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

UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA



TESIS DOCTORAL

UNIDAD EXPERIMENTAL EÓLICO-SOLAR CON ALMACENAJE DE ENERGÍA TÉRMICA EN PARAFINAS

JOSÉ MIGUEL MONZÓN VERONA

Las Palmas de Gran Canaria, Junio de 1992

BIBLIO A CENTRAL PROPERTY OF THE PROPERTY OF T

UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA

UNIDAD DE TERCER CICLO Y POSTGRADO

Reunido el día de la fecha, el Tribunal nombrado por el Excmo. Sr. Rector Magfco. de esta Universidad, el aspirante expuso esta TESIS DOCTORAL.

Terminada la lectura contestadas el Doctorando las objeciones formuladas los por jueces del Tribunal, éste calificó trabajo con la nota de APTO CUM LAUDA

Las Palmas de G. C., a 2 de julio de 1992 El Presidente: Dr. D. Sergio González González,

El Secretario: Dr. D. Agustín Macías Machín,

El Vocal: Dr. D. Santiago Aroca Lastra.

El Vocal: Dr. D. Manuel García Gandara,

El Vocal: Dr. D. Sebastián Ovidio Pérez Báez,

Shriharaing

El Doctorando: D. José Miguel Monzón Verona

NEGOCINO OLIMBOLISO A COLOR DE TERCHE

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

UNIDAD EXPERIMENTAL EÓLICO-SOLAR CON ALMACENAJE DE ENERGÍA TÉRMICA EN PARAFINAS

Ser M. Harry

JOSÉ MIGUEL MONZÓN VERONA UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE G.C. JUNIO, 1992

ROQUE CALERO PÉREZ, CATEDRÁTICO Y DIRECTOR DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE G.C.

CERTIFICO:

Que la presente Memoria titulada "UNIDAD EXPERIMENTAL EÓLICO-SOLAR CON ALMACENAJE DE ENERGÍA TÉRMICA EN PARAFINAS", presentada por el Ingeniero JOSÉ MIGUEL MONZÓN VERONA, para optar al grado de Doctor Ingeniero Industrial, por esta Universidad, ha sido realizada en los laboratorios de la Sección de Química Analítica bajo la dirección del catedrático Dr. D. JOSÉ ANTONIO LÓPEZ CANCIO y autorizo con esta fecha su presentación.

Y para que así conste expido el presente certificado en

Las Palmas de G.C., a 1 de Junio de 1992

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento al Catedrático Dr D. José Antonio López Cancio que con su dirección y ayuda ha hecho realidad la presente Memoria.

Muy especial agradecimiento al Dr. Álvaro Gómez Sabucedo, Catedrático Jubilado y Ex-Director de esta E.T.S.I.I. por la idea, sugerencias y sacrificios personales para poder llevar a buen término los trabajos realizados para la culminación de la Tesis.

A Luis Montañá Codina y Eloy Rodríguez Ramos profesores de F.P. del C.E.I. por su enorme esfuerzo de colaboración en el montaje de la Estación. A Jesús Rodríguez Morales por su ayuda en la instalación eléctrica. A Juan Iglesias Cazorla, coordinador de prácticas en empresas del C.E.I, por su interés en la creación de relaciones Universidad F.P.

A la Dra. Concepción Ling, Antonio Vera, José Corujo y Marcos González, miembros de la Sección de Química Analítica, por el aliento y ayuda prestados en todo momento.

A J. Bornay Aerogeneradores de Castalla (Alicante) por

adecuar a nuestras necesidades los aerogeneradores instalados.

Al Centro Meteorológico Regional por poner a nuestra disposición los datos meteorológicos que han sido precisos.

A la Dirección General de Política Energética de la Consejería de Industria y Energía, (G.A.C) por sus aportaciones económicas.

A la Refinería CEPSA de Tenerife y a REPSOL, S.A. por su suministro sin cargo de muestras de parafinas, así como de parámetros termodinámicos de las mismas.

A los Almacenes GRAU-BASSAS, S.L. por sus detalles con ocasión del suministro de materiales.

A los Dres. Claudio Gutiérrez de la Fe, M^a Victoria Roux, y José A. García Domínguez por la ejecución de análisis térmicos y cromatográficos de las parafinas. En el mismo sentido al profesor Francisco García Montelongo del Dpto. de Química Analítica de la Universidad de La Laguna.

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

"La cultura no se desenvuelve en lo grande; el verdadero progreso no se de sarrolla en formas gigantescas, sino de modo pequeño y transparente."

.-Robert Jungk.-

ÍNDICE

<u>PÁGINA</u>

1. INTRODUCCIÓN

1.	1	Preámbulo	• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	001
		1.1.1 Antecedentes	••••••	001
		1.1.2 Objeto de la Tesis	•••••	005
1.	2	Aplicaciones de las energías solar y e	eólica	
		por via térmica Complementariedad .		006
1.	3	Desarrollo del sistema combinado eólic	co-solar	012
1.	4	Análisis térmico general del almacén .		015
1.	5	Técnicas de medida utilizadas		017
1.	6	S Planteamiento genérico de las experier	ncias	019
2 819	e Tr	TEMAS DE CONVERSIÓN EÓLICOS Y SO	LARES.	
2. SIS	ST	TEMAS DE CONVERSIÓN EÓLICOS Y SO	LARES.	
				021
		1 Sistemas de conversión de energía sol	ar	
		1 Sistemas de conversión de energía solo 2.1.1 Sistemas solares fotovoltaicos	ar	021
		1 Sistemas de conversión de energía sol	ar	021
2.	. 1	1 Sistemas de conversión de energía solo 2.1.1 Sistemas solares fotovoltaicos	ar	021
2.	. 1	1 Sistemas de conversión de energía solo 2.1.1 Sistemas solares fotovoltaicos 2.1.2 Sistemas solares térmicos	ar	021 023 027
2.	. 1	1 Sistemas de conversión de energía solo 2.1.1 Sistemas solares fotovoltaicos 2.1.2 Sistemas solares térmicos 2 Sistemas de conversión de energía eól	ar	021 023 027 028
2. 2.	.1	1 Sistemas de conversión de energía solo 2.1.1 Sistemas solares fotovoltaicos 2.1.2 Sistemas solares térmicos 2 Sistemas de conversión de energía eól 2.2.1 Clasificación	ar	021 023 027 028

<u>PÁGINA</u>

3. ALMACENAJE POR CALOR LATENTE DE ENERGÍA EÓLICO-SOLAR

3.1	Introd	ducción 051
3.2	Materi	lales de almacenaje
	3.2.1	Tipos de materialesPropiedades
	3.2.2	Criterios de selección
3.3	Interd	cambiadores de calor 061
3.4	Parafi	inas ensayadas; 063
	3.4.1	Disponibilidad y propiedades 063
	3.4.2	Análisis térmico 072
	3.4.3	Análisis Químico 078

4. DESCRIPCIÓN DE LA ESTACIÓN EÓLICO-SOLAR

INSTALADA

4.1	Introducción 080)
4.2	Captadores solares	3
4.3	Captadores eólicos 085	5
4.4	Almacén de energía térmica	5
4.5	Elementos de control y adquisición de datos 09	4
4.6	Energía auxiliar 10	1
4.7	Demanda de energía 102	2

5. ECUACIONES DE FUNCIONAMIENTO DE UNA INSTALACIÓN EÓLICO-SOLAR.

5.1	Introducción	106
5.2	Captadores eólicos	106
5.3	Captadores solares	108
5.4	Almacén de energía	111
	5.4.1 Balance energético para un elemento	
	de parafina y fluido	113
	5.4.2 Solución numérica de las ecuaciones	
	del almacén de energía	122
		_
6. EST	UDIO DE LA UTILIZACIÓN SIMULTÁNEA DE LAS ENERGÍAS	•
EÓL	ICA Y SOLAR EN LA ZONA	
6.1	Descripción general de la zona	131
6.1 6.2		
	Consideraciones generales	133
6.2	Consideraciones generales Estudio estadístico de los datos	133 138
6.2 6.3	Consideraciones generales Estudio estadístico de los datos	133 138
6.2 6.3	Consideraciones generales Estudio estadístico de los datos	133 138
6.2 6.3	Consideraciones generales Estudio estadístico de los datos	133 138
6.2 6.3 6.4	Consideraciones generales Estudio estadístico de los datos	133 138
6.2 6.3 6.4	Consideraciones generales Estudio estadístico de los datos Conclusiones	133 138
6.2 6.3 6.4	Consideraciones generales Estudio estadístico de los datos Conclusiones LISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES	133 138 142
6.2 6.3 6.4 7. ANA	Consideraciones generales Estudio estadístico de los datos Conclusiones ÄLISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES	133 138 142
6.2 6.3 6.4 7. ANA 7.1 7.2	Consideraciones generales Estudio estadístico de los datos Conclusiones LISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES Introducción	133 138 142

7.4 Carga de energía con red en el DP1 (EXP:D-I)............. 192

<u>PÁGINA</u>

	7.5	Descarga de	la energía térmica	almacenada	1		
		en el DP1 (EXP:G-I)			• • •	195
	7.6	Energía pro	cedente de los aero	generadores	5		
		(EXP: H-I)			• • • • • • • • • • • • •	• • •	198
	7.7	Ajuste de l	os parámetros del a	lmacén de			
		energía en	un modelo de coefi	cientes con	nstantes	• • •	215
	7.8	Análisis ad	imensional del alma	cén de ene	ergía	• • •	223
	7.9	Comparació	del almacén de par	afina frent	te		
		a otro equi	valente en volumen	de agua			237
	7.10	Aumento de	la conductividad té	rmica			
		media en e.	material de almace	naje		• • • •	241
		7.10.1 In	luencia de la condu	ctividad te	érmica		
		en	el coeficiente de	transferend	cia		
		de	energía	• • • • • • • • •	• • • • • • • • • • • •	• • • •	242
		7.10.2 In:	luencia en la estra	tificación	de		
		la	temperatura en la p	arafina	• • • • • • • • • • •	• • • •	246
0	DECL	DATENT V. CO	NCLUSIONES				
ð.				•			
			generales				
			s particulares				
	8.4	Expectativa	5	• • • • • • • •	• • • • • • • • • • •	• • • •	256

9. BIBLIOGRAFÍA

<u>PÁGINA</u>

10. APÉNDICES

A)	PROGRAMAS	•••••	• • • • •	· · · · · ·	• • • • •	• • • • •	• • • • •	• • • •		• • • • •	. 268
B)	GRÁFICOS	EXP: A-	ı	• • • • • •		• • • • •	• • • • •	• • • •	· • • • •	• • • • •	. 283
C)	GRÁFICOS	EXP: C-	ı	• • • • •	• • • • •	• • • • •	• • • • •	• • • •		• • • • •	. 292
D)	GRÁFICOS	EXP: F-	ı	• • • • •	• • • • •	• • • • •				• • • • • •	. 313
E)	GRÁFICOS	EXP: D-	ı	• • • • •	• • • • •		• • • • •			• • • • •	. 319
F)	GRÁFICOS	EXP: G-	ı	• • • • •		• • • • •	• • • • •		• • • • •	• • • • •	328
G)	GRÁFICOS	" ANÁLI	SIS T	ÉRMICO	=DSC	'=" · ·	• • • • •		• • • • •	••••	332
H)	GRÁFICOS	"ANÁLI	SIS Q	UÍMICO	=CRO	MATOG	RAFÍA	DE	GASES	:= "	340

1. INTRODUCCIÓN

1.1 PREÁMBULO

1.1.1 ANTECEDENTES

Hace casi 20 años que se produjo la primera crisis del petróleo. La última tuvo lugar en el año 91 como consecuencia de la "guerra del Golfo". En aquel período de tiempo hubo un desarrollo tecnológico de las energías alternativas (solar, eólica, geotérmica, etc.) que nos ha conducido a la situación actual. La gran disparidad de aplicaciones y diferentes tecnologías que surgieron ha hecho difícil homogeneizar criterios de aplicación. Sin embargo, es indudable que se ha producido un gran desarrollo tecnológico.

La tecnología desarrollada para las fuentes energéticas renovables como la radiación solar, el viento etc., amplía las bases del suministro energético y permiten conservar mejor los limitados recursos de las energías convencionales reduciendo, además, la contaminación del aire, del suelo y del agua. Cómo evolucionará su empleo en el futuro dependerá de la competitividad de las técnicas modernas y de la forma en que puedan éstas hacer atractivos los precios en comparación con las fuentes clásicas.

Dada la tendencia actual marcada por el desarrollo creciente de la Ecología, la necesidad legal de disminuir los niveles de los contaminantes introducirá en breve un factor negativo para las energías convencionales actuales.

Existen dos características específicas que son comunes a las

energías eólica y solar:

- a) Dispersión
- b) Intermitencia

La primera de las características precisa en el caso de la energía solar utilizar gran superficie de captación.

En los aerogeneradores se tienen que utilizar diámetros mayores para obtener mayores potencias.

Ello es debido a que tanto para un tipo de energía como para la otra las potencias (W/m²) son en general reducidas. Lo anterior implica utilizar superficies de captación grandes, para de esa forma, obtener potencias que sean útiles para un proceso que exija potencias considerables.

En el caso de colectores solares conlleva utilizar grandes superficies de terreno para obtener la potencia requerida.

Para los aerogeneradores ocurre otro tanto, ya que aunque la superficie de captación es perpendicular al terreno, para evitar sombras (flujo de aire) de unos sobre otros, hay que situarlos a una distancias mínimas que eliminen este efecto.

Queda claro que, cuando se considera por separado instalaciones eólicos y solares se necesita una gran superficie de terreno para obtener una potencia de relativa importancia.

Si utilizamos un sistema combinado eólico-solar, siempre se podría utilizar la superficie de terreno entre aerogeneradores para situar un campo de colectores. Aumentaríamos de esa forma la potencia instalada por metro cuadrado de terreno.

La segunda característica - la intermitencia o falta de continuidad en estas energías - es más difícil de optimizar y limita su utilización. Plantea esta segunda característica el problema de almacenaje energético de esas fuentes alternativas.

En la actualidad el sistema más común de almacenaje de energía térmica procedente de captadores solares y eólicos es el agua. Si bien ésta tiene ventajas (abundante, bajo costo, inocuidad, propiedades de transporte excelentes, etc.), la temperatura de salida del almacén disminuye con el tiempo, como consecuencia de la entrega de su energía interna almacenada, en el proceso de descarga en estado líquido. Así mismo es un medio corrosivo, lo que encarece el recipiente contenedor.

Varios investigadores han estudiado otros materiales como posible alternativa para dar solución a los problemas indicados en el parrafo anterior.

Los materiales más utilizados son las <u>sales hidratadas</u> (29), (83), (80), (5), (23) y las <u>parafinas</u> (25), (44), (95), (17), (16), (9), (57), (62).

Tanto las sales como las parafinas tienen ventajas indudables la principal es la alta capacidad de almacenaje de energía por unidad de volumen.

Los mayores inconvenientes de las sales son :

- 1º) Pérdida de la capacidad de almacenaje de energía tras varios ciclos de carga y descarga.
- 2°) Son corrosivas.

El mayor incoveniente de las parafinas es su baja conductividad térmica. Este problema puede ser solucionado introduciendo filamentos metálicos en la masa de parafina, o bien dividiendo el material, introduciéndolo en recipientes en que se trate de reducir al mínimo el espesor de la parafina.

Existen numerosas referencias (25), (80), (95), (32), (40), (20), (22), (28), (35), (45), (46), (47), (48), (50), (51), (53), (76) de unidades experimentales de almacenaje térmico con agua, parafinas y sales (Glauber) en relación con energía solar.

Menos frecuente son los estudios sobre almacenaje de energía térmica de origen eólico (13), (93), (48) (68), (7), (15).

Existen sistemas eólico-solares para usos térmicos. Ha sido muy generalizado el uso del agua como almacén de energía térmica (30), (34), (68), (86).

No se conocen intentos de llevar a la práctica las posibilidades conjuntas de un sistema eólico-solar con almacenaje en parafina. Esta es la

razón fundamental para el estudio que se ha seguido, habiendo sido precisa la construcción exprofeso de almacenes térmicos de diseño especial.

La mayor parte de las investigaciones sobre instalaciones eólicosolares hechas hasta la fecha ha consistido en realizar simulaciones sobre el funcionamiento de esas instalaciones (33), (30), (7), (86). Sin embargo, muy pocas instalaciones eólico-solares han sido construidas para validar los resultados obtenidos en las simulaciones (34), (73).

1.1.2 OBJETO DE LA TESIS

En la Tesis se estudia la posibilidad de utilizar un sistema combinado eólico-solar en unión de un sistema de almacenaje por calor latente para lo cual se ha diseñado y construido una instalación que nos permita sacar conclusiones sobre la viabilidad económica del diseño.

La Tesis propone que junto con el sistema eólico- solar (SES) se utilice un sistema que optimice al máximo el volumen que se necesite para almacenar esas energías. Un método que consigue almacenar grandes cantidades de energia por unidad de volumen es el almacenaje por calor latente (o calor de transformación). Se utilizó la parafina como material de almacenaje.

<u>Introducción</u>

1.2 APLICACIONES DE LA ENERGÍA SOLAR Y EÓLICA POR VÍA TÉRMICA.- COMPLEMENTARIEDAD.

Los principales sectores en los que se aplican los aprovechamientos de la energía solar y eólica por via térmica, (12) son:

- a) Usos domésticos
- b) Agricultura
- c) Industria

Usos domésticos.-

En la actualidad es este sector el que más utiliza la energía eólico/solar; fundamentalmente para calefacción de inmuebles colectivos o para la producción de agua caliente.

El gran número de Proyectos que existe ya dentro de la C.E. hace pensar que el sector de la vivienda será en el futuro el más importante desde el punto de vista de la sustitución parcial de las energías primarias por energía solar para calefacción y calentamiento de agua sanitaria. Hay que tener en cuenta que el consumo de energía de este sector representa una parte significativa de las necesidades totales de la energía de la comunidad.

Así para el caso de España en la Tabla 1.1 se representa la distribución del consumo de energía para un periodo de 6 años.

Agricultura.-

Las principales aplicaciones de las energías eólico-solar en este sector son calefacción de invernaderos y secaderos, y utilizaciones diversas, como la preparación de alimentos para animales.

TABLA 1.1

Estructura del consumo final directo de energía en España por sectores (%)

SECTOR \\ AÑO	1978	1982	1983	1984
INDUSTRIA	50,9	47,2	46,6	45,2
TRANSPORTE	27,6	30,4	30,3	31,2
USOS DOMÉSTICOS	11,4	11,1	11,4	11,9
AGRICULTURA	5,6	4,6	4,6	4,6
SERVICIOS Y OTROS	4,5	6,7	7,1	7,1

(Fuente: Energía., Mayo 1987)

Industria .-

Las Aplicaciones de las energías (eólica y solar) en este sector se encuentran menos avanzada que para usos domésticos. Las abundantes ofertas energéticas actuales a precios bajos, hace que estas fuentes renovables no puedan competir con los más económicos sistemas convencionales en uso. También la necesidad de terrenos adyacentes a la industria para situar estos sistemas las hace poco atractivas. Pero hay una serie de ventajas en cuanto a la aplicación de la energía eólico/solar en procesos industriales en comparación con su utilización para agua caliente sanitaria o calefacción:

- a) Los consumos industriales son más constantes a lo largo del año.
- b) Las industrias, en general, disponen de personal cualificado que se puede hacer cargo del mantenimiento del SES, lo que asegura un funcionamiento correcto del mismo.
- c) Los ahorros conseguidos en las aplicaciones industriales son elevados, debido a la mayor participación del sector industrial en el consumo final.
- d) Independencia de los recursos finitos. Esto significa no depender de las importaciones, ni de las condiciones políticas o económicas mundiales.
- e) La utilización de estas energías en la industria en comparación con los combustibles convencionales, significa su escasa o nula incidencia en el medio ambiente.

- f) Disponibilidad modular de estas fuentes.
- g) Complemento para las energías residuales de la industria.

Es muy interesante conocer la distribución de energía del sector industrial, en función del tipo de proceso utilizado y del nivel térmico. La Tabla 1.2 muestra estos datos para España en 1980.

TABLA 1.2

Nivel de temperatura

PROCESO	T<= 80 °C	80 < T < 120 °C	T>= 120 °C		
TÉRMICO	6 %	12 %	42 %		
NO TÉRMICO	40 %				

(Fuente: Energía.- Mayo 1987)

Si tomamos sólo aquellos procesos térmicos con nivel <= 80 °C; se tiene una contribución posible de las energías solar y eólica al total del consumo en España de alrededor del 3 %. Lo que supondría un ahorro considerable de energías primarias dedicadas a procesos térmicos de esos niveles de temperatura.

Complementariedad.-

Tradicionalmente, las fuentes de energía renovables eólica y solar han sido tratadas independientemente; para dar un tipo concreto de energía bien en su forma térmica o eléctrica.

Centrándonos exclusivamente en la forma térmica (objeto de la Tesis), se verán cuales son las ventajas de utilizar un SES en lo que se refiere a la captación de esas energías.

La utilización conjunta (donde fuera posible) de las energías solar y eólica tendría las siguientes ventajas:

- 1°) Complementariedad estacional
- 2º) Complementariedad diaria
- 3°) Complementariedad de espacio

La primera de ellas la estacional se produce debido a la variación relativa de la Tierra respecto al Sol. En los meses de Verano la intensidad de radiación media es mayor que en los meses de invierno, mientras que en los meses de invierno en promedio (depende del tipo de zona) la velocidad del viento es mayor (33).

En lo que se refiere a la complementariedad diaria se produce porque la variación de la intensidad del viento media del día a la noche es pequeña (pequeña disminución), mientras que la energía solar por la noche no está disponible.

Debido a la poca potencia por metro cuadrado de las energías solar y eólica, se necesitan grandes superficies de captación para ambas energías, pero debido a la disposición de las superficies de los aerogeneradores y los paneles solares el espacio sobre el terreno no se suma. Esto hace que el terreno donde se situe un SES sea menor o esté mejor aprovechado que utilizando los sistemas eólico y solar por separado.

En relación a la complementariedad que proporciona un SES se puede decir que es muy favorable para su uso en el sector industrial debido:

- 1º) Mayor uniformidad de la potencia de salida a lo largo del año.
- 2º) Disminución de las necesidades de almacenaje como consecuencia de estar en fase la potencia generada y la consumida.
- 3º) Posibilidad de proporcionar las dos formas de energías más comunes en la industria:
 - a) Energía térmica
 - b) Energía eléctrica

1.3 DESARROLLO DEL SISTEMA COMBINADO EÓLICO-SOLAR

La Tesis se ha desarrollado siguiendo el esquema de la Figura 1.3.1 .

En primer lugar se hace un estudio de las magnitudes que afectan a la estación eólico-solar, éstas son:

- 1^a) Intensidad de radiación (W/m²)
- 2^a) Velocidad del viento (m/s)

Estos datos se han obtenido del Instituto Nacional de Meteorología, así como diversos Trabajos de Investigación, en la zona de estudio (92).

Se continua haciendo un estudio preliminar de ambas energías, encaminado a mostrar la posible complementariedad de las mismas.

Para dar un grado de veracidad a las conclusiones obtenidas en el estudio preliminar, se realiza un estudio estadístico que valide tales conclusiones.

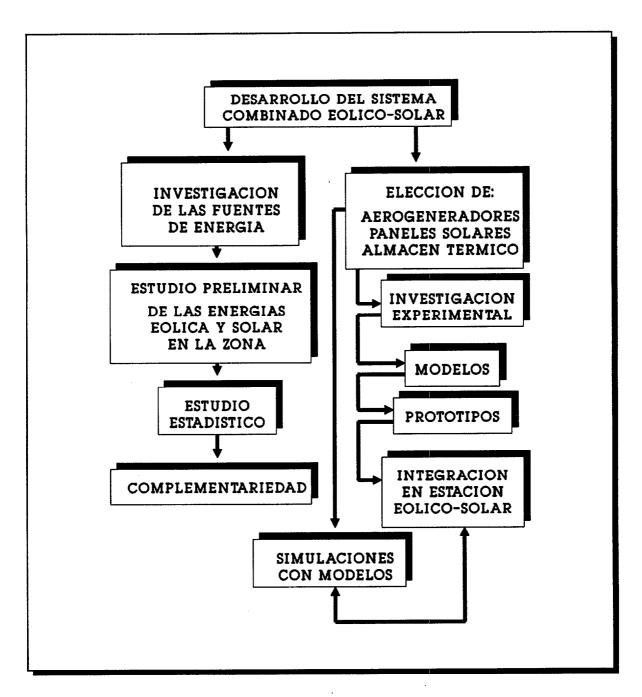


Figura 1.3.1

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

En segundo lugar se hace un estudio de los principales elementos que componen la instalación:

a) Captador eólico.

<u>Introducción</u>

- b) Captador solar.
- c) Almacén térmico.

Analizando cuales son los elementos idóneos para la instalación. Se hace especial incapié en el almacén de energía, pieza clave de toda la instalación.

El camino que hay que seguir a continuación es doble y paralelo, de un lado está la parte <u>experimental</u> que incluye el trabajo con modelos de laboratorios (28), (27), (26) le sigue la construcción de prototipos (almacén de parafina) y la integración de estos en la Estación Eólico-solar.

El dimensionamiento dado a la instalación ha sido el suficiente para extrapolar los resultados obtenidos a otras zonas.

Un último paso consiste en encontrar un modelo del conjunto de la Instalación Eólico-Solar como queda señalizado en el gráfico de la Figura 1.3.1. Este modelo se irá mejorando con la realización de pruebas que consistirán en la comparación de los resultados experimentales de la instalación en condiciones de trabajo normal, con las predicciones del Modelo.

Este último paso se hace dividiendo el conjunto total (Estación Eólico-Solar) en varios subconjuntos (Captadores Solares, Captadores Eolicos,

Almacen Térmico) y haciendo las comparaciones individualmente.

Se termina haciendo un análisis de las conclusiones que se obtengan en las distintas etapas, así como los futuros trabajos a realizar.

1.4 ANÁLISIS TÉRMICO GENERAL DEL ALMACÉN

Un elemento de especial importancia en la instalación eólicosolar es el almacén de energía térmica. El análisis conlleva la elección del material de almacenaje, así como el tipo de intercambiador que se va a utilizar.

Una vez planteado el modelo el siguiente paso consiste en decidir el tipo de método numérico a plantear. El método que más se utiliza en la actualidad para resolver el tipo de ecuación diferencial que aparece al plantear el modelo del almacén es el " Método de Diferencias Finitas", Marshall 1984, (60), (65), (54).

En la Figura 1.4.1 se resume los bloques principales del método.

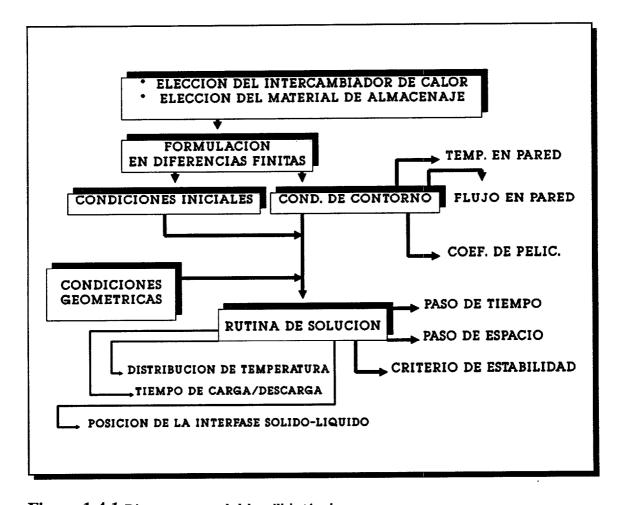


Figura 1.4.1 Diagrama general del análisis térmico

1.5 TÉCNICAS DE MEDIDA UTILIZADAS

En este apartado se hará un resumen de las principales técnicas de medida utilizadas para la realización de la Tesis.

Dos tipos de análisis se han realizado:

- a) Análisis térmico
- b) Análisis químico

Con la realización del analisis térmico se han obtenido las principales magnitudes de tipo térmico, necesarias para tener un conocimiento del material, con el que se han realizado las experiencias. Así mismo nos permite conocer el funcionamiento del mismo bajo condiciones reales de trabajo ver la Tabla 1.5.1.

El análisis químico nos permite saber la composición de la parafina ensayada. De esa forma indirectamente conocer otras propiedades térmicas no calculadas, o bien, contrastar las ya calculadas por medio de los análisis térmico.

TABLA 1.5.1

TÉCNICA DE MEDIDA	TIPO DE APARATO	MASA DEL	MEDIDAS HECHAS	LABORATORIO	DATOS
Análisis térmico de presición	Calorímetro diferencial de barrido. Tipo: DSC-2C PERKIN ELMER	De 2 a 5 mgr	Variación temporal de la energía intercambiada con la muestra a una velocidad de calentamiento constante. (Termograma)	Laboratorio de Termoquímica del C.S.I.C. Madrid	1°) Forma del pico exotérmico o endotérmico sobre el termograma. 2°) Rango del punto de fusión. 3°) Rango del punto de solidificación. 4°) Grado de subenfriamiento. 5°) Calor de fusión y solidificación. 6°) Calor específico en función de la temperatura
Análisis térmico	"Electrothermal"- Melting Point Apparatus	De 10-20 gr	Medición del punto de fusión total	Laboratorio de Química Orgánica de la E.U.P. Las Palmas	1°) Forma de la variación de la temperatura con el tiempo (cambio de inflexión de la curva
general	Modelos de laboratorio: 1°) Intercambiador almacén estático 2°) Intercambiador almacén rotativo	De 1 a 3 kg	Medidas de carga y descarga bajo diferentes condiciones de contorno	Laboratorio de Química Analítica de la E.T.S.I.I Las Palmas	fusión, solidificación). 2º) Rango del punto de fusión. 3º) Rango del punto de solidificación.
	Prototipos: 1°) Intercambiador- almacén modular con aletas. (DP2) (Estación Eólico-Solar) 2°) Intercambiador- almacén modular sin aletas. (DP1) (Estación Eólico-Solar)	20 a 50 kg	Medida de carga y descarga bajo condiciones reales de trabajo.	Laboratorio de Química Analítica de la E.T.S.I.I. Las Palmas	4°) Grado de subenfriamiento. 5°) Coeficiente de transferencia de energía.
Análisis Químico	columna PS-255 (dimetil silicona) de unos 15 m	0,5 a 1 gr	Cromatografía de gases	Laboratorio de Química Analítica de la Universidad de la Laguna, y C.S.I.C	Composición del material

1.6 PLANTEAMIENTO GENÉRICO DE LAS EXPERIENCIAS

La instalación eólico-solar consta de tres bloques claramente diferenciados:

- 1°) Captadores solares
- 2º) Captadores eólicos
- 3º) Almacén de energía

Las experiencias realizadas se han orientado a estudiar el funcionamiento de estos elementos. El almacén de energía es la pieza más importante en la instalación, pero también la más complicada de estudiar, debido fundamentalmente al tipo de modelo que se precisa para estudiarlo (ecuaciones diferenciales en derivadas parciales). En cambio tanto los aerogeneradores como los paneles solares se pueden estudiar con unas ecuaciones de funcionamiento de tipo algebraico.

Hay una característica especial que es común a todas las experiencias y es que todas se han realizado en condiciones de trabajo reales. Esta circunstancia nos permitió trabajar con unos valores de las variables de entrada (intensidad de radiación, velocidad de viento y temperatura ambiente) que son las que normalmente una instalación de este tipo tiene.

Para tener un conocimiento muy preciso de ciertos parametros

(Térmicos y Químicos) del material de almacenaje se han realizado unos análisis con una instrumentación de muy alta presición (análisis térmico DSC y análisis químico de "cromatografía de gases").

El conjunto de las experiencias va encaminado a obtener un modelo matemático para cada uno de de los elementos indicados anteriormente. Eso nos permite extrapolar los resultados a una instalación de características similares trabajando con otras condiciones de entrada, o incluso hacer una mejora de diseño en nuestra propia instalación.

2. SISTEMAS DE CONVERSIÓN EÓLICOS Y SOLARES

2.1 SISTEMAS DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA SOLAR

Se pueden clasificar en dos grupos dependiendo del efecto de conversión que se utilice (79). Así tenemos:

- 1°) Sistemas solares fotovoltaicos
- 2°) Sistemas solares térmicos

2.1.1 SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS

El efecto fotovoltaico fue descubierto por Becquerel en 1839, al comprobar la tensión originada en una disolución electrolítica fuertemente iluminada.

Posteriormente Adame y Day observaron este efecto en el Selenio, pero hay que llegar a 1954, tras sus primeras investigaciones sobre el silicio, para encontrar las aplicaciones prácticas de este sistema.

La superficie o módulo solar está compuesta de células fotovoltaicas unidas entre sí y encapsuladas para protegerlas del ambiente exterior.

La célula fotovoltaica es una lámina generalmente de silicio cristalino, algo mayor que la palma de la mano, muy delgada (su espesor es menor de 0,5 mm), compuesta de un material de dos capas de distinta

naturaleza, formando un diodo, que genera una tensión interna al ser iluminada.

Elegidos los materiales adecuados, cuando la célula se expone al Sol la energía propia de los rayos solares hace que se desprendan cargas eléctricas (la energía de los fotones es del mismo orden de magnitud que la necesaria para desprender electrones de su última capa).

La existencia del campo eléctrico interno hace que las cargas así obtenidas se orienten y dirijan hacia las superficies de la célula. Sobre las superficies frontal y posterior, se colocan, formando cuerpo con la misma célula, unas mallas metálicas, conectadas entre sí para formar la serie que compone el módulo.

Aunque el silicio sea un elemento abundante en nuestro planeta, convertirle en materia utilizable para la fabricación de células fotovoltaicas es un proceso especializado que supone el 60 % del coste de la célula.

La complejidad del proceso de fabricación se refleja en la alta inversión de tecnología y medios que requiere la fabricación de elementos fotovoltaicos, asequible actualmente sólo a grandes corporaciones industriales.

En la actualidad el coste de esta energía es de 7 a 8 veces el de la producida por métodos convencionales tales como el carbón o fuelóleo. Si consideramos para estas últimas energías todos los costes, incluidos el coste ecológico y de calidad de vida, la diferencia sería mucho menor.

Los Proyectos que se desarrollan en la actualidad van encaminados a aumentar el rendimiento de la célula. Ello se consigue haciendo que la malla métalica sobre la cara frontal de la célula ocupe el menor espacio posible, con lo que se tiene una mayor superficie de la célula expuesta al Sol y, por lo tanto mayor generación de cargas eléctricas.

2.1.2 SISTEMAS SOLARES TÉRMICOS

Se puede hacer una primera clasificación de los aprovechamientos térmicos de la radiación solar en dos grandes grupos:

- 1º) Radiacion solar térmica de efecto directo.
- 2º) Radiación solar térmica con intercambio.

1º) Radiación solar térmica de efecto directo

El primer grupo abarca un conjunto de sistemas y equipos de aprovechamiento de la radiación solar, basados en su utilización instantánea.

Se puede a su vez subdividir en varios subgrupos, de acuerdo con sus aplicaciones últimas, que van a ser precisamente las diferenciadoras de los matices tecnológicos de acabado de los modelos de este grupo de efecto directo.

Los tres subgrupos principales son:

- a) Absorbedores solares.
- b) Balsas solares.
- c) Efecto invernadero.

a) Absorbedores solares

Dentro del primer subgrupo tenemos materiales o aparatos más o menos simples, consistentes fundamentalmente en variaciones sobre el tema del acondicionamiento pasivo.

Como ejemplo más conocido se tiene la fachada (y cubierta) solar, muy empleada sobre todo en USA. Consiste en construir un muro Sur con recipientes que se llenan de agua, el calor cedido al agua por el Sol es transferido más tarde al interior de la vivienda, en razón de la inercia térmica de la masa de agua.

Otros ejemplos son las persianas para calentamiento de huecos de ventana en viviendas, así como unas variantes de aquellas, a situar en paramentos verticales como si fueran falsas ventanas.

b) Balsas solares

Es un embalse de muy poca profundidad construido artificialmente, impermeabilizado su fondo y, en ocasiones, con mezclas

salinas disueltas o simplemente rocas que absorben y acumulan la radiación interceptada.

c) Efecto invernadero

El efecto invernadero es el más extendido, con una inmensa gama de aplicaciones.

La tecnología energética solar en cuanto a la construcción de colectores solares planos de agua o aire se encuentra muy desarrollada y sus aplicaciones inmediatas son calentamiento de agua de piscinas y/o calefacción en edificios o viviendas.

2º) Radiación solar térmica con intercambio

Descontamos de este apartado, por ser de aprovechamiento directo, los colectores planos de aire y también algunos modelos de colectores de agua, especialmente los de plástico para calentamiento de piscinas, pasando ahora a agrupar los restantes de la siguiente forma:

a) Colectores planos

b) Colectores concentradores

a) Colectores planos.-

El panel plano más común recibe la energía solar en una superficie plana de gran absortividad. Por encima de la placa absorbedora y paralela a ella, uno o varios cristales o laminas de plástico especial impiden el paso a la radiación desde la placa al ambiente (efecto invernadero).

En contacto con la placa absorbedora se encuentra un serpentín que recoge la energía aportada y la transmite al circuito calefactor. Todo el conjunto forma una caja aislada por sus partes inferior y laterales, quedando el cristal en la superficie superior.

b) Colectores concentradores.-

Si se precisan temperaturas superiores a los 70-80 ° C puede recurrirse a concentrar la energía solar, generalmente, sobre un tubo metálico o de vidrio. Para enviar los rayos solares desde una superficie superior a las posibilidades de captación del tubo, puede emplearse un espejo parabólico (cilindro-parábola) en cuya línea focal se situa el tubo. Estos sistemas suelen ser orientables a la luz solar.

También puede recurrirse a revestir el tubo con otro concéntrico de mayor diámetro captador de energía. Con mayor diámetro se recubren los dos tubos anteriores por uno de vidrio que produce el efecto invernadero para la reradiación del tubo negro.

2.2 SISTEMAS DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA EÓLICA

Los aerogeneradores transforman la energía del aire en movimiento en energía mecánica de rotación con facilidad y simplicidad. Por tanto la conversión viento-electricidad está considerada como uno de los medios básicos de utilización de la energía eólica.

Los componentes esenciales de un sistema electroeólico son (47):

- 1°) Aeroturbina
- 2º) Interfase mecánica
- 3º) Generador eléctrico
- 4º) Sistema de control

La energía extraida del aire en movimiento en forma de rotación mecánica es transmitida a un generador eléctrico a través de una interfase mecánica consistente en un engranaje que eleve la velocidad de rotación y un embrague adecuado. La electricidad que sale del generador se conecta a la carga o a la red eléctrica según se exija por cada aplicación en particular.

El sistema de control mide velocidad del viento y dirección del mismo, velocidad y momento en el eje en uno o más puntos, así como la energía de salida y la temperatura del generador si fuera necesario. Genera además y genera las señales de control adecuadas.

En los sistemas eólicos, el rendimiento global de conversión, obtenida a partir de la energía disponible en el viento y de la energía eléctrica de salida se encuentra en un rango entre el 20 y 35 %.

2.2.1 CLASIFICACIÓN

Los sistemas de conversión eólicos pueden ser clasificados de acuerdo a los tres factores básicos siguientes:

1º) Tipo de salida

- a) Corriente continua
- b) (corriente alterna) Frecuencia variable, tensión constante o variable.
- c) (corriente alterna) Frecuencia constante, voltaje constante o variable.

2º) Velocidad de rotación de la aeroturbina

- a) Velocidad constante con aspas de inclinación variable
- b) Velocidad cuasi constante con mecanismos simples de cambio de inclinación.
 - c) Velocidad variable con palas de inclinación constante

3º) Utilización de la energía eléctrica de salida

- a) Almacenaje en baterías
- b) Otras formas de almacenaje
- c) Interconexión a redes convencionales (Sistemas eléctricos de potencia)

2.2.2 ESQUEMAS DE GENERACIÓN

La selección del esquema de generación apropiado depende principalmente del tipo de carga receptora y del modo de operación de la aeroturbina. Varias combinaciones de velocidad y de tipo de salida han sido planteadas en los sistemas de conversión eólica. Algunos de los esquemas más significativos son discutidos a continuación:

1º) Generador de imán permanente

Uno de los esquemas de generación más simples de conversión se obtiene usando un alternador de imán permanente.

El estátor del alternador tiene un devanado polifásico (de dos o tres fases) y el rótor está compuesto de imanes permanentes, giratorios y que, al girar, cambian la polaridad magnética alternativamente en cada punto del rótor. Los imanes están embebidos mecánicamente alrededor de la periferia del rotor.

A circuito abierto (sin carga) la tensión de salida es también proporcional a la velocidad de rotación. Por el contrario bajo carga la reacción de la armadura (reacción de inducido) y la impedancia interna contribuyen a la pérdida de esta proporcionalidad. Si la aeroturbina opera a velocidad constante, la salida bajo carga será de frecuencia constante pero de tensión variable. Si opera a velocidad variable la salida será de frecuencia y voltaje variable.

Cualquiera de estas salidas puede ser convertida a tensión y frecuencia constantes por medio de un rectificador-inversor de estado sólido con los controles apropiados.

2°) Generadores síncronos.-

La tecnología de las máquinas sínronas para generar corriente alterna de frecuencia constante a partir de una fuente primaria de movimiento es materia bien conocida.

El generador debe moverse a velocidad constante llamada velocidad síncrona, que está relacionada con el número de polos de la máquina.

Para máquinas síncronas operando en paralelo sobre la red, los requerimientos de velocidad constante son tan estrictos que tan solo pequeñas fluctuaciones (alrededor del 1 al 2 %) de corta duración (fracciones de

segundo) pueden ser toleradas.

Satisfacer estas exigencias en el caso de máquinas síncronas movidas por el viento es complicado por lo siguiente:

- 1°) Las constantes fluctuaciones de la velocidad del viento.
- 2º) La sensibilidad de la corriente de salida a estas variaciones de velocidad.
- 3º) La capacidad de la máquina para extraer energía de la red y operar como un motor.

Sincronizar un generador accionado con el viento a las líneas eléctricas es un problema difícil especialmente con viento racheado.

3º) Generadores de inducción.-

Con el estator conectado a la red si el rótor de un motor de inducción es conducido a velocidades superiores a la síncrona la máquina se convierte en generador y cede energía a la red y a la frecuencia de ésta. El deslizamiento por unidad de una máquina de inducción se define como: (velocidad síncrona-velocidad del rotor)/velocidad síncrona.

Como motor, la velocidad de la máquina a plena carga es ligeramente inferior a la velocidad síncrona y el deslizamiento por unidad se encuentra entre 0.0+0.05. Como generador el deslizamiento por unidad pasa

a ser negativo con valores comprendidos entre 0,0 y -0,05. Las condiciones de funcionamiento como generador son obtenidas a velocidades (menos del 5 %) lígeramente superiores a la síncrona. Por lo tanto un sistema eólico que emplee generadores de inducción convencionales debe operar a una velocidad "esencialmente" constante.

Los generadores de inducción son básicamente más simples que los generadores síncronos. Son más fáciles de operar, controlar, y mantener. No tienen problemas de sincronización y son económicos.

En cualquier caso, ellos extraen su excitación de la red y consecuentemente imponen una carga reactiva. Aunque esto puede ser corregido añadiendo condensadores estáticos, tal procedimiento añade coste y complejidad al esquema de generación. Por otra parte, los rendimientos de los generadores de inducción son lígeramente más bajos que los de los generadores síncronos.

Si se produce una racha repentina de viento aumenta la velocidad del aerogenerador y si esta persite, debido a la curva característica de esta máquina, se produce un aumento incontrolado de la velocidad. Por lo tanto, la protección por sobrevelocidad es vital para la seguridad de los sistemas con generadores de inducción movidos por el viento.

Si la aeroturbina no es de autoarranque, puede usarse una máquina de inducción operando como motor para el arranque y como generador después de alcanzar la velocidad apropiada.

1 Interest and 1 and 1 and 2 and 2 and 2 and 3 and 3

Para obtener una frecuencia de salida constante a partir de una aeroturbina que opera a velocidad variable, es necesario un esquema de generación velocidad-variable/frecuencia constante (VSCF) 1*.

Varios de estos esquemas han sido desarrollados utilizando máquinas rotativas con elementos de conmutación mecánicos y/o electrónicos (tiristores y diodos)

2.3 SISTEMAS UTILIZADOS PARA ALMACENAR ENERGÍA EÓLICA Y/O SOLAR

La forma en que la energía se utiliza determina el tipo de almacenaje que es conveniente emplear.

Así se pueden hacer los siguientes grupos (74):

1º) Almacenaje de energía mecánica.-

- a) Energia potencial
- a.1 Embalses.

^{1*} Variable Speed Constant Frecuency

- a.2 Neumático (sin asistencia de combustible)
- a.3 Aire comprimido. (con asistencia de combustible.
- b) Como energía cinética en volantes.
- 2º) Almacenaje de energía química.
 - a) Hidrógeno.
 - b) Fertilizantes y combustibles sintéticos
 - c) Baterías electroquímicas.
- 3º) Almacenaje de energía magnética o eléctrica.
 - a) En campos eléctricos de alta intensidad.
 - b) En campos magnéticos de alta intensidad (magnetos superconductoras).
- 4º) Almacenaje de energía térmica.
 - a) Como calor sensible
 - a.1 En sólidos
 - a.3 En agua y líquidos

- a.4 En medios mixtos sólidos-líquidos
- b) Como calor latente.
 - b.1 Calor de fusión de sólidos
 - b.2 Calor de vaporización de líquidos
 - b.3 Calor de cambio de estructura sólido-sólido en estructuras cristalinas.
- c) Almacenaje combinado por calor latente y sensible.
- d) Almacenaje termoquímico en reacciones químicas reversibles.
- 1º) Almacenaje de energia mecanica
 - a) Energía potencial
 - a.1 En embalses.-

Este tipo de almacén se utiliza sobre todo en los sistemas de conversión eléctricos eólicos. (WECS) ^{2*}.

^{2*}Wind Electric Conversion Systems.

En esencia en este método la energía eólica es almacenada en forma de energía potencial de agua de reserva en un embalse.

a.2 Neumático.-

Este procedimiento de almacenaje también se suele utilizar en en sistemas eólicos (WECS) se utilizan para accionar un compresor. Estos comprimen aire que será almacenado en cavidades subterráneas o en tanques en la superficie.

La energía almacenada puede ser recuperada, usando turbinas o máquinas de pistón.

El rendimiento de este método de almacenaje y recuperación de la energía es bastante bajo (Aprox. 30 %). Una posible mejora del rendimiento global puede ser conseguido usando el compresor para otras aplicaciones (aire acondicionado, etc.) ver Figura 2.3.1.

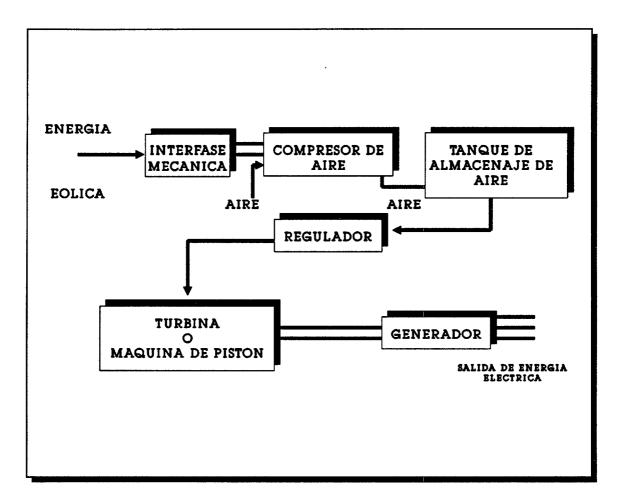


Figura 2.3.1 Almacenaje neumático de energía eólica.

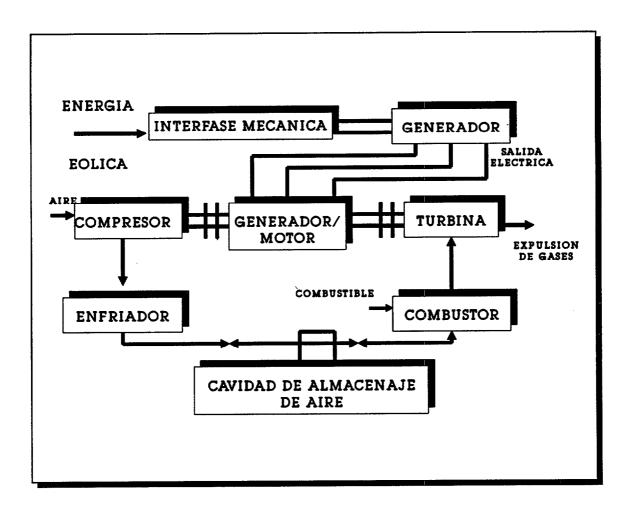


Figura 2.3.2 Almacenaje en aire comprimido de energía eólica.

a.3 Aire comprimido.-

El rendimiento de los sistemas de almacenaje de aire comprimido pueden ser significativamente mejorados por expansión del aire comprimido a través de la cámara de combustión de una turbina de gas según se ve en la Figura 2.3.2. La ventaja de esta alternativa es que la turbina no necesita accionar su compresor, mientras exista reserva de aire comprimido.

El rendimiento de este sistema sube al 45%.

b) Almacenaje en volante de inercia.-

El movimiento de rotación de una aeroturbina puede ser almacenado en forma de energía cinética. La cantidad de energía cinética almacenada es proporcional al cuadrado de la velocidad de giro. Cuando la energía almacenada es extraida, disminuye la velocidad angular del volante. Con una variación de velocidad de dos a uno, el 75% de la energía almacenada puede ser extraida.

Una interfase de potencia de frecuencia constante y velocidad variable (VSCF) se necesita para extraer la energía en forma eléctrica. Este tipo de sistema se utiliza para sistemas eólicos en la Figura 2.3.3 se ve un esquema de este tipo de almacén.

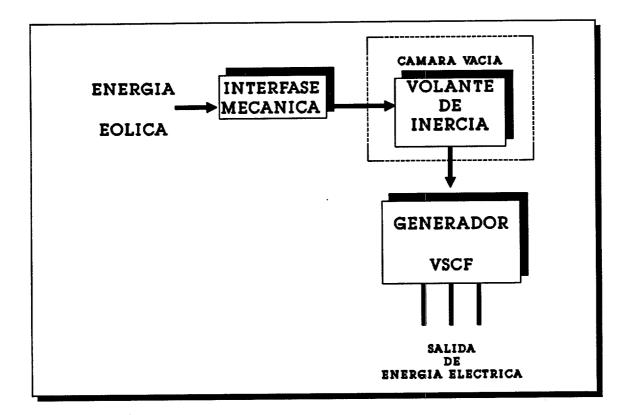


Figura 2.3.3

2º) Almacenaje de energía química

a) Hidrógeno.-

La energía eólica o solar (aerogeneradores y paneles fotovoltaicos de alto rendimiento) pueden ser usadas para descomponer agua en gases de hidrógeno y oxígeno, por la bien conocida técnica de electrólisis. El hidrógeno puede ser almacenado para aplicaciones como combustible, o

como elemento para diversos usos químicos.

La producción de hidrógeno por electrólisis puede ser hecha con un rendimiento del 90% operando con celdas a altas presiones y temperaturas moderadas (150 a 200 °C). La tensión ideal de la reacción hidrógeno-oxígeno decrece con el incremento de la temperatura y crece con el incremento de la presión. Sin embargo en la práctica un incremento en la presión de operación también tiene el efecto de disminuir la tensión de operación de la celda. En consecuencia la característica del rendimiento de las celdas de electrólisis mejora con el aumento de la presión y la temperatura.

En la Figura 2.3.4 se muestran los componentes básicos de un sistema que utilice hidrógeno como almacén.

El hidrógeno puede ser usado como combustible para generar electricidad o puede ser quemado con oxígeno en agua fría y producir vapor de alta calidad que accione una unidad turbina-generador para generar electricidad.

El hidrógeno puede ser usado como combustible por si mismo o puede ser combinado con materiales orgánicos para producir combustibles sintéticos. Debido a su versatilidad, el hidrógeno será el combustible que sustituirá a los actuales (petróleo,carbón, etc) y será obtenido en parte por fuentes no fósiles como son el viento y el sol.

Existen tres formas básicas de almacenar hidrógeno: como un

gas a alta presión en recipientes de acero cilíndricos; como hidrógeno líquido; o combinado con metales. El almacenaje en forma de gas comprimido requiere contenedores grandes y resistentes. Para evitar el riesgo de explosión.

El almacenamiento criogénico como hidrógeno líquido requiere refrigeración continua (por debajo de 250 °C). Si se pretende evitar la vaporización.

Las técnicas de hidrógeno con metales parecen ser prometedoras en términos de densidades de almacén y alta estabilidad. Sin embargo en la actualidad, los tres métodos son muy costosos.

b) Fertilizantes y combustibles sintéticos

Los problemas asociados con el almacenaje del hidrógeno puede ser solucionado por síntesis de cadena de hidrocarburos, alcoholes, etc. Una forma fácil y barata de almacenaje que es económicamente competitiva comparada con las plantas tradicionales de fertilizantes que utilizan gas natural, es la obtención de fertilizantes nitrogenados obtenidos por la electrólisis del agua usando electricidad generada por energía eólica o solar (aerogeneradores y paneles fotovoltaicos).

Tales plantas tendrían la ventaja adicional de producirse en las zonas agrícolas, reduciendo la energía correspondiente de distribución.

c) Almacenaje electroquímico.-

Las baterías almacenan energía en forma electroquímica por medio de reacciones químicas generalmente reversibles.

Este sistema de almacenaje se utiliza sobre todo en sistemas eólicos y solares de pequeña y mediana potencia ver la Figura 2.3.5.

El almacenaje en baterías es de alto rendimiento, silencioso y libre de polución si se opera adecuadamente.

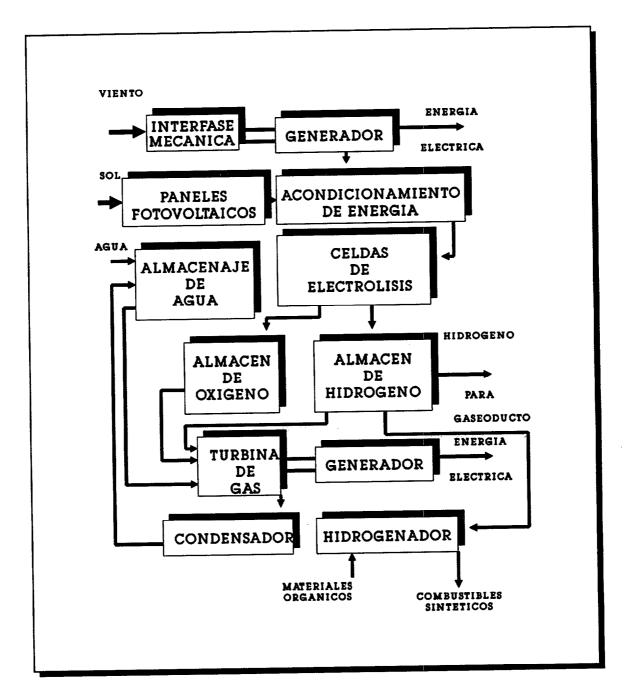


Figura 2.3.4 Almacenaje de energía eólica y solar.- Sistemas de reconversión empleando hidrógeno.

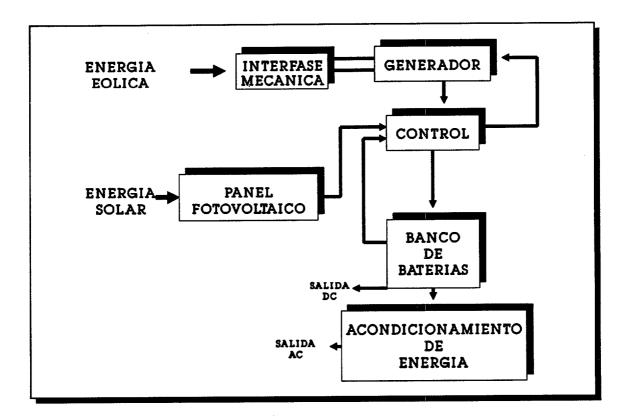


Figura 2.3.5 Almacenaje electroquímico y reconversión de energía solar y eólica.

3º) Almacenaje de energía magnética y eléctrica

a) Campos eléctricos.-

La energía almacenada por unidad de volumen en un campo eléctrico es proporcional al cuadrado de la intensidad del campo eléctrico y por tanto los campos eléctricos de alta intensidad poseen energías específicas altas. Sin embargo, en el estado actual de la tecnología, el almacenaje en campos eléctricos no es práctico excepto para cortas duraciones, como en el caso de condensadores para la correccion del factor de potencia y en multitud de circuitos electrónicos y eléctricos.

b) Campos magnéticos.-

En este tipo de campos se pueden obtener energías específicas altas. En este caso también es proporcional al cuadrado de la intensidad del campo magnético. Para establecer campos magnéticos de alta intensidad sin excesivas pérdidas por efecto Joule son necesarios magnetos superconductoras. Aunque tecnológicamente es posible, económicamente necesitan una alta inversión y por lo tanto para sistemas de conversion eólico-solar son inviables hoy en día.

4°) Almacén térmico

La energía solar y eólica pueden ser convertida y almacenada en forma de energía térmica.

En la Figura 2.3.7 se ven métodos de conversión y almacenaje térmico para la energía eólica y solar.

Para la energía eólica existen dos procedimientos básicos para convertir energía eólica en térmica:

- a) Por medios de agitadores mecánicos.
- b) Con unas resistencias de caldeo.
- a) Un agitador mecanico puede ser usado para calentar agua para almacenaje en forma térmica a baja temperatura (< 100° C). El principio de funcionamiento del agitador mecánico es muy sencillo, consiste en convertir la energia cinética de la unidad en energía térmica, a través del rozamiento que provocan unos agitadores mecánicos en un fluido que puede ser el agua. (ver, The Status of Wind Power Research And Development For Space And Water Heating In The United Stated.- D.E. GROMACK) (13).
- b) Otra posibilidad que se pone de manifiesto en el esquema es utilizar como carga para los aerogeneradores una resistencia de caldeo. En este caso, dada la naturaleza de la carga, no existe limitación en cuanto a tensión y frecuencia por lo que el alternador que se diseñe estará muy simplificado,

abaratándose considerablemente su coste.

Los métodos de conversión de energía solar en energía térmica fueron explicados en el Apartado 2.1.2 y no insistiremos sobre ellos.

La energía térmica puede ser almacenada por calor sensible, por calor latente, por un sistema combinado de ambos y por almacenaje termoquímico.

El <u>almacenaje termoquímico</u>.- se da en reacciones termoquímicas reversibles; endotérmicas en un sentido y exotérmicas en el contrario.

Con esta técnica de almacenaje se consiguen altas energías específicas. Constituye un medio potencial para su transporte a grandes distancias con costes de almacenaje bajos.

Un ejemplo de estas reacciones puede ser la combinación de monóxido de carbono e hidrógeno para obtener metano y agua.

El rango de temperaturas, dependiendo del tipo de reacción, está entre 350 y 850 ° C.

Por calor sensible. Existen dos sistemas de almacenaje de energía térmica por calor sensible. El primero de ellos incluye a los sistemas en los que el material de almacenaje es al mismo tiempo fluido de transporte. El segundo tipo está caracterizado por la necesidad de un sistema

de transporte para llevar la energía de un foco a otro.

Los materiales más comunes utilizados son:

- a) Sólidos
- b) Agua y líquidos

En los sistemas solares es el agua el material más usado, ya que sirve como almacén y fluido de transporte al mismo tiempo. Además tiene un alto calor específico.

El mayor inconveniente estriba en su limitado intervalo de trabajo (0-100°C). Así mismo, suponiendo una nula adición de energía al agua, cualquier extracción de energía que se haga supone un descenso en la temperatura del sistema.

En cuanto al almacenaje por calor sensible en sólidos, se suelen usar principalmente ladrillos de diversos materiales no metálicos. También se suelen usar materiales metálicos (doble capacidad de almacenamiento) pero su costo es dos o tres veces superior.

El almacenaje por calor latente será desarrollado en el Apartado 3.

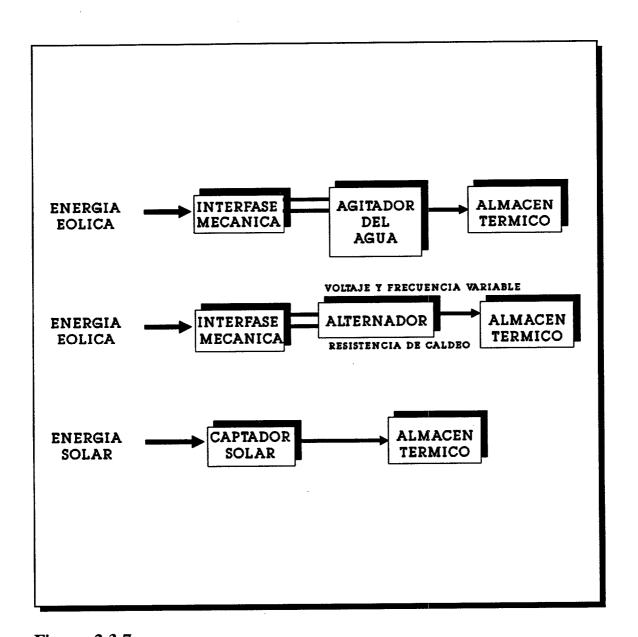


Figura 2.3.7

3. ALMACENAJE POR CALOR LATENTE DE ENERGÍA EÓLICO-SOLAR

3.1 INTRODUCCIÓN

La energía <u>Eólica</u> y <u>Solar</u> pueden ser convertidas y almacenadas en forma de energía térmica según se explicó en el Apartado 2.

Una forma de almacenaje de energía térmica que consigue grandes densidades energéticas, es por calor latente o de transformación. Este sistema de almacenaje, es el de más reducidas dimensiones. Así mismo la diferencia entre la temperatura de carga y descarga puede ser muy pequeña.

La energía almacenada y cedida en el proceso de carga y descarga respectivamente, corresponde a la energía de cambio de fase. Este cambio de fase puede ser de tres tipos de sólido a sólido, de sólido a líquido o de líquido a gas.

De estos tres el que presenta mayores ventajas para los casos de que tratamos es el de sólido a líquido y en adelante nos centraremos en él.

Un sistema de almacenaje por calor latente deberá constar al menos de los siguientes elementos (3):

- 1º) Material de almacenaje
- 2º) Intercambiador de calor
- 3º) Contenedor del material de almacenaje

3.2 MATERIALES DE ALMACENAJE

De los tres elementos mencionados en el apartado anterior, es el material de almacenaje el que presenta mayor importancia, ya que está supeditado estríctamente a los requisitos del proceso energético para el que sea aplicado.

3.2.1 TIPOS DE MATERIALES.- PROPIEDADES

Los materiales se pueden clasificar según diversos criterios, el más usual es hacerlo por grupos funcionales (3). Así se puede hacer la siguiente clasificación:

a) Orgánicos

- a.1 Parafinas
- a.2 No parafínicos

b) Inorgánicos

- b.1 Sales hidratadas
- b.2 Mezclas eutécticas
- b.3 Metálicos

Almacenaje por calor latente de energía eólico-solar

En las Tablas (3.2.1), (3.2.2), (3.2.3), (3.2.4), (3.2.5) se resumen algunas propiedades generales de los materiales indicados anteriormente, (11).

TABLA 3.2.1

Propiedades generales Orgánicos no parafínicos

- 1°) La mayoría son inflamables.
- 2°) Algunos son tóxicos.
- 3º) La mayoría de los ácidos de cadena larga presentan polimorfismo.
- 4º) El punto de inflamación de la mayoría es bajo.
- 5°) Las impurezas suelen afectar al punto de fusión de una forma importante.
- 6º) Son recomendables hilos metálicos, para aquellos de baja conductividad.
- 7°) Se descomponen generalmente cuando son sometidos a altas temperaturas.
- 8°) Tienen generalmente puntos de fusión apropiados.
- 9°) Son frecuentes las transiciones sólido-sólido.
- 10°) Muchos de ellos tienen altos calores de fusión.

Almacenaje por calor latente de energía eólico-solar

TABLA 3.2.2

Propiedades generales Orgánicos parafínicos

- 1º) Alto calor de fusión por unidad de peso
- 2º) No son tóxicas
- 3º) Baja conductividad térmica
- 4°) No son corrosivas
- 5°) Bajo cambio de volumen durante la fusión

TABLA 3.2.3

Propiedades generales Sales hidratadas

- 1º) Calor de fusión elevado por unidad de peso y volumen.
- 2º) Pequeña variación de volumen en la fusión.
- 3°) La mayoría funden incongruentemente, con la consiguiente pérdida de reversibilidad.
- 4°) Alta conductividad térmica.
- 5°) Subenfriamiento en una extensa zona.
- 6°) Suelen ser corrosivas.

Almacenaje por calor latente de energía eólico-solar

TABLA 3.2.4

Propiedades generales Mezclas eutécticas de sales inorgánicas

- 1º) La proporción de la mezcla puede variar ofreciendo una amplia gama de puntos de fusión y calores de fusión.
- 2º) El punto de fusión es generalmente alto.
- 3°) Su preparación hay que realizarla en ausencia de humedad, ya que ésta influye en el punto de fusión.
- 4°) Son generalmente corrosivas.

TABLA 3.2.5

Propiedades generales Metálicos

- 1º) Alto calor de fusión por unidad de volumen.
- 2º) Bajo calor de fusión por unidad de peso.
- 3º) Alta conductividad térmica.
- 4°) Bajo calor específico.
- 5°) Relativa baja presión de vapor.
- 6º) Baja expansión volumétrica durante la fusión.
- 7º) Alta estabilidad térmica.
- 8º) Presentan problemas de corrosión.

Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Biblioteca Digital.

3.2.2 CRITERIOS DE SELECCIÓN

Los principales criterios para seleccionar un material de almacenamiento por calor latente (3) son:

a) Termodinámico

- a.1 Temperatura de fusión
- a.2 Calor latente
- a.3 Densidad
- a.4 Calor específico
- a.5 Conductividad térmica
- a.6 Congruencia de la fusión
- a.7 Incremento del volumen en la fusión

b) Cinético

- b.1 Velocidad de nucleación
- b.2 Velocidad de cristalización
- b.3 Subenfriamiento

c) Químico

- c.1 Estabilidad química
- c.2 Corrosión
- c.3 Inflamabilidad
- c.4 Explosividad

d) Económico

- d.1 Disponibilidad
- d.2 Costo

a) Termodinámico

a.1 Temperatura de fusión

Interesa que la temperatura de fusión coincida con el intervalo de trabajo del sistema.

a.2 Calor latente

El calor latente deberá ser el más alto posible de forma que almacene una gran cantidad de energía por unidad de peso y volumen.

a.3 Densidad

Interesa una alta densidad ya que el volumen del almacén es un factor crítico.

a.4 Calor específico

El calor específico de las fases sólida y líquida deberá ser el más alto posible ya que el material siempre trabaja en un rango de temperatura que no se restringe a la temperatura de fusión.

a.5 Conductividad térmica

La conductividad del material de almacenamiento deberá ser lo más alta posible. Esto permite una menor subdivisión del material.

a.6 Congruencia de la fusión

El material deberá tener una fusión congruente a una temperatura fija.

Una fusión se dice que es congruente si en cualquier instante durante la fusión, la composición química de las dos fases, solida y líquida son idénticas.

a.7 Incremento del volumen en la fusión

Los materiales suelen aumentar su volumen en la fusión, interesa que este valor sea el más pequeño posible. En general este aumento suele estar entre un 5 y un 10%.

b) Cinético

b.1 Velocidad de nucleación

Se define como el número de núcleos que se forman por unidad de volumen y tiempo.

Este valor deberá ser el más alto posible, si nó se tiende al subenfriamiento.

b.2 Velocidad de cristalización

Se define al valor del crecimiento del cristal en la proximidad de la temperatura de fusión. Este es uno de los factores que determinan la transferencia de energía. Por tanto interesa que sea el más alto posible.

b.3 Subenfriamiento

Cuando el líquido es subenfriado por debajo de su temperatura de solidificación podemos encontrar que la fase líquida subenfría hasta una temperatura más baja que la de solidificación antes de que se empiece a formar los primeros núcleos en la fase sólida.

Durante la nucleación se empiezan a formar los primeros núcleos que darán lugar a los cristales y aumenta la temperatura del material al mismo tiempo que se libera el calor latente.

c) Químico

c.1 Estabilidad química

El material de almacenamiento deberá tener una alta estabilidad química. El promedio de vida de los materiales deberá ser de 10 a 20 años, por ello los materiales deben tener una gran estabilidad y no descomponerse químicamente.

c.2 Corrosión

El material no debe reaccionar con el recipiente contenedor.

c.3 Inflamabilidad

La inflamabilidad es la propiedad por la cual el material se oxida rápidamente y libera calor de combustión cuando es expuesto a llama o fuego y le permite continuar la combustión aún después de ser retirada la llama. Es importante conocer la temperatura de inflamabilidad, que es la temperatura a la cual el líquido o vapor ignecta o arde.

c.4 Explosividad

Es la propiedad de los materiales a detonar.

d) Económico

d.1 Disponibilidad

El material tiene que ser fácilmente adquirido en el mercado.

d.2 Costo

El material de almacenamiento deberá ser lo más barato posible, reduciendo de esta forma el costo total del sistema de almacenamiento.

Vistas las propiedades de los materiales de almacenaje y los criterios de selección se puede deducir que no existe ningún material perfecto. selección indicadosSe puede observar sin embargo, que en general los materiales orgánicos presentan una serie de características positivas en relación con los compuestos inorgánicos:

- 1^a) Funden congruentemente.
- 2º) Optimas propiedades de nucleación.
- 3^a) No subenfrían.
- 4^a) Compatibles con el material contenedor.

Estas son las razones que en principio han llevado a la elección de la parafina como material idóneo para realizar las experiencias de almacenaje de energía térmica de procedencia Eólico y Solar.

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

Almacenaje por calor latente de energía eólico-solar

El siguiente paso a dar consiste en elegir el tipo de parafina más adecuado para la instalación. Esto se hará en el Apartado 3.4.

3.3 INTERCAMBIADORES DE CALOR

a) Características

El intercambiador de calor deberá poseer una serie de características como son:

- 1^a) Poseer un alto valor para el coeficiente global de transmisión de calor. Esto permite una carga y descarga relativamente rápida.
- 2^a) El intercambiador de calor deberá poseer una alta difusividad térmica.
 - 3^a) Tener alta durabilidad.

b) Clasificación

Podemos clasificarlos en dos categorías (51):

1°) Pasivos

- a) Encapsulados
- b) No encapsulados

2°) Activos

En los intercambiadores de tipo "pasivo" se encuentran formando tubos de pequeño diámetro (20-40 mm) (51) o también formando esferas de pequeño radio, en el interior de los cuales se encuentra el material de almacenaje (encapsulados). Otra modalidad de intercambiador de tipo "pasivo" consiste en introducir el material de almacenaje en un recipiente generalmente de tipo cilíndrico. Interiormente se introduce un serpentín que hace de intercambiador de calor (No encapsulados) (26).

Existe un tipo denominado de contacto directo, llamado así porque el fluido caloportador, y el material de almacenamiento están en directo contacto uno con el otro. La gran ventaja de este procedimiento consiste en la gran superficie de contacto que se consigue. El mayor inconveniente radica en que hay que conseguir materiales totalmente inmiscibles con el fluido caloportador (18), (41), (42), (43).

Los intercambiadores de calor "activos" son aquellos en los cuales se trata de conseguir gracias al movimiento de alguno de sus elementos una agitación del material de almacenaje. Con ello se consigue una mejor conducción en el interior del material de almacenaje (5). El mayor

inconveniente de este tipo de intercambiador radica en los problemas de mantenimiento a realizar en los elementos móviles.

3.4 PARAFINAS ENSAYADAS

3.4.1 DISPONIBILIDAD Y PROPIEDADES

Las parafinas pueden ser preparadas sintéticamente, pero lo usual es que sean obtenidas como subproductos en el refinado del petróleo, aunque también se extraen de ciertos yacimientos.

Las parafinas normales son las de tipo C_nH_{2n+2} . Componen una familia de hidrocarburos saturados con unas propiedades muy similares. Todos los de la serie más pequeña que el pentano C_5H_{12} son gases a la temperatura ambiente. Los comprendidos entre el pentano y el $C_{15}H_{32}$ son líquidos, y el resto son sólidos cerosos.

Las parafinas normales o de cadena recta funden normalmente a altas temperaturas, superiores a las de cadena ramificada.

Las propiedades químicas están gobernadas por consideraciones estructurales. Las parafinas de cadena recta o las parafinas de cadena ramificada simétrica, son las más estables.

Las parafinas amorfas de cadena ramificada (mezclas de parafinas) son usadas en productos como aceites lubricantes y combustibles.

Las parafinas de cadena recta son separadas de las de cadena ramificada y son vendidas (como bloques de parafinas, productos de cera, ,etc.), o son recirculados en una unidad catalítica que rompe las moléculas en otras de cadena ramificada de peso molecular más bajo utilizables como gasolina.

No es sorprendente, por lo tanto que las parafinas esten disponibles en "cantidad" y que el precio de venta es del mismo orden que otros productos del petróleo (gasolinas, aceites para motor, etc).

Es bien conocido que la temperatura de fusión de las parafinas crece con el número de átomos de carbono en la cadena. La relación experimental entre el punto de fusión y el número de átomos de carbono en la cadena para parafinas normales puras, conteniendo de 10 a 24 átomos de carbono es mostrada en la Figura 3.4.1. (37)

La temperatura de ebullición para la misma serie de C-10 a C-24 se muestra en la Figura 3.4.2. (37).

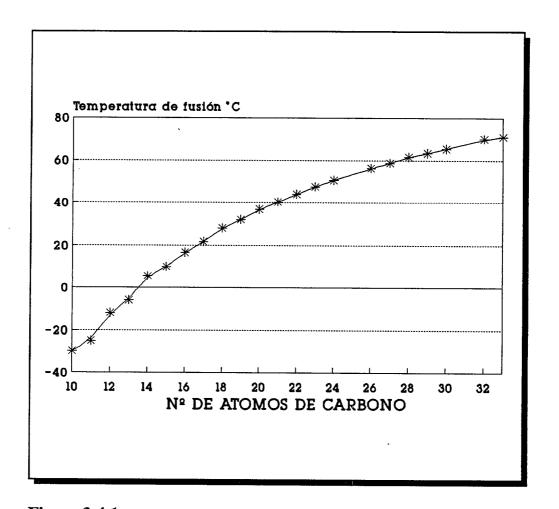


Figura 3.4.1

TABLA 3.4.1

Valores numéricos de los puntos de fusión

	
Nº	punto
de átomos de C	de fusión °C
10	-30
11	-25
12	-12
13	-6
14	5,5
15	10
16	16,7
17	21,7
18	28,0
19	32
20	36,7
21	40,2
22	44
23	47,5
24	50,6
25	-
26	56,3
27	58,8
28	61,6
29	63,4
30	65,4
31	-
32	70
33	71,0

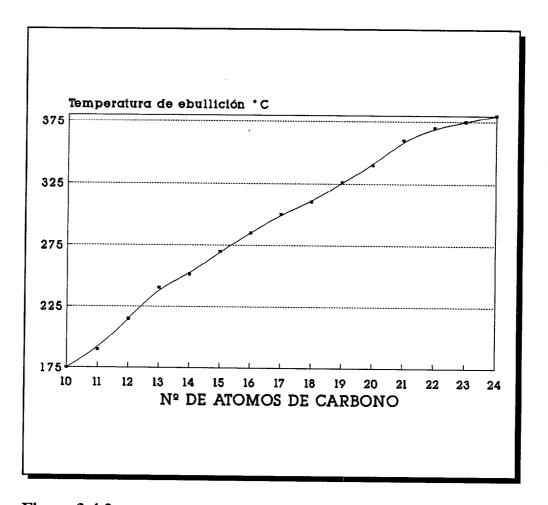


Figura 3.4.2

TABLA 3.4.2

Valores numéricos del punto de ebullición

N°	punto de
de átomos de C	ebullición °C
10	175
11	190
12	215
13	240
14	251
15	270
16	285
17	300
18	310
19	326
20	340
21	360
21	370
22	375
23	380

Lo más interesante en los datos de la Figura 3.4.1 es que se puede literalmente seleccionar un tipo de hidrocarburo de una temperatura de fusión entre -38 °C y 60 °C en usos como material para almacenaje de energía térmica en aplicaciones tanto activas como pasivas de energía solar.

Otras propiedades de las parafinas se resumen en la Tabla 3.4.3, ver (11).

A continuación se resumen las propiedades y características generales de las parafinas:

- 1^a) Selección del punto de fusión o solidificación en el rango de (15 a 60 °C).
- 2^a) Calor de fusión entre 125 y 250 KJ/kg (dependiendo de la pureza del hidrocarburo).
- 3^a) La distancia térmica entre la temperatura de solidificación y fusión (T_m - T_c) es menor de 10 °C; incluso con velocidades de calentamiento o enfriamiento rápidas (10°C/minuto) (subenfriamiento despreciable).
- 4^a) Las parafinas no son tóxicas.
- 5^a) No son corrosivas.
- 6a) En general absorben poca o ninguna agua con humedades relativas altas o en contacto directo con agua.
- 7^a) Baja conductividad térmica.
- 8^a) Químicamente estables e inertes por debajo de los 500 °C, por encima de esta temperatura tienen lugar reacciones muy complejas, tales como aromatización, deshidrogenación, etc.
- 9^a) Lígeramente inflamables.

- 10^a) Baja presión de vapor a la temperatura de fusión.
- 11^a) Bajo cambio de volumen durante la fusión.
- 12^a) Si se introducen en pequeñas esferas o tubos de pequeñas dimensiones su transferencia de energía puede ser alta.
- 13ª) Estan disponibles comercialmente en las cantidades que se necesitan por diferentes Compañias de Petróleo (Witco, Shell, Exxon, Unión Oil, Repsol, etc). El precio internacional varía entre (33 y 61 Pts/kg).

TABLA 3.4.3

Propiedades (11)

****	1	sidad	l I	calor espe	calor especif.	
fórmula	kg/	dm ³ fusión		J/kg°C		term.
****	solid.	liq.	KJ/kg	solid.	liq.	J/hm°C
n-C12H26	-	0,750	210	1449,9	1529,1	_
n-C13H28	-	0,756	154,7	1449,9	1529,1	-
n-C14H30	0,825	0,771	224,9	2062,4	1699,9	533
n-C15H32	-	0,768	162,5	-	-	_
n-C16H34	0,835	0,774	236,1	1449,9	1699,9	537
n-C17H36	0,778	-	167,9	_	-	-
n-C18H38	0,814	0,774	241,6	1449,9	2145,8	537
n-C19H40	_	-	170,4	1687,4	1699,9	-
n-C20H42	0,856	0,778	245,8	1783,3	2004	533
n-C21H44	0,758	-	160,8	-		-
n-C22H46	0,763		157,5	-	-	-
n-C23H48	0,764	-	166,24	-	-	-
n-C24H50	0,766	_	162,1	-	_	<u>-</u>

3.4.2 ANÁLISIS TÉRMICO

Las características de almacenaje de energía térmica de pequeñas muestras de material, es muy conveniente realizarlas usando un calorímetro diferencial (DSC)¹, por su elevada presición. Para ello puede ser usado el fabricado por Dupont, Perkin-Elmer.

El que se ha utilizado para realizar los análisis es del tipo:

DSC-2C PERKIN-ELMER

El funcionamiento del instrumento DSC para el análisis térmico, se encuentra bien explicado en numerosos artículos ver (Organic Phase-Change Materials For Solar Heat Storage) C.J. Hoogendoorn. (36)., así como en el manual de usuario de estos equipos.

Los tipos de parafinas que hemos ensayado proceden de diversas empresas, Repsol y Refinería de Tenerife principalmente.

Se ha hecho el análisis a un total de 7 muestras ver la Tabla 3.4.4.

^{1*} Diferential Scanning Calorimeter o calorímetro diferencial de barrido.

TABLA 3.4.4

TIPO DE PARAFINA	ORIGEN *******	
CERA-400	REPSOL	
CERA-100	REPSOL	
CERA-150	REPSOL	
CERA-50	REFINERÍA DE TENERIFE	
CERA-62	REFINERÍA DE TENERIFE	
CERA-FF	REFINERÍA DE TENERIFE	
CERA-400-62	MEZCLA C-400 Y C-62 50%	

Los ensayos realizados usan muestras con masas entre 3 y 5 miligramos. Las velocidades de calentamiento y enfriamiento son del orden de 5 °C/minuto.

Los resultados de los análisis se encuentran en el Apéndice G.

En la Figura 3.4.3 y 3.4.4 se muestran los resultados para la muestra CERA-400 en el proceso de calentamiento y enfriamiento respectivamente.

En la Figura 3.4.3 se aprecian claramente los puntos de inicio de la temperatura que marca el inicio de cambio de fase, la temperatura pico y la temperatura que marca el final del cambio de fase. El proceso

representado es el de calentamiento.

El mismo procedimiento es seguido durante el enfriamiento para localizar y obtener la magnitud de la temperatura exotérmica.

La energía de fusión y cristalización se calcula por el área bajo la curva obtenida en el calentamiento y enfriamiento respectivamente.

Normalmente se observan en los diagramas 2 picos. El primero - el más reducido - corresponde a un cambio en la estructura cristalina. El segundo es el más importante y corresponde a la energía absorbida o cedida en el proceso de cambio de fase.

En la Tabla 3.4.5 se recogen los parámetros térmicos más importantes como son:

 T_m = Temperatura de fusión (°C)

 T_c = Temperatura de cristalización (°C)

 $Dh_m = Calor latente de fusión (J/kg)$

 Dh_{c} = Calor latente de cristalización (J/kg)

TABLA 3.4.5

MUESTRA ******	T _m °C	T _e ℃	Dh _m KJ/kg	Dh _c KJ/kg
CERA-400	49	42	131,0	131,1
CERA-100	59,2	54,8	190,2	189,2
CERA-150	62	58,2	191,9	191,2
CERA-50	51,5	45,2	154,3	129,0
CERA-62	62,9	57,2	194,7	193,8
C-62-400	56,4	51,4	183,0	146,8
CERA-FF	59,6	59,5	136,9	95,68

Hechos los análisis térmicos de las muestras de parafinas señaladas en la Tabla 3.4.5, el siguiente paso consiste en seleccionar la parafina idónea para nuestra instalación (entre las disponibles). Para ello se han tenido en cuenta fundamentalmente dos parámetros:

- 1°) Calor latente
- 2°) Temperatura (T_c, T_m)

La temperatura seleccionada interesa que se encuentre entre 40 y 50 °C que es la idónea para las condiciones climatólogicas del lugar. El calor latente interesa que sea el máximo posible. De hecho entre las minerales

al menos, pueden obtenerse calores latentes de 250 KJ/kg.

La parafina que se ha considerado más adecuada para realizar las experiencias es la CERA-400, de entre aquellas con las que se contaba.

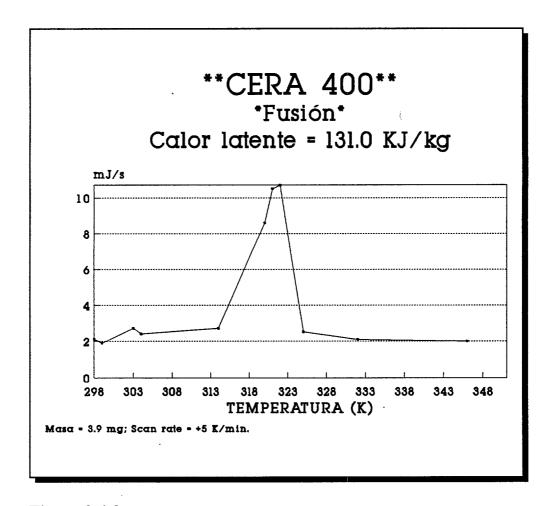


Figura 3.4.3

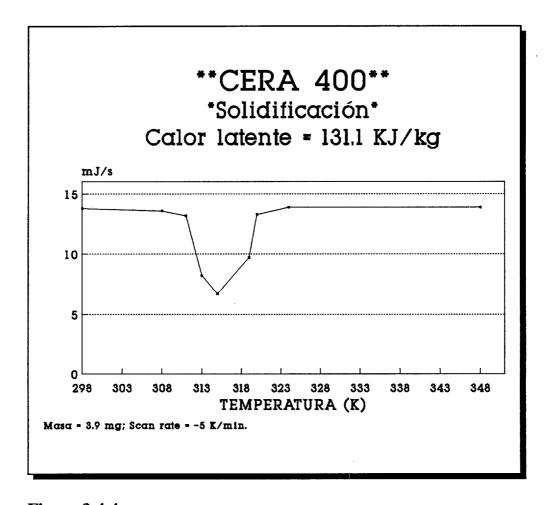


Figura 3.4.4

3.4.3 ANÁLISIS QUÍMICO

El análisis químico se ha realizado a la muestra CERA-400, esta parafina es la utilizada en la totalidad de las experiencias.

Los análisis se han hecho en el Departamento de Química Analítica de La Laguna y en el Instituto Rocasolano del C.S.I.C. en Madrid.

La técnica de análisis es "Cromatografía de Gases" y el aparato utilizado tiene las siguientes características:

- Columna PS-255 (dimetil silicona) de unos 15 m.
- Temperatura inicial = 100 °C.
- Temperatura final = 200..230 °C.
- Programa de 3 ó 4 °C.

En la Figura 3.4.5 se representa los % de los hidrocarburos comprendidos entre el C19 y el C30. Los picos cuantificados representan el 85 % del total del área.

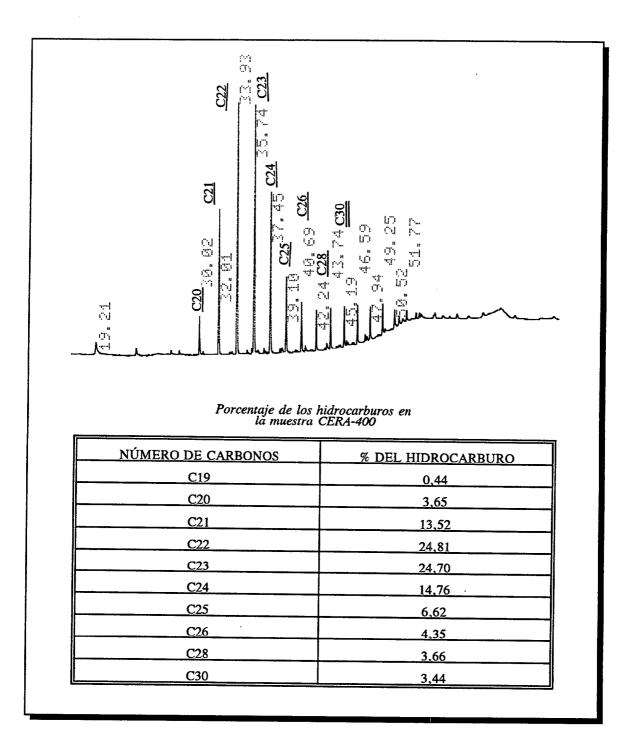


Figura 3.4.5 Los picos cuantificados representan el 85 % del total del área.

4. DESCRIPCIÓN DE LA ESTACIÓN EÓLICO-SOLAR INSTALADA

4.1 INTRODUCCIÓN

La estación se ha diseñado y construido según el esquema básico que puede observarse en la Figura 4.1.1. Se ha instalado en la azotea del pabellón A del Seminario y consta de los elementos que a continuación se indican:

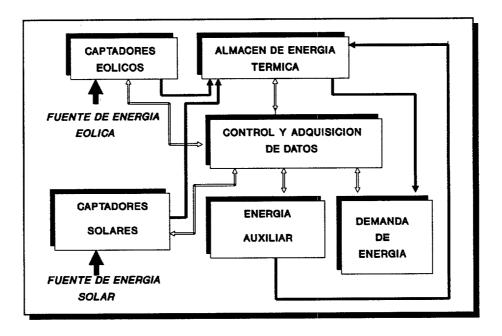


Figura 4.1.1 Bloques que componen la Instalación Eólico-Solar.

- a) Captadores solares
- b) Captadores eólicos

- c) Almacén de energía térmica
- d) Elementos de control y adquisición de datos.
- e) Energía auxiliar.
- f) Demanda de energía.

En la Figura 4.1.2 se presenta una vista general de la estación con los elementos de captación y almacenaje. En rojo y en el centro, los cuatro almacenes-intercambiadores. Los de la derecha son de tipo comercial normalizado de 150 litros c/u. Los de la izquierda han sido reformados en los Talleres de E.T.S de Ingenieros Industriales de Las Palmas, para realizar en ellos las experiencias con la parafina. A la izquierda de la foto aparecen los dos grupos de dos paneles solares cada uno. A la derecha, los dos aerogeneradores.

A continuación se describirán las características técnicas generales de cada uno de los elementos que integran la instalación.

Figura 4.1.2 Elementos de captación y almacenaje, situados en la azotea de la E.T.S.I.I.

82

4.2 CAPTADORES SOLARES

Los captadores solares utilizados son paneles térmicos de agua de la marca ESE modelo TF-7911. Los datos técnicos se resumen a continuación:

Superficie útil	$1,5 \text{ m}^2$
Dimensiones exteriores	1973x943x86 mm
Contenido de agua	3,3 Litros
Presión máxima	196 N/m^2
Coeficiente absorción a 135 °C	$\alpha = 0,95$
Coeficiente de emisión a 135 ° C	$\epsilon = 0.86$

De los cuatro paneles que se han utilizado dos (P3 y P4) se destinan a la instalación convencional de agua, y los dos restantes (P1 y P2) a la instalación de prueba en la que se investiga el comportamiento de la parafina. La disposición de los paneles se puede apreciar en la Figura 4.2.1.

Los dos paneles correspondientes a cada una de las dos instalaciones se encuentran conectados en serie.

El ángulo de inclinación de la superficie de los paneles respecto

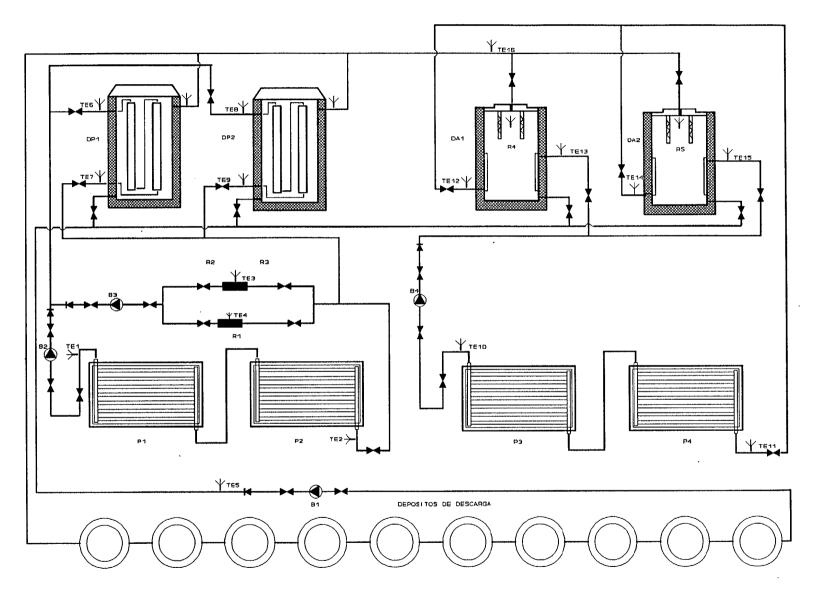


Figura 4.2.1 Diagrama de flujo de los elementos de captación, almacenaje, y situación de los sensores de temperatura.

de la horizontal es de aproximadamente 38°. La orientación de todos ellos es hacia el Sur.

4.3 CAPTADORES EÓLICOS

Los captadores eólicos, una vista de los cuales se puede apreciar en la Figura 4.3.1., son dos aerogeneradores de 500 W c/u. Están constituidos por sendos generadores trifásicos excitados por imanes permanentes que forman parte del rótor.

La carga de cada generador está constituida por una resistencia de caldeo de 32,5 ohmios, ubicadas en los depósitos de agua DA1 Y DA2. Este último extremo se puede apreciar en el esquema de la Figura 4.2.1.

Los aerogeneradores han sido diseñados y construidos específicamente para la optimización de su curva de potencia, trabajando a velocidades de viento bajas, entre 4 y 8 m/s. Estas características les permiten, al menos en principio, un aporte energético anual muy elevado. Otras especificaciones de los aerogeneradores son:

Diámetro del rótor	2 m
Velocidad de arranque	4 m/s
Margen de operación	4 a 18 m/s
Velocidad de potencia nominal	8 m/s
Número de palas	3

Orientación	 Por veleta
Material	 Composit

4.4 ALMACÉN DE ENERGÍA TÉRMICA

La energía procedente de los aerogeneradores y los paneles se almacena en forma de energía térmica en los depósitos que se han denominado DA1, DA2, DP1, y DP2. En la Figura 4.4.1 se puede apreciar una vista general, de la estación desde el Sur, en ella aparecen en primer término, a la izquierda de la foto y en color oscuro, los dos depósitos DP1 y DP2; más al fondo, a la derecha, y en color rojo, los dos depósitos DA1 y DA2.

Los depósitos DP1 y DP2 están destinados al almacenaje en la parafina de la energía térmica captada; los DA1 y DA2 efectúan el almacenaje en agua.

Almacén DP1.- Es un depósito metálico contenedor de unos 200 litros de capacidad. El mismo dispone de un aislamiento de poliuretano rígido de 5 cm de espesor.



 $FIGURA \quad 4.3.1 \ \ Vista \ de \ los \ dos \ aerogeneradores \ de \ 500 \ W$



Figura 4.4.1 Vista desde el sur de la instalación. En medio de la foto y de izquierda a derecha el DP1, DP2, DA1, DA2 respectivamente.

En el espacio interior vacio se ha introducido un doble intercambiador de calor, formado por 28 tubos de cobre con un diámetro exterior de 4 cm y un espesor de 1 mm. La altura de los tubos es de 78 cm. En el interior de estos tubos se ha introducido la parafina. Concéntricamente con cada uno de los tubos y por su interior se encuentra otro por el que se efectua la carga del almacén. El tubo utilizado tiene unas dimensiones de 12x10 mm y el material de construcción es latón. Los dos conjuntos de tubos están instalados en serie. La masa total de parafina contenida en dichos espacios anulares es aproximadamente de 19 kg.

Los 28 tubos exteriores se encuentran rodeados de agua cuya masa es de unos 120 kg. En la Figura 4.4.2 se puede observar el interior del DP1 con los dos conjuntos de tubos citados.

Almacen DP2.- Está constituido por un depósito metálico contenedor con similares característica que el DP1. En el interior del citado depósito se encuentran un total de 9 tubos de un diámetro exterior de 100 mm y un espesor de 1,5 mm. de pared. La altura de cada uno de estos tubos es de 80 cm. El material de construcción es cobre.

Concéntricamente con los anteriores tubos se introducen otros de latón de 10x12 mm que tienen la misión de transferir la energía de los paneles solares a la masa de parafina. Para mejorar la transferencia de energía, cada uno de estos tubos tiene soldadas de forma longitudinal 9 aletas de cobre. En el interior de los espacios anulares entre ambos tubos se introduce el material de almacenaje (parafina). La masa total introducida es de 39,5 kg.

Rodeando a los tubos contenedores de parafina hay agua que tiene una doble misión. De una parte actua como almacén de energía y de otra como medio para realizar la descarga del almacén de parafina. El volumen de agua es de unos 97,2 litros. Un detalle de lo dicho se puede apreciar en la Figura 4.4.3.

Almacenes DA1 y DA2.- Son dos depósitos metálicos de agua de 150 litros de capacidad c/u. Se encuentran provistos de un intercambiador de calor a fin de transferir la energía de los paneles al agua. El volumen del agua de la camisa intercambiadora es de 6,5 litros, la superficie de intercambio es de 0,60 m². Los depósitos disponen de un aislamiento de poliuretano rígido. En la Figura 4.4.4 se puede apreciar una vista de los dos depósitos instalados, así como una sección de los mismos.



Figura 4.4.2 En esta figura se observa el interior del DP1 los tubos contenedores de parafina y en blanco los cables que corresponden a los sensores de temperatura.

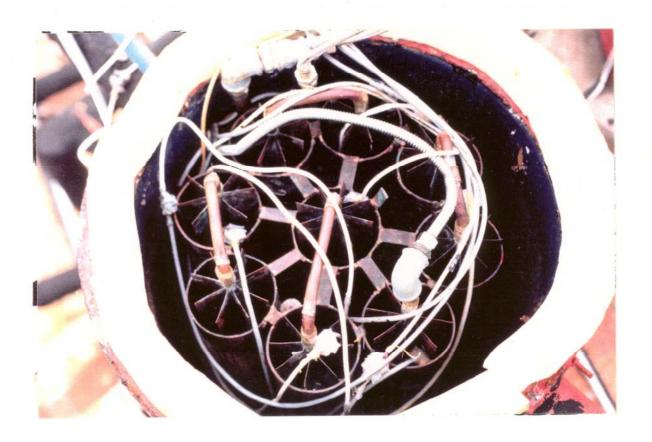


Figura 4.4.3 En el interior del DP2 se pueden observar los 9 tubos contenedores de parafina y las aletas que se encuentran soldadas al serpentín.

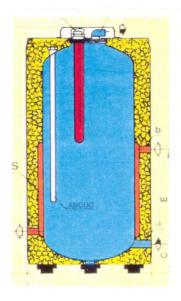




Figura 4.4.4 Almacenes intercambiadores de tipo comercial de 150 litros c/u. En la parte superior de la figura una sección de los mismos.

4.5 ELEMENTOS DE ADQUISICIÓN DE DATOS Y CONTROL

El sistema de adquisición de datos así como el control de la instalación se realizan por medio de un PC y un total de cinco tarjetas modelo PC-Labcard. En la Figura 4.5.1 se muestra una vista general del sistema de control instalado en nuestro laboratorio. En la Figura 4.5.2 se puede observar un detalle de algunas de las tarjetas.

Las tarjetas utilizadas son:

PCLD-714; 2 PCLD-789; PCL-720; PCLD-786

La PCLD-714 es una tarjeta de 16 entradas analógicas con una resolución de 14 bits, dos salidas analógicas con así mismo 14 bits de resolución, y un tiempo de conversión de menos de 40 microsegundos. Todos los canales de entrada y salida son compatibles TTL. Esta tarjeta va conectada al bus interno del PC y controla el resto de las tarjetas.

Las entradas analógicas tienen un rango de -5 a +5 voltios.

La PCLD-789 es una potente tarjeta acondicionadora de señales y multiplexora. Esta tarjeta se conecta a la tarjeta madre (PCLD-714). La tarjeta multiplexa 16 canales de entrada diferencial a un canal de salida analógico. Posee un amplificador de alta calidad en el cual es posible seleccionar ganancias de 0,5; 1; 2; 50; 100; 200; 1000; o una ganancia

definible por el usuario. Las señales que llegan a la PCLD-789 son:

- 21 termómetros del tipo PT-100
- 2 tensiones en continua (Potencia Aerg1. y Aerg2.)
- 2 tensiones en continua (Realimentación Aerg1 y Aerg2)

La PCLD-720 es una tarjeta con 32 canales digitales de entrada, 32 canales digitales de salida, y se utiliza junto con la PCLD-714 para direccionar la PCLD-789 y la PCLD-786.



Figura 4.5.1 Vista general del sistema de control instalado en el laboratorio de Investigación de Química Analítica.



Figura 4.5.2 En la parte superior izquierda las tarjetas amplificadoras y acondicionadoras de las señales. En la parte inferior circuitos conversores de resistencia a tensión.

La PCLD-786 tiene 8 relés de estado sólido de una potencia aproximada de 800 vatios y 8 salidas digitales de control. Esta tarjeta la utilizamos para el control de los distintos elementos que actuan en la instalación como son las cuatro electrobombas B1, B2, B3, y B4 y las resistencias de caldeo R1, R2 y R3. También controla las resistencias R4 y R5 conectadas a los aerogeneradores.

El control de todas estas tarjetas se realiza a través de un programa escrito en BASIC y configurado por el usuario.

De los 21 termómetros de que dispone la instalación, los que se encuentran fuera de los depósitos (DP1, DP2, DA1, y DA2), se denominan TE y se encuentran todos ellos numerados según la posición en la instalación ver Figura 4.2.1 .

Los depósitos de agua DA1 y DA2 disponen, cada uno de ellos, de un termómetro situado a media altura del depósito.

Cada depósito de parafina dispone de un total de 10 puntos de medida de la temperatura. La temperatura del agua que rodea a los tubos contenedores de parafina se mide utilizando tres termómetros situados en el fondo, a media altura y en la parte superior del depósito. La medida de la temperatura de la parafina se realiza con un total de siete termómetros ver Figuras 4.5.3 y 4.5.4.

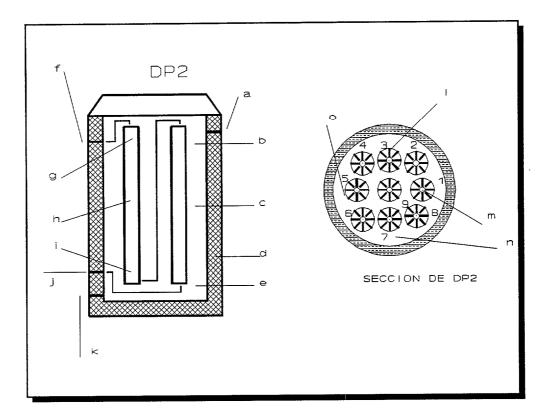


Figura 4.5.3 Situación de termómetros en el DP2

LEYENDA (Figura 4.5.3)

- a...Salida de agua caliente
- b...TP15 temperatura del agua la en parte superior
- c...TP23 temperatura del agua en el medio
- d...Aislamiento
- e...TP11 temperatura del agua en el fondo
- f...Entrada de agua de paneles

- i...TP14 temperatura de parafina en el fondo (tubo 5)
- h...TP13 temperatura de parafina en el medio (tubo 5)
- g...TP12 temperatura de parafina arriba (tubo 5)
- j...Salida de agua hacia paneles
- k...Entrada de agua fria (carga)
- 1...Aleta
- m...Tubo de carga de paneles
- n...Agua de descarga
- o...Tubo contenedor de parafina

Los termómetros TP21, TP22, TP24 y TP25 se encuentran en los tubos de parafina numerados 1, 4, 6, 9 respectivamente y a media altura.

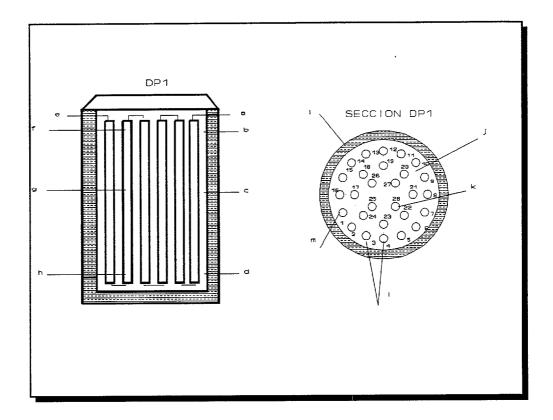


Figura 4.5.4 Situación de termómetros en el DP1

LEYENDA (Figura 4.5.4)

- a...Salida hacia paneles
- b...TP15
- c...TP23
- d...TP11
- e...Agua caliente de paneles
- h...TP14 (Tubo 14)

g...TP13 (Tubo 14)

f...TP12 (Tubo 14)

j...agua de descarga

k...Tubo de salida

1...Tubo de parafina

m...Tubo de entrada

i...Aislamiento

Los termómetros TP21, TP22,TP24, y TP25 se encuentran en los tubos de parafina 28, 5, 24, 1 respectivamente y a media altura.

4.6 ENERGÍA AUXILIAR

La instalación eólico-solar dispone de unas resistencias de caldeo. Los depósitos DA1 y DA2 llevan sendas resistencias que se alimentan normalmente de la energía suministrada por los aerogeneradores. Por un sistema de conmutación las resistencias de los depósitos pueden alimentarse de la red.

En uno de los depósitos auxiliares va una resistencia de 1000 W a 220 V, R1. El otro depósito auxiliar lleva dos resistencias de 500 W a 220 V, R2 y R3.

Ver la Figura 4.6.1.

Los dos depósitos actuan en paralelo o individualmente para el caldeo de uno de los depósitos DP1 o DP2. Las resistencias R1, R2, y R3 se alimentan directamente de la red, controladas por dos termostatos instalados en los depósitos auxiliares y que impiden que el agua alcance temperaturas excesivas. Se refuerza la acción de los termostatos convencionales con las temperaturas que controla el ordenador.

4.7 DEMANDA DE ENERGÍA

27

La descarga energética de cada almacén se efectua por un circuito que conecta los depósitos DP1, DP2, DA1 y DA2 a la salida de agua caliente. Durante las experiencias el agua caliente, portadora de energía, se dirige hacia un conjunto de 10 depósitos de 500 l c/u, aproximadamente. La Figura 4.7.1 muestra en primer término y a lo largo de la foto el sistema de descarga de la instalación. La tubería conduce a los citados depósitos: La Figura 4.7.2 es una vista general de los mismos.



Figura 4.6.1 Almacenes DP1 y DP2 sus interconexiones y accesorios. En el centro los cilindros portadores de las resistencias de caldeo.



Figura 4.7.1 Vista desde el oeste de los depósitos-almacenes y del sistema de descarga de agua.



Figura 4.7.2 Vista de los 10 depósitos de descarga.

5. ECUACIONES DE FUNCIONAMIENTO DE UNA INSTALACIÓN EÓLICO-SOLAR

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

5.1 INTRODUCCIÓN

Los tres módulos principales que componen una instalación de este tipo son:

- a) Captadores eólicos
- b) Captadores solares
- c) Almacén de energía

Es necesario, por tanto, conocer las ecuaciones de estos tres elementos para llegar a conocer su comportamiento. Las variables más importantes para estas ecuaciones son:

- Intensidad de radiación,
- velocidad de viento,
- Temperatura ambiente.

5.2 CAPTADORES EÓLICOS

Los aerogeneradores que se utilizan en la instalación responden a la siguiente ecuación experimental (86).

$$P_{a}(V) = \begin{cases} 0 & si \ V < V_{i} \\ P(V) \ si \ V_{i} < V < V_{r} \\ P_{r} & si \ V_{r} < V < V_{o} \\ 0 & si \ V > V_{o} \end{cases}$$

Donde:

$$P(V) = A_0 + A_1 * V^2$$

representa la potencia entre la velocidad de arranque y la velocidad de potencia nominal,

- P_a(V) representa la potencia de los aerogeneradores en función de la velocidad del viento.
- V representa la velocidad del viento en m/s.
- V_r velocidad nominal del viento.
- V_i velocidad mínima para la producción de potencia.
- V_o Velocidad de corte.
- A_0 y A_1 coeficientes estadísticos de ajuste de los datos experimentales para velocidades de viento comprendidos entre V_i y V_r .

ver Figura 5.2.1.

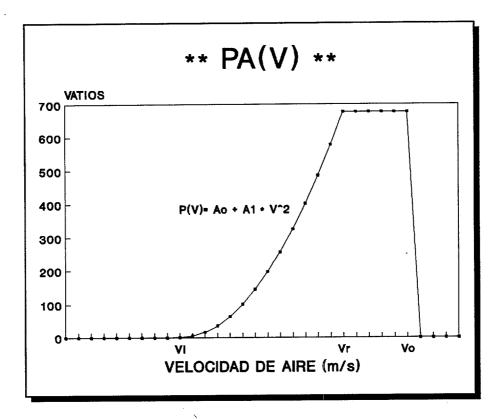


Figura 5.2.1 Curva característica de un aerogenerador de pequeña potencia.

5.3 CAPTADORES SOLARES

El rendimiento térmico de los paneles (ver Fig 5.3.1) responde a la siguiente ecuación (86):

$$\eta = \eta_0 - U_c * X$$

Donde:

$$X = \frac{T_m - T_a}{I}$$

$$T_m = \frac{T_i + T_s}{2}$$

siendo:

 T_i = Temperatura de entrada del panel (°C)

 T_s =Temperatura de salida del panel (°C)

 T_a = Temperatura ambiente (° C)

I = Intensidad de radiación sobre la superficie $\left(W/m_c^2\right)$

 η_0 = Rendimiento máximo

 U_c = Coeficiente global de pérdidas $\left(\frac{W}{m^{2\circ}C}\right)$

 $S = Superficie de panel (m^2)$

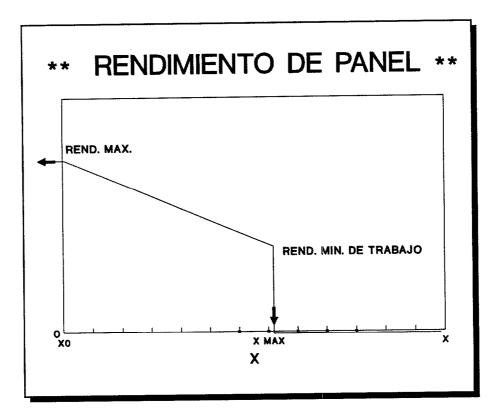


Figura 5.3.1 Rendimiento de trabajo de un panel plano de agua.

La ecuación de potencia del colector en función de la intensidad de radiación teniendo en cuenta la expresión del rendimiento anterior es:

$$P_{c}(I) = \begin{cases} 0 & si \ I = 0 \\ 0 & si \ X > X_{\text{max}} \\ I * S * \eta & si \ 0 < X < X_{\text{max}} \\ I * \eta_{0} * S & si \ X \le 0 ; T_{m} \le T_{a} \end{cases}$$

Así mismo la potencia del colector se puede poner como:

$$P_c = \dot{m} * C_{pf} * (T_s - T_i) \quad (W)$$

$$\dot{m} = Flujo \ másico \ del fluido \left(\frac{Kg}{s}\right)$$

$$C_{pf}$$
 = Calor específico del fluido a presión constante $\left(\frac{J}{Kg^{\circ}C}\right)$

que nos relaciona la potencia con el caudal y las temperaturas de entrada y salida del panel.

Como se observa las ecuaciones utilizadas son algebraicas y no presentan mayor dificultad para integrarlas en un modelo global que dé el funcionamiento del conjunto de la instalación. A partir de este punto nos centraremos en el almacén de energía dada su importancia y complejidad.

5.4 ALMACÉN DE ENERGÍA

De los tres elementos de que consta la instalación es éste el que presenta mayor dificultad para encontrar un modelo que sea sencillo y que al mismo tiempo represente de forma adecuada el almacén.

Para la deducción del modelo se partirá de las siguientes hipótesis:

- 1ª) Asociaremos a cada sección transversal una temperatura media que depende únicamente de la variable x (seccion despreciable frente a longitud).
- 2ª) Se despreciará toda convección natural en la parafina.
- 3^a) Supondremos que el calor específico a presión constante del fluido no depende de la temperatura.
- 4ª) Se trabajará con una densidad media de la parafina.
- 5^a) Supondremos la densidad del agua constante.
- 6^a) Las conductividades térmicas de la parafina y el agua la supondremos constantes.
- 7^a) El caudal del fluido lo supondremos constante.
- 8^a) La sección transversal del intercambiador se supone constante.

5.4.1 <u>BALANCE ENERGÉTICO PARA UN ELEMENTO DE</u> <u>PARAFINA Y FLUIDO</u>

Consideremos un elemento diferencial de fluido que suponemos se mueve con una velocidad $W_{\rm x}$ como se observa en la Fig. 5.4.1

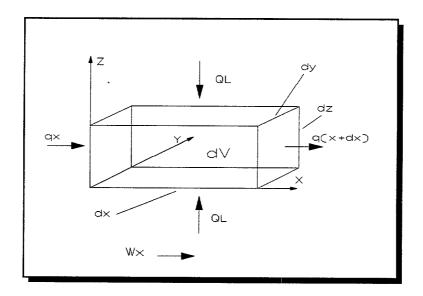


Figura 5.4.1 Elemento de fluido considerado en el balance energético.

Siendo q_x el flujo calorífico según x; en (W/m^2) .

La diferencia entre las cantidades de energía introducidas y extraidas en la dirección x del elemento en el intervalo de tiempo dt es:

$$dQ_{xl} = dQ_x - dQ_{x+dx}$$

siendo

$$dQ_{xI} = q_x dy dz dt - q_{x+dx} dy dz dt$$
 (1)

Si q_{x+dx} es continua y diferenciable

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx + \frac{\partial^2 q_x}{\partial x^2} \frac{dx^2}{2!} + \dots$$
 (2)

Tomando los dos primeros términos de (2), la ecuación (1) queda:

$$dQ_{x1} = -\frac{\partial q_x}{\partial x} dx dy dz dt = -\frac{\partial q_x}{\partial x} dv dt$$

al flujo calorífico en la dirección x contribuyen simultáneamente un efecto de convección y uno de conducción luego podemos poner:

$$q_x = q_{xconv} + q_{xcond} (3)$$

por la Ley de Fourier

$$q_{xcond} = -K_f \frac{\partial T_f}{\partial x} \tag{4}$$

mientras que el término de convección vale:

$$q_{xconv} = \rho_f C_{pf} W_x T_f \tag{5}$$

sustituyendo estas dos últimas expresiones (5) y (4) en (3) queda para q_x:

$$q_x = \rho_f C_{pf} W_x T_f - K_f \frac{\partial T_f}{\partial x}$$

derivando esta última expresión respecto de x se tiene

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} = \rho_f C_{pf} \left(W_x \frac{\partial T_f}{\partial x} + T_f \frac{\partial W_x}{\partial x} \right) - K_f \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial W_x}{\partial x} = 0 \; ; \; Caudal \; constante$$

Luego la variación de energía dQ₁ según x debido a la conducción y convección vale:

$$dQ_{xI} = -dVdt \rho_f C_{pf} W_x \frac{\partial T_f}{\partial x} + dVdt K_f \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2}$$

Según la primera hipótesis, a cada elemento dV le corresponde una $T_f = T_f(x,t)$, siendo x la posición del elemento y t el instante de tiempo. Luego la energía que entra por las caras laterales vale:

$$dQ_L = U_{sf} dA_{sf} (T_s - T_f) dt$$

Siendo $T_s = T_s(x,t)$ la temperatura del elemento de parafina adyacente al fluido, dA_{sf} el área de contacto entre el elemento de parafina y el fluido y U_{sf} el coeficiente de transferencia de energía entre la parafina y el fluido $(J/m^2 \, {}^{\circ}C \, s)$.

La variación de energía interna del elemento de fluido queda:

$$dQ = dQ_{xI} + dQ_L (6)$$

También la variación de energía interna del elemento de fluido es:

$$dQ = C_{pf} \frac{\partial T_f}{\partial t} dV_f dt \, \rho_f \tag{7}$$

sustituyendo esta última expresión (7) en la ecuación anterior (6) tenemos:

$$C_{pf} \frac{\partial T_f}{\partial t} dV_f \rho_f = -dV_f \rho_f C_{pf} W_x \frac{\partial T_f}{\partial x} + dV_f K_f \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} + U_{sf} dA_{sf} (T_s - T_f)$$

teniendo en cuenta que:

$$W_x = \frac{dx}{dt}$$
; $dV_f \rho_f = dm_f$; $\dot{m} = \frac{dm}{dt}$

$$C_{pf} \frac{\partial T_f}{\partial t} dM_f = -\dot{m} dx C_{pf} \frac{\partial T_f}{\partial x} + dV_f K_f \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} + U_{sf} dA_{sf} (T_s - T_f)$$
 (8)

De forma similar se deduce una ecuación para el elemento de parafina, pero teniendo en cuenta que no existe convección:

$$C_{ps} \frac{\partial T_s}{\partial t} dM_s = K_s dV_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + U_{sf} dA_{sf} (T_f - T_s)$$
 (9)

Partiendo de la primera de las hipótesis se puede poner que:

$$dM_f = \frac{M_f}{NI}$$
; $dx = \frac{L}{NI}$; $dV_f = \frac{V_f}{NI}$; $dA_{sf} = \frac{A_{sf}}{NI}$

siendo $M_{\rm f}$ la masa total del fluido en el intercambiador, L la longitud del intercambiador, $V_{\rm f}$ el volumen del fluido del intercambiador, $A_{\rm sf}$ el área total de intercambio entre el fluido y la parafina y NI un número entero.

De igual forma se define para la ecuación de la parafina. Sustituyendo en la ecuación (8) y la ecuación (9) queda:

$$C_{pf} \frac{\partial T_f}{\partial t} M_f = -\dot{m} L C_{pf} \frac{\partial T_f}{\partial x} + V_f K_f \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} + U_{sf} A_{sf} (T_s - T_f)$$
 (10)

$$C_{ps} \frac{\partial T_s}{\partial t} M_s = K_s V_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + U_{sf} A_{sf} (T_f - T_s)$$
 (11)

Las ecuaciones (10) y (11) se pueden poner para un tipo genérico de almacén (ver Figura 5.4.2) de la siguiente forma:

$$C_{pf} \frac{\partial T_f}{\partial t} M_f = -\dot{m} L C_{pf} \frac{\partial T_f}{\partial x} + V_f K_f \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} + (UA)_{sf} (T_s - T_f) + (UA)_{fa} (T_a - T_f) + (UA)_{sb,fa} (T_a - T_f)$$

$$C_{ps} \frac{\partial T_s}{\partial t} M_s = K_s V_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + (UA)_{sf} (T_f - T_s) + (UA)_{sa} (T_a - T_s) + (UA)_{sb,sa} (T_s - T_a)$$

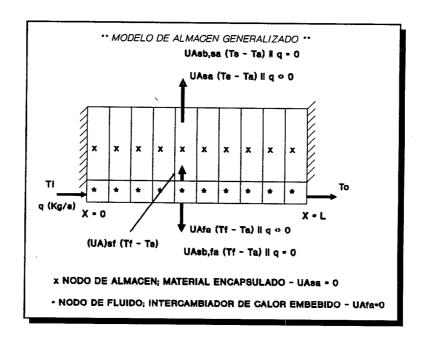


Figura 5.4.2 Esquema del almacén generalizado

Si despreciamos los términos de conducción frente a los demás sumandos, suponemos que los coeficientes globales de transferencia de energía son constantes en el intervalo de trabajo y definimos un calor específico medio para la parafina de la siguiente forma:

$$\bar{C}_{ps} = \frac{\int_{T_1}^{T_2} C_{ps}(T) dT}{T_2 - T_1}$$

Siendo T_1 y T_2 la temperatura inferior y superior de trabajo en la parafina respectivamente.

Se tiene el modelo de Schumann Generalizado de Coeficientes Constantes.

Las ecuaciones toman la forma siguiente:

$$C_{pf} \frac{\partial T_f}{\partial t} M_f = -\dot{m} L C_{pf} \frac{\partial T_f}{\partial x} + (UA)_{sf} (T_s - T_f) + (UA)_{fa} (T_a - T_f) + (UA)_{sb,fa} (T_a - T_f)$$

$$(12)$$

$$\overline{C}_{ps} \frac{\partial T_s}{\partial t} M_s = (UA)_{sf} (T_f - T_s) +$$

$$+ (UA)_{sa} (T_a - T_s) + (UA)_{sb,sa} (T_s - T_a)$$
(13)

Es conveniente para modelizar un almacén específico dar a las ecuaciones anteriores forma adimensional, para poder así comparar distintos almacenes, o para hacer una mejora de diseño en uno determinado. Para ello se van a definir las siguientes variables adimensionales:

1.- Número de unidades de transmisión.

$$(NTU)_{sf} = \frac{(UA)_{sf}}{\dot{m}C_{pf}}$$
; $(NTU)_{fa} = \frac{(UA)_{fa}}{\dot{m}C_{pf}}$; etc.

2.- Capacidades de energía relativas.

$$R_f = \frac{(MC_p)_f}{(MC_p)_f + (M\bar{C}_p)_s}$$
; $R_s = 1 - R_f$

3.- Tiempo adimensional

$$\tau = \frac{t}{t^*} ; t^* = \frac{(MC_p)_f + (M\bar{C}_p)_s}{\dot{m}C_{pf}}$$

4.- Posición adimensional.

$$X = \frac{x}{L}$$

5.- Temperatura adimensional.

$$\theta = \frac{T - T_1}{T_2 - T_1}$$

Las ecuaciones quedan:

$$\frac{\partial \theta_f}{\partial \tau} = \left(-\frac{\partial \theta_f}{\partial X} + (NTU)_{sf}(\theta_s - \theta_f) + (NTU)_{fa}(\theta_a - \theta_f) + (NTU)_{sb,fa}(\theta_a - \theta_f) \right) / R_f$$

$$\frac{\partial \theta_s}{\partial \tau} = ((NTU)_{sf}(\theta_f - \theta_s) + (NTU)_{sa}(\theta_a - \theta_f) + (NTU)_{sb,sa}(\theta_a - \theta_s))/R_s$$

5.4.2 SOLUCIÓN NUMÉRICA DE LAS ECUACIONES DEL ALMACÉN DE ENERGÍA.

Las ecuaciones diferenciales se resolverán en su forma dimensional para poder comparar con los resultados que se obtengan de forma experimental.

Para su resolución se ha empleado el Método de Diferencias Finitas, que es un método que se comporta bastante bien en este tipo de problemas.

El planteamiento de las ecuaciones se han hecho en forma explícita por ser más sencillo de realizar en un programa y no presentar excesivos problemas de estabilidad.

La ecuaciones a resolver son:

$$C_{pf} \frac{\partial T_f}{\partial t} M_f = -\dot{m} L C_{pf} \frac{\partial T_f}{\partial x} + V_f K_f \frac{\partial^2 T_f}{\partial x} + (UA)_{sf} (T_s - T_f) + (UA)_{fa} (T_a - T_f)$$

$$(14)$$

$$C_{ps} \frac{\partial T_s}{\partial t} M_s = K_s V_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + (UA)_{sf} (T_f - T_s) + (UA)_{sa} (T_a - T_s)$$

$$+ (UA)_{sa} (T_a - T_s)$$
(15)

La aproximación de los términos quedan:

$$\frac{\partial T_f}{\partial t} = \frac{T_{f_i}^{j+1} - T_{f_i}^j}{\Delta t} + O_1(\Delta t)$$

iversidad de Las Palmas de Gran Canaria Biblioteca Digital 2004

Ecuaciones de funcionamiento de una instalación eólico-solar

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{T_{s_i}^{j+1} - T_{s_i}^{j}}{\Delta t} + O_2(\Delta t)$$

Donde se han utilizado diferencias ascendentes (método explícito), y el error local cometido es de primer orden.

para los términos:

$$\frac{\partial T_f}{\partial x}$$
; $\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2}$; $\frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2}$

se utilizará diferencias centrales por ser el error local de segundo orden,

quedando:

$$\frac{\partial T_f}{\partial x} = \frac{T_{f_{i+1}}^j - T_{f_{i-1}}^j}{2 \Delta X} + O_3(\Delta X^2)$$

$$\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} = \frac{T_{s_{i+1}}^j - 2T_{s_i}^j + T_{s_{i-1}}^j}{\Delta x^2} + O_4(\Delta x^2)$$

$$\frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} = \frac{T_{f_{i+1}}^j - 2T_{f_i}^j + T_{f_{i-1}}^j}{\Delta x^2} + O_5(\Delta x^2)$$

siendo las variables:

T = Temperatura

x = posición

t = tiempo

y los subindices:

f = Fluido

s = Parafina

i = Punto de x

j = Punto de t

sustituyendo en las ecuaciones (14) y (15) queda para el fluido:

$$\frac{C_{pf}(T_{f_{i}}^{j+1} - T_{f_{i}}^{j})M_{f}}{\Delta t} = \frac{-\dot{m}C_{pf}L}{2\Delta x}(T_{f_{i+1}}^{j} - T_{f_{i-1}}^{j}) + (UA)_{sf}(T_{s_{i}}^{j} - T_{f_{i}}^{j}) + \frac{K_{f}V_{f}}{\Delta x^{2}}(T_{f_{i+1}}^{j} - 2T_{f_{i}}^{j} + T_{f_{i-1}}^{j}) + (UA)_{fa}(T_{a}^{j} - T_{f_{i}}^{j})$$

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

Ecuaciones de funcionamiento de una instalación eólico-solar

para la parafina:

$$\frac{C_{ps}(T_{s_i}^{j+1} - T_{s_i}^{j})M_s}{\Delta t} = + (UA)_{sf}(T_{f_i}^{j} - T_{s_i}^{j}) +$$

$$+ \frac{K_s V_s}{\Delta x^2} (T_{s_{i+1}}^j - 2T_{s_i}^j + T_{s_{i-1}}^j) + (UA)_{fa} (T_a^j - T_{s_i}^j)$$

Despejando las temperaturas de parafina y fluido en el nodo i y en el instante de tiempo j+1, obtenemos las ecuaciones en forma explícita:

$$T_{f_i}^{j+1} = K_1 T_{f_i}^j + K_2 T_{f_{i+1}}^j + K_3 T_{f_{i-1}}^j + K_4 T_{s_i}^j + K_{13} T_A^j$$
 (16)

$$T_{s_i}^{j+1} = K_5 T_{s_i}^j + K_6 T_{s_{i+1}}^j + K_7 T_{s_{i-1}}^j + K_8 T_{f_i}^j$$
 (17)

Variando i desde 0 hasta N-1 y j desde 0 hasta JN; siendo N+1 el número de nodos o puntos sobre X donde se calcula la temperatura y JN el último instante a considerar.

niversidad de Las Palmas de Gran Canaria Biblioteca Digital 2004

Ecuaciones de funcionamiento de una instalación eólico-solar

Las ecuaciones anteriores junto con las condiciones iniciales y las condiciones de contorno del problema nos permite hallar los valores de $T_s(x,t)$ y $T_f(x,t)$.

Las constantes adimensionales que aparecen en las ecuaciones son las siguientes:

$$K_{1} = -\frac{(UA)_{fa}\Delta t}{C_{pf}M_{f}} - \frac{2K_{f}V_{f}\Delta t}{\Delta x^{2}C_{pf}M_{f}} - \frac{(UA)_{sf}\Delta t}{C_{pf}M_{f}} + 1$$

$$K_2 = -\frac{\dot{m} C_{pf} \Delta t L}{2 \Delta x C_{pf} M_f} + \frac{2 K_f V_f \Delta t}{\Delta x^2 C_{pf} M_f}$$

$$K_2 = +\frac{\dot{m}C_{pf}\Delta tL}{2\Delta x C_{pf}M_f} + \frac{2K_f V_f \Delta t}{\Delta x^2 C_{pf}M_f}$$

$$K_4 = \frac{(UA)_{sf} \Delta t}{C_{pf} M_f}$$

Ecuaciones de funcionamiento de una instalación eólico-solar

$$K_{13} = \frac{(UA)_{fa} \Delta t}{C_{pf} M_f}$$

$$K_{5} = -\frac{(UA)_{sa}\Delta t}{C_{ps}M_{s}} - \frac{2K_{s}V_{s}\Delta t}{\Delta x^{2}C_{ps}M_{s}} - \frac{(UA)_{sf}\Delta t}{C_{ps}M_{s}} + 1$$

$$K_6 = K_7 = \frac{K_s V_s \Delta t}{\Delta x^2 C_{ps} M_s}$$

$$K_8 = \frac{(UA)_{sf} \Delta t}{C_{ps} M_s}$$

Las condiciones de estabilidad para las ecuaciones planteadas en diferencias finitas en forma explícita, KAMIMOTO M., 1986 (41) son:

$$\left(\frac{(UA)_{sf}}{C_{pf}M_f} + \frac{2K_f}{C_{pf}\rho_f\Delta x^2} + \frac{v}{\Delta x^2}\right)\Delta t < 1$$
 (18)

Ecuaciones de funcionamiento de una instalación eólico-solar

$$\left(\frac{(UA)_{sf}}{C_{ps}M_s} + \frac{2K_s}{C_{ps}\rho_s\Delta x^2}\right)\Delta t < 1$$
 (19)

Siendo v la velocidad del fluido calotransportador, y p la densidad (kg/m³) de la parafina y el fluido.

Para asegurar la de estabilidad del proceso numérico se escogerá un incremento de tiempo igual a la décima parte del que resulte de la condición (19).

Planteadas las ecuaciones diferenciales del almacén de energía en su forma explícita (16) y (17) junto con las condiciones de estabilidad (18) y (19), es posible implementar un programa que resuelva dichas ecuaciones. En el Apéndice A se encuentra el listado del programa escrito en Quick-Basic.

El planteamiento de las ecuaciones en su forma (12) y (13) tienen las siguientes ventajas:

- 1º) El nº de parámetros que aparece en las ecuaciones es reducido.
- 2º) Todos los coeficientes son constantes, lo que permite emplear la Técnica de Mínimos Cuadrados para el ajuste de los coeficientes.
- 3°) Aparecen los 6 coeficientes que gobiernan el rendimiento térmico de todo almacén de energía, propuestos por la SSTG (Comisión del Grupo

Ecuaciones de funcionamiento de una instalación eólico-solar

de Ensayo de Almacenaje de Energía Solar de la Comunidad Europea) estos son:

- a) Capacidad de energía del material de almacenaje.
- b) Capacidad de energía del fluido calortransportador.
- c) Parámetros de pérdidas (UA)sa.
- d) Parametros de pérdidas (UA)fa.
- e) Capacidad de transferencia de energía entre el fluido y el material de almacenaje.
- f) Grado de estratificación NI (NI=1 mezcla perfecta; NI>10 estratificación total.
- 4°) Se pueden introducir condiciones iniciales y límites arbitrarias.
- 5°) Una vez los coeficientes han sido determinados el mismo modelo servirá para establecer el rendimiento del almacén en periodos amplios.

El Modelo anterior fue propuesto por primera vez como procedimiento de Test por YANG en 1974, posteriormente lo han utilizado MARSHALL R. en 1985 y KAMIMOTO M. ,1986, (60),(43).

La técnica que en general se suele utilizar para la resolución de las ecuaciones es el método explícito, aunque cuando el tiempo de computación es excesivamente largo se suele recurrir a técnicas implicitas modificadas ver (A Simplified Model as the Basic for a Thermal Storage Test Procedure; R. Marshall 1985) (65).

6. ESTUDIO DE LA UTILIZACIÓN SIMULTÁNEA DE LAS ENERGÍAS EÓLICA Y SOLAR EN LA ZONA

6.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ZONA

- Situación

El lugar seleccionado para la realización de las experiencias se encuentra situado en la isla de Gran Canaria, carretera del centro, Km 10, azotea de la ETSII. El término municipal es el de Las Palmas en la zona de Tafira Baja.

En la Figura 6.1.1 se observa la fotografía de la zona donde se encuentra la instalación.

En dicha fotografía se observa como desde el punto donde se encuentra ubicada la instalación hacia el norte se encuentra libre de obstáculos, lo que ha sido muy beneficioso para los aerogeneradores.

- Climatología general de la zona

La zona se encuentra a una altitud de 300 metros sobre el nivel del mar, lo que hace que, en invierno, las temperaturas sean más bajas que en Las Palmas Capital, si bien persiste una humedad relativa media alta, alrededor de 80%.



Figura 6.1.1 Vista general de la zona hacia el norte, desde la instalación.

El viento es más intenso y constante en las estaciones de primavera, verano y otoño. Desde la mitad del otoño hasta fines del invierno los vientos aflojan, aunque hay brotes esporádicos. Las temperaturas varían entre 10 y 27 °C a lo largo del año.

En algunos meses - más frecuentemente en verano - aparece en esta zona un cúmulo de nubes bajas como consecuencia de los vientos alisios, lo que hace disminuir la intensidad media de radiación.

6.2 CONSIDERACIONES GENERALES

Es práctica habitual en los estudios de la utilización simultánea de la energía solar y de la eólica establecer en forma global la "complementariedad" de ambas energías HERRANS, 1983, (33).

De acuerdo con el criterio anterior se han efectuado estudios en la zona de ensayo. Basados en los datos obtenidos (recogidos del Centro Meteorológico del Zurbarán Figura 6.2.1), se han realizado los gráficos que aparecen en la Figura 6.2.2. Estos gráficos representan las variaciones de radiación solar media diaria y la velocidad media diaria del viento para los distintos meses del año y recogen valores medios de los años 1987-88-89.

En los gráficos aparecen las potencias por unidad de superficie (W/m^2) tanto para la energía solar como para la eólica.



Figura 6.2.1 Estación Meteorológica del Zurbarán. Situada a 500 m aproximadamente de la Estación Eólico-Solar.

the contribution of the Co

Estudio de la utilización simultánea de las energías eólica y solar en la zona

La ecuación para el viento es:

$$P(W/m^2) = 1/2\rho V^3$$

siendo:

 ρ = densidad del aire en kg/m³ V = Velocidad del aire en m/s

 $El \ valor \ medio \ tomado \ para \ la \ densidad \ del \ aire \ es$ $1,29 \ kg/m^3$

La Figura 6.2.3 recoge las variaciones del viento a lo largo del día para los distintos meses del año. Los valores corresponden a valores medios registrados en los años 1987-88-89.

** TAFIRA BAJA **

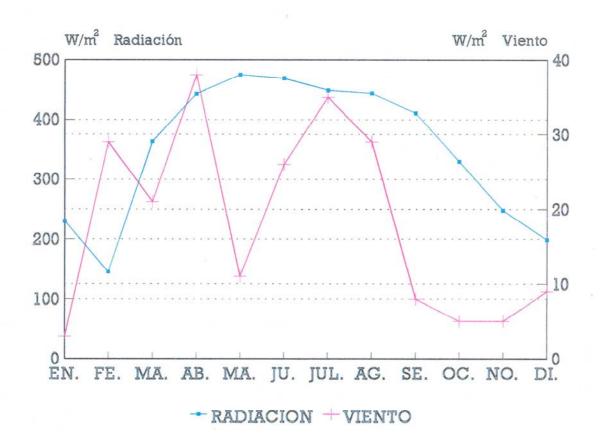


Figura 6.2.2

** TAFIRA BAJA **

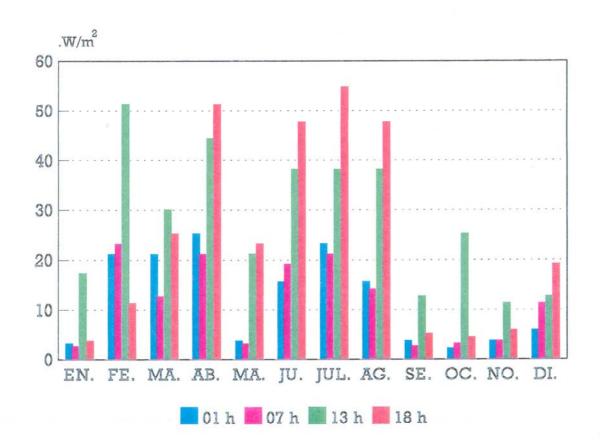


Figura 6.2.3

Como se ve, la velocidad media a lo largo del día no sufre grandes variaciones para los distintos meses del año, si bien sobre las 12:00 h se eleva ligeramente en general así como a última hora de la tarde.

Las curvas parecen indicar que existe una complementariedad con la energía solar a lo largo del día.

Considerando la potencia específica (por metro cuadrado) tanto para el viento como para la energía eólica, se puede observar que es mayor la del sol que la del viento. Sin embargo, las horas de captación posibles de energía por día son más para la eólica.

6.3 ESTUDIO ESTADÍSTICO DE LOS DATOS

Los razonamientos inductivos efectuados, basados en los datos experimentales, realizados en el apartado anterior, llevan consigo una incertidumbre que puede conducir a aseveraciones falsas.

Para medir dicha incertidumbre y obtener conclusiones a las que se pueda dar veracidad se han empleado métodos estadísticos, considerando la velocidad del viento y la irradiación solar como variables aleatorias.

El estudio estadístico consta de dos partes en primer lugar el

análisis y observación de los hechos y la segunda se dedicará a la interpretación y obtención de las conclusiones.

La primera nos viene dada y el resultado será la recopilación de datos de radiación solar y velocidad del viento.

Una vez se han obtenido esos datos el siguiente paso es buscar una relación entre las dos variables aleatorias.

Se dice que entre dos variables aleatorias existe una dependencia funcional cuando existe una expresión matemática que las relaciona.

Las variables aleatorias se representarán como "XRA" y "XVI". En las que RA y VI significan Radiación y Viento respectivamente y la "X" indicará la situación geográfica, por ejemplo "TARA" significará "radiación solar" en la zona de Tafira Baja y "TAVI" la potencia del viento por metro cuadrado en la zona de Tafira Baja.

Si se representa "XRA" frente a "XVI" se obtiene un diagrama donde se situa la nube de puntos de los datos. Se buscará una función de ecuación conocida que mejor se ajuste a dicha nube de puntos.

La bondad del ajuste se hallará por la varianza residual (s² ó CME). La raiz cuadrada positiva de ese valor se conoce por desviación estandar residual.

La varianza residual s² es una medida absoluta de que tan bien se ajusta el modelo elegido a las medias de las observaciones de la variable respuesta.

$$s^{2} = \frac{\sum_{i=1}^{n} e_{i}^{2}}{n-2} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (Y_{i} - \hat{Y}_{i})^{2}}{n-2}$$

Siendo:

$$n = N^{\circ}$$
 de datos observados
 $Y_i = Valor$ observado
 $\hat{Y}_i = Valor$ medio esperado

Hecho el análisis estadístico, se encuentra una relación funcional de segundo grado entre las variables TARA y TAVI. La ecuación es:

$$TARA = a_1 * TAVI + a_2 * TAVI^2$$

Los coeficientes estimados, a_1 y a_2 y el intervalo de confianza del 95% se representan en la Tabla 6.3.1

En la Figura 6.3.1 aparecen los datos obtenidos y la curva de ajuste.

TABLA 6.3.1

COEFICIENTE	COEFICIENTE	LÍMITE	LÍMITE	
******	ESTIMADO	INFERIOR	SUPERIOR	
a_1	38,06	20,3330	55,8052	
a ₂ -0,77154		-1,32669	-0,21638	

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

6.4 CONCLUSIONES

Del estudio estadístico realizado se deduce que existe una relación de dependencia de 2º grado entre las variables aleatorias TARA y TAVI.

Examinada esa función se observa una ligera dependencia directa entre ambas variables.

Por otro lado, el análisis diario de las velocidades del viento, indica que en la zona en estudio los vientos se mantienen bastante constantes a lo largo del día con un ligero aumento al medio día. Este hecho indica claramente que la utilización simultánea de energía eólica y solar repercute en una disminución de las necesidades de la energía térmica almacenada.

TAFIRA BAJA REGRESION DE TARA FRENTE TAVI

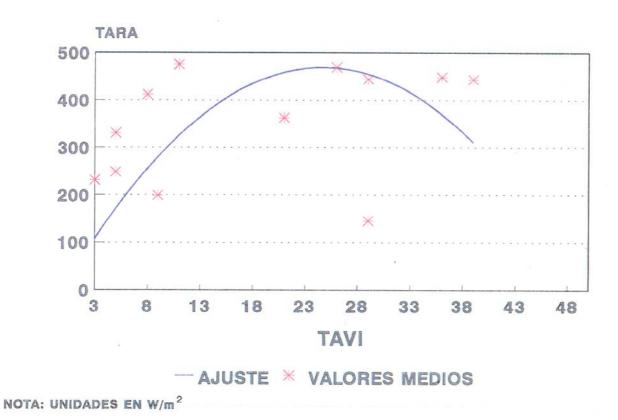


Figura 6.3.1

7. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

7.1 INTRODUCCIÓN

Uno de los principales objetivos que se pretende con la realización de las experiencias es obtener los coeficientes que permitan encontrar un modelo matemático para el Almacén de Energía, pieza clave de toda la instalación. También se establece la ecuación de funcionamiento para el aerogenerador (correlación entre las variables aleatorias potencia del aerogenerador y velocidad del viento).

El coeficiente UA (W/°C) como ya se explicó en el Apartado 5.4 interviene en el modelo matemático del almacén. Dicho coeficiente depende en general del tipo de geometría del intercambiador y del coeficiente interno de transferencia de energía h_i (W/m²°C).

Varios investigadores MARSHALL 1978 (56) y 1979 (55); EFTEKHAR 1984 (19), han obtenido para diversas geometrías expresiones adimensionales para el coeficiente hi; en la Tabla 7.1.1 se resumen los resultados que hasta la fecha se han obtenido relacionando el Nº de Nusselt con el Nº de Rayleigh (para el proceso de fusión).

La mayor parte de las investigaciones encaminadas a encontrar modelos en este tipo de almacén de energía, han sido realizadas con unas condiciones de contorno constantes y el sistema no se mantiene en una situación de espera (stand-by).

En la instalación que se ensaya en general las condiciones de contorno (intensidad de radiación, temperatura ambiente y velocidad del viento) no son constantes y existen algunos periodos en los que el almacén se encuentra en situación de stand-by (cielo nublado, periodo nocturno ausencia de viento).

TABLA 7.1.1

<u>AUTOR</u>	<u>AÑO</u>	<u>GEOMETRÍA</u>	<u>EXPRESIÓN</u>
R. Marshall	1978	rectangular	$\bar{N}u = 0.072 Ra^{1/3}$
R. Marshall	1979	cilíndrica con aletas	$\bar{N}u = 0.024 Ra^{1/3} \pm 30 \%$
R. Viskanta	1980	cilíndrica	$\overline{Nu} = 0.0178 \left(\frac{Ra}{Ste}\right)^{1/3}$
Eftekhar	1984	rectangular	$\bar{N}u = 0.0270 f_s^{-1} \left(\frac{Ra}{Ste}\right)^{1/3}$

Siendo:

$$f_s = \frac{S}{S_c}$$

$$Ra = \frac{g \beta (\overline{T}_w - T_c) L_{eq}^3}{v \alpha}$$

$$Ste = \frac{C_{pl}(\overline{T}_w - T_c)}{\lambda}$$

$$L_{eq} = \frac{V_L}{S_c}$$

S = Superficie de interfase sólido-líquido (m²)

 S_c = Superficie caliente (m²)

g = Aceleración de la gravedad (m/s²)

 \overline{T}_{w} = Temperatura media de pared caliente (°C)

 T_c = Temperatura de solidificación (°C)

v = Viscosidad cinemática (m²/s)

 β = Coeficiente de expansión medio del líquido (°C)⁻¹

 $\alpha = \text{Difusividad térmica del líquido} \qquad \frac{K_L}{\rho_L C_{pL}}$

K_L = Conductividad térmica del líquido (W/m °C)

 ρ_L = Densidad del líquido (kg/m³)

 λ = Calor latente (J/kg)

$$\vec{N}_u = \frac{\vec{h}_i L_{eq}}{K_L}$$

 $\overline{h_i}$ = Coeficiente de transferencia interno entre pared caliente y parafina. (W/m²°C)

Las pruebas realizadas en la instalación han permitido obtener coeficientes globales obtenidos en condiciones reales de funcionamiento, (para la fusión y solidificación por lo que el modelo matemático obtenido se acercará más a las condiciones de funcionamiento normales.

En la Tabla 7.1.2 se describen las pruebas que se han realizado en la Instalación Eólico y Solar.

TABLA 7.1.2

TIPOS DE PRUEBAS	CARACTERÍSTICAS GENERALES		
A-I ¹	CARGA DE ENERGÍA CON RED EL DP2		
C-I	CARGA DE ENERGÍA CON PANELES Y AEROGENERADORES LA IES.		
F-I	DESCARGA DE ENERGÍA DEL DP2		
D-I	CARGA DE ENERGÍA CON RED EL DP1		
G-I	DESCARGA DE ENERGÍA DEL DP1		
H-I	CARGA CON ENERGÍA PROCEDENTE DE LOS AEROGENERADORES EL DA1 Y DA2		

¹ I representa el número que clasifica la experiencia y el fichero de datos

7.2 CARGA DE ENERGÍA TÉRMICA EN EL DP2 (EXP:A-I; C-I)

Con este grupo de experiencias se pretende estudiar el funcionamiento del almacén de energía ante dos tipos de condiciones de entrada:

- 1º) Carga del almacén DP2 con una potencia de entrada que es aproximadamente constante y procedente de la red (EXP:A-I).
- 2º) Carga del almacén DP2 con una potencia proporcionada por los paneles
 P1 y P2, que en general será variable según el nivel de radiación,
 (EXP:C-I).

La totalidad de las pruebas se ha realizado con un caudal que es constante durante el tiempo que dura la misma.

En los Apéndice B y C se recogen todos los resultados experimentales recogidos de forma gráfica, de los cuales se analizarán en detalle los indicados en la Tabla 7.2.1 .

TABLA 7.2.1

EXP:	FECHA	HORA: INICIO	HORA: FIN	CAUDAL 1/s	MASA: paraf. kg.	MASA: agua kg
A-11	8-4-91	11:19:42	17:32:37	0,06	39,5	0
A-12	10-4-91	10:53:57	15:51:20	0,06	39,5	0
A-13	29-4-91	13:26:21	17:43:08	0,06	39,5	97,2
A-14	30-4-91	12:31:44	16:03:29	0,06	39,5	97,2
A-15	24-7-91	08:47:08	18:47:27	0,06	39,5	97,2
C-22	23-5-91	10:15:42	15:57:01	0,02	39,5	0
C-35	27-6-91	11:19:30	15:18:56	0,014	39,5	0
C-14	19-4-91	10:14:31	16:01:29	0,018	39,5	97,2
C-38	8-7-91	09:55:55	16:34:47	0,02	39,5	97,2
C-19	15-5-91	11:15:55	16:09:07	0,016	39,5	97,2

Las experiencias del tipo C-I se han realizado siguiendo el organigrama que se pone en la Figura 7.2.1 .

En dicho esquema se resumen los principales bloques de los que consta las experiencias C-I.

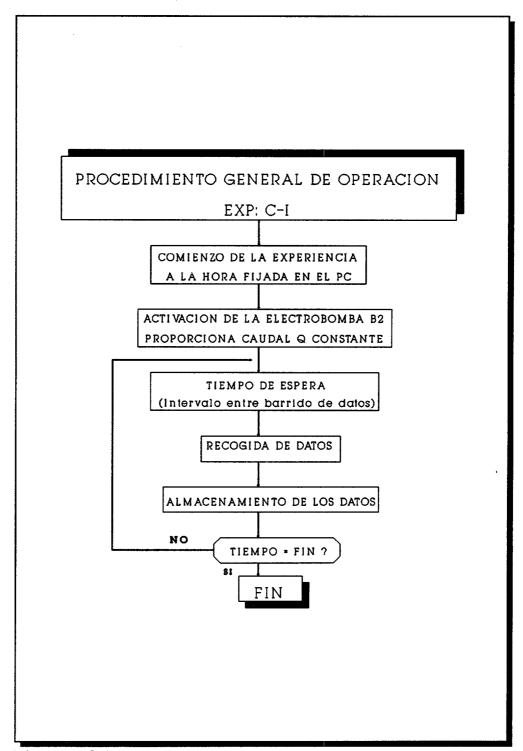


Figura 7.2.1

a) EXP: C-I en este tipo de prueba la energía recogida por los paneles será variable según el nivel de radiación, de ahí que la potencia de entrada es en general máxima hacia el medio día y mínima a primera hora de la mañana y por la tarde. La hora de finalización de la experiencia se programa en función del nivel de radiación.

Durante el tiempo que dura la experiencia se mantiene siempre constante el caudal, incluso con un nivel de radiación bajo. Este hecho hace que en algunas de las experiencias se observe como el almacén cede energía en lugar de recibirla.

La razón de mantener el caudal constante es para simplificar las expresiones del balance energético y el programa de control.

La carga del almacén se realiza en este tipo de prueba por el serpentín interior que poseen los tubos contenedores de parafina del DP2. La energía entregada a la parafina se controla por la diferencia de temperaturas a la entrada y salida del mismo y por el caudal constante de la electrobomba B2.

La ventaja de trabajar con este tipo de experiencias es que nos permite observar el funcionamiento en "modo carga" con condiciones reales en cuanto a la potencia de entrada del almacén y, por tanto, con niveles de temperatura en el serpentín que pueden ser rápidamente variables con el tiempo.

b) EXP: A-I consisten en estudiar el funcionamiento del DP2 cuando se carga éste con energía procedente de la red. La potencia de entrada del almacén es aproximadamente constante.

La potencia eléctrica que se proporciona en el depósito auxiliar es de unos 1000 W. Esta será pues la máxima potencia que entra en el DP2; si no existieran pérdidas en las tuberías, llaves, etc y el NTU del almacén fuera infinito.

En los resultados experimentales la potencia media de entrada es siempre menor de 1000 W tal y como se observa en los gráficos de las Figuras 7.2.7, y 7.2.8.

El organigrama general de las experiencias se muestra en la Figura 7.2.2. Destacar del esquema el punto donde se comprueba un termómetro de control para no calentar excesivamente los circuitos de carga. Si dicho punto sobrepasa la temperatura de seguridad, a través del programa de control se desconectaría la alimentación de las resistencias de caldeo. Solamente en este caso la potencia de entrada cae a cero.

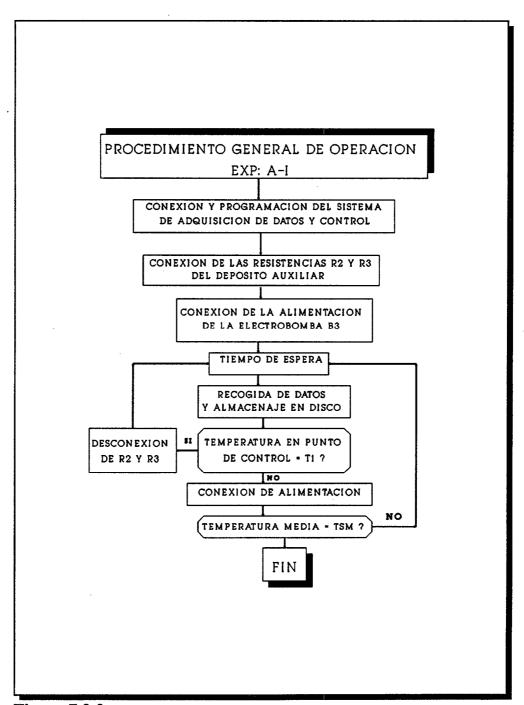


Figura 7.2.2

En primer lugar se hará un análisis descriptivo de las experiencias A-I y C-I representando:

- a) Temperatura frente a tiempo en la carga.
- b) Potencia de entrada (W).
- c) Velocidades de calentamiento (°C/h).

En segundo lugar se hará un análisis de los parámetros de interés para el almacén como son diferencia de temperatura media (entre la parafina y el agua) y coeficientes de transferencia de energía UA (W/°C).

Las experiencias A-11 y A-13 se representan en las Figuras 7.2.3 y 7.2.4.

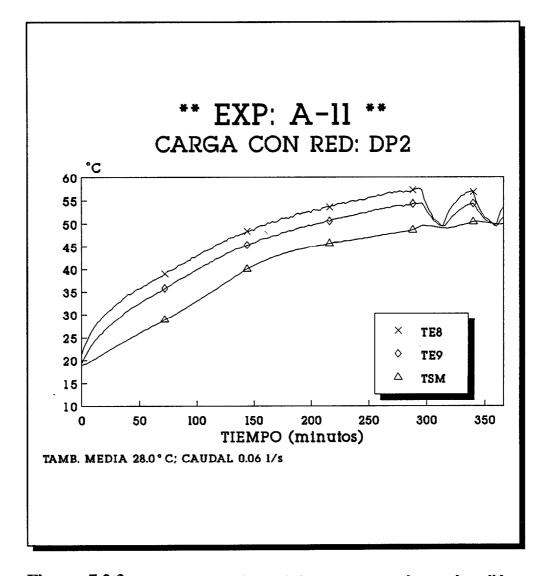


Figura 7.2.3 Variación con el tiempo de las temperaturas de entrada, salida, y media de la parafina (TE8,TE9,TSM) respectivamente en la experiencia de carga con red del DP2, (depósito sin agua).

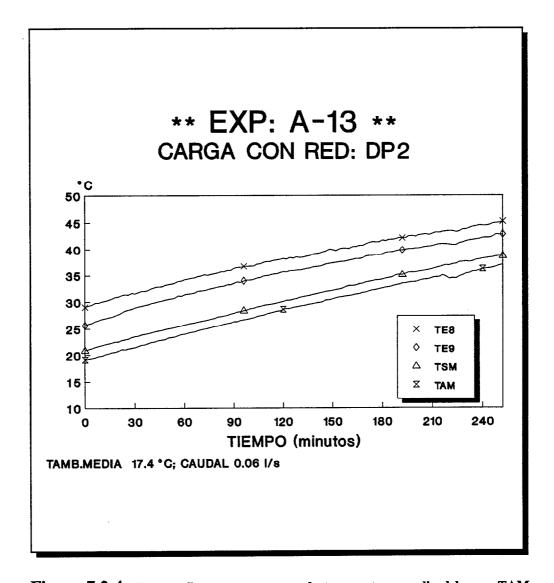


Figura 7.2.4 En esta figura se representa la temperatura media del agua TAM además de TE8, TE9 y TSM en una experiencia de carga con red, (depósito con agua).

Donde TE8 y TE9 representan las temperaturas a la entrada y a la salida respectivamente.

La temperatura TSM representa la temperatura media en la masa de parafina obtenida como promedio de 7 termómetros situados en distintos puntos, siendo:

$$TSM = (TP12 + TP13 + TP14 + TP21 + TP22 + TP24 + TP25)/7$$

La temperatura TAM representa la temperatura media del agua cuando el depósito está lleno (agua que rodea a los tubos contenedores de parafina) siendo:

$$TAM = (TP11 + TP23 + TP25)/3$$

En las Figuras 7.2.5 y 7.2.6 se observan las experiencias C-22 y C-14.

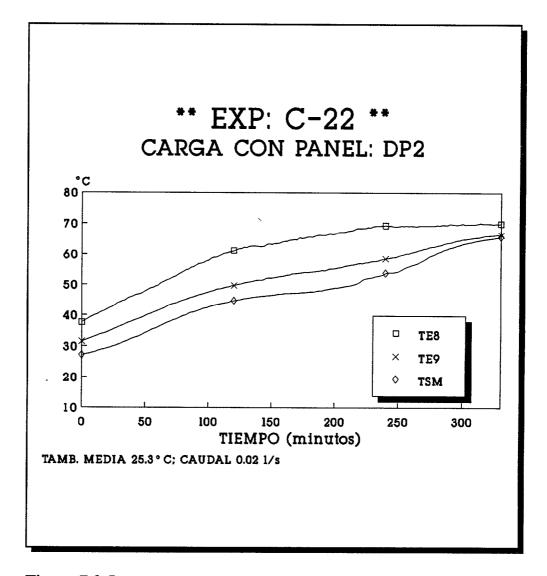


Figura 7.2.5 Carga del DP2 con los paneles P1 y P2; el DP2 se encuentra sin agua.

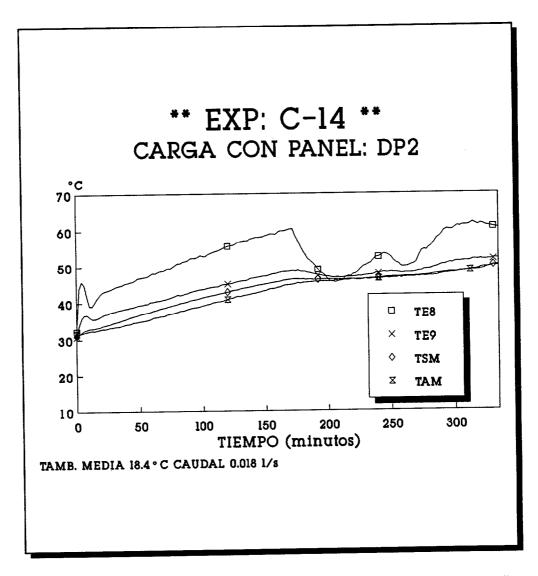


Figura 7.2.6 Carga del DP2 con los paneles P1 y P2; con el DP2 lleno de parafina y agua.

Partiendo como base de los resultados experimentales como los mostrados en las figuras anteriores, se obtendrán algunas características de interés que explican el funcionamiento del almacén. Una de estas características es la potencia de entrada al almacén:

$$p(t) = C_{pf} \dot{m} (T_e - T_s) \quad (W)$$

o en función de los datos experimentales:

$$p_i = C_{pf} \dot{m} (TE8_i - TE9_i)$$

siendo:

 C_{pf} = Calor específico del fluido a presión constante

$$(J/kg^{\circ}C)$$

 $T_e = TE8 = Temperatura de entrada (°C)$

 T_s = TE9 = Temperatura de salida (°C)

 $\dot{m} = Flujo \ m\'asico \ (kg/s)$

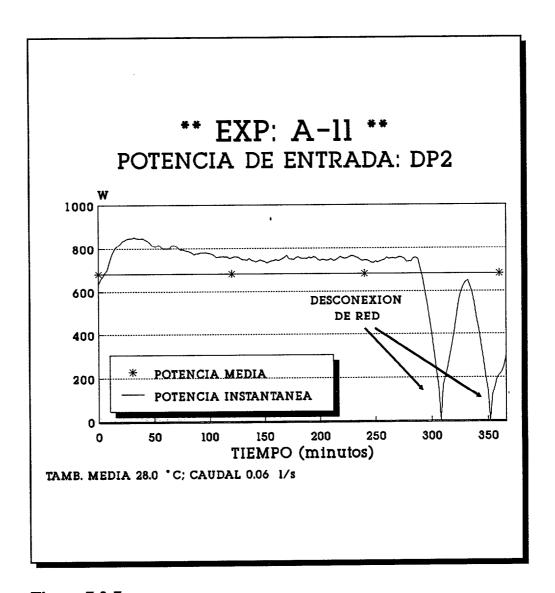


Figura 7.2.7

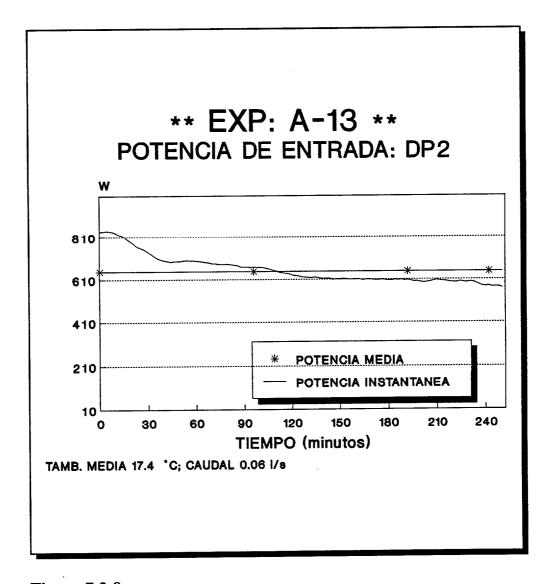


Figura 7.2.8

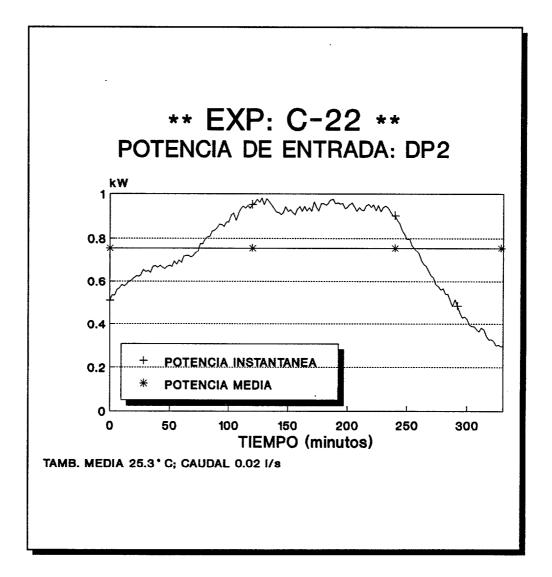


Figura 7.2.9 Se observa como la potencia es máxima en la parte central de la gráfica (medio día) y mínima en los extremos (primeras horas de la mañana y últimas de la tarde).

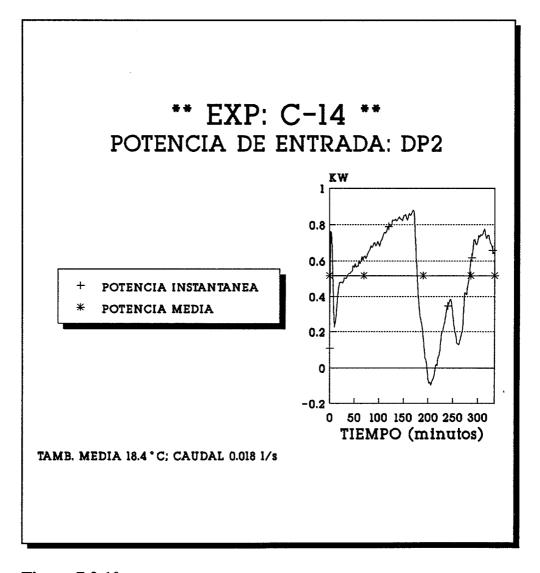


Figura 7.2.10 Se puede observar como alrededor de los 200 minutos la potencia pasa a negativa debido a la ausencia de radiación e inversión en la transferencia de energía.

En las Figuras 7.2.7, 7.2.8, 7.2.9 y 7.2.10 se observan las potencias de entrada para las experiencias A-11; A-13; C-22; y C-14 respectivamente.

La energía total que entra hasta el instante de tiempo t:

$$E(t) = \int_0^t p(t) dt \quad (J)$$

o también:

$$E_i = \sum_{i=0}^{i=N} \frac{p_i + p_{i+1}}{2} Dt$$
 (J)

siendo Dt el intervalo de tiempo entre i e i+1 y N el instante de tiempo final.

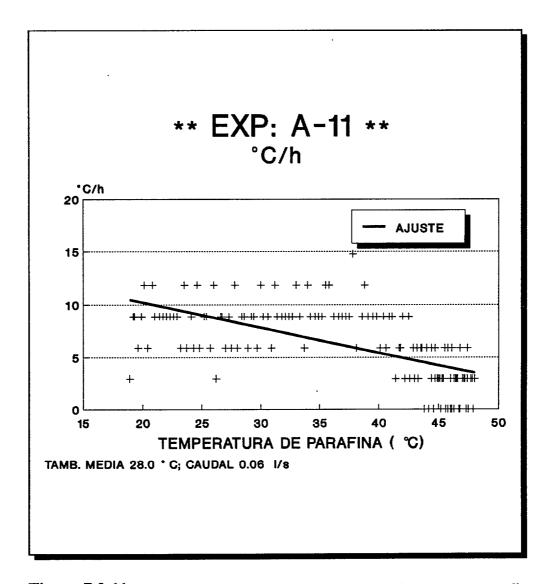


Figura 7.2.11 Velocidad de calentamiento en °C/h frente a la temperatura media de la parafina con el depósito de agua DP2 vacío.

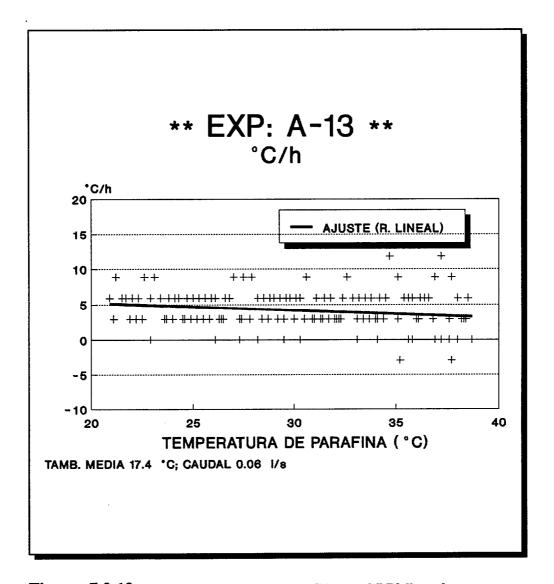


Figura 7.2.12 Velocidad de calentamiento °C/h con el DP2 lleno de agua.

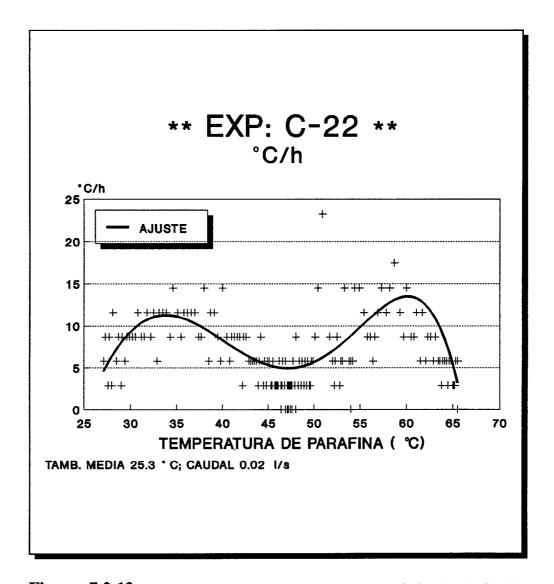


Figura 7.2.13 En la figura se observa como en la zona de fusión la velocidad de calentamiento es mínima.

Otra característica de especial interés es la velocidad de calentamiento de la masa de parafina expresada en °C/h frente a la temperatura media de parafina, característica que nos da información del estado de fusión de la misma, así.

$$\xi = \frac{dT}{dt}$$

en función de los datos experimentales:

$$\xi = \frac{TSM_{i+1} - TSM_i}{Dt} 3600 \quad (\frac{\circ C}{h})$$

siendo TSM_i la temperatura media de la parafina en el instante de tiempo i y Dt el tiempo en segundos entre i e i+1.

Los resultados de las experiencias A-11; A-13 y C-22; se muestran en las Figuras 7.2.11, 7.2.12 y 7.2.13 respectivamente.

La energía acumulada en la parafina desde el inicio de la experiencia hasta el instante de tiempo t se calcula de la siguiente forma:

$$E_s = \int_{T_1}^{T_2} M_s C_{ps}(T) dT$$

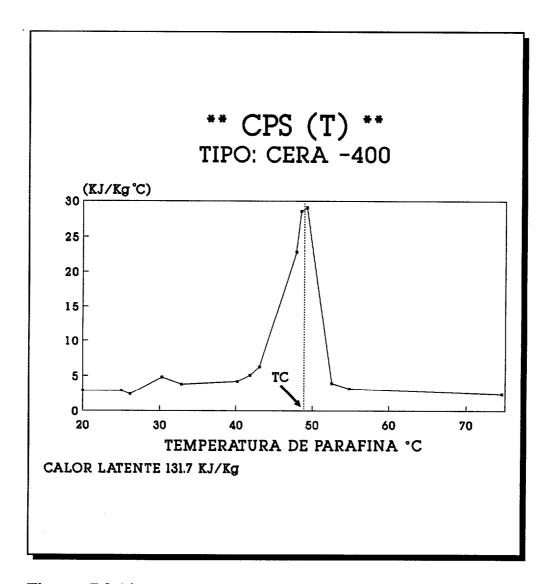


Figura 7.2.14 Calor específico a presión constante de la parafina utilizada en todas las experiencias: CERA-400.

Siendo T_1 y T_2 las temperaturas medias de la parafina en el instante inicial y final respectivamente.

La función CPS(T) es el calor específico a presión constante en función de la temperatura de la parafina, dicha función ha sido obtenida mediante un calorímetro diferencial (Apartado 3.4.2).

La Figura 7.2.14 representa la función CPS(T) para el material con el que se han realizado la totalidad de las experiencias y al que se ha denominado CERA-400.

Dada la simetría aproximada de la curva respecto al eje que pasa por Tc (temperatura de pico), y considerando CPS(T) aproximadamente constante cuando el material se encuentra a una temperatura fuera del intervalo [45;55] °C. Se podrá hacer la siguiente aproximación para E_s , MARSHALL, 1983 (57):

$$E_{s}(TSM_{i}) = \begin{cases} (TSM_{i} - TSMI)M_{s}CPSS & si \ TSM_{i} < 45^{\circ}C \\ (45 - TSMI)M_{s}CPSS + CPLS(TSM_{i} - 45)M_{s} + \lambda \frac{(TSM_{i} - 45)}{10}M_{s} & si \ 45 < TSM_{i} < 55 \\ \lambda + (45 - TSMI)M_{s}CPSS + CPLSM_{s}10 + CPSLM_{s}(TSM_{i} - 55) & si \ TSM_{i} > 55 \end{cases}$$

donde:

CPSS: El Calor específico medio a presión constante de la parafina sólida CPSL: El calor específico medio a presión constante de la parafina líquida

CPLS:
$$\frac{CPSS + CPSL}{2} (\frac{J}{kg^{\circ}C})$$

 λ : Calor latente de la parafina $(\frac{J}{kg})$

TSM;:Temperatura de la parafina en el instante t

TSMI:Temperatura incial de la parafina

Determinada la energía almacenada, los tiempos transcurridos, y la diferencia de temperatura media, se pueden determinar los coeficientes de transferencia de energía promediados en unos intervalos de trabajo; así se han considerado tres zonas claramente diferenciadas:

- 1^a) Intervalo de Trabajo 1º (I.T.1º) TSM_i < 45 °C
- 2^a) Intervalo de Trabajo 2^o (I.T. 2^o) $45 < TSM_i < 55$ °C
- 3^{a}) Intervalo de Trabajo 3^{o} (I.T. 3^{o}) TSM_i > 55 °C

$$(\bar{UA})_{fs} = \frac{\Delta E}{\Delta t \Delta \bar{T}} (\frac{W}{\circ C})$$

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

Análisis de los resultados experimentales

donde:

$$\Delta \overline{T} = \sum_{i=1}^{N} \frac{(T\overline{F}_i - TSM_i)}{N}$$

$$T\overline{F}_i = \frac{(TE8_i + TE9_i)}{2}$$

 ΔE = Incremento de energía interna(J)

 $\Delta t = Intervalo de tiempo (s)$

N = Número de datos

En la Tabla 7.2.2 se resumen para las experiencias indicadas, las diferencias medias de temperatura (definidas anteriormente) para los tres intervalos de trabajo. Así mismo se muestran los coeficientes (UA)_{fs} para los mismos intervalos de trabajo.

Se puede observar como en el I.T.2°, en promedio los coeficientes son claramente mayores que en el I.T.1°, debido a que en el I.T.1° la transferencia de energía se realiza únicamente por conducción, mientras que en el I.T.2° la transferencia de energía se realiza por conducción

y convección, muy beneficiada esta última por la propia estructura del almacén.

En el I.T.3º debido debido a la disminución del gradiente térmico agua-parafina (ver Figura 7.2.5) cuando el tiempo llega al final de la experiencia disminuye la velocidad de transmisión de energía y por ende el coeficiente global de transmisión de energía en este último intervalo.

TABLA 7.2.2

EXP	δΤ° C I.T.1°	δΤ° C I.T.2°	δΤ° C I.T.3°	(UA) _{f8} I.T.1° (W/° C)	(UA) _{fs} I.T.2° (W/° C)	(UA) _{fs} I.T.3° (W/° C)
A-11	7,17	6,78	_ 2	34,1	62	<u>-</u>
A-12	7,55	7,60	-	31	58	<u>-</u>
A-15	7,87	7,74	-	26,3	60	-
A-13	6,3	_	-	21	-	_
A-14	5,42	5,87	-	8,20	40	-
C-19	10,85	11,23	5,6	26	60,4	31,2
C-35	6,4	10,35	7,71	12	75	30
C-22	9,58	11,47	5,25	27,8	67,95	35
C-14	6,7	4,63	-	26	59	- '
C-38	8,72	8,2	-	19,1	41,24	-

² Los recuadros en los que aparece un guión corresponderían a la zona de parafina fundida. Como la experiencia se suspendió inmediatamente después de terminada la fusión, cualquier intervalo hubiera podido introducir un error considerable.

7.3 DESCARGA DE LA ENERGÍA TÉRMICA ALMACENADA EN EL DP2 (EXP:F-I).

Con el conjunto de experiencias denominadas F-I estudiamos el funcionamiento del almacén cuando efectuamos la descarga de energía del mismo.

En la Tabla 7.3.1 se recogen las experiencias realizadas y sus características generales.

El Apéndice D recoge todos los resultados experimentales en forma gráfica.

TABLA 7.3.1

Experiencias de descarga

					
		MASA DE	MASA DE	CAUDAL	
EXP:	FECHA	PARAFINA	AGUA	1/s	CIRCUITO
		kg	kg		
F-1	8-3-91	39,5	97,2	0,141	exterior
F-2	11-3-91	39,5	97,2	0,038	exterior
F-3	30-4-91	39,5	97,2	0,106	exterior
F-4	13-5-91	39,5	0	0,040	interior
F-5	14-5-91	39,5	0	0,043	interior
F-6	21-5-91	39,5	0	0,0168	interior
F-7	23-5-91	39,5	0	0,0263	interior
F-8	27-6-91	39,5	0	0,013	interior
F-9	11-7-91	39,5	97,2	0,038	exterior

Las experiencias realizadas son de dos tipos:

- a) Descarga del almacén utilizando el circuito exterior. (depósito de agua lleno).
- b) Descarga del almacén utilizando el circuito interior. (depósito de agua vacio).

El circuito exterior de descarga lo forman la superficie exterior de los tubos contenedores de parafina y el agua que rodea a estos tubos que sirve de fluido receptor de la energía almacenada en la parafina. El volumen del agua es de aproximadamente 97 litros.

El circuito interior del DP2 lo forma un serpentín que se encuentra situado concéntricamente con los tubos contenedores y que sirve a la vez para realizar la carga del almacén. Dichos tubos tienen aletas de cobre soldadas longitudinalmente para mejorar la transferencia de energía.

Cada experiencia se ha realizado con un caudal que es aproximadamente constante y su valor viene indicado en la Tabla 7.3.1 .

Los dos tipos de experiencias se han realizado siguiendo el esquema de trabajo que se muestra en la Figura 7.3.1 y 7.3.2.

La realización completa de la Experiencia de Descarga del almacén DP2 la hemos dividido en dos fases:

1ª FASE.- En esta fase se produce la homogenización de la temperatura de la parafina, con lo que se consigue de forma aproximada que todos los puntos del material esten fundidos y aproximadamente a la misma temperatura TSMI.

Esta fase comprende en primer lugar la conexión y programación del sistema de adquisición de datos y control. En el programa de control se define la conexión de las resistencias eléctricas de caldeo R2 y R3, que se encuentran dentro del depósito auxiliar y que sirven para calentar el agua que se utiliza como fluido caloportador para fundir la parafina.

El bombeo del agua caliente se realiza con una electrobomba (B3) que es controlada también desde el PC.

La estrategia que sigue el programa de control es mantener de la forma más aproximada posible que todos los puntos de la parafina se mantengan a la misma temperatura. Para ello se actuará sobre las resistencias R2 y R3, conectándolas o desconectándolas según sea necesario.

Esta fase habrá terminado cuando en promedio la temperatura de la parafina sea igual al valor fijado.

2ª FASE.- La segunda fase es la descarga de energía. Para ello se proporciona un caudal constante de agua con la electrobomba B1.

A partir de este momento se empiezan a recoger a intervalos regulares de tiempo las temperaturas que permitan realizar los balances

energéticos necesarios para conocer el funcionamiento del almacén de parafina. Estas temperaturas son:

- Temperatura media de la parafina.
- Temperatura de entrada del agua.
- Temperatura de salida del agua.
- Temperatura ambiente.
- Temperatura media de agua en el depósito.³

³ Esta temperatura se mide para el agua del depósito sólo en el caso (a), cuando se hace la descarga, utilizando el circuito exterior.

En el caso (b) (depósito vacío de agua) los tres termómetros indicarán temperaturas del aire contenido en el depósito.

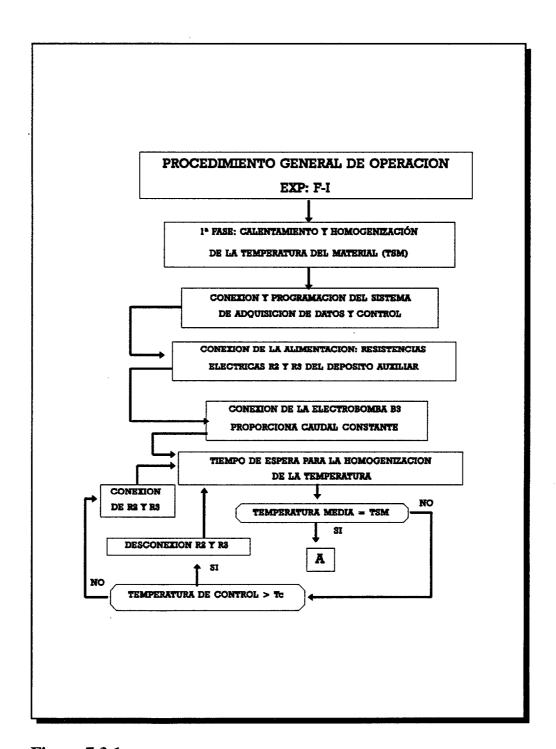


Figura 7.3.1

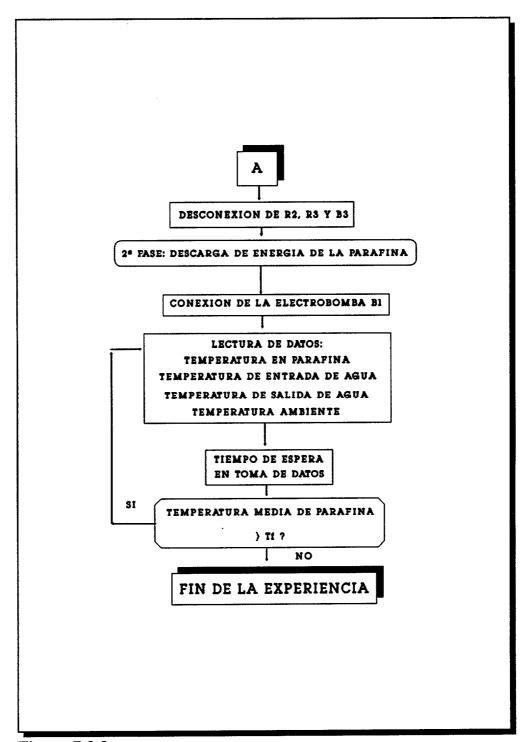


Figura 7.3.2

Al igual que se hizo con las experiencias A-I y C-I se hará previamente un análisis descriptivo de estas experiencias representando:

- 1º) Variación de la temperatura en la descarga frente al tiempo
- 2º) Potencia de descarga frente al tiempo.
- 3°) Velocidades de enfriamiento °C/h.

Posteriormente se hallarán para las distintas experiencias, diferencias de temperaturas medias y coeficientes de transferencia de energía UA.

Para no ser reiterativos no repetiremos las expresiones analíticas de los cálculos, simplemente se harán los comentarios que se consideren de interés.

En las Figuras 7.3.3 y 7.3.4 se pueden observar los resultados de las experiencias F-3 y F-4 para descarga por el circuito exterior e interior respectivamente.

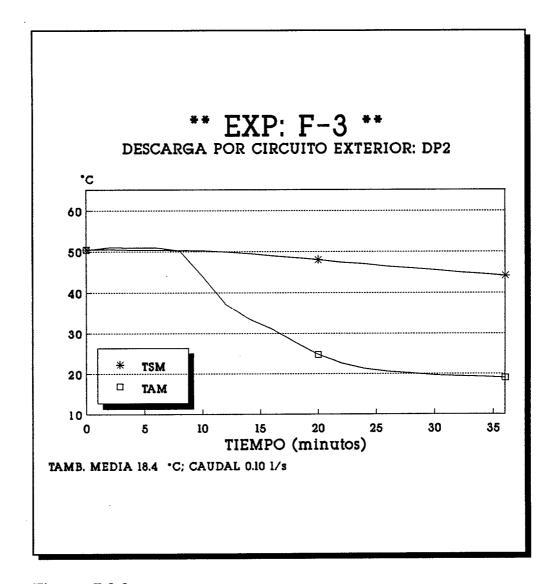


Figura 7.3.3 Descarga por el circuito exterior del DP2.

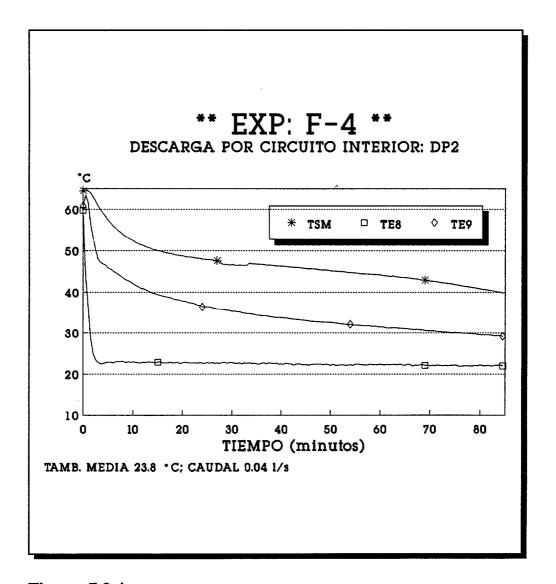


Figura 7.3.4 Descarga por el circuito interior el DP2

La potencia de salida para la EXP:F-4 esta representada en la Figura 7.3.5, se puede observar como a medida que transcurre el tiempo su valor va decreciendo hasta estabilizarse en un cierto valor. La explicación del decrecimiento y posterior estabilización de la potencia se debe a que inicialmente no existe una capa de parafina sólida suficientemente gruesa en la pared de intercambio y la transferencia de energía es mayor. A medida que transcurre el tiempo el espesor va aumentando y esto dificulta el paso de la energía. A partir de un cierto espesor prácticamente es constante la energía cedida por unidad de tiempo.

Este último hecho se ve corroborado en la Figura 7.3.6 donde se observa claramente como al entrar en la fase de solidificación hay un cambio de tendencia en el enfriamiento del material, lo que se pone de manifiesto en la temperatura media de la parafina y salida del agua.

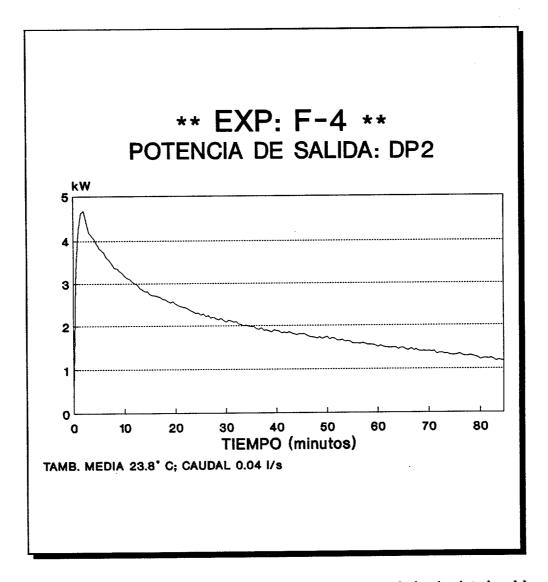


Figura 7.3.5 Potencia de salida en la descarga por el circuito interior del almacén DP2.

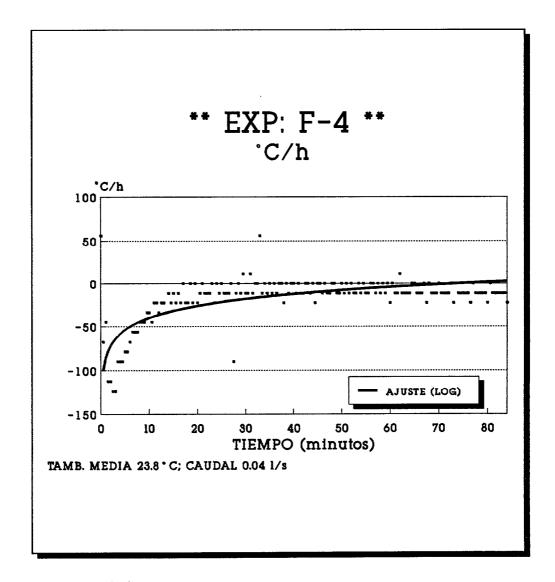


Figura 7.3.6 Velocidad de enfriamiento del material de almacenaje frente al tiempo.

Una vez explicado el aspecto descriptivo de las experiencias F-I; se pasará a resumir los resultados siguientes:

- a) Diferencia media de temperatura parafina-agua (°C)
- b) Coeficiente global de transmisión parafina-agua (W/°C)

En la Tabla 7.3.2 se representan dichos resultados para los tres intervalos de trabajo.

Se observa como al igual que ocurría con las experiencias de carga los valores de los coeficientes de transferencia de energía son claramente mayores en los intervalos de trabajo segundo y tercero, independientemente del circuito de descarga.

TABLA 7.3.2

	\Deltaar{T}	$\Delta \bar{T}$	$\Delta ar{T}$	UA	UA	UA
EXP	°C	°C	°C	(W/°C)	(W/°C)	(W/°C)
				I.T.1°	I.T.2°	I.T.3°
	I.T.1°	I.T.2°	I.T.3°			
F-1	22,1	8,6	-	34,7	448	_
F-2	12,5	2	-	38,3	776,6	-
F-3	-	14,6		-	119,1	-
F-4	16,5	18,4	20,7	17,3	116,6	85
F-5	17,2	18,59	17,50	13	124	80,8
F-6	14,6	15,1	15,0	10,1	86,1	57,6
F-7	14,8	14,9	14,7	7,43	142,9	93
F-8	10,7	10,53	14,53	12,14	70,8	62,7
F-9	18	10,0	-	9,31	121,6	-

7.4 CARGA DE ENERGÍA CON RED EN EL DP1 (EXP: D-I)

Para estudiar el efecto de las aletas de cobre sobre el coeficiente global de transferencia de energía, se ha realizado un conjunto de 16 experiencias con el depósito de parafina DP1. Este depósito no está provisto de aletas, este hecho nos permite estudiar la influencia de las mismas sobre el coeficiente global de transferencia de energía. Para ello los resultados de las experiencias hechas en el DP1 se comparan con las de las realizadas en el DP2, que sí dispone de aletas.

Las experiencias consisten en cargar con energía de la red el DP1. El procedimiento de carga es igual al explicado en el apartado 7.2 (EXP: A-I).

El conjunto de experiencias se encuentra detallado en el Apéndice E de ellas se analizan en detalle las indicadas en la Tabla 7.4.1.

TABLA 7.4.1

Características generales de D-I

EXP:	FECHA	MASA PARAF. kg	MASA AGUA kg	CAUDAL 1/s	CIRCUITO DE CARGA
D-2	2-8-91	19	0	0,048	INTERIOR
D-4	6-8-91	19	0	0,036	INTERIOR
D-5	7-8-91	19	0	0,036	INTERIOR
D-6	8-8-91	19	0	0,040	INTERIOR
D-7	9-8-91	19	0	0,06	INTERIOR

Al igual que se hizo en el apartado 7.2 se divide el intervalo de temperatura de trabajo en tres zonas (IT1, IT2, IT3). Estos son los intervalos representativos de los procesos físicos que ocurren en la carga del almacén.

En la Tabla 7.4.2 se resumen los resultados obtenidos.

TABLA 7.4.2

EXP	UA W/°C	UA W/°C	UA W/° ^C	Δt	Δt	Δt
	IT1	IT2	IT3	°C	°C	°C
				IT1	IT2	IT3
D-2	25,9	63	-	8,5	8,9	-
D-4	31,9	57	-	6,6	7,8	-
D-5	25,8	53,8	-	6,9	8,5	-
D-6	34,8	56,8	-	6,0	8,2	-
D-7	19,0	52,5	-	8,0	8,6	-

El análisis de los resultados muestra que:

1°) La transferencia de energía en el IT2 está entre 1,63 y 2,76 veces la que se produce en el IT1, para una diferencia de temperatura (entre la parafina y el fluido caloportador), comprendida entre 6,0 y 8,9 °C.

2°) Comparando los coeficientes globales de transferencia de energía U (W/m²°C) para el DP1, con 0,82 m² de área de transferencia de energía y para el DP2 con aproximadamente 0,26 m² de área de transferencia de energía, referida en ambos casos al serpentín interior. Se observa una mejora del coeficiente de transferencia de energía para el DP2 de entre 2 y 3 veces en relación con el DP1.

7.5 DESCARGA DE LA ENERGÍA TÉRMICA ALMACENADA EN EL DP1 (EXP:G-I).

La influencia de las aletas sobre la transferencia de la energía en la descarga es más importante que en la carga, debido a que en la descarga, toda la transferencia energética se realiza únicamente por conducción.

Si nó dispusiéramos de aletas, en los primeros instantes de la descarga el coeficiente global de transferencia de energía (U W/m²oC) sería elevado. Pero a partir de que el espesor de la parafina sólida, sobrepasa los 2 centímetros, éste baja considerablemente.

Para estudiar cuantitativamente el efecto de las aletas, se ha realizado un conjunto de 6 experiencias con el DP1 (ver Apéndice F).

De esas 6 experiencias 5 se han realizado utilizando el circuito

de descarga interior (éste no dispone de aletas). Comparando éstas con las realizadas con el DP2 se puede considerar la influencia de las aletas sobre el coeficiente U.

En La Tabla 7.5.1 se resumen los resultados obtenidos.

TABLA 7.5.1

EXP	UA W/°C	UA W/°C	UA W/°C	Δt	Δt	Δt
				°C	°C	°C
	IT1	IT2	IT3	IT1	IT2	IT3
G-1	-	62,6	179,4	-	20,2	20,4
G-2	_	79,4	298	-	18,0	10,3
G-3	-	76,4	136,4	-	14,2	14,6
G-4	-	81,5	149,0	_	20,4	17,2
G-5	-	56,5	127,6	_	16,2	14,4

De los resultados reflejados en las Tablas 7.5.1 y 7.4.2 y se deduce:

- 1°) La transferencia de energía en el proceso de descarga en el IT3 está entre 1,78 y 3,7 veces la correspondiente para el IT2 para una diferencia media de temperatura entre 14,4 y 20,4 °C.
- 2°) Si se comparan los coeficientes globales de transferencia de energía U para el DP1, con 0,82 m² de área de transferencia de energía y para el DP2 con aproximadamente 0,26 m², (estas áreas corresponden al serpentín interior). Se observa una mejora entre 4 y 5 veces del coeficiente de transferencia de energía para el DP2 en esta situación de descarga.

También se observa como ya se indicó previamente, que en la descarga la presencia de las aletas mejora la transferencia de energía de forma más significativa que en la carga (Apartado 7.4), debido a que en la descarga la transferencia de energía se efectua únicamente por conducción, mientras que en la carga el proceso es por conducción y convección simultáneamente, y la mejora de transferencia por las aletas, es menos significativa.

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

7.6 ENERGÍA PROCEDENTE DE LOS AEROGENERADORES (EXP: H-I)

Este apartado se ha dividido en dos partes, en una primera se describirá brevemente el procedimiento de control utilizado. En la segunda se hará una descripción de las experiencias que se han realizado así como de los resultados obtenidos.

a) Control.-

Una parte de la energía total que se recoge en el SES procede de los aerogeneradores 1 y 2 y es almacenada en los depósitos de agua DA1 y DA2 respectivamente.

La carga que se encuentra conectada a los aerogeneradores tiene naturaleza puramente resistiva (resistencia de caldeo introducida en los depósitos de agua). Para evitar que las aspas pierdan mucha velocidad ante una disminución repentina de la intensidad de viento o un cambio brusco en la dirección de éste, se desconecta la carga cuando se presenten situaciones de ese tipo. Para ello se han utilizado dos tipos de control:

- 1º) Control analógico (CA)
- 2°) Control digital (CD)

El control analógico consiste en realimentar un circuito eléctrico

de tipo analógico por medio de la tensión entre dos de las fases de salida del aerogenerador previamente acondicionada y rectificada.

En el <u>control digital</u> también se toma la tensión entre dos fases como realimentación, pero en este caso es leida por un PC (haciendo previamente la transformación analógica-digital).

Tanto en un caso como en otro, la estrategia de control consiste en mantener la carga conectada siempre que la potencia del viento sea suficiente para mantener una tensión entre fases, capaz de proporcionar una potencia eléctrica útil.

El utilizar una carga de naturaleza puramente resistiva hace que el margen de control sea muy amplio (amplio margen de potencia de salida). Además, el no tener limitación ni en la frecuencia ni en la tensión hace que los aerogeneradores sean constructivamente muy sencillos (generadores excitados por imanes permanentes).

Se han realizado múltiples experiencias con los dos tipos de controles. Cada uno tiene sus ventajas e inconvenientes. El CA es mucho más sencillo que el CD, tiene una respuesta que es prácticamente instantánea. El mayor inconveniente es la rigidez de la pauta de control (exigencias de operaciones manuales sobre los circuitos analógicos para variación del rango de la potencia de entrada).

El CD por el contrario es más complejo, la respuesta puede ser

muy rápida (depende de la velocidad de muestreo); pero su mayor ventaja radica en la flexibilidad para variar las pautas de conexión o desconexión de carga. Así mismo existe la posibilidad de guardar la información de las realimentaciones (tensión entre fases) y potencias para, posteriormente, hacer un análisis de los resultados y mejorar el rendimiento de los aerogeneradores.

b) Experiencias realizadas.-

Para conocer la energía que cada aerogenerador introduce en su depósito respectivo, se hace un muestreo de la potencia a intervalos regulares de tiempo (intervalos de 2 minutos). La medida de la potencia se realiza indirectamente por medio de la lectura de la tensión en bornes de la carga. La conversión de la potencia se realiza por medio de las fórmulas siguientes:

1^a) Potencia del aerogenerador 1

$$66,84 * V_{MI}^2 = P_1 \quad (W)$$

2^a) Potencia del aerogenerador 2

$$68,98 * V_{M2}^2 = P_2$$
 (W)

Siendo V_M la tensión medida por la tarjeta A/D en voltios (después de los circuitos acondicionadores).

Los datos recopilados de las potencias de los aerogeneradores se encuentran agrupados dentro de las experiencias que se han denominado (C-I) y (E-I).

Las experiencias (C-I) y (E-I) contienen datos de potencias medidas por el día y por la noche respectivamente.

Simultáneamente a la recogida de datos de potencia en el SES, un sistema automático situado en el Zurbarán (Estación Meteorológica situada a 500 m aproximadamente del SES) recoge datos de velocidades medias de viento cada 10 minutos.

En la Figura 7.6.1 se representa la potencia instantánea total recogida por los dos aerogeneradores conjuntamente, así como la velocidad del viento. Esos datos corresponden a la experiencia C-33.

Es conveniente realizar un análisis de regresión entre la variable aleatoria velocidad de viento "VV" (medida en la Estación del Zurbarán) y la variable aleatoria potencia total "PT" de los aerogeneradores, para de esa forma poder estimar la potencia de los aerogeneradores en aquellos días en que por cualquier motivo no se dispusieran de esos datos.

Para hacer el análisis de regresión se tomaron un total de 1179

datos entre lecturas de potencia y velocidades de viento (EXP: C-33; E-6; C-34; E-7).

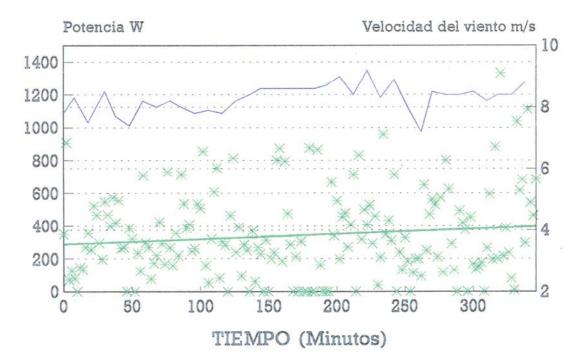
En la Tabla 7.6.1 se resumen los datos después de hacer las medias con grupos de 10 datos.

La función que mejor ajusta los datos es un polinomio de 2º grado cuya expresión es:

$$PT = a_1 * VV + a_2 * VV^2$$

DATOS DE LOS AEROG. 1 Y 2

EXP:C-33



* POT. TOTAL P1+P2 (W) - VELOCIDAD DEL VIENTO

Viento en Est. del Zurbarán

Figura 7.6.1

TABLA 7.6.1

Valores promediados de las Experiencias
C-33; E-6; C-34; E-7
con un número total de datos de 1179

VELOCIDAD DEL VIENTO (m/s)	POTENCIA TOTAL (W)
7,9	305,3
8,1	337,0
8,7	338,9
8,3	332,0
8,0	430,3
7,6	335,9
7,3	342,6
6,3	249,0
6,8	266,4
7,2	306,8
7,3	300,3
6,9	215,2
5,6	221,0
6,3	225,0
5,4	071,8
5,7	127,4
5,6	211,0
5,9	178,5
5,4	117,3
4,8	059,6
3,8	046,7
2,7	000,1
2,3	0,000
2,2	0,000
2,0	0,000

Los intervalos de confianza del 95% para los coeficientes estimados se representan en la Tabla 7.6.2 .

En la Figura 7.6.2 se representa la curva de regresión así como los datos experimentales.

TABLA 7.6.2

Intervalos de confianza del 95%

para los coeficientes estimados

COEFICIENTES ********	COEFICIENTE ESTIMADO	LÍMITE SUPERIOR	LÍMITE INFERIOR
a1	-9,34634	2,9674	-21,660
a2	6,63526	8,38854	4,88199

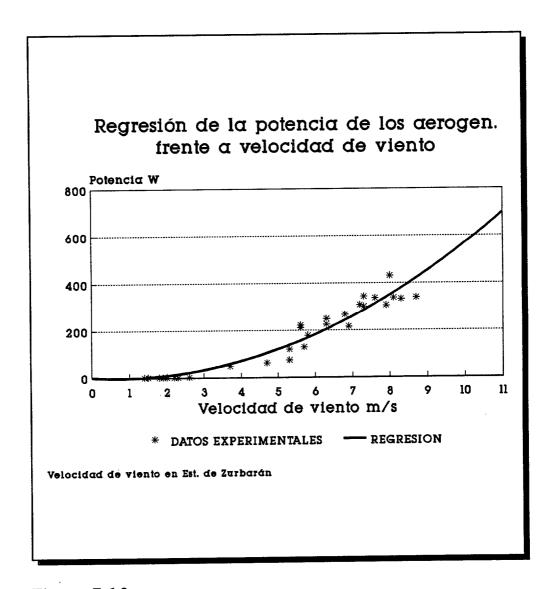


Figura 7.6.2

El tipo de función que mejor se ajusta coincide con la obtenida por diversos investigadores para aerogeneradores de este tipo, (Ver "Renewable heat and electricity concept for industrial applications in UK"; SS Thabit. 1985 (86)).

Los resultados experimentales obtenidos en el año 91 indican que existe una relación de dependencia directa (anual) entre la potencia de los paneles y la potencia de los aerogeneradores. Esto se vio en el Apartado 6.3, que estudia la complementariedad anual entre las variables aleatorias "TARA" y "TAVI".

En cuanto a la complementariedad diaria es más importante en la "Zona de estudio". En la Figura 7.6.3 se tiene la evolución de la potencia de los paneles **P2** y **P3** y los aerogeneradores 1, 2 desde las 12:00:00 del día 25-6-91 a las 12:00:00 del día 26-6-91, que corresponden a las experiencias (C-33; E-6; C-34).

En esa figura podemos comprobar una ventaja indudable de estos SES y es su complementariedad diaria. Aun siendo la potencia por metro cuadrado de la energía del viento menor que la intensidad de radiación, es más constante a lo largo del día, incluida la noche, no estando en ese periodo de tiempo disponible la intensidad de radiación.

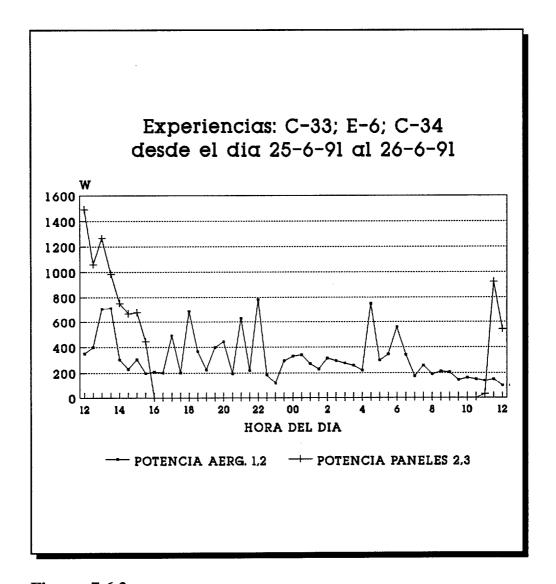


Figura 7.6.3

Es interesante comparar la velocidad de calentamiento del agua (° C/h) de los depósitos, cuando se realiza con los paneles y cuando se hace con los aerogeneradores. Para ello se partió de un total de 116 valores de potencia y 116 de velocidad de calentamiento (EXP:C-35), y se hicieron medias con grupos de 20 valores. En la Tabla 7.6.3 se representan los valores promedios obtenidos para diferentes potencias de entrada del DA2, así como su velocidad de calentamiento. En la Figura 7.6.4 se observa la función que las relaciona.

Velocidad de calentamiento del DA2 utilizando como fuente el P2 y P3

TABLA 7.6.3	
POTENCIA P2 y P3 (W)	CALENTAMIENTO DA2 °C/h
1332	9,2
1365	9,19
1293	8,43
1177	7,55
1001	6,67

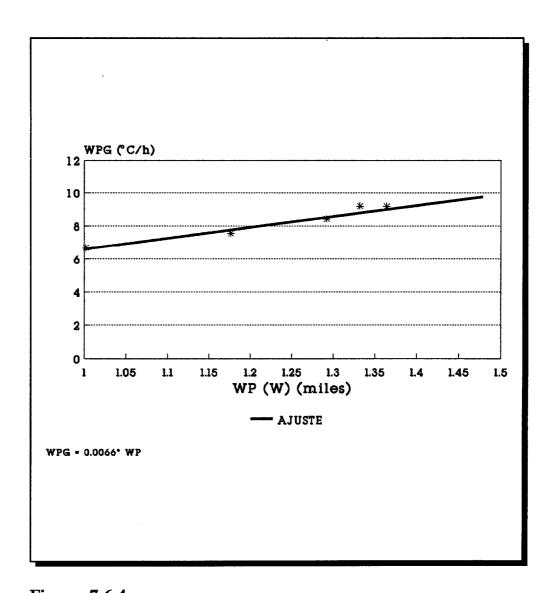


Figura 7.6.4

Velocidad de calentamiento °C/h utilizando como fuente Aerg.1

TABLA 7.6.4	
POTENCIA	CALENTAMIENTO
AEROG.1 W	DA1 °C/h
231	1,3
229	1,1
197	0,9
177	0,6
136	0,8
147	0,8

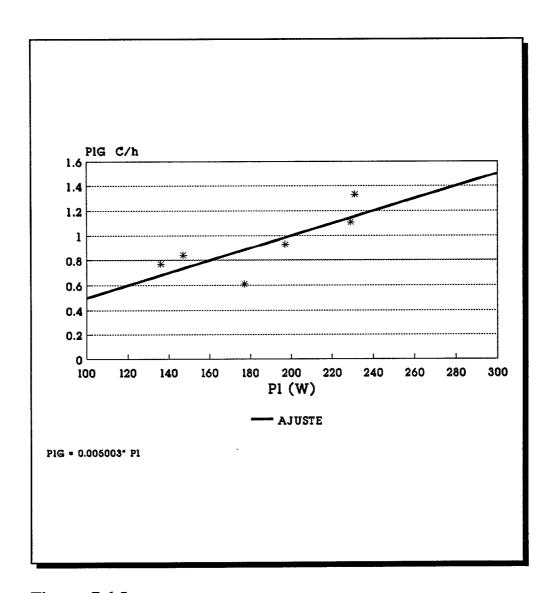


Figura 7.6.5

En la Tabla 7.6.4 se representa la potencia del aerogenerador 1 frente a la velocidad de calentamiento.

En la Figura 7.6.5 se observa la relación que existe entre ambas magnitudes.

En ambas Figuras 7.6.4 y 7.6.5 se puede ver como las pendientes de ambas rectas son prácticamente iguales, siendo lígeramente superior la correspondiente a la potencia de salida de los paneles **P2** y **P3**. Ello es debido posiblemente a la alta dispersión en las potencias en el aerogenerador, mientras que en los paneles, ésta es mucho menos dispersa, influyendo en el ajuste de los datos.

El hecho de que ambos coeficientes sean prácticamente iguales demuestra que los rendimientos térmicos de la energía eléctrica introducida por los "aerogeneradores" es igual a la introducida por los "paneles", medidas ambas potencias en la "resistencia de caldeo" y "temperatura de entrada y salida de agua" respectivamente.

Para terminar con este apartado se resume en la Tabla 7.6.6 los incrementos de temperaturas alcanzados en el DA1 originados por la energía proporcionada por el aerog1, según haya sido la velocidad media del viento en el periodo de tiempo que se indica. La lectura de la temperatura se ha hecho leyendo directamente el termómetro que el depósito tiene situado en la parte central.

TABLA 7.6.6

Incremento de temperatura frente
a velocidad de viento
volumen de agua 150 dm³

VELOCIDAD PROMEDIO m/s	INCREMENTO TEMPERATURA °C	TIEMPO TRANSCURRIDO h
3,9	27	13
5,3	5	5
6,4	20	9
6,5	25	9
7,3	40	12
6,1	25	15
6,2	13	8
6,9	25	8
5,9	25	24
5,6	20	10
5,4	30	19
5,9	20	8

7.7 AJUSTE DE LOS PARÁMETROS DEL ALMACÉN DE ENERGÍA EN UN MODELO DE COEFICIENTES CONSTANTES

Una vez que se ha seleccionado el modelo del almacén, Ecuaciones (5.4.1-12) y (5.4.1-13), la siguiente tarea es obtener estimaciones para los parámetros que intervienen en el mismo. Una técnica muy aceptada para este propósito es el método de mínimos cuadrados (MC).

Este método estima los parámetros en las ecuaciones seleccionadas mediante la minimización de la suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores observados de la variable respuesta y de aquellos proporcionados por las ecuaciones de predicción (5.4.1-12) y (5.4.1-13). Estos valores se conocen como los estimadores por mínimos cuadrados (EMC) de los parámetros, (ver :"Identification of UA in Thermal Storage Devices-Two Methods"; Richard Marshall) (60).

Las ecuaciones de predicción del almacén se han resuelto en dos situaciones distintas, una para la carga y otra para la descarga del almacén, tal y como se indica en la Tabla 7.7.1. En la misma se indican las dos experiencias tipo consideradas. La C-14 corresponde a una experiencia tipo de carga con panel; estando el DP2 lleno con 39,5 Kg de parafina y rodeando a ésta un volumen de agua de 97,2 Kg.

La EXP:F-5 corresponde a una experiencia de descarga por el

circuito interior, estando el DP2 en este caso vacio de agua. El resto de las características generales se tienen en el Apéndice D.

TABLA 7.7.1

SIMULACIÓN	MASA DE AGUA (kg)	MASA DE PARAFINA (Kg)	COND. DE CONTORNO
C-14SIM	97,2	39,5	VARIABLE,¹ CARGA CON PANEL
F-5SIM	0	39,5	CONSTANTE ² DESCARGA POR CIRCUITO INTERIOR

Las ecuaciones del almacén se resuelven numéricamente con un programa escrito en Quick-Basic llamado "Contor3" y cuyo listado se encuentra en el Apéndice A. Entre otros resultados el programa calcula la temperatura del agua a la salida del almacén (Tf_i), para unos coeficientes determinados (UA)_i. A continuación y, teniendo la temperatura de salida del agua (TE9_i) obtenida experimentalmente, se puede hallar el error cuadrático

¹ Temperatura de entrada

² Temperatura de entrada

medio:

$$E\overline{CM}^2 = \frac{\sum_{1}^{N} (Tf_i - TE9_i)^2}{N}$$

Esta operación se vuelve a realizar variando uno de los coeficientes y dejando el resto constantes, hasta obtener una función que relacione el error cuadrático medio frente al coeficiente de ajuste. Este procedimiento se vuelve a realizar con el resto de los coeficientes obteniendo un conjunto de curvas, a las que se hallarán los mínimos. Se escogerá aquella combinación de parámetros que dé el error cuadrático mínimo.

Los datos introducidos en el programa "Contor3" que son comunes a los dos experiencias son:

Calor latente (J/Kg) = 131586 (CERA-400)

Calor específico de la parafina líquida(J/kg°C) = 2100

Calor específico de la parafina sólida (J/kg°C) = 2900

Temperatura de solidificación media (°C) = 48,5

Conductividad térmica media de la parafina (W/°C.m) = 0,24

Conductividad térmica media del agua(W/°C.m) = 0,26

Volumen de parafina medio (m³) = 0,053

Masa de parafina (kg) = 39.5

Volumen de agua en el intercambiador (m³) = 0,00056

Masa de agua en el intercambiador (kg) = 0,56

Longitud del intercambiador (m) = 7.2

Masa de cobre en el almacén (kg) = 32

Calor específico del cobre (J/kg°C) = 382

Calor específico del agua (J/kg°C) = 4179

Los parámetros de la Exp:C-14 son:

Número de pasos de ficheros de impresión = 240

Número de nodos = 6

Coeficiente matricial máximo para el tiempo = 242

Paso de tiempo DT (s) = 0.5

Temperatura final TS(j,N) (°C) = 75

Número de elementos de la condición de contorno = 8

a) Las condiciones iniciales de contorno y parámetros de ajuste para la experiencia

C-14 son:

1°) Condiciones iniciales:

$$Tf_i^0 = 31 \ (^{\circ}C); \ i = 0,1,...6$$

$$Ts_i^0 = 31 \ (^{\circ}C); \ i = 0,1,...,6$$

2º) Condiciones de contorno:

En la Figura 7.7.1 se indica la temperatura de entrada de agua y la temperatura media del agua que rodea a la parafina.

3º) Parámetros de ajuste:

Los parámetros obtenidos para este tipo de experiencia (C-I) que realizan el mejor ajuste son:

$$(\overline{UA})_{sf} = 45.2 \quad \frac{W}{\circ C}$$

$$(\overline{UA})_{sa} = 1 \frac{W}{\circ C}$$

$$(\overline{UA})_{fa} = 22 \frac{W}{\circ C}$$

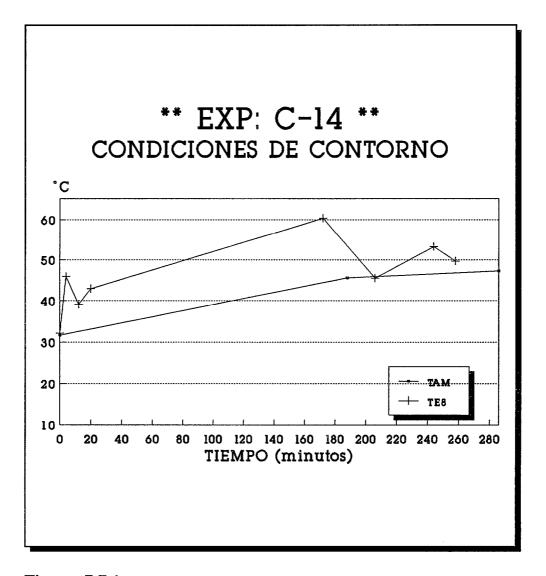


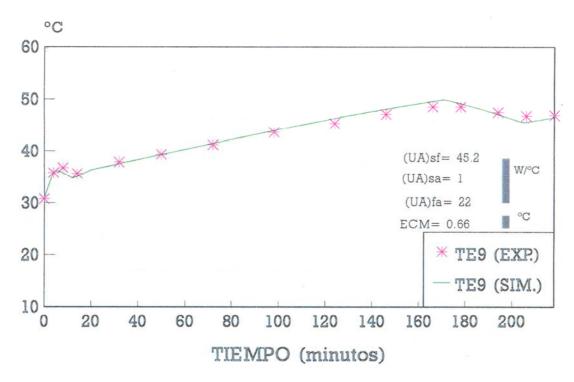
Figura 7.7.1

La temperatura ambiente media y el caudal másico son 18,4 °C y 0,018 l/s respectivamente.

El resultado del ajuste se observa en la Figura 7.7.2 donde se indica el error cuadratico medio obtenido (0,6 °C).

Los valores obtenidos corresponden al ajuste de las ecuaciones diferenciales para una temperatura media de la parafina menor de 45 °C.

** SIMULACION: C-14 ** AJUSTE 9°



TAMB. MEDIA 18,4 °C, CAUDAL 0,018 l/s

Figura 7.7.2

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

Análisis de los resultados experimentales

b) Las condiciones iniciales, de contorno y parámetros propios de la EXP:F-5 son:

1°) Parametros diversos.-

Numeros de pasos de fichero de impresión = 300

Coeficiente matricial máximo para el tiempo = 302

Paso de tiempo DT (s) = 0.1

Temperatura final de proceso (°C) = 43

Número de elementos de condición de contorno = 5

Caudal (1/s) = 0.04

 $T_{amb.}$ media (°C) = 22,6

2º) Condiciones de contorno

TFE(0,0001) = 36,8 (Tiempo en segundos)

TFE(60) = 30,2

TFE(120) = 24,4

TFE(150) = 22,4

TFE(100000) = 22,4

3°) Condiciones iniciales.-

$$T_{f_i}^0 = 60,7 \ (^{\circ}C); \ t = 0,1...,6$$

 $T_{s_i}^0 = 60,7 \ (^{\circ}C); \ t = 0,1...6$

En la Figura 7.7.3 se observa como varía el error cuadrático medio frente al coeficiente medio de ajuste.

7.8 ANÁLISIS ADIMENSIONAL DEL ALMACÉN DE ENERGÍA

El buen ajuste observado entre el modelo y los datos experimentales para varias condiciones de contorno e iniciales garantiza la validez del modelo. Se está pues en condiciones de estudiar la unidad del almacén bajo varias condiciones. Para ello es adecuado hacer un planteamiento del modelo en su forma adimensional tal y como fue explicado en el Apartado 5.4.1.

Diversas series de cálculos han sido realizados para varios parámetros adimensionales. Las variables adimensionales analizadas son la temperatura de salida de agua y la temperatura media de parafina frente al tiempo.

ERROR CUADRATICO MEDIO

(SIM: F-5)

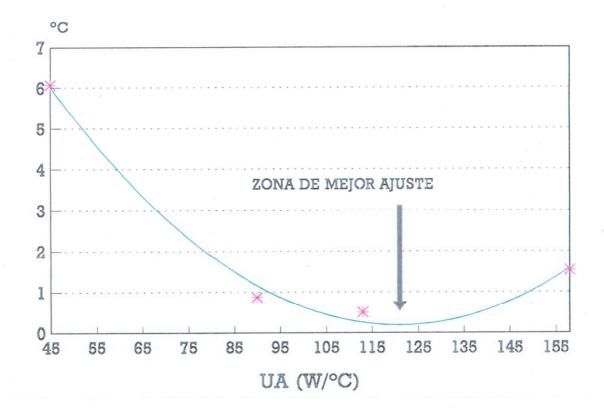


Figura 7.7.3

En el modelo se han supuesto (NTU)fa = 0 y (NTU)sa = 0 para simplificar el análisis sin que ello signifique una pérdida de generalidad en los resultados que se obtienen.

1º) Efecto del Número de Unidades de Transmisión (NTU)

Se ha estudiado la característica de la carga del almacén cuando:

$$NTU = 0.6$$
; $NTU = 1.8$; $NTU = 3.6$

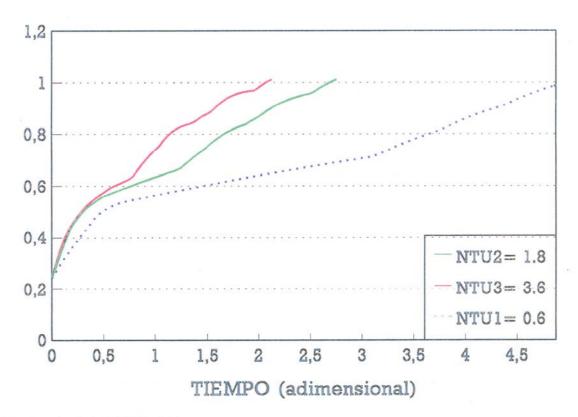
Las condiciones comunes son (según quedaron definidas en el Apartado 5.4.1) :

$$RS = 0.99$$
; $CI = 0.24$; $CC = 1.11$; $STE = 0.22$

La Figura 7.8.1 muestra la temperatura media de la parafina frente al tiempo, ambas adimensionales. Cuando el NTU decrece el aplanamiento de la temperatura en la zona de fusión es más pronunciado y el tiempo para que el material llegue a fundir completamente es más largo.

En la Figura 7.8.2 se observan idénticas conclusiones para la temperatura adimensional de salida de agua. Además para NTU menores la potencia de entrada al almacén es menor. Eso hace que el tiempo de fusión sea mayor.

TEMPERATURA ADIMENSIONAL MEDIA (de parafina)



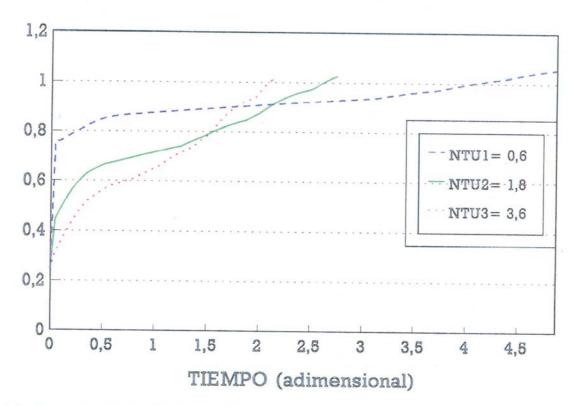
Rs=0.99; C.I.=0.24; C.C.=1.11 STE=0.22

Figura 7.8.1

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

TEMPERATURA ADIMENSIONAL

(salida de agua)



Rs = 0,99; C.I.= 0,24; C.C.= 1,11; STE = 0,22

Figura 7.8.2

2º) Efecto de la Capacidad Calorífica Relativa (RS)

En la Figura 7.8.3 se han representado 3 series de valores que corresponden a las capacidades caloríficas (RS = 0.99; RS = 0.97; y RS = 0.94).

Como condiciones comunes se han utilizado (NTU = 0.60); C.I. (condiciones iniciales) = 0.24; C.C. (condiciones de contorno) = 1.11. STE = 0.22.

La variable dependiente representa la temperatura adimensional de salida del agua.

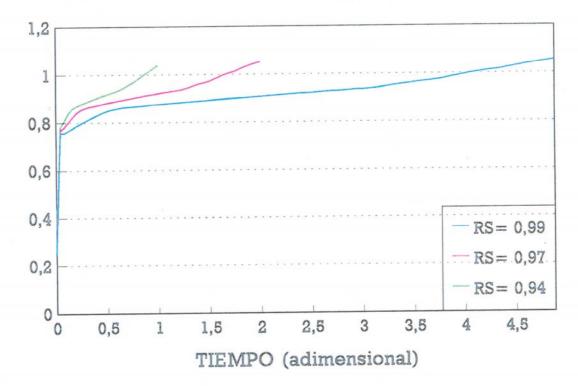
Se observa como al disminuir la RS para todos los instantes de tiempo la temperatura crece más rápidamente que en los demás casos, lo que hace que para iguales condiciones de salida el tiempo sea menor.

Al aumentar RS el tiempo en que la temperatura permanece con crecimiento lento es mayor.

Idénticas conclusiones aunque más pronunciadas pueden ser observadas en la Figura 7.8.4 donde se representa la temperatura media adimensional de la parafina frente al tiempo adimensional.

TEMPERATURA ADIMENSIONAL

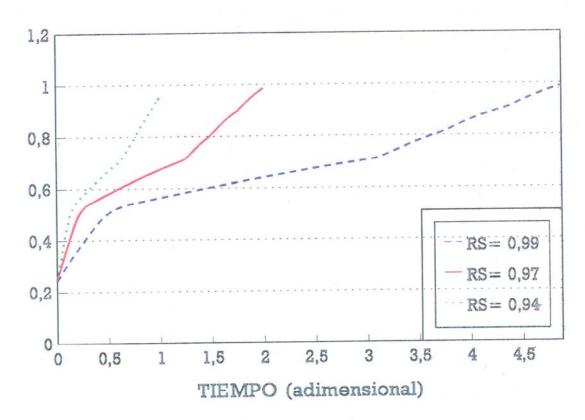
(salida de agua)



NTU = 0.6; C.I.= 0.24; C.C.= 1.11

Figura 7.8.3

TEMPERATURA DE PARAFINA



NTU = 0,6; C.I.= 0,24; C.C.= 1,11

Figura 7.8.4

3º) Efecto de la condición de contorno (C.C.)

Todas las series de valores se han realizado con NTU = 0.60; CI = 0.24; RS = 0.94; STE = 0.22 y las condiciones de contorno utilizadas son:

$$CC = 0.88$$
; $CC = 1$; $CC = 1.1$.

En la Figura 7.8.5 se observa como a medida que la condición de contorno disminuye, el tiempo en que se alcanzan iguales condiciones finales aumenta. Así para CC = 1,1 la velocidad de calentamiento es en promedio superior en 3 veces que para CC = 0,88 según se observa en la Tabla 7.8.1.

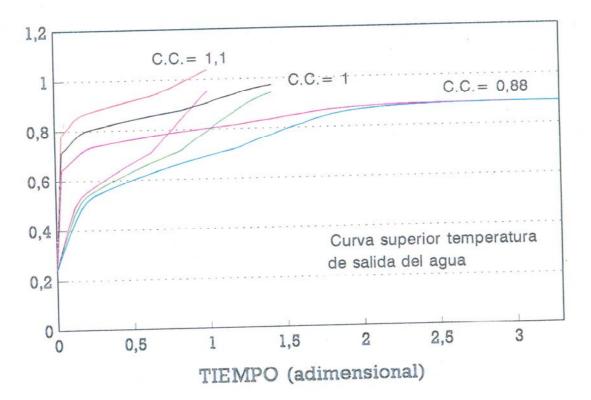
TABLA 7.8.1

Condición de contorno	velocidad de calentamiento
0,88	0,27
1	0,58
1,1	0,88

Así mismo el tiempo total en que el material tarda en fundir es mayor para condiciones de contorno menores.

TEMPERATURAS ADIMENSIONALES

Influencia de la condición de contorno



NTU = 0.60; C.I.= 0.24; RS = 0.94; STE = 0.22

Figura 7.8.5

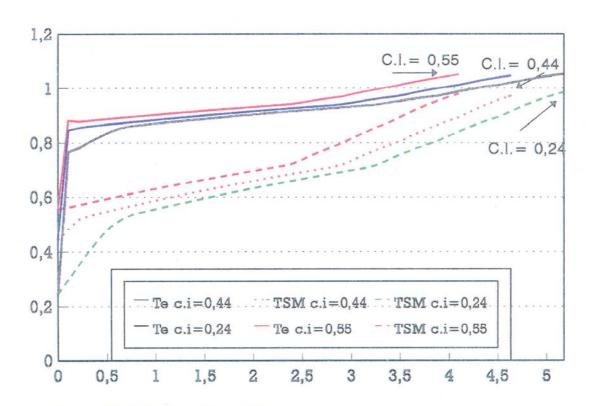
4°) Efecto de las condiciones iniciales (C.I.)

El efecto de las CI fue investigado para tres valores de 0,24, 0,44 y 0,55. La historia temporal de la temperatura de salida de agua y la temperatura media de la parafina ambos adimensionales se representan en la Figura 7.8.6.

En los primeros momentos del proceso las temperaturas son muy diferentes en su evolución, debido precisamente a que parten de condiciones iniciales diferentes. Al llegar a la temperatura de cristalización se observa una cierta tendencia a que en los tres casos las temperaturas adimensionales tiendan a confundirse. Esto es debido al alto calor específico en la zona de cristalización. Al salir de esta zona se observa una separación en la evolución de las temperaturas, debido a que la fusión a empezado en tiempos diferentes para cada caso.

De cualquier forma, la diferencia en las condiciones iniciales afecta principalmente a la capacidad de almacenaje.

TEMPERATURA ADIMENSIONAL (Variación de c.i.)



NTU = 0.60; RS = 0.97; C.C.= 1.1; STE = 0.22

Figura 7.8.6 La familia de curvas superior se refiere a las temperaturas adimensionales de salida del agua. La familia inferior de curvas se refiere a temperaturas medias adimensionales de la parafina.

5°) Efecto del Calor Latente (STE)

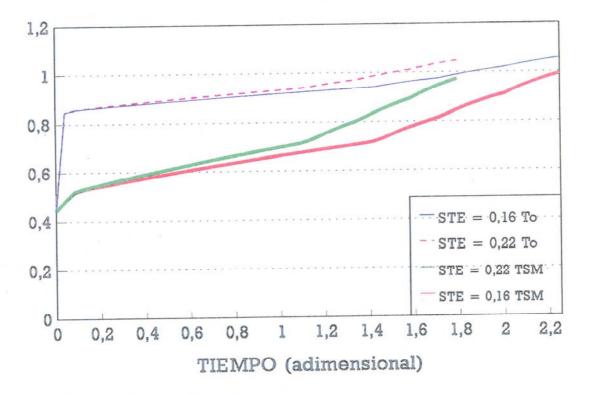
Se han realizado dos series de valores con NTU= 0.60; CI = 0.24; CC = 1.1 y como N° de STE (0.22 y 0.16).

El calor latente afecta principalmente a la capacidad de almacenaje.

En lo que respecta a la temperatura de salida, esta se ve afectada tal y como se observa en la Figura 7.8.7 . El efecto aparece de forma significativa solamente después de que la temperatura del material alcanza la temperatura de cristalización (Tc). El tiempo de duración en la Tc es más largo para menores Nº de STE.

TEMPERATURA (adimensional)

influencia del Nº de STE



NTU = 0,60; CI = 0,44; CC = 1,1; RS = 0,97

Figura 7.8.7 La familia de curvas superior se refiere a la temperatura adimensional de salida del agua. La familia de curvas inferior se refiere a la temperatura media adimensional de la parafina.

7.9 COMPARACIÓN DEL ALMACÉN DE PARAFINA FRENTE A OTRO EQUIVALENTE EN VOLUMEN DE AGUA

En este punto se analiza un almacén de parafina de una masa determinada frente a otro de agua que ocupe el mismo volumen.

La simulación se ha realizado para los dos materiales bajo las siguientes condiciones:

b) NTU =
$$0.60$$
; CC = 1.1 ; CI = 0.55 Figura $7.9.2$

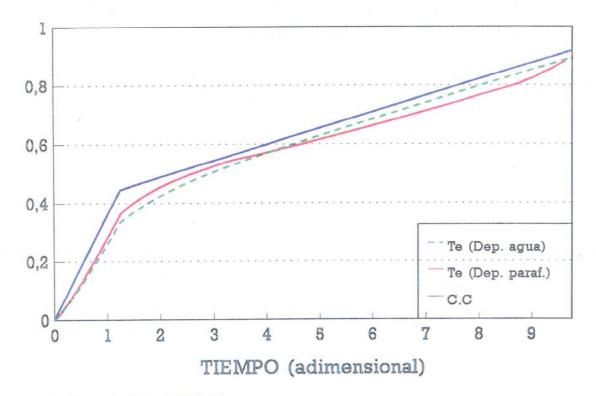
De los resultados arrojados por la simulación tanto para las condiciones a) como b) se deduce lo siguiente:

- 1°) En el intervalo de fusión de la parafina la temperatura de salida del agua en el almacén de parafina se mantiene claramente por debajo que en el almacén de agua.
- 2°) Cuando la parafina está en estado sólido o líquido la temperatura de salida de agua es superior a la del almacén de agua.
 - 3°) De 1°) y 2°) se deduce que es conveniente hacer funcionar el

almacén de parafina lo más cerca posible del intervalo de fusión debido a que:

- a) Establece una diferencia de temperatura mayor entre la temperatura de entrada y la de salida. Puede observarse que la potencia de entrada al almacén, proporcional a la diferencia de temperaturas entre la del agua de entrada y la de salida de agua, es mayor para el caso de la parafina que para el del agua mientras dura el proceso de fusión.
- b) Cuando se hace funcionar el almacén de parafina con paneles solares y dentro del intervalo de fusión, el rendimiento de estos aumenta en relación con otro almacén de agua de igual volumen, al ser menor la temperatura de salida del agua del almacén de parafina.

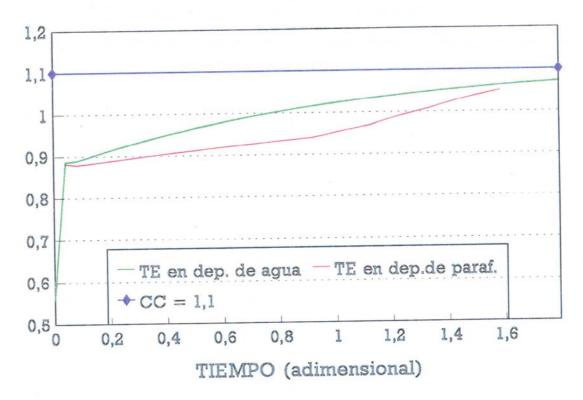
TEMPERATURAS CONDICION DE CONTORNO VARIABLE



NTU = 0,60; C.I. = 0; C.C.= VARIABLE;

Figura 7.9.1

TEMPERATURAS CONDICION DE CONTORNO CONSTANTE



NTU = 0,60; C.I. = 0,55; C.C.= 1,11

Figura 7.9.2

7.10 AUMENTO DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA MEDIA EN EL MATERIAL DE ALMACENAJE

De los resultados obtenidos de las experiencias se deduce:

- 1°) En el proceso de <u>calentamiento</u> cuando la masa del material se encuentra por debajo de los 45 °C, la transferencia de energía se realiza fundamentalmente por <u>conducción</u>.
- 2°) En el proceso de <u>enfriamiento</u> cuando empieza la parafina a solidificarse (por debajo de los 55 °C), el proceso de transferencia de energía se realiza por <u>conducción</u>.

Tanto en un caso como en el otro se observa un coeficiente de transferencia de energía que en general es bajo, salvo cuando la descarga se realiza a través de las aletas (DP2). En este caso aumenta notablemente.

El coeficiente de transferencia de energía (UA), aumenta en el proceso de fusión, debido al proceso de convección natural que mejora sustancialmente ese coeficiente.

Se ve por tanto la necesidad de mejorar dicho coeficiente en aquellos casos en que la transferencia de energía se realice únicamente por conducción. En esa forma de transferencia tiene una gran importancia la conductividad térmica del material de almacenaje.

7.10.1 <u>INFLUENCIA DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA EN EL</u> <u>COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE ENERGÍA</u>

En la Tabla 7.10.1 se representan las conductividades térmicas para varios materiales (70), (71). Se observa que existen grandes diferencias de valores entre las conductividades térmicas del cobre y la parafina la relación es de 1925 veces. Menor es la diferencia con las sales hidratadas donde la relación es de 481 veces.

TABLA 7.10.1

MATERIAL ******	CONDUCTIVIDAD TERM. (W/°Cm)	
PARAFINA	Entre 0,17 y 0,2	
SALES HIDRATADAS	Entre 0,5 y 0,8	
ALUMINIO	200	
COBRE	385	

Existen trabajos previos (89), (36), (26) que demuestran experimentalmente como al introducir una esponja de cobre o aluminio en el material de almacenaje mejora notablemente la conductividad térmica media.

Así introduciendo solamente un 2 % en volumen de aluminio en

la masa de parafina la conductividad térmica media pasa de 0,2 a 0,75 W/°Cm (similar a las sales hidratadas) (36).

Igualmente con un 2 % en volumen de cobre la conductividad media sube a 1,25 W/°Cm (26).

Con estos datos veamos como mejoraría el coeficiente de transferencia de energía en el proceso de solidificación.

En la Figura 7.10.1 se representa como varía el coeficiente de transferencia de energía en el proceso de solidificación de un anillo de parafina de espesor "e" (26).

En dicha Figura se observan tres curvas, una obtenida con una conductividad térmica para la parafina de :

 $k1 = 0.2 \text{ W/}^{\circ}\text{Cm}$ (parafina)

k2 = 0.75 W/°Cm (parafina con esponja de aluminio, 2 % en volumen de aluminio).

K3 = 1,25 W/°C (parafina con esponja de cobre, 2 % en volumen de cobre).

COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE ENERGIA

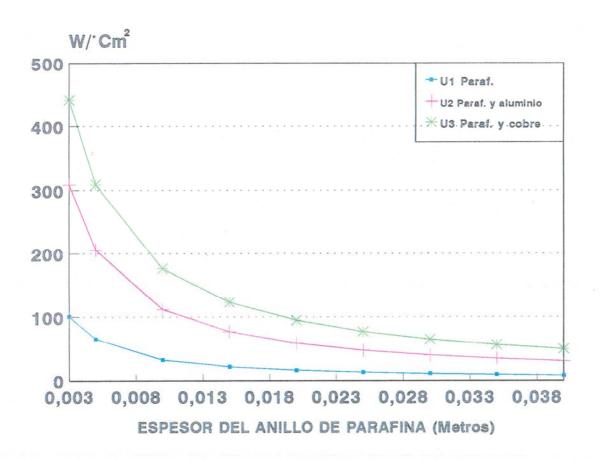


Figura 7.10.1 Influencia de la conductividad térmica media en el coeficiente de transferencia de energía.

La mejora del coeficiente U es evidente. Entre 3 y 4 veces mejora cuando se utiliza aluminio, y de 5 a 7 veces cuando se utiliza cobre . En la Tabla 7.10.2 se representan los valores numéricos de la Figura 7.10.1.

TABLA 7.10.2

ESPESOR	U1	U3	U2
m	K1 = 0,2	K3 = 1,25	K2 = 0.75
	W/°Cm	W/°Cm	W/°Cm
0,003	100,7	442,2	308,9
0,005	65,5	309	205,7
0,01	32,1	176,3	112,1
0,015	21,7	123,4	77,1
0,02	16,4	94,9	58,8
0,025	13,2	77,1	47,5
0,03	11,0	64,9	39,9
0,035	9,5	56,1	34,4
0,04	8,3	49,4	30,2

En la Figura 7.10.1 en la curva U1, se observa como prácticamente con 1 cm de espesor de parafina hay una disminución considerable del coeficiente U1 (< 30 W/°Cm²). En cambio en la curva U3 este vale 176 W/°Cm² esto significa que podemos trabajar con tubos de mayores diámetros y conseguir iguales transferencias de energía.

7.10.2 <u>INFLUENCIA DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA EN LA</u> ESTRATIFICACIÓN DE LA TEMPERATURA DE LA PARAFINA

La influencia en la temperatura de la parafina en función de x (posición en el intercambiador) se ve influenciada fundamentalmente a través de la transferencia de energía por conducción segun su posición a lo largo de x y también por el término de transferencia de energía a través del coeficiente UA.

La influencia del primer coeficiente es disminuir el gradiente de temperatura en la parafina según x. Mientras que la influencia del coeficiente UA, es aumentar esas diferencias.

En las Figuras 7.10.2, 7.10.3 y 7.10.4 se observan los resultados arrojados por el programa "Contor3", para las conductividades térmicas de K1 = 0.2; K2 = 0.75 W/m°C (esponja de aluminio, 2% en volumen). y k3 = 1.25 W/m°C (esponja de cobre, 2 % en volumen) respectivamente.

El programa ha utilizado los siguientes coeficientes:

 $(UA)_1 = 113 \text{ W/}^{\circ}\text{C}$

 $(UA)_2 = 226 \text{ W/°C}$

 $(UA)_3 = 329 \text{ W/°C}$

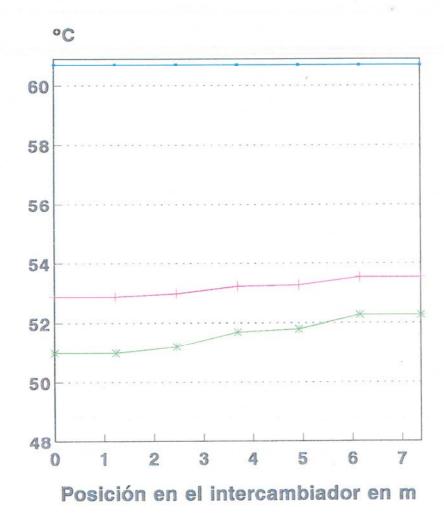
De los gráficos se deduce:

- 1^a) Una rápida disminución de la temperatura de la parafina cuando su temperatura media es superior a 55 °C.
- 2^a) Una mayor estratificación en el caso de utilizar una esponja de cobre debido a su influencia positiva en el término UA (aumento de valor).

De este último punto se deduce:

- a) Necesidad de invertir el sentido del flujo del agua en la carga o descarga de la parafina para mejorar su rendimiento.
- b) La estratificación de la temperatura disminuirá más rápidamente para el caso de que utilicemos una esponja de aluminio o cobre en situaciones de espera, debido a que el término que predomina en este caso es el de conducción.

ESTRATIFICACION DE LA TEMPERATURA EN LA PARAFINA

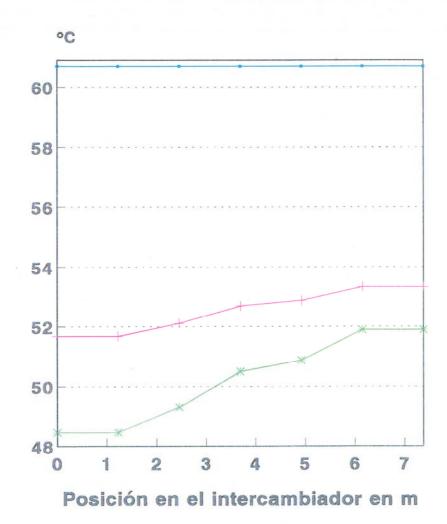


t = 0 minutos + t = 6 minutos * t = 13 minutos

Para k1

Figura 7.10.2 Evolución de la temperatura de la parafina con el tiempo desde el nodo N=0 al N=6. La parafina se encuentra sin malla metálica.

ESTRATIFICACION DE LA TEMPERATURA EN LA PARAFINA

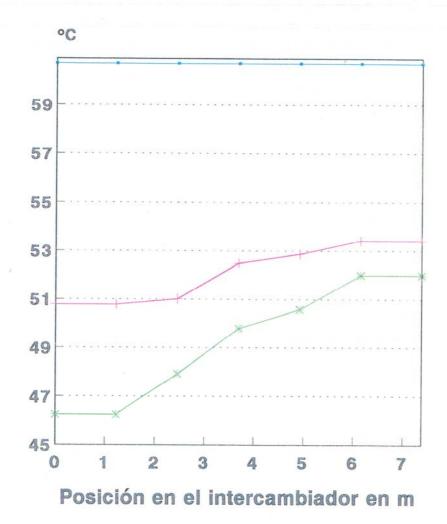


t = 0 minutos + t = 6 minutos * t = 13 minutos

Para k2

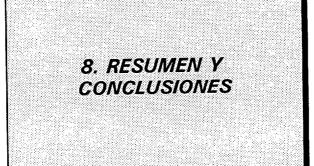
Figura 7.10.3 Parafina con malla de aluminio.

ESTRATIFICACION DE LA TEMPERATURA EN LA PARAFINA



t = 0 minutos t = 0 minutos t = 0 minutos t = 0 minutos

Figura 7.10.4 Parafina con malla de cobre



8.1 RESUMEN

El objeto de la Tesis ha sido demostrar que utilizando un sistema combinado eólico-solar y un sistema de almacenaje de energía térmica por calor latente, se consiguen reducciones en el espacio total que requiere este tipo de instalaciones. Una consecuencia inmediata es la reducción del coste total de la instalación debido a un mejor aprovechamiento del espacio disponible.

Las etapas principales en que se ha dividido este Trabajo han sido:

- 1^a) Estudios de Trabajos de Investigación realizados sobre el Tema.
- 2^a) Diseño y construcción de una Estación Eólico-Solar.
- 3^a) Planteamiento de los Modelos matemáticos de cada uno de los principales bloques que componen la instalación construida.
- 4^a) Realización de un número de experiencias suficientes en la Instalación Eólico-Solar para obtener los parámetros de los Modelos planteados en la Etapa 3^a. Esta fase dará lugar a una validación de los modelos o una modificación de los mismos.

5^a) Establecer conclusiones basadas en las etapas anteriores.

8.2 CONCLUSIONES GENERALES

- 1^a) Se ha conseguido una mejora del espacio disponible para instalaciones de este tipo.
- 2^a) Se ha conseguido una reducción del volumen de almacenaje.
- 3^a) Se ha logrado un nivel térmico de utilización aproximadamente constante.
- 4^a) Se ha obtenido un aumento del rendimiento de funcionamiento de los paneles en el intervalo de trabajo del material de almacenaje.
- 5^a) Se hace posible la elección del nivel térmico de utilización a causa del rango de variación del intervalo de fusión (20 a 90°C)
- 6a) Se hace posible la utilización de estos sistemas combinados
 Eólicos-Solares el sector industrial.

- 7^a) Se puede aumentar el intervalo de trabajo de la instalación, utilizando dos o tres tipos de parafinas con temperaturas de fusión que cubran el intervalo de trabajo deseado. En este caso para llegar a fundir las parafinas de alto grado de fusión puede emplearse con ventaja la energía eólica.
- 8^a) Se consigue una mejora en el coeficiente de utilización mediante el empleo de los aerogeneradores para generar energía térmica en vez de eléctrica ya que ofrece un rango de potencia mucho más amplio (no hay limitación ni de frecuencia ni de voltaje).
- 9^a) Se llega a la conclusión, una vez más (26), de las mejoras que puede introducir el uso de esponja de cobre en el interior de la parafina. consisten en:
 - * Aumento de la conductividad térmica media del material de almacenaje.
 - * Aumento del coeficiente global de transferencia de energía.
- 10^a) Se ha constatado que las características térmicas específicas de las parafinas las convierte en materiales

adecuados para el almacenaje energético en sistemas pasivos de energía solar (temperatura de utilización de 20 a 25 °C).

8.3 CONCLUSIONES PARTICULARES

Se ha comprobado que:

- 1ª) La zona presenta buenas condiciones de radiación y viento durante todo el año, mejorando en los meses de verano.
- 2^a) El nivel térmico de la parafina elegida (48,5 ° C) es el adecuado para las condiciones de radiación y viento del lugar.
- 3ª) La parafina utilizada en la instalación permite una reducción de aproximadamente 27 % en volumen en relación con un almacén de agua que trabaje entre 35 y 55 ° C.
- 4^a) Existe un aumento general del rendimiento de los paneles (P1 y P2) de la instalación de parafina en su zona de fusión en relación con el rendimiento de los mismos en la instalación de agua (p2 y p3).
- 5^a) Se obtiene un alto rendimiento de los aerogeneradores 1 y 2 al utilizar un sistema de control que actue sobre la carga.

- 6a) Se produce una mejora en la transferencia de energía de entre 2 y 3 veces para el DP2 (depósito con aletas) con respecto al DP1 (sin aletas) en modo carga. En modo descarga esta mejora aumenta hasta 4 veces.
- 7^a) El análisis numérico realizado muestra que, introduciendo una esponja de cobre de un 2% en volumen en la parafina, se consigue una mejora del coeficiente global de transferencia de energía de entre 5 y 7 veces en relación al que tenía inicialmente la parafina sin esponja de cobre.

Esta conclusión fue alcanzada como consecuencia del proyecto de investigación (1988-1989) llevado a cabo por el autor de esta tesis en colaboración con los miembros de la Sección de Química Analítica de la ETSII, y el apoyo económico de la Consejería de Industria y Energía.

9^a) El Modelo de Coeficientes Constantes utilizado para los almacenes DP1 y DP2 explica los resultados experimentales para un amplio margen de trabajo (desde 20 °C hasta 70 °C).

8.4 EXPECTATIVAS

La Línea de Trabajo que se va a seguir a partir de ahora, estará orientada en <u>primer lugar</u> a estudiar Técnicas Numéricas que acorten el tiempo de resolución de las ecuaciones diferenciales (Técnicas Implicitas Modificadas). Ello es imprescindible, si se pretende realizar una simulación del funcionamiento de la instalación en periodos amplios (periodos de 1 año). De esa forma se puede ver como funciona la instalación, ante diferentes condiciones de entrada (radiación y viento).

En <u>segundo lugar</u> es necesario estudiar de forma precisa la influencia de la *geometría* de la esponja de cobre introducida en el material de almacenaje (parafina) sobre el coeficiente UA medio, ya que este es uno de los factores que mayor incidencia tiene en el rendimiento de la instalación.

En una próxima experiencia, en que el almacén se proyecte preparado para el uso de esponja de cobre, se espera obtener una mejora sustancial en el coeficiente global de transferencia de energía. Por ende, la mejora en el rendimiento del almacén debe de permitir una reducción apreciable en los tiempos de carga y descarga de energía.

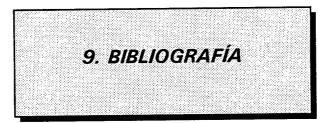
También se puede destacar la posibilidad cierta de la aplicación del sistema para unidades destinadas a la potabilización de agua en funciones de precalentamiento.

Otro posible uso a destacar es la aplicación del sistema a la calefacción de edificios.

Finalmente añadir que en Canarias por sus singulares características climatológicas, el sol está presente durante la mayor parte del año. Los vientos alisios, durante muchos meses al año, actúan con intensidad y dirección muy constantes. Además las brisas soplan diariamente en las zonas costeras.

Se espera, a corto plazo, poder disponer de medios para instalar una estación eólico-solar de dimensiones adecuadas para comprobar resultados, haciendo uso de las experiencias realizadas. Se escogerá una zona de la isla de Gran Canaria que reuna condiciones óptimas de sol y viento.

Se hace resaltar el gran interés de todo lo dicho en las islas, carentes de otras fuentes autóctonas de energía. Estas ideas son perfectamente exportables a las costas saharianas.



- 1 ABHAT, A.; ABOUL-ENEIN, S.; MALATIDIS, N.A. Heat of fusion storage systems for solar heating applications. Presented at International TNO-Symposium, "Thermal Energy Storage", 1980.
- 2 ABHAT, A. Low temperature latent heat thermal energy storage. In G. Beghi (ed.), Thermal Energy Storage, D. Reidel Publishing, Co., Dordrecht, Nl ,1982.
- 3 ABHAT, A. Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials. Solar Energy, Vol. 30, No. 4, pp. 313-332, 1983
- 4 ABOUL-ENEIN, S; ABHAT, A. Experimental investigation and analysis of heat transfer in a novel finned annulus heat exchanger for heat of fusion storage application. Congress of Chemical Engineering, Montreal, Canada, October, 1981.
- 5 ACHARD, P.; LECOMTE, D.; MAYER, D. Characterization and modelling of test units using salt hydrates. International Conference on Energy Storage, Brighton, UK, April 29-May 1, 1981
- 6 ALLISON, H.J. A renewable energy system for developing countries
- 7 ASHENAYI, K.; RAMAKUMAR, R. Design of stand-alone wind energy conversion systems with energy storage. Sixth Biennial Wind Energy Conference and Workshop, 1983
- 8 BERNARD, C.; BODY, Y.; ZANOLI, A. Experimental comparison of latent and sensible heat thermal walls. Solar Energy, Vol. 34, no 6, pp. 475-787, 1985
- 9 BUDDHI, D.,; BANSAL, N.K.; SAWHNEY, R.L.; SODHA, M.S. Solar thermal storage systems using phase change materials.

 International Journal of Energy Research, Vol. 12, 1988

- 10 BUDDHI, D.,; BANSAL, N.K. Performance equations of a collector cum storage system using phase change materials. Solar Energy, Vol. 48, No.3, pp 185-194.
- 11 CABRERA DELGADO, N. E. Sistemas de almacenamiento de energía térmica por calor de transformación. Tesis, 1982.
- 12 CAÑADA RIBERA, J. Algunas consideraciones sobre la aplicación de la energía solar fototérmica en procesos industriales. E.T.S.I.I. Valencia. Energía, Mayo, 1987,
- 13 CROMACK, D.E.; MCGOWAN, J.G.; HERONEMUS, W.E. The status of windpower research and development for space and water heating in the united states. Third International Symposium on Wind Energy Systems, August 26-29, 1980
- 14 CHAURASIA, P.B.L. Study of solar energy storage in paraffin wax storage system upto two night duration. Regional Journal of Energy, Heat and Mass Transfer, Vol. 8, No. 2, pp. 57-62, 1986
- 15 DAVIES, T.S.; JEFFERSON, C.M.; MAYER, R.M.; SOMERVILLE, W.M. The application of energy storage in wind energy conversion.

 International Solar Energy Society. Silver Jurilee Congres, 1979
- 16 DUTRÉ, W.L.; VANHEELEN, J. Perfomance of domestic solar systems with air collectors and parafin storage. International Conference on Energy Storage. Brighton, UK, April 29-May 1, 1981
- 17 DUVBOIS, P.; HOCHON, B. Etude du stockage de l'energie thermique par fusion des materiaux organiques. Centre de Recherches de la Compagnie Générale d'Electricité
- 18 EDIE, D.D.; MELSHEIMER, S.S. Latent heat energy storage using direct contact heat transfer. Department of Chemical Engineering. Clemson University.
- 19 EFTEKHAR, J.; HAJI-SHEIKH, A.; LOU, D.Y.S. Heat transfer enhancement in a paraffin wax thermal storage system. Journal of

- Solar Energy Engineering, Vol. 106, August 1984
- 20 FAUNCE, S.; SLIWKOWSKI, J.; GUCERI, S. An applications of phase change materials in passive solar systems. Institute of Energy Conversion. University of Delaware.
- 21 FARID, M.M. Solar energy storage with phase change.

 Journal of Solar Energy Research, Vol. 4, No. 1 pp. 11-29

 March. 1986.
- 22 FERRAGUT CANALS, L. Resolución del problema de stefan mediante métodos variacionales. E.T.S.I. Minas, Cátedra de Cálculo Numérico e Informático, U.P. de Madrid, Tesis, 1982
- 23 FOUDA, A.E.; DESPAULT, G.J.G.; TAYLOR, G.B.; CAPES, C.E. Solar storage systems using salt hydrate latent heat and direct contact heat exchange-ii. Characteristics of pilot system operating with sodium sulphate solution. Solar Energy, Vol. 32, no 1, pp. 57-65, 1984
- 24 FURBO, S. Test procedures for heat storages for solar heating systems. Thermal Insulation Laboratory, Technical University of Denmark
- 25 GHONEIM, A.A.; KLEIN, S.A.; DUFFIE, J.A. Analysis of collectorstorage building walls using phase-change materials. Solar Energy, Vol. 47, no 3,pp. 237-242, 1991
- 26 GÓMEZ A.; LÓPEZ J.A.; MONZÓN, J.M. Utilización de la parafina como almacén térmico en sistemas eólicos solares. Ingeniería Ciencia y Tecnología, Nº 1, pp 38..54, 1990
- 27 GÓMEZ SABUCEDO, A.; LÓPEZ CANCIO, J.A. Almacenaje de energía térmica en parafinas II. El Instalador Nº 212, pp 32-40, Julio 1986
- 28 GÓMEZ SABUCEDO, Á.; LÓPEZ CANCIO, J.A. Almacenaje de energía térmica en parafinas I. El Instalador Nº 205, pp 49-54, Dic. 1985

- 29 GUION, J.; TEISSEIRE, M. Nucleation of sodium acetate trihydrate in thermal heat storage cycles. Solar Energy, Vol. 46, no 2, pp. 97-100, 1991
- 30 HANSJORG, G.; JOACHIM, L. Wind-solar hybrid electrical supply systems. Results from a simulation model and optimization with respect to energy pay back time. Solar & Wind Technology. Vol 5 No 3 PP 239-247, 1988.
- 31 HEINE, D. The chemical compatibility of construction materials with latent heat storage materials. International Conference on Energy Storage, Brighton, UK, April 29-May 1, 1981
- 32 HEINE, D.; HEESS, F. Physical and chemical properties of change materials for applications in solar tower and solar farm plants
- 33 HERRANZ ACERO, G.; SÁNCHEZ URDIAIN, C. Sistemas adaptadores de energía eólica y solar. Aspectos meteorológicos. Energía, Nov-Dic 1983
- 34 HOZUMI, S. Development of hybrid solar systems using solar thermal, photovoltaics, and wind energy. Journal of the Japanese Solar Energy, Vol. 11, No 4, pp. 257-280, 1986
- 35 HOOGENDOOR, C.J.; BART, G.C.J. Performance and modelling of latent heat stores. Solar Energy, pp. 53-58, 1991
- 36 HOOGENDOORN, C.J.; BANEN, R. Organic phase-change materials for solar heat storage. Solar World Congress, Volume 3, pp, 1498-1502, 1984
- 37 IVAL, O.; SALYER; ANIL, K.; SIRCAR; RICHARD, P.; CHARTOFF; DANIEL MILLER, E. Advanced phase-change materials for passive solar storage applications. University of Dayton Research Institute, 1985.
- 38 JARIWALA, V.G.; MUJUMDAR, A.S.; WEBER, M.E. The periodic steady state for cyclic energy storage in paraffin wax. The Canadian

- Journal of Chemical Engineering, Vol. 65, December 1987
- 39 JING-HUA, L.; GUI-EN, Z. Investigation of eutectic mixture of sodium acetate thihydrate and urea as latent heat storage. Solar Energy Vol 47, No. 6, pp. 443-445, 1991
- 40 JURINAK, J.J.; ABDEL-KHALIK, S.I. The sizing and economics of phase change energy storage units in air-based solar heating systems. Solar Energy Laboratory. University of Wisconsin-Madison
- 41 KAMIMOTO, M.; ABE, Y.; KANARI, K.; TAKAHASHI, Y. Latent thermal storage unit using form-stable high density polyethylene; part II: numerical analysis of heat transfer. Journal of Solar Engineering, Vol. 108, November 1986
- 42 KAMIMOTO, M.; ABE, Y.; SAWATA, S. Design and cost evaluations of solar energy and waste heat utilization systems with latent thermal storage unit using form-stable high-density poliethylene. Journal of Chemical Engineering of Japan, Vol. 19, no 4, 1986
- 43 KAMIMOTO, M.; ABE, Y.; SAWATA, S. Latent thermal storage unit using form-stable high density poliethylene; part I: perfomance of the storage unit. Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 108, November 1986
- 44 KAURANEN, P.; PEIPPO, K; LUND, P.D. An organic pcm storage system with adjustable melting temperature. Solar Energy, Vol. 46, no 5, pp. 275-278, 1991
- 45 KENNA, J.P.; MARSHALL, R.H. Economic comparisons of phase change and water storage for solar water heating in the U.K. 2nd BHRA Fluid Engineering International Conference on Energy Storage. May 24-26, 1983.
- 46 KENTFIELD, J.A.C. Pneumatic energy transmittal in wind-power systems. J. Energy, Vol. 5, No 6, 1981
- 47 KREIDER, F.; Wind. Electric conversión systems

Solar Energy Hand Book pp. 23-12, 23-18, 1981

- 48 L.H. SODORHOLM SCIENCE AND EDUCATION ADMINISTRATION, U.S.

 Wind energy for agricultural heating. Dept. of Agriculture, Ames,

 Iowa. Energy Symposium, Iowa, 1980
- 49 LIOR, N.; BRISH, R.T.; TEDORI, L.; KOFFS S. Long-term stability and perfomance of solar system instrumentation. Ambient Press Limited, 1984
- 50 LUSH, D.M. Monitoring solar heated house in the european community procedures, results and future activities. International Solar Energy Society. Silver Jurilee Congres, 1979.
- 51 MACCRACKEN, C.C. *Pcm bulk storage*. International Conference on Energy Storage, Brighton, UK, April 29-May 1, 1981
- 52 MACIAS MACHÍN, AGUSTÍN. Sistemas de almacenamiento de energía por medio de reacciones químicas. Tesis, Febrero, 1987.
- 53 MANWELL, J.F.; MCGOWAN, G. A design procedure for wind powered heating systems. Solar Energy
- 54 MARSHALL, R. Identification of UA using the locus curve on a schumann plot. J. Solar Energy, Vol. 3, pp. 329-339, 1985
- 55 MARSHALL, R. Studies of natural convection efects in an annulus containing a phase change material. Solar Energy Unit, University College Cardif, 1979
- 56 MARSHALL, R.H. Natural convection efects in rectangular enclosures containing a phase change material.

 Solar Energy Unit, University College, Cardiff, Wales ASME Winter Meeitng, San Francisco, 1978
- 57 MARSHALL, R.; DIETSCHE, C. Comparisons of paraffin wax storage subsystem models using liquid heat transfer media. Solar Energy, Vol. 29, No. 6, 1983

- 58 MARSHALL, R.H. Experimental determination of heat transfer coefficients in a thermal store containing a phase change material the rectangular cavity. International Conference on Future Energy Concepts, 30 January-1 February 1979 London
- 59 MARSHALL, R. Experimental experience with the ashrae/nbs procedures for testing a phase change thermal storage device.

 International Conference on Energy Storage, Brighton, UK, April 29-May 1, 1981
- 60 MARSHALL, R. Identification of UA in thermal storage devices two methods. J. Solar Energy, 1985, Vol. 3, pp. 341-354
- 61 MARSHALL, R.H. A theoretical study of ashrae standard 94-77 for testing thermal storage devices. Thermal Storage of Solar Energy. By TNO and Martinus Publishers, 1984
- 62 MARSHALL, R. Parametric sensitivity studies using paraffin wax storage sub-systems. Solar Energy Vol 32, No 1, pp. 41-48, 1984
- 63 MARSHALL, R.H. A one dimensional model of a solar heat store using a change of phase material. International Conference on Solar Building Technology, July 25-27, 1977, London
- 64 MARSHALL, R.H. A Comparison of thermal storage devices for combined space heating and domestic hot water systems. Solar Energy Unit. University College Cardiff. Newport Road.
- 65 MARSHALL, R. A simplified model as the basis for a thermal storage test procedure. J. Solar Energy, 1985, Vol. 3, pp. 255-269
- 66 MARSHALL, R.; DIETSCHE, C. Models or parafin wax storage subsystems using liquid based heat transfer media. International Solar Energy Society, Solar World Forun, Bright, 1981
- 67 MENON, A.S.; WEBER, M.E.; MUJUMDAR, A.S. The dinamics of energy

- storage for paraffin wax in cylindrical containers. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 61, Oct.1983
- 68 NIGIM, K.A.; NIGIM, H.H. The need for integration in use of renewable sources.
- 69 NIGIM, K.A.; NIGIM, H.H. The need for integration in use of renewable sources. 34th Congress on Electronics, Rome, March 24-27, 1987
- 70 NIKOLIC, R.; KELIC, K.; NESKOVIC, O. The thermal conductivities of some low melting materials relevant to energy storage.

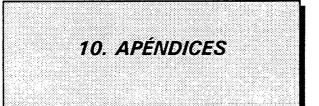
 Applied Physics A Solids and Surfaces. Springer-Verlag 1984
- 71 NIKOLIC, R; TRIPKOVIC, J. Measeruments of thermal conductivities of some low-melting materials in a concentric cylinder apparatus. Aplied Physics A Solids and Surfaces. Springer-Verlag 1987
- 72 PACKARD, C.J.; SAN MARTIN, R.L.; FENTON, D. Perfomance data from reduced levels of instrumentation in solar heated and/or cooled buildings. International Solar Energy Society. Silver Jurilee Congres, 1979.
- 73 PLUCHARD, A.G.; AUZILLEN, J. "Energies nouvelles l'aerosolec".
 1982. (Estación de telecomunicación en Turbie (Francia).
- 74 RAMAKUMAR, R. Storage options for harnessing wind energy. Mechanical Engineering, November 1983
- 75 ROSENFELD, J.L.J. The perfomance of solar water heaters in the UK. International Solar Energy Society. Silver Jurilee Congres, 1979
- 76 SAMA, D.A.;, SLADEK, K.J. Phase change fluids for solar thermal systems. The America Institute Of Chemical Engineers, 1981
- 77 SCHMITT, N.; JONES, W.T.; MURRAY, T.M. The design and development of programs to optimize the control, monitoring and functional

- analysis of the u of 1 solar research center. International Solar Energy Society. Silver Jurilee Congres, 1979
- 78 SUTER, J.M.; KESSELRING, P. Measurements of perfomance and efficiency of solar energy systems. International Solar Energy Society. Silver Jurilee Congres, 1979
- 79 SERRANO LORENTE, J. Hacia una sistematización de las nuevas tecnologías energéticas. Monografías del Ministerio de Industria y Energía. 1983.
- 80 SHARMA, S.K.; JOTSHI, C.K.; SUNITI KUMAR. Thermal stability of sodium salt hidrates for solar energy storage applications. Solar Energy, Vol. 45 no 3, pp. 177-181, 1990
- 81 SOKOLOV, M.; KEIZMAN, Y. Perfomance indicators for solar pipes with phase change storage. Solar Energy, Vol. 47, no 5,pp 339, 346, 1991
- 82 STEEMERS, T.C. A review on the r & d on heat storage in the european solar energy programme. International Conference on Energy Storage. Brighton, UK, April 29-May 1, 1981
- 83 STOCKERL, R.; KOHLER, H.H. Dynamic investigations of the slow recrystallization of incongruently melting clauber salt. Solar Energy, Vol. 46. no 3, pp. 167-173, 1991
- 84 SXCHULER, H.F.; ROST, D.F.; AMEDURI, G. Mini-computer-based energy monitor system. International Solar Energy Society. Silver Jurilee Congres, 1979
- 85 HAYS, D.K.; PAKIRSON, B.W.; WINN, C.B. Real time identification of parameters in building models. International Solar Energy Society. Silver Jurilee Congres, 1979
- 86 THABIT, S.S.; STARK, J. Renewable heat and electricity concept for industrial application in the UK. Pro. Inst. Mech. Engrs., Vol.199 No A3, 1985

Bibliografía

- 87 TOKSOY, M.; ILKEN, Z. The efects of phase change during the stanby period in latent heat energy storage systems. Solar Energy, Vol. 47, no 2, pp. 69-73, 1991
- 88 TREVOR, R.; LEE; ARCH, B. Energy self-sufficiency in monsoonal Australia. International Solar Energy Society. Silver Jurilee Congres, 1979
- 89 VAN GALEN, E.; VAN DEN BRINK, G.J. Energy storage in phase change materials for solar applications. International Journal of Ambient Energy, Volume 7, Number 1, January 1986.
- 90 VAN KOPPEN, C.W.J.; SIMON THOMAS, J.P.; VELTKAMP W.B. The actual benefits of thermally stratified storage in a small and a medium size solar system.
- 91 VAN GALEN, E.; OUDEN DE C. Development of a storage system based on encapsulated p.C.-Materials. Institute of Applied Physics TNO-TH
- 92 VEGA BETANCORT, J. La radiación: su medida y estimación en Las Palmas de Gran Canaria. Tesis
- 93 WAKAMATSU, H.; YAMAMOTO, I.; SHIMODA, Y. Windpower conversion to heat and the heat storage system by metalhydride.

 International Journal of Energy Systems, Vol.2, No 2, 1982
- 94 WOOD, R.J.; GLADWELL, S.D. Low temperature thermal energy storage using packed beds of encapsulated phase-change materials. International Conference on Energy Storage, Brighton, UK, April 29-May 1, 1981
- 95 ZIEGENBEIN, B. Investigation of latent heat of fusion storage for solar heating systems. Brown Boveri & CIE AG. International Solar Energy Society. Silver Jurilee Congres, 1979



CLS	
PRINT	T " ***** PROGRAMA ***** "
PRINT	" *************************************
PRINT	T" ************************************
PRINT	" ************************************
PRINT	Γ
PRINT	Γ
PRINT	T " AJUSTE DE LOS COEFICIENTES U Y N APLICANDO"
PRINT	EL MODELO DE SCHUMANN DE COEFICIENTES CONSTANTES"
PRINT	T " TOMANDO CONDICIÓN DE CONTORNO VARIABLE "
PRIN	[" ===================================
PRIN'	Γ
,	
•	
′ 11	VARIABLES DEL PROGRAMA "
^ n	=======================================
	' N= "NUMERO DE ELEMENTOS DEL INTERCAMBIADOR (adimensional)"
,	TC= "TEMPERATURA DE SOLIDIFICACIÓN PROMEDIO (°C)"
,	TFI= "TEMPERATURA DE FLUIDO INICIAL (°C)"
,	TSI= "TEMPERATURA DE PARAFINA INICIAL (°C)"
,	TFE= "TEMPERATURA DE FLUIDO EN X=0 PARA T>0 (°C)
,	DX = "VALOR DEL INTERVALO INCREMENTO DE X (m)"
,	DT = "VALOR DEL INTERVALO DE TIEMPO-T- (s)"
,	LT= "CALOR LATENTE PROMEDIO DE LA PARAFINA (J/kg)"
•	CPSL= "CALOR ESPECÍFICO DE LA PARAFINA LÍQUIDA (J/kg°C)"
,	CPSS= "CALOR ESPECÍFICO DE LA PARAFINA SÓLIDA (J/kg°C)"
,	KS = "CONDUCTIVIDAD DE LA PARAFINA (W/m°C)"
,	VS = "VOLUMEN DE PARAFINA (m³)"
,	MS = "MASA DE PARAFINA (kg)"
,	M = "CAUDAL DE AGUA (I/s)"
,	CPF = "CALOR ESPECÍFICO DEL AGUA (J/kg°C)"
•	L = "LONGITUD DEL INTERCAMBIADOR (m)"
,	KF = "CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DEL FLUIDO (W/m°C)"
,	VF = "VOLUMEN DEL FLUIDO (m³)"

' A = "ÁREA DE INTERCAMBIO FLUIDO PARAFINA (m²)"

```
' U = "POTENCIA DE TRANSFERENCIA POR UNIDAD DE ÁREA Y TEMP.DE
      FLUIDO-PARF (W/m2°C)"
' MF = "MASA DE FLUIDO (kg)"
' MCU= "MASA DE COBRE (kg)"
' CPU = "CALOR ESPECÍFICO DE COBRE (J/°Ckg)"
' A1 = "ÁREA DE INTERCAMBIO FLUIDO AIRE (m²)"
' U1 = "COEFICIENTE DE TRANS. FLUIDO AIRE (W/m<sup>2</sup>°C)"
' CPA= "CALOR ESPECÍFICO DEL AIRE (J/kg°C)"
   MA = "MASA DE AIRE (kg)"
   A2= "ÁREA DE INTERCAMBIO CON AMBIENTE (m²)
   U2= "COEFIENTE DE PÉRDIDAS AL AMBIENTE (W/°Cm²)
   TI= "TEMPERATURA INICIAL DE AIRE EN DEPÓSITO (°C)"
  PROPIEDADES TIPO
           _____=
GOTO 640
' PS = 37: 'PASO DE TIEMPO DE FICHERO EN (S)
N = 10
' TC = 50: '^{\circ}C
'TFE = 21: '°C
' DX = .72: ' m
' DT = 1: 's
' LT = 131700: ' J/(Kg)
' CPSL = 2100: ' J/(Kg.°C)
'CPSS = 2900: 'J/(Kg.°C)
' KS = .24: ' W/(m.^{\circ}C)
'VS = .0564: 'm^3
' MS = 39.57: ' Kg
' M = .00587: ' Kg/s
```

' CPF = 4179: 'J/(Kg.°C)

'KF = .26: 'W/(m. °C)

L = 7.2: m

```
'VF = .000543: 'm^3
  ' A = .3: ' m^2
  ' UH = 197.96: ' W/(m<sup>2</sup>.°C)
  ' UM = 147.39
\cdot 'UL = 124.88
  MF = .54: m^3
  ' MCU = 32: 'Kg
  'CPU = 382.47; 'J/(Kg^{\circ}C)
640 INPUT "DESEA INTRODUCIR DATOS"; K$
  IF K$ = "NO" THEN 1570
660 INPUT "DESEA INTRODUCIR PROPIEDADES GEOMÉTRICAS Y FÍSICAS"; M$
  IF MS = "NO" THEN 880
  INPUT "CALOR LANTENTE LT (J/KG)="; LT
  INPUT "CALOR ESPECÍFICO DE PARAFINA LÍQUIDA (J/(KG°C))="; CPSL
  INPUT "CALOR ESPECÍFICO DE PARAFINA SÓLIDA (J/(KG°C))="; CPSS
  INPUT "TEMPERATURA DE SOLIDIFICACIÓN MEDIA (°C)=", TC
  INPUT "NÚMERO DE PASOS DE FICHERO DE IMPRESIÓN"; PS
  INPUT "CONDUCTIVIDAD TERMICA MEDIA DE PARAFINA (W/m°C)="; KS
  INPUT "CONDUCTIVIDAD TÉRMICA MEDIA DE AGUA (W/m°C)="; KF
  INPUT "VOLUMEN DE PARAFINA MEDIO (M^3)="; VS
  INPUT "MASA DE PARAFINA (Kg)="; MS
  INPUT "VOLUMEN DE AGUA EN INTERCAMBIADOR (m^3)="; VF
  CLS
  INPUT "MASA DE AGUA EN INTERCAMBIADOR (Kg)="; MF
  INPUT "ÁREA DE INTERCAMBIO FLUIDO PARAFINA(m^2)="; A
  INPUT "LONGITUD DEL INTERCAMBIADOR (m)="; L
  INPUT "MASA DE COBRE EN EL ALMACÉN (Kg)="; MCU
  INPUT "CALOR ESPECÍFICO DEL COBRE (J/(KG°C))="; CPU
   INPUT "CALOR ESPECÍFICO DE AGUA (J/(Kg°C)="; CPF
   INPUT "ÁREA DE INTERCAMBIO FLUIDO DEPÓSITO (M^2)="; A1
```

```
INPUT "CALOR ESPECÍFICO DEL AIRE (J/KG°C)="; CPA
  INPUT "MASA DE AIRE EN DEPÓSITO (KG)="; MA
  INPUT "ÁREA DE INTERCAMBIO CON AMBIENTE (M^2)="; A2
  INPUT "ÁREA DE INTERCAMBIO PARAFINA DEPÓSITO (M^2)="; A3
  OPEN "O", #1, "C:\DATOS\SIMULACI\CONSTA.PRN"
  WRITE #1, LT, CPSL, CPSS, TC, PS, KS, KF, VS, MS, VF, MF, A, L, MCU, CPU, CPF, A1,
  CPA, MA, A2, A3
  CLOSE #1
880 INPUT "DESEA INTRODUCIR N, N2,DT"; H$
  IF H$ = "NO" THEN 960
  INPUT "NÚMERO DE NODOS N="; N
  INPUT "DIMENSIÓN MÁXIMA DE TIEMPO N2="; N2
  INPUT "PASO DE TIEMPO DT (s)="; DT
  CLS
  OPEN "O", #1, "C:\DATOS\SIMULACI\NDT.PRN"
  WRITE #1, N, N2, DT
  CLOSE #1
960 INPUT "DESEA INTRODUCIR TFIN, TAMB, UH, UM, UL, U1, U2, U3"; K$
  IF K$ = "NO" THEN 1050
  INPUT "TEMPERATURA FINAL DE PROCESO (°C)="; TFIN
  INPUT "TEMPERATURA AMBIENTE MEDIA (° C)="; TAMB
  INPUT "COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSMISIÓN ALTO (W/M^2°C)="; UH
  INPUT "COEFICIENTE DE TRANS. ENERGÍA FLUIDO AIRE(W/M^2°C)"; U1
  INPUT "COEFIENTE DE PÉRDIDAS AMB.(W/M^2°C)="; U2
   INPUT "COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSMISIÓN MEDIO (W/(M^2°C)="; UM
   INPUT "COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSMISIÓN BAJO (W/(m^2°C)="; UL
   INPUT "COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSMISIÓN PARF. DEPOS(w/M^2°C)="; U3
   OPEN "O", #1, "C:\DATOS\SIMULACI\UTFIN.PRN"
   WRITE #1, TFIN, TAMB, UH, UM, UL, U1, U2, U3
   CLOSE #1
   CLS
1050 INPUT "DESEA INTRODUCIR NU6,NU5,M,A$,TI"; H$
   IF H$ = "NO" THEN 1130
   INPUT "NÚMERO DE ELEMENTOS DE CONDICIÓN DE CONTORNO NU5 (FLUIDO)"; NU5
```

```
INPUT "NÚMERO DE ELEMENTOS DE CONDICIÓN DE CONTORNO NU6 (AIRE)"; NU6
   INPUT "CAUDAL MÁSICO Kg/s="; M
   INPUT "SI DESEA = CALENTAMIENTO = ESCRIBIRLO"; A$
   INPUT "TEMPERATURA INICIAL DE AIRE DEP.(°C)="; TI
   OPEN "O", #1, "C:\DATOS\SIMULACI\TFX0M.PRN"
   WRITE #1, NU5, M, A$, TI, NU6
   CLOSE #1
1130 INPUT "DESEA INTRODUCIR CONDICIONES INICIALES"; K$
   IF K$ = "NO" THEN 1330
   FOR i = 0 TO N
   PRINT "TFI("; i; ")=";
   INPUT TFI(i)
   CLS
   NEXT i
   OPEN "O", #1, "C:\DATOS\SIMULACI\TFI.PRN"
   FOR i = 0 TO N
   WRITE #1, TFI(i)
   NEXT i
   CLOSE #1
   FOR i = 0 TO N
   PRINT "TSI("; i; ")=";
   INPUT TSI(i)
   CLS
   NEXT i
   OPEN "O", #1, "C:\DATOS\SIMULACI\TSI.PRN"
   FOR i = 0 TO N
   WRITE #1, TSI(i)
   NEXT i
   CLOSE #1
1330 INPUT " DESEA INTRODUCIR CONDICIONES DE CONTORNO TEF °C"; K$
   IF K$ = "NO" THEN 1540
   INPUT "NÚMERO DE ELEMENTOS NU5="; NU5
   FOR i = 1 TO NU5
   PRINT "TEF("; i; ")=";
   INPUT TEF(i)
```

```
CLS
   NEXT i
   FOR i = 1 TO NU5
   PRINT "TIEMPO("; i; ")=";
   INPUT TT(i)
   CLS
   NEXT i
   OPEN "O", #1, "C:\DATOS\SIMULACI\TEF.PRN"
   FOR i = 1 TO NU5
   WRITE #1, TEF(i)
   NEXT i
   CLOSE #1
   OPEN "O", #1, "C:\DATOS\SIMULACI\TT.PRN"
   FOR i = 1 TO NU5
   WRITE #1, TT(i)
   NEXT i
   CLOSE #1
'CONDICIÓN DE CONTORNO PARA LA DE PARAFINA
*****************
1540 INPUT " DESEA INTRODUCIR CONDICIONES DE CONTORNO TAA °C"; K$
  IF K$ = "NO" THEN 1870
  INPUT "NÚMERO DE ELEMENTOS NU6="; NU6
  FOR i = 1 TO NU6
  PRINT "TAA("; i; ")=";
  INPUT TAA(i)
  CLS
  NEXT i
  FOR i = 1 TO NU6
  PRINT "TIEMPO("; i; ")=";
  INPUT ITT(i)
  CLS
  NEXT i
  OPEN "O", #1, "C:\DATOS\SIMULACI\TAA.PRN"
  FOR i = 1 TO NU6
```

```
WRITE #1, TAA(i)
 NEXT i
  CLOSE #1
 OPEN "O", #1, "C:\DATOS\SIMULACI\ITT.PRN"
  FOR i = 1 TO NU6
  WRITE #1, ITT(i)
  NEXT i
  CLOSE #1
  GOTO 1870
***************************
' RECOGIDA DE DATOS DE FICHEROS
  , **********
1570 OPEN "i", #1, "C:\DATOS\SIMULACI\CONSTA.PRN"
  INPUT #1, LT, CPSL, CPSS, TC, PS, KS, KF, VS, MS, VF, MF, A, L, MCU, CPU, CPF, A1,
  CPA, MA, A2, A3
  CLOSE #1
  OPEN "I", #1, "C:\DATOS\SIMULACI\NDT.PRN"
  INPUT #1, N, N2, DT
  CLOSE #1
  OPEN "I", #1, "C:\DATOS\SIMULACI\UTFIN.PRN"
  INPUT #1, TFIN, TAMB, UH, UM, UL, U1, U2, U3
  CLOSE #1
  OPEN "I", #1, "C:\DATOS\SIMULACI\TFX0M.PRN"
  INPUT #1, NU5, M, A$, TI, NU6
  CLOSE #1
   ' DIM TSI(N + 1): DIM TFI(N + 1)
  OPEN "I", #1, "C:\DATOS\SIMULACI\TFI.PRN"
   FOR i = 0 TO N
   INPUT #1, TFI(i): NEXT i
   CLOSE #1
   OPEN "I", #1, "C:\DATOS\SIMULACI\TSI.PRN"
   FOR i = 0 TO N
```

```
INPUT #1, TSI(i): NEXT i
  CLOSE #1
  OPEN "I", #1, "C:\DATOS\SIMULACI\TEF.PRN"
  FOR i = 1 TO NU5
  INPUT #1, TEF(i)
  NEXT i
  CLOSE #1
  OPEN "I", #1, "C:\DATOS\SIMULACI\TT.PRN"
  FOR i = 1 TO NU5
  INPUT #1, TT(i)
  NEXT i
  CLOSE #1
  OPEN "I", #1, "C:\DATOS\SIMULACI\TAA.PRN"
  FOR i = 1 TO NU6
  INPUT #1, TAA(i)
  NEXT i
  CLOSE #1
  OPEN "I", #1, "C:\DATOS\SIMULACI\ITT.PRN"
  FOR i = 1 TO NU6
  INPUT #1, ITT(i)
  NEXT i
  CLOSE #1
  INPUT " DESEA PROPIEDADES Y PARÁMETROS POR IMPRESORA"; L$
  IF L$ = "NO" THEN 1866
  PRINT "CONECTAR LA IMPRESORA Y APRETAR F1 CUANDO ESTE LISTO"
1864 KEY(1) ON
  ON KEY(1) GOSUB 7000
  GOTO 1864
1881 LPRINT "
              LPRINT "
             PROPIEDADES Y PARÁMETROS ACTUALES"
  LPRINT "
             LPRINT
              PROPIEDADES GEOMÉTRICAS Y FÍSICAS
  LPRINT "
              ***********
  LPRINT "
```

```
LPRINT
LPRINT "CALOR LATENTE LT (J/KG)="; LT
LPRINT "CALOR ESPECÍFICO DE PARAFINA LÍQUIDA (J/(KG°C))="; CPSL
LPRINT "CALOR ESPECÍFICO DE PARAFINA SÓLIDA (J/(KG°C))="; CPSS
LPRINT "TEMPERATURA DE SOLIDIFICACIÓN MEDIA (°C)=", TC
LPRINT "NÚMERO DE PASOS DE FICHERO DE IMPRESIÓN"; PS
LPRINT "CONDUCTIVIDAD TÉRMICA MEDIA DE PARAFINA (W/m°C)="; KS
LPRINT "CONDUCTIVIDAD TÉRMICA MEDIA DE AGUA (W/m°C)="; KF
LPRINT "VOLUMEN DE PARAFINA MEDIO (M^3)="; VS
LPRINT "MASA DE PARAFINA (Kg)="; MS
LPRINT "VOLUMEN DE AGUA EN INTERCAMBIADOR (m^3)="; VF
LPRINT "MASA DE AGUA EN INTERCAMBIADOR (Kg)="; MF
LPRINT "ÁREA DE INTERCAMBIO FLUIDO PARAFINA(m^2)="; A
LPRINT "LONGITUD DEL INTERCAMBIADOR (m)="; L
LPRINT "MASA DE COBRE EN EL ALMACÉN (Kg)="; MCU
LPRINT "CALOR ESPECÍFICO DEL COBRE (J/(KG°C))="; CPU
LPRINT "CALOR ESPECÍFICO DE AGUA (J/(Kg°C)="; CPF
LPRINT "CALOR ESPECÍFICO DEL AIRE(J/KG°C)="; CPA
LPRINT "MASA DE AIRE EN DEPÓSITO (KG)="; MA
LPRINT "ÁREA DE INTERCAMBIO FLUIDO AIRE DEP.(M^2)"; A1
LPRINT "ÁREA DE INTERCAMBIO CON EXTERIOR(M^2)="; A2
LPRINT "COEFICIENTE DE PÉRDIDAS AL AMBIENTE="; U2
LPRINT "ÁREA DE INTERCAMBIO PARAFINA DEPÓSITO (M^2)="; A3
LPRINT "U3 PARAFINA DEPÓSITO (W/M^2°C)="; U3
LPRINT
LPRINT "
             PARÁMETROS DIVERSOS"
             ********
LPRINT "
LPRINT
LPRINT "NÚMERO DE NODOS N="; N
LPRINT "DIMENSIÓN MÁXIMA DE TIEMPO N2="; N2
LPRINT "PASO DE TIEMPO DT (s)="; DT
LPRINT "TEMPERATURA FINAL DE PROCESO (°C)="; TFIN
LPRINT "COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSMISIÓN ALTO (W/M^2°C)="; UH
LPRINT "COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSMISIÓN MEDIO (W/(M^2°C)="; UM
```

LPRINT "COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSMISIÓN BAJO (W/(m^2°C)=": UL

```
LPRINT "COEFICIENTE GLOBAL DE TRANS. FLUIDO AIRE(W/M^2°C)="; U1
LPRINT "NÚMERO DE ELEMENTOS DE CONDICIÓN DE CONTORNO NU5="; NU5
LPRINT "CAUDAL MÁSICO Kg/s="; M
LPRINT "SI DESEA = CALENTAMIENTO = ESCRIBIRLO "; A$
LPRINT "TEMPERATURA AMBIENTE MEDIA °C="; TAMB
LPRINT
LPRINT "
             CONDICIONES INICIALES °C"
              ********
LPRINT "
LPRINT
FOR i = 0 TO N
LPRINT "TFI("; i; ")=";
LPRINT TFI(i)
NEXT i
LPRINT
FOR i = 0 TO N
LPRINT "TSI("; i; ")=";
LPRINT TSI(i)
NEXT i
LPRINT
LPRINT "TEMPERATURA DE AIRE INICIAL="; TI
LPRINT "
            CONDICIONES DE CONTORNO TEF °C"
LPRINT "
              **********
LPRINT
FOR i = 1 TO NU5
LPRINT "TEF("; i; ")=";
LPRINT TEF(i)
NEXT i
FOR i = 1 TO NU5
LPRINT "TIEMPO("; i; ")=";
LPRINT TT(i)
NEXT i
LPRINT
LPRINT "CONDICIÓN DE CONTORNO DEPÓSITO"
LPRINT
```

FOR i = 1 TO NU6

```
LPRINT "TAA("; i; ")=";
   LPRINT TAA(i)
   NEXT i
   FOR i = 1 TO NU6
   LPRINT "TIEMPO("; i; ")=";
   LPRINT ITT(i)
   NEXT i
1866 INPUT " DESEA CAMBIAR ALGÚN DATO"; N$
  IF N = "SI" THEN 660
1870 OPEN "O", #1, "C:\DATOS\SIMULACI\TS1.prn"
  OPEN "O", #2, "C:\DATOS\SIMULACI\TF1.PRN"
PRINT "PROCESO DE CALCULO.- ESPERAR"
PRINT
PRINT " PARA SALIR PULSAR F2"
   ' DIMENSIONADO DE LISTAS
   , ===============
  DIM TS(N, N2): DIM TF(N, N2)
   ' CONDICIONES INICIALES
   FOR i = 0 TO N
   TF(i, 0) = TFI(i)
   TS(i, 0) = TSI(i)
   NEXT i
   TAA = TI: 'TEMPERATURA DEL AIRE O AGUA INICIAL EN DEPÓSITO
```

```
MI = 0
2100 ' PROCESO (ECUACIONES COMPLETAS)
        ======
 . ,
  DX = L / N
   J = 0: 'INSTANTE DE TIEMPO INICIAL
   GOTO 2180
2160 J = J + 1: 'INSTANTE SIGUIENTE
   TIEMP = MI * DT
' CONDICIÓN DE CONTORNO DEL FLUIDO
   K = 1
2163 K = K + 1
   IF TIEMP > TT(K) THEN 2163
   TFE = (TIEMP - TT(K - 1)) * (TEF(K) - TEF(K - 1)) / (TT(K) - TT(K - 1)) + TEF(K - 1)
   TF(0, J) = TFE: 'CONDICIÓN DE CONTORNO EN X=0
' CONDICIÓN DE CONTORNO DE DE AGUA O AIRE
   K = 1
2222 K = K + 1
   IF TIEMP > ITT(K) THEN 2222
   TA = (TIEMP - ITT(K - 1)) * (TAA(K) - TAA(K - 1)) / (ITT(K) - ITT(K - 1)) + TAA(K - 1)
   TAA = TA: 'CONDICIÓN DE CONTORNO EN DEPÓSITO
' INICIO DE NODOS
2180 FOR i = 1 TO N - 1: 'NÚMERO DE NODOS
   'CALCULO DE CPS
   IF (TS(i, J) > TC - 5) AND (TS(i, J) < TC + 5) THEN CPS = (LT / 10 * MS + MCU * CPU)
   / MS + (CPSL + CPSS) / 2
```

```
IF TS(i, J) > TC + 5 THEN CPS = (CPSL * MS + MCU * CPU) / MS
   IF TS(i, J) < TC - 5 THEN CPS = (CPSS * MS + MCU * CPU) / MS
   'CÁLCULO DE U TOTAL FLUIDO PARAFINA
   IF (TS(i, J) > TC - 5) AND (TS(i, J) < TC + 5) THEN U = UM
   IF TS(i, J) > TC + 5 THEN U = UH
   IF TS(i, J) < TC - 5 THEN U = UL
   'CONSTANTES ADIMENSIONALES DE PASO
   K1 = 1 - 2 * KF * VF * DT / (CPF * MF * DX ^ 2) - U * A * DT / (CPF * MF) - U1 * A1 * DT
   / (CPF * MF)
   K2 = -M * L * CPF * DT / (2 * CPF * MF * DX) + KF * VF * DT / (CPF * MF * DX ^ 2):
   K3 = KF * VF * DT / (DX ^ 2 * CPF * MF) + M * CPF * L * DT / (2 * DX * CPF * MF);
   K4 = U * A * DT / (MF * CPF):
   K5 = 1 - U * A * DT / (CPS * MS) - 2 * KS * VS * DT / (CPS * MS * DX ^ 2) - U3 * A3 * DT
   / (CPS * MS)
   K6 = KS * VS * DT / (CPS * MS * DX ^ 2)
   K7 = KS * VS * DT / (DX ^ 2 * CPS * MS)
   K8 = U * A * DT / (CPS * MS)
   K13 = U1 * A1 * DT / (CPF * MF)
   'CÁLCULO DE TS Y TF EN FORMA EXPLÍCITA
   TF(i, J + 1) = K1 * TF(i, J) + K2 * TF(i + 1, J) + K3 * TF(i - 1, J) + TS(i, J) * K4 + K13 *
   TAA
   TS(i, J + 1) = K5 * TS(i, J) + K6 * TS(i + 1, J) + K7 * TS(i - 1, J) + TF(i, J) * K8
   NEXT i
' CONDICIÓN DE CONTORNO
```

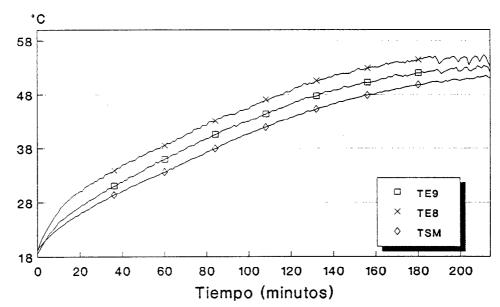
```
TS(0, J + 1) = TS(1, J + 1): 'CONDICIÓN DE CONTORNO EN X=0
  TS(N, J + 1) = TS(N - 1, J + 1)
  TF(N, J + 1) = TF(N - 1, J + 1)
  MI = MI + 1
  IF J < N2 - 1 GOTO 2160: 'CONTADOR PARA ALMACENAJE PARCIAL
  NI = J
  KEY(2) ON
  ON KEY(2) GOSUB 6500
  KEY(1) ON
  ON KEY(1) GOSUB 6000
  'PREPARACIÓN DE DATOS PARA FICHERO FORMATO LOTUS
  , IMPRESIÓN DE CONDICIÓN INICIAL
   IF MI <> J + 1 THEN 2640
  FOR i = 0 TO N
  PRINT #1, TS(i, 0);
  NEXT i
  PRINT #1,
  FOR i = 0 TO N
  PRINT #2, TF(i, 0);
  NEXT i
  PRINT #2,
2640 'FICHEROS DE DATOS
   FOR J = PS TO NI STEP PS
   FOR i = 0 TO N: PRINT #1, TS(i, J);
   NEXT i
   PRINT #1,
```

```
NEXT J: CF = J - PS: 'ÚLTIMO VALOR ALMACENADO
   FOR J = PS TO NI STEP PS
   FOR i = 0 TO N: PRINT #2, TF(i, J);
   NEXT i
   PRINT #2,
   NEXT J
   'CONDICIONES INICIALES PARA REPETIR EL PROCESO
   FOR i = 0 TO N
   TF(i, 0) = TF(i, CF)
   TS(i, 0) = TS(i, CF)
   NEXT i
   IF TIEMP > TT(NU5) - 60 THEN 2910: 'CONDICIÓN DE FIN DE TIEMPO
   IF A$ = "CALENTAMIENTO" THEN 2890
   IF TS(N, CF) < TFIN THEN 2910: 'CONDICIÓN DE FIN POR ENFRIAMIENTO
2890 IF TS(N, CF) > TFIN THEN 2910: 'CONDICIÓN DE FIN POR CALENTAMIENTO
   GOTO 2100
2910 CLOSE #1, 2
   END
6000 CLS
   PRINT "VALOR ACTUAL DE TS(N,J) °C="; TS(N, J)
   PRINT "TEMPERATURA DE SALIDA DE AGUA °C="; TF(N, J)
   PRINT "TEMPERATURA DE AIRE EN DEPÓSITO ° C="; TAA
   PRINT "TIEMPO TRANSCURRIDO EXP. (MINUTOS)="; TIEMP / 60
   PRINT "PARA VER VALOR ACTUAL DE TS(N,J) PULSAR F1 "
   PRINT "PARA SALIR PULSAR F2"
   PRINT " ******* PROCESO DE CÁLCULO ********
   RETURN
7000 GOTO 1881
6500 SYSTEM
```

EXPERIENCIA: RED-DP2

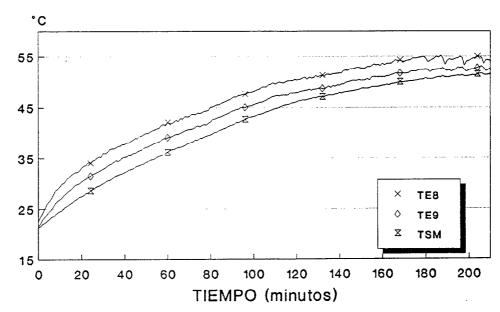
								
FICHERO	FECHA I	HORA INICIO	HORA FIN	CAUDAL (1/s)	MASA DE PARAF.Kg	Masa de agua (Kg)	CIRCUITO DE CARGA	
A-1	07-02-91	08:01:35	11:39:50	0,06	39,5	0	INTERIOR	
A-2	08-02-91	09:48:39	13:22:34	0,06	39,5	0	INTERIOR	
A-3	08-02-91	16:10:15	17:20:05	0,06	39,5	0	INTERIOR	
A-4	09-02-91	10:05:00	12:42:26	0,06	39,5	0	INTERIOR	
A-5	11-02-91	15:23:40	19:14:38	0,06	39,5	0	INTERIOR	
A-6	14-02-91	09:05:29	15:17:19	0,06	39,5	0	INTERIOR	
A-7	22-02-91	15:47:14	19:44:24	0,06	39,5	0	INTERIOR	
A-8	01-03-91	08:15:20	16:23:15	0,06	39,5	o _	INTERIOR	
A-9	05-03-91	08:12:42	12:17:21	0,06	39,5	0	INTERIOR	
A-10	11-03-91	07:57:55	18:57:04	0,06	39,5	97,2	INTERIOR	
A-11	08-04-91	11:19:42	17:32:37	0,06	39,5	0	INTERIOR	
A-12	10-04-91	10:53:57	15:51:20	0,06	39,5	0	INTERIOR	
A-13	29-04-91	13:26:21	17:43:08	0,06	39,5	97,2	INTERIOR	
A-14	30-04-91	12:31:44	16:03:29	0,06	39,5	97,2	INTERIOR	
A-15	24-07-91	08:47:08	18:47:27	0,06	39,5	0	INTERIOR	

** EXP:A-1 ** CARGA CON RED: DP2



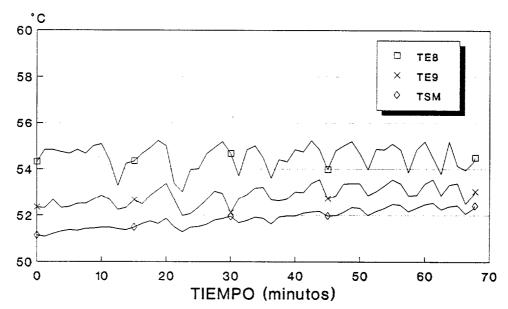
TAMB. MEDIA 18 °C; Caudal 0.06 1/s

** EXP: A-2 ** CARGA CON RED: DP2



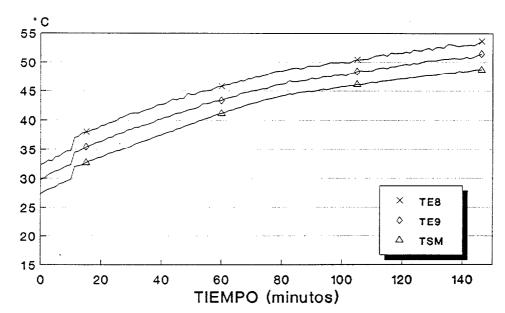
TAMB MEDIA 18 °C; CAUDAL 0.06 I/s

** EXP: A-3 ** CARGA CON RED: DP2



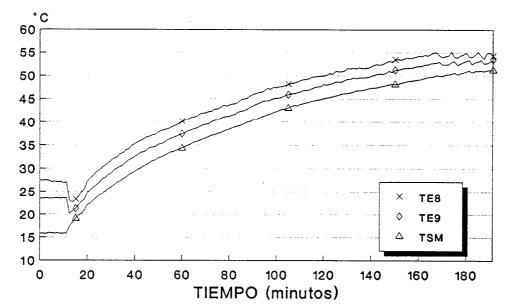
TAMB. MEDIA 18 °C; CAUDAL 0.06 I/s

** EXP:A-4 ** CARGA CON RED: DP2



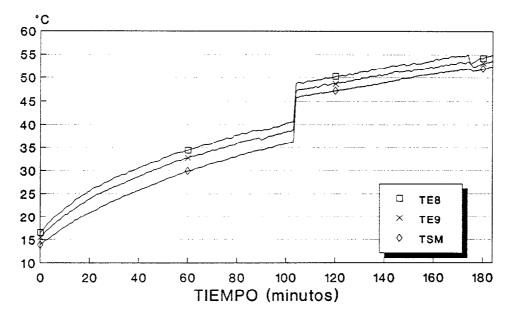
TAMB. MEDIA 18.5 °C; CAUDAL 0.06 1/s

** EXP: A-5 ** CARGA CON RED: DP2



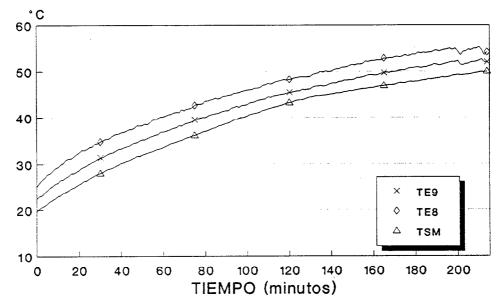
TAMB. MEDIA 17.2 °C; CAUDAL 0.06 1/s

** EXP:A-6 ** CARGA CON RED: DP2



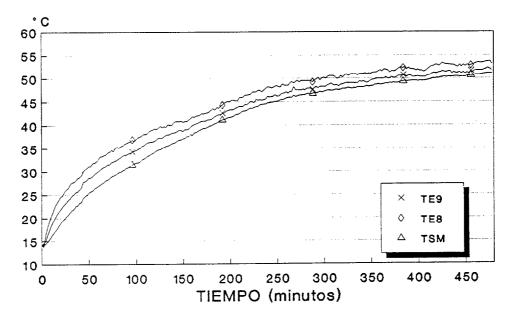
TAMB. MEDIA 20.6 °C; CAUDAL 0.06 1/s

** EXP:A-7 ** CARGA CON RED: DP2



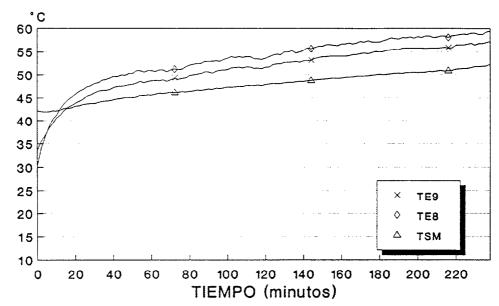
TAMB. MEDIA 15.2 °C; CAUDAL 0.06 I/s

** EXP: A-8 **
CARGA CON RED: DP2



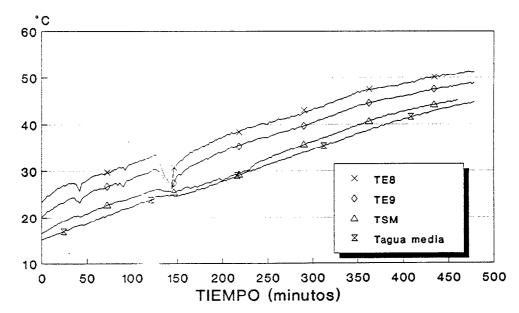
TAMB. MEDIA 16.5 °C; CAUDAL 0.06 1/s

** EXP: A-9 ** CARGA CON RED: DP2



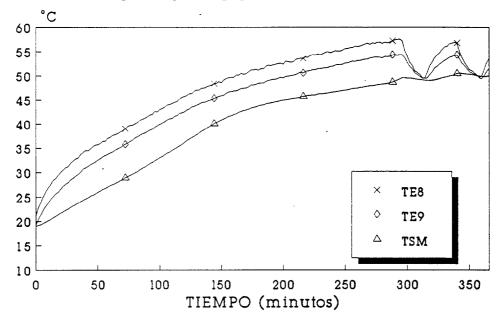
TAMB. MEDIA 17.1 °C; CAUDAL 0.06 1/s

** EXP: A-10
CARGA CON RED: DP2



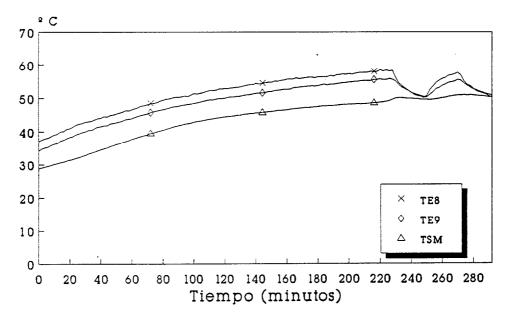
TAMB. MEDIA 19.0 °C; CAUDAL 0.06 1/s

** EXP: A-11 **
CARGA CON RED: DP2



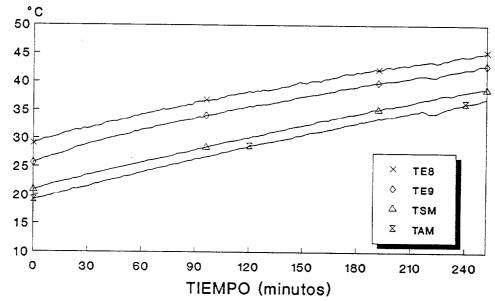
TAMB. MEDIA 28.0 °C; CAUDAL 0.06 1/s

** EXP: A-12 **
CARGA CON RED: DP2



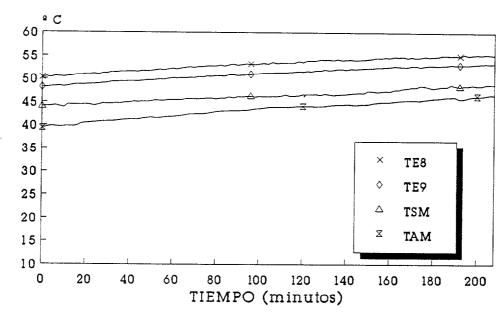
TAMB. MEDIA 30 °C; CAUDAL 0.06 (1/s)

** **EXP:** A-13 ** CARGA CON RED: DP2



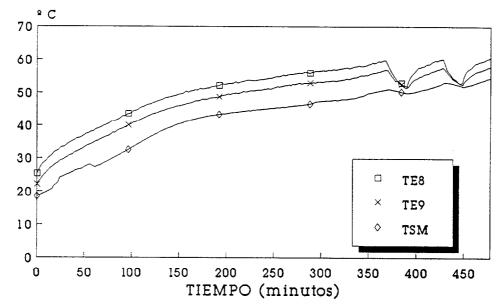
TAMB.MEDIA 17.4 °C; CAUDAL 0.06 I/s

** EXP: A-14 **
CARGA CON RED: DP2



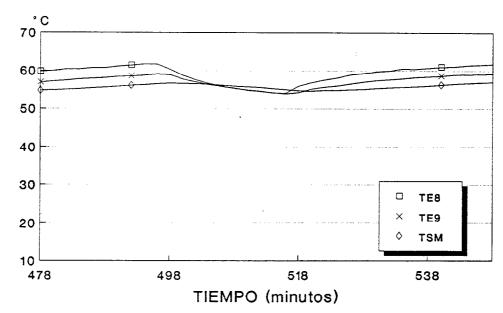
TAMB. MEDIA 20.4 ° C; CAUDAL 0.06 (1/s)

** EXP: A-15 **
CARGA CON RED: DP2



TAMB. MEDIA 18.7 ° C; CAUDAL 0.06 (1/s)

** **EXP:A-15** **
CARGA CON RED: DP2 (cont. A-15)



TAMB. MEDIA 18.7 °C; CAUDAL 0.06 1/s

EXPERIENCIA: DIA-DP2-DA21-CARGA (circuito interior)

FICHERO	FECHA НО	RA INICIO	HORA FIN	CAUDAL B2 (1/s)	MASA DE PARAF.kg	MASA DE AGUA (kg)	CAUDAL B4
C-1	13-02-91	08:45:40	17:16:31	0,025	39,5	o	0,076
C-2	14-02-91	09:05:29	15:17:07	0,025	39,5	0	0,076
C-3	14-02-91	15:25:49	17:18:51	0,025	39,5	о о	0,076
C-4	16-02-91	09:38:38	12:43:47	0,025	39,5	O	0,076
C-5	18-02-91	12:12:27	17:23:10	0,025	39,5	0	0,076
C-6	19-02-91	13:42:01	17:47:25	0,025	39,5	o	0,076
C-7	20-02-91	10:08:10	17:35:54	0,025	39,5	0	0,076
C-8	21-02-91	08:18:19	15:51:54	0,025	39,5	0	0,076
C-9	22-02-91	12:41:44	15:33:04	0,025	39,5	0	0,076
C-10	01-03-91	08:15:20	16:23:15	0,025	39,5	0	0,076
C-11	11-04-91	10:37:51	14:24:17	0,025	39,5	0	0,076
C-12	12-04-91	11:02:50	16:30:19	0,021	39,5	0	0,073
C-13	18-04-91	10-49-25	15:04:49	0,018	39,5	97,2	0,073
C-14	19-04-91	10:14:31	16:01:29	0,018	39,5	97,2	0,073
C-15	08-05-91	13:40:36	17:36:20	0,020	39,5	97,2	0,062

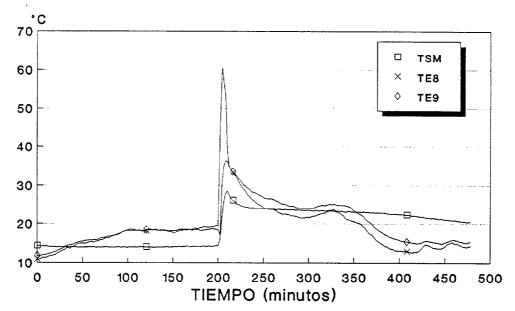
EXPERIENCIA: DIA-DP2-DA21-CARGA (circuito interior)

FICHERO	FECHA	HORA INICIO	HORA FIN	CAUDAL B2 (1/s)	MASA DE PARAF.kg	MASA DE AGUA	CAUDAL B4 (1/s)
C-16	13-05-91	08:43:31	13:41:56	0,020	39,5	0	0,062
C-17	13-05-91	14:27:18	17:13:25	0,016	39,5	0	0,06
C-18	14-05-91	12:50:19	15:01:26	0,016	39,5	0	0,06
C-19	15-05-91	11:15:55	16:09:07	0,016	39,5	0	0,06
C-20	20-05-91	13:18:08	17:12:27	0,025	39,5	О	0,057
C-21	21-05-91	11:02:40	15:43:48	0,018	39,5	0	0,054
C-22	23-05-91	10:15:42	15:57:01	0,02	39,5	0	0,055
C-23	24-05-91	10:17:41	15:50:35	0,02	39,5	O	0,053
C-24	27-05-91	13:24:55	16:20:23	0,02	39,5	o	0,070
C-25	03-06-91	10:04:54	15:31:36	0,02	39,5	0	0,070
C-26	03-06-91	16:16:37	17:37:15	0,02	39,5	0	0,070
C-27	04-06-91	12:17:08	17:32:56	0,02	39,5	0	0,070
C-28	05-06-91	11-50-39	17:32:24	0,02	39,5	o	0,070
C-29	06-06-91	11:39:50	17:06:21	0,02	39,5	o	0,070
C-30	11-06-91	11:23:30	18:10:53	0,02	39,5	0	0,070

EXPERIENCIA: DIA-DP2-DA21-CARGA (circuito interior)

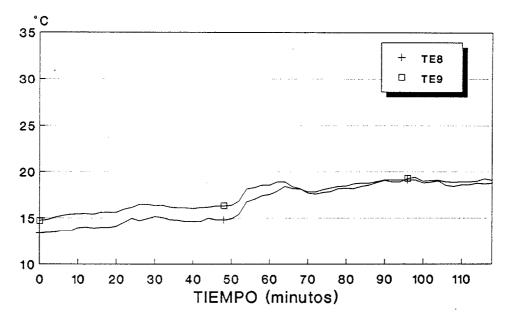
FICHERO	FECHA	HORA INICIO	HORA FIN	CAUDAL B2 (1/s)	MASA DE PARAF.Kg	MASA DE AGUA (Kg)	CAUDAL B4
. C-31	12-06-91	10:45:56	17:58:27	0,020	39,5	o	0,07
C-32	13-06-91	10:15:43	16:54:8	0,02	39,5	o	0,07
C-33	25-06-91	12:00:45	17:58:20	0,02	39,5	0	0,07
C-34	26-06-91	10:29:49	17:58:34	0,02	39,5	0	0,07
C-35	27-06-91	11:19:30	15:18:56	0,014	39,5	0	0,07
C-36	28-06-91	10:40:48	17:23:16	0,014	39,5	97,2	0,07
C-37	01-07-91	10:24:43	18:04:58	0,02	39,5	97,2	0,07
C-38	08-07-91	09:55:55	16:34:47	0,02	39,5	97,2	0,07
C-39	09-07-91	11:20:41	17:07:56	0,02	39,5	97,2	0,07
C-40	10-07-91	14:05:03	16:52:30	0,02	39,5	97,2	0,07
C-41	11-07-91	10:57:16	17:13:27	0,02	39,5	97,2	0,07
C-42	15-07-91	09:57:30	15:54:38	0	39,5	97,2	0
C-43	18-07-91	09:16:47	17:45:25	0,02	39,5	97,2	0,07

** EXP: C-1 **
CARGA CON PANEL: DP2



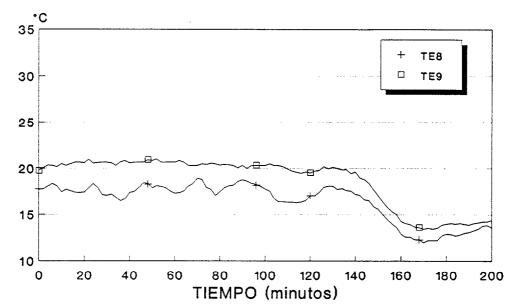
TAMB. MEDIA 15.6 °C; CAUDAL 0.02 I/s

** EXP: C-4 **
CARGA CON PANEL: DP2



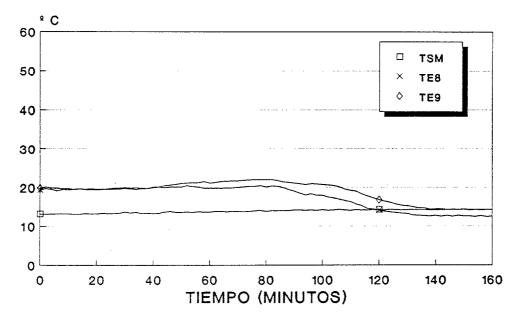
TAMB. MEDIA 15.8 °C; CAUDAL 0.02 I/s

** EXP: C-5 ** CARGA CON PANEL: DP2



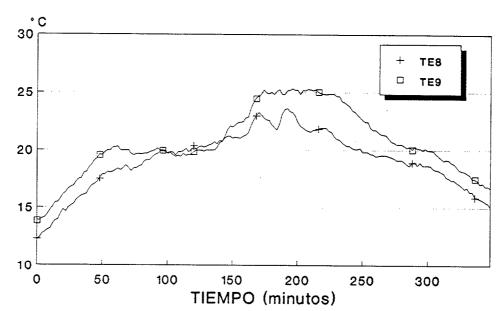
TAMB. MEDIA 15.0° C; CAUDAL 0.02 1/s

** EXP: C-6 **
CARGA CON PANEL: DP2



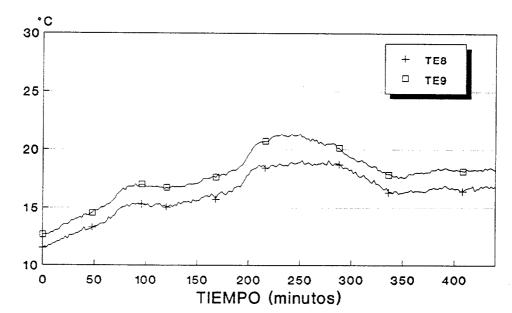
Tamb. media 16.5 ° C; Caudal 0.02

** EXP: C-7 **
CARGA CON PANEL: DP2



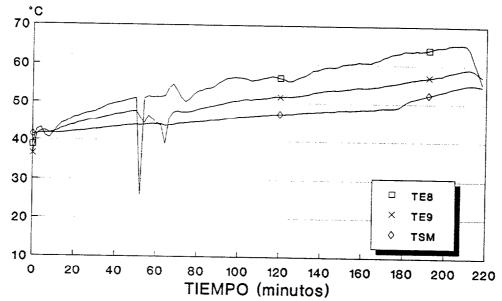
TAMB. MEDIA 17.4 °C; CAUDAL 0.02 I/s

** EXP: C-8 **
CARGA CON PANEL: DP2



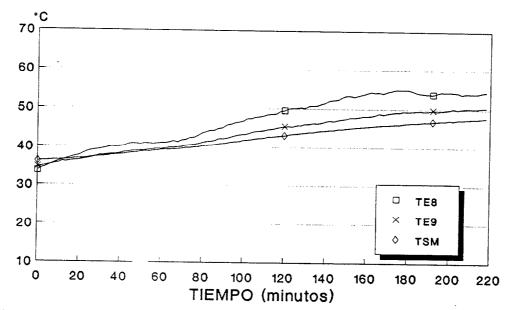
TAMB. MEDIA 16.1 °C; CAUDAL 0.02 I/s

** EXP: C-11 ** CARGA CON PANEL: DP2



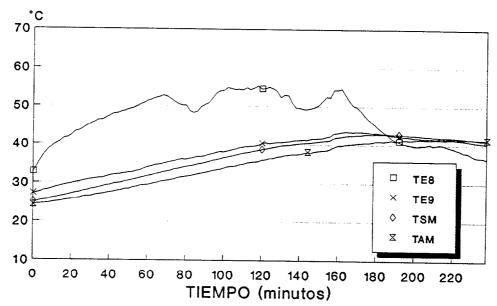
TAMB. MEDIA 20.3 °C; CAUDAL 0.025 1/8

** EXP: C-12 **
CARGA CON PANEL: DP2



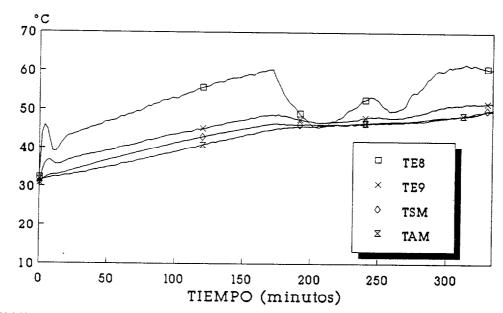
TAMB. MEDIA 18.5 °C CAUDAL 0.021 I/s

** EXP: C-13 ** CARGA CON PANEL: DP2



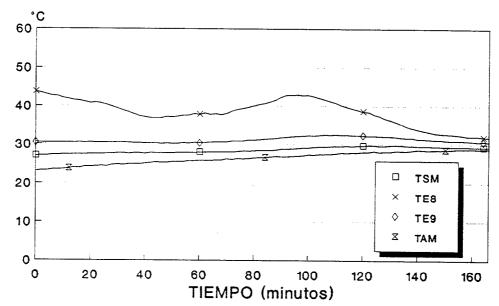
TAMB. MEDIA 19.4 °C; CAUDAL 0.018 I/s

** EXP: C-14 **
CARGA CON PANEL: DP2



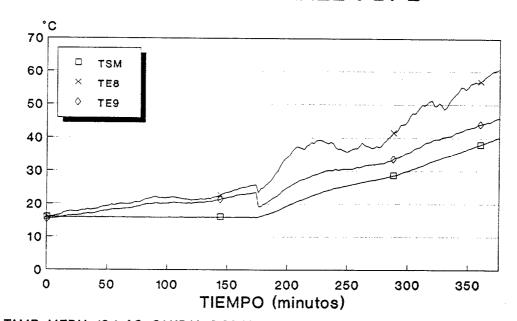
TAMB. MEDIA 18.4 °C CAUDAL 0.018 1/s

** EXP: C-15 ** CARGA CON PANEL: DP2



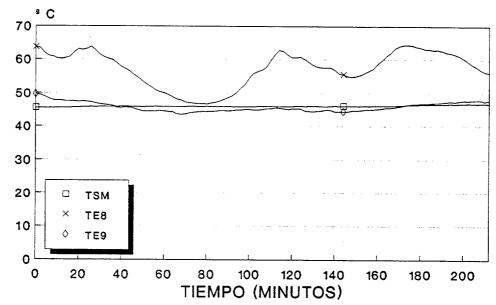
TAMB. MEDIA 17.7 °C; CAUDAL 0.02 I/s

** EXP: C-16 **
CARGA CON PANEL: DP2



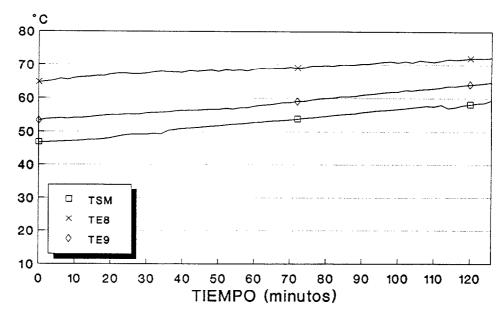
TAMB. MEDIA 18.1 °C; CAUDAL 0.02 I/s

** EXP: C-17 ** CARGA CON PANEL: DP2



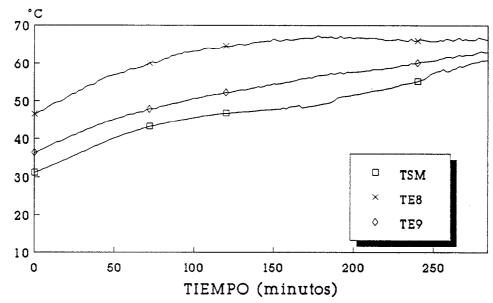
Tamb. media 21.5 ° C; Caudal 0.016 1/s

** EXP: C-18 **
CARGA CON PANEL: DP2



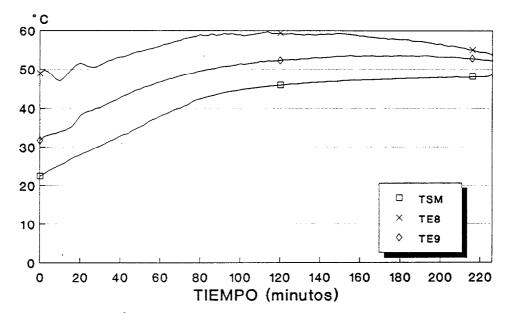
TAMB. MEDIA 25.6 °C CAUDAL 0.016 I/s

** EXP: C-19 **
CARGA CON PANEL: DP2



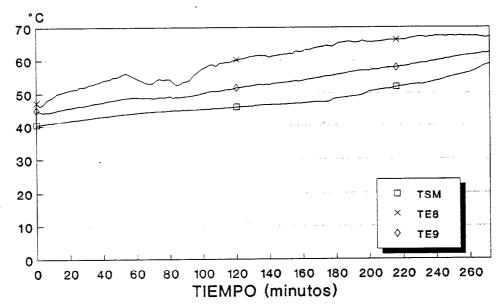
TAMB. MEDIA 25.3 °C; CAUDAL 0.016 1/s

** EXP: C-20 **
CARGA CON PANEL: DP2



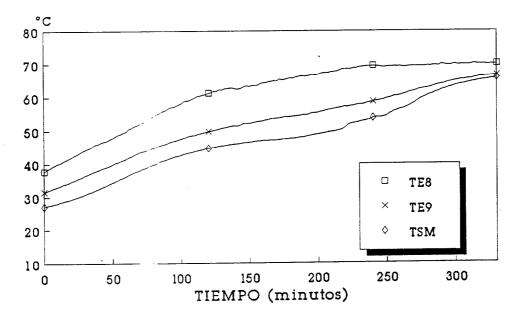
TAMB. MEDIA 21.3 °C; CAUDAL 0.025 1/s

** EXP: C-21 ** CARGA CON PANEL: DP2



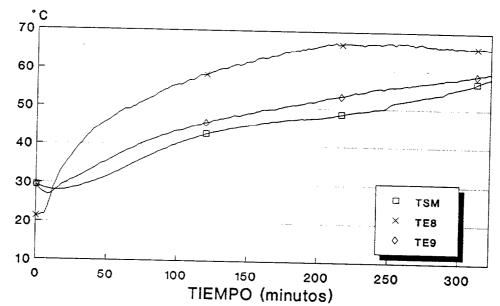
TAMB. MEDIA 22.1 °C; CAUDAL 0.018 I/s

** EXP: C-22 **
CARGA CON PANEL: DP2



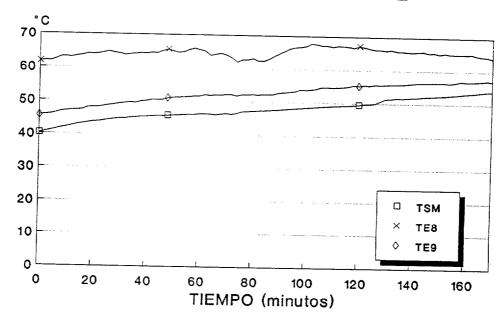
TAMB. MEDIA 25.3°C; CAUDAL 0.02 1/s

** EXP: C-23 ** CARGA CON PANEL: DP2



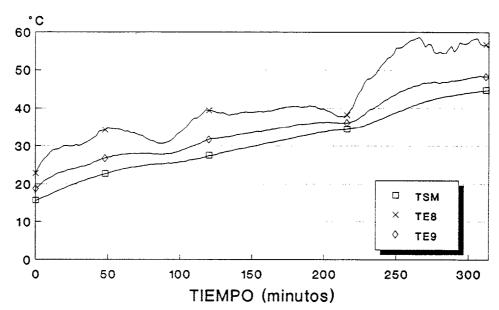
TAMB. MEDIA 23.2 °C; CAUDAL 0.02 I/s

** EXP: C-24 ** CARGA CON PANEL: DP2



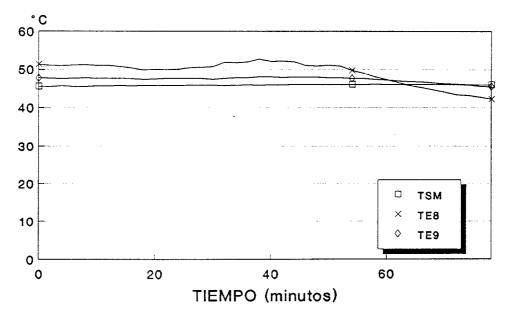
TAMB. MEDIA 25.4 °C; CAUDAL 0.02 I/s

** EXP: C-25 ** CARGA CON PANEL: DP2



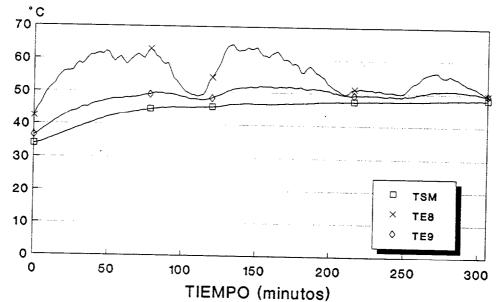
TAMB. MEDIA 20.1 °C; CAUDAL 0.02 1/s

** EXP: C-26 ** CARGA CON PANEL: DP2



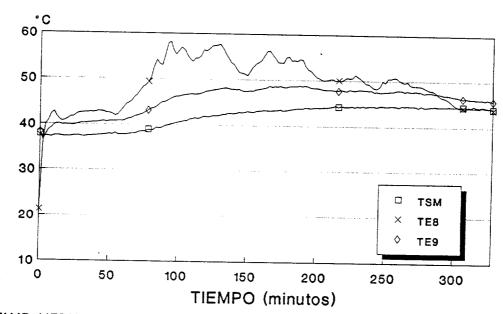
TAMB. MEDIA 20.7 °C; CAUDAL 0.02 I/s

** EXP: C-27 ** CARGA CON PANEL: DP2



TAMB. MEDIA 22.3 °C; CAUDAL 0.02 1/s

** EXP: C-28 ** CARGA CON PANEL: DP2

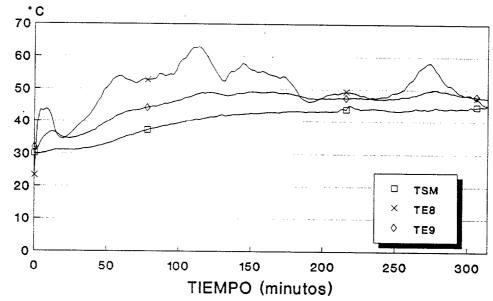


TAMB. MEDIA 20.7 °C; CAUDAL 0.02 1/s

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

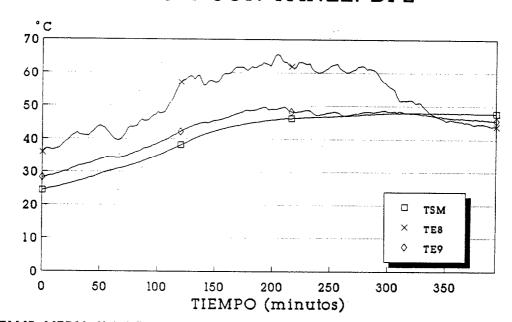
Apéndice C: GRÁFICOS EXP; C-I

** EXP: C-29 ** CARGA CON PANEL: DP2



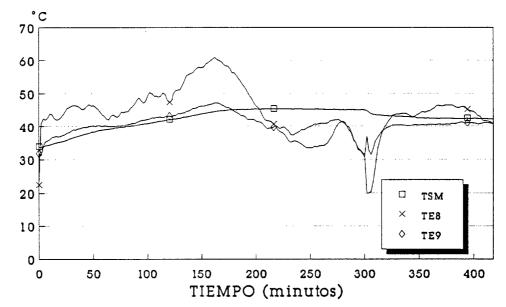
TAMB. MEDIA 21.8 °C; CAUDAL 0.02 I/s

** EXP: C-30 **
CARGA CON PANEL: DP2



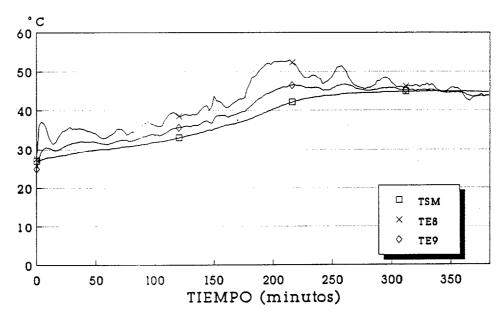
TAMB. MEDIA 21.6 °C; CAUDAL 0.02 1/s

** EXP: C-31 **
CARGA CON PANEL: DP2



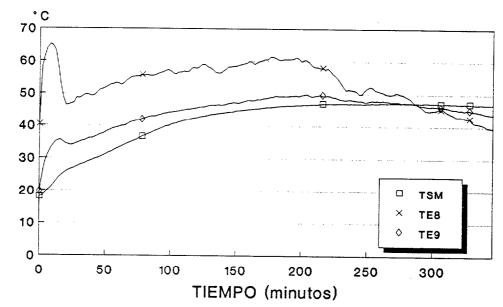
TAMB. MEDIA 19.4 °C; CAUDAL 0.02 1/s

** EXP: C-32 **
CARGA CON PANEL: DP2



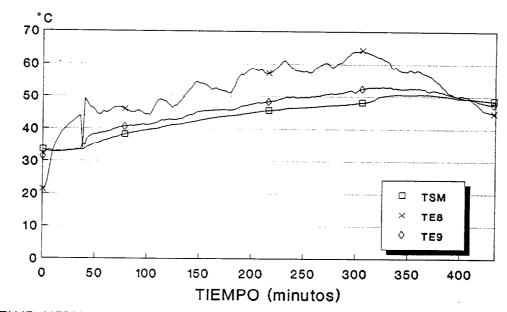
TAMB. MEDIA 19.5 °C; CAUDAL 0.02 1/s

** EXP: C-33 ** CARGA CON PANEL: DP2



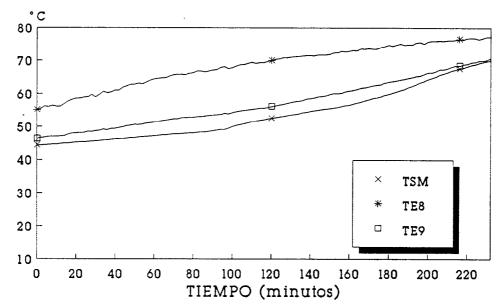
TAMB. MEDIA 21.6 °C; CAUDAL 0.02 1/s

** EXP: C-34 **
CARGA CON PANEL: DP2



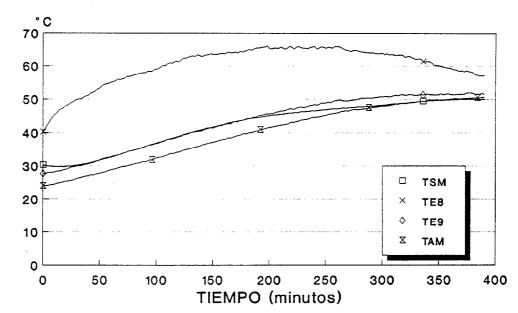
TAMB. MEDIA 21.9 °C; CAUDAL 0.02 I/s

** EXP: C-35 ** CARGA CON PANEL: DP2



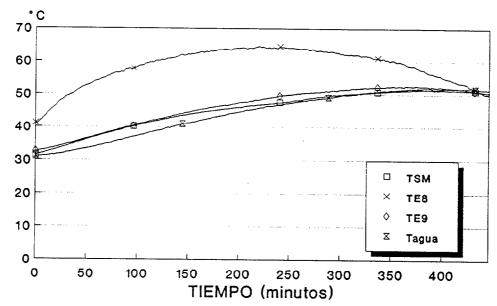
TAMB. MEDIA 28.6 °C; CAUDAL 0.014 1/s

** EXP: C-36 ** CARGA CON PANEL: DP2



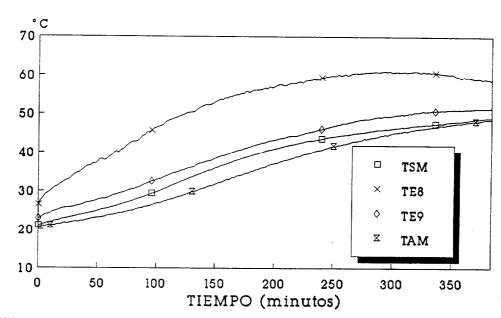
TAMB. MEDIA 26.2 °C; CAUDAL 0.014 I/s

** EXP: C-37 ** CARGA CON PANEL: DP2



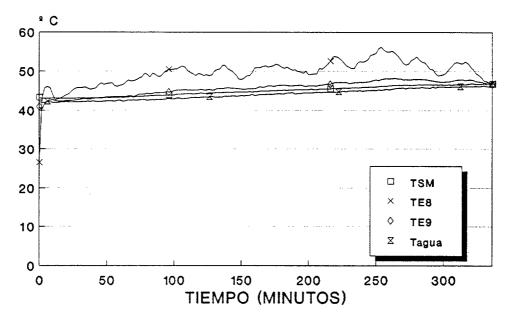
TAMB. MEDIA 24.2 °C; CAUDAL 0.020 I/s

** EXP: C-38 **
CARGA CON PANEL: DP2



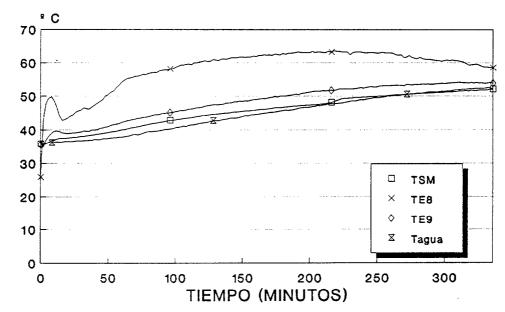
TAMB. MEDIA 23.8 °C; CAUDAL 0.020 1/s

** EXP: C-39 ** CARGA CON PANEL: DP2



Tamb. media 21.3 ° C; Caudal 0.020 I/s

** EXP: C-41 ** CARGA CON PANEL: DP2

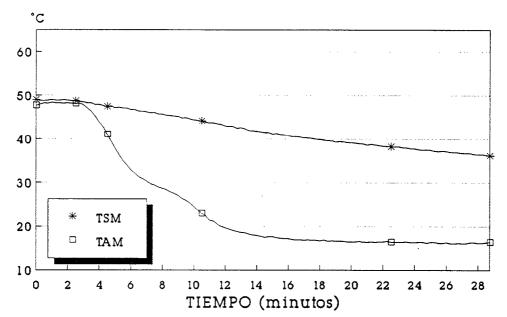


Tamb. media 22.7 ° C; Caudal 0.020 1/s

EXPERIENCIA: DESCARGA-DP2

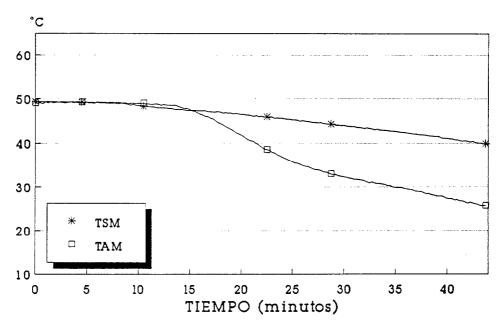
FICHERO	FECHA	HORA INICIO	HORA FIN	CAUDAL (1/s)	MASA DE PARAF. kg	MASA DE AGUA (kg)	CIRCUITO DE
F-1	08-03-91	19:36:28	20:10:24	0,141	39,5	97,2	EXTERIOR
F-2	11-03-91	19:17:37	20:09:06	0,0382	39,5	97,2	EXTERIOR
F-3	30-04-91	17:03:52	17:40:39	0,106	39,5	97,2	EXTERIOR
F-4	13-05-91	15:46:55	17:19:01	0,040	39,5	o	INTERIOR
F-5	14-05-91	16:30:39	17:41:39	0,043	39,5	0	INTERIOR
F-6	21-05-91	16:21:45	18:07:09	0,016	39,5	0	INTERIOR
F-7	23-05-91	16:14:20	17:27:30	0,026	39,5	0	INTERIOR
F-8	27-06-91	15:53:43	18:52:21	0,013	39,5	0	INTERIOR
F-9	11-07-91	17:42:14	19:03:48	0,038	39,5	97.2	EXTERIOR

** EXP: F-1 **
DESCARGA POR CIRCUITO EXTERIOR: DP2



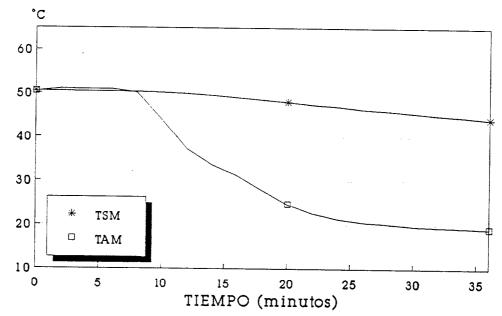
TAMB. MEDIA 13.8 °C; CAUDAL 0.14 1/s

** EXP: F-2 **
DESCARGA POR CIRCUITO EXTERIOR: DP2



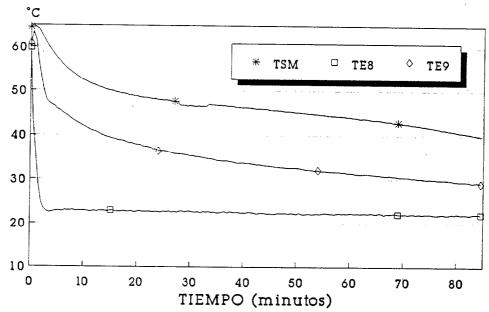
TAMB. MEDIA 15.0 °C; CAUDAL 0.04 1/s

** EXP: F-3 **
DESCARGA POR CIRCUITO EXTERIOR: DP2



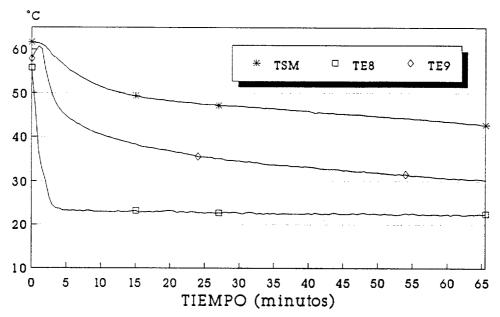
TAMB. MEDIA 18.4 °C; CAUDAL 0.10 1/s

** EXP: F-4 **
DESCARGA POR CIRCUITO INTERIOR: DP2



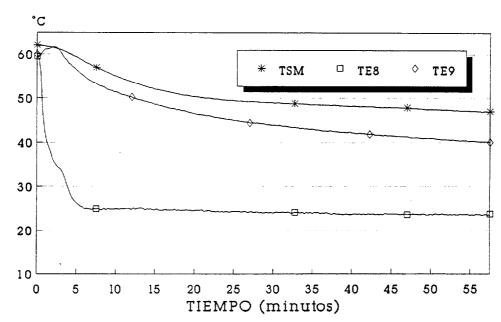
TAMB. MEDIA 23.8 °C; CAUDAL 0.04 1/s

** EXP: F-5 **
DESCARGA POR CIRCUITO INTERIOR: DP2



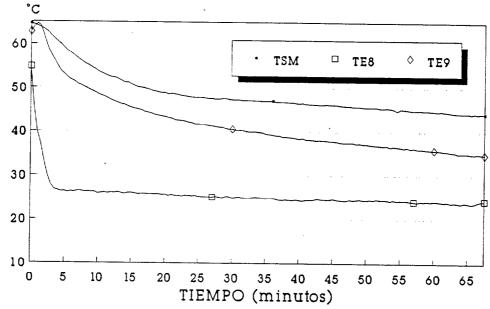
TAMB. MEDIA 22.6 °C; CAUDAL 0.04 1/s

** EXP: F-6 **
DESCARGA POR CIRCUITO INTERIOR: DP2



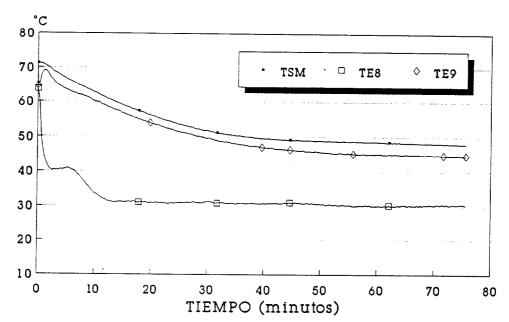
TAMB. MEDIA 25.0 °C; CAUDAL 0.02 1/s

** EXP: F-7 **
DESCARGA POR CIRCUITO INTERIOR: DP2



TAMB. MEDIA 23.9 °C; CAUDAL 0.03 1/s

** EXP: F-8 **
DESCARGA POR CIRCUITO INTERIOR: DP2

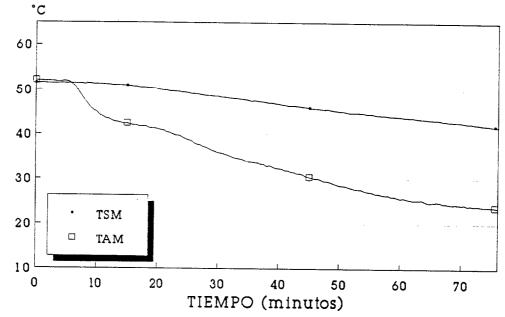


TAMB. MEDIA 26.2 °C; CAUDAL 0.01 1/s

International de Les Bellines de Cesarie Biblistes Divised 2004

Apéndice D: GRÁFICOS EXP: F-I EXP: F-9 **

DESCARGA POR CIRCUITO EXTERIOR: DP2

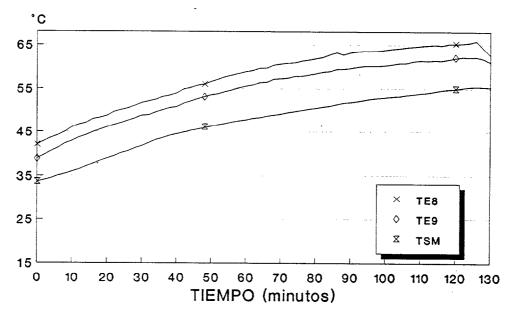


TAMB. MEDIA 19.8 °C; CAUDAL 0.04 1/s

EXPERIENCIA: RED-DP1

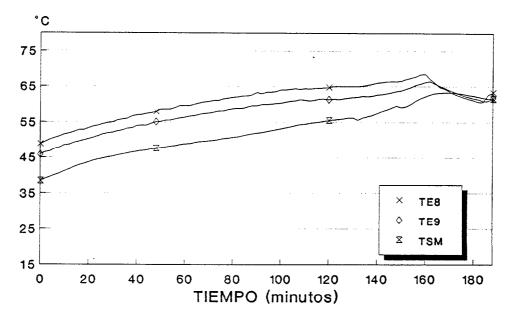
FICHERO	FECHA	HORA INICIO	HORA FIN	CAUDAL (1/s)	MASA DE MASE PARAF. kg	A DE AGUA (kg)	CIRCUITO DE CARGA
D-1	01-08-91	10:27:19	12:40:08	0,046	39,5	0	INTERIOR
D-2	02-08-91	09:16:51	12:28:53	0,048	39,5	0	INTERIOR
D-3	05-08-91	08:54:49	12:41:53	0,036	39,5	0	INTERIOR
D-4	06-08-91	08:47:54	12:43:13	0,036	39,5	0	INTERIOR
D-5	07-08-91	10:06:32	13:10:15	0,036	39,5	0	INTERIOR
D-6	08-08-91	09:02:15	12:55:30	0,040	39,5	0	INTERIOR
D-7	09-08-91	08:40:18	12:04:39	0,06	39,5	0	INTERIOR
D-8	12-08-91	09:23:09	13:01:57	0,040	39,5	120	INTERIOR
D-9	13-08-91	09:50:13	13:43:28	0,036	39,5	120	INTERIOR
D-10	14-08-91	09:27:31	13:06:19	0,031	39,5	120	INTERIOR
D-11	19-08-91	09:17:42	12:21:25	0,031	39,5	120	INTERIOR
D-12	20-08-91	08:46:57	13:31:46	0,039	39,5	120	INTERIOR
D-13	21-08-91	09:26:55	13:07:47	0,039	39,5	120	INTERIOR
D-14	26-08-91	09:23:19	13:08:19	0,08	39,5	120	EXTERIOR
D-15	27-08-91	09:08:46	13:35:02	0,08	39,5	120	EXTERIOR

** EXP: D-1 ** CARGA CON RED: DP1



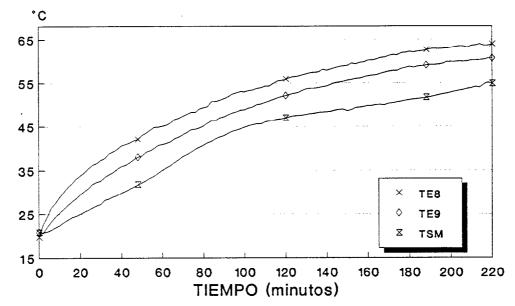
TAMB MEDIA 25 °C; CAUDAL 0.046 I/s

** EXP: D-2 ** CARGA CON RED: DP1



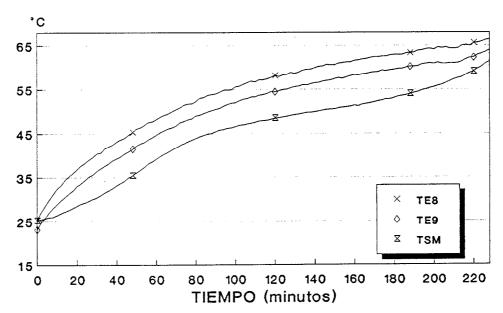
TAMB MEDIA 24 °C; CAUDAL 0.048 I/s

** EXP: D-3 ** CARGA CON RED: DP1



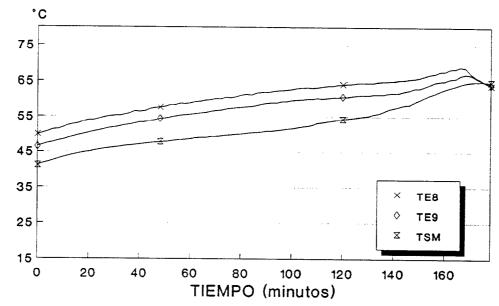
TAMB MEDIA 23 °C; CAUDAL 0.036 1/s

** EXP: D-4 **
CARGA CON RED: DP1



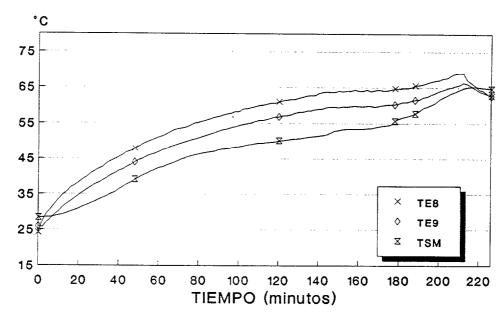
TAMB MEDIA 23 °C; CAUDAL 0.036 1/s

** EXP: D-5 ** CARGA CON RED: DP1



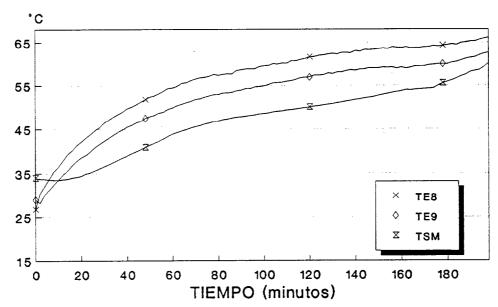
TAMB MEDIA 25 °C; CAUDAL 0.036 I/s

** EXP: D-6 ** CARGA CON RED: DP1



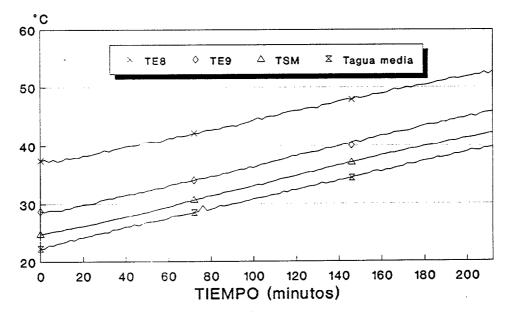
TAMB MEDIA 25 °C; CAUDAL 0.040 I/s

** EXP: D-7 ** CARGA CON RED: DP1



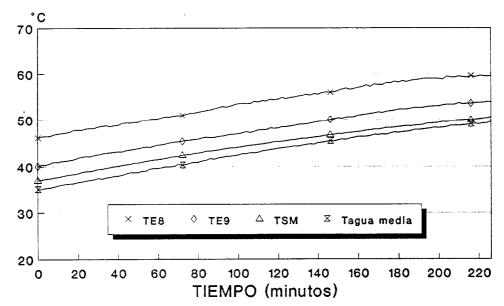
TAMB MEDIA 23 °C; CAUDAL 0.040 I/s >

** EXP: D-8 ** CARGA CON RED: DP1



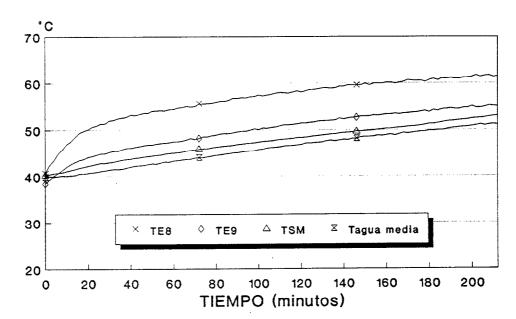
TAMB. MEDIA 25.5 °C; CAUDAL 0.04 I/s

** EXP: D-9 ** CARGA CON RED: DP1



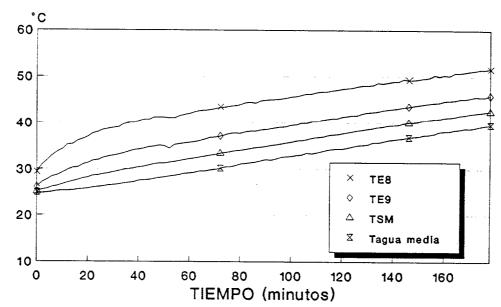
TAMB. MEDIA 27.0 °C; CAUDAL 0.036 I/s

** **EXP: D-10** ** CARGA CON RED: DP1



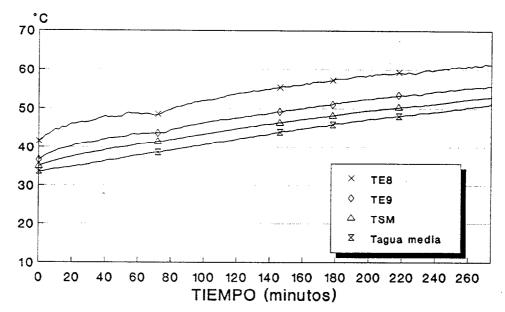
TAMB. MEDIA 26.4 °C; CAUDAL 0.031 I/s

** **EXP: D-11** ** CARGA CON RED: DP1



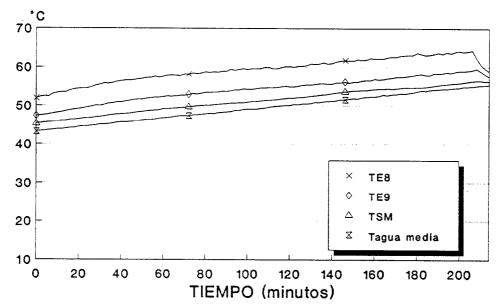
TAMB. MEDIA 25.6 ° C; CAUDAL 0.031 I/s

** EXP: D-12 ** CARGA CON RED: DP1



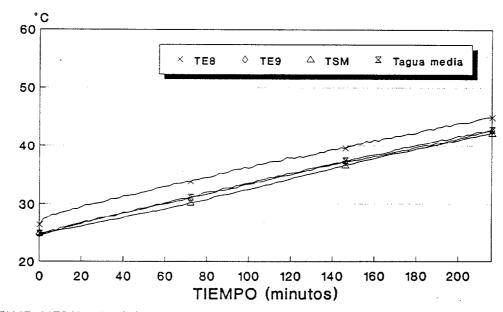
TAMB. MEDIA 26.5 °C; CAUDAL 0.039 I/s

** EXP: D-13 ** CARGA CON RED: DP1



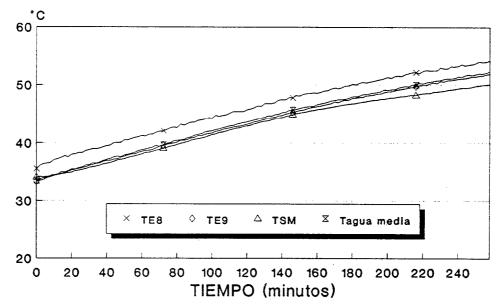
TAMB. MEDIA 28.4 ° C; CAUDAL 0.039 I/s.

** EXP: D-14 **
CARGA CON RED: DP1



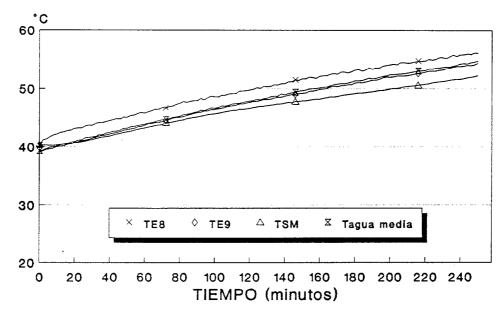
TAMB. MEDIA 25.5 °C; CAUDAL 0.08 I/s

** **EXP: D-15** ** CARGA CON RED: DP1



TAMB. MEDIA 27.2 °C; CAUDAL 0.08 I/s

** EXP: D-16 ** CARGA CON RED: DP1

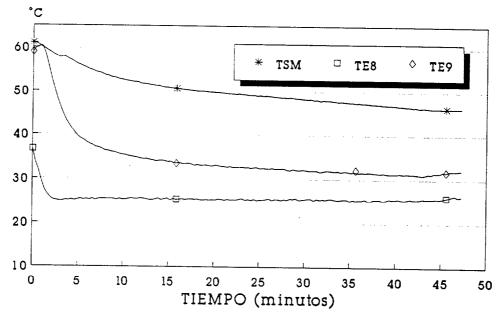


TAMB. MEDIA 25.9 °C; CAUDAL 0.08 I/s

EXPERIENCIA: DESCARGA-DP1

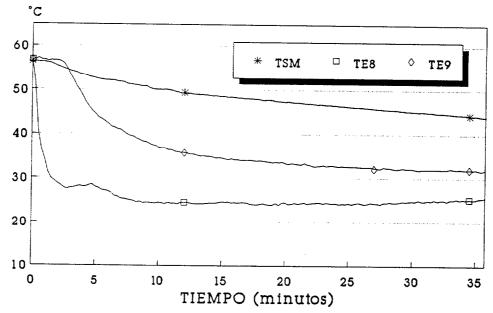
FICHERO	FECHA	HORA INICIO	HORA FIN	CAUDAL (1/s)	MASA DE PARAF.kg	MASA DE AGUA (kg)	CIRCUITO DE DESCARGA
G-1	02-08-91	12:43:53	13:25:59	0,043	39,5	0	INTERIOR
G-2	05-08-91	12:56:53	13:38:57	0,030	39,5	0	INTERIOR
G-3	06-08-91	13:04:28	14:03:18	0,018	39,5	0	INTERIOR
G-4	07-08-91	13:26:13	13:45:48	0,028	39,5	О	INTERIOR
G - 5	09-08-91	12:16:32	13:11:52	0,019	39,5	О	INTERIOR
G-6	21-08-91	13:20:17	13:55:51	0,07	39,5	120	EXTERIOR

** EXP: G-1 **
DESCARGA POR CIRCUITO INTERIOR: DP1



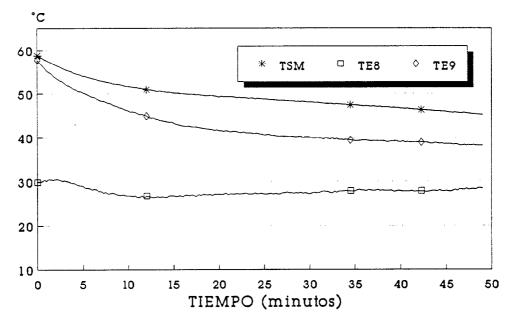
TAMB. MEDIA 27.1 °C; CAUDAL 0.04 1/s

** EXP: G-2 **
DESCARGA POR CIRCUITO INTERIOR: DPI



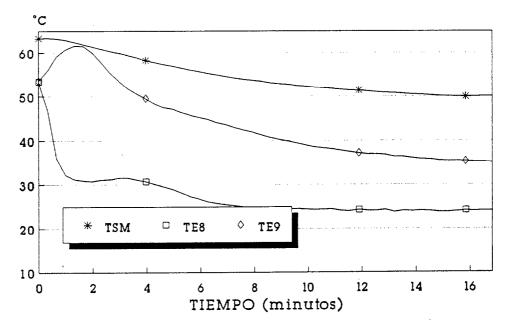
TAMB. MEDIA 25.3 °C; CAUDAL 0.03 1/s

** EXP: G-3 **
DESCARGA POR CIRCUITO INTERIOR: DPI



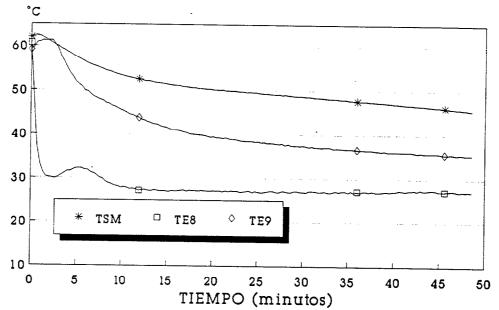
TAMB. MEDIA 26.6 °C; CAUDAL 0.018 1/s

** EXP: G-4 **
DESCARGA POR CIRCUITO INTERIOR: DP1



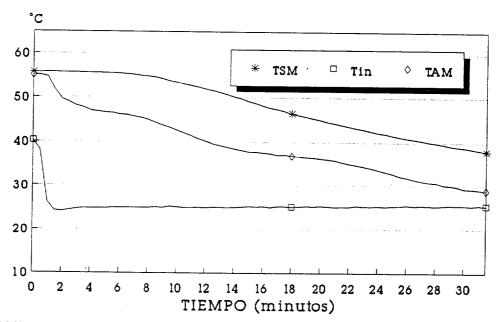
TAMB. MEDIA 24.7 °C; CAUDAL 0.028 1/s

** EXP: G-5 **
DESCARGA POR CIRCUITO INTERIOR: DP1



TAMB. MEDIA 26.4 °C; CAUDAL 0.019 1/s

** EXP: G-6 **
DESCARGA POR CIRCUITO EXTERIOR: DPI



TAMB. MEDIA 32.8 °C; CAUDAL 0.07 1/s

(1) Introvesidad do Las Balmas do Osca Canada Biblioteca Distin

Apéndice G: GRÁFICOS "ANÁLISIS TÉRMICO =DSC="

PARAFINAS ENSAYADAS

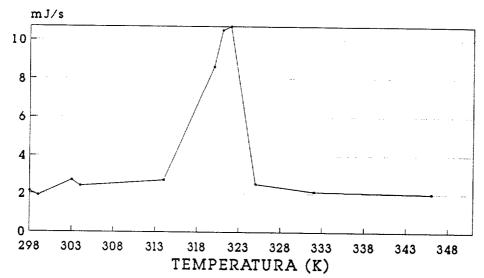
TIPO DE PARAFINA	ORIGEN *******		
CERA-400	REPSOL		
CERA-100	REPSOL		
CERA-150	REPSOL		
CERA-50	REFINERÍA DE TENERIFE		
CERA-62	REFINERÍA DE TENERIFE		
CERA-FF	REFINERÍA DE TENERIFE		
CERA-400-62	MEZCLA C-400 Y C-62 50%		

PARÁMETROS TÉRMICOS

MUESTRA ******	T _m °C	T _c °C	Dh _m KJ/kg	Dh _e KJ/kg
CERA-400	49	42	131,0	131,1
CERA-100	59,2	54,8	190,2	189,2
CERA-150	62	58,2	191,9	191,2
CERA-50	51,5	45,2	154,3	129,0
CERA-62	62,9	57,2	194,7	193,8
C-62-400	56,4	51,4	183,0	146,8
CERA-FF	59,6	59,5	136,9	95,68

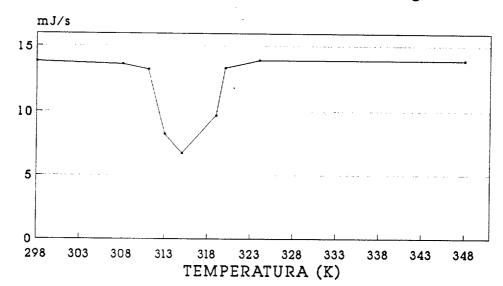
CERA 400

Fusión Calor latente = 131.0 KJ/kg



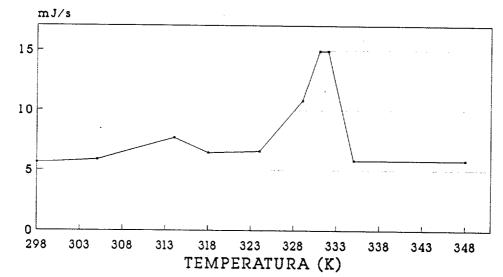
Masa = 3.9 mg; Scan rate = +5 K/min.

CERA 400 *Solidificación* Calor latente = 131.1 KJ/kg



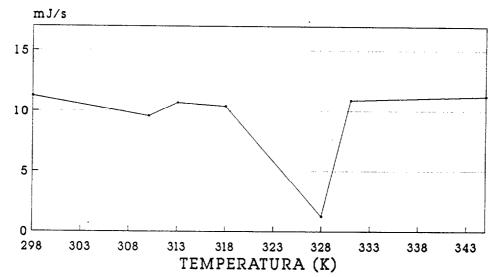
Masa • 3.9 mg; Scan rate • -5 K/min.

CERA 100 *Fusión* Calor latente = 190.2 KJ/kg



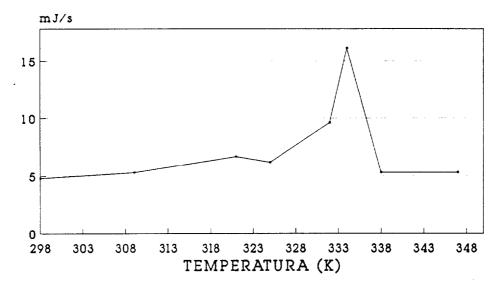
Masa = 4.25 mg; Scan rate = +5 K/min.

CERA 100 *Solidificación* Calor latente = 190.2 KJ/kg



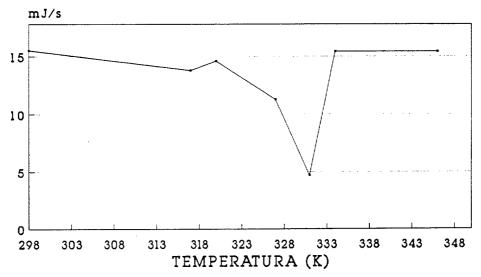
Masa = 4.25 mg; Scan rate = -5 K/min.

CERA -150 *Fusión* Calor latente = 191.9 KJ/kg



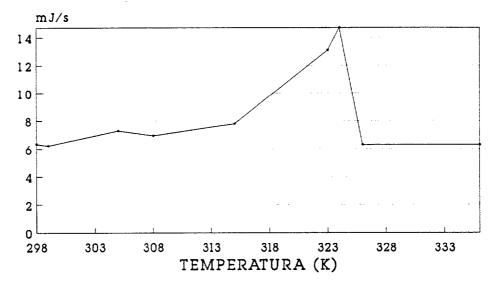
Masa = 4.8 mg; Scan rate = +5 K/min.

CERA -150 *Solidificación* Calor latente = 191.2 KJ/kg



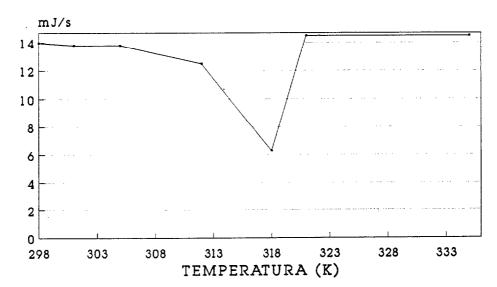
Masa • 4.8 mg; Scan rate • -5 K/min.

CERA -50 *Fusión* Calor latente = 154.3 KJ/kg



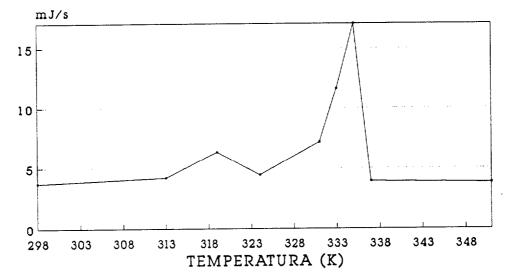
Masa = 4.3 mg; Scan rate = +5 K/min.

CERA -50 *Solidificación* Calor latente = 129.0 KJ/kg



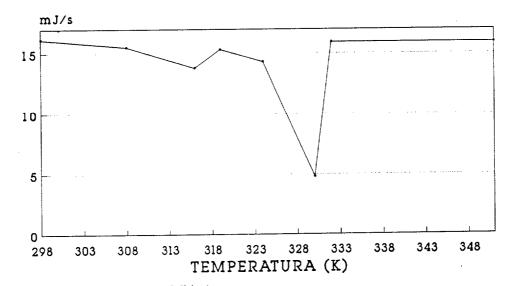
Masa = 4.3 mg; Scan rate = -5 K/min.

CERA -62 *Fusión* Calor latente = 194.7 KJ/kg



Masa = 4.3 mg; Scan rate = +5 K/min.

CERA -62 *Solidificación* Calor latente = 193.8 KJ/kg

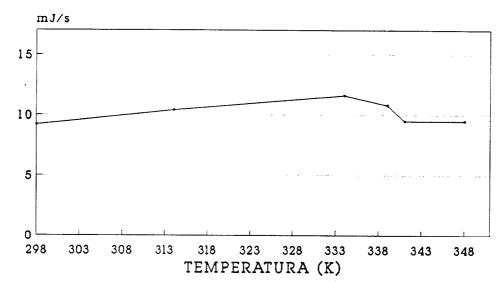


Masa = 4.3 mg; Scan rate = -5 K/min.

ACCOUNTS TO THE PROPERTY OF TH

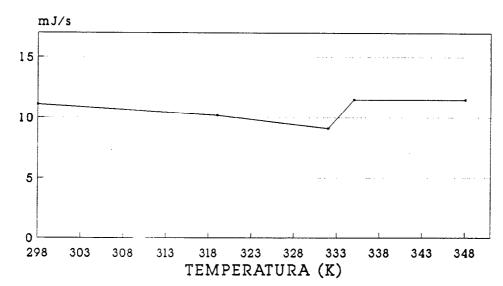
Apéndice G: GRÁFICOS "ANÁLISIS TÉRMICO =DSC="

CERA FF *Fusión* Calor latente = 136.9 KJ/kg



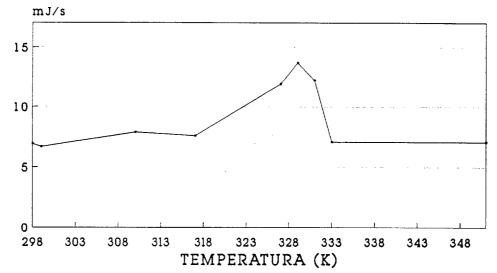
Masa = 4.6 mg; Scan rate = +5 K/min.

CERA FF *Solidificación* Calor latente = 95.68 KJ/kg



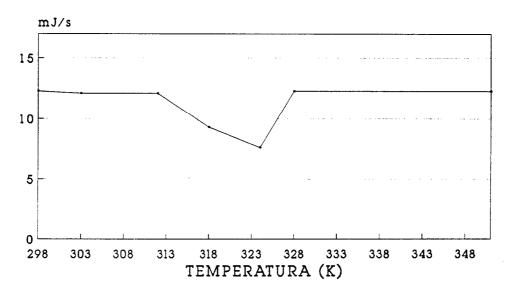
Masa = 4.6 mg; Scan rate = -5 K/min.

CERA -62-400 *Fusión* Calor latente = 183.0 KJ/kg



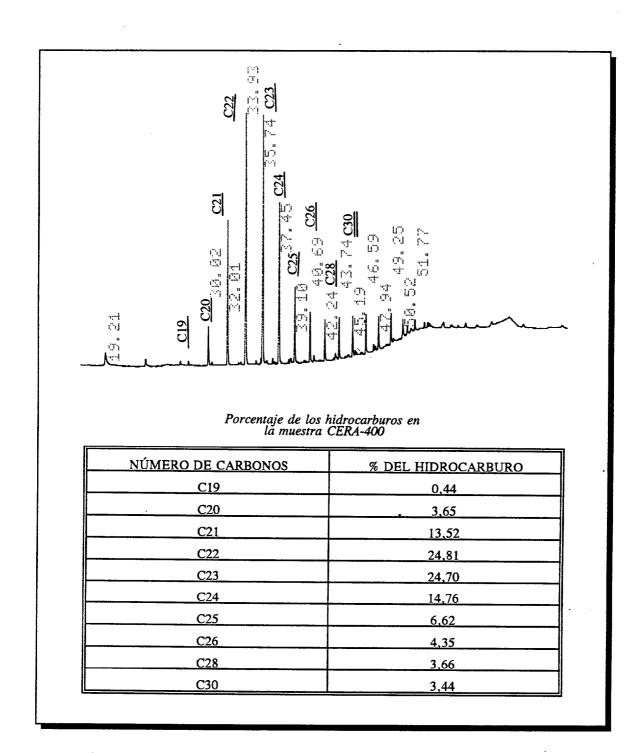
Masa = 4.2 mg; Scan rate = +5 K/min.

CERA -62-400 *Solidificación* Calor latente = 146.8 KJ/kg



Masa = 4.2 mg; Scan rate = -5 K/min.

<u>Apéndice H: GRÁFICOS "ANÁLISIS QUÍMICO = CROMATOGRAFÍA DE GASES = "</u>



Los picos cuantificados representan el 85 % del total del área.