger como liquido el agua dulce. En la mayoría de los casos dicho proceso se lleva a cabo en canales de cubierta transparente a la radiación solar. El modo de operación viene explicado en la figura 2.2., de manera que la energía absorbida por el agua en el fondo la calienta y se evapora una parte. El vapor se difunde hasta la cubierta, que por estar mas fría actúa como condensador, de forma que la humedad del aire cae por la pared inclinada y se recoge en las canaletas laterales. La cubierta actúa además como reductora de pérdidas al exterior, pues la convección forzada sobre el fondo es impedida por la cubierta. Suele denominarse a los evaporadores

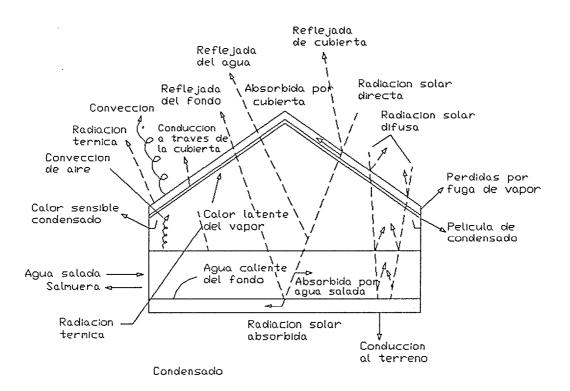


Figura 2.2. Seccion del evaporador solar y diagrama de flujos de energia.

convencionales como de "efecto invernadero", por el hecho de que el grueso de la radiación queda atrapada dentro del dispositivo, además de la circunstancia casual de la similitud en la forma constructiva.

El efecto invernadero se deriva de la ley de Planck que establece la relación entre la energía E emitida por un cuerpo negro a determinada longitud de onda y la temperatura, según la ecuación

Esta expresión indica que la emisión del cuerpo negro, para cada temperatura, tiene un máximo en una cierta longitud de onda, según se desprende de la figura 2.3. que muestra la distribución espectral de la radiación emitida.

La longitud de onda que corresponde al máximo de emisión se determina fácilmente, y se llega a la conclusión expresada por la ley del desplazamiento de Wien, que especifica que la longitud de onda que da la máxima energía es inversamente proporcional a la temperatura según

La curva de máximos viene también en la figura 2.3.

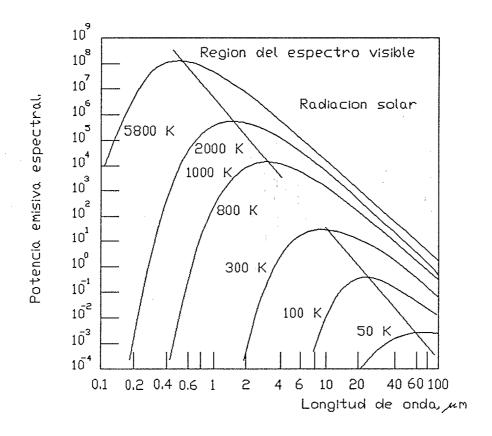
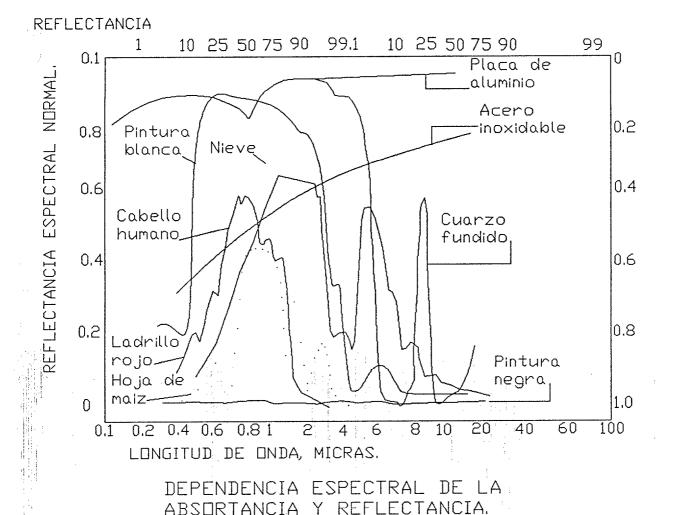


Fig.2.3, POTENCIA EMISIVA ESPECTRAL DEL CUERPO NEGRO.



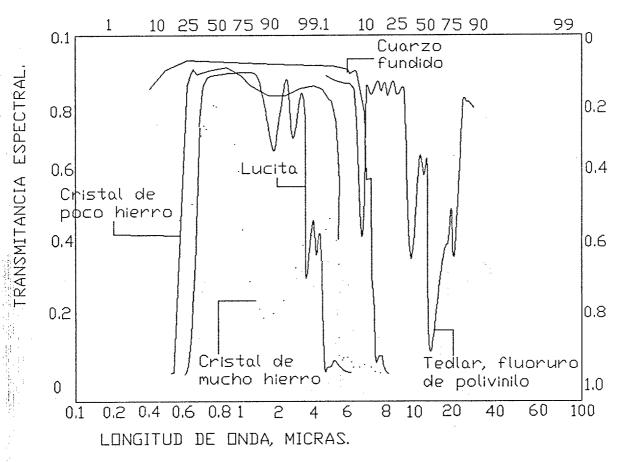


Figura 2.4. DEPENDENCIA ESPECTRAL DE LA TRANSMITANCIA ESPECTRAL DE MATERIALES SELECCIONADOS.

La transmitancia de los cuerpos a la radiación sigue un patrón inverso, pues es mayor a bajas longitudes de onda y decrece al aumentar aquellas. En la figura 2.4. se representa esta variación.

La forma habitual de la variación es la de una alta transmitancia, del orden de 95 % en niveles de longitud de onda de hasta unas 3 micras, y transmitancias muy bajas, menores de 5 %, por encima de la citada longitud.

Si se comparan las dos curvas se observa que la zona de bajas longitudes de onda corresponde a la radiación de alta temperatura, y en ese rango la transmitancia es buena. Por el contrario a longitudes mas altas, que corresponden a radiaciones de baja temperatura, la transmitancia es muy baja.

La consecuencia es inmediata. Los cuerpos que reciban radiación a alta temperatura (solar) la transmitirán fácilmente, pero si esta radiación llega a otros cuerpos (agua, metal, etc) que se calientan y la emiten a menor temperatura, la longitud de onda predominante en esta radiación devuelta será mayor, y la primera superficie tendrá una transmitancia muy pobre a esa baja temperatura. La radiación habrá quedado atrapada entre las dos superficies.

El proceso de destilación directa se lleva a cabo normalmente en canales cerrados, de forma que se opera en forma discontinua o por cargas. De modo que se llena el canal hasta una cierta altura de agua (entre los 3 y 20 cm) y se deja que se vaya

evaporando hasta que lo haya hecho aproximadamente la mitad del contenido. Entonces se drena el canal de salmuera, y se vuelve a llenar con agua salada para iniciar un nuevo período.

La distribución de la energía absorbida en un EC puede estimarse como sigue en la tabla 2.2. [1.12]

Tabla 2.2.Distribución de energía absorbida en un evaporador clásico

	Porcentaje de	
	radiación solar	
Evaporación de destilado (eficiencia)	31	
Pérdidas de calor al terreno y laterales	2	
Radiación reflejada del evaporador	11	
Radiación absorbida por la cubierta	5	
Radiación del agua a la cubierta	26	
Convección interna	8	
Reevaporación de destilado y otras	17	
	100	

2.3.1.2. Eficiencia solar

En los destiladores solares hay que hablar mas de eficiencia que de capacidad de producción ya que esta última es muy variable con la radiación, mientras que la eficiencia es la relación entre el equivalente energético de la primera y la segunda, y es mejor parámetro de comparación al estar corregido según las condiciones de entrada de energía. En los casos de aire en circulación que estudiaremos posteriormente influye también la humedad y temperatura del aire ambiente.

Un valor típico de eficiencia simple es del 30 % con lo que la producción media en las condiciones canarias habituales es del orden de 2.6 $kg/m^2/d$ ía ($L/m^2/d$)

La eficiencia que se ha citado es sencillamente la relación entre la energía de evaporación necesaria para producir el agua y la energía recibida. Esta y otras formas de evaluar la eficiencia se estudian con detalle mas adelante.

Además de los evaporadores convencionales en su configuración basica se pueden considerar las siguientes variantes:

- -Multiefecto.
- -Inclinados y de tela mojada.
- -Limpieza rotativa.
- -Combinación con invernaderos.

Por otra parte y atendiendo a su expectativa de vida y/o aplicación pueden clasificarse en permanentes (cubierta de

vidrio), semipermanentes (cubierta de plástico) y expandibles (de doble tubo o flotantes).

2.3.2. Evaporador de multiefecto.

El objetivo fundamental de un sistema multiefecto sería, por analogía con cualquier proceso de destilación, el de mejorar la eficiencia del proceso, produciendo mas agua por unidad de energía absorbida.

En la figura 2.5. se recoge el esquema de lo que sería un evaporador multiefecto, donde se sobreponen tres placas absorbedoras de energía, de forma que el calor cedido en una de ellas en la condensación del vapor sirve como aportación a la siguiente bandeja.

La recopilación de Malik recoge varias propuestas, como las de evaporador de difusión, el tipo chimenea, el de cabeza caliente, los de doble etapa y triple etapa inclinadas. Un análisis comparado teórico-experimental para un doble efecto lleva, entre otras, a la conclusión de que las eficiencias pueden aumentar hasta en un 34 % sobre las de simple efecto.

2.3.3. Evaporador inclinado.

En este caso el objetivo de lograr mayor eficiencia o productividad mediante una inclinación del captador adecuada para

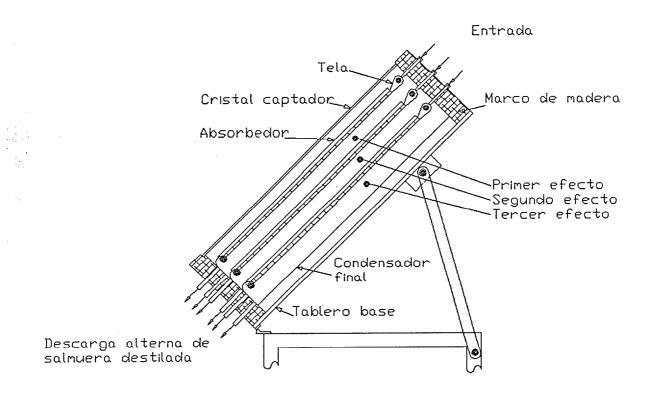


Figura 2.5. SECCION DE EVAPORADOR MULTIEFECTO.

recibir la máxima radiación, o colocar la cubierta paralela a la superficie del agua para reducir las pérdidas por reflexión, o exponer menor cantidad de agua al sol para aumentar la temperatura máxima a la que aquella se calienta (reducir la inercia).

Algunos casos clásicos son los de bandeja inclinada o de escalones, los de múltiple bandeja y los de tela mojada inclinada. Este último aparece en la figura 2.6.

2.3.4. Combinación con invernadero.

La utilización de invernaderos y el desarrollo de técnicas de conservación de agua han hecho posible la práctica de la agricultura en escala moderada aun cuando no se disponga mas que de agua salada. Esto se logra con una estructura integrada invernadero-evaporador solar que proporciona un clima térmico apropiado, además de una adecuada elección de cosechas y técnicas de ahorro y conservación del agua. Han habido algunas experiencias con éxito como la llamada de Texas.

2.4.APROVECHAMIENTO INDIRECTO DE LA ENERGIA SOLAR

Estudiaremos aquí los diversos procesos en los que esta incluida la captura o concentración de la radiación.

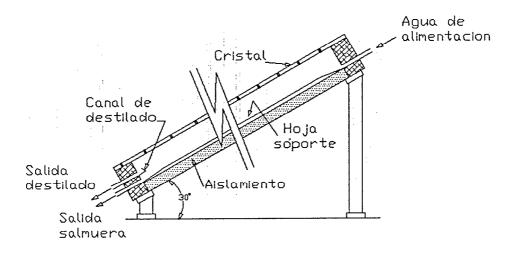


Fig. 2.6. SECCION DE EVAPORADOR DE TELA INCLINADA.

De nuevo pueden clasificarse estas instalaciones en relación con la forma en que realizan la captación de energía :

- -Estanques solares. (Solar pond)
- -Captadores planos convencionales
- -Captadores planos de tubo evacuado
- -Captadores de concentración
- -Conversión- generación termoeléctrica- sistemas distribuidos
- -Conversión- generación termoeléctrica- receptor central
- -Conversión fotovoltaica

2.4.1. Estanques o piscinas solares.

Como se ha dicho, la utilización de estanques solares puede resolver algunos de los problemas de los captadores clásicos que son:

- -Baja densidad de radiación solar.
- -Naturaleza intermitente, que requiere almacenamiento térmico.
- -Necesidad de limpieza de los captadores.
- -Dificultad de transportar la energía almacenada.

Un estanque solar tiene tres zonas: superficie, gradiente y almacenamiento. La primera y última son convectivas y la intermedia es estratificada y no convectiva.

Para la desalación puede utilizarse cualquiera de los procesos de destilación, en particular si se va a tratar agua de mar o muy

salobre. En caso contrario pueden ser mas adecuados otros procesos del tipo de membranas.

Un proceso típico se recoge en la figura 2.7. que combina la captación de energía solar en el estanque, la transferencia de calor al flúido de trabajo y su utilización definitiva en una instalación de destilación clásica.

2.4.2. Captadores planos convencionales. Temperaturas bajas.

Este grupo incluye una serie de casos en los que el aprovechamiento de la energía solar se lleva a cabo a través de captadores planos sencillos, sin concentración, generalmente combinados con procesos clásicos de desalación.

Los captadores planos tienen unas medidas del orden de $1.5 \times 1~\text{m}^2$, fabricados con un cuerpo metálico que incluye una base absorbente de radiación. Esta última puede ser de material selectivo y la cubierta es de cristal. En instalaciones de tipo industrial se requiere un depósito de almacenamiento de calor para las horas de noche y los días de cielo cubierto.

La eficiencia de captación difícilmente supera el 50 % y las temperaturas alcanzadas en los captadores son tipicamente de unos 60 °C, lo cual obliga a desalar a baja temperatura o a utilizar el aporte solar simplemente como precalentamiento, que ha de ser complementado con otra fuente de energía adicional.

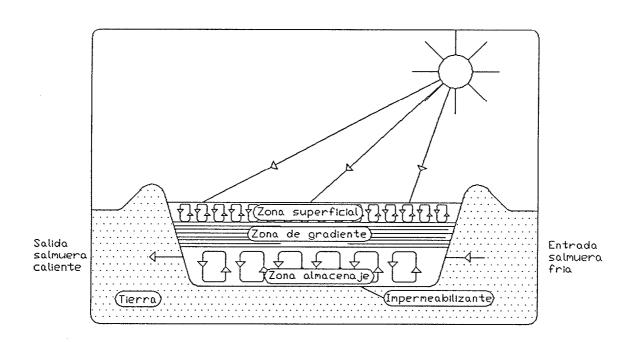


Fig. 2.7. ESTANQUE SOLAR DE GRADIENTE DE SAL.

Para todos los tipos de captadores, ya sean planos o de concentración, se han desarrollado expresiones analíticas que permiten diseñarlos o estudiar su funcionamiento.

2.4.3. Captadores planos de tubo evacuado.

En este tipo de captadores se ha eliminado el aire del espacio entre la cubierta y la superficie absorbente y trabajan en vacío, reduciendo así las pérdidas de calor. Los diseños mas frecuentes son tubulares, y la superficie captadora puede ser plana o también tubular, en cuyo caso el dispositivo es de dos tubos concéntricos. En todo caso hay que sellarlo bien para mantener el vacío.

De esta manera se alcanzan eficiencias del orden de 60 a 70 % y temperaturas de 150 a 200 °C. El resto del sistema de desalación no varía, tal como aparece en la figura 2.8.

2.4.4. Captadores de concentración.

En este grupo entran las instalaciones cuya fuente de alimentación energética esta constituida por alguno de los diversos tipos de captadores de concentración que ya se han mencionado.

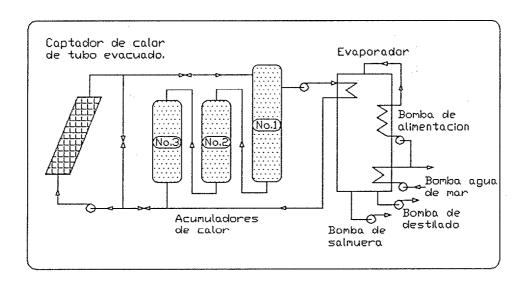


Fig. 2.8. PLANTA DE DESTILACION MULTIEFECTO ASISTIDA POR ENERGIA SOLAR.

Estos paneles operan con eficiencias menores que las de los captadores planos, si bien la concentración de la radiación les permite alcanzar temperaturas de hasta 350 °C.

El precalentamiento del agua salada antes de pasar a una planta de desalación es una técnica sencilla que mejora la eficiencia energética del conjunto, aunque exige la instalación de extensiones considerables de captador plano, o bien estanques solares. El esquema del proceso es el que se representa en la figura 2.9, que corresponde a la ya citada planta de 10 m³/d de capacidad que fue instalada en 1980 en Arinaga, Gran Canaria.

La planta consistía en un campo de 350 captadores cilindroparabólicos, cada uno de ellos de 2 m de largo, con una apertura
de 0.63 m y absorbedor de 20 mm diámetro. El factor de
concentración era de 10.5 ocupando en total 750 m² de terreno.
Los captadores disponían de un sistema de seguimiento solar.

El sistema de desalación era del tipo multietapa flash (MSF) de 12 etapas de recuperación de calor y dos de rechazo con temperatura máxima de salmuera de 90 C. La capacidad proyectada de la unidad era de 10 m³/día, con un consumo de calor de 80 kcal/kg. Los costos estimados en el momento de su instalación eran de 470 PTA/m³ para una producción estandarizada, si bien la planta en cuestión tuvo unos costos mayores (38 millones de pesetas) por su carácter experimental.

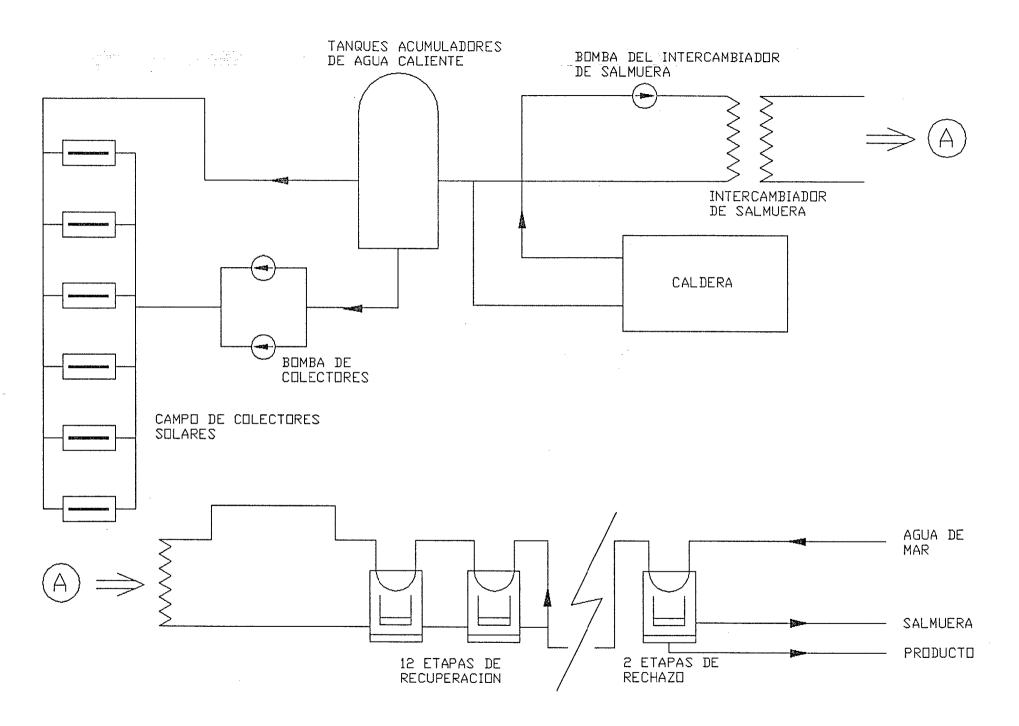


Fig. 2.9. ESQUEMA DE PLANTA SOLAR DE ARINAGA.

2.4.5.Conversión-generación termoeléctrica. Sistemas distribuidos.

En este caso cada captador tiene su receptor de calor cuya energía se lleva a un almacenamiento central que a su vez sirve de foco caliente en una posterior generación eléctrica. La denominación de sistema distribuido se debe a que cada captador aporta una parte del flúido de trabajo que habrá de pasar a un intercambiador de calor y finalmente al turboalternador.

Los captadores no difieren mucho de los ya estudiados en el párrafo anterior, con la única diferencia de que entre la absorción de radiación solar y la utilización final hay unas etapas intermedias de almacenamiento de calor y generación eléctrica normalmente mediante ciclo Rankine (a veces Brayton o Stirling).

Naturalmente que en este caso el proceso de desalación ya no es térmico sino electromecánico, del tipo de compresión de vapor, ósmosis inversa o electrodiálisis.

Un ejemplo sería el de la figura 2.10. en que aparecen los captadores con un tubo central donde se concentra la radiación y calienta un flúido de trabajo. El flúido de cada captador se recoge y reune en un intercambiador para pasar a la turbina. Existen plantas de este tipo en el mundo de hasta 5 MW.

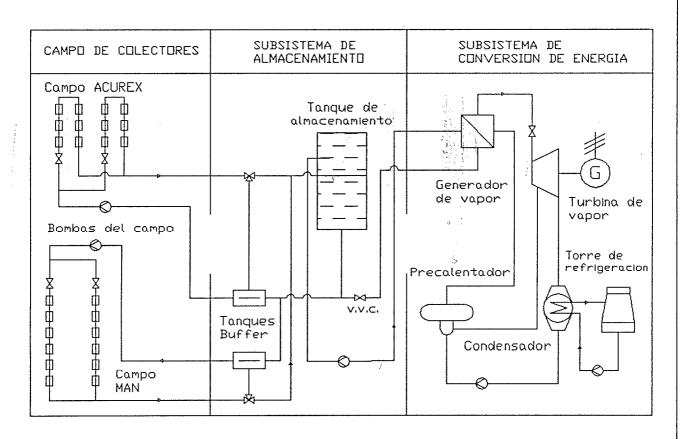


Figura 2.10. DIAGRAMA DE FLUJOS, CENTRAL SSPS/CDS.

2.4.6. Conversión- generación termoeléctrica. Receptor central.

Aquí la captación solar se lleva a cabo en heliostatos planos o curvos, que dirigen toda la energía a la torre que actúa como receptor central. Esta es la diferencia básica con el caso anterior, y es que ahora se centraliza toda la radiación reflejada en un foco que puede alcanzar hasta 1900 °C y del cual parte el ciclo convencional de vapor para generación eléctrica. Figura 2.11.

El campo de heliostatos representa un espejo de Fresnel. Los heliostatos utilizados aquí son habitualmente formados por caras planas, cada uno de ellos con un sistema de orientación y seguimiento al sol.

Hay una planta de este tipo de 10 MW. en Barstow, California. Además esta tecnología se esta usando para desalación en uno de los proyectos que componen el programa SOLERAS, que se comentará mas adelante.

2.4.7. Conversión fotovoltaica.

En este caso se produce energía eléctrica mediante paneles fotovoltaicos y posteriormente se emplea en un proceso electromecánico de desalación que puede ser de ósmosis inversa o de electrodiálisis.

La mayoría de los captadores solares fotovoltaicos son planos, y no es habitual en este caso la concentración, salvo algún caso muy determinado. Esto los lleva a acusar las servidumbres ya comentadas de los captadores térmicos planos: necesidad de mucha superficie de captación ó por el contrario limitación de la capacidad. Por ello las plantas que se han construido hasta ahora y que operan sobre energía fotovoltaica tienen una capacidad limitada.

Un esquema de funcionamiento aparece en la figura 2.12., para una planta de electrodiálisis. En la figura aparecen además de los captadores las baterías de almacenamiento, inversor de corriente continua a alterna, y el diagrama habitual de electrodiálisis.

2.4.8.Proyecto SOLERAS

Una buena parte de las actividades en desalación solar en los últimos años se han venido desarrollando bajos los auspicios del programa SOLERAS (Project Agreement for Cooperation in the Field of Solar Energy) al que nos vamos a referir de forma especifica. Este programa responde a un acuerdo de los Gobiernos de Arabia Saudi y Estados Unidos en 1977, y el Agente Operador es el Solar Energy Research Institute (SERI).

La parte del programa SOLERAS que corresponde a desalación comprende tres fases.

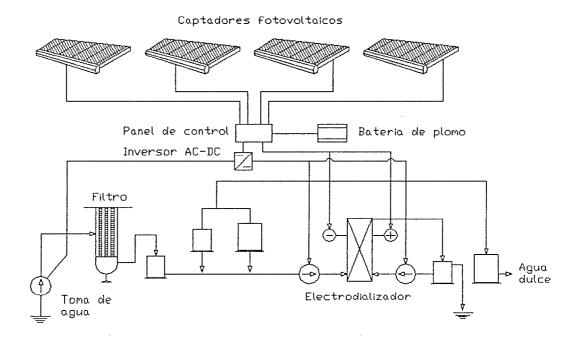


Figura 2.12. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA PLANTA DE CONVERSION FOTOVOLTAICA.

-Fase 1. Diseño de sistemas y análisis de costo preliminares

-Fase 2. Diseño detallado y construcción de planta piloto.

-Fase 3. Operación de planta piloto y formación del personal.

Para la Fase 1 se adjudicaron cinco contratos para otras tantas plantas, que en su mayoría son del tipo de generación electrosolar y posterior desalación mediante ósmosis inversa. Concretamente son los tipos de plantas que figuran en la tabla 2.3.

Tabla 2.3.Instalaciones de desalación solar incluidas en el Programa SOLERAS

Contratista. Boeing Engineering & Construction Co

Tipo de agua. Salobre

Ubicación de la planta. Ranking, Tejas

Tecnología de desalación. Osmosis inversa, simple etapa

Tecnología solar. Heliostatos y receptor central

Area de captación, m². 20448

Temperatura de operación °C. 277-788

Contratista. Catalytic Inc

Tipo de agua. Mar

Ubicación de la planta. Yabu, Arabia Saudi

Tecnología de desalación. Osmosis inversa, doble etapa en serie

Tecnología solar. Eólica y lentes de Fresnel lineales

CAPITULO 2

niversidad de Las Palmas de Gran Canaria. Biblioteca Digital. 2004

Area de captación, m². 12800

Temperatura de operación °C. 204-302

Contratista.

Chicago Bridge & Iron Co

Tipo de agua.

Mar

Ubicación de la planta.

Yabu, Arabia Saudi

Tecnología de desalación.

Congelación indirecta.

Capacidad, m³/día.

210

Tecnología solar.

Captadores parabólicos de foco puntual

Area de captación, m².

43800

Temperatura de operación °C. 253-378

Contratista.

DHR Inc

Tipo de agua.

Mar

Ubicación de la planta.

Yabu, Arabia Saudi

Tecnología de desalación.

Osmosis inversa simple etapa en serie

con electrodiálisis

Tecnología solar.

Captadores

foco

lineal

У

fotovoltaica

Area de captación, m².

56000 y 5000

Temperatura de operación °C. 215-300

Contratista.

Exxon Research & Engineering Co

de

Tipo de agua.

Mar

Ubicación de la planta.

Yabu, Arabia Saudi

CAPITULO 2

Tecnología de desalación. Osmosis inversa doble etapa en paralelo con destilación

Capacidad, m³/día.

3478 y 2520

Tecnología solar.

Heliostatos y receptor central

Area de captación, m².

22800

Temperatura de operación °C. 285-566

2.4.9.Resumen.

Hasta aquí se han analizado los diversos sistemas existentes o propuestos para utilizar la energía solar para desalación de aguas, ya sea de forma que dicha energía es la única fuente o que requiera un complemento. Es momento de recapitular y exponer las conclusiones obtenidas.

Por una parte es claro que las tecnologías clásicas, entendiendo como tales el evaporador convencional en su versión básica o en sus variantes, dan muy bajo rendimiento en términos de productividad de agua. Además hay que notar que no hay una metodología sencilla de análisis de su funcionamiento y resultados esperables.

En cuanto las tecnologías mas modernas de uso indirecto, suponen mejoras en los rendimientos a base de una mayor sofisticación en su diseño y esto implica a su vez mayores

costos. Desde el punto de vista económico estas últimas no son atractivas en tiempos de bonanza de precios energéticos.

Por otro lado al ser de instalación mas reciente en la mayoría de los casos no hay aún suficiente información sobre los resultados de operación.

Nuevamente hay que tener en cuenta que dada la diversidad de formas de aprovechamiento de la energía y de producción de agua no está extendida una metodología de comparación de condiciones y resultados de operación, en particular para el sistema de desalación, por lo que sería de interés desarrollar alguna aplicación de los métodos existentes que permita evaluar comparativamente los diversos procesos.

Entre las dos opciones básicas de desalación solar que se han descrito hasta ahora existe una tercera vía. Se trata de una alternativa intermedia que en principio mejora al evaporador convencional sin llegar a la complejidad de los demás procesos expuestos. A pesar de que existen antecedentes sobre este proceso intermedio, no está suficientemente estudiado y vamos a hacerlo en los siguientes capitulos.

2.5. DESCRIPCION GENERAL DEL PROCESO DE CONVECCION FORZADA

El sistema que hemos estudiado en este trabajo es el que hemos denominado de "evaporación por energía solar en convección

forzada". Como todos los de evaporación, el proceso consta de dos fases consecutivas claramente diferenciadas:

a. La evaporación del agua por efecto del aporte de energía solar recibida y dependiendo de la intensidad de radiación así como de la humedad del aire ambiente. Esta variable tiene una notable importancia y no ha sido tenido en cuenta hasta ahora en estudios previos.

b. La condensación del vapor, que vuelve a la fase liquida, para lo cual se requiere refrigeración exterior en un condensador externo.

En su esquema mas simple, el proceso puede representarse gráficamente de la manera representada en la figura 2.13

Puede apreciarse a la vista de este diagrama como desde el punto de vista energético las dos etapas citadas, evaporación y condensación, constituyen a su vez la absorción y cesión de energía por el sistema.

Una de las características distintivas del mismo es el medio de transporte utilizado entre las dos etapas, y que es precisamente una corriente de aire forzado, el cual se humedece con el vapor procedente del agua salada, y se seca posteriormente al condensar aquel vapor. En este sentido puede denominarse también al proceso como de humidificación - deshumidificación. Esta corriente de aire forzado es la diferencia mas notable, aunque no la única, con el evaporador convencional.

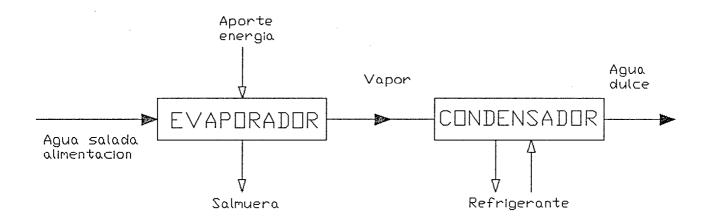


Figura 2.13.

La energía eléctrica necesaria para ventilar el aire constituye una aportación externa, por lo cual no puede considerarse al sistema en rigor como energéticamente autónomo o autosuficiente. Una variante posible es la utilización de captadores fotovoltaicos o aerogeneradores para producir la eléctrica necesaria, haciendo así el sistema totalmente independiente del exterior.

Así pues el equipo básicamente está constituido por un captador solar que actúa como evaporador y un condensador refrigerado por agua salada. En el estudio de detalle que se realizará en capítulos posteriores se analizarán algunas alternativas a este diseño básico.

Otra característica distintiva es la utilización a título experimental de dispositivos que mejoren la evaporación respecto a otros sistemas de funcionamiento. Así en este caso y como se detallará mas adelante, se ha utilizado lapilli volcánico (conocido en las Islas como picón) que en su doble condición de color negro, como absorbente de radiación, y de constitución porosa, que presenta una mayor superficie de transferencia de masa y energía, mejora la evaporación del agua.

A las dificultades señaladas previamente, comunes a todos los procesos de desalación por energía solar, y que se traducen en la limitación de la exposición energética y por tanto en la capacidad de evaporación de agua, hay que añadir ahora la derivada del funcionamiento del condensador externo. En efecto,

este debe ser capaz de absorber todo el calor de condensación de la humedad del aire, de modo que este quede lo mas seco posible, puesto que la humedad condensada será en definitiva la producción de agua dulce del proceso. En la práctica sin embargo, los niveles de temperatura del aire húmedo y del agua de mar que se utiliza como refrigerante impiden llegar a un secado del aire tan bajo como sería de desear.

Como sistema termodinámico el esquema que comentamos resulta un proceso de humidificación del aire, que en consecuencia se enfria; si bien el proceso no es de tipo adiabático dado el aporte de energía solar, e incluso mecánica a través de los ventiladores, que se recibe en los canales.

No se ha comentado hasta aquí nada respecto a la calidad del agua producto puesto que como en todos los procesos de destilación, el condensado resulta ser muy bueno, salvo algunas impurezas por arrastre de sales, hasta el punto de que es perfectamente viable la mezcla del agua producto con aguas salobres para aumentar la producción total, siempre manteniendo la calidad del agua dentro de los límites aceptados por las normas.

2.5.1.Antecedentes.

Procesos semejantes al propuesto aquí han sido probados anteriormente, si bien en contadas ocasiones. Concretamente en

Atlanta, Georgia, y en el Cotillo, Fuerteventura. En el primero de los casos se trataba de una serie de pequeñas instalaciones a escala de laboratorio, y donde con ligeras modificaciones se probaron sistemas de convección tanto natural como forzada, con interesantes resultados. Es de destacar que dichas experiencias se llevaron a cabo cuando aún estaba lejos la época de escasez o carestía de los crudos de petróleo y el consiguiente impulso a la investigación energética, y quizá por ello no se avanzó mas.

2.5.1.1. Experiencias en Atlanta.

En el Instituto de Tecnología de Georgia, en Atlanta, y entre los años 1958/61 se llevaron a cabo unas experiencias bajo la dirección del Prof. W.N. Grune [2.1 a 2.5] para estudiar los resultados de un total de nueve dispositivos. Cuatro de ellos eran de convección natural, sin flujo continuo de agua y aire, y los otros cinco de convección forzada. Entre ellos diferían a su vez en el tipo de cubierta (cristal o plásticos especiales), o en la altura del agua en el fondo del canal (canales profundos o superficiales).

Los resultados alcanzados en la producción de agua dependen naturalmente de la radiación, y en este sentido se introduce el concepto de "eficiencia solar" como relación entre la cantidad de energía necesaria para la producción de agua obtenida y la

exposición energética recibida en el período de referencia. Esta es una manera sencilla de medir rendimientos.

Hay una relación casi directa entre ambas magnitudes y así en la figura 3.2. puede apreciarse como la temperatura media de operación entre agua y cubierta influye favorablemente en la eficiencia, tanto mas cuanto mas próximas estén ambas temperaturas.

Para canales de convección natural las eficiencias oscilan entre 14 y 41 %, dependiendo de las condiciones de trabajo y del diseño de la experiencia. En la tabla 2.4. se incluye un balance energético de un canal, con simple y doble cubierta de cristal. Los valores de exposición energética recibida son de 22667 y 24597 kJ/m².día., valores comparables a los medidos en la zona Sur de Gran Canaria, con unas eficiencias de 41.2 y 28.8 % respectivamente. Medidas a 10 C, equivale a unas producciones de 4.01 y 3.04 kg agua por metro cuadrado y día (kg/m².d.) respectivamente.

Tabla 2.4.Balances internos de energía para el canal V_b(SNG) (de 5.30 a 21.30 h)

Cubierta simple. 19 ago 61. Exposición energética 22667 kJ/m²/d Cubierta doble. 17 ago 61. Exposición energética 24597 "

Porcentaje de radiación solar

Cubierta simple Cubierta doble

Cubiert	Cubierta simple Cubierta doble		
1.Producción de destilado	41.2	28.8	
2.Radiación interna a la cubierta	12.2	3.5	
3a.Radiación solar reflejada por cubierta	a(s) 14.2	23.2	
3b.Radiación solar absorbida por cubierta	(s) 3.7	6.6	
3c.Radiación solar absorbida			
por cinta de sellado	3.0	2.4	
3d.Radiación solar reflejada del canal	2.5	2.0	
4.Convección interna	7.5	3.6	
5.Pérdida por aislamiento	6.3	11.5	
6.Almacenamiento en la unidad	3.2	6.1	
7. Reflujo, pérdidas de vapor y otros	6.2	12.3	
·			
Total	100	100	
Eficiencia global %	41.2	28.8	

La eficiencia global corresponde aquí a la eficiencia solar tal como se ha definido antes.

En lo que se refiere a canales de convección forzada, se realizaron experiencias tanto en canales previstos para recoger solo el condensado del cambiador de calor (condensador externo), como en otras dotadas de canaletas interiores donde recoger también el posible condensado en el interior de la cubierta si llegaba a producirse. Las eficiencias alcanzadas oscilan entre el 38.2 % para el primero, con una sola cubierta, y el 34.9 % para el segundo. En la tabla 2.5. se describe el aprovechamiento de la radiación en cada uno de los casos.

Tabla 2.5. Balances de energía	para	difere	ntes c	anales	de	
convección forzada						
Canal	II _b (S	FT) II	(SFT)	IV(DF	1)	
Día	18 ago	61 19	ago 61	24 jul	61	
Horas		5.30/2	0.30	24	h	
Exposición energética, kJ/m²/d	23019	22	2667	25960		
Caudal de aire, m³/h.	25	.48	25.48	10	.19	
Porcentaje de radiación						
1a.Destilado de condensador extern	.0 -	-38.2	-40.	5 -3	4.9	
1b.Destilado interno de cubierta	-			1	7.2	
2. Radiación interna a la cubierta	-			1	4.4	
3.Absorción y reflexión en cubiert	a -	-35.4	-37.	0 -1	4.9	
4a.Convección interna		0.6	- 0.	3 -	4.2	
4b.Calor sensible al aire	-	7.7	- 8.	3 -	7.4	
5.Pérdidas por aislamiento	-	0.8	- 0.	4 -	4.3	
6.Almacenamiento en la salmuera	-	- 1.7	- 1.	3 -	7.1	
7. Ganancia de calor sensible en la						
tubería del aire				- +	1.1	
8.Reflujo de la cubierta	· -	2.2	- 1.	5		
9.Transporte desde la bandeja	-			+	2.9	
10. Aporte energético de ventilador	es -	⊦ 1.6	+ 1.	7 +	1.7	
11. Pérdidas no contabilizadas.	-	- 5.2	- 3.	9 -	1.3	
Total	-	100	-100	-1	00	
Eficiencia global %		37.6	39.	8 4	9.3	

2.5.1.2.Planta de El Cotillo, Fuerteventura.

En cuanto a Fuerteventura, se construyó en la zona de las playas del Cotillo, T.M. La Oliva, una planta grande, de unos 3150 m², muy bien dotada de equipos e instalaciones auxiliares como talleres, laboratorios, etc, si bien nunca llegó a operar en las debidas condiciones, según la información que se ha podido obtener. Dicha planta fue construida por el Grupo de trabajo de Tecnologías Apropiadas de la Universidad Técnica de Berlín en 1975.

El canal, de 3.6 m de ancho tenia un total de 900 m de largo, formando un serpentin de 30 vueltas. La cubierta estaba inicialmente prevista en plástico, si bien durante las pruebas no soportó la depresión, de modo que se acordó cubrirlo de cristal. Entretanto, y según nuestras noticias, el fallecimiento de uno de los componentes del grupo trajo consigo la disolución de éste, de modo que la experiencia no siguió adelante y no pudieron obtenerse resultados ningunos.

En cualquier caso, de acuerdo con las previsiones del grupo, se podían recibir desde 11950 kJ/m².d. en enero hasta 21500 en julio, lo que permitiría obtener, con un 70 % de eficiencia, entre 8 y 19 m³ de agua diarios. (2.53 a 6 kg/m².d.). Estos valores de eficiencias esperadas son probablemente muy optimistas.

2.5.1.3.0tras experiencias.

Experiencias similares las han llevado a cabo mas recientemente Koske [2.6] y Ruess [2.7]. En el primer caso se trata de un sistema de convección forzada, para el cual se preparó un modelo de simulación sencillo, llegando a la conclusión de que el caudal de aire debe variar dependiendo de la radiación. En cuanto a las productividades obtenidas, del orden de 4 kg/m².d son análogas a las observadas en otros casos. Por su parte Ruess ha venido operando un sistema de pequeñas dimensiones desde 1986 en Suiza, conjuntamente con paneles fotovoltaicos para la energía auxiliar de ventilación, y con aplicación del agua a riego. De la información disponible no se deducen resultados cuantificados, pero una estimación de la producción necesaria para 600 m² de cultivo es de 227 m³ agua/año, con un coste de 23500 francos suizos y un coste energético de 290 francos/año.

REFERENCIAS

- [2.1] W.N. Grune, y I. Zandi, Improved solar still process for desalting sea and brackish waters, Journal AWWA, p 993, ago 1960.
- [2.2] W.N. Grune, R.B. Hughes y T.L. Thompson, Operating experiences with natural and forced convection solar stills, Water & Sewage Works, p 378, 1961.
- [2.3] W.N. Grune, R.B. Hughes y T.L. Thompson, Forced-convection, multiple effect solar still for desalting sea and brackish waters, UN Conference on New sources of energy, Rome, p 205, 1961.
- [2.4] W.N. Grune, R.B. Hughes y T.L. Thompson, Natural and forced convection solar stills, Journal of the Sanitary Eng. Div., Proceedings ASCE, p 3036, 1962.
- [2.4] W.N. Grune, R.A.Collins, R.B. Hughes y T.L. Thompson, Development of an improved solar still, Office of Saline Water R&D report no 60, US Department of the Interior, 1962.
- [2.6] P.H. Koske, N.P. Schmidt, An economic foil-based solar still for seawater desalination. Design concept and operating results, Proceedings ISES Solar World Congress 1987, vol 2, Pergamon Press, 1988.
- [2.7] K. Ruess, Sea water desalination and irrigation with a mixture of air and water vapour, Comunicación personal, 1989.

CAPITULO 3. DESTILACION SOLAR POR CONVECCION FORZADA

En este apartado se describirá el proceso seleccionado para el estudio teórico y experimental, y que resulta un método que pudieramos llamar de "tecnología intermedia" entre los de convección natural y los de uso indirecto de energía solar. Tras una descripción del proceso en si, se definen los modelos matemáticos, simplificado y general, que simulan el funcionamiento del sistema.

3.1. DESCRIPCION DEL PROCESO

En este apartado se describe el proceso propuesto tal como se ha concebido y experimentado. Como se ha indicado las etapas del proceso son básicamente dos: calentamiento de agua y aire, evaporación del agua y humidificación del aire por una parte, y enfriamiento y deshumidificación (secado) del aire en segundo lugar. Ambas fases se describirán por separado.

3.1.1.Canal

En el canal de evaporación tiene lugar la primera de las dos etapas básicas del proceso. La figura 3.1. muestra una vista general. La sección del canal podrá ser rectangular o semicircular, con una longitud variable según conveniencia del proceso. La cubierta es transparente, de vidrio o plástico, accesible a la radiación en toda su longitud.

Por un extremo de un canal se introducen sendas corrientes de aire y agua. El aire viene forzado por los correspondientes ventiladores y el agua es también bombeada desde el exterior. La radiación incidente calentará tanto el agua, facilitando su evaporación al aumentar su tensión de vapor, como el aire que podrá así admitir mas contenido de humedad absoluta. Por tanto las salidas del canal son agua salada caliente y aire presumiblemente caliente y cargado de humedad.

Una sección transversal del canal nos dará en sentido de la altura diversas zonas como son la cubierta transparente al sol, la zona de circulación de aire y el fondo con circulación de agua salada. Esta configuración se utilizará en el estudio posterior.

Desde el punto de vista del análisis termodinámico el canal se comporta como una cámara de saturación no adiabática, ya que recibe una entrada de energía radiante. En una cámara adiabática el aire se enfría. En este caso no adiabático, no puede saberse de antemano como se comportará la corriente de aire húmedo, ya

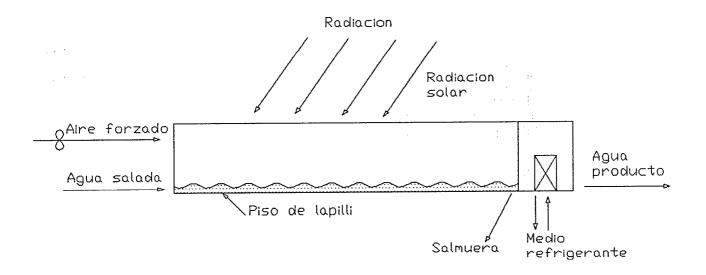


Figura 3.1.

que este comportamiento dependerá de los balances de materia y energía. Por tanto el supuesto inicial de que el aire se calienta no es absolutamente garantizado.

Los laterales y fondo del canal podrán llevar ó no algún tipo de aislamiento, en función de las necesidades de operación y de razones económicas.

3.1.2.Condensador

En el extremo de salida del canal se encuentra el condensador o enfriador, con la función básica de producir la condensación del vapor contenido en el aire, que será el agua producto de todo el sistema. El condensador esta refrigerado por agua de mar, de forma que el agua queda precalentada. Una parte pasará a ser la alimentación del canal y el resto se devuelve al mar.

El condensador puede ser de tubos y flujo cruzado, y refrigerado por agua o aire. El agua producto procedente de la condensación se recoge en bandejas y se lleva a depósitos de producto.

Todo el conjunto de canal y condensador opera a presión prácticamente iqual a la atmosférica.

3.2. MODELOS DE SIMULACION. MODELO SIMPLIFICADO.

3.2.1.Consideraciones generales

El comportamiento del sistema físico descrito se ha simulado analíticamente mediante modelos matemáticos, explicitando las ecuaciones planteadas y las variables que intervienen, así como el método de resolución adoptado. Todo ello se describirá los apartados siguientes. En primer lugar se ha preparado un modelo simplificado, que considera los procesos de transferencia de masa y energía en el canal de una forma sencilla, y que solo incluye las variables básicas. Con este modelo se pretende determinar cuales son las criticas, y determinar el orden de magnitud de las variables implicadas.

A continuación se ha desarrollado un modelo detallado, que se espera represente con la mayor precisión posible el funcionamiento del sistema, y que tiene algunas variantes, según se considere que el aire es recirculado en el canal ó que se toma continuamente aire nuevo del exterior, además de considerar el uso o no de picón (lapilli volcánico) en el piso del canal. La alternativa dependerá fundamentalmente del nivel de humedad del aire ambiente y del grado de secado que se pueda alcanzar en el condensador anexo al canal.

A la vista de la descripción general nos podemos preguntar a priori de qué variables fundamentales depende el modelo, y como puede esperarse que se comporte. En primer lugar de las temperaturas de agua y aire que deberán ser cuanto mas altas mejor ya que ello aumenta la evaporación, aunque por el contrario incremente las pérdidas de calor al exterior. Los caudales de aire y agua no se puede saber a priori que efecto pueden tener.

Naturalmente cuanto mas radiación haya es de esperar que mejor funcione el sistema. Por otra parte, cuanto mejor funcione el condensador mas producción habrá, y esto implica que el agua de refrigeración deberá ser fría y el coeficiente de transmisión bueno.

El comportamiento del sistema simulado por el modelo podemos representarlo por las distribuciones de temperatura y humedad a lo largo del canal y en el condensador a diferentes horas del día, así como la distribución de la producción de agua y la eficiencia de utilización de la energía (tanto de la entalpía como de la exergía).

El modelo matemático que representa el comportamiento del sistema termodinámico esta basado en un sistema de ecuaciones diferenciales derivado de la realización de balances de materia y energía. Además, y a fin de conocer la eficiencia en la utilización de la energía se realiza también un análisis de energía útil (exergía) lo que corresponde a un análisis de segunda ley.

Sensibilidad. En una fase posterior, una vez que se conozca en cierto detalle el modelo y sus funcionamiento, habrá que conocer

cuales son sus respuestas bajo diferentes condiciones de entrada. Habrá que valorar como se comporta el sistema ante variaciones de los parámetros, tanto de aquellos que pueden variarse a voluntad (como por ejemplo los caudales de agua y aire) como de aquellos otros que no dependen del operador (radiación solar, temperatura ambiente, humedad ambiente).

En algunos casos el análisis de sensibilidad requiere pequeñas modificaciones al modelo básico, por ejemplo

-cuando se distingue entre funcionamiento del aire en circuito abierto o cerrado

-cuando se trabaja con una entrada de agua caliente del exterior

-cuando se trabaja con un enfriador de agua externo que alimenta el condensador de aire

3.2.2.Descripción del modelo simplificado

El análisis está basado en los estudios clásicos de un captador plano [3.1] y se refiere básicamente a la cámara como un todo, considerando las entradas y salidas de materia y energía. En concreto se analiza la entrada y salida de aire húmedo, la entrada de agua, entrada de radiación solar y la aportación de energía mecánica en ventiladores.

Las ecuaciones que intervienen en el modelo se derivan de los correspondientes balances de materia y energía. Pueden establecerse los siguientes:

balance de materia de aire húmedo:

humedad de entrada en el aire + vapor de agua procedente del agua salada = humedad de salida del aire

balance de energía :

entalpía del aire de entrada + entalpía del agua de entrada + energía de la radiación solar + energía mecánica de ventilación = entalpía del aire de salida + pérdidas de energía

o lo que es lo mismo

suma de energías de radiación y ventilación = ganancia de entalpía del aire + pérdidas de calor

En este punto estamos asumiendo que el único caudal de agua circulante es el de entrada necesario para la evaporación.

La resolución se plantea de la siguiente forma:

-conocidas las condiciones de entrada al canal (temperatura y humedad del aire) y las aportaciones de energía en cada momento

(irradiancia, energía mecánica de ventilación), se determinan las condiciones de salida (temperatura y humedad del aire)

-con el conjunto de variables que definen ambas condiciones de entrada y salida se calculan los correspondientes rendimientos o eficiencias, referidos a masa (producción de agua), energía y exergía.

3.2.3. Expresiones analíticas

3.2.3.1.Agua

ganancia de entalpía

$$h = c_3(T_s - T_\bullet)$$

 $H= m_3* h$

ganancia de exergía

$$e_{x} = c_{x}*(T_{\bullet}-T_{\bullet})-T_{\bullet}*ln(T_{s}/T_{\bullet})$$

 $E_x = m_3 \cdot e_x$

$$h = h-h_a$$

$$H_{\bullet} = m_{\bullet \bullet} (h-h_{\bullet})+m_{\bullet} (h-h_{\bullet})$$

$$H_a = m_{aa}(h-h_a)+m_{\omega}(h-h_a)$$

$$h_{\bullet} = H_{\bullet}/m_{\bullet \bullet} = [h-h_{\bullet}] | +w_{\bullet}[h-h_{\bullet}] |$$
 | aire seco | vapor agua

$$h_a = H_a/m_{aa} = [h-h_a] | +w_a[h-h_a] |$$
 | aire seco | vapor agua

$$\triangle h = h_{\bullet} - h_{\bullet} = (h_{\circ} - h_{\bullet}) | + [w_{\circ} \cdot h_{\circ} - w_{\circ} \cdot h_{\bullet} - h_{\bullet} (w_{\circ} - w_{\bullet}) |$$
| aire | vapor

$$\triangle H = m_{\bullet \bullet} \cdot \triangle h$$

$$\triangle h = [h_{\circ} - h_{\circ}] | + [w_{\circ}(h_{\circ} - h_{\circ}) - w_{\circ}(h_{\circ} - h_{\circ})] |$$
| aire | vapor

$$\Delta h = [c_2(T_s-T_\bullet) + w_s \cdot c(T_s-T_\bullet) - w_\bullet \cdot c(T_\bullet-T_\bullet)]$$

ganancia de exergía

$$e_{\star}= h-h_{\bullet}-T_{\bullet}(s-s_{\bullet})$$

$$E_{**} = m_{**}[h-h_{*}-T_{*}(s-s_{*})]+m_{*}[h-h_{*}-T_{*}(s-s_{*})]$$

$$E_{xs} = m_{as}[h-h_a-T_a(s-s_a)]+m_w[h-h_a-T_a(s-s_a)]$$

$$e_{x \bullet} = E_{x \bullet} / m_{\bullet \circ} = [h - h_{\bullet} - T_{\bullet} (s - s_{\bullet})] | + w_{\bullet} [h - h_{\bullet} - T_{\bullet} (s - s_{\bullet})] |$$

$$|aire seco | vapor deagua$$

$$\triangle E_{x} = m_{as} \cdot \triangle e_{x}$$

$$\triangle e_{x} = [h_{a} - h_{-} - T_{a}(s_{a} - s_{-})] +$$

$$|aire$$

$$+ [W_{a}(h_{a} - h_{a}) - W_{a}(h_{-} - h_{a}) - T_{a}[W_{a}(s_{a} - s_{-}) - W_{a}(s_{-} - s_{-})]] |$$

$$|vapor$$

donde

- m_{**} caudal de aire seco,
- h entalpía especifica,
- s entropía especifica
- ex exergía especifica,
- capacidad térmica especifica a presión constante del aire seco
- c capacidad térmica especifica a presión constante del vapor de agua
- c_{v2} capacidad térmica especifica a volumen constante del aire seco
- capacidad térmica especifica a volumen constante del vapor de aqua

El estado muerto o de referencia "a" es el estado ambiente en cada momento y los subíndices "e" y "s" corresponden a entrada y salida del canal respectivamente.

Los rendimientos o eficiencias se definen según :

rendimiento de materia

ws/we-1

producción de agua

 $M_{\bullet \bullet} \cdot (W_{\bullet} - W_{\bullet})$

rendimiento de energía

m2*(h2s-h2e)/(A*I/1E3+m3*c3*(t3e-ta)+9.84*m2)

exergía de la radiación

 $A*I*(1-T_b/T_d)$

pérdidas de calor

 $Q_p = U*A*(T_m-T_a)$

3.3. MODELO GENERAL DE SIMULACION

3.3.1.Descripción general

En el modelo general se detalla el análisis fundamentalmente mediante el estudio de cada punto del canal y en cada hora del día. Las ecuaciones que se plantean corresponden a balances diferenciales de materia y energía que permiten establecer las distribuciones de temperatura y humedad en cada punto.

3.3.2.División en zonas.

Con objeto de conocer el comportamiento del sistema y su evolución respecto de las distintas variables que intervienen en el proceso, se ha dividido la unidad en tres zonas de análisis.

Estas zonas corresponden, respectivamente, a la cubierta, a la zona intermedia de flujo de aire y al fondo del canal con flujo de agua. Se consideró la posibilidad de definir una cuarta zona correspondiente al piso del canal, por su efecto en las pérdidas de calor al terreno, pero todas las experiencias y estimaciones conocidas [2.1 a 2.5] dan una cifra de pérdidas relativamente baja, que no justifica la complicación adicional de la inclusión de la base del canal como zona aparte.

En cada una de estas tres zonas a estudiar se han considerado las posibles transferencias de masa (evaporación y condensación)

y de energía, incluyendo el efecto de la radiación solar y procesos de transmisión de calor por conducción, convección y radiación. A continuación se detalla el planteamiento y formulación analítica de cada una de estas ecuaciones.

3.3.3.Zona I. Cubierta.

Para el estudio de la transferencia de energía analizaremos los flujos que se producen en un elemento de cubierta de longitud Δx . Figura 3.3. La fracción de la irradiancia que es absorbida por la cubierta, S_1 , el flujo de calor por conducción en x, el flujo recibido desde el aire por convección y radiación, $U_2(T_2-T_1)$, y el calor de condensación asociado a la posible humedad del aire que pueda quedar en la cara interior de la cubierta, que expresaremos como $k(W_2-W_1)*h_{r_0}$ son las entradas de energía al elemento analizado. Por su parte, la conducción hacia el exterior, en $x-\Delta x$, así como la convección y radiación hacia la atmósfera $U_1(T_1-T_0)$ son los términos a incluir en las salidas.

Queda por considerar el término que corresponde a la acumulación de energía interna en el tiempo, y que representa el regimen transitorio. El conjunto de los términos citados viene representado analiticamente de la siguiente forma:

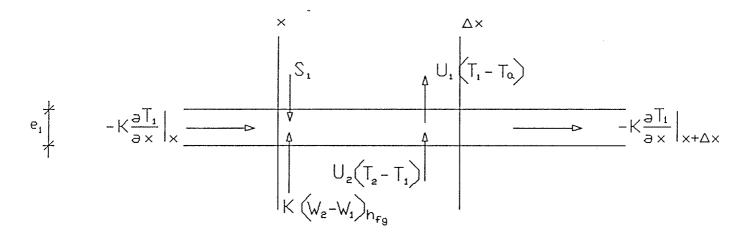


Figura 3.3. BALANCE DE ENERGIA EN CUBIERTA.

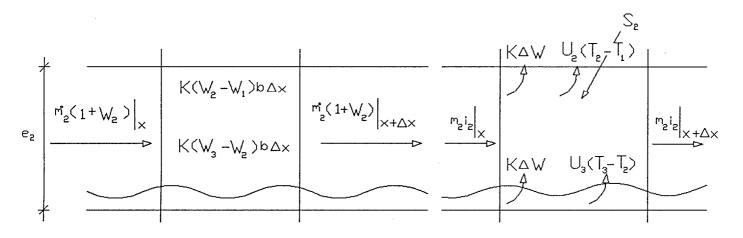


Figura 3.4. BALANCES DE MATERIA Y ENERGIA EN EL AIRE.

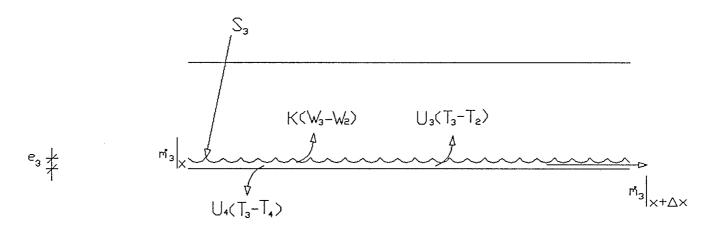


Figura 3.5, BALANCES DE MATERIA Y ENERGIA EN EL AGUA.

$$\delta T_1$$

$$S_1 \cdot b \cdot \Delta x - k_1 \cdot b \cdot \Delta x - --- | +U_2(T_2 - T_1) \cdot b \cdot \Delta x + k(W_2 - W_1) h_{r_0} \cdot b \cdot \Delta x = \delta x | x$$

$$\delta T_{1} \qquad \delta T_{1}$$

$$= U_{1}(T_{1}-T_{e})b \cdot \Delta x - k_{1} \cdot b \cdot \Delta x - \cdots + m_{1} \cdot C_{v_{1}} - \cdots - \delta x \quad |x+\Delta x| \quad \delta t$$

donde

- T₁ es la temperatura de la cubierta, K
- T₂ temperatura del aire en el canal, K
- T. temperatura del aire en el exterior, K
- W. humedad absoluta de saturación del aire a temperatura T., kg vapor/kg aire seco
- W₂ humedad del aire en el canal, kg vapor/kg aire seco
- b anchura de la cubierta, m
- k₁ conductividad de la cubierta, W/m/K
- C₁ capacidad térmica especifica de la cubierta, J/(kg·K)
- C_{v1} " " a volumen constante, J/(kg·K)
- k coeficiente de transferencia de masa, kg/m²/s
- m₁ masa de cubierta incluida en la zona a estudiar, kg,

sidad de Las Palmas de Gran Canaria Biblioteca Digital, 2004

siendo $m_1 = \int_1 \cdot b \cdot \Delta x \cdot e_1$

con

- f. densidad del material de la cubierta, kg/m³
- e₁ espesor, m

Una vez dividido por b. $\triangle x$, y cuando x-->0 , la ecuación queda

$$\delta^{z}T_{1} \qquad \delta T_{1}$$

$$S_{1}+U_{z}(T_{z}-T_{1})+k(W_{z}-W_{1})h_{zz}-U_{1}(T_{1}-T_{z})-k_{1}----= \int_{1} \cdot e_{1} \cdot C_{v_{1}} \cdot ---- \delta x$$

$$\delta X^{z} \qquad \delta X$$
(1)

3.3.4.Zona II. Flujo de aire.

En este caso hemos de realizar tanto un balance de materia como de energía sobre el elemento diferencial, tal como se muestra en la figura 3.4.

3.3.4.1.Balance de materia.

Aquí hemos de considerar los caudales de aire húmedo $m_2(W_1-W_2)$ tanto a la entrada como a la salida, así como la posible aportación de agua debida a la evaporación y la posible condensación en la cubierta.

$$m_2(1+W_2)$$
 | + $k(W_3-W_2) \cdot b \cdot \Delta x = m_2(1+W_2)$ | + $k(W_2-W_1) \cdot b \cdot \Delta x$ | $x+\Delta x$

$$\delta W_{z}$$
de donde m_{z} ---- = $k \cdot b(W_{s} + W_{1})$ (2)

Se han considerado iguales los coeficientes de transferencia de masa, k, en la evaporación y condensación. [2.5]

3.3.4.2.Balance de energía.

Ahora incluiremos en el balance las entalpías asociadas a los flujos de masa contabilizados en la ecuación anterior, además de la radiación solar (propiamente la irradiancia) absorbida por

Universidad de Les Dalmes de Gran Caparia, Bibliotaca Diothal, 2004

el aire y las pérdidas o ganancias de calor por convección y radiación.

$$m_z \cdot i_z | +S_z \cdot b \cdot \triangle x + k(W_3 - W_2)h_{+a} \cdot b \cdot \triangle x + U_3(T_3 - T_2)b \cdot \triangle x =$$

$$| x |$$

 δu_{z} $= m_{z} \cdot i_{z} | +k(W_{z}-W_{1})h_{re} \cdot b \cdot \Delta x + U_{z}(T_{z}-T_{1})b \cdot \Delta x + m_{z} --- |x+\Delta x| \delta t$

donde

m₂ caudal en masa de aire seco, kg/s

i₂ entalpía de aire húmedo, J/kg a.s.

m₂ masa de aire seco en el elemento, kg

u₂ energía interna del aire humedo, J/kg a.s.

siendo

$$m_z = \int 2 \cdot b \cdot \Delta x \cdot e_z$$

$$i_z = (c_1+c.W_z)T_z+h_{rg}\cdot W_z$$

$$\mathbf{u}_{2} = (\mathbf{C}_{\vee 1} + \mathbf{C}_{\vee} \cdot \mathbf{W}_{2}) \mathbf{T}_{2} + \mathbf{u}_{\mathsf{fg}} \cdot \mathbf{W}_{2}$$

y resulta

$$b(S_z+k(W_z+W_1)h_{r_z}+U_z(T_z-T_z)-U_z(T_z-T_1)) =$$

$$\delta i_{2} \qquad \delta u_{2}$$

$$m_{2} \quad ---- \quad + \quad \int_{2} \cdot b \cdot e_{2} \quad ----$$

$$\delta x \qquad \delta t \qquad (3)$$

3.2.5.Zona III. Piso del canal. Flujo de agua.

En esta zona habrán de realizarse asimismo balances de materia y energía, sobre un elemento diferencial como se muestra en la figura 3.4.

Incluye la entrada y salida de agua al elemento de control considerado, así como la pérdida por evaporación, en el supuesto de que no hay acumulación por mantenerse constante el nivel de agua.

$$|\mathbf{m}_{s}| = k(\mathbf{W}_{s} - \mathbf{W}_{s}) \mathbf{b} \cdot \Delta \mathbf{x} + \mathbf{m}_{s} |$$

$$|\mathbf{x}| + \Delta \mathbf{x}$$

CAPITULO 3

donde m_s es el caudal de agua, kg/s.

o sea

$$\delta m_3$$

$$k.b(W_3-W_2)=---$$

$$\delta x$$
(4)

3.2.5.2.Balance de energía.

De forma análoga a la anterior podemos establecer que:

$$m_3 \cdot C_3 \cdot T_3 \mid +S_3 \cdot b \cdot \Delta x = m_3 \cdot C_3 \cdot T_3 \mid +k(W_3 - W_2)h_{+\alpha} \cdot b \cdot \Delta x + |x + \Delta x|$$

$$\delta T_3 \\ + U_3 (T_3 - T_2) b \cdot \Delta x + U_4 (T_3 - T_4) b \cdot \Delta x \\ + m_3 \cdot C_{\sqrt{3}} - - - \\ \delta t$$

lo cual equivale a

$$b(S_3-k(W_3-W_2)h_{*a}-U_3(T_3-T_2)-U_4(T_3-T_4))=$$

CAPITULO 3

115

$$\delta \qquad \qquad \delta T_{3}$$

$$= c_{\sim s} ---(m_{s}T_{s}) + \int_{3} \cdot b \cdot e_{s} \cdot c_{\sim s} ----$$

$$\delta x \qquad \qquad \delta t$$

con $m_3 = \int_a \cdot \mathbf{b} \cdot \Delta \mathbf{x} \cdot \mathbf{e}_a$

que es la masa de agua de profundidad e,

El sistema de ecuaciones de que disponemos en un principio, y que nos permitirá conocer las distribuciones de temperaturas T_1, T_2, T_3 , y humedad W_2 a lo largo del canal y en el tiempo, es el siguiente:

$$\delta^{z}T_{1} \qquad \delta T_{1}$$

$$S_{1}+U_{z}(T_{z}-T_{1})+k(W_{z}-W_{1})h_{z_{0}}-U_{1}(T_{1}-T_{0})-k_{1}----= \int_{1}^{\infty}e_{1}\cdot c_{-1}----$$

$$\delta x^{z} \qquad \delta x$$

$$\delta x$$

$$\delta W_{2}$$

$$m_{2} = k \cdot b(W_{3} + W_{1})$$

$$\delta x$$
(2)

CAPITULO 3

$$b(S_2+k(W_3+W_1)h_{r_0}+U_3(T_3-T_2)-U_2(T_2-T_1)) =$$

$$\delta i_2$$
 δu_2
 m_2 ----- + $\int_2 \cdot b \cdot e_2$ -----
 δx δt (3)

$$\delta m_{s}$$

$$k \cdot b(W_{s}-W_{z}) = ----$$

$$\delta x$$
(4)

$$b\,(\,S_{3} - k\,(\,W_{3} - W_{2}\,)\,h_{*e} - U_{3}\,(\,T_{3} - T_{2}\,)\, - U_{4}\,(\,T_{3} - T_{4}\,)\,\,) =$$

$$\delta \qquad \delta T_{3}$$

$$=C_{\sim 3} ---(m_{s}T_{s}) + \int_{3} \cdot b \cdot e_{s} \cdot C_{\sim s} ----$$

$$\delta x \qquad \delta t \qquad (5)$$

3.4.ANALISIS DEL MODELO GENERAL

A continuación vamos a ir analizando los términos de cada una de las ecuaciones y sus posibles supuestos de simplificación.

3.4.1. Radiación solar.

Uno de los factores mas importantes, sino el que más, es la intensidad de radiación recibida en el canal, y la fracción absorbida en cada zona de las separadas para el análisis.

Para la determinación de estas fracciones partimos de la irradiancia solar. A estos efectos, el modelo se resolverá para condiciones estacionarias durante cada hora, en que supondremos constante la irradiancia.

Finalmente, las fracciones de irradiancia que son absorbidas en cada zona (cubierta, aire, agua) se determinan mediante los correspondientes valores de transmitancia y absortancia.

Así, la fracción absorbida por cada una de las tres zonas es, respectivamente:

 $S_1 = I \cdot \alpha_1$

 $S_z = I.\tau_1.\alpha_z$

 $S_3 = I.\tau_1.\tau_2.\alpha_3$

donde τ y α son los correspondientes porcentajes de transmisión y absorción en el material de que esta compuesta cada zona.

Los valores de irradiancia utilizados en los calculos definitivos son los medidos en condiciones reales en el lugar de la experiencia (Jinámar, a 6/8 km Sur de Las Palmas).

3.4.2. Resolución del sistema.

La resolución del sistema de ecuaciones (1) a (5) se ha llevado a cabo de modo numérico por el método de diferencias finitas. Se realizó previamente un intento de aplicación de la rutina Simulación analógica (SIMANAL) que no dió resultado, aparte de que era poco adecuada puesto que solo admite una variable independiente, y en este caso tenemos longitud y tiempo.

Para la resolución del sistema se ha partido de los siguientes supuestos:

1. Regimen estacionario a lo largo de cada hora del día. Si bien el sistema es en sí mismo de comportamiento transitorio, dada la variabilidad de la irradiancia solar, el método que utilizamos para estimar ésta la supone constante en cada hora. De modo que el sistema en su conjunto es considerado como estacionario en cada hora. De esta forma vamos a trabajar con 24 estados estacionarios diferentes, si bien con la particularidad de que durante la noche habrá muy poca variación entre dos horas consecutivas dado que la irradiancia es nula y sólo es de considerar el efecto de inercia térmica.

- 2. Supuesto de conducción nula. En algunos casos se ha despreciado por considerarla poco significativa la transmisión de calor por conducción en la dirección longitudinal del canal. Así, por ejemplo, para la cubierta de cristal se ha efectuado tal supuesto, lo cual implica que la temperatura del cristal no varía a lo largo del canal, sino que solo lo hace con el tiempo. Este supuesto viene avalado por experiencias anteriores [2.5]. De este modo quedaría anulado el término en derivada segunda de la ecuación (1).
- 3. Supuesto de parámetros termofísicos constantes en el margen de temperaturas considerado. Dado que las temperaturas de trabajo oscilan siempre entre la del ambiente y un máximo de unos 343 K (70 C), se han considerado constantes algunos parámetros tales como conductividad térmica del aire y agua, densidad y viscosidad.

Las capacidades térmicas específicas del agua, vapor y aire así como los coeficientes de transmisión de calor por convección y radiación son mas dependientes de la temperatura y así se han considerado.

En estas condiciones el sistema queda de la siguiente forma:

$$\delta T_{1} = S_{1} + U_{2}(T_{2} - T_{1}) + k(W_{2} - W_{1})h_{2} - U_{1}(T_{1} - T_{2}) = \int_{1}^{\infty} e_{1}C_{2} - \cdots - \delta t$$

$$\delta W_{z}$$
 $kb(W_{s}-W_{1}) = m_{z}--- \delta t$

$$\delta m_{z} \quad \delta i_{z} \qquad \delta u_{z}$$

$$S_{z}+k(W_{s}-W_{1})h_{r_{0}}+U_{s}(T_{s}-T_{z})-U_{z}(T_{z}-T_{1})=---- \\ \delta b \quad \delta x \qquad \delta t$$

$$\delta m_s$$
 $kb(W_z-W_s) = ---- \delta x$

$$\delta C_{vs} \quad \delta (m_s T_s) \qquad \delta T_s$$

$$S_s + k (W_s - W_s) h_{rs} - U_s (T_s - T_s) - U_s (T_s - T_s) = ---- + \int_s e_s C_{vs} - ---- \delta b \quad \delta x \qquad \delta t$$

3.4.3. Condiciones iniciales.

Las condiciones iniciales necesarias para la resolución del sistema son

las de posición (mas propiamente de contorno):

Temperatura y humedad del aire al comienzo del canal (x=0).

Temperatura y caudal de agua al comienzo del canal. y las de tiempo:

Temperatura de cubierta en la hora inicial (t=0).

Temperatura y humedad del aire en la hora inicial.

Temperatura del agua en la hora inicial.

El modelo se resolvió para diversas situaciones iniciales y de contorno, según se verá en el capítulo 4.

3.4.4. Coeficientes de transmisión de calor.

En la resolución del modelo se han utilizado una serie de coeficientes que vamos a detallar ahora. En primer lugar los coeficientes de absorción y transmisión a la radiación en los diversos materiales a los que afecta. Estos valores (absortancia y transmitancia) se han tomado globales y hemisféricos, es decir

independientes de la longitud de onda recibida y de la dirección, y son los especificados en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Valores de transmitancia y absortancia solar global

	Transmitancia	Absortancia	•
Cubierta	0.82	0.1	
Aire	0.79	0.1	
Agua		0.9	

3.4.4.1. Coeficientes de convección.

Hemos de distinguir los siguientes coeficientes:

- a)convección cubierta aire ambiente.
- b)condensación aire húmedo cubierta.
- c) evaporación agua aire húmedo.
- d)pérdidas laterales y al terreno.

Las ecuaciones utilizadas en cada caso han sido:

- a) $h_1=5.7+3.8 \cdot V$; V, velocidad del viento, m/s.
- b) $h_3=7.758E-4\cdot/(R_{\bullet}/1)$ con $R_{\bullet}=$ número adimensional de Reynolds

ul

= ----

 μ

c) $h_s=h_c+h_o+h_r$ donde

 $h_c = 0.884 \cdot (T_s - T_c + (1E5 \cdot pr(T_s) - pr(T_c) \cdot T_s / 268900 - 1E5 \cdot pr(T_s))^{(1/3)}$

 $h_{\bullet}= 0.016E5 \cdot (pr(T_s)-pr(T_s))/(T_s-T_s) \cdot hc$

 $h_r = 0.1 \cdot \sigma \cdot (T_3^4 - T_2^4)$

y donde pr(T) es la presión parcial del vapor a la temperatura T

d) h_{r} = variable entre 5 y 15 W/($m^{2} \cdot K$)

Coeficientes de radiación.

La radiación se ha expresado mediante coeficientes de la forma

$$T^4_m - T^4_n$$

$$h_r = F \cdot \sigma \quad ------$$

$$T_m - T_n$$

donde T_m y T_n son las temperaturas de las dos superficies que intercambian radiación, y F es el factor de forma ó de visión ,que depende de las dos areas en cuestión y de su posición

Strange Control of Comment of Control Office Contro

relativa, y σ es la constante de Stefan-Boltzman, de valor 5.67E-8 W/(m²·K²).

Los coeficientes utilizados son los siguientes:

e) radiación cubierta - aire ambiente

$$h_z=0.8957 \cdot \sigma \cdot (T_1^4-(T_4-11)^4)/(T_1-T_4+11)$$

f) radiación aire canal - cubierta

$$h4_0.8957 \cdot \sigma \cdot (T_2^{4-7}, 4)/(T_2-T_1)$$

g) radiación agua - aire del canal

$$h6_0.9138 \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_e^4) / (T_s - T_e)$$

3.4.4.2.Coeficientes globales

Por su parte los coeficientes globales que se han utilizado son los siguientes:

coeficiente global cubierta - aire atmosférico

$$U_1 = h_1 + h_2$$

coeficiente global aire del canal - cubierta

 $U_2 = h_3 + h_4$

coeficiente global agua - aire del canal

 $U_3 = h_5 + h_6$

coeficiente global de pérdidas por suelo y paredes $U_4 = h_7$

3.4.5. Resolución del modelo

El modelo se ha resuelto mediante un algoritmo cuyas etapas fundamentales son las siguientes:

- -entrada de constantes
- -entrada de condiciones iniciales
- -calculo de perdida de carga
- -calculo en hora inicial
- -coeficientes de transmisión
- -calculo de temperaturas y humedades a lo largo del canal por diferencias finitas
 - -calculo de temperaturas y humedades en el condensador
 - -calculo de eficiencias

-salida de datos horarios

-calculo de variaciones de temperatura y humedad en el tiempo -calculo en nueva hora, hasta hora final

El listado del programa de calculo se incluye en el anexo 3.1. Los intervalos utilizados han sido de 0.25 m para la dirección longitudinal de canal y de 30 a 60 segundos para la variación del tiempo. Otros intervalos mayores impiden llegar a respuestas razonables del modelo.

3.5.INDICADORES DE RESULTADOS

3.5.1. Introducción. Variables indicadoras

Como indicadores de los resultados del modelo pueden considerarse varios, de distinta utilidad: en primer lugar debe valorarse la producción de agua, que es en definitiva el objeto del proceso. Sin embargo ya se ha indicado que esta variable por si sola no es informativa ni rigurosa puesto que en un proceso fuertemente dependiente de la radiación solar y de las condiciones ambientales hay que relacionar ambos valores. De modo que la producción es una variable que sólo da una información parcial sobre el proceso.

Otro indicador es el consumo específico de energía (consumo por unidad de producto). Esta variable suele ser muy utilizada para comparar desde el punto de vista energético varios procesos. En el caso de procesos clásicos de desalación es muy útil, pues incluye todas las formas de energía consumida en una planta. Sin embargo hay que tener la precaución de sumar o comparar las diversas formas de energía de una manera coherente.

En cambio en procesos en los que sean predominantes las energías renovables, sólo se suelen incluir en el consumo energético las aportaciones externas de energía, como bombeo y auxiliares. Esto vuelve a ser una visión parcial ya que no se considera la radiación solar, que debe aparecer aunque se considere gratuita. Quizá desde un punto de vista económico no cuente, pero al analizar con rigor el uso de la energía debe incluirse.

Llegados a este punto, parece evidente que la forma de evaluar el proceso de desalación, al menos desde un punto de vista energético, es alguna relación que ligue la energía consumida (tanto en cantidad como en calidad) con la producción de agua ó con la energía asociada a esa producción. Esta relación, que en general será una eficiencia solar, podrá tomar diversas formas.

3.5.2. Eficiencia energética simple

La única formulación de la eficiencia solar que se ha utilizado hasta ahora (véase capítulo 2) relaciona el equivalente energético del agua evaporada con la radiación solar como única entrada de energía al sistema. Este planteamiento es aún incompleto, y se debe introducir una eficiencia conjunta o global que incluya entre las entradas de energía las correspondientes al agua y al aire. Esta sería una formulación mas rigurosa, puesto que incluye la relación del agua producida (o de la energía necesaria para producirla) a todas las aportaciones energéticas al sistema, máxime algunas tan fundamentales como la del aire.

El análisis incluye entonces una valoración de la entalpía de todas las corrientes o flujos energéticos de entrada y salida al proceso. Este planteamiento es aplicable al proceso de humidificación que se desarrolla en el canal, ó a la deshumidificación del condensador, ó al conjunto de ambos. Esta última alternativa será la utilizada en nuestra exposición aquí, aunque la metodología a seguir es naturalmente válida para el análisis de procesos parciales.

3.5.3. Eficiencia energética compuesta.

La eficiencia energética que se va a analizar debe por tanto incluir todas las aportaciones de energía al sistema termodinámico y todas las salidas también.

Los flujos de energía asociados a las diversas corrientes del sistema son los siguientes:

- a)entradas de energía
- -agua de entrada al condensador, cuya entalpía es función del caudal de refrigeración y temperatura del agua de mar
- -aire de entrada al canal, en función del caudal, temperatura y humedad
- -radiación, en función de la irradiancia y del área de captación
 - b)salidas de energía
- -agua de refrigeración, en función del caudal y de la temperatura de salida del condensador
- -agua de salida del canal, en función del caudal que circula por el canal y su temperatura final
- -aire de salida, función del caudal, temperatura y humedad tras haber pasado por el condensador
- -producto, en función de la cantidad de vapor condensado y su temperatura

-pérdida de energía, valorada en función de las pérdidas de calor, radiación reflejada y otras, ó como diferencia entre todas las entradas y las salidas

La eficiencia energética (a veces llamada de primera Ley) vendría entonces expresada por

entalpías de productos de salida

eficiencia energética = ----- =

entradas de entalpía al sistema

Esta forma de la eficiencia es aplicable al funcionamiento del canal (humidificación del aire), al del condensador, o bien al conjunto de canal y condensador.

3.5.4. Análisis de la exergía.

La introducción y la utilización de la exergía se deriva de un estudio de la segunda ley de la Termodinámica, una de cuyas conclusiones puede establecerse diciendo que las diversas formas de energía no son termodinámicamente equivalentes. La manera de valorar una forma de energía debe ser no sólo por la cantidad, sino también por su calidad. En este sentido la magnitud utilizada para la valoración es la exergía, que con ligeras

variantes se denomina también disponibilidad, energía disponible, energía útil, capacidad de trabajo técnico, función B de Darrieus, etc, y que fundamentalmente mide el potencial de una determinada forma de energía de realizar un trabajo hasta llegar a un estado de referencia o de equilibrio con el ambiente. Se trata del máximo de energía aprovechable, por así decirlo. Desde luego esta definición requiere el establecimiento de unas condiciones de referencia, llamadas del estado muerto. [3.2 a 3.6].

Así, el primer principio de termodinámica define la conservación de la energía, y el segundo principio define su degradación hacia formas progresivamente menos útiles, de menor calidad. En definitiva, de menor exergía.

3.5.4.1.Formulación.

La formulación analítica de la exergía, si no se consideran efectos cinéticos o de energía potencial, incluye a la entalpía (asociada a la cantidad de energía) y a la entropía (asociada a la calidad). Propiamente lo que se define son diferencias o variaciones de exergía con relación al estado de referencia o entre dos estados cualesquiera.

La expresión analítica de la exergía de una corriente fluida en un sistema abierto es la siguiente :

$$ex = (h-h_o)-T_o(s-s_o)$$

donde ex es la función exergía especifica referida al estado muerto o de referencia, h y s son los correspondientes valores de entalpía y entropía, h. y s. los valores en el estado de referencia y T. es la temperatura del estado de referencia.

Para la exergía asociada a la transmisión de calor de intensidad q_{τ} a la temperatura T

$$ex(q_\tau) = q_\tau(1-T_o/T)$$

Para la exergía de trabajo mecánico W

$$ex(W) = W$$

Y para la exergía de la radiación solar

$$ex(I) = I(1-T_o/T_d)$$

donde T_a es la temperatura equivalente de la irradiancia solar, que se determinará mas adelante.

Puede apreciarse que la exergía distingue entre distintas formas de energía y distintos niveles de entalpía y entropía. El interés de usar la exergía es el de poder comparar esas formas y calidades distintas, reduciendolos a una medida única que tiene en cuenta todas las características. En consecuencia se puede

utilizar como índice homogéneo de comparación de cualquier clase de proceso.

La exergía es así una fracción de la entalpía. La otra fracción (T△s) recibe el nombre de anergía y es naturalmente la parte degradada ó inútil.

3.5.4.2. Eficiencia exergética. (Efectividad)

Una vez revisado el concepto de exergía como medida de la energía útil, se puede deducir que una medida de la eficiencia con que se utiliza la energía debe estar ligada a la exergía, pues debe considerarse el rendimiento aplicable a la fracción realmente disponible o útil de la energía. Por consiguiente una medida de la eficiencia sería la relación entre la exergía saliente del proceso y el consumo de exergía entrante.

Concretamente en nuestro caso la exergía saliente sería la correspondiente al agua producida en el proceso de destilación-condensación mas la del agua y aire saliente. La exergía entrante por su parte sería la debida a la irradiancia solar mas las exergías asociadas a los flujos de agua y aire entrantes al canal y/o al condensador.

Los flujos de entrada y salida a considerar son los mismos que para el análisis energético, y cada uno de ellos lleva asociado su flujo de exergía.

Ollhiversided de les Delmes de Gren Cenerie Bibliotece Digital 2004

3.5.4.3. Expresiones analíticas.

Las expresiones analíticas utilizadas en este caso son tanto para liquidos como para gases o vapores y son respectivamente la entalpía y entropía:

$$\Delta h = f c_p(T) dT + f v(1 - \beta T) dp$$

$$c_p(T)$$

$$\triangle s = f ---- dT + f \beta v dp$$

$$T$$

donde β es el coeficiente de expansión cúbica

Por su parte la radiación solar lleva asociada una temperatura equivalente según la expresión [3.7]

$$T_{cl} = \frac{C_{z}}{C_{z}/\Gamma T_{*}}$$

$$(e -1)$$

$$\Gamma \ln[1+----]$$

donde

 C_2 es la segunda constante de radiación, 1.439E4 micra·K longitud de onda, que tomamos en el máximo de 0.5 micras

CAPITULO 3 135

- T. temperatura de cuerpo negro del Sol, 5777 K
- φ coeficiente atmosférico de atenuación óptica

Este último valor se determina por la relación I/ I.

La exergía de la radiación solar se determina entonces como la de una transmisión de calor de intensidad igual a la irradiancia y temperatura equivalente T_{σ} .

De acuerdo con ello, las expresiones para cada flujo deben incluir

- a)entrada de exergía.
- -agua de refrigeración, en función de su entalpía, del caudal y de su temperatura de entrada.
- -aire de entrada, en función de la entalpía, caudal de aire seco, temperatura y humedad.
 - -irradiancia, como función de la temperatura de equilibrio.
 - b)salida de exergía
 - -agua de refrigeración
 - -aqua de salida
 - -aire de salida
 - -aqua producto
 - -pérdida de calor

Hay que incluir además en el calculo las aportaciones de energía mecánica de bombas de aportación de agua y ventiladores de aire.

3.5.4.4. Eficiencia exergética (eficiencia de segunda ley)

La expresión que define la eficiencia de segunda ley es formalmente análoga a la de primera ley:

eficiencia exergética = exergía asociada a los productos / suma de exergías aportadas al sistema.

Esta expresión es igualmente aplicable tanto al canal y al condensador por separado como al conjunto de los dos.

3.5.5.Criterio de comparación

A fin de comparar resultados de los modelos de simulación, se considera como criterio de selección básicamente a la eficiencia exergetica, ya que como se ha dicho representa de forma mas completa a la cantidad y calidad de energía puestas en juego.

Esto no quiere decir que se desprecien otros indicadores como la producción de agua y la eficiencia energética, que pueden complementar el criterio básico. Por otro lado es de prever que los tres criterios tendran los optimos en valores próximos de cada variable. Asi, una mayor producción de agua llevará consigo

en general una mejor eficiencia energética y exergética. En el bien entendido de que esta relación no es ni mucho menos directa.

Es importante recordar que la utilización de la eficiencia exergética es la única manera de comparar con rigor procesos con intervención de energía térmica en distintos niveles de presión y temperatura o energía mecánica. Todavía no es todo lo habitual que debiera la utilización de este índice de comparación y en este sentido el trabajo recogido en esta Memoria insiste en su utilidad.

REFERENCIAS

- [3.1] J.A. Duffie, W.A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, Wiley, Nueva York, 1980
- [3.2] H.D. Baehr, Tratado Moderno de Termodinámica, Ed Montesó, Barcelona, 1979.
- [3.3] J.E. Ahern, The Exergy Method of Energy Systems Analysis, Wiley, Nueva York, 1980.
- [3.4] Proceedings of a Workshop, Second Law Analysis of Energy Devices and Processes, Energy, vol 5, num 8-9, 1980.
- [3.5] N. Lior, Proceedings Solar Desalination Workshop, Solar Energy Research Institute, 1981.
- [3.6] T.J. Kotas, The Exergy Method of Thermal Plant Analysis, Butterworths, 1985.
- [3.7] V. Ruiz, Comunicación personal, 1989.

CAPITULO 4. ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO TEORICO Y RESULTADOS

En este capítulo se van a mostrar y analizar los resultados obtenidos en la simulación según los modelos desarrollados en el capítulo anterior. Aquí hay que volver a mencionar las diversas variantes del modelo a las que nos hemos referido y que consisten en el funcionamiento del canal con ó sin recirculación del aire, así como las referidas al uso ó no de picón en el piso y a la refrigeración del condensador.

Posteriormente se realizará un estudio de sensibilidad de los resultados del modelo a la variación de las diversas variables que intervienen en el mismo.

4.1.APLICACION DEL MODELO SIMPLIFICADO

4.1.1.Aplicación

La aplicación del modelo consiste básicamente en la resolución de las ecuaciones en las que está fundamentado: balances de materia y energía.

En relación con las condiciones de entrada, la temperatura y humedad del aire se consideran iguales a las del ambiente, y para mayor simplicidad se considera asimismo que el agua de entrada al canal (la necesaria para la evaporación) también entra a temperatura ambiente.

La referencia para las exergías es asimismo la temperatura y humedad ambiente en cada hora del día. Esto supone una novedad en la metodología de análisis, y permite determinar la eficiencia exergética de una manera mas ajustada, ya que las condiciones de referencia son cambiantes en cada momento.

Otros datos de partida son el caudal de aire en circulación, la superficie en planta del canal y el coeficiente global de pérdidas de calor.

Los resultados básicos son la temperatura y humedad especifica de salida del aire del canal, así como la producción de agua (determinada por la diferencia de humedades de entrada a salida) y las eficiencias energética y exergética del proceso.

El esquema del calculo es el siguiente:

- -lectura de datos de entrada
- -resolución del balance de materia y de energía (método iterativo)
 - -calculo de la producción de agua
 - -calculo de eficiencia energética
 - -calculo de eficiencia exergética

El listado del programa para simulación del modelo simplificado aparece en el Anexo 4.1 en lenguaje Turbo Pascal.

4.1.2.Resultados

La aplicación del modelo con datos reales de irradiancia, temperatura y humedad ambiente (día 05.09) proporciona unos resultados como los que aparecen en la figura 4.1 referida a las horas de sol del día, entre la 6 y las 18 h. En ella aparecen la temperatura y la humedad especifica de salida del aire en el canal.

Asimismo aparecen en la figura 4.2 la producción de agua y eficiencias energética y exergética. Con estos datos obtenidos de una manera sencilla se puede determinar en principio y con las reservas debidas el orden de magnitud de los resultados del sistema estudiado, tanto en lo que se refiere a temperaturas como a producción de agua y eficiencias. Una primera observación es

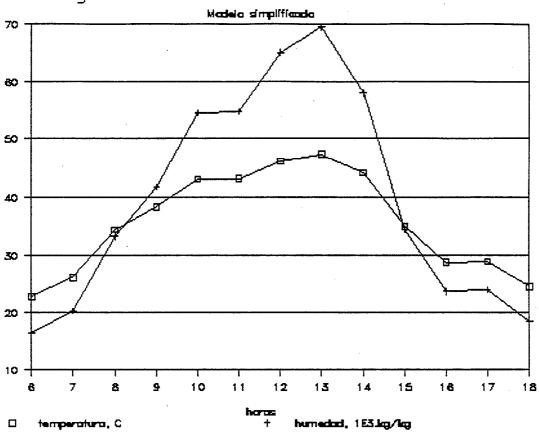
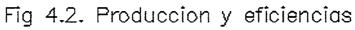
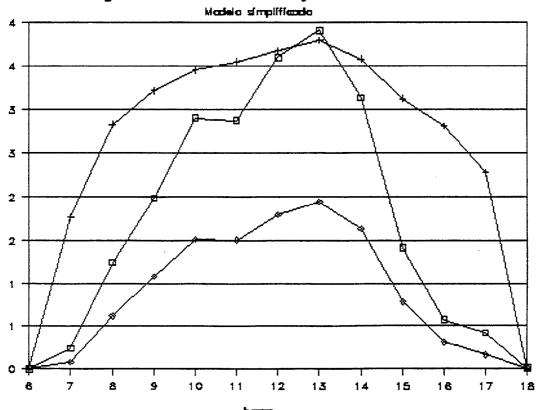


Fig 4.1. Condiciones de aire de salida





efic energetics, %

que estos resultados son similares a los obtenidos en un captador solar plano.

4.2.APLICACION DEL MODELO GENERAL DE SIMULACION

4.2.1.Aplicación.

De una forma mas detallada se ha simulado el funcionamiento del sistema mediante el conjunto de ecuaciones ya desarrolladas y algunas adicionales como las de perdida de carga, evaluación de entalpías, exergías, eficiencias. Para ello se han introducido una serie de valores iniciales ya sea en el tiempo (hora cero del calculo) o en el espacio (punto de entrada al canal) además de otros que son función de las propias temperaturas o que son constantes. Las lecturas de irradiancia se han tomado de un fichero auxiliar con valores medidos en campo en la planta experimental.

Esta simulación se lleva a cabo con objeto de conocer los resultados previstos y determinar así el interés del modelo como método de predicción y análisis. Además se realizará una comparación entre los dos modelos propuestos con objeto de determinar la validez de cada uno de ellos.

4.2.1.1. Proceso de calculo.

La simulación del proceso se ha realizado conforme al supuesto de que

opera en regimen estacionario en cada una de las horas del día. El proceso de calculo es el siguiente:

- -inicialización de variables, lectura de valores experimentales
- -determinación de pérdidas de carga
- -calculo de temperaturas y humedad en cada punto del canal hasta entrada al condensador
 - -calculo de temperaturas y humedad en salida del condensador
- -calculo de temperaturas y humedad iniciales para la hora siguiente
 - -análisis de eficiencias
 - -salida de resultados a fichero o a pantalla

4.2.1.2. Valores constantes e iniciales.

En el proceso de calculo intervienen una serie de parámetros de los cuales se señalan aquí los mas significativos:

- -longitud canal
- -altura del canal
- -anchura del canal
- -caudal de aire seco

Otra serie de variables tienen un valor inicial

- -temperatura de agua en entrada canal
- -temperatura de aire en entrada canal
- -humedad del aire en entrada canal
- -caudal de agua en entrada canal

Y otras magnitudes tienen valores variables a lo largo del día

- -irradiancia solar
- -temperatura ambiente
- -humedad ambiente

4.2.2. Resultados del modelo.

Los resultados del modelo teórico que se van a analizar son los siguientes:

- -distribución espacial de temperatura del agua, a lo largo de varios puntos del canal
 - -distribución espacial de temperatura del aire
 - -distribución espacial de humedad del aire
- -distribución temporal de temperatura del agua, a lo largo de las 24 horas
 - -distribución temporal de temperatura del aire
 - -distribución temporal de humedad del aire
 - -distribución temporal de la producción de agua

-producción de agua por unidad de superficie. Se ha explicado que esta es una variable poco significativa por si misma pues no tiene en cuenta la radiación solar ni las condiciones de temperatura y humedad ambientales, y por tanto el simple conocimiento de la cantidad de agua producida no da una idea de como se utiliza la energía disponible. Aún así es informativa y se determinan las productividades del canal y del condensador, en términos de cantidad de agua por unidad de superficie y de tiempo.

-eficiencia energética y exergética. La eficiencia de utilización de la radiación solar y de las energías disponibles es el resultado mas significativo y será el que tomemos como índice básico de estudio y comparación. Como ya se indicó en el capítulo anterior, la eficiencia puede aplicarse al canal o al conjunto de canal y condensador. En este sentido se prestará especial atención el estudio del canal, dado que éste constituye el punto de interés fundamental en este trabajo. Por otra parte se ha considerado como criterio básico de análisis y comparación el de la eficiencia exergética, puesto que proporciona una mejor información del uso de la energía en cantidad y calidad, todo ello sin descartar la información deducida de analizar la eficiencia energética y la producción de aqua.

A su vez los valores de eficiencia pueden estimarse para las veinte y cuatro horas del día, ya que en cada una de ellas se han considerado las diversas variables. Se obtiene así un conjunto

de resultados para cada hora. A efectos de análisis y comparación de diversos casos se ha calculado en un principio la media de esas 24 horas. Esta cifra no es sino un parámetro de comparación, pues en muchas horas la eficiencia es nula al no producirse agua. En un principio se ha adoptado la media en 24 horas como valor representativo, a salvo de posteriores modificaciones.

4.2.3. Análisis de sensibilidad. Variables a considerar

Las variables que en un principio se consideran mas significativas desde el punto de vista de su influencia en los resultados son las siguientes

- -exposición energética solar
- -temperatura de entrada del agua
- -temperatura de entrada del aire
- -humedad de entrada del aire
- -temperatura ambiente
- -humedad del aire ambiente
- -longitud del canal
- -anchura del canal
- -altura del canal
- -caudal de aire en el canal
- -caudal de agua en el canal
- -caudal de agua de refrigeración

Para cada una de estas variables se describirá su efecto sobre los resultados de eficiencia analizados y se añadirá un gráfico representativo.

4.3. RESULTADOS DEL MODELO GENERAL. CANAL LISO

A continuación se describirán los resultados mas significativos del modelo general. Se estudiarán las distribuciones de temperaturas y humedad tanto en el espacio como en el tiempo, así como la producción y eficiencias.

Las distribuciones de temperatura y humedad en el canal se estudian mediante una representación en tres puntos del canal, correspondientes a la entrada (1.5 m), mitad (5.5 m) y salida (9.5 m).

Este es el caso que podemos llamar básico o de referencia, respecto al cual se compararán los resultados de otras alternativas.

Asimismo se realizará una comparación de resultados de este modelo general con el simplificado, a fin de determinar la bondad y utilidad de éste último.

4.3.1. Parámetros de entrada

Los valores de los parámetros mas significativos utilizados en este caso se detallan a continuación

Valores utilizados en la simulación general

Condiciones ambientales de irradiancia, temperatura y humedad correspondientes al día

05 septiembre

Caudal de aire 0.02 kg/s

Caudal de agua 0.02 kg/s

Longitud de canal 10 m

Anchura de canal 1 m

Temperatura y humedad del aire de entrada al canal correspondientes a las del aire atmosférico en cada momento.

4.3.2.Resultados

Los resultados referidos a la cámara de evaporación se presentan en los apartados siguientes.

4.3.2.1. Temperatura del agua en el canal.

La curva de distribución de temperaturas a lo largo del día se presenta en la figura 4.3. En ella se observa como la temperatura "sigue" a la curva de radiación, que tiene una forma aproximadamente senoidal. Esta tendencia se repite en los tres puntos de observación.

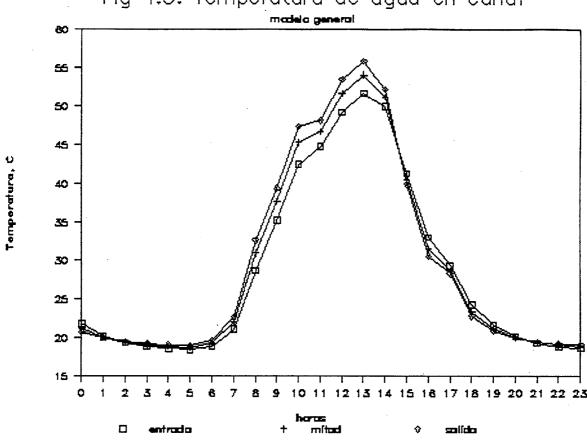
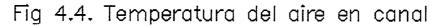
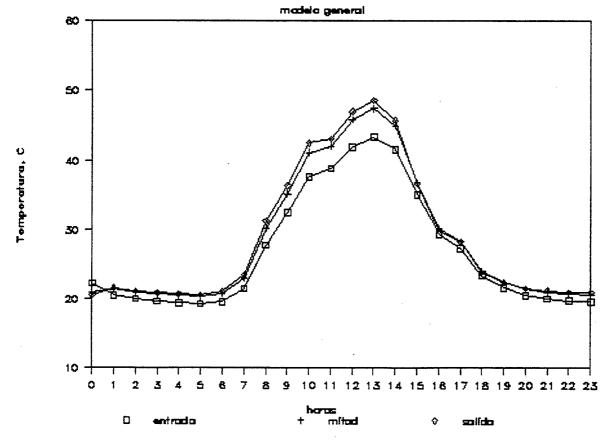


Fig 4.3. Temperatura de agua en canal





Respecto al punto de observación a lo largo del canal, la evolución de la temperatura del agua es muy ligera para las condiciones en que se ha realizado la simulación. El calentamiento del agua es muy poco señalado, con aumento de solo 4 grados a las 13 horas en que se alcanzan los 56 °C. En horas de la tarde se produce un enfriamiento aun mas ligero a medida que se avanza por el canal.

4.3.2.2.Temperatura del aire

La temperatura del aire sigue una tendencia de calentamiento análoga a la del agua, aunque con algunas variantes, tal como se representa en la figura 4.4. La distribución a lo largo del día se mantiene "siguiendo" a la radiación, y el máximo se da a igual hora que el agua, aunque de solo 48.6 °C.

El comportamiento del aire difiere del de una cámara de saturación adiabática, lo cual es de esperar dado que en las horas de sol se recibe una aportación energética externa.

En cuanto a la relación de temperaturas del agua y el aire, éste se mantiene habitualmente mas frío que el agua. Esta circunstancia puede cambiar para otras condiciones de caudal de ambas corrientes.

4.3.2.3. Humedad del aire.

La humedad absoluta del aire sigue también una curva cuasisenoidal, y de forma que aquel se va cargando de vapor al avanzar por el canal. (Figura 4.5) Los valores absolutos de humedad para las 13 horas van de 0.03 kg vapor/kg aire seco en la entrada del canal a 0.064 kg/kg en la salida.

Por su parte la humedad relativa del aire en el canal tiene una evolución inversa a lo largo del día, de forma que en las horas de noche los valores son de 100 % y en las horas del día decrecen hasta cifras que van desde 53 % en la entrada hasta 83 % en la salida. (Figura 4.6)

Del comportamiento de la humedad reflejado en las dos últimas figuras se puede ir adelantando que en las horas de noche el sistema es poco efectivo.

4.3.2.4. Producción de agua

Como producción de agua se ha estimado la derivada del incremento de humedad en el canal, y así se representa en la figura 4.7. La producción total para el caso de referencia es de 23.6 kg/día. El grueso de la producción tiene lugar entre las 6 y las 18 horas, que corresponden a las horas de sol. Concretamente 20.3 kg, que suponen el 86 % del total. Este comportamiento es lógico si se tiene en cuenta que como se ha dicho en las horas

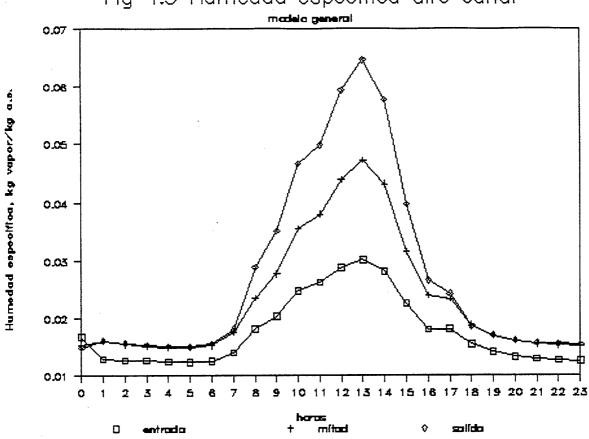


Fig 4.5 Humedad especifica aire canal

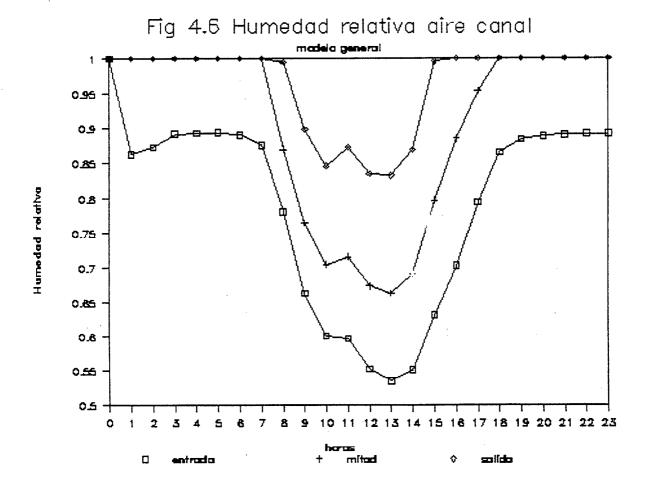
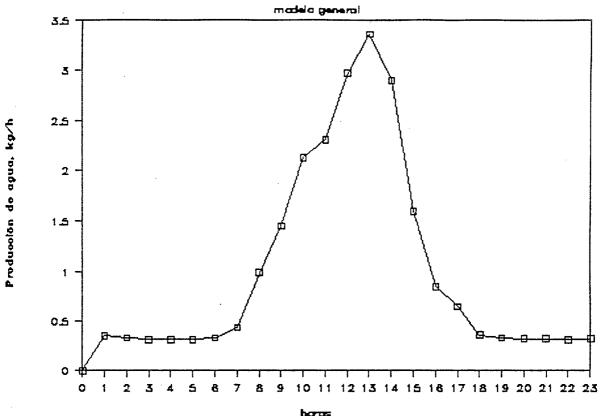
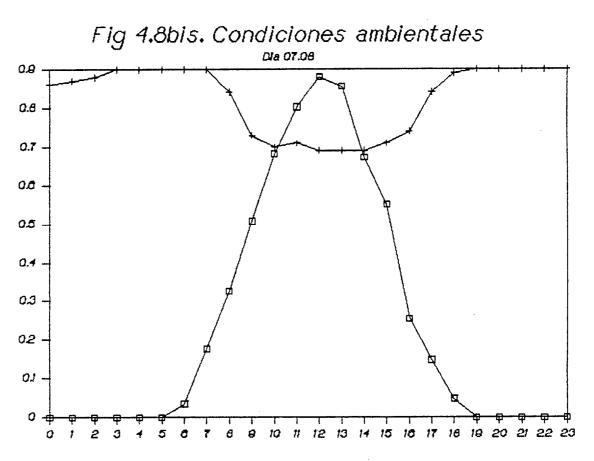


Fig 4.7 Producciín de agua en el canal





del día coinciden la alta radiación y la baja humedad, que tienen una relación inversa tal como queda representado en la figura 4.8.

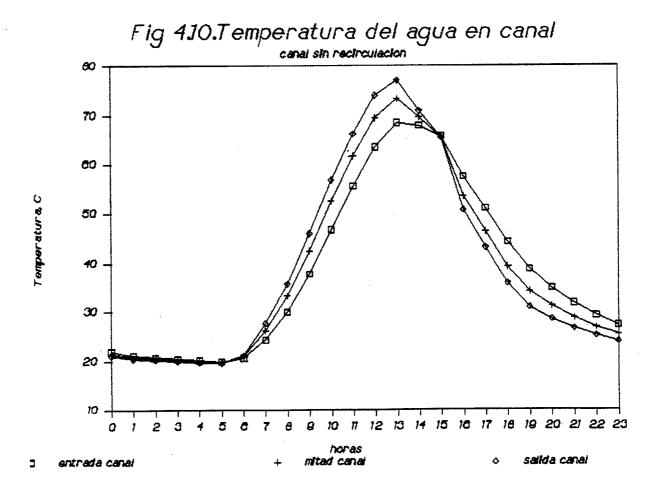
4.3.2.5. Eficiencia energética y exergética

Los valores de eficiencia energética y exergética para cada hora del día se han determinado de acuerdo con el procedimiento establecido en el capítulo 3. La eficiencia energética tiene una media de 38.2 % entre las 6 y 18 horas, con un máximo de 40 % a las 13 h.

Por su parte la eficiencia exergética tiene un valor medio de 1.03 %, y un máximo de 2.5 % a las 13 h. Todos estos datos corresponden al canal, tal y como aparecen en la figura 4.9.

Las cifras de eficiencia alcanzadas son nuevamente de un orden de magnitud comparable a los alcanzados en otros dispositivos de conversión energética tanto de energías renovables (captadores solares planos) como fósiles (calentadores domésticos de ACS a gas, por ejemplo).

Del análisis realizado hasta ahora se deduce con claridad que la variación de las temperaturas del agua y del aire así como de la humedad con el tiempo es mucho mas significativa que con la posición en el canal. El efecto principal es el de la variable tiempo, o mas exactamente la variación de la irradiancia solar y condiciones ambientales en cada momento.



4.3.2.6. Horas de funcionamiento en el día.

A la vista de cuanto se ha comentado relativo a la producción y eficiencias a lo largo del día, aparece que durante la noche hay muy poca producción de agua, y por tanto no hay ventaja en operar las 24 horas del día, cuando además hay unos consumos eléctricos inútiles. Las únicas condiciones en que puede tener sentido la operación nocturna son las de enfriamiento externo del condensador o el caso en que se disponga de agua o aire caliente de forma continua, como calor residual de algún proceso.

En consecuencia todo nuestro análisis de ahora en adelante estará circunscrito a las operación entre las 6 y las 18 hora solar.

4.3.3. Comparación modelos simplificado y general

Con objeto de contrastar el interés de operar con el modelo simplificado y conocer hasta que punto ofrece resultados similares al modelo general, se realizaron las respectivas simulaciones en igualdad de condiciones de operación, comparándose los resultados de temperatura y humedad de salida del aire del canal, así como la producción y eficiencia exergética. La representación gráfica de la temperatura y humedad del aire de salida aparece en la figura 4.10, donde aparece un

grado de concordancia apreciable. Por su parte la producción total es de 22.2 kg/día en el modelo simple y de 20.39 en el general, mientras que la eficiencia exergética media es de 0.87 % y 1.03 % respectivamente. Los datos horarios aparecen en la figura 4.11.

4.4.ANALISIS DEL MODELO GENERAL. CANAL CON FONDO DE PICON

Una de las particularidades de este trabajo es la introducción del uso de picón (lapilli volcánico) en el fondo del canal de evaporación a fin de comprobar si mejora los resultados.

4.4.1.Antecedentes

Isachenko [4.1] y Luikov [4.2] han estudiado la transferencia de masa y energía entre cuerpos porosos y fluidos. Se acepta que la presión de vapor en la capa de mezcla es prácticamente la de saturación a la temperatura correspondiente (las desviaciones son del orden de 0.2 a 0.7 %).

En la práctica se dan procesos de evaporación no adiabática, en los que el sistema considerado agua - mezcla aire/vapor intercambia calor con el exterior mediante los procesos habituales.

Cuando la evaporación se produce no desde la superficie libre sino desde una superficie porosa, los estudios teóricos señalaban

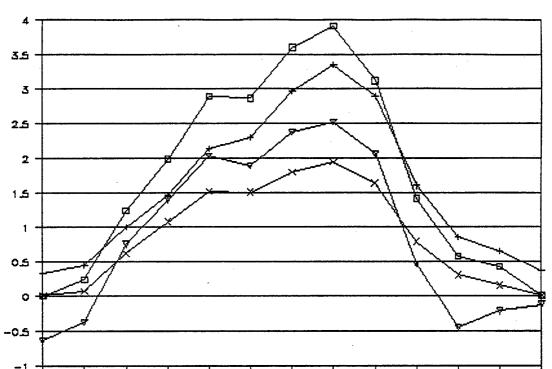
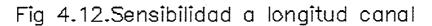
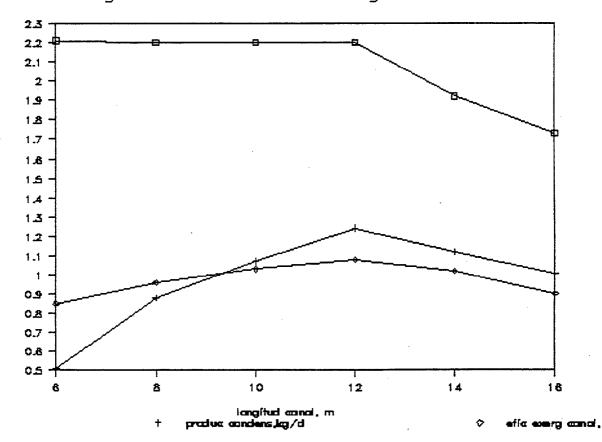


Fig 4.11. Comparacion modelos



efic eer simpl, %

produc grai, kg/d



en un principio que debía haber una caída en la intensidad de transmisión de calor. Sin embargo las experiencias demuestran lo contrario. Luikov ha sugerido la teoría de la evaporación volumétrica.

Unas experiencias en Moscú llevaron a determinar unos coeficientes en condiciones adiabáticas según las ecuaciones

$$N_{ui} = 1.6E-4R_{\bullet i}^{o.s}(PI/R_{\bullet}^{o.s})^{(-2/3)}$$

$$N_{ut} = 4.55E-3 \cdot R_{\bullet t}^{\circ -8} \cdot K^{\circ -4}$$

con K = número de Kutateladze = $h_{tg}/c_p/\Delta t$

4.4.2. Evolución comparada del canal con piso de picón o liso

Se realizaron simulaciones de ordenador con modelos que incluían diferentes coeficientes, uno para canal de fondo liso y otro con fondo de picón.

La diferencia entre ambos es que el segundo caso tiene un valor mayor de la absortancia del agua, b_3 (0.95 en vez de 0.9) además de que la ecuación usada para representar el coeficiente de evaporación h_* corresponde a la aportada por Isachenko

$$N_{ut} = 4.55E-3 \cdot R_{et}^{o.8} \cdot K^{o.4}$$

El resumen de los resultados es que estos mejoran en el canal con picón en lo que se refiere a la producción de agua, pero con eficiencias mas bajas.

Tabla 4.1. Comparación canal liso ó con picón

Variable	Productiv	Productiv	EficienciaEficiencia	
unidad	canal	condens	exergét	exergét
	kg/m²/día	kg/m²/día	canal %	global %
Liso	2.16	1.05	1.03	14.19
Picón	2.92	0.92	0.74	10.7

Las temperaturas de agua y aire así como la humedad especifica son menores en el caso del picón. Sin embargo la diferencia de humedad entre la entrada y salida del canal es mayor para el picón, lo cual explica que la producción sea un 35 % mayor. Desde este punto de vista es recomendable la utilización del picón, dado que además no encarece ni complica el proceso.

4.5.RESULTADOS DEL MODELO GENERAL. CONDENSADOR EN CICLO ABIERTO

4.5.1.Introducción

A continuación se va a analizar el conjunto del dispositivo de producción de agua, que incluye no solo el captador solar o cámara de evaporación que ya hemos estudiado, sino el condensador donde se recoge el agua producida, y que esta refrigerado por agua de alimentación o por aire. Este condensador es un elemento tradicional cuyo funcionamiento es bien conocido.

En primer lugar se analizará el funcionamiento en ciclo abierto, es decir con entrada y salida continua de aire al canal, y por tanto sin recirculación.

4.5.2. Eficiencias

Al introducir un nuevo elemento en el estudio, hay que considerar una eficiencia global que recoja el funcionamiento de canal y condensador. Incluye por una parte todas las salidas del sistema: aire, agua de circulación del canal, agua de refrigeración del condensador, producto condensado. Por otra las entradas de radiación solar y energía mecánica de ventilación. Esta eficiencia como siempre puede definirse tanto para la energía como para la exergía.

La eficiencia así definida encubre el resultado de producción de agua, pues el valor mas significativo en las salidas del proceso es el de la ganancia de energía o exergía del aire, siendo la energía o exergía de producto muy baja. Esto hace que se obtengan unas cifras razonables de eficiencia del conjunto, pero sin que sepamos con certeza el resultado respecto a la producción de condensado, que es el resultado final buscado.

Para conocer en detalle el rendimiento de producción de agua se define la eficiencia de producto, que es la relación de la energía o exergía de producto frente a las entradas de radiación y energía mecánica al sistema. El resultado de esta eficiencia será muy bajo en cifras absolutas, pero sirve de comparación entre diversas alternativas.

4.5.3. Parámetros utilizados

Los datos de operación e iniciales utilizados en la simulación son los mismos empleados hasta ahora para el canal, además de los siguientes que son propios del condensador:

caudal de agua de refrigeración 0.02 kg/s superficie de intercambio de calor 2 m^2 coeficiente global de transmisión de calor 30 $W/m^2/K$ temperatura de agua de mar igual o menor que la del ambiente

4.5.4.Resultados

Los resultados de temperaturas y eficiencias para el canal son iguales a los conocidos hasta ahora. En cuanto al condensador, el efecto fundamental es el de enfriamiento y deshumidificación del aire, actuando como un secador.

En el momento de máximas temperaturas (13 horas), las condiciones de entrada y salida del aire son las siguientes

Temperatura seca, °C, Humedad especifica,

kg vapor/kg aire seco

Entrada canal: 35 0.0228

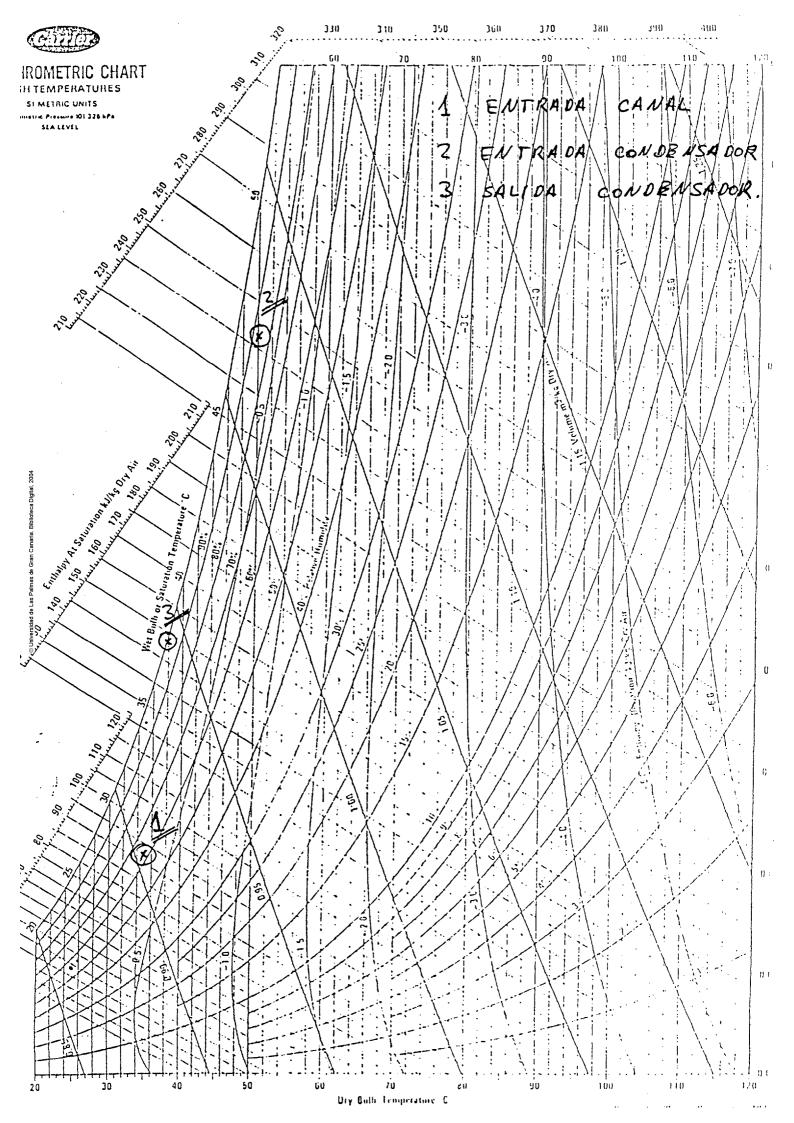
Entrada condensador: 50.2 0.0731

Salida condensador: 38.2 0.0437

El efecto puede representarse sobre un diagrama psicrométrico con los tres puntos citados. Figura 4.41 8

La producción de agua en el canal es de 2.16 kg/día mientras que el condensador es de 1.05 kg/día. Esto indica que no se recupera en el condensador toda la ganancia de humedad obtenida en el canal, por lo que habrán de modificarse las condiciones de funcionamiento de aquel.

La eficiencia energética del canal es de 35.97 % mientras que la exergética es de 1.03 %, ambas consideradas como media a lo largo de las horas de sol.



Las correspondientes eficiencias globales (para el conjunto de canal y condensador) son de 38.5 % para la energía y de 14.19 % para la exergía. A título de ilustración, si evaluamos la eficiencia sólo de producto en este caso, resulta ser 0.1473 % para la energía y de 0.0018 % para la exergía. Estas cifras, aunque no son representativas en valor absoluto, si pueden servir a efectos de comparación con otros casos.

4.6. RESULTADOS DEL MODELO GENERAL. CONDENSADOR EN CICLO CERRADO

En este punto se va a analizar el proceso en circuito cerrado, con recirculación continua de aire. El aire seco a la salida del condensador se vuelve a inyectar en el principio del canal mediante conducto de aire forzado. No se introduce aire atmosférico continuamente en el dispositivo, con lo cual el funcionamiento de éste solo depende de la radiación solar, pero independiente de las condiciones del aire atmosférico.

4.6.1.Resultados

Al ser el aire en circulación siempre el mismo en todo el sistema y no haber renovación, las condiciones de temperatura y humedad varían respecto al caso anterior. Los valores siguientes (13 h) ilustran la diferencia

Temperatura seca, °C, Humedad especifica, kg vapor/kg aire seco

Entrada canal: 35.4 0.0372

Entrada condensador: 50.1 0.0862

Salida condensador: 37.9 0.0431

Las temperaturas son muy similares en ambos casos. En cambio las humedades específicas varían. En el caso de funcionamiento en ciclo cerrado que estamos analizando, la ganancia de humedad en el canal es menor. El secado que puede obtenerse del aire es sin embargo mayor, lo cual explica la mayor producción en el canal. Los datos correspondientes incluyen una producción de agua en el canal de 1.54 kg/día mientras que el condensador es de 1.48 kg/día. La eficiencia energética del canal es de 21.94 % mientras que la exergética es de 1.13 %.

Las correspondientes eficiencias globales (para el conjunto de canal y condensador) son de 7.23 % para la energía y de 0.03 % para la exergía. La diferencia tan significativa en estos últimos valores respecto a los de ciclo abierto es debida a que en el caso de ciclo cerrado el aire no interviene en la determinación de la eficiencia, pues no entra ni sale del dispositivo y por tanto no figura en la expresión de ganancias de exergía.

A la vista de estos resultados, y siempre desde el punto de vista prioritario del funcionamiento del canal, éste produce mejores resultados cuando se opera en ciclo abierto o con renovación continua del aire.

4.7.RESULTADOS DEL MODELO GENERAL. CONDENSADOR REFRIGERADO POR AIRE

Una alternativa de funcionamiento para el canal sería la de refrigeración por aire ambiente en cada momento. En consecuencia se ha simulado dicha alternativa, cuyas variantes respecto a las anteriores son básicamente que

el aire de entrada al canal ya va precalentado. En cambio el agua de entrada al canal está a la temperatura del mar, sin precalentamiento en el condensador. Además hay que considerar que el coeficiente de transmisión de calor en el condensador es menor, dadas las peores condiciones transmisoras de los gases en general.

4.7.1.Resultados

La simulación estima unos resultados de 2.15 kg/día de agua en el canal, mientras que en el condensador son 0.23 kg/día,

sensiblemente menor que los anteriores. Las eficiencias energética y exergética del canal son de 35.84 % y 1.03 % respectivamente, mientras que las globales son 62.86 % y 19.29 %.

Se desprende que aunque el canal funciona de manera muy semejante, la operación del condensador aporta peores resultados cuando se refrigera con aire.

4.8.ANALISIS DE LA EFICIENCIA. SENSIBILIDAD

4.8.1. Sensibilidad de la eficiencia a diversas variables.

A continuación se van a comentar los rendimientos obtenidos en diferentes condiciones de operación del sistema, en particular con los parámetros que sean fácilmente modificables desde el exterior.

El procedimiento ha sido el de pasar el modelo matemático para diversos valores de las variables, comparando con un caso base o de referencia.

Los valores utilizados en el caso base han	sido los sig	uientes
exposición energética solar	21373	
kJ/m²/día		
temperatura de entrada del agua	295	K
temperatura de entrada del aire	298	K
humedad de entrada del aire	variable	
temperatura ambiente	variable	
longitud del canal	10	m
anchura del canal	1	m
altura del canal	0.4	m
caudal de aire en el canal	0.02	kg/s
caudal de agua en el canal	0.02	kg/s
caudal de agua de refrigeración	0.02	kg/s

4.8.2. Sensibilidad a la longitud del canal.

La longitud del canal tiene una influencia obvia en el área de captación solar además de en la perdida de carga del aire, y por tanto en el consumo eléctrico en ventilación. La productividad no varía entre los 6 y 10 m de largo, aunque la eficiencia exergética tiene un máximo en 12 m. En esa distancia es además donde mayor cantidad de agua produce el condensador; la eficiencia exergética conjunta va en disminución. Tabla 4.2 y figura 4.12.

Tabla 4.2. Sensibilidad ante la variación de longitud del canal

Variable	Productiv	Productiv	EficienciaEficiencia	
unidad	canal	condensad	exergét	exergét
	kg/m²/día	kg/m²/día	canal %	global %
Longitud, m				
4	2.17	0	0.73	22.83
6	2.21	0.52	0.85	18.85
8	2.2	0.88	0.96	15.78
10	2.2	1.07	1.03	14.18
12	2.2	1.24	1.08	12.5
14	1.92	1.12	1.02	11.21

4.8.3. Sensibilidad a la anchura de canal

El ancho del canal tiene una significación mas moderada en los resultados, como se deduce de la tabla 4.3. y figura 4.13. El óptimo desde el punto de vista de producción y eficiencia parece estar en un canal de una anchura entre 0.8 y 1 m pues es donde tiene una producción máxima, si bien las eficiencias son mejores en 1.2 m.

Tabla 4.3. Sensibilidad ante la variación de anchura del canal

Variable	Productiv	Productiv	EficienciaEficiencia	
unidad	canal	condens	exergét	exergét
	kg/m²/día	kg/m²/día	canal %	global %
Anchura, m				
0.4	2.17	0.11	0.72	22.7
0.6	2.21	0.68	0.85	18.56
0.8	2.21	1.01	0.96	15.54
1.0	2.16	1.05	1.03	14.19
1.2	2.12	1.18	1.08	12.51

4.8.4.Sensibilidad a la altura del canal

La altura del canal tiene un óptimo de producción para 0.6 m, donde tanto canal como condensador producen mas agua, con eficiencias poco variables. Tabla 4.4 y figura 4.14.

Tabla 4.4. Sensibilidad ante la variación de altura del canal

Variable	Productiv	Productiv	EficienciaEficiencia	
unidad	canal	condens	exergét	exergét
	kg/m²/día	kg/m²/día	canal %	global %
Altura,m				
0.2	1.58	0.75	1.03	5.58
0.4	2.21	1.22	1.03	13.45
0.6	2.25	1.25	1.03	13.44
0.8	2.16	1.09	1.03	13.65

effa every cond,

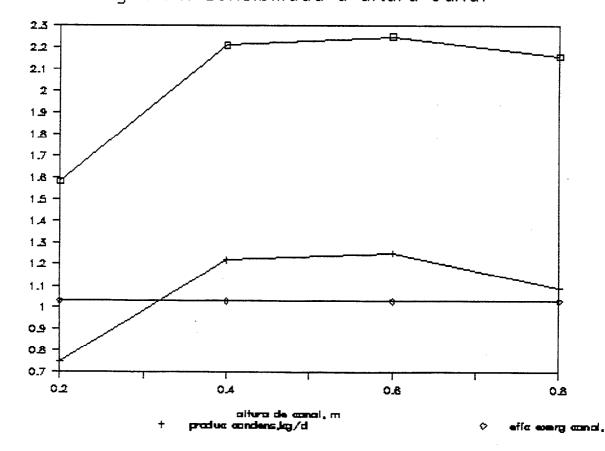
2.3 2.2 2.1 2 1.9 12 1.7 1.6 1.5 1.4 1.3 1.2 1.1 1 20 0.8 0.7 8.0 0.5 0.4 0.3 0.2 0.1 0.4 8.0 0.8 1.2

Fig 4.13. Sensibilidad a anchura canal

Fig 4.14. Sensibilidad a altura canal

anchera de conal, m

produc condens,kg/d



4.8.5. Sensibilidad al caudal de aire.

Este es uno de los parámetros con mas influencia en la producción y en el consumo de energía, por lo cual tiene un efecto importante en la eficiencia. Tal como se aprecia en la figura 4.15 y tabla 4.5 hay un máximo de la productividad y eficiencia del canal para un valor determinado del caudal de aire, del orden de 0.04 kg/s. Sin embargo con caudales por encima de 0.02 el condensador no opera bien, reduciendose su productividad hasta anularse.

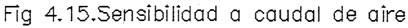
Tabla 4.5. Sensibilidad ante la variación de caudal de aire Variable Productiv Productiv EficienciaEficiencia unidad canal condens exergét exergét kg/m²/día kg/m²/día canal % global % Caudal aire, kg/s 0.01 1.31 1.02 0.85 7.97 0.02 2.16 1.05 1.03 14.19 0.03 2.27 0.17 0.88 19.4 0.04 2.32 0.76 22.11 0.05 2.29 0.69 22.39 0.06 2.29 0 0.62 23.47

4.8.6. Sensibilidad al caudal de agua al canal.

El caudal de agua de alimentación al canal tiene una marcada y clara influencia en la operación, de forma que el óptimo de producción esta en valores muy bajos de caudal, del orden de 0.04 kg/s. Lógicamente, el agua necesaria es la mínima para evaporar, e introducir mas implica aumentar la inercia térmica del conjunto, pero no producir mas. Las eficiencias por su parte no se ven muy afectadas por este parámetro. Tabla 4.6 y figura 4.16.

Tabla 4.6. Sensibilidad ante la variación de caudal de agua al canal

Variable	Productiv	Productiv	EficienciaEficiencia	
unidad	canal	condens	exergét	exergét
	kg/m²/día	kg/m²/día	canal %	global %
Caudal agua	,			
kg/s				
0.004	2.49	1.44	1.02	13.48
0.005	2.46	1.42	1.02	13.47
0.01	2.32	1.3	1.02	13.44
0.02	2.19	1.21	1.03	13.44
0.03	2.12	1.16	1.04	13.46
0.04	2.07	1.13	1.04	13.49



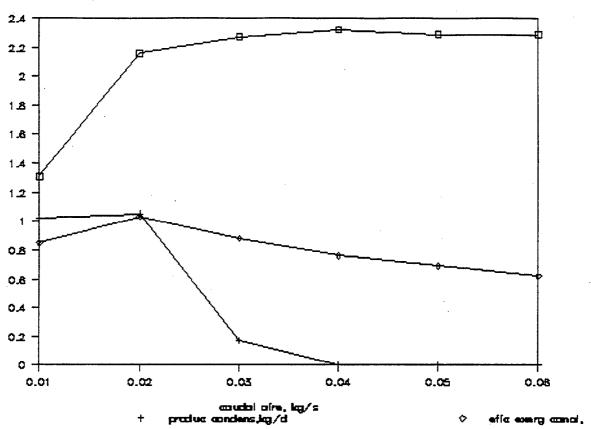
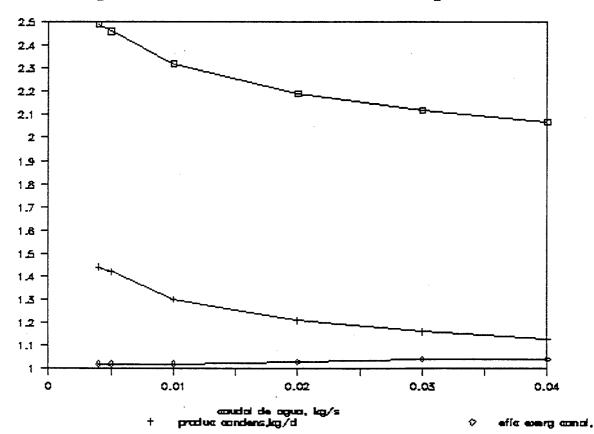


Fig 4.16. Sensibilidad a caudal agua



4.8.7. Sensibilidad al caudal de agua de refrigeración.

Esta es otra variable que muestra un óptimo de productividad para un valor de $0.05\ kg/s$, con eficiencia estable. Tabla $4.7\ y$ figura 4.17

Tabla 4.7. Sensibilidad ante la variación de caudal de agua de refrigeración

Variable	Productiv	Productiv	Eficiencia	aEficiencia		
unidad	canal	condens	exergét	exergét		
	kg/m²/día	kg/m²/día	canal %	global %		
Caudal agua	Caudal agua,					
kg/s						
0.03	2.16	1.15	1.03	13.51		
0.04	2.19	1.2	1.03	13.45		
0.05	2.22	1.24	1.03	13.41		
0.06	2.16	1.22	1.03	13.4		

4.8.8.Sensibilidad a la exposición energética.

En general una mayor exposición energética mejora la producción y la eficiencia del canal, tal y como se observa en la figura 4.18. La relación es prácticamente lineal. En la figura hay un punto de cierta discontinuidad que puede explicarse en el sentido de que se están representando valores medios de eficiencia frente a valores diarios de exposición. Sin embargo la forma en que varía la irradiancia a lo largo del día y por tanto la eficiencia no necesariamente se ajusta a la de los valores medios. Tabla 4.8.

Tabla 4.8. Sensibilidad ante la variación de exposición energética

Variable	Productiv	Productiv	EficienciaEficiencia	
unidad	canal	condens	exergét	exergét
	kg/m²/día	kg/m²/día	canal %	global %
Exposición,				
kJ/m²/día				
10850	1.21	0.64	0.51	11.46
16333	1.61	0.88	0.84	9.78
19191	2.2	1.07	1.03	14.18
21373	2.33	1.45	1.27	9.4

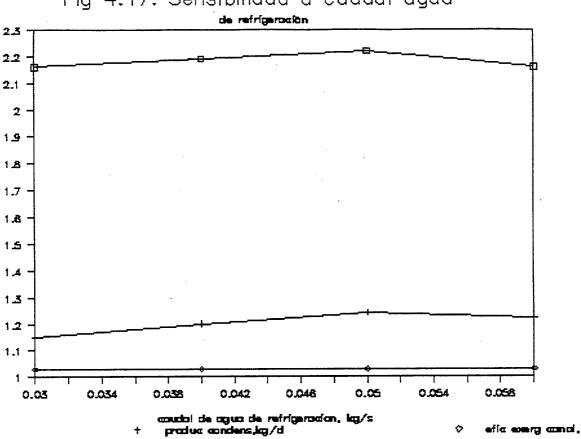
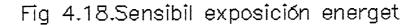
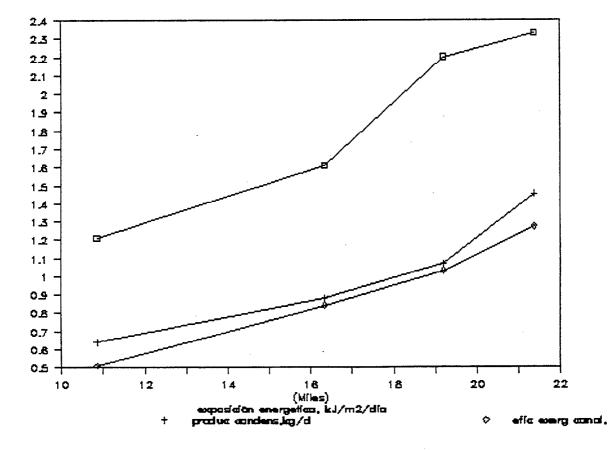


Fig 4.17. Sensibilidad a caudal agua





4.8.9. Sensibilidad a la temperatura del agua de refrigeración.

Un estudio del efecto de menores temperaturas en el condensador equivale a suponer la introducción de un enfriador del agua de refrigeración mediante un equipo electromecánico (compresor) de frío. Se trata de determinar si la refrigeración a baja temperatura (entre 0 y 15 °C) mejora la condensación, y cuanto. Una vez hecho el calculo se observan efectivamente aumentos en la producción de hasta un 64 %. Sin embargo esta mejora es a costa de una reducción en la eficiencia de 27 %, dado el consumo eléctrico necesario para enfriar el agua de refrigeración. Tabla 4.9 y figura 4.19.

Tabla 4.9. Sensibilidad ante la variación de temperatura del agua de refrigeración

Variable	Productiv	Productiv	EficienciaEficiencia			
unidad	canal	condens	exergét	exergét		
	kg/m²/día	kg/m²/día	canal %	global %		
Temperatura	de		÷:			
agua de ref	agua de refrigeración, °C					
15	1.51	1.14	0.51	11.82		
10	1.53	1.41	0.53	10.71		
5	1.55	1.65	0.56	9.68		
0	1.58	1.87	0.58	8.6		

4.8.10. Sensibilidad a la humedad relativa ambiental.

Una reducción del 15 % en la humedad relativa del aire ambiente durante el día produce el efecto de que el aire dentro del canal se humedece mas, y la productividad del canal aumenta en un 5 %. Sin embargo en el condensador la producción se reduce un 7 %, lo cual esta relacionado con el hecho de que al tener menor humedad el aire de entrada, aún cuando se carga de vapor a lo largo del canal, no se humedece lo suficiente para poder extraerle condensado. Esto pone de manifiesto nuevamente como parte del agua producto proviene del secado del aire ambiente, y no sólo de la humedad absorbida en el canal. Tabla 4.10 y figura 4.20.

Tabla 4.10. Sensibilidad ante la variación de humedad relativa ambiental

Variable	Productiv	Productiv	EficienciaEficiencia	
unidad	canal	condens	exergét	exergét
	kg/m²/día	kg/m²/día	canal %	global %
Humedad rel	ativa			
caso base	2.16	1.05	1.03	14.19
- 5 %	2.2	1.12	1.08	13.5
- 10 %	2.24	1.05	1.13	13.56
- 15 %	2.28	0.97	1.21	13.65

Fig 4.19. Sensibil a temper refrigerant

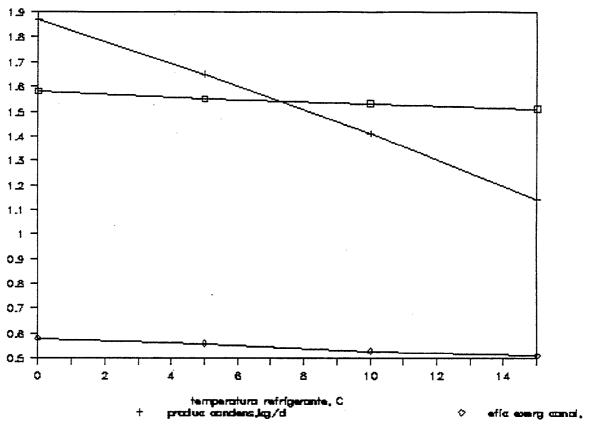
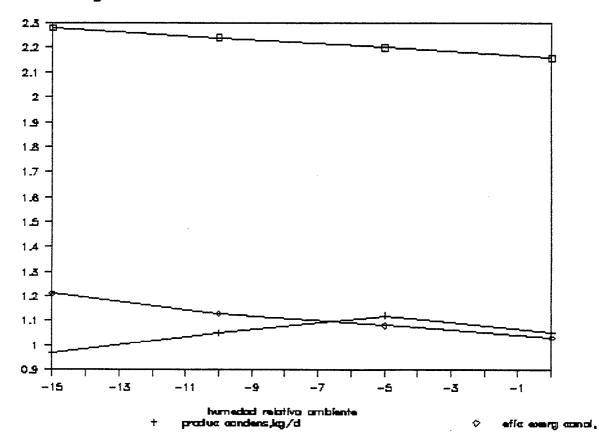


Fig 4.20. Sensibil a humedad ambiente



4.8.11. Sensibilidad respecto a la temperatura ambiente.

La variación de la temperatura ambiente es favorable si el aire se calienta, pues una disminución de aquella reduce la productividad aunque la eficiencia mejore pues se trabaja con energía de menor calidad. En cambio en el condensador hay mejora, pues al bajar la temperatura ambiente lo hace también la temperatura del agua de mar que refrigera aquél, y por tanto mejora la condensación. Tabla 4.11 y figura 4.21.

Tabla 4.11. Sensibilidad ante la variación de temperatura ambiente

Variable	Productiv	Productiv	EficienciaEficiencia		
unidad	canal	condens	exergét	exergét	
	kg/m²/día	kg/m²/día	canal %	global %	
Temperatura, C					
caso base	2.16	1.05	1.03	14.19	
- 2 C	2.06	1.36	1.12	10.16	
- 4 C	1.97	1.38	1.21	9.51	
- 6 C	1.88	1.42	1.31	8.31	

4.8.12. Sensibilidad al área del condensador.

El área de condensador disponible para la segunda etapa del proceso, es decir la producción de agua por deshumidificación de aire, tiene también una cierta influencia, de forma que como se aprecia en la tabla 4.12 y figura 4.22, la productividad es óptima con una superficie del orden de 8 m², mientras que la eficiencia es menos sensible.

Tabla 4.12. Sensibilidad ante la variación de área de condensador

Variable	Productiv	Productiv	EficienciaEficiencia	
unidad	canal	condens	exergét	exergét
	kg/m²/día	kg/m²/día	canal %	global %
Area, m²				
2	2.16	1.59	1.03	12.91
4	2.19	1.61	1.03	12.9
6	2.22	1.63	1.03	12.88
8	2.25	1.66	1.03	12.89
10	2.16	1.23	1.03	13.82

Fig 4.21. Sensibil temperat ambiente

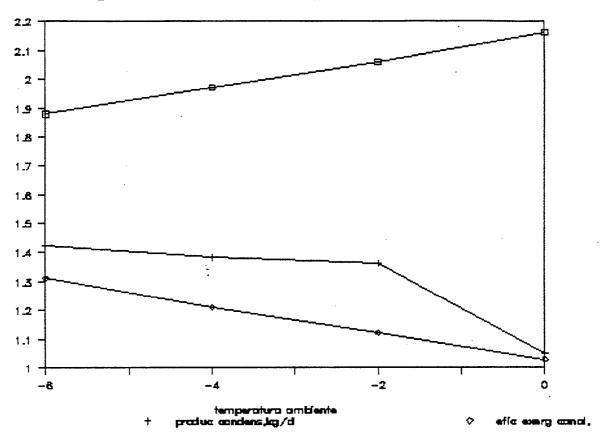
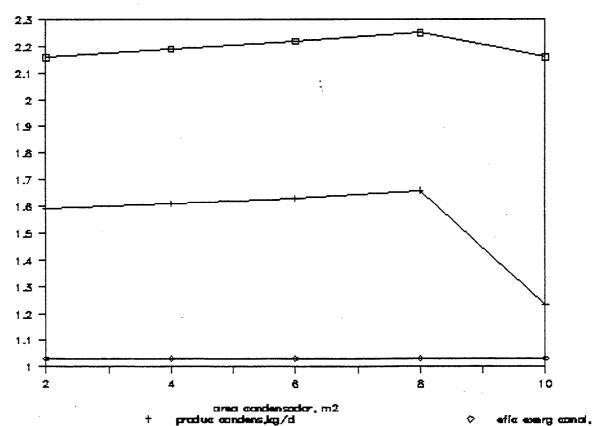


Fig 4.22. Sensibil area condensador



4.8.13. Sensibilidad respecto del coeficiente de transmisión de calor en el condensador.

Con respecto al coeficiente de transmisión de calor en el condensador se observa en la tabla 4.13 y figura 4.23 como se requiere también un coeficiente mínimo, en este caso del orden de 150 W/m².K para que la productividad tenga un máximo, mientras que la eficiencia tiene un valor razonable.

Tabla 4.13. Sensibilidad ante la variación de coeficiente de transmisión de calor en el condensador

	Variable	Productiv	Productiv	EficienciaEficiencia	
	unidad	canal	condens	exergét	exergét
		kg/m²/día	kg/m²/día	canal %	global %
Coeficiente,					
	W/m²/día				
	30	2.16	1.05	1.03	14.19
	50	2.16	1.52	1.03	12.97
	100	2.19	1.61	1.03	12.9
	150	2.22	1.63	1.03	12.88
	200	2.16	1.23	1.03	13.82

4.8.14. Variación respecto a una temperatura fija de entrada de agua

En este punto vamos a analizar el efecto que tendría sobre los resultados la introducción en el canal de agua de alimentación caliente, a una temperatura constante a lo largo del día. Este sería el caso si se dispusiera de agua que aportara calor residual de algún otro proceso cercano, o bien de algún tipo de almacenamiento.

La producción aumenta apreciablemente, si bien el incremento en la eficiencia no es tan notable ya que también naturalmente aumenta también la exergía de entrada. Tabla 4.14 y figura 4.24.

Tabla 4.14. Sensibilidad ante la variación de temperatura de entrada del agua

Variable	Productiv	Productiv	EficienciaEficiencia		
unidad	canal	condens	exergét	exergét	
	kg/m²/día	kg/m²/día	canal %	global %	
Temperatura					
agua, °C					
25	1.54	0.59	0.53	13.89	
30	1.73	0.82	0.67	12.46	
35	1.92	0.99	0.81	11.16	
40	2.13	1.14	0.94	11.33	

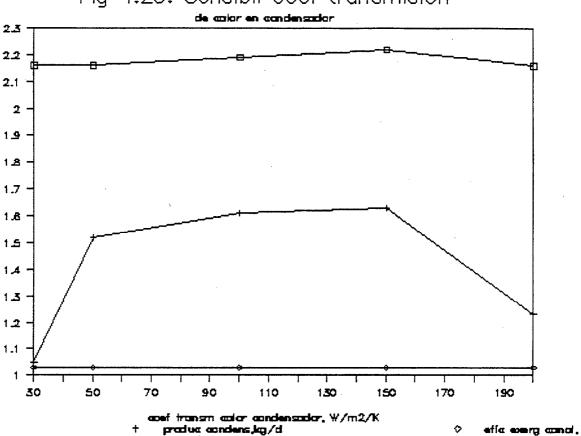
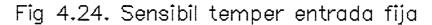
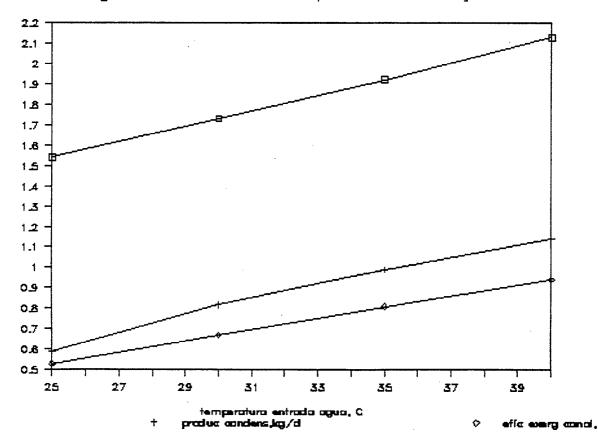


Fig 4.23. Sensibil coef transmision





4.9. RESUMEN

En este capítulo se ha estudiado el comportamiento de los modelos matemáticos que simulan el sistema, tanto un modelo simplificado como uno general. En primer lugar se han analizado los resultados para cada modelo en términos de producción de agua y eficiencia energética y exergética, comprobándose su concordancia y concluyendo que el modelo simplificado, a pesar de su sencillez, permite conocer muy aproximadamente las condiciones de operación y resultados de la simulación.

Asimismo se han analizado diversas alternativas de funcionamiento del canal, ya sea liso o con picón, en ciclo abierto o cerrado, etc. En general se ha obtenido una idea completa sobre el orden de magnitud de los resultados en cada caso, además de determinar en una primera aproximación los valores de los parámetros que dan mejores resultados.

Como resumen podemos indicar que las variables que mas afectan a los resultados son las siguientes:

- -irradiancia solar
- -humedad ambiental
- -temperatura ambiental
- -longitud del canal
- -caudal de aire
- -caudal de agua de alimentación al canal

-caudal de agua de refrigeración

A la vista de los resultados obtenidos en los análisis de sensibilidad podemos deducir un conjunto de condiciones en que la operación del sistema será óptima, siempre desde el punto de vista básico de la producción del canal y de la eficiencia exergética. Los valores de estas variables tienen aún un carácter provisional, pendientes del contraste que se hará en próximos capitulos. Hay algunos parámetros sobre los que naturalmente no se puede influir, como son las condiciones atmosféricas.

El conjunto de condiciones de diseño mas significativas para un funcionamiento óptimo sería el siguiente

longitud del canal	12	m
anchura del canal	0.8	m
altura del canal	0.6	m
caudal de aire	0.02	kg/s
caudal de agua de alimentación al canal	0.004	kg/s
caudal de agua de refrigeración	0.05	kg/s
superficie de condensador	8	m²
coeficiente de transmisión de calor	150	W/m²/K

REFERENCIAS

- [4.1] V. Isachenko, V. Osipova, A. Sukomel, Transmisión del calor, Boixareu Editores- Marcombo, Barcelona, 1973.
- [4.2] A.V. Luikov, Heat and mass transfer in capillary porous bodies, Pergamon Press, 1966.

CAPITULO 5. PLANTA EXPERIMENTAL. EXPERIENCIAS.

5.1. OBJETIVOS Y PLANTEAMIENTO DE LA EXPERIENCIA

La finalidad general de la experiencia es la de servir de apoyo a los resultados del modelo matemático que simula el proceso real a fin de adecuar éste a las condiciones de operación y a los resultados obtenidos. En todo caso la experiencia realizada es de caracter muy simple, por lo que no se pretende con ella validar de una manera rigurosa el modelo de simulación.

Mas concretamente pueden establecerse como objetivos específicos:

-Determinación de las variables críticas, a las que sea mas sensible el comportamiento del proceso.

-Determinación de las condiciones óptimas de operación en cada caso, dependiendo de las circunstancias externas (meteorología).

-Análisis de la correlación entre las características de funcionamiento en piso plano o cubierto de picón poroso.

-Determinación de los caudales de agua que pueden obtenerse a fin de conocer la productividad final del proceso.

Adicionalmente y aunque no se ha realizado en este trabajo puede analizarse la correlación de valores de irradiancia solar, medidos y calculados.

El diseño de la planta se hizo en base a una serie de criterios que han gobernado todo el proyecto. En primer lugar, era necesario contar con dos experiencias simultáneas referidas al proceso en piso plano y al de piso cubierto de picón, respectivamente, que permitieran analizar las diferencias y previsibles mejoras de uno sobre otro. Este estudio comparativo se plasma en la construcción de dos canales de geometrías iguales, en paralelo y de funcionamiento independiente.

Por otra parte se procuró realizar el diseño con el proceso mas simple y en materiales de uso común en la medida de lo posible, huyendo de una sofisticación técnicamente posible pero que nos pareció fuera de lugar dada la aplicación prevista del sistema.

Por último, se incluyó en la planta piloto una dotación de instrumentos para medida y registro de variables que si bien no serían en absoluto recomendables en una instalación standard, si lo son en una planta experimental como es el caso donde la idea fundamental es la de obtener datos de funcionamiento.

5.2. DESCRIPCION DE LA PLANTA.

Las experiencias correspondientes a este trabajo se han realizado en una instalación piloto diseñada y construida expresamente, en terrenos de la Central eléctrica de Jinámar, (de Unión Eléctrica de Canarias S.A., UNELCO). Dicha planta, con una superficie útil de 2x10 m², fue dotada de los correspondientes equipos de medida y operó entre los meses de octubre de 1984 y septiembre de 1985.

La instalación piloto consta de tres conjuntos principales, correspondientes a la toma de agua de mar, canales de evaporación y equipo de medida y registro. Estaba situada en el extremo Este del dique de escollera en la Central térmica de Jinámar (T.M.Las Palmas), y se alimenta directamente de agua de mar, con un contenido en sales de aproximadamente 42000 ppm, de acuerdo con análisis del propio laboratorio de la Central.

5.2.1. Toma de agua de mar.

El agua de alimentación a la planta se obtiene mediante dos electrobombas horizontales instaladas sobre una plancha en la escollera, de 1.12 y 0.6 kW respectivamente. Las bombas aspiran mediante válvula sumergida y envían el agua a los condensadores antes de su paso a los canales.

5.2.2. Canales de evaporación.

Los canales son dos, absolutamente iguales y de funcionamiento paralelo, salvo que el fondo de uno de ellos va cubierto de picón, como se ha explicado. El segundo canal tiene el fondo liso. Están construidos en muro de bloque, sobre una base de hormigón armado, y cubiertos de vidrio transparente. Sus dimensiones son de 11 m de longitud por uno de anchura y de 0.4 m altura, con una pendiente en el fondo de 1 %.(Figura 5.1). De los once metros solo diez son útiles, puesto que en el último tramo se encuentra la batería condensadora y el ventilador, y esta cubierto con plancha aislante, constituyendo la zona fría del canal.

Las paredes de bloque son de 20 cm de espesor, mientras que la cubierta esta formada por cuadros de vidrio standard de 1x1 m² y 5 mm de espesor, dispuestos sobre un marco metálico. La plancha de vidrio tiene una conductividad térmica de 0.75 W/m/K con una transmitancia de 86 %, y absortancia de 5 %.

5.2.3.Condensador.

En el tramo final de cada canal se encuentra el condensador de humedad del aire, enfriado por agua de mar. En un principio se instaló una batería de fan-coil comercial, con tubos de cobre aleteados en aluminio, si bien posteriormente y por problemas de

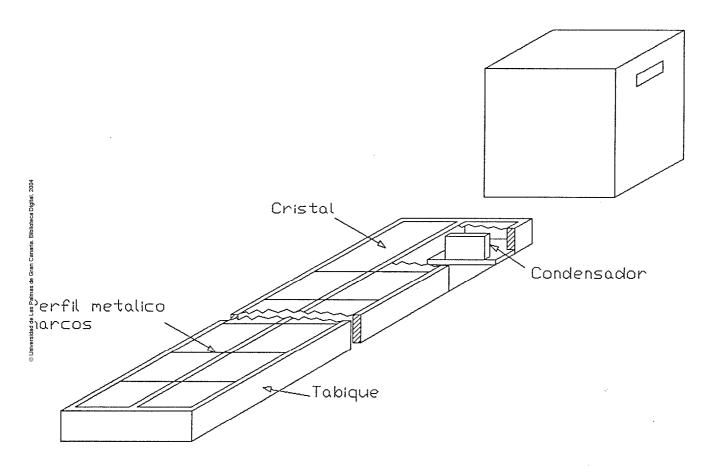


Figura. 5.1.

corrosión se substituyó por un enfriador de flujos cruzados en tubos capilares de plástico, con diámetro 1.5 mm, espesor 0.125 mm, longitud de tubos 1 m, superficie frontal de paso de 0.18 m^2 y superficie total de intercambio de calor de 7.6 m^2 .

En ese mismo tramo final se encuentra un ventilador centrífugo de impulsión de aire, de 480 W, mientras que un segundo ventilador helicoidal, de 132 W se instaló en la tubería de retorno de aire. Este segundo ventilador es de velocidad regulable. El aire circula en circuito cerrado, sin contacto con el exterior, y solo sigue el doble proceso de humidificación y posterior secado.

5.2.4. Instrumentos de medida en el canal.

Cada canal esta provisto de los siguientes instrumentos de medida:

-Rotámetro para caudal de agua de alimentación, para medidas entre 1 y 10.5 L/minuto.

-Tres termopares (entrada, intermedio, salida) para medida de temperatura de agua. Termopares tipo E de cromel/ constantan.

-Tres sondas (entrada, intermedia y salida) para medida de temperatura (Pt 100) y humedad del aire circulante. Las sondas admiten medidas de 273-333 K (0-60 °C) y 0-100 % humedad relativa. Los respectivos transductores proporcionan una señal

analógica de salida en intensidad de 4-20 mA, que posteriormente se toma en el data-logger entre 1 y 5 V.

5.2.5. Depósitos de agua producto.

Se dispusieron asimismo dos depósitos de 200 litros c/u., en fibrocemento, para recogida del agua producto de los canales. Cada depósito lleva instalada una sonda de medida de nivel de agua por conductividad, que permite conocer la producción de cada canal en cualquier momento, y que están conectadas a conversores con salida analógica de 4 a 20 mA.

5.2.6. Instrumentación meteorológica y de proceso.

Además de los instrumentos mencionados, la planta dispone de una estación meteorológica capaz de medir las siguientes variables:

Temperatura ambiente	-50	a	+50	°C.
Humedad relativa ambiente	0	a	100	8
Presión atmosférica	700	a	1100	mbar
Velocidad de viento	0	a	50	m/s
Irradiancia solar global sobre				
superficie horizontal	0	a	1500	W/m².

Los instrumentos están montados sobre una caseta junto a los canales, excepto el anemómetro que esta sobre una torre de 10 m de altura. La señal de cada uno de los sensores es procesada en los correspondientes conversores que a su vez proporcionan una señal de salida en tensión de 1 a 5 V.

A su vez, todas las señales citadas hasta ahora (meteorológicas, temperaturas y humedades en los canales y niveles de agua producto en los depósitos) son introducidas a un sistema de almacenamiento de datos, instalado en la misma caseta de instrumentación y medida. El sistema (SANEI 7V07) tiene un scanner dotado de 20 canales y tomaba datos con frecuencia programada de una hora, pasandolos a papel térmico. Tiene entradas de tensión y función de entrada directa para varios tipos de termopares.

Además de una amplia información numérica sobre el comportamiento de la planta piloto, durante los meses en que ésta estuvo en marcha se extrajeron algunas experiencias de interés, relacionadas fundamentalmente con el propio diseño de la planta y con los materiales utilizados en la misma.

5.3. EXPERIENCIAS OBTENIDAS

5.3.1.Toma de agua.

El agua de mar, que había de servir tanto como agua de refrigeración de condensadores como de alimentación a la propia planta, se tomó de la laguna de decantación hecha en escollera de la que toman agua de refrigeración todos los grupos de producción termoeléctrica asi como alimentación para las plantas de desalación conocidas como Las Palmas I, II y III. Las bombas de impulsión, que habían de salvar un desnivel de unos 20 m, eran de tipo horizontal y de superficie, de 1100 y 590 W respectivamente. En un momento determinado la altura de las bombas sobre el nivel del mar no fue suficiente para la aspiración, dadas las bajas mareas características de los meses de septiembre y octubre, obligando a bajar la cota de las bombas. En este período se probó también una bomba sumergible de la que se pudo disponer, si bien era muy corta de caudal.

5.3.2.Condensadores.

Por otra parte, el carácter notablemente agresivo del agua hizo que los condensadores que inicialmente se habían instalado (baterías comerciales de tubo de cobre y aleteado de aluminio) no pudieran resistir la corrosión observandose picaduras en las

soldaduras y las "U" de los tubos. Ante la imposibilidad de controlar la corrosión, se optó por cambiar las baterías, instalándose unas de plástico, inertes a la corrosión.

La utilización de una batería de tubos de plástico para una aplicación de condensación de vapor se justifica porque en este caso los tubos para la transmisión de calor eran prácticamente capilares, de forma que siendo el espesor muy pequeño, se mejora la conductancia y se mantiene la facilidad de transmisión del calor. Tal como se ha indicado, el diámetro y espesor de los capilares en cuestión son de 1.5 y 0.125 mm respectivamente.

Las dos baterías, una en cada canal y construidas en polisulfonas y resina epoxy, fueron instaladas en abril de 1985 y estaban seleccionadas para las condiciones medias de operación en los canales.

5.4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

5.4.1.Datos obtenidos.

De entre las diversas experiencias realizadas se han seleccionado un número de ellas por ser las mas completas en cuanto a datos se refiere o por ser mas significativas respecto a algún parámetro en particular. En concreto se ha dispuesto de datos correspondientes a los días siguientes

MES DIAS

Mayo 20, 21, 22, 23, 24

Junio 21, 22, 23

Julio 14

Agosto 1, 2, 10, 11, 16, 18

Septiembre 1, 2, 3, 4, 5

En el Anexo 5.1 se incluyen las tablas de datos correspondientes.

Se dispone asimismo de datos de irradiancia solar horaria entre los meses de noviembre 1984 y septiembre 1985.

5.4.2. Análisis de los datos.

Para el estudio de los resultados vamos a ir revisando los datos obtenidos en los días de la experiencia, centrandonos en concreto en el día 5 de septiembre por ser mas significativo, e incluyendo otros días cuando sean asimismo de interés.

5.4.2.1. Radiación solar.

La radiación solar se midió entre los meses de noviembre 84 y septiembre 85 mediante valores de irradiancia a la hora solar. No se midió con mayor frecuencia ya que al estar el modelo teórico basado en el supuesto de condiciones estacionarias a lo

largo de cada hora del día, se consideró que la medida horaria era suficientemente representativa para ese modelo.

Es de señalar que en general los valores de exposición energética global medidos son mas bien bajos, debido probablemente a la situación de la estación experimental, no muy alejada de Las Palmas. En la figura 5.2 se aprecia como la irradiancia media para agosto es de sólo 18277 kJ/m2.d, con un máximo de 22057. Para julio los valores correspondientes son de 17532 y 25423 respectivamente y para septiembre son 16780 de media y 21405 de máxima.

5.4.2.2. Temperatura del agua en el canal.

La temperatura del agua en el canal tiene una evolución muy marcada en el tiempo, de forma que sigue a la irradiancia, como aparece representado en la figura 5.3 para el día 0509. Los valores en las horas de la noche se mantienen relativamente estables, y es en las horas de sol cuando se eleva el nivel térmico del agua.

En relación con el avance del agua en el canal, esta se calienta habitualmente a medida que avanza por el conducto, de modo que la temperatura va ascendiendo desde la entrada hacia el centro y hacia la salida. El calentamiento asciende a valores del orden de 10 a 12 °C.

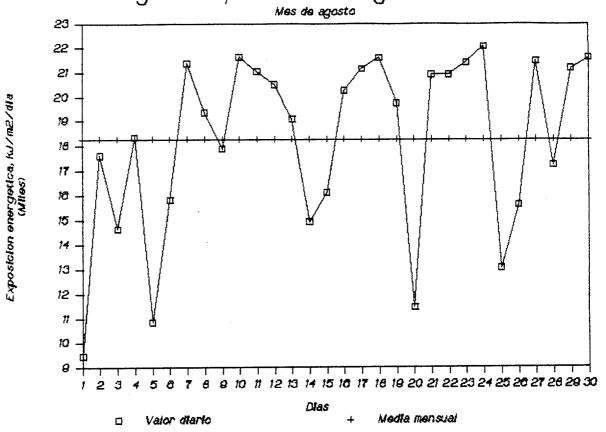
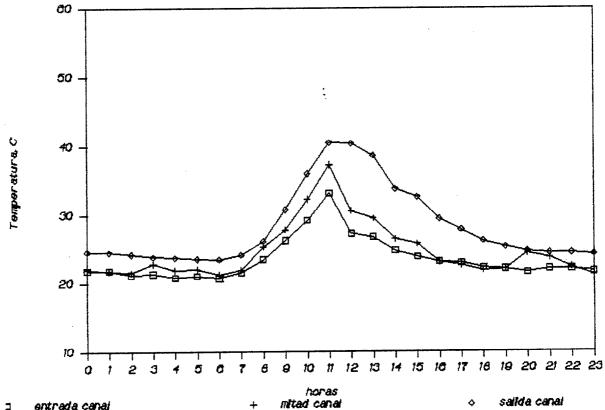


Fig 5.3.Temperatura de agua en canal



5.4.2.3. Temperatura del aire en el canal.

El aire tiene una evolución ligeramente diferente a la del agua, como es lógico debido a sus propiedades térmicas. En general la temperatura también sigue a la irradiancia, si bien las elevaciones son menores. Es importante recordar que la experiencia se realizó con el sistema operando en ciclo cerrado, con recirculación del aire.

La evolución a lo largo del canal es muy variable, pues resulta muy sensible a la radiación de cada día. En días de radiación baja o con variaciones fuertes en la irradiancia la temperatura del aire llega a descender entre la entrada y la mitad o la salida del canal. En la figura 5.4 se representa la variación de temperatura a lo largo del día para la entrada y salida del canal, con un calentamiento apreciable que llega hasta los 15 °C.

La relación entre ambas temperaturas del agua y del aire en este caso es tal que en general la segunda es mas alta que la del agua.

5.4.2.4. Humedad del aire en el canal.

En cuanto a la humedad del aire, se midió la humedad relativa como se ha dicho y la forma de la curva a lo largo del día es la de la figura 5.5 donde se observa como el aire esta próximo a la

Fig 5.4.Temperatura de aire en canal

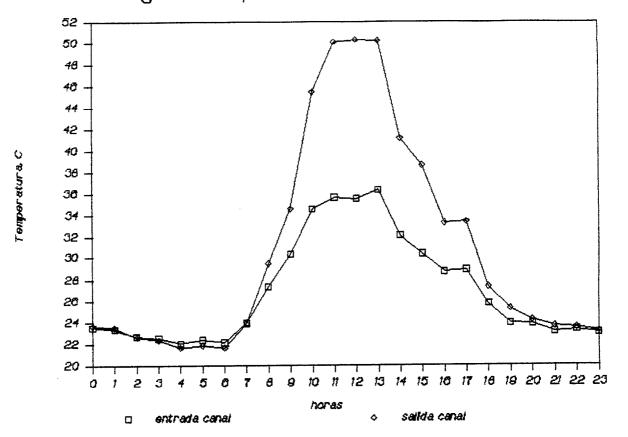
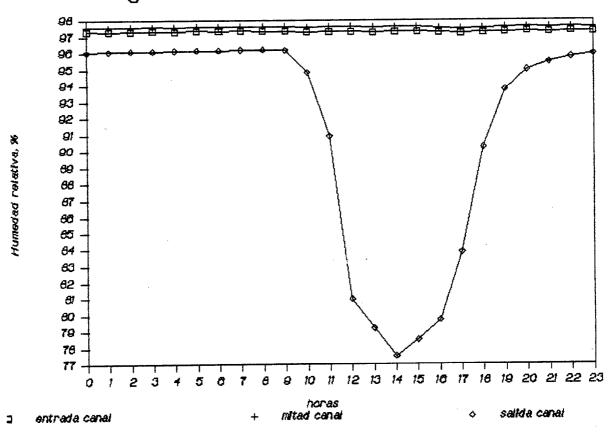


Fig 5.5.Humedad relativa aire en canal



saturación durante buena parte de las horas del día salvo en las del mediodía en que baja a 78 %. Esta situación anticipa alguna de las conclusiones que se comentarán posteriormente relativa a la necesidad de reducir la humedad en la entrada del canal para que el aire pueda absorber una buena ganancia de vapor.

De los datos expuestos hasta ahora resulta que tanto las temperaturas como la humedad son mucho mas sensibles al nivel de irradiancia que a la posición en el canal. Las curvas tienen una variación notable de acuerdo con la irradiancia en cada hora del día, mientras que la variación respecto a la longitud del canal es mínima, y solo apreciable en la temperatura del agua que se calienta sensiblemente en la mayoría de los casos. Esta tendencia coincide sensiblemente con lo previsto en el análisis del modelo matemático.

5.4.2.5. Producción de agua.

La producción de agua en el condensador se concentra en las horas del día, siendo las horas de la noche prácticamente inútiles en este sentido. En las tablas de datos diarios del anexo se incluyen los datos correspondientes.

La distribución horaria de estas cantidades aparece en la figura 5.6 para el día 05.09. Se observa como las horas de la noche no aportan sino una cantidad no significativa a la

producción, menor del 5 % del total, asimismo coincidente con el análisis teórico.

5.4.2.6. Comparación dos canales.

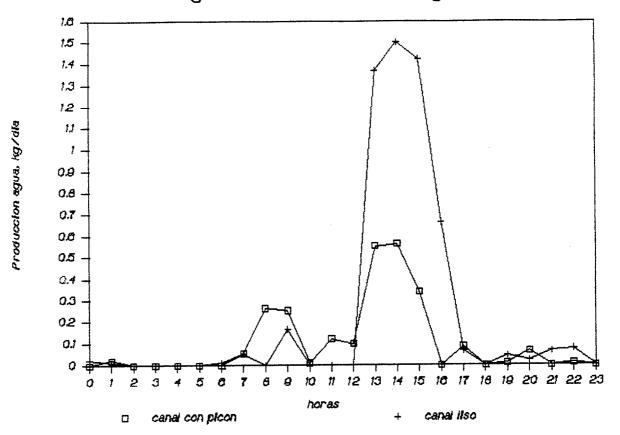
Dentro de la experiencia estaba también la intención de comparar en lo posible el comportamiento de los dos canales, el de fondo cubierto de picón y el de fondo liso. A pesar de las dificultades habidas con los instrumentos de medición, un análisis de algunas de las cifras incluidas en las hojas del Anexo 5.1. permite deducir alguna relación entre las temperaturas en ambos casos.

Un análisis comparativo de las temperaturas de agua o aire en los dos canales (cubierto de picón o liso) nos lleva a las siguientes conclusiones : La temperatura del agua al final del canal de fondo liso se mantiene mas fría en las primeras horas del día, si bien a la tarde se llega a calentar mas que en el canal de picón. Figura 5.7 referida al día 14.07.

La temperatura del aire se suele mantener mas fría en el canal de fondo liso, como se aprecia en la figura 5.8 del día 14.07.

La humedad relativa no difiere mucho en uno y otro caso. Las diferencias son de dos puntos porcentuales y en todo caso por encima de 95 %.

En cuanto a la producción de agua, un análisis de los resultados para julio y agosto no permite deducir una relación



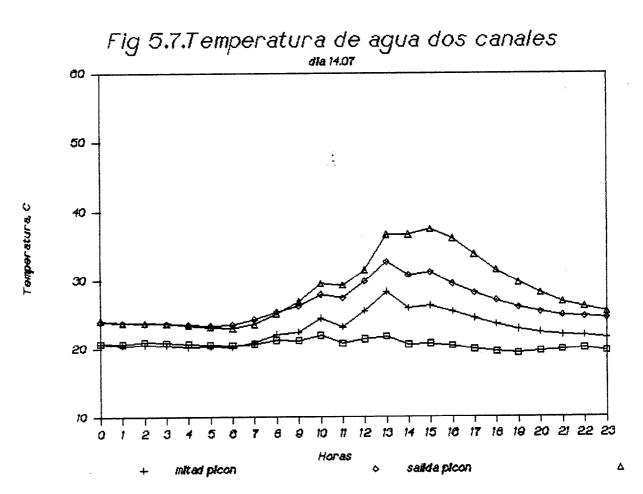
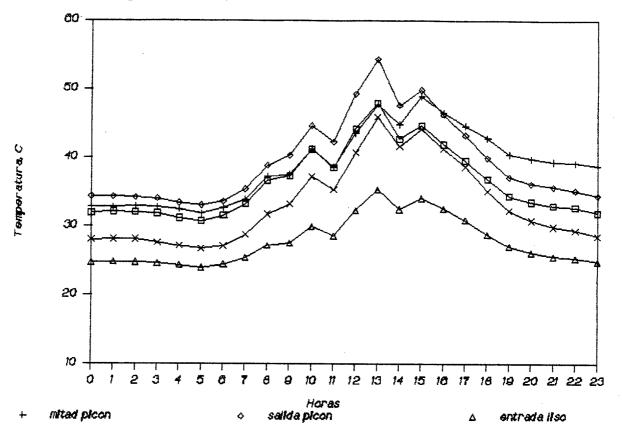


Fig 5.8.Temperatura aire en dos canales



1 John Consider of the Comment of the Control of th

clara entre los dos canales con picón o liso, respectivamente. En la figura 5.9 se representan las productividades obtenidas en ambos canales, sin que se pueda concluir una tendencia definida. Sin embargo la relación de productividad en el canal con picón a la de canal liso tiene una ligera desviación: un 61 % de valores de esta relación esta por encima de la unidad. Puede concluirse que en general produce mas agua el canal con fondo de picón.

5.5.DISCUSION DE LOS RESULTADOS.

Además de los comentarios realizados en el apartado 5.3., pueden añadirse algunas consideraciones sobre los resultados obtenidos y su relación con los esperados de acuerdo con la simulación previa.

Tanto el nivel general de las temperaturas de agua y aire como su tendencia al calentamiento a lo largo del canal se mantienen dentro de lo previsto.

La humedad relativa es comparable a la esperada. Sin embargo la producción de agua es muy baja. La observación de los canales durante la experiencia mostró que la cara inferior de los cristales a veces estaba húmeda por condensación. Esto parece indicar por una parte que el caudal de aire utilizado era muy bajo (de hecho era del orden de una décima parte de los valores que se han manejado en el modelo) lo cual impedía el suficiente

Fig 5.9 Comparacion productividad

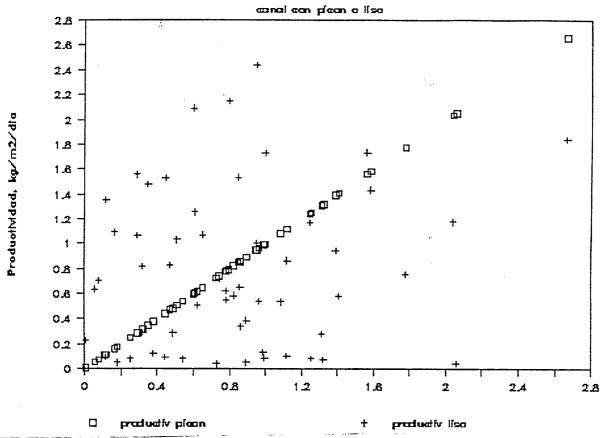
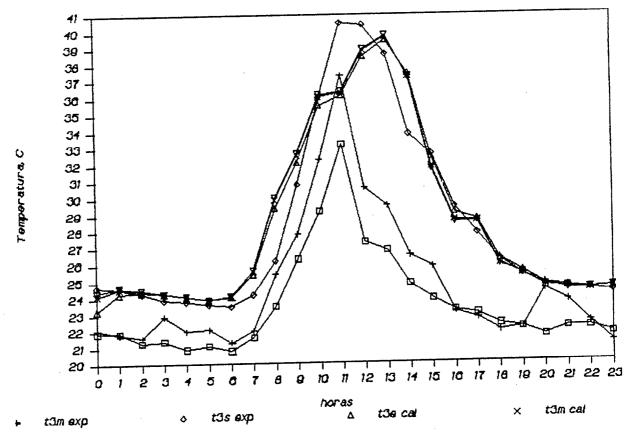


Fig 5.10.Temperatura de agua en canal



arrastre de humedad. Además esto influye en la transmitancia del cristal de cubierta a la radiación solar, que se reduce.

Otra razón es un nivel de aislamiento bajo, lo cual aumenta las pérdidas de calor al exterior y reduce la producción y la eficiencia del sistema.

Hay otras consideraciones mas bien de tipo constructivo, como pueden ser la importancia de diseñar adecuadamente los sistemas de distribución del agua en los canales de forma que aquella entre y avance por el canal de forma pareja.

5.6.APROXIMACION DE MODELOS A LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

5.6.1.Modelo general

A la vista de los resultados anteriores cabe preguntarse como se comportaría el modelo analítico si se simularan las condiciones de funcionamiento experimentales en el canal. El resultado de esa simulación permitirá a su vez determinar hasta que punto el modelo es representativo del sistema físico. Mas que una validación rigurosa del modelo, se trata de acercar el modelo al sistema físico, que por otra parte es conceptual y constructivamente sencillo.

Se ha pasado el modelo en unas condiciones similares a las de la experiencia, de las cuales se relacionan las mas significativas:

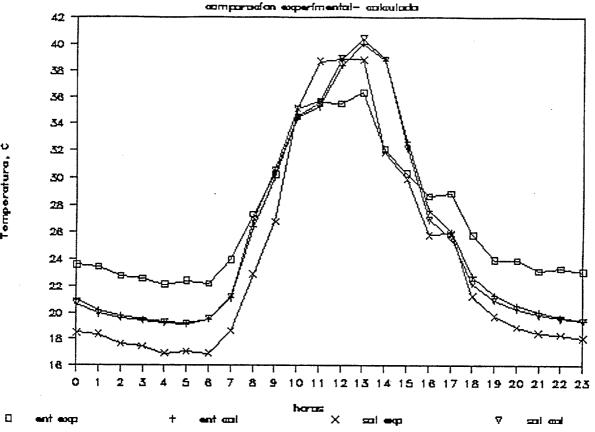
Longitud de canal	10	m
Anchura de canal	1	m
Caudal de aire	0.0015	kg/s
Caudal de agua	0.12	kg/s
Coeficiente de perdida de calor	20	$W/m^{2}/k$
Irradiancias para el día 05.09		

El resultado viene representado en las figuras 5.10 y 5.11 para las temperaturas de agua y de aire. Puede comprobarse como la curva simulada tiene la misma tendencia que la experimental, si bien no se ajusta en los valores absolutos. La dificultad del ajuste proviene de la gran cantidad de variables que intervienen y para las que no se dispone del amplio numero de datos experimentales requeridos, ya que como se ha dicho la experiencia no se diseñó para una validación total del modelo.

Sin embargo si puede concluirse que el modelo es suficientemente representativo del sistema real y puede usarse para predicciones.

Por otra parte es obvio que las condiciones de diseño y funcionamiento mas adecuadas son distintas de las que se utilizaron en el modelo, y ahí deberia centrarse el trabajo en adelante.

Fig 5.11. Temperatura aire en canal

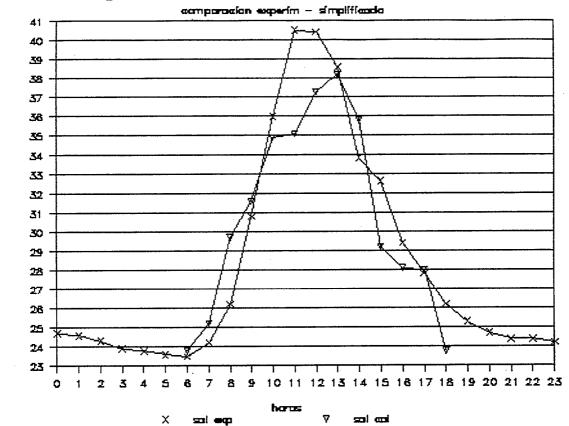


5.6.2. Modelo simplificado

El problema de ajuste del modelo de simulación a los datos experimentales puede resultar mas sencillo con el caso simplificado, al ser menor el numero de variables en juego. Se ha realizado tal simulación con el modelo simplificado para las mismas condiciones de entrada de la experiencia (dia 0509) y que se han señalado en el parrafo anterior: longitud y anchura de canal, caudales de agua y aire, irradiancia solar, temperatura y humedad ambientales.

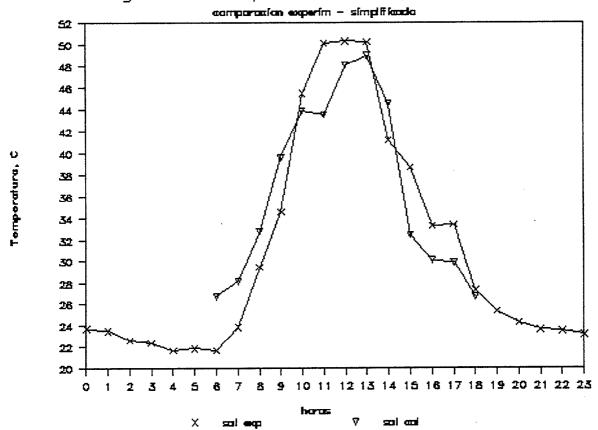
El resultado de la aproximación aparece en las figuras 5.12 y 5.13 en que se representan la temperatura de salida del agua, experimental frente a simulada, (fig 5.12) e igual variable para el aire de salida (fig 5.13). Puede apreciarse como el ajuste en las horas de sol es mejor en este caso simplificado.

Fig 5.12. Temperatura agua en canal



Temperatura, C

Fig 5.13. Temperatura de aire en canal



REFERENCIAS

- [5.1] Liu, B.Y.H y Jordan, R.C., The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation, Solar Energy, vol 4, n 3, p 1, 1960.
- [5.2] Liu, B.Y.H y Jordan, R.C., A rational procedure for predicting the long term average performance of flat-plate solar energy collectors, Solar Energy, vol 7,n 2, p 53, 1962.
- [5.3] Collares-Pereira, M. y Rabl, A., The average distribution of solar radiation. Correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values, Solar Energy, vol 22, p 155, 1979.
- [5.4] Duffie, J.A. y Beckman, W.A., Solar Engineering of Thermal Processes, Wiley, 1980.
- [5.5] Alaiz Fernandez, E, Energía solar. Calculo y diseño de instalaciones, ETS Ingenieros Industriales Madrid, 1981.
- [5.6] Bernard, R., Menguy, G. y Schwartz, M., La radiación solar. Conversión térmica y aplicaciones, Ed Lavoisier, 1982.

CAPITULO 6. CONDICIONES OPTIMAS DE FUNCIONAMIENTO.

6.1.RESUMEN ANTERIOR. CONCLUSIONES PREVIAS SOBRE SENSIBILIDAD

En este capítulo nos vamos a concentrar en la determinación de las condiciones mas adecuadas de funcionamiento del sistema.

Del análisis de sensibilidad realizado en el capítulo anterior podemos resumir un cuadro con las condiciones cualitativas en que la operación es mas eficiente.

Tabla 6.1. Variables mas significativas

Variable	Sensibilidad	Punto de operación
Caudal aire	alta	Cerca del máximo
Caudal de agua	alta	Cerca del máximo
Caudal de refrigeración	media	Poco efecto
Longitud	alta	Longitud larga
Exposición energética	alta	Exposición alta
Humedad ambiente	media	Humedad baja

CAPITULO 6

Temperatura	ambiente	media	Temperatura	baja
Temperatura	agua	media	Temperatura	alta
Temperatura	aire	media	Temperatura	alta
Temperatura	enfriador	media	Temperatura	baja

De todas estas variables, algunas son manejables o modificables por el operador. Otras en cambio son ajenas y aleatorias, y no se pueden variar a voluntad.

Entre las modificables están el caudal de aire, caudal de agua, caudal de refrigeración del condensador y la longitud, dentro de los límites del diseño. Entre las ajenas están la irradiancia solar, la humedad ambiente y la temperatura ambiente.

Otras variables corresponden a un diseño modificado o dependen de disponibilidades externas: temperatura del agua de entrada al canal, temperatura del aire de entrada al canal, temperatura del agua de refrigeración.

A la vista del cuadro pueden establecerse algunas conclusiones provisionales que nos vayan acercando al diseño mas adecuado. Estas conclusiones pueden ser:

- a) El caudal de aire es crítico. Debe operarse lo mas cerca posible del caudal óptimo.
- b) El caudal de aire puede regularse. Para conocer el interés real de esta regulación sería importante saber si el óptimo del caudal es muy variable con las condiciones externas : es decir,

si el óptimo es muy distinto en un día de mucho o poco sol, por ejemplo.

- c) A estos efectos pueden establecerse varios niveles de trabajo para radiación, temperatura y humedad ambiente, y determinar el óptimo de caudal en cada uno.
- d) La longitud tiene también un punto óptimo, a partir del cual no mejora la productividad ni la eficiencia, puesto que a partir de ese punto el aire se mantiene saturado en el canal.
- e) La ventaja de utilizar un equipo externo de enfriamiento de agua es clara en cuanto a la producción de agua, aunque con menor eficiencia.
- f) Es obvio que si se dispone de agua o aire caliente de alguna procedencia externa, el funcionamiento del proceso será tanto mejor cuanto mas calientes estén ambos.

6.2.ALTERNATIVA DE FUNCIONAMIENTO.

Además de las variables que intervienen en el modelo en la formulación que se le ha dado a este, hay otras alternativas de funcionamiento e incluso de diseño que pueden analizarse.

6.2.1. Alternativa de separación del captador solar y la cámara de humidificación.

Esta separación sería un diseño alternativo al que se ha venido barajando y consistiría en calentar el agua de forma separada y antes de pasar al evaporador -humidificador de aire, tal como se representa en la figura 6.1. El calentamiento del agua se llevaría a cabo en un captador solar de tipo clásico, de los utilizados para agua caliente sanitaria (ACS). Posteriormente se llevaría el agua caliente a una cámara de evaporación donde se humidificaría el aire. La diferencia con el modelo analizado hasta ahora sería la de que en esta alternativa se adelanta la fase de calentamiento.

Este modelo de funcionamiento se ha simulado, y los resultados son sensiblemente iguales a los obtenidos con el sistema conjunto captador-humidificador. Según los datos que figuran a continuación, la productividad de canal y del condensador se mantienen constantes, aunque en el caso de separar las dos camaras la eficiencia es mejor. Estos resultados aumentan apreciablemente cuando se mejora el aislamiento del sistema, como aparece en la última línea.

Sensibilidad de los resultados ante la separación captadorevaporador

Alternativa Productiv Productiv Eficiencia

	canal	condens	exergética
	kg/m²/día	kg/m²/día	canal %
Conjunta	1.50	0.70	0.58
Separada	1.50	0.70	0.67
Conjunta	(*) 2.63	1.60	1.60

(*) mejor aislamiento

6.3. CAUDAL DE AIRE OPTIMO.

Con objeto de analizar en mas detalle el caudal óptimo de aire (el que proporciona una eficiencia máxima) vamos a estudiar la relación que tiene con las condiciones ambientales. A este respecto pueden establecerse por ejemplo tres niveles de radiación, temperatura y humedad, con las características siguientes:

Nivel 1. Radiación baja, del orden de 10800 kJ/m^2 .día, humedad y temperatura altas. Caso mas desfavorable.

○ I Iniversidad de Las Palmas de Gran Canaria Biblioteca Digital 2004

Nivel 2. Radiación media, del orden de 16200 kJ/m^2 .día, humedad y temperatura medias. Caso intermedio.

Nivel 3. Radiación alta, del orden de 21600 kJ/m^2 .día, humedad y temperatura bajas. Caso mas favorable.

En cada una de estas tres situaciones ambientales se ha determinado el óptimo de la eficiencia, en las condiciones de

caudal de aire

variable a optimizar

caudal de agua

0.004 kg/s

caudal de refrigeración

0.005 kg/s

longitud

12 m

anchura

0.8 m

Los resultados son los que aparecen en las tablas 6.2 a 6.4 siguientes

Tabla 6.2. Sensibilidad de los resultados ante la variación de caudal de aire en condiciones ambientales desfavorables.

Variable	Productiv	Productiv	Eficiencia	Eficiencia
unidad	canal	condens	energética	exergética
	kg/m²/día	kg/m²/día	canal %	canal %
Caudal				
aire, kg/s				
0.005	0.3	0.23	11.99	0.11
0.010	0.61	0.43	21.67	0.21
0.015	0.88	0.58	29.8	0.29
0.020	1.05	0.62	35.82	0.3
0.025	1.11	0.54	38.91	0.26

Tabla 6.3. Sensibilidad de los resultados ante la variación de caudal de aire en condiciones ambientales medias.

Variable	Productiv	Productiv	Eficiencia	Eficiencia
unidad	canal	condens	energética	exergética
	kg/m²/día	kg/m²/día	canal %	canal %
Caudal				
aire, kg/s				
0.005	0.39	0.37	7.33	0.17
0.010	0.78	0.71	14.49	0.33
0.015	1.13	0.97	20.83	0.45
0.020	1.29	1.01	24.78	0.46
0.025	1.35	0.93	26.88	0.42

Tabla 6.4. Sensibilidad de los resultados ante la variación de caudal de aire en condiciones ambientes favorables.

Variable	Productiv	Productiv	Eficiencia	Eficiencia
unidad	canal	condens	energética	exergética
	kg/m²/día	kg/m²/día	canal %	canal %
Caudal				
aire, kg/s				
0.005	0.56	0.63	8.77	0.28
0.010	1.12	1.22	16.67	0.53
0.015	1.51	1.59	22.88	0.67
0.020	1.6	1.62	26.32	0.66
0.025	1.66	1.58	28.68	0.64
0.030	1.69	1.49	30.31	0.61

Se observa que el mejor valor de caudal es del orden de 0.02 kg/s salvo en días de baja exposición energética en que el óptimo de caudal se reduce a 0.015 kg/s. Estos valores de caudal de aire dan la máxima eficiencia exergética. Desde el punto de vista de la producción de agua en el canal es obvio que cuanto mas caudal de aire que sirva como medio de transporte de la humedad, mas agua se producirá. Sin embargo hay una limitación en el condensador, de forma que nuevamente aparece un caudal óptimo que coincide con el ya determinado de 0.02 kg/s.

6.3.2. Relación caudal de aire - longitud.

En el apartado anterior se ha comprobado como el caudal óptimo de aire es poco sensible a la radiación, y en cambio parece tener una relación mas directa con la longitud, por vía de las pérdidas de carga, según puede deducirse de los análisis del capítulo 4. Por lo tanto se ha realizado un análisis del caudal óptimo en cada longitud, con los siguientes resultados (tabla 6.5).

Tabla 6.5. Eficiencias para diversos caudales de aire y longitudes de canal.

	Eficiencia exergética de canal %					
Caudal	Longitud,	m				
kg/s	8	9	10	12	13	14
0.005	0.41	0.33	0.28	0.24		
0.010	0.68	0.67	0.63	0.53	0.45	
0.015	0.66	0.67	0.67	0.67	0.67	0.65
0.020	0.62	0.65	0.66	0.66	0.67	
0.025	0.61	0.62	0.64	0.65		
0.030	0.60	0.60	0.61	0.63		

Estos resultados están representados en la figura 6.2. De ellos se deduce que el caudal de aire que da el máximo de eficiencia en el canal no sufre gran modificación para el rango de longitudes que estamos considerando.

Por otra parte pudiera pensarse que existe alguna relación entre la eficiencia del sistema y el número de Reynolds longitudinal, siempre que se tome esta dimensión como longitud característica. En efecto, de la definición del número de Reynolds se deduce que en este intervienen varios de los factores que hemos estudiado hasta ahora.

$$R_{\bullet} = ----- = ------$$

$$\mu \qquad \mu$$

donde intervienen el caudal de aire, longitud, anchura y altura del canal además de la viscosidad del aire.

Si se analizan los valores de eficiencia obtenidos hasta ahora y se relacionan con el número de Reynolds se observa (figura 6.3) que a partir de determinados valores del número de Reynolds la eficiencia es prácticamente constante y con valor de 0.645 %. El rango de Re para 10000 en adelante es el que corresponde a las condiciones de trabajo del sistema propuesto.

Fig 6.2.Relacion eficiencia/caudal aire

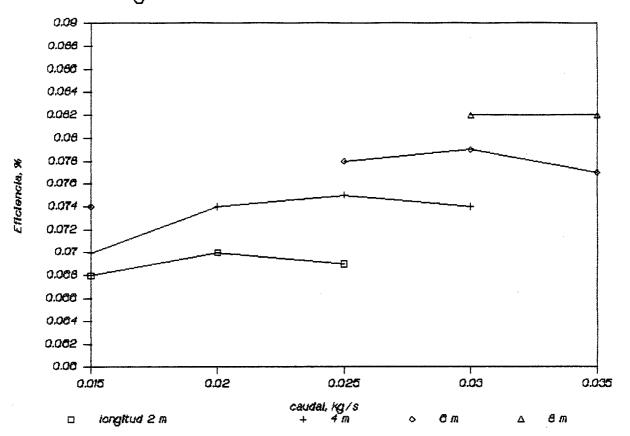
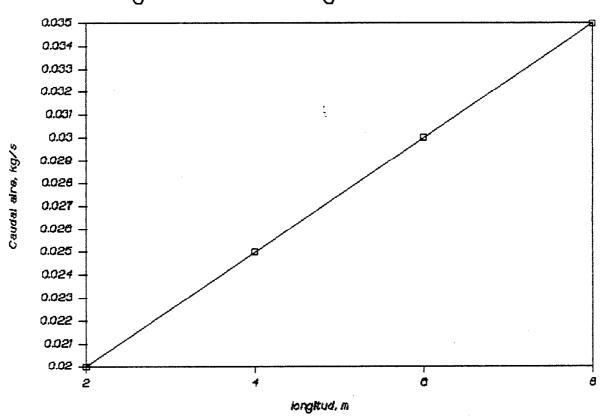


Fig 6.3.Relacion longitud-caudal aire



Una representación similar para el número de Reynolds con el diámetro equivalente del canal como dimensión característica nos lleva a iguales resultados, con el umbral de Re en 800.

6.4. ANALISIS DE LA EFICIENCIA

Con objeto de conocer como se usa la energía en el sistema, en el canal y en el condensador se han realizado balances de materia, energía y exergía.

Los resultados se muestran a continuación, en las tablas 6.6 a 6.8. En todos los casos se ha asumido valor nulo de la exergía de las pérdidas de calor y las condiciones de operación han sido longitud 12 m, caudal de aire = 0.02 kg/s, caudal de agua 0.005 kg/s, caudal de refrigeración 0.05 kg/s, todo ello a las 12 horas.

Tabla 6.6.Balance de materia

	ENTRADAS kg/h	SALIDAS kg/h
AIRE SECO	72.00	72.00
VAPOR DE AGUA EN AIRE	1.50	7.25
AGUA CANAL	8.57	4.96
AGUA REFRIGERACION	180	162
PRODUCTO		5.74

Tabla 6.7.Balance de energía

	ENTRADAS	GANANCIA
	W	W
AIRE		339
AGUA		45
RADIACION	8208	
ENERGIA MECANICA	196.8	
AGUA REFRIGERACION		1553
PRODUCTO		47

Tabla 6.8.Balance de exergía

	ENTRADAS	GANANCIA
	W	W
AIRE		256
AGUA		0.3
RADIACION	7745	
ENERGIA MECANICA	196.8	
AGUA REFRIGERACION		9.74
PRODUCTO		0.3

6.5.DISEÑO PROPUESTO

6.5.1.Introducción

En el trabajo expuesto hasta ahora se ha definido un proceso de producción de agua que se ha simulado mediante un modelo matemático. Ayudados de este modelo se han determinado las condiciones en que mejor funciona el proceso, lo cual da paso ahora a un diseño óptimo del sistema tanto en sus dimensiones como en sus condiciones de funcionamiento. Esto es en el bien entendido de que se trata de hacer un diseño de proceso y no un proyecto detallado de la instalación, que caería fuera del ámbito de este trabajo.

6.5.2.Aplicaciones

Las aplicaciones básicas del sistema propuesto serían por una parte la de abastecimiento de agua en pequeñas cantidades para zonas costeras, en el supuesto de que estén aisladas y no les llegue otro suministro. Por otro lado existe la posibilidad del uso agrícola del agua, pues las producciones de agua que se manejan coinciden con las necesidades de ciertos cultivos, además de que el diseño sobre el que se ha estado trabajando se asemeja a algunos tipos de invernaderos o cierros usados con frecuencia.

El diseño, de acuerdo con los principios básicos expuestos en el capítulo 2 debe ser sencillo, construido con materiales económicos y de fácil obtención y cuya operación sea igualmente sencilla, sin necesidad de una atención constante. Un diseño en definitiva que huya de la sofisticación y la complejidad.

6.5.3.Diseño óptimo.

6.5.3.1. Características geométricas

Longitud.

Como se ha descrito, la longitud es un componente crítico, pues el rendimiento depende mucho de ella. La longitud óptima (la que da resultados óptimos en términos de eficiencia) se ha fijado en 12 metros. Esta es la longitud propuesta en consecuencia desde el punto de vista del proceso.

Anchura.

Con la anchura del canal sucede algo similar a la longitud. Las simulaciones demuestran que el mejor rendimiento se produce para una anchura de 0.8 m.

Altura.

La altura no es un elemento tan determinante y se ha establecido en 0.4 m.

CAPITULO 6

Aislamiento.

En cuanto al aislamiento, será el necesario para que las pérdidas no excedan de 5 W/m2.K, lo cual equivale a unos 20 cm de espesor de bloque de hormigón.

6.5.3.2.Condiciones de operación

Es importante señalar que las condiciones de operación óptimas, deducidas de los análisis de sensibilidad realizados hasta ahora, son diferentes de las utilizadas como referencia y en la planta experimental, lo cual hace prever mejores resultados que los analizados hasta el momento.

Caudal de aire.

El caudal de aire es, de entre las variables que pueden modificarse por el operador del sistema, la que mas influye sobre la producción de agua y la eficiencia. Se ha analizado en detalle en capítulos anteriores y como resultado se ha seleccionado un valor base de 0.02 kg/s de aire.

Caudal de agua de alimentación al canal.

El caudal de agua de alimentación al canal tiene una influencia igualmente importante y a la vista de los resultados de sensibilidad se establece en 0.005 kg/s.

Caudal de agua de refrigeración al condensador.

La refrigeración al condensador se establece en 0.05 kg/s.

Altura de agua.

Establecida en 0.02 m.

Refrigeración.

La planta cuyas características básicas se están definiendo se concibe con la única refrigeración del condensador enfriado por agua de mar. No se considera refrigeración exterior con producción mecánica de frío, aunque mejoraría el rendimiento, por simplificar y porque parece que introducir una refrigeración "forzada" iría en contra de un diseño que esta basado en el aprovechamiento de las condiciones naturales.

Resumen de características.

En la tabla 6.1 se resumen las características constructivas y de operación.

niversidad de Las Palmas de Gran Canaria. Biblioteca Dicital. 2004

Tabla 6.1. Características del sistema propuesto.

Característica		Unidad
a)Geométricas		
Longitud	12	m
Anchura	0.8	m
Altura	0.4	m
Aislamiento, espesor de bloque	0.2	m
b)De operación		
Caudal de aire	0.02	kg/s
Caudal de agua		
de alimentación al canal	0.005	kg/s
Caudal de agua		
de refrigeración al condensador	0.05	kg/s
Irradiancias, temperatura y humedad ambi	ental corr	espondientes
al día 5 septiembre.		
		·

Operación sin recirculación de aire (proceso abierto)

6.6.PROYECCION DE RESULTADOS

En este apartado se pretende ofrecer una estimación del comportamiento del sistema diseñado con las características geométricas y de proceso expuestas. Naturalmente que dicho comportamiento depende de las condiciones ambientales que son muy variables. Por tanto se ha simulado el comportamiento en las condiciones que se han tomado como referencia.

Los resultados que se comentan a continuación corresponden a las condiciones mas favorables de entre las que se han seleccionado, y que son las expuestas en 6.3. con un caudal de aire de 0.02 kg/s y de agua en el canal de 0.005 kg/s.

La proyección se ha efectuado para las horas de sol, comprendidas entre la 6 y las 18 horas.

6.6.1. Temperatura del agua.

La distribución de la temperatura que alcanza el agua en el canal sigue la forma expuesta en el capítulo 4. En este caso presenta un máximo de 66.8 °C a las 13 horas, con un calentamiento desde la entrada a la salida del canal en esa hora de 5.6 °C. La temperatura es creciente a lo largo del canal en horas de la mañana y decreciente en horas de la tarde.

6.6.2. Temperatura del aire.

La distribución de temperatura del aire en el canal es también creciente a lo largo del canal en las horas de mediodía, con máximo de 54.3 °C y un calentamiento de 9.7 °C.

La relación entre ambas temperaturas de agua y aire es tal que ésta última siempre se mantiene por debajo de la del agua. Esto produce mejores condiciones para la evaporación de agua y por tanto para la producción, y es debido al bajo caudal de agua en movimiento en el canal, mientras que el aire debe ser suficiente para arrastrar la humedad y mejorar la convección en la interfase agua-aire.

En cuanto a la distribución de temperaturas del aire combinada en el canal y condensador, en las horas centrales del día el aire se calienta a lo largo del canal para enfriarse en el condensador desde un 54.3 hasta 38 °C.

6.6.3. Humedad especifica y relativa

La distribución de humedad especifica a lo largo del canal nos muestra como el aire se va cargando de vapor en las horas centrales del día, desde 30 hasta un máximo de 80 mg vapor/kg aire seco.

La humedad relativa es asimismo creciente en el canal, desde 30 % hasta 76.8 % en la salida, y saturándose al enfriarse el aire en el condensador.

6.6.4. Producción horaria

La distribución de la producción de agua a lo largo de las horas centrales del día se corresponde con la de la irradiancia. En primer lugar se considera la "producción " del canal, es decir la cantidad de vapor que se ha absorbido por el aire. Esta magnitud tiene un valor comparativo con la producción en el condensador, puesto que por mucha carga de humedad que tome el aire, el elemento que determina cuanta de esa humedad puede convertirse en agua producto es el propio condensador, que puede actuar como factor limitante.

En el caso favorable que estamos analizando no es así, ya que la temperatura del agua de mar para refrigeración es baja, y el condensador opera bien, produciendo prácticamente toda el agua que se absorbe en el canal. De hecho se produce no solo una deshumidificación sino un secado que deja el aire con menor contenido de vapor que el que tiene al entrar al canal.

La producción total en el canal es de 32.06 kg/día equivalente a 3.34 kg/m2/día. El máximo de producción es de 6.13 kg a las 13 horas. En el condensador se pueden separar 29.18 kg/día, equivalentes a 3.04 kg/m²/día.

6.6.5. Eficiencias

La eficiencia energética del canal tiene un valor medio entre las 6 y 18 horas de 42 %, con un máximo de 57.2 %. La correspondiente eficiencia exergética media es de 1.73 % con máximo de 4.43 %.

Para el conjunto del proceso, considerando canal y condensador, las eficiencias energética y exergética media son de 24.5 y 6.8 %, aunque en estas cifras no se discrimina lo que corresponde estrictamente a producción de agua.

CAPITULO 7. RESUMEN Y CONCLUSIONES

7.1.RESUMEN

A lo largo de los capítulos que componen esta Memoria se ha introducido la problemática del agua y la energía en Canarias poniendo de manifiesto que en general se produce escasez de la primera, además de una distribución muy irregular de dotaciones. En cuanto a la energía es conocida la existencia de recursos sólo en formas no convencionales. Posteriormente se han considerado las posibilidades de aplicación de aquellas energías renovables a la producción de agua, y las limitaciones que esto puede llevar consigo. Se han estudiado y analizado las diversas formas de producción de agua apoyadas en energía solar, ya sea por destilación directa o indirecta, uso de energía fotovoltaica y otros, comentando las realizaciones mas significativas en cada caso.

Se ha seleccionado para su estudio en detalle un proceso de destilación solar en convección forzada, en función de criterios de simplicidad y demandas reducidas además de estar poco estudiado.

Dentro de este análisis se han establecido las ecuaciones analíticas que gobiernan el proceso, definidas en base a los balances de materia y energía, además de un estudio de eficiencias exergéticas que consideren la calidad de la energía utilizada. Se ha simulado el sistema mediante modelos matemáticos, simplificado y general, con resultados razonables.

Estos resultados se han analizado desde el punto de vista de la sensibilidad o peso de cada variable, en busca de la determinación de las variables críticas. Además de las condiciones ambientales, como son la radiación solar, temperatura y humedad ambiente, resultan ser críticos e interelacionados los caudales de aire y agua en el canal y la longitud de éste.

Por otra parte se ha llevado a cabo una experiencia de apoyo con objeto de disponer de algunos resultados cuantitativos y cualitativos que se exponen, así como algunas sugerencias para mejora del diseño del proceso.

A la vista de los resultados, tanto en las experiencias realizadas como en la simulación analítica se ha determinado el punto de funcionamiento óptimo para cada variable, en particular para las que resultan ser críticas o mas influyentes o significativas, todo ello en términos de eficiencia energética y exergética.

Por último, y considerando toda la información obtenida previamente, se ha diseñado un sistema considerado óptimo, que en las mejores condiciones ambientales produce unos resultados estimables. El diseño incluye características de dimensionado, constructivas y de proceso, todas ellas orientadas a alcanzar un máximo de eficiencia.

7.2.CONCLUSIONES

- 1) Se ha estudiado un sistema de producción de agua apoyado fundamentalmente en la energía solar térmica para destilación en convección forzada.
- 2) Puede simularse mediante modelos matemáticos, ya sean simplificado o general, el funcionamiento del proceso para predecir el rendimiento y resultados según las características de diseño, de operación y ambientales.
- 3) En el desarrollo de estos modelos se ha generado una metodología de evaluación de eficiencia energética y exergética que es asimismo aplicable a otros procesos de captación y conversión solar.
- 4) Los resultados de las proyecciones son atractivos desde el punto de vista de la producción de agua, y de la eficiencia energética y exergética.
- 5) Puede producirse agua en cantidad razonable en las adecuadas condiciones climáticas.
- 6) Se han determinado las relaciones existentes entre los distintos parámetros que intervienen en el proceso, así como las condiciones óptimas.
- 7) El sistema puede resultar económicamente factible si se utilizan materiales sencillos e integrados en terreno de cultivo.

ANEXO 3.1

LISTADO DE PROGRAMA DESOL PARA SIMULACION DEL PROCESO EN LENGUAJE TURBO PASCAL

```
program DESOL ; (* M53
                                 *)
(* sin recirculacion - aire de nueva entrada en cada hora y
condensador *) (* temperaturas centigradas *)
(* declaracion de variables *)
constv:real=3;e1:real=5E-3;k1:real=0.75;c1:real=752;c:real=1005;
c2:real=1920; c3:real=4187;
const b1:real=0.1 ; b2:real=0.1 ; b3:real=0.9 ;(* absortancia *)
 rl:real=0.08; r2:real=0.01; r3:real=0.10; (* reflectancia *)
const v1:real=0.82 ; v2:real=0.79 ; v3:real=0 ; (* transmitancia*)
const s:real=5.67E-8 ; L9:real=0.48869; const 1:real= 10 ;
m2:real=0.02
               ; m3:real=0.02 ; mr:real=0.02
a:real=0.4 ; b:real=1 ; h:real=0 ; I:real=0; Iv:real=0;
const t10:real=293; t20:real=298 ; t30:real=295 ; t4:real=0 ;
t5:real=292; p9:real=1;
var t1,t2,t3:real; var w2,w2f,base,ln1,hc,he,hr:real;
                                                           var
mcap,mcop:real;
const t9:real=0; t0:real= 60 ; tf:real=24; t:real=0; x:real=0 ;
x1:real=0.25 ;
var Tb:real; const phi0:real=0.55; var j1,j2,j3,j5:real;
```

```
van2,pca,pco,s1,s2,s3,r4,r5,r6,f1,f2,f7,f8,N,p2,u1,u2,u3,u4:real;
var m3i,d2,d6,d3,a0,t1i,t2i,t3i,w2i,pp,ppi,ppb,phi:real;
vahr1, h2, h3, h4, h5, h6, h7, k, d4, a1, a2, a3, s8, s7, r8, r7, j, r9, v9, s9: real;
var t22,t23,w22,w23,tms,q1,q3:real;
const mca:real=0 ; mco:real=0 ; tme:real=0 ;
const U:real=30 (*100*); area:real=2. (*7.6*);
var en_ag_e,en_ai_e,en_irra,en_mec,en_ag_s,en_ai_s,en_per:real;
var ex_ag_e,ex_ai_e,ex_irra,ex_mec,ex_ag_s,ex_ai_s,ex_per,t_irra,
t_per:real; var en_ref,en_prod,ex_ref,ex_prod,s_e_e,s_e_s:real;
var Ulin,Ulfin,per:real;
var en_ag_eo,en_ai_eo,s_e_o,ex_ag_eo,ex_ai eo,en ai so,s e eo,
s_e_so,ex_ai so,en pero:real;
     a
           r
                                       е
                                             X
s_ex_s,enp_can,exp_can,enp_con,exp_con,enp_glo,exp_glo:real;
var vf1,vf2,vf3,vf4,vfir,vfhum:text; var int:integer;
  type tipo10 = string[10];
                                                          v a r
numficht, numfiche, numficho, numfichn, cad1, cad2, cad3,
cad4,cad5,cad6:tipol0;
 var car:char; tc,tt:real;(* hora inicial y final de operacion*)
var mu_ener_glot,mu_exer_glot:real; var mu ener t,mu exer t:real;
var
       mu_ener_prot,mu_exer_prot:real;
                                                           var
mu_ener_pro,mu_exer_pro:real;
function pr(te:real):real;(* pres parcial a temper te absol *)
begin pr:=75/760*exp(14.09-3887.8/(te-43)) end;
function w(te:real):real ;(* hum saturacion a temp te absol *)
begin w:=0.622*pr(te)/(p9-pr(te)) end;
```

2

```
function hfg(te:real):real;
                            (*entalpia vaporizacin
                                                       a temper
te absoluta *)
            b
                                                 i
                                     g
                                                              n
hfg:=2.32559*(1072.653-1.0166*(te-273)+1.04087E-4*sqr(te-273))end
;
procedure irradiancia;
begin
   s8:=0.4092*sin(2*PI*(n2+284)/365)
s9:=-sin(19)/cos(19)*sin(s8)/cos(s8);
  s7:=arctan(sqrt(1-sqr(s9))/s9); if s7<0 then s7:=pi-s7;
  r8:=0.41+0.5*sin(s7-pi/3); r7:= 0.66-0.48*sin(s7-pi/3)
j:=2*pi*(t+12)/24;
  r9:=pi/24*(r8+r7*cos(j))*(cos(j)-cos(s7))/(sin(s7)-s7*cos(s7))
; I:=r9*H ;
 end ; (*irradiancia*)
procedure coef trans;
  label 200;
 begin
 base:=t3-t2+(1E5*(pr(t3)-pr(t2))*(t3-273)/(268900.0-1E5*pr(t3)))
 if base<=1 then goto 200;
 hc:=0.884*exp(1/3* ln(base));
 200:hc:=0 ;
 he:=0.0160E5*(pr(t3)-pr(t2))/(t3-t2)*hc;
```

```
Oliniversidad de l'es Delmas de Gran Caparia Biblioteca Digital 2004
```

```
hr:=b1*s*(sqr(t3)+sqr(t2))*(t3+t2);
  h5:=hc+he+hr;
       h
          1
                           5
h2:=0.8957*s*(sqr(sqr(T1))-sqr(sqr(T4-11)))/(T1-T4+11);
  v9:=5417.3*10*m2*1/a/b;
                              (* v9 es el numero de Reynolds *)
  h3:=7.758E-4*sqrt(v9)/1;
  h4:= 0.8957*s*(sqr(sqr(T2))-sqr(sqr(T1)))/(T2-T1);
  (*h5:=14.28*exp(ln(m2/a/b)*0.8) ; *)
  h6:= 0.9138*s*(sqr(sqr(T3))-sqr(sqr(T2)))/(T3-T2) ; h7:=10
  U1:=h1+h2 ; U2:=h3+h4 ; U3:=h5+h6 ; U4:=h7;
 end ; (*coef_trans*)
procedure difer_finitas; (* D4=dW2/dx ;; D2=dT2/dx ;; D6=dM3/dx ;;
D3=dT3/dx *)
 begin
  k:=h5/(c+c2*w2);
  D4:=k*b/m2*(w(t3)+w(t1));
  al:=s2+u3*(t3-t2)-u2*(t2-t1)
  a2:=a1*b/m2-D4*(c2*(t2-273)+hfg(t3));
 D2:=a2/(c+c2*w2); D6:=-k*b*(w(t3)-w2);
  a3:=s3-u3*(t3-t2)-u4*(t3-t5)
 D3:=(a3*b/c3-(t3-273)*D6)/m3;
 end ; (*difer_finitas*)
procedure perdida carga;
begin
```

```
r4:=2*a*b/(a+b); r5:=21906.7*10*sqrt(m2); r6:=6841.3*10*m2/r4
;
   f1:=0.0014+0.125*exp(-0.32*ln(r6))
f2:=0.0014+0.125*exp(-0.32*ln(r5));
  f8:=0.2+0.0385*f1*sqr(m2/a/b)*1/r4;
  f7:=0.2+0.0385*f2*sqr(m2/a/b)*(1+1)/(0.314*sqrt(m2));
  N:=24.6*m2*(f8+f7)
 end ; (*perdida_carga *)
procedure entrada canal;
const ufg:real=2262E3;
 begin
  write('entrada_canal'); t9:=0;
  while t9<3600 do
  begin
    if frac(t9/300)=0 then write(' ',t9/60:2:0); if t9=(3600-t0)
then
                      writeln(' 60 ');
   t1:=t1i ; t2:=t2i ; t3:=t3i ; (* w2:=w23 ;*) w2i:=w2 ;
   coef_trans;
                  difer_finitas;
   pp:=phi*pr(t2); w2:=0.622*pp/(p9-pp);
   a0:=S1+U2*(T2-T1)-U1*(T1-T4)
   j1:=a0/752/e1/2550;
   j5:=k*(w(t3)+w(t1))/a /1.02;
    j2:=
             (a1/a/1.02-((c2-0.29)*(t2-273)+ufg)*j5)
((c-0.29)+(c2-0.46)*w2);
   j3:=a3/(c3-0.46)/0.02/980;
```

```
Tli:=Tli+t0*j1 ; T2i:=T2i+t0*j2 ; T3i:=T3i+t0*j3 ;
   t9:=t9+t0 ;
   end;
  t1:=t1i ; t2:=t2i ; t3:=t3i ;
 end ; (*entrada_canal*)
procedure calculo_espacial;
 begin
 x:=0; if (x=0) and (t>0) then entrada canal;
 while x<l do
  begin
   coef_trans; difer finitas;
   T2:=T2+D2*x1; T3:=T3+D3*x1; w2:=w2+D4*x1; m3:=m3+D6*x1;
   pp:=w2*p9/(w2+0.622); phi:=pp/pr(t2);
   if (phi>1) then begin W2:=w(t2); phi:=1; end;
                          (* SALIDA DATOS PANTALLA *)
   if frac(x/2)=0 then
   writeln('x ',x:2:2,'
                              t1 ',t1-273:5:2,'
                                                          t2
',t2-273:5:2,
   ' t3 ',t3-273:5:2,' w2 ',w2:2:4,' phi ',phi:1:3,' ');
   if (x=l-x1) then
   writeln('x ',x:2:2,'
                             t1 ',t1-273:5:2,'
                                                          t2
',t2-273:5:2,
   ' t3 ',t3-273:5:2,' w2 ',w2:2:4,' phi ',phi:1:3,' ');
```

6

```
(* salida datos comparacion con experiencia *)
    if x=1.75
                then write(vf1,t3-273:3:2,' ',t2-273:3:2,'
',w2:1:4,' ',
                        phi:1:3,' ');
    if x=5.5 then write(vf1,t3-273:3:2,'
                                             ',t2-273:3:2,'
',W2:1:4,' ',
                          phi:1:3,' ');
    if x=9 then writeln(vf1,t3-273:3:2,' ',t2-273:3:2,'
', w2:1:4,' ', phi:1:3); w2f:=w2; x:=x+x1;
   end;
 end ;(* calculo espacial *)
(* calculo de produccion. efecto del condensador *)
procedure condensador;
 label 100; label 200;
           write('condensador');
  begin
   t22:=t2 ; t23:=t22 ; w22:=w2 ;
   if tme>=t22 then begin; tms:=tme; t23:=t22; w23:=w22; goto
100 ; end;
   repeat
    t23:=t23-0.2;
    if t23<=tme then begin; t23:=tme; tms:=tme; w23:=w22; goto
200 ; end ;
    if tms>=t22 then begin; tms:=t22; goto 200; end;
    if t23<=tms then begin; tms:=t23; goto 200; end;
    if w22<=w(t23) then w23:=w22 else w23:=w(T23);
           writeln('Taire= ',' ',T23:3:2,' Waire= ','
    (*
',W23:2:4);*)
```

```
q1:=m2*(c*(t22-t23)+c2*((t22-273)*w22-w23*(t23-273))+hfg(tme)*(-
t22-t23)-
                        (w22-w23)*c3*(t23-273));
     tms:=tme+(q1/mr/c3);
     if tms<=tme then begin; tms:=tme; goto 100; end;
     q3:=U*area*(t22-t23-tms+tme)/ln((t22-tms)/(t23-tme));
     until abs(1-q3/q1)<=0.10 ;
     if w23<0 then w23:=0;
     mcop:=m2*(w22-w23)*3600
     100: mcop:=0; 200: mcop:=m2*(w22-w23)*3600;
     writeln('
                   tms ', tms-273:3:2);
     if mcop<0 then mcop:=0 ; mco:=mco+mcop ;</pre>
     writeln(' t22 ',t22-273:3:2,' t23 ',t23-273:3:2,'
                         ' w23 ',w23:2:4,' mcop ',mcop:2:2,'
',w22:2:4,
mco ',mco:2:2);
     t3:=tms; w2:=w23;
end ;(* condensador *)
procedure ana ener;
begin
 writeln ;
 writeln('analisis energia; entradas
                                                       salidas-
     watios');
 writeln(' aire
                             ', en_ai_e:4:1,'
',en_ai_s:4:1);
```

```
Classociated de les Delmes de Gran Canaria Bibliotaca Digital 2004
```

```
writeln(' agua
                              ', en_ag_e:4:1,'
',en_ag_s:4:1);
  writeln(' irradiancia
                            ', en_irra:4:1);
  writeln(' mecanica
                             ',en_mec:4:1);
  writeln(' refrigeracion
',en_ref:4:1);
  writeln(' producto
',en prod:4:1);
  writeln(' perdidas
',(s_e_e-s_e_s):4:1);
  writeln(' suma
                             ',s_e_e:4:1,'
',s e s:4:1);
 end;
procedure ana exer;
 begin
  s_ex_e:=ex_ai_e+ex_ag_e+ex_irra+ex_mec;
  s_ex_s:=ex_ai_s+ex_ag_s+ex_ref+ex_per+ex_prod;
 writeln ;
 writeln('analisis exergia; entradas
                                                        salidas-
 watios');
 writeln(' aire
                             ', ex ai e:4:1,'
',ex_ai_s:4:1); writeln(' agua
                                             ', ex_ag_e:4:1,'
                ',ex_ag_s:4:1); writeln(' irradiancia
ex_irra:4:1);
 writeln(' mecanica
                            ',ex mec:4:1);
```

```
writeln(' refrigeracion
',ex_ref:4:1);
  writeln(' producto
',ex_prod:4:1);
  writeln(' perdidas
',ex_per:4:1);
  writeln(' suma
                             ',s_ex_e:4:1,'
',s_ex_s:4:1);
  writeln(' trabajo perdido
(s_ex_e-s_ex_s):4:1);
 end;
procedure EFIC_CAN2;
var dif_ex_ai, dif_ex_ag,dif_ex,ex_rad,ex_ag,mu_exer:real;
var p2,p2i,p3,p3i,p3b:real;
var dif_en_ai,dif_en_ag, gan_en_ai,gan_en_ag, mu_ener:real;
var landa5,phid,tau,Td:real;
begin (* p3 es pres vapor agua y p2 es pres parcial aire*)
p3:=pp; p3b:=ppb ; p3i:=ppi ;
                                       (* vapor *)
p2:=1-p3; p2i:=1-p3i;
                                       (* aire *)
(*
          eficiencia energetica *)
(*
    1.1 aire
                   *)
dif_en_ai:= 1005*(t2-t2i) +1900 * (w2f*(t2-tb)-w2i*(t2-tb))
+2501E3*(w2-w2i);
(*
    1.2 agua *)
dif_en_ag:= c3*(t3-t3i);
```

10

```
gan_en_ai:=m2*dif_en_ai; gan_en_ag:=m3*dif_en_ag;
mu_ener:=(gan_en_ai+gan_en_ag)/(b*1*I+9840*m2);
write('canal .....mu_ener
                                 % ',mu ener*100:2:2);
(*
           eficiencia exergetica *)
(*
     2.1
           aire *)
dif_ex_ai := 1005*(t2-t2i)-tb*(1005*ln(t2/t2i)-290*ln(p2/p2i))
+w2f*1900*(t2-tb)-w2i*1900*(t2-tb)
-tb* (w2f* (1900*ln(t2/tb)-460*ln(p3/p3b)) -w2i* (1900*ln(t2i/tb)-
              460*ln(p3i/p3b)));
(*
     2.2
           agua *)
dif_ex_ag:=m3*c3*(t3-t3i-Tb*ln(t3/t3i));
(*
     2.
           suma
                    *)
dif_ex:=m2*dif_ex_ai+dif_ex_ag;
     2..
          radiacion
                        *)
(* calculo de exergia de la radiación con landa= 0.5 y Tsol= 5777
K *)
if (I>0) then begin
landa5:=0.5*sqr(0.5)*sqr(0.5);
phid:=5.67E-8/landa5/(exp(1.439E4/0.5/5777)-1); tau:=I/1367;
Td:=1.439E4/0.5/ln(1+(5.67E-8/landa5/tau/phid));
end;
if (I=0) then Td:=Tb;
ex rad:=1*b*I*(1-Tb/Td);
ex ag:=m2*(w2f-w2i) *c3*(t3-tb-tb*ln(t3/tb));
mu exer:=dif ex/(ex rad+9840*m2);
writeln('
                              % ',mu exer*100:2:2);
                    mu exer
```

```
Oliver in the Company of Company Control of Control of
```

```
if mu_ener<0 then mu_ener:=0 ; mu_ener_t:=mu_ener_t+mu_ener ;
if mu_exer<0 then mu_exer:=0 ; mu_exer_t:=mu_exer_t+mu_exer ;
if (t>=tc) and (t<=tt) then writeln(vf4,t2-273:2:2,' ',w2:2:4,'
                          mcap:2:2,'
                                          ',mu_ener*100:2:2,'
',mu_exer*100:2:2);*)
end;
                 ana_exer; *) (* cuando se requiera analisis de
 (* ana ener;
eficiencias *)
procedure EFIC GLO2; (* eficiencias para el conjunto canal-
condensador *)
                               а
                                                              r
gan_ex_ai,gan_ex_ag,gan_ex_ref,ex_rad,ex_ag,gan_ex_pro,mu_exer_glo-
:real;
var p2,p23,p2i,p3,p3i,p33,p3b:real;
vardif_en_ai,dif_en_ag,gan_en_ai,gan_en_ag,gan_en_ref,gan_en_pro,
                mu_ener_glo:real;
var landa5,phid,tau,Td:real;
begin (* p3 es pres vapor agua y p2 es pres parcial aire*)
p3:=pp; p3b:=ppb ; p3i:=ppi ; p33:=pr(t23) ;
                                                   (* vapor *)
p2:=1-p3; p2i:=1-p3i;
                                  p23:=1-p33 ;
                                                   (* aire *)
(* 1. eficiencia energetica *)
(* 1.1 aire *)
dif_en_ai:= 1005*(t23-t2i) +1900 * (w23*(t23-tb)-w2i*(t2i-tb))
```

```
+2501E3*(w23-w2i);
gan_en_ai:=m2*dif_en_ai;
(* 1.2 agua circulacion *)
dif_en_ag:= c3*(t3-tme);
gan_en_ag:=m3*dif_en_ag;
(* 1.3 agua refrigeracion
gan_en_ref:=(mr-m3i)*c3*(tms-tme);
(* 1.4. producto
gan_en_pro:= m2*(w22-w23)*c3*(t23-tme);
mu_ener_glo:=(gan_en_ai+gan_en_ag+gan_en_ref+gan_en_pro)/(b*1*I+
9840*m2);
                          ',mu ener glo*100:2:2);
write('mu ener glo
                        ૪
mu_ener_pro:= gan_en_pro/(b*1*I+9840*m2);
(*
         eficiencia exergetica *)
     2.1. aire
                  *)
gan_ex_ai:=m2*(
1005*(t23-t2i)-tb*(1005*ln(t23/t2i)-290*ln(p23/p2i))
+w23*1900*(t23-tb)-w2i*1900*(t2i-tb)
-tb* (w23* (1900*ln(t23/tb)-460*ln(p23/p3b)) -w2i*
(1900*ln(t2i/tb)-
                                 460*ln(p3i/p3b))) );
(* 2.2. agua circulacion *)
gan_ex_ag:=m3*c3*(t3-tme-Tb*ln(t3/tme));
(* 2.3 agua refrigeracin *)
gan_ex_ref:=(mr-m3i)*c3*(tms-tme-tb*ln(tms/tme) );
(* 2.4 producto *)
gan_ex_pro:=m2*(w22-w23)*c3*(t23-tme-Tb*ln(t23/tme));
```

```
(* 2.5 radiacion
calculo de exergia de la radiación con landa= 0.5 y Tsol= 5777
K *)
if (I>0) then begin
landa5:=0.5*sqr(0.5)*sqr(0.5);
phid:=5.67E-8/landa5/(exp(1.439E4/0.5/5777)-1); tau:=I/1367;
Td:=1.439E4/0.5/ln(1+(5.67E-8/landa5/tau/phid));
end;
if (I=0) then Td:=Tb;
ex rad:=1*b*I*(1-Tb/Td);
mu exer glo:=(gan ex ai+gan ex ag+gan ex ref+gan ex pro)/(ex rad
+9840*m2);
mu_exer_pro:=gan_ex_pro/(ex_rad+9840*m2);
writeln('
                    mu_exer_glo
',mu exer glo*100:2:2);
if mu_ener_glo<0 then mu_ener_glo:=0;
mu ener glot:=mu ener glot+mu ener glo ;
if mu_exer_glo<0 then mu_exer_glo:=0 ;</pre>
mu_exer_glot:=mu_exer_glot+mu_exer_glo ;
if mu ener pro<0 then mu ener pro:=0;
mu ener prot:=mu ener prot+mu ener pro ;
if mu exer pro<0 then mu exer pro:=0;
mu_exer_prot:=mu_exer_prot+mu_exer_pro ;
if (t>=tc) and (t<=tt) then writeln(t2-273:2:2,' ',w2:2:4,' ',
```

```
mcop:2:2,' ',mu_ener_glo*100:2:2,' ',mu_exe-
r_glo*100:2:2);
if (t>=tc) and (t<=tt) then writeln(vf4,t2-273:2:2,' ',w2:2:4,'
                mcop:2:2,' ',mu ener glo*100:2:2,' ',mu exe-
r_glo*100:2:2);
writeln('efic ener prod ',mu_ener_pro*1E6:2:2,' efic exer
prod ',mu_exer_pro*1E6:2:2);
end;
procedure calculo horario;
begin
 t:=0; t1i:=t1; t2i:=t2; t3i:=t3;
 while t<tf do
  begin
   writeln; write('T ',t:2:0,' ');
   readln(vfir,I,t4); T4:=t4 +273; tme:=T4-2;
   H:=H+I; write(' I ',I:3:0,' ');
                                    Iv:=I ;
   S1:=Iv*b1 ; S2:=Iv*v1*b2 ; S3:=Iv*v1*v2*b3 ;
   write(' irradiancias ',s1:3:2,' ',s2:3:2,'
',s3:3:2);
   readln(vfhum,phi); phi:=(phi )/100 ;writeln('
                                                        phi
',phi:2:2);
   pp:=phi*pr(T4); ppi:=pp; w2:=0.622*pp/(p9-pp); w2i:=w2;
tb:=t4 ;
   ppb:=phi*pr(tb); if m3>mr then m3:=mr; m3i:=m3;
```

```
perdida_carga;
   tc:= 6 ; tt:= 18 ; (* 6 a 18 horas *)
   if (t<tc ) or (t>tt) then w2f:=0 ;
   if (t>=tc) and (t<=tt) then
    begin
     calculo espacial;
     mcap:=m2*(w2-w2i)*3600; if mcap<0 then mcap:=0;
mca:=mca+mcap ;
                                      w2f ',w2f:4:4,' w2i
     writeln('
                          ' mcap ',mcap:2:2,
',w2i:4:4,
',mca:2:2);
     efic can2; condensador; efic_glo2;
     writeln(vf2,mcap:2:2,' ',mcop:2:2,' ',elcap*100:2:2,'
(*
',e2cap*100:2:2,' ',e1cop*100:2:2,' '
      ,e2cop*100:2:2,' ',e1glp*100:2:2,' ',e2glp*100:2:2); *)
     (* grabacion de t22-t23-w22-w23- *)
   writeln(vf2,' ',t22-273:3:2,' ',t23-273:3:2,' ',w22:2:-
(*
4,' ',w23:2:4);*)
    end;
    t:=t+1
  end;
 end ; (* calculo_horario *)
begin
       (*desol*)
 n2:=215; m3 :=0.03; int:=022;
repeat
```

16

```
Sold International Control of the Co
```

```
writeln('pasada
                       ',int:3);
   (* puesta a cero de variables acumulativas
   mca:=0 ; mco:=0 ; mu_ener_glot:=0 ; mu_exer_glot:=0 ;
mu_ener_prot:=0 ;
                    mu_exer_prot:=0 ;
   mu_ener_t:=0 ; mu_exer_t:=0 ;
   (* puesta a cero de variables *)
  w2:=0 ; w22:=0 ; w23:=0;
    str(int,cad3); cad1:='st';cad2:='se'; cad4:='.prn';
cad5:='so';
  cad6:='mg';
  numficht:=concat(cad1,cad3,cad4);
                                       (* vfl
                                                 sal
                                                      temp *)
  numfiche:=concat(cad2,cad3,cad4);
                                       (* vf2
                                                      efic *)
                                                 sal
  numficho:=concat(cad5,cad3,cad4);
                                       (* vf3
                                                      cond *)
                                                 sal
  numfichn:=concat(cad6,cad3,cad4);
  assign(vf1,numficht);
(* assign(vf2,numfiche); assign(vf3,numficho);
  assign(vf4,numfichn);
 assign (vfir,'ir0509.prn'); (*
                                   DIA DE
                                           CALCULO
 assign(vfhum,'phi.prn');
reset(vfir);
                 reset(vfhum);
rewrite(vf1); (* rewrite(vf2); rewrite(vf3); *)
rewrite(vf4);
t1:=t10 ; t2:=t20 ;t3:=t30 ;
calculo_horario;
pco:=mco/l/b ; pca:=mca/l/b ;
(* writeln(vf2,pca:2:2,'
                                           gl*100/13:2:2); *)
```

```
close(vfir);close(vfhum); close(vf1); (* close(vf2); (*
close(vf3); *)
 close(vf4); writeln;
 writeln('productividad canal ',pca:2:2,'
                                              productiv
condensador ',pco:2:2);
writeln('efic energetica canal ',mu_ener_t/(tt-tc+1)*100:2:2,
          efic exergetica canal
',mu_exer_t/(tt-tc+1)*100:2:2);
writeln('efic energetica media
',mu_ener_glot/(tt-tc+1)*100:2:2,
         efic exergetica media
',mu_exer_glot/(tt-tc+1)*100:2:2);
writeln('efic energetica prod
',mu_ener prot/(tt-tc+1)*1E6:2:2,
         efic exergetica prod
',mu_exer prot/(tt-tc+1)*1E6:2:2);
m3 := m3 + 0.01 ; int:=int+1;
until
       m3 > 0.04
```

end . DESOL

NOMENCLATURA EN EL LISTADO DEL MODELO MATEMATICO

a	altura del canal, m
area	área del condensador, m²
a0	variable auxiliar en el calculo de diferencias
	finitas
al	variable auxiliar en el calculo de diferencias
	finitas
a2	variable auxiliar en el calculo de diferencias
	finitas
a3	variable auxiliar en el calculo de diferencias
	finitas
b	anchura del canal, m
bl	absortancia de la cubierta, 0.1
b2	absortancia del aire, 0.1
b 3	absortancia del agua, 0.9
base	variable auxiliar en el calculo
c	capacidad térmica especifica del aire seco, 1005
	J/kg/K
cl	capacidad térmica especifica de la cubierta, 752
	J/kg/k
c 2	capacidad térmica especifica del vapor de agua, 1920
	J/kg/K

c 3	capacidad térmica especifica del agua, 4187 J/kg/K
cad1	variable de cadena
cad2	variable de cadena
cad3	variable de cadena
cad4	variable de cadena
d2	diferencia finita de la temperatura del aire, K/m
d3	diferencia finita de la temperatura del agua, K/m
d4	diferencia finita de la humedad del aire, K/m
d6	valor auxiliar
en_ag_e	entalpía de agua de entrada, W
en_ag_s	entalpía de agua de salida, W
en_ai_e	entalpía de aire de entrada, W
en_ai_s	entalpía de aire de salida, W
en_irra	energía de la irradiancia, W
en_mec	energía mecánica, W
en_prod	entalpía del producto, W
en_ref	entalpía de agua de refrigeración, W
enp_can	ganancia horaria de entalpía de producto en el
	canal, W
enp_con	ganancia horaria de entalpía de producto en el
	condensador, W
enp_glo	ganancia horaria de entalpía de producto global, W
ex_ag_e	exergía de agua de entrada, W
ex_ag_s	exergía de agua de salida, W
ex_ai_e	exergía de aire de entrada, W
ex_ai_s	exergía de aire de salida, W

ex_irra	exergía de la irradiancia, W
ex_mec	exergía mecánica, W
ex_per	exergía de las pérdidas, W
ex_prod	exergía del producto, W
ex_ref	exergía de agua de refrigeración, W
exp_can	ganancia horaria de exergía de producto en el canal
	W
exp_con	ganancia horaria de exergía de producto en el
	condensador, W
exp_glo	ganancia horaria de exergía de producto global, W
el	espesor de la cubierta, 0.005 m
elca	eficiencia energética diaria en el canal
elcap	eficiencia energética horaria en el canal
elco	eficiencia energética diaria en el condensador
elcop	eficiencia energética horaria en el condensador
elgl	eficiencia energética diaria global
elglp	eficiencia energética horaria global
e2ca	eficiencia exergética diaria en el canal
e2cap	eficiencia exergética horaria en el canal
e2co	eficiencia exergética diaria en el condensador
e2cop	eficiencia exergética horaria en el condensador
e2gl	eficiencia exergética diaria global
e2glp	eficiencia exergética horaria global
f7	coeficiente de fricción del aire en el canal
f8	coeficiente de friccion del aire en el conducto de
	retorno

h	exposición energética, Wh/m².día
hc	coeficiente de convección en la evaporación, W/m²/K
he	coeficiente de evaporación, W/m²/K
hr	coeficiente de radiación en la evaporación, W/m²/K
hfg	entalpía de evaporación del agua, 2.5E6 J/kg
h1	coeficiente de convección cubierta- aire ambiente,
	W/m²/K
h2	coeficiente de radiación cubierta- aire ambiente,
	W/m²/K
h3	coeficiente de convección cubierta- aire ambiente,
	W/m²/K
h4	coeficiente de radiación cubierta- aire ambiente,
W/m²/K	
h5	coeficiente de convección cubierta- aire ambiente,
$W/m^2/K$	
h6	coeficiente de convección agua- aire,W/m²/K
h7	coeficiente de transmisión de pérdidas al exterior,
W/m²/K	
I	irradiancia solar, W/m²
j	indicador de la hora del dia en radianes
j1	incremento de T1 en el tiempo, K/s
j2	incremento de T2 en el tiempo, K/s
j 3	incremento de T3 en el tiempo, K/s
j 5	variable auxiliar
k	coeficiente de transferencia de masa, kg/m²/s
k1	conductividad térmica de la cubierta, W/m/K

1	longitud del canal, m
ln1	variable auxiliar en el calculo
L9	latitud, 0.48869 rad
m2	caudal de aire seco, kg/s
m3	caudal de agua en el canal, kg/s
mr	caudal de agua de refrigeración, kg/s
mca	produccion de agua en el canal, kg
mco	produccion de agua en el condensador, kg
mcap	producción parcial de agua en el canal, kg/h
mcop	producción parcial de agua en el condensador, kg/h
N	potencia de ventilador, W
numfiche	variable de cadena
numficht	variable de cadena
pca	productividad del canal, kg/m²/dia
pco	productividad del condensador, kg/m²/dia
phi	humedad relativa del aire
pr	función presión parcial del vapor, bar
p2	presión parcial del vapor, bar
p 9	presión total, 1 bar
ql	velocidad de transmisión de calor en el condensador,
	W
q3	velocidad de transmisión de calor en el condensador,
	W
rl	reflectancia de la cubierta, 0.08
r2	reflectancia de la cubierta, 0.01
r3	reflectancia de la cubierta, 0.1

r4,r5,r6	auxiliares en perdida de carga
r7, r8	auxiliares en la irradiancia
r9	factor de transferencia de exposición a irradiancia
s	constante de Stefan-Boltzman, 5.67E-8 W/m²/K4
s_e_e	suma de entalpias de entrada
s_e_s	suma de entalpias de salida
s_ex_e	suma de exergias de entrada
s_ex_s	suma de exergias de salida
sl	fracción de la irradiancia absorbida por la cubierta
s2	fracción de la irradiancia absorbida por la cubierta
s3	fracción de la irradiancia absorbida por la cubierta
t	hora solar
tb	temperatura del estado muerto, 273 K
tf	hora final del calculo, 24 h
tme	temperatura del agua de mar a la entrada al
	condensador, K
tms	temperatura del agua de mar a la salida del
	condensador, K
t1	temperatura de la cubierta, K
t2	temperatura del aire en el canal, K
t22	temperatura del aire a la entrada del condensador, K
t23	temperatura del aire a la salida del condensador, K
t3	temperatura del agua en el canal, K
t4	temperatura ambiente, K
t9	tiempo de iteracion, s
to	intervalo para la iteración de tiempo, s

24

tli .	temperatura de cubierta a la entrada del canal, K
t2i	temperatura del aire a la entrada del canal, K
t3i	temperatura del agua a la entrada del canal, K
t_irra	temperatura equivalente de la irradiancia, K
U ·	coeficiente global de transmisión de calor en el
	condensador, W/m²/K
u1	coeficiente global de transmisión de calor cubierta-
	aire ambiente, W/m²/K
u2	coeficiente global de transmisión de calor cubierta-
	aire, W/m²/K
u3	coeficiente global de transmisión de calor cubierta-
	aire ambiente, W/m²/K
u4	coeficiente global de transmisión de calor cubierta-
	aire ambiente, W/m²/K
v	velocidad del viento, m/s
v1	transmitancia de la cubierta, 0.82
v2	transmitancia del aire, 0.79
v3	transmitancia del agua, 0
v 9	numero de Reynolds del aire
vfl	variable de fichero, salida de temperaturas en el
	canal
vf2	variable de fichero, salida de temperaturas en el
	condensador y eficiencias
vfir	variable de fichero, entrada de irradiancia
vfhum	variable de fichero, entrada de humedad ambiente

W	función humedad especifica del aire, kg vapor /kg
	aire seco
w2	humedad especifica del aire, kg vapor /kg aire seco
w2i	humedad especifica del aire a la entrada del canal,
	kg vapor /kg aire seco
w2f	humedad especifica del aire a la salida del canal,
	kg vapor /kg aire seco
w22	humedad especifica del aire a la entrada del
	condensador, kg vapor /kg aire seco
w23	humedad especifica del aire a la salida del
	condensador, kg vapor /kg aire seco
x	posición en el canal, m
x1	intervalo para diferencias finitas en canal, 0.25 m

program msim; (* declaracion de variables *) const m2:real=0.02 ; A:real=10 ; U:real=25 ; t3:real=30 ; t3e:real=25; var ta,phia:real; const c2:real=1; c:real=1.9; c3:real=4.18; hfg:real=2501; var I,phi:real; var ts,tsi,p0,pe,ps,pa,ws,b,h2s,h2e,e2s,e2e,e3,m3,we,w0,wa,mu_ma, mu_ener,mu_exer:real; var dif_ex,Ex_agua,p3e,p3a,p3s,pp:real; var prod,prod_par,ef_en,ef_ex:real; var vfir,vfhum,vfsal:text; const t:real=0; var car:char; *) (* unidades A, m2 I, W/m2 U, W/m2K c, kJ/kgK function pr(t:real):real; (* presion saturacion *) begin pr:=75/760*exp(14.09-3887.8/(t+230)) (* condiciones de entrada del aire *) (* humedad salida *) const phis:real=0.95; var te,phie:real; procedure bal_materia; end; m3:=m2*(ws-we);begin procedure bal_energia;

LISTADO DEL MODELO SIMPLIFICADO EN TURBO PASCAL

27

ANEXO

4.1

```
function f(t:real):real; (* funcion error
 begin
  f:=m2*((c2+c*ws)*t+(hfg-c3*t3)*(ws-we)-(c2+c*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t*we)*te)+A*U/1E3*((t
 e+t)/2-ta)-
 0.7*I/1E3*A-9.84*m2;
 end;
 begin
 wa:=0.622*phia*pr(ta)/ ( 1-phia*pr(ta) );
 we:=0.622*phie*pr(te)/(1-phie*pr(te));
 writeln('wa = ',wa:2:4,' we= ',we:2:4);
 tsi:=te-5 ;
 repeat
 tsi:=tsi+0.5 ; ps:=pr(tsi); ws:=0.622*phis*ps/(1-phis*ps);
 until abs(f(tsi))<=0.50
 ts:=tsi; writeln('temp sal aire, C ',ts:3:2,'
                                                                                                                                                                               hum salida
 aire ',ws:2:4);
 writeln('radiacion , kW
                                                                                                  ',0.7*I*A/1E3:4:2);
h2s:=(c2+c*ws)*ts+hfg*ws; h2e:=(c2+c*we)*te+hfg*we;
writeln('entalp aire , kW ',m2*h2e:4:2,' ',m2*h2s:4:2);
end;
procedure bal_exergia;
begin
                                         (*e2e, e2s, e3*)
 (*presiones parciales de vapor *)
p3e:=phie*pr(te);p3a:=phia*pr(ta);p3s:=phis*pr(ts);(*vaporagua*)
pe:=1-p3e
                                                     ; pa:=1-p3a
                                                                                                                                  ps:=1-p3s ; (* aire *)
                                                                                                                   ;
end;
```

```
procedure rendim materia;
        mu_ma:=ws/we-1; prod_par:=m2*(ws-we)*3600;
begin
procedure rendim_energia;
begin
        mu_ener:=m2*(h2s-h2e)/(A*I/1E3+m3*c3*(t3e-ta)+9.84*m2);
end;
procedure rendim_exergia;
vardh_as_e,ds_as_e,dh_as_s,ds_as_s,ex_as_e,ex_as_s,ex_rad,ex_ag:
real; var dif_ex_ai:real;
begin
dif_ex ai:=m2*(
1.005*(ts-te)-(ta+273.15)*(1.005*ln((ts+273.15))/(te+273.15))-
0.29*ln(ps/pe))
+ws*1.9*(ts-ta)-we*1.9*(te-ta)-(ta+273.15)*(ws*(1.9*ln((ts+273.1
5)/(ta+273.15)) - 0.46*ln(p3s/p3a))
-we*(1.9*ln((te+273.15)/(ta+273.15))-0.46*ln(p3e/p3a))));
ex_rad:=A*I*0.9/1E3;
ex_ag:=m2*(ws-we) *c3*(t3-ta-(ta+273.15)*ln((t3+273)));
writeln('ganancia exerg aire, kW ',(dif_ex_ai):3:2,'
ex_radia, kW
                         ex rad:3:2,'
                                           ex_agua, kW
',ex_ag:3:2);
mu_exer:=(dif_ex_ai)/(ex_rad+ex_ag+9.84*m2)
end;
begin
assign (vfir,'ir0509.prn');
```

29

```
assign(vfhum,'phi.prn'); assign(vfsal,'ms001.prn');
reset(vfir);
               reset(vfhum); rewrite(vfsal);
prod:=0; ef_en:=0; ef_ex:=0; t:=0;
while t<23 do
 begin
  readln(vfir,I,ta) ; readln(vfhum,phi);
  te:=ta; phie:=phi/100; phia:=phi/100;
  if (I>0) then
  begin
   writeln;
   writeln('T',t:2:0,' I',I:3:1);
   (*bal materia;*)
   bal energia; bal exergia;
   rendim_materia; rendim_energia; rendim_exergia;
   writeln('produccion agua, kg/h ',prod_par:2:2);
   writeln('rend materia, % ',mu_ma*100:2:2,' rend
energia, % ',
                            mu ener*100:2:2,
       rend exergia, % ',mu exer*100:2:2);
   if prod_par<0 then prod_par:=0; if mu ener<0 then
mu ener:=0; if mu_exer<0 then mu_exer:=0;</pre>
   writeln(vfsal,ts:2:2,' ',ws:2:4,' ',prod par:2:2,'
',mu_ener*100:2:2,' ',mu_exer*100:2:2);
   prod:=prod+prod_par ; ef_en:=ef en+mu ener ;
ef ex:=ef ex+mu exer;
   end:
```

30

```
Sold International Control of the Co
```

```
t:=t+1;
end;
close(vfir);close(vfhum); close(vfsal);
writeln('produccion, kg/d/m2 ',prod/A:3:2,' ef ener, %
',ef_en*100/13:2:2,
    ' ef exer , % ',ef_ex*100/13:2:2);
end.
```

LEYENDA CANALES

```
00 Temperatura del agua a la entrada del canal de picon (x=1.75 m)
01 Temperatura del aire a la entrada del canal
02 Humedad del aire a la entrada del canal
03 Temperatura del agua a la mitad del canal (x = 5.5 m)
04 Temperatura del aire a la mitad del canal
05 Humedad del aire a la mitad del canal
06 Temperatura del agua a la salida del canal(x = 9.5n)
07 Temperatura del aire a la salida del canal
08 Humedad del aire a la salida del canal
09 Temperatura del agua a la entrada del canal liso
10 Temperatura del aire a la entrada del canal liso
11 Humedad del aire a la entrada del canal liso
12 Temperatura del agua a la salida del canal liso
13 Temperatura del aire a la salida del canal liso
14 Humedad del aire a la salida del canal liso
16 Irradiancia solar
17 Temperatura ambiente
18 Produccion de agua en el canal de picon
19 Produccion de agua en el canal liso
```

	CH 01) CH01	CH02	CH03	CH04	CH05	CH06	CH07	CHO8
20	0	19.5	98.73	57.90	36.2		64.80)	95.58
	1	19.4	98.73	59.80	39.6		66.80)	95.53
	2	19.0	98.73	59.90	40.4		67.90	}	95.55
	3	19.1	98.75	61.50	41.4		66.80)	95.55
	4	18.9			41.1		65.70)	95.55
	5	17.4			37.2		64.60)	95.55
	6	18.6					60.60)	95.65
	7	27.6					58.30)	95.74
	8	40.2		59.10			70.10)	95.71
	9	44.4		62.40			81.80)	95.69
20	10	49.8		67.70			92.50		95.67
	11	53.8		62.70			99.20)	95.62
	12	58.8		49.40			98.00)	95.60
	13		110.81				93.60		95.55
	14	34.1			39.5				95.58
	15	32.4					74.10)	95.55
	16	33.8			39.7		72.70		95.55
	17	30.1			32.9		67.70		95.53
	18	26.0			29.9		65.30		95.58
	19	23.7		47.30			62.40		95.62
20	20	22.4					59.70		95.62
10	21	21.4					59.51		95.62
	22	21.9					58.00		95.65
	23	21.6					56.00	-	95.65

	Hora CH 00	CH 01	CH 02	CH 03	CH 04	CH 05	CH 06	CH 07	CH 08	CH 09	CH 10	CH 11	CH 12	CH 13	CH 14	CH 15	CH 16
21	0	21.3	97.60	41.40	29.9		59.40		95.62					34.60	17.05	98.41	0.00
	1	21.2	97.60	39.80	29.0		57.70		95.65					35.80	16.75	98.39	0.00
	2	20.9	97.60	39.00	27.8		55.60		95.67					35.30	16.32	98.41	0.00
	3	21.3	97.63	39.50	27.1		55.60		95.67					35.90	16.64	98.41	0.00
	4	21.0	97.63	39.70	27.6		55.50		95.67					35.70	15.98	98.41	0.00
	5	21.7	97.65	39.80	28.6		54.90		95.67					35.00	16.35	98.44	0.60
	6	22.5	97.63	39.10	29.1		54.50		95.67					36.00	17.27	98.41	36.90
	7	26.5	97.60	44.00	30.4		58.50		95.67					39.50	21.79	98.41	256.80
	8	29.4	97.65	48.30	35.4		63.30		95.67					42.30	26.71	98.39	490.20
	9	33.2	97.41	54.80	40.1		73.30		95.62					48.80	30.13	98.34	672.90
21	10	36.8	95.86	61.70	43.4		82.80		95.58					53.70	37.41	98.32	827.40
	11	39.7	94.95	66.00	45.3		88.60		95.55					56.20	40.47	98.32	938.70
	12	41.1	94.81	68.30	47.7		90.30		95.53					59.30	42.52	98.29	964.20
	13	41.4	94.52	72.70	47.5		92.10		95.49					59.80	43.65	98.27	914.10
	14	41.3	93.91	69.70	47.3		87.40		95.46					58.30	44.08	98.25	774.90
	15	39.5	93.68	64.40	44.3		81.30		95.46					57.60	43.01	98.25	620.70
	16	33.1	95.86	63.00	36.1		69.60		95.49					50.10	32.73	98.25	212.10
	17	29.8	97.30	54.20	32.3		65.00		95.51					47.60	28.35	98.22	110.70

	18	28.0	97.32	55.60	29.6	58.70	95.53	42.90	25.26	98.27	30.00
	19	26.4	97.34	57.30	27.9	59.10	95.55	40.20	23.05	98.29	0.00
21	20	25.2	97.37	55.50	27.1	56.00	95.58	37.90	21.65	98.29	0.00
	21	24.1	97.39	54.90	26.1	55.00	95.58	38.30	20.73	98.29	0.00
	22	23.7	97.39	51.70	26.0	54.50	95.60	38.10	19.85	98.32	0.00
	23	23.2	97.46	49.80	26.9	52.40	95.62	37.20	18.85	98.34	0.00

0 1 2 3 4 5

CANAL

1	NUKR										
22	0	22.6	97.44	53.40	25.3	52.60	95.62	38.90	18.46	98.32	0.00
	1	21.1	97.48	43.30	24.2	51.30	95.62	38.50	16.64	98.37	0.00
	2	21.5	97.48	44.00	24.5	51.60	95.62	39.00	16.67	98.37	0.00
	3	20.7	97.53	44.00	24.1	50.70	95.65	38.70	15.94	98.39	0.00
	4	20.3	97.53	42.20	24.2	50.60	95.67	37.40	15.24	98.41	0.00
	5	20.3		38.60	23.8	50.20	95.69	35.60	15.06	98.41	0.60
	6		97.56	42.80	24.5	50.00	95.67	35.00	15.66	98.41	35.10
	7		97.53		27.4	51.00	95.67	35.90	17.52	98.39	114.90
	8		97.77		32.0		95.71	71.40	22.82	98.46	388.80
	9		97.86	52.20	36.5	68.40	95.67	47.00	26.73	98.39	665.40
22	10		97.86		40.8	76.50	95.65	49.20	34.81	98.37	822.90
	11		97.88		41.6	79.10	95.65	51.10	35.19	98.37	753.30
	12		97.88		32.7	64.50	95.65	43.80	27.80	98.37	209.70
	13	27.2	97.91	47.70	30.4	61.30	95.62	41.20	25.41	98.34	160.80
	14	26.1	97.93	44.70	29.6	57.20	95.62	37.70	23.48	98.34	142.20
	15	26.6	97.88	45.50	29.3	59.30	95.60	38.50	24.19	98.34	189.9 0
	16	29.0	97.88	44.80	32.8	60.00	95.62	41.30	28.80	98.34	182.70
	17		97.88	45.60	29.5	.58.40	95.62	38.40	24.53	98.34	129.30
	18		97.88		28.7	56.30	95.60	36.90	22.03	98.34	47.10
	19	22.8		41.30	26.0	54.90	95.62	35.40	18.82	98.34	0.00
22	20	22.0	97.91	41.50	24.9	71.20	95.62	35.50	18.12	98.37	0.00
	21	21.3	97.93	41.30	24.1	52.60	95.65	35.00	17.01	98.39	0.00
	22		97.95		23.9	54.10	95.65	35.80	15.94	98.39	0.00
	23		97.98		24.3	52.60	95.67	35.20	15.30	98.41	0.00

6 7 8 9 10

11

12

13

14

15

16

CANAL

		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	HORA																	
23	0		19.8	91.98	42.00	24.2		76.20	5	5.65						14.92	98.41	0.00
	1		19.4	97.98	40.90	23.8		74.10	5	15.67						14.34	98.41	0.00
	2		19.1	98.00	40.10	23.5		72.70	5	15.67						14.08	98.44	0.00
	3		18.7	98.03	39.70	23.7		68.60	9	15.69						13.44	98.44	0.00
	4		18.5	98.03	34.70	23. 4		70.50	5	75.69					34.90	13.27	98.44	0.00
	5		18.4	98.03	38.90	23.1		67.50	5	75.69						12.86		1.80
	6		19.3	98.05	37.10	24.0		61.10	9	75.69					35.80	13.80	98.44	
	7		25.0	98.00	41.40	30.5		71.80	5	95.67					36.70	19.91		
	8		25.2	96.26	49.00	30.9		65.30	9	95.78						24.57		592.80
	9		30.7	93.40	52.90	47.8		19.30	9	95.69					58.00	33.20		763.80
23	10		32.9	98.17	57.00	39.9		69.30	9	35. 65					60.20		98.37	282.00
	11		37.8	98.10	59.40	43.2		71.40	9	95.62					62.30	39.00		452.10
	12		28.8	98.57	51.90	31.2		56.60	9	95.65					58.50	26.52	98.37	184.80
	13		26.9	98.66	46.70	29.2		49.20	9	95.65					51.80	23.70		131.10
	14		26.4	98.80	46.00	29.2		50.20	9	75.62					50.40			158.10
	15		25.0	98.87	43.90	31.1		49.20	9	95.62					49.50	21.39		74.40
	16		23.9	98.99	41.40	31.4		45.80	(95.60					45.50		98.37	
	17		23.7	99.06	42.30	28.5		46.40	9	95.62					46.90			
	18		23.2	99.08	41.80	27.7		45.20	(95.62					47.20	18.33	98.39	15.00
	19		22.8	99.15	42.10	28.4		46.10	(95.62					46.20	17.59	98.37	0.00
23	20		21.8	99.15	40.50	28.3		44.00	(95.62					44.80	16.20	98.39	0.00
	21		21.2	99.15	39.30	26.9		42.20	9	95.65					44.80	15.30	98.39	0.00
	22		20.8	99.20	39.20	26.3		41.80		95.65					31.20	14.92		0.00
	23		20.4	99.22	38.30	24.9		40.70		95.67					45.40	14.47	98.41	0.00

	CANAL																
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	HORA																
24	0	19.8	99.32	36.20	24.1		39.70	95	.69					45.40	13.82	98.44	0.00
	i	19.3	99.32	38.30	23.0		40.20	95	.71					46.30	13.46	98.46	0.00
	2	18.9	99.39	35.80	23.2		38.10	95	.71					43.10	13.01	98.46	0.00
	3	18.9	99.43	36.70	22.2		39.00	95	.71					46.20	12.41	98.46	0.00
	4	18.8	99.46	34.70	22.1		37.40	95	.74					45.30	12.20	98.48	0.00
	5	18.5	99.48	34.90	21.5		36.80	95	.74					42.90	12.07	98.48	1.80
	6	19.9	99.46	34.20	23.1		36.80	95	.74					45.80	12.89	98.46	90.30
	7	23.5	99.43	36.50	27.9		39.00	95	.71					46.90	16.32		295.50
	8	28.6	98.07	41.50	33.0		45.80	95	.69					49.50	22.67		476.70
	9	32.2	97.67	50.40	37.5		35.40	95	.69					30.40	28.98		351.90
24	10	35.9	97.65	59.20	42.1		40.10	95	.60					34.40	37.18	98.32	958.50
	11	28.1	97.65	56.00	31.2		33.40	95	.60					28.90	25.81		110.10
	12	26.7	97.67	50.20	28.9		29.80	95	.60					27.40	23.35	98.37	101.40
	13	26.8	97.67	49.80	28.9		29.00	95	5.58					35.80	23.27	98.34	127.80
	14	26.1	97.70	47.20	28.5		28.30	95	.60					35.10	22.59	98.34	110.70
	15	26.3	97.72	48.50	28.6		28.20	95	5.58					35.40	23.03		164.70
	16	25.8	97.74	48.30	28.5		28.10	95	5.60					35.50	22.65	98.32	94.20
	17	24.6	97.77	45.80	26.8		27.30	95	5.60					25.10	20.92	98.32	53.40
	18	23.5	97.77	46.30	25.5		26.20	95	5.60					26.80	19.40	98.34	16.80
	19		97.79	46.00	24.6		25.60	95	5.62					32.80	18.40	98.34	0.00
24	20	22.5	97.81	42.90	24.3		25.20	95	5.62					23.60	17.69	98.34	0.00
	21	22.1	97.84		24.1		25.00	95	5.62					23.20	16.94	98.37	0.00
	22	21.1		42.60	23.1		24.70	95	5.67					30.80	16.09	98.39	0.00
	23			43.70	22.7		24.50		5.65					23.10	15.81	98.41	0.00

		CANAL																			
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	HORA																				
21	0	22.20	36.0	97.46	24.90	82.44	93.45	22.40	38.2	95.12	46.85	98.03	48.82	98.58	24.50			0.60	21.70	1.17	0.00
	1	20.00	35.8	97.46	21.20	81.85	93.45	22.20	38.0	95.12	46.64	98.03	48.52	98.58	23.30			0.00	21.50	1.11	0.00
	2	19.20	35.5	97.46	20.00	83.07	93.48	22.00	37.7	95.12	46.26	98.06	47.88	98.58	21.90			0.00	21.30	0.13	0.00
	3	19.60	35.8	97.46	20.30	82.44	93.45	22.10	37.9	95.12	46.59	98.06	48.36	98.58	21.80			0.30	21.50	5.65	1.06
	Á	19.00	35.8	97.46	19.00	82.33	93.45	22.10	37.9	95.14	46.51	98.06	48.14	98.58	21.50			0.30	21.40	0.00	0.00
	5	18.40	35.3	97.46	18.60	83.53	93.45	21.90	37.5	95.12	46.06	98.06	47.63	98.58	21.20		,	1.50	21.00	0.17	0.00
	-	19.10				81.78					46.87		48.53					156.30	21.60	0.43	0.40
	7	19.20	37.1	97.48		79.72			39.5	95.12			49.74					261.60		0.00	0.00
	8	19.50	38.5							95.07	49.70			98.55				196.20		0.00	0.0(
	9	20.10	38.8	97.46	23.40	75.31	93.45	26.60	41.6	95.07	50.19			98.55				446.70		0.81	0.57
21	10	19.80	40.5		25.10		93.43		45.0	88.34			57.97		32.20			399 .90		0.00	0.00
	11	19.60	40.8	97.44	25.30	67.46	93.41	31.90	45.8	85.80	52.76	97.99	58.89	98.48	34.50			347.70		0.00	0.00
	12	20.10	41.0	97.44	26.40	66.64	93.43	33.20	46.3	85.02			59.34		36.40			679.80		0.64	0.6
	13	19.90	40.4	97.41	25.40		93.41		45.0	86.49			58.20					687.30		0.43	0.5%
	14	19.50	40.3	97.44	23.80	61.68	93.43	30.30	45.0	85.64			57.99					362.70		0.00	0.0
	15	19.40	39.5	97.44	22.80	59.79	93.43	28.40	43.7	87.54	51.02	97.96	56.39	98.48	29.90			223.20		0.36	0.3.
	16	19.30	39.2	97.37	21.90	48.84	93.34	26.60	42.9	88.80	50.64	97.92	55.56	98.44	28.20			396.90		0.46	0.2
	17	18.70	37.9	97.44	20.70	45.38	93.43	25.00		93.61		97.99		98.48			į	348.30	23.60	0.00	0.0€
	18	18.30	37.1	97.41	19.50								51.07					30.00		0.00	0.0
	19	18.40			19.20		93.38								23.20				23.10	0.11	0.0
21	20	18.20				53.44									22.80				22.90	0.13	0.0
	21	18.00	36.5	97.46	18.20	53.84	93.45	22.90	38.8	95.10	47.42	98.01	49.62	98.51	22.50			0.00	22.40	0.00	0.0

22	18.10	36.2 97.44	17.70	55.33	93.43	22.70	38.5	95.10	47.17	98.01	49.17	98.51	22.20	0.00	22.10	0.04	9.1
23	18.10	36.0 97.41	17.90	56.32	93.43	22.50	38.3	95.07	46.96	98.01	48.89	98.51	22.00	0.00	22.10	0.00	0.0

		CANAL																			
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	HORA						,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,														
22	0	18.30	36.1	97.44	17.90							98.01							22.40	0.28	0.03
	1	18.10	36.1	97.44	18.00		93.43					98.01						0.00	22.20	0.03	0.00
	2	17.90	36.4	97.44	18.00							98.03							22.00	0.08	0.01
	3	18.10	36.0		18.10		93.43					98.01						0.00	22.10	0.00	0.00
	4	18.00		97.46								98.03							21.80	0.08	0.00
	5	17.90		97.46								98.03							21.50	0.00	0.00
	6	18.50		97.44								98.03							22.00	0.83	0.28
	7	18.40		97.44								98.01						69.00		0.00	0.00
	8	18.50	36.7	97.48	17.70	65.94	93.45	23.20				98.03						59.40		0.01	0.00
	9	18.70	37.1	97.46	16.80	67.54	93.45	23.40	39.4	95.12	47.91								22.40	0.25	0.24
22	10	19.40	38.9	97.48	20.40	74.43	93.48	27.60	42.4	94.30	50.17	98.03		98.53					23.60	0.00	0.00
	11	18.80	37.8	97.44	19.30	92.85	93.43	25.30	40.8	95.10	48.94	98.03		98.53				234.90		0.14	0.38
	12	19.60	39.4	97.46	22.50	65.00	93.45	28.30		91.04		98.01		98.51				419.70		0.00	0.00
	13	19.20	39.8	97.44	23.30	59.56	93.43	29.70	44.2	88.96		97.99						703.20		0.00	0.21
	14	19.40	41.0	97.41	23.80	66.32	93.41	31.10	46.0	84.84		97.96							25.20	0.00	0.00
	15	19.90	40.4	97.41	22.80	60.71	93.43	29.50	45.2	84.68		97.96							24.60	0.77	0.9
	16	19.70	40.0	97.41	21.10	53.76	93.43	26.60	44.5	85.85		97.99						607.20		0.13	0.00
	17	19.10	39.0	97.39	20.50	53.53	93.41	25.50	42.0	91.73		97.94						289.50	23.70	0.23	0.00
	18	18.70	37.4	97.41	19.90	52.35	93.41	24.30	40.2	94.98	48.47	97.96	51.88	98.46	24.30			45.30	22.90	0.01	0.0
	19	18.70	36.5	97.41	19.50	63.49	93.41	23.40	39.1	95.05	47.55	97.99	50.11	98.48	23.20			4.20	22.50	0.44	0.3
22	20	18.60	36.1	97.41	19.00	45.36	93.41	22.70	38.6	95.07		97.99		98.48	22.40			0.00	22.10	0.06	0.0
	21	18.70	36.1	97.41	18.90	46.76	93.43	22.60	38.5	95.07	47.04	98.01	49.21					0.00	22.20	0.18	0.0
	22	18.60	36.1	97.44	18.70	54.20	93.43	22.40	38.4		47.04		49.08		21.90			0.00	22.10	0.00	0.0
	23	18.50	36.0	97.41	18.50	110.92	93.41	22.40	38.2	95.07	46.87	98.01	48.89	98.51	21.60			0.00	22.00	0.26	0.0

		CANAL																			
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	1
	HORA															·					
23	0	18.50	36.0	97.44	18.30	118.04	93.43	22.40	38.2	95.10	46.79	98.03	48.74	98.53	21.50			0.00	21.70	0.00	0.0
	1	18.30	35.7	97.46	18.10	116.40	93.45	22.10	38.0	95.12	46.49	98.03	48.48	98.53	21.20			0.00	21.40	0.08	0.0
	2	18.30	35.5	97.44	17.90	88.02	93.43	21.80	37.7	95.10	46.30	98.03	48.03	98.53	20.80			0.00	21.40	0.17	0.0
	3	18.30	35.6	97.51	17.80	56.81	93.50	21.90	37.8	95.14	46.34	98.08	48.05	98.55	20.60			0.00	21.10	0.00	0.0
	4	18.20	35.6	97.46	17.60	84.79	93.45	21.60	37.7	95.12	46.32	98.06	47.86	98.55	20.30			0.00	21.20	0.00	0.0
	5	18.20	35.7	97.51	17.70	108.13	93.50	21.80	37.8	95.14	46.38	98.08	48.05	98.58	20.30			1.50	21.00	0.25	0.0
	6	18.80	36.4	97.48	18.20	59.05	93.50	22.30	38.5	95.14	46.92	98.06	48.72	98.55	20.60			150.90	21.50	0.39	0.1
	7	18.70	36.5	97.46	18.70	61.34	93.45	22.70	38.8	95.10	47.32	98.03	48.89	98.53	21.00		1	259.20	21.60	0.00	0.0
•	8	20.40	39.0	97.48	21.30	68.34	93.48	25.50	41.2	95.12	50.21	98.08	53.38	98.58	24.90		ļ	590.70	23.10	0.00	0.0
	9	23.10	41.0	97.41	26.00	66.43	93.41	32.20	43.5	95.07	51.26	97.99	54.36	98.48	30.00		(695.10	23.60	2.99	0.0
23	10	25.50	42.8	97.41	31.00	53.02	93.41	37.80	47.3	92.07	52.74	97.96	58.70	98.46	34.30		;	771.00	24.80	0.00	0.0
	11	26.10	43.1	97.41	33.00	49.73	93.41	40.60	48.1	88.57	52.98	97.94	59.06	98.44	36.70		;	314.10	25.40	0.00	0.0
	12	24.50	41.8	97.39	31.90	57.83	93.38	40.00	46.2	91.20	51.85	97.94	57.35	98.44	35.70		:	282.30	25.20	0.35	0.1
	13	22.20	41.2	97.39	28.90	37.41	93.38	36.10	45.2	91.48	51.08	97.94	55.90	98.41	30.20		1	238.80	25.00	0.65	0.3
	14	26.30	44.4	97.37	35.00	41.81	93.36	41.40	49.7	85.46	53.74	97.92	60.53	98.39	35.70			770.70	26.10	0.00	0.0
	15	22.30	40.8	97.37	28.80	58.40	93.38	35.90	44.9	90.91	50.68	97.94	55.41	98.41	28.60		j	117.90	24.60	0.95	0.6
	16	22.60	42.2	97.34	26.80	56.22	93.34	34.20	46.5	87.86	52.08	97.89	58.63	98.39	29.70		1	485.70	24.80	0.29	0.0
	17	21.20	40.2	97.34	25.60	51.66	93.34	32.20	43.3	93.01	50.34	97.92	55.75	98.39	27.20			101.40	24.00	0.57	0.0
	18	20.10	39.2	97.34	24.60	31.91	93.36	30.60	41.9	94.75	49.38	97.92	53.67	98.39	24.90		1	114.30	23.50	0.64	0.1
	19	19.00	37.6	97.39	23.30	31.93	93.38	29.10	40.3	95.03	47.91	97.96	50.60	98.44	23.60			4.20	22.80	0.18	0.0
23	20	18.30	36.9	97.37	22.40	31.91	93.36	27.80	39.5	95.01	47.40	97.94	49.77	98.44	22.70			0.00	22.70	0.36	0.0
	21	18.00	36.6	97.37	21.70	31.93	93.38	26.90	39.1	95.03	47.09	97.96	49.34	98.44	22.20			0.00	22.30	0.55	0.0
	22	17.70	36.6	97.39	21.40	31.93	93.38	26.30	39.0	95.05	47.13	97.99	49.29	98.46	21.80			0.00	22.30	0.63	0.0
	23	18.00	36.4	97.41	21.30	31.93	93.41	26.00	38.8	95.05	46.91	97.99	49.08	98.46	22.00			0.00	22.20	0.25	0.0

DATOS CORRESPONDIENTES AL DIA 14 07 fich 1407-3

		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	HORA										,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,										
14	0	20.80	21.6	97.37	20.70	21.8	97.66	23.90	23.2	96.08	16.85	99.02	20.64	98.74	24.10			0.00		0.011	0.430
	1	20.70	21.7	97.37	20.50	21.8	97.68	23.80						98.74	23.80			0.00		0.011	
	2	21.00	21.7	97.37	20.60	21.8	97.66	23.70	23.2	96.08		99.02						0.00		0.000	
	3	20.90	21.6	97.39	20.50		97.68			96.10		99.04			23.70			0.00		0.011	
	4	20.70	21.2	97.39	20.20		97.68					99.04						0.00		0.000	0.000
	5	20.60	20.9	97.39	20.30	21.1	97.70	23.40				99.04						0.00			0.000
	6	20.50	21.4	97.41	20.20		97.68							98.77				25.20		0.000	
	7	20.70	22.4	97.39	20.90		97.66							98.77				98.70		0.033	
	8	21.30	24.6	97.37	22.10		97.68					99.02			25.10			23.70		0.088	
	9	21.20					97.68					99.04			26.90			33.40		0.000	
	10	22.00		97.37			97.66					98.99						96.20		0.110	
	11	20.80		97.41			97.70					99.04			29.20			10.60		0.000	
	12	21.40		97.32			97.59					98.95			31.40			63.60		0.022	
	13	21.80	31.9	97.27	28.30		97.57				28.89		41.05		36.60			61.30		0.210	
	14	20.60	28.5	97.30	25.90		97.61				25.60		36.15		36.60			38.50		0.000	
	15	20.70	29.8	97.25	26.30		97.54				27.47		39.08		37.40			57.10		0.000	
	16	20.40	28.0		25.40		97.57				25.70		35.77		36.00			26.50			1.235
	17	19.90	26.5	97.27	24.40		97.59			91.20			32.76		33.70			53.60		0.033	
	18	19.50		97.30			97.59			95.99			28.65		31.40			67.80			0.386
	19	19.30		97.32			97.59					98.95						5.70		0.000	0.728
	20	19.60	22.7	97.32			97.61	25.30	24.4			98.97			28.10			0.00			0.000
	21	19.80	22.3	97.34	22.00	26.3		24.80		96.04	17.75			98.72	26.80			0.00			0.000
	22	20.00		97.34			97.61			96.04	17.51			98.72	26.10			0.00			0.011
	23	19.60	21.6	97.37	21.50	25.9	97.63	24.40	23.3	96.06	16.98	98.99	21.18	98.72	25.30			0.00		0.033	0.000

DATOS CORRESPONDIENTES A 01 08 fich 0108E

	1	CANAL																			
		0	1	2	3	á	5	6	- 7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	HORA						,		,												
1	0	22.1	22.2	97.41	27.2		97.68	27.1	22.5	96.08	15.89	99.04	20.13	98.60	23.2			0.00	23.0	0.00	0.00
	1	21.8	21.8	97.39	26.9		97.68	26.8	21.8	96.06	15.53			98.60	22.8			0.00	22.8	0.000	0.000
	2	21.7	21.5	97.41	26.8		97.68	26.5	21.4	96.08	15.36	99.04	19.15	98.60	22.6			0.00		0.000	
	3	21.4	21.0	97.41	26.8		97.68	26.1	20.7	96.08			18.57		22.3			0.00		0.000	
	4	21.3	20.8	97.41	26.4		97.68	25.7	20.4	96.08			18.61		22.2			0.00		0.000	0.585
	5	21.5	20.6	97.41	26.1		97.70	25.2	20.0	96.08			18.10	98.63	22.0			0.00		0.000	
	6	21.7	21.0	97.41	25.8		97.70	25.0	20.5	96.10		99.06	18.50	98.63	22.1			18.30		0.011	
	7	23.3	23.5	97.41	26.9		97.68	25.8	24.0	96.08	17.53	99.04		98.63	23.7			69.90		0.132	
	8	23.7	23.6	97.41	27.6		97.70	26.3	24.3	96.08		99.04		98.60	24.1			108.60		0.077	
	9	24.9	25.5	97.41	28.7		97.70	29.2	27.4	96.10	18.60	99.04		98.63	25.5			226.80		0.077	0.000
1	10	28.5	27.0	97.39	29.6		97.68	26.7			19.91	99.04			26.7			232.20		0.960	
	11	29.8	28.1	97.30	29.9		97.68	26.8	31.7	96.08		99.02	28.05	98.58	28.3			376.80		0.022	
	12	35.4	31.5	97.32	33.2		97.68	28.5	38.3	96.08		99.02		98.58	31.9		ļ	540.60		0.121	
	13	31.5	32.2	97.32	33.2		97.68	33.2	39.2	95.99	24.34	98.97		98.55	32.5			277.20		0.640	
	14	32.6	33.6	97.32	33.9		97.61	33.5	40.9	95.99	25.38	98.97	35.38	98.53	33.4			450.30		0.761	
	15	30.5	29.7	97.34	32.3		97.63	31.5	34.4	96.04			30.15	98.53	29.8			148.50		0.739	
	16	29.9	28.7	97.32	31.5		97.61	30.7	32.9	96.01	21.53	98.97	29.19	98.53	29.1			108.60		0.518	0.000
	17	33.7	26.6	97.32	30.7		97.61	27.8	29.4	96.04	19.92	98.97	26.26	98.55	27.3			54.60		0.331	
	18	27.6	25.5	97.32	29.1		97.59	27.8	27.6	96.04	19.08	98.97	24.94	98.55	26.4			23.40			
	19	26.4	24.0	97.34	28.0		97.61	26.5	25.2	96.01	17.89	98.99	22.97	98.55	25.2			0.00		0.044	
1	20	26.0	23.5	97.34	27.3		97.63	25.8	24.4	96.04	17.43	98.99	22.37	98.55	24.7			0.00		0.066	
	21	25.4	22.6	97.37	28.1		97.66	25.1	23.1	96.06			21.00	98.58	24.1			0.00	23.3	0.022	
	22	24.9	22.1	97.39	27.7		97.68	24.8	22.4	96.08	16.17	99.04	20.34	98.60	23.6			0.00		0.011	
	23	24 7	21 8	97 39	27.8		97.68	24.5	21.8	96.06	16.02	99.04	19.79	98.60	23.3			0.00	23.0	0.044	0.110

CANAL

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
HORA_																				
0	21.0	21.7	97.41	24.5		97.68	24.0	21.9	96.10	16.40	99.06	18.46	98.60	22.8			0.00	22.8	0.000	0.000
1	20.8	21.5	97.41	24.4		97.68	23.7	21.6		15.89				22.6			0.00		0.000	0.000
2	20.6	-21.4	97.44	25.0		97.70	23.5	21.3				17.50		22.6			0.00		0.011	0.011
3	20.5	21.4	97.41	24.6		97.70	23.3					17.11		22.4			0.00		0.000	0.000
4	20.8	20.8	97.44	24.2		97.73	23.2					16.96	98.63	22.3			0.00	22.3	0.000	0.000
5	21.1	21.2	97.46	25.0		97.73	22.9	20.7		14.79				22.2			0.00	22.2	0.000	0.000
6	20.9	21.3	97.46	23.9		97.70	22.9	20.9		15.00		16.77		22.0			18.60		0.000	0.000
7	21.3	22.1	97.41	24.4		97.70	23.6	21.9		16.23				22.8			113.40		0.055	0.088
8	23.2	23.6	97.44	25.0		97.70	25.4			17.94				24.3			206.10		0.121	0.132
9	24.7	26.5	97.41	26.0		97.70	28.4		96.08	20.23				26.5			267.30		0.221	0.044
10	28.7	30.5	97.44	30.9		97.73	34.5		96.08	24.81		31.63	98.58	30.2			515.70		0.232	0.121
11	32.3	36.1	97.39	34.4		97.68	40.0	47.8	95.71		99.02		98.55	33.3			999.00		0.342	
12	33.8	39.8	97.46	39.3		97.79	44.1	54.7	89.99	31.47			98.63	33.8			925.50		0.000	0.121
13	32.1	41.4	97.37	44.4		97.68	44.7	55.5				44.09		40.0			873.30		0.132	
14	31.7	37.2		45.1		97.59	44.7	48.0				46.26		42.4			770.10		2.327	0.860
15	30.7	34.4	97.27	44.8		97.59	43.1	43.6				45.23		41.4			602.10	25.7		1.688
16	28.1	29.8		31.2		97.59	39.8	36.2						39.7			417.90	25.7		
17	25.9		97.27	28.7		97.57	34.3	35.9				37.04	98.48	35.4		•	236.40		1.169	
18	24.4		97.30	27.3		97.59	31.3	30.3						30.2			66.00		0.000	
19	23.0		97.39	25.6		97.68	28.6	26.5		19.26				27.0			0.00		1.048	
<u>20</u>	22.7		97.37	24.6		97.63	27.1	24.8			99.02		98.55	26.2			0.00		1.401	
21	22.4		97.37	24.4		97.68	26.2	24.6			99.04			25.4			0.00		0.221	0.022
22	22.3		97.39	23.7		97.66	25.6	23.7			99.04			24.9			0.00		1.070	
23	22.3	22.7	97.39	24.1		97.68	25.2	23.2	96.08	17.43	99.04	20.01	98.58	24.6			0.00	25.9	0.000	0.022

ersidad de Las Palmas de Gran Canaria. Biblioteca Digital, 2004

	CANAL																			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	. 14	15	16	17	18	19
HOR	A																	-		• •
11 0	22.0	22.1	97.39	24.0		97.68	24.8	22.3	96.08	17.04	99.06	19.49	98.58	24.2			0.00	23.5	0.132	0.000
1	22.1	21.9	97.39	24.1		97.68	24.6	22.0	96.08	16.89	99.04	19.15	98.58	23.9			0.00		0.000	0.000
2	21.7	21.9	97.39	24.4		97.68	24.3	21.7	96.06	16.81	99.04	18.96	98.58	23.8			0.00	23.4	0.000	0.011
3	21.9	21.8	97.41	24.0		97.70	24.3	21.6	96.08	16.57	99.04	18.57	98.58	23.5			0.00	23.2	0.066	0.022
4	21.6	21.5	97.41	24.7		97.73	24.1	21.1	96.10	16.06	99.06	18.09	98.60	23.2			0.00	22.7	0.000	0.000
5	20.8	22.9	97.41	23.9		97.73	23.6	20.2	96.10	15.30	99.06	17.20	98.60	22.5			0.00	22.4	0.099	0.000
ó	20.8	20.9	97.41	23.5		97.70	23.5	20.3	96.10	15.47	99.06	17.43	98.60	22.5			31.50	22.7	0.000	0.000
7	21.9	23.0	97.41	24.1		97.70	24.4	23.4	96.10	17.55	99.06	20.19	98.60	23.9		1	70.40	22.6	0.066	0.110
8	23.2	24.7	97.41	24.8		97.70	25.9	26.2	96.08	19.02	99.04	22.61	98.58	25.0		1	76.10	22.7	0.099	0.199
9	27.0	30.0	97.44	27.1		97.73	31.0	34.1	96.08	24.26	99.04	28.51	98.55	28.0		1	58.00	23.2	0.000	0.077
10	30.0	33.8	97.39	31.0		97.68	37.2	42.7	96.06	28.89	99.02	35.99	98.53	31.3		ć	96.90	24.0	0.000	0.088
11	33.2	37.3	97.37	33.8		97.68	41.1	50.9	92.74	32.49	98.99	39.98	98.53	33.7		8	47.20	24.6	0.000	0.507
12	34.8	39.2	97.32	36.6		97.63	44.3	53.5	90.95	34.36	98.95	43.98	98.51	36.1		8	46.00	25.5	0.000	1.710
13	35.9	40.9	97.32	42.7		97.61	45.7	55.5	88.69	36.11	98.95	46.47	98.48	39.5		8	18.70	25.9	0.000	2.041
14	35.8	41.6	97.25	46.2		97.57	45.7	55.7	89.65	37.34	98.90	47.70	98.48	41.9		7	34.10	26.6	0.000	2.018
15	33.7	39.7	97.23	45.1		97.57	44.0	52.9	90.13	35.87	98.88	47.42	98.46	41.6		6	06.00	26.8	0.000	1.721
16	30.6	36.6	97.23	32.8		97.54	40.6	46.7	94.18	32.91	98.85	43.73	98.46	39.2		3	89.40	26.9	1.059	1.026
17	27.8	32.8	97.23	30.5		97.52	36.0	39.0	95.83	28.96	98.88	37.88	98.46	35.4		2	12.70	26.8	0.077	0.540
18	26.2	28.7	97.25	28.6		97.54	33.0	32.8	95.97	24.53	98.90	30.76	98.46	31.1			57.60	26.6	0.000	0.364
19	24.3	25.4	97.30	26.8		97.59	30.3	27.9	96.01	21.17	98.95	25.63	98.51	28.0			0.00	25.8	0.000	0.188
20	23.3	24.1	97.32	25.4		97.61	28.4	25.8	96.01	19.72	98.97	23.67	98.51	26.8			0.00	25.6	0.000	0.000
21	23.0	23.2	97.34	24.9		97.63	27.1	24.4	96.04	18.83	98.99	22.41	98.53	26.0			0.00	25.3	0.033	0.022
22	22.3	22.7	97.37	24.6		97.66	26.2	23.5	96.06	18.13	99.02	21.38	98.55	25.4			0.00	24.7	0.419	0.000
23	22.0	22.2	97.39	24.7		97.68	25.5	22.6	96.08	17.47	99.04	20.40	98.55	24.7			0.00	24.1	0.849	0.044

	C	ANAL																			!
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	15
}	IORA_																				
16	0	19.1	23.9	97.27	20.2		97.57	26.2	24.5	95.99	18.74	98.92	23.83	98.48	25.1	•		0.00		0.044	
	1	17.5	23.4	97.30	21.0		97.59	25.7		95.99			23.03		24.7			0.00		0.044	
	2	17.7	23.4	97.32	20.3		97.61	25.6					22.76		24.4			0.00		0.011	
	3	17.9	23.2	97.32	20.1		97.59	25.4		96.01			22.37		24.1			0.00		0.000	
	4	18.0		97.32	20.4		97.61	25.3	22.8				21.92		23.9			0.00		0.011	
	5	17.7		97.37	20.0		97.68	25.0	22.5				21.47		23.6			0.00		0.044	
	6	18.0	23.4	97.34	19.6		97.61	25.0					21.52		23.6			21.90		0.000	
	7	19.2	25.1	97.34	20.9		97.66	25.8					24.14		24.9			132.90		0.077	
	8	21.5	28.1	97.34	23.6		97.66	27.5		95.97			28.68		26.7			302.40		0.110	
	9	24.7		97.30	25.5		97.61	31.6					33.61		29.2			477.90		0.364	1
	10	28.4		97.30	29.3		97.61	37.3					39.98		31.8			643.80		1.423	1
	11	33.8		97.27	34.1		97.59	40.6					44.91		34.0			747.00		1.996	
	12	28.2	36.1	97.30	37.0		97.61	44.0					44.91		38.3			792.00		3.695	1
	13	27.5	35.1	97.30	30.3		97.59	39.1					43.44		37.1			767.70		1.401	
	14	27.2	34.4	97.30	29.1		97.59	37.8					43.18		36.7			675.30		1.235	1
	15	26.3	33.2	97.27	27.4		97.59	36.0					42.14		36.2			515.10		0.982	- 1
	16	25.2		97.25	26.1		97.54	33.1					39.68		34.4			342.60		0.662	1
	17	23.9	29.1	97.25	24.3		97.52	29.9					35.13		31.3			168.00		0.265	1
	18	22.6		97.20	22.9		97.50	27.9					29.85		29.8			39.60	26.0	0.000	4
	19	21.7		97.23	22.1		97.50	26.5					26.33		26.9			0.00	25.7	0.000	1
	20	21.2		97.23	21.4		97.52	25.8					25.21		26.1			0.00		0.000	
	21	21.1		97.23	21.2		97.52	25.4					24.44		25.5			0.00	25.4	0.022	1
	22	21.0	23.9	97.27	20.9		97.54	25.1					23.82		24.8			0.00		0.022	4
	23	20.7	23.8	97.30	20.7		97.57	24.9	24.4	95.99	18.21	98.95	23.29	98.51	24.3			0.00	25.1	0.033	0.14

	C	ANAL																		`	,
		0	1	2	3	4	5.	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	HORA_																				
18	0	19.5		97.32	23.0		97.61	26.4	22.7		17.34				23.7			0.00	24.4	0.044	0.011
	1	19.4		97.34	22.8		97.63	26.0	22.0	96.04	16.83	98.97	20.64		23.2			0.00	23.9	0.000	0.000
	2	19.3		97.37	22.4		97.66	25.6	21.4	96.04	16.72		20.06		22.8			0.00	23.6	0.022	0.000
	3	18.7		97.37	21.8		97.66	25.2	20.8	96.01	16.19	98.97	19.44		22.3			0.00	23.6	0.000	0.000
	4	18.6		97.39	21.6		97.68	24.9	20.6	96.06	16.36		19.12	98.60	22.0			0.00	23.1	0.000	0.000
	5	18.4		97.39	21.2		97.68	24.6	20.4	96.06	16.23		19.08	98.60	21.9			0.00	23.1	0.011	0.000
	6	18.6		97.39	21.1		97.68	24.6	20.9	96.06	16.43	98.99	19.59	98.60	22.2			21.30	23.0	0.022	0.000
	7	19.4		97.39	21.7		97.68	25.0	22.5	96.08	17.17	98.99	20.90		22.8			85.20	22.9		0.033
	8	21.6		97.37	23.5		97.68	26.5	26.8	96.08	19.40		24.72		24.6			94.10	23.0	0.110	
•	9	27.5		97.34	28.5		97.66	31.9	37.3	96.06	26.21	98.99	32.52		28.3			74.60	23.7	0.176	
	10	30.2		97.39	33.6		97.70	37.9	46.0	96.04	29.55				30.4			17.00		0.121	
	11	35.1		97.32	39.1		97.66	39.5	55.3	78.96	32.96		44.85		32.9			55.60	24.7	0.971	
	12	39.2		97.32	43.9		97.63	45.6	59.7	74.36		98.95			36.0			19.80		1.754	
	13	37.9		97.34	44.7		97.66	44.8	53.8	75.84	31.83	98.95	45.38	98.51	38.1		-	98.20		1.710	
	14	23.0		97.34	43.2		97.66	43.4	52.5	76.32	30.91		44.66		39.6			76.60		1.158	
	15	22.9		97.34	44.6		97.63	44.6	54.7	71.29	32.02		46.47		40.6			09.60		1.412	
,	16	19.6		97.25	40.3		97.57	42.0	49.6	78.68		98.88			38.9			71.10			1.375
	17	17.5		97.25	36.8		97.52	37.2	40.7	88.09		98.88			35.8			34.90		0.651	
	18	15.0		97.25	34.0		97.54	34.3	33.1			98.90			30.7		•	42.00	26.0	0.121	0.419
	19	26.3		97.32	31.6		97.63	32.0	28.6	96.01	20.85		27.39	98.55	27.9			0.00	24.9	0.000	0.210
	20	25.5	25.2	97.32	27.0		97.61	30.7	27.2	96.01	20.08	98.95	26.11		27.0			0.00	25.3	0.033	0.000
	21	24.7	24.4	97.34	26.8		97.63	29.8	26.0	96.04	19.11				26.3			0.00	24.7	0.022	0.01
	22	23.9	23.8		26.6		97.63	28.8	25.1	96.01	18.70				25.6			0.00	24.8	0.022	0.022
	23	23.5	23.5	97.37	26.4		97.66	28.2	24.5	96.06	18.17	98.99	23.40	98.55	25.0			0.00	24.1	0.022	0.021

8
505 500
æ,
ğ
<u>~</u>
ဗို
₫
₫
щ
ä
ana
Õ
ä
ō
å
as
틆
ď
as
ᇦ
5
ğ
2
<u>8</u>

		CANAL			-	,	,	,	7	٥	0	10	11	10	17	1.2	1 E	17	. 17	18	1.6
	HARA	. 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	10	19
1	HORA O	22.10	23.0	97.34	27 90		97.63	27 30	23 4	96 33	16 75	98 99	21.41	98 58	23.40			0.00	24.60	0.00	0.00
1		21.80		97.37			97.63						20.77						24.40	0.01	0.01
	_	21.30		97.37				26.30					20.81					0.00	24.10	0.00	0.00
		21.30		97.37			97.63						20.11						24.00	0.03	0.00
		21.10		97.37			97.66						19.76						23.70	0.00	0.00
		20.70		97.37			97.66						19.74						23.60	0.00	0.55
		20.30		97.37			97.66						19.76					15.30		0.00	0.00
		21.10		97.37			97.66						22.20				1	41.30	23.50	0.00	0.08
		22.70		99.46			97.63						25.73					44.10		0.32	0.12
		25.80		97.32				30.60					29.55				2	18.40	24.40	0.36	0.12
1		27.60		97.39				33.40					33.46				4	08.60	24.40	0.13	0.06
_		32.30			40.80			38.20					38.91				i	93.20	25.00	0.09	1.01
		35.10			44.10			43.00					42.03				8	302.20	25.30	0.08	2.17
		35.30		97.32				44.20					43.35				7	777.00	25.80	0.34	2.49
		35.20	•		43.70			44.00					45.19				4	10.70	26.30	0.85	2.69
	15	31.70		97.30			97.59	40.50	43.9	35.00	26.77	98.92	38.03	98.58	34.50		(33.90	25.90	0.76	1.84
	16	30.40	34.0	97.27	41.30		97.57	38.70	43.1	35.76	26.64	98:92	38.23	98.58	34.40		3	598.40	26.10	0.15	1.29
	17	28.00	29.9	97.25	39.20		97.54	35.50	35.3	53.75	22.96	98.90	31.47	98.58	30.10			84.60	25.80	0.13	0.74
	18	26.10	26.8	97.30	36.50		97.61	33.10	30.0	68.31	20.09	98.95	26.69	98.60	27.10				25.20	0.11	0.20
	19	24.90	25.2	97.34	35.70		97.63	31.20							25.60			0.00	24.60	0.00	0.08
1	20	24.30	24.9	97.34	34.40		97.63	30.20					23.85					0.00	24.80	0.00	0.08
	21	24.00	24.3	97.37	33.20		97.63	29.30					23.23						24.70	0.00	0.03
	22	23.70	24.4	97.34	32.30			28.70							24.10				24.50	0.00	0.04
	23	23.40	23.8	97.37	31.30		97.66	28.30	24.6	95.88	26.62	99.02	22.31	98.70	24.10			0.00	24.10	0.01	0.01

		CANAL																			
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	HORA																				
2	0	22.80	23.5	97.39	30.40		97.68	27.60	23.9	96.45	26.23	99.04	21.62	98.72	23.60			0.00	23.50	0.00	0.03
	1	22.60	23.4	97.37	29.80		97.66	27.30						98.72	23.30			0.00	23.80	0.00	0.00
	2	22.10	22.8	97.39	22.60		97.68	26.70			25.94				22.90			0.00	23.50	0.00	0.00
	3	21.20		97.37	22.40		97.66	26.30							22.80				23.60	0.00	0.00
	4	21.20	22.8	97.37	22.30		97.66	26.20	22.6	96.42	21.70	99.02	20.60	98.74	22.70			0.00	23.70	0.02	0.03
	5	20.50	22.3	97.39	22.20		97.68	25.80			20.60								23.00	0.00	0.00
	6	19.90	22.2	97.39	21.90		97.68	25.60			21.62								23.00	0.00	0.10
	7	21.40	24.0	97.39	22.60		97.68	26.40										99.00		0.04	0.07
	8	24.20	27.3	97.39	24.60		97.68	27.70			21.47							291.00		0.21	0.12
	9	27.50	32.1	97.37	28.70		97.66	32.00										186.90		0.41	0.14
2	10	30.40	34.8	97.39	33.60		97.68	36.40			27.62						,	702.30	24.40	0.10	0.19
	11	33.10	37.0	97.34	40.10		97.66	38.60			29.55							888.90		0.26	0.00
	12	28.50	36.5	97.37	42.10		97.66	42.10			31.83							397.90		0.62	2.12
	13	28.20	36.6	97.34	29.00		97.66	40.70	49.7	10.46	32.00	98.92	45.83		37.30			765.00		1.44	2.06
	14	28.00	35.7	97.34	37.90		95.36	39.80			31.94							661.20		1.64	2.34
	15	26.90		97.34			97.63				30.38							508.50		1.16	1.46
	16	25.80	32.1	97.34	26.70		97.61				28.08							330.30	25.70	0.76	1.00
	17	25.10	28.9	97.34	24.90			31.70							32.20			151.20		0.31	0.50
		24.10	26.0	97.34	24.90		97.63								28.20			18.60		0.29	0.17
	19	23.30	24.7	97.34	25.90		97.63								26.30				24.80	0.08	0.00
2		23.20		97.37			97.63								25.50				24.60	0.04	0.03
	21	22.60	24.3	97.37	26.70		97.66				22.30			99.79					24.20	0.02	0.02
	22	21.90			26.10		97.63				20.60								23.80	0.00	0.04
	23	21.10	25.6	97.41	25.70		97.70	26.60	22.5	97.09	18.85	99.06	21.47		23.80			0.00	22.60	0.00	0.03

		CANAL																			
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	HOR	A				.,															
3	0	20.30	23.8	97.41	25.20			26.30							23.40			0.00	22.30	0.00	0.02
	1	20.00	23.5	97.41	24.10			25.60							23.20				22.10	0.00	0.00
	2	18.50	23.2	97.39	23.40		97.68	25.00						98.74	22.80				22.60	0.00	0.02
	3	19.70	22.8	97.39	23.30	*	97.68	24.40			18.26				22.40				22.40	0.00	0.01
	4	18.50	22.9	97.41	23.00		97.70	24.00			16.96								21.90	0.00	0.00
	5	18.10	23.1	97.44	22.90		97.73	23.80							21.90				21.60	0.00	0.01
	6	17.60	35.9	97.41	24.40		97.70	23.70			16.34								21.80	0.00	0.00
	7	18.60	26.6	97.41	25.30		97.73	24.20	22.2	97.87	17.94	99.06	22.27	98.82			1	151.80	21.50	0.01	0.13
	8	20.90	30.2	97.39	29.30		97.70	25.70			20.96				24.80				22.20	0.26	0.21
	9	25.60	34.9	97.34	34.10		97.68	31.60	35.6	91.07	25.17	98.97	31.05	98.77	27.70				23.20	0.41	0.17
3	10	29.00	37.6	97.32	39.20		97.66	38.00	45.9	55.86	29.32			98.72			6	593.60	24.20	0.53	1.24
	11	32.20	41.6	97.23	36.60		97.57	41.20	55.7		34.36	98.88	45.39	98.98			8	317.80	24.80	0.00	0.00
	12	26.70	34.9	97.20	45.60		97.50	39.70	50.2	5.56	31.49	98.80	44.04		37.40		8	326.80	26.40	17.68	0.00
	13	27.00	36.2	97.18	43.40		97.48	39.10	51.7	10.46	32.19	98.80	45.94		38.00		8	316.60	26.70	0.89	2.31
	14	26.40	35.6	97.16	39.60		97.45	37.80	50.9	10.09	32.04	98.78	45.92		37.90		7	701.70	26.90	0.86	2.03
	15	25.50	34.2	97.16	38.00		97.45	35.90	47.9	15.41	30.77	98.76	44.83		36.50				27.20	0.77	1.52
	16	24.60	31.9	97.18	34.00		97.48	33.10	43.9	30.22	28.38	98.78	41.60		33.30		3	349.50	27.00	0.35	1.08
	17	23.70	29.0	97.25	20.10		97.52	29.00	35.1	52.56	24.59	98.83	35.36		30.00		1	161.10	26.60	0.00	0.32
	18	23.30	26.4	97.27	21.20		97.54	27.10	28.2	74.79	20.75	98.88	27.44	98.98	26.80			10.20	26.00	0.08	0.02
	19	23.50	25.7	97.25	22.90		97.52	26.00	26.4	85.34	24.11	98.85	25.32	98.93	25.50			0.00	25.90	0.04	0.00
3	20	22.90	25.1	97.27	22.60		97.52	25.70	25.6	90.88	19.89	98.90	24.79	98.96	25.10			0.00	25.80	0.00	0.02
	21	22.90	24.2	97.25	20.90		97.52	25.50	25.1	95.53	18.81	98.90	24.00	98.96	24.70			0.00	25.80	0.00	0.00
	22	23.10	24.1	97.27	21.30		97.52	25.20	24.7		18.57	98.92	23.53	98.96	24.40				25.80	0.00	0.02
	23	22 AB	23.8	97.77	20.60		97.52	24.90	24.2	10	18.13	98.92	22.95	98.96	23.90			0.00	25.40	0.00	0.00

3

4

5

CANAL

9

8

10

11

7

6

12

13

14

15

16

17

18

19

idad de Las Palmas de Gran Canaria. Biblioteca Digit:

2 3

1

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

CANAL