

UTILIZACION DE CONCENTRADORES DE RADIACION SOLAR PARA LA  
GENERACION DE CALOR PARA USO INDUSTRIAL EN LA ARGENTINA.

Carlos Franciulli<sup>\*)</sup> y Jaime A. Moragues<sup>#)</sup>

División Energía Solar  
Comisión Nacional de Energía Atómica  
Avda. del Libertador 8250 - 1429 Buenos Aires

RESUMEN

Se calcula para siete localidades del país, que cubren las regiones noroeste, de cuyo, centro, litoral y Buenos Aires, la cantidad de combustible ahorrado por año y por metro cuadrado de concentrador cilíndrico-parabólico usado para calentamiento de fluidos entre 150 y 250°C para proveer calor para aplicaciones industriales. Para ello se utilizaron las expresiones paramétricas dadas en Ref. 1. La radiación solar directa promedio anual necesaria para el cálculo se obtuvo a partir del promedio anual del índice de claridad.

Considerando costo competitivo de los concentradores el del combustible ahorrado durante 10 años, se compara éste con el costo local de concentradores de acuerdo con la tecnología actual y una producción pequeña y con el costo futuro que se espera lograr.

1.- INTRODUCCION

Una de las utilidades importantes de los concentradores de radiación solar es su uso para calentamiento de fluidos en el intervalo de temperaturas de 150 a 250 °C para proveer calor para diversas aplicaciones industriales. Estos sistemas solares usualmente son operados en conjunto con los sistemas convencionales (co-generación) ahorrando combustible durante las horas de sol.

En el presente trabajo se calcula para diversas localidades del país la cantidad de combustible ahorrado por año y por metro cuadrado de concentrador, la cual depende de la ubicación geográfica de la instalación a la cual se aplica o sea del nivel de radiación solar disponible en la zona. Considerando como costo competitivo de los concentradores el cos-

to del combustible ahorrado durante 10 años de operación, se compara éste con el costo actual estimado para la construcción de concentradores en el país de acuerdo con la tecnología presente y una producción pequeña, del orden de 1.000 m<sup>2</sup>, y también con el costo futuro que se espera lograr con un desarrollo tecnológico adecuado y producción en serie de los componentes.

2.- ESTIMACION DE LA ENERGIA ANUAL  
TOTAL GENERADA CON CONCENTRADORES  
CILINDRICO-PARABOLICOS.

Para estimar la energía anual total que es posible generar con concentradores cilíndrico-parabólicos<sup>2)</sup> en diferentes lugares del país se necesita conocer los datos de radiación solar para las distintas localidades consideradas y algunos parámetros característicos de los concentradores. En el presente trabajo se empleó el método aproximado de simulación dado en la Ref. 1, el cual permite obtener la energía anual total entregada por los sistemas. Este método requiere conocer la radiación solar directa promedio anual incidente en un plano horizontal, promediada entre las horas de entrada y salida del Sol, el parámetro  $\eta_f$  que es el producto de la eficiencia óptica del concentrador por el coeficiente de absorción del receptor, y el coeficiente de pérdida total U.

2.1.- Recurso solar

Dado que en el país no se dispone de datos de radiación solar directa que cubran varias localidades y períodos de por lo menos un año, se utilizó la relación dada en la Ref. 1

\*) Contratado con subsidio otorgado por la SUBCYT

#) Miembro de la Carrera del Investigador Científico del CONICET.

UTILIZACION DE CONCENTRADORES DE RADIACION SOLAR PARA LA  
GENERACION DE CALOR PARA USO INDUSTRIAL EN LA ARGENTINA.

Carlos Franciulli<sup>\*)</sup> y Jaime A. Moragues<sup>#)</sup>

División Energía Solar  
Comisión Nacional de Energía Atómica  
Avda. del Libertador 8250 - 1429 Buenos Aires

RESUMEN

Se calcula para siete localidades del país, que cubren las regiones noroeste, de cuyo, centro, litoral y Buenos Aires, la cantidad de combustible ahorrado por año y por metro cuadrado de concentrador cilíndrico-parabólico usado para calentamiento de fluidos entre 150 y 250°C para proveer calor para aplicaciones industriales. Para ello se utilizaron las expresiones paramétricas dadas en Ref. 1. La radiación solar directa promedio anual necesaria para el cálculo se obtuvo a partir del promedio anual del índice de claridad.

Considerando costo competitivo de los concentradores el del combustible ahorrado durante 10 años, se compara éste con el costo local de concentradores de acuerdo con la tecnología actual y una producción pequeña y con el costo futuro que se espera lograr.

1.- INTRODUCCION

Una de las utilidades importantes de los concentradores de radiación solar es su uso para calentamiento de fluidos en el intervalo de temperaturas de 150 a 250 °C para proveer calor para diversas aplicaciones industriales. Estos sistemas solares usualmente son operados en conjunto con los sistemas convencionales (co-generación) ahorrando combustible durante las horas de sol.

En el presente trabajo se calcula para diversas localidades del país la cantidad de combustible ahorrado por año y por metro cuadrado de concentrador, la cual depende de la ubicación geográfica de la instalación a la cual se aplica o sea del nivel de radiación solar disponible en la zona. Considerando como costo competitivo de los concentradores el cos-

to del combustible ahorrado durante 10 años de operación, se compara éste con el costo actual estimado para la construcción de concentradores en el país de acuerdo con la tecnología presente y una producción pequeña, del orden de 1.000 m<sup>2</sup>, y también con el costo futuro que se espera lograr con un desarrollo tecnológico adecuado y producción en serie de los componentes.

2.- ESTIMACION DE LA ENERGIA ANUAL  
TOTAL GENERADA CON CONCENTRADORES  
CILINDRICO-PARABOLICOS.

Para estimar la energía anual total que es posible generar con concentradores cilíndrico-parabólicos<sup>2)</sup> en diferentes lugares del país se necesita conocer los datos de radiación solar para las distintas localidades consideradas y algunos parámetros característicos de los concentradores. En el presente trabajo se empleó el método aproximado de simulación dado en la Ref. 1, el cual permite obtener la energía anual total entregada por los sistemas. Este método requiere conocer la radiación solar directa promedio anual incidente en un plano horizontal, promediada entre las horas de entrada y salida del Sol, el parámetro  $\eta_f$  que es el producto de la eficiencia óptica del concentrador por el coeficiente de absorción del receptor, y el coeficiente de pérdida total U.

2.1.- Recurso solar

Dado que en el país no se dispone de datos de radiación solar directa que cubran varias localidades y períodos de por lo menos un año, se utilizó la relación dada en la Ref. 1

\*) Contratado con subsidio otorgado por la SUBCYT

#) Miembro de la Carrera del Investigador Científico del CONICET.

que permite calcular la radiación solar directa promedio anual proyectada sobre un plano horizontal a partir del promedio anual del índice de claridad. Este último se define como el cociente entre la radiación solar total diaria recibida sobre la tierra (H) y la radiación solar diaria fuera de la atmósfera (H<sub>0</sub>) para el mismo lugar geográfico considerado:

$$K = H/H_0 \quad (2.1)$$

El promedio anual de K se calculó a partir de los promedios mensuales de la radiación solar total diaria recibida sobre la tierra ( $\bar{H}_m$ ) y de la radiación solar total diaria fuera de la atmósfera ( $\bar{H}_{0m}$ ).

$$\bar{K} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{12} \bar{H}_m^i / \bar{H}_{0m}^i \quad (2.2)$$

La intensidad directa promedio anual se puede calcular con la relación<sup>2)</sup>

$$\bar{I} = -0,34 + 1,37 \bar{K} \text{ (kW/m}^2\text{)} \quad (2.3)$$

Esta relación fue verificada para el caso de la localidad de San Miguel, provincia de Buenos Aires, para la que se dispone de datos de radiación solar total y directa (obtenida esta última como diferencia entre la radiación total y difusa) para una año completo, obteniéndose una correlación razonable. El valor experimental es 330 W/m<sup>2</sup> mientras que el obtenido con la relación (2.3) y los datos de varios años es de 355 W/m<sup>2</sup> (ver Tabla I).

Se seleccionaron lugares de los que se posee información de radiación solar total durante por lo menos un año y de forma tal que se cubra la zona de muy buena insolación del país (noroeste y Cuyo) y la zona donde hay una gran densidad de industrias actualmente en operación (centro-litoral-Buenos Aires). Para el caso extremo de la Quiaca se utilizaron los datos de la Ref. 3 y para el resto de las localidades los de la Red Solarimétrica Nacional<sup>4)</sup>. Los datos de radiación solar total fuera de la atmósfera fueron obtenidos de la Ref. 5.

En la Fig. 1 se indican las localidades para las cuales se ha realizado el cálculo indicándose en la tabla adjunta la latitud, longitud y altura correspondientes. En la Tabla I. se dan los valores usados de  $\bar{H}_m$ ,  $\bar{H}_{0m}$ ,  $\bar{K}_m$ ,  $\bar{K}$  e  $\bar{I}$  para las siete localidades seleccionadas.

## 2.2. Parámetros característicos de los concentradores.

Los parámetros característicos de



N°	LOCALIDAD (PCIA.)	LATITUD S	LONGITUD O	ALTITUD (m)
1	LA QUITACA (JUJUY)	22°06'	65°36'	3400
2	SAN CARLOS (SALTA)	25°53'	65°65'	1700
3	SAN JUAN (SAN JUAN)	31°37'	68°32'	800
4	RAMA CAIDA (MENDOZA)	34°40'	68°23'	800
5	MARCOS JUAREZ (CORDOBA)	32°41'	62°07'	700
6	RAFAELA (SANTA FE)	31°17'	61°33'	100
7	SAN MIGUEL (BS.AS.)	34°33'	58°44'	20

Fig. 1: Localidades para las cuales se ha realizado el cálculo de energía térmica anual generada con concentradores cilíndrico-parabólicos.

los concentradores cilíndrico-parabólicos que se requieren para aplicar el método de simulación utilizado se obtuvieron a partir de las curvas de eficiencia medidas en Sandia Laboratories<sup>6)</sup>, seleccionando aquellos que se consideran factibles de ser logrados con los concentradores a construir en el país.

La expresión de la eficiencia total de un concentrador en función de la temperatura media del fluido de trabajo está dada por

$$\eta = F (\eta'_0 - U(\bar{T}_m - T_a) / I_b \cos i) \quad (2.4)$$

donde:

$\bar{T}_m = (T_e + T_s) / 2$  es la temperatura

TABLA I RADIACION SOLAR DIRECTA, PROMEDIO ANUAL

LA QUIACA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
$\bar{H}_{\text{mensual}}$ (MJ/m <sup>2</sup> )	34,20	34,37	27,63	26,20	20,51	17,75	19,00	22,77	28,61	33,57	34,09	34,51
$\bar{H}_o$ mensual (MJ/m <sup>2</sup> )	41,81	39,60	35,42	29,84	24,30	22,39	23,39	27,58	33,09	37,97	41,05	42,22
$\bar{k}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_o}$ mensual	0,818	0,867	0,780	0,878	0,844	0,793	0,812	0,826	0,865	0,884	0,830	0,817
$\bar{k}_T \text{ anual} = 0,834$ $\bar{I}_{\text{anual}} = -0,34 + 1,37 \times 0,834 = 0,803$ (kW/m <sup>2</sup> )												

SAN JUAN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
$\bar{H}_{\text{mensual}}$ (MJ/m <sup>2</sup> )	29,25	26,76	23,77	16,52	14,71	12,53	12,17	13,93	19,96	23,91	19,50	31,48
$\bar{H}_o$ mensual (MJ/m <sup>2</sup> )	42,55	39,10	33,16	26,10	20,20	17,57	18,77	23,47	30,26	36,90	41,50	44,13
$\bar{k}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_o}$ mensual	0,687	0,684	0,716	0,633	0,728	0,713	0,648	0,593	0,659	0,648	0,710	0,713
$\bar{k}_T \text{ anual} = 0,667$ $\bar{I}_{\text{anual}} = -0,34 + 1,37 \times 0,667 = 0,588$ (kW/m <sup>2</sup> )												

SAN CARLOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
$\bar{H}_{\text{mensual}}$ (MJ/m <sup>2</sup> )	18,91	22,05	18,80	17,40	15,31	13,61	14,69	17,27	19,99	21,24	30,22	25,37
$\bar{H}_o$ mensual (MJ/m <sup>2</sup> )	42,17	39,55	34,77	28,63	23,34	20,81	21,84	26,28	32,22	37,69	41,34	42,78
$\bar{k}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_o}$ mensual	0,448	0,557	0,541	0,608	0,657	0,654	0,673	0,657	0,620	0,566	0,731	0,593
$\bar{k}_T \text{ anual} = 0,609$ $\bar{I}_{\text{anual}} = -0,34 + 1,37 \times 0,609 = 0,494$ (kW/m <sup>2</sup> )												

TABLA I (Continuación)

RAMA CAIDA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
$\bar{H}_{\text{mensual}}$ (MJ/m <sup>2</sup> )	25,70	21,47	19,20	12,22	10,88	8,84	10,60	13,57	18,63	20,20	24,60	29,10
$\bar{H}_o$ mensual (MJ/m <sup>2</sup> )	42,68	38,60	31,99	24,33	18,20	15,50	16,70	21,63	28,87	36,23	41,50	43,77
$\bar{k}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_o}$ mensual	0,602	0,556	0,600	0,502	0,598	0,572	0,635	0,627	0,645	0,550	0,592	0,664
$\bar{k}_{T \text{ anual}} = 0,595$ $\bar{i}_{\text{anual}} = -0,34 + 1,37 \times 0,595 = 0,475$ (kW/m <sup>2</sup> )												

MARCOS JUAREZ	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
$\bar{H}_{\text{mensual}}$ (MJ/m <sup>2</sup> )	24,17	22,21	18,86	11,96	9,61	9,59	9,55	11,96	17,40	19,20	21,46	25,54
$\bar{H}_o$ mensual (MJ/m <sup>2</sup> )	42,60	38,97	32,84	25,00	16,69	16,99	18,20	22,90	29,80	36,71	41,50	43,56
$\bar{k}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_o}$ mensual	0,566	0,569	0,574	0,467	0,576	0,564	0,524	0,522	0,583	0,523	0,517	0,586
$\bar{k}_{T \text{ anual}} = 0,547$ $\bar{i}_{\text{anual}} = -0,34 + 1,37 \times 0,547 = 0,410$ (kW/m <sup>2</sup> )												

RAFAELA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
$\bar{H}_{\text{mensual}}$ (MJ/m <sup>2</sup> )	24,73	21,26	19,06	12,81	10,12	9,61	10,32	12,53	16,45	18,93	21,51	24,94
$\bar{H}_o$ mensual (MJ/m <sup>2</sup> )	42,55	39,15	33,29	26,28	20,48	17,78	18,98	23,66	30,41	36,97	41,50	43,43
$\bar{k}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_o}$ mensual	0,581	0,543	0,572	0,487	0,494	0,540	0,546	0,529	0,541	0,512	0,518	0,574
$\bar{k}_{T \text{ anual}} = 0,537$ $\bar{i}_{\text{anual}} = -0,34 + 1,37 \times 0,537 = 0,395$ (kW/m <sup>2</sup> )												

TABLA I (Continuación)

SAN MIGUEL	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
$\bar{H}_{\text{mensual}}$ (MJ/m <sup>2</sup> )	24,57	21,96	16,62	10,72	9,20	7,10	8,56	11,02	15,59	18,10	20,45	25,25
$\bar{H}_o$ mensual (MJ/m <sup>2</sup> )	42,69	38,70	32,24	24,72	18,65	15,95	17,15	22,02	29,17	36,38	41,50	43,84
$\bar{k}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_o}$ mensual	0,570	0,560	0,510	0,430	0,490	0,445	0,499	0,500	0,534	0,490	0,492	0,570
$\bar{k}_T$ anual = 0,507		$\bar{I}_{\text{anual}} = -0,34 + 1,37 \times 0,507 = 0,355$		(kW/m <sup>2</sup> )								

media del fluido dentro del receptor;  
 $T_e$  y  $T_s$ , las temperaturas de entrada y salida del fluido al receptor;  
 $T_a$ , la temperatura ambiente;  
 $k$ , el factor de transferencia de calor, que tiene en cuenta que se toma la temperatura del fluido en lugar de la temperatura del receptor;  
 $I_o$ , la radiación solar directa media sobre un plano perpendicular a la dirección de incidencia;  
 $\theta$ , el ángulo que forma la radiación directa incidente con la normal del plano de abertura del concentrador.

En la Figura 2 se muestra la curva utilizada, tomada de la Ref. 6. A partir de la misma se obtuvo  $F\eta_o$  de la ordenada al origen y  $FU$  de su pendiente. Los valores de dichos parámetros, así como los de  $U/\eta_o$  requeridos por el modelo usado en el presente cálculo son:

$$F\eta_o = 0,70$$

$$FU = 0,56 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

$$U/\eta_o = 0,80 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

Para la curva considerada, tomando  $I = 940 \text{ W/m}^2$ , y las temperaturas de salida de 150 y 200 °C (que son los casos que analizaremos) las eficiencias al mediodía solar resultan:

$$\eta_{150} = 64 \% \quad \eta_{200} = 62 \%$$

2.3. Método de simulación utilizado para el cálculo de la energía térmica total anual.

Como fue mencionado anteriormente, la energía térmica total anual entregada por los concentradores cilíndrico-parabólicos fue obtenida utilizando las expresiones paramétricas dadas en la Ref. 1. Las mismas permi-

ten calcular el cociente entre la energía anual total entregada y  $F\eta_o$  (en GJ/m<sup>2</sup> año) en función de la intensidad directa promedio anual (kW/m<sup>2</sup>), la latitud del lugar (en radianes) y un nivel umbral  $X=U\Delta T/\eta_o$  (kW/m<sup>2</sup>). Este último es el valor para el cual la energía entregada al receptor (proveniente de la energía solar incidente) es igual a las pérdidas térmicas de éste;  $\Delta T$  es la diferencia entre la temperatura media del fluido y la temperatura ambiente. Se considera que por debajo del nivel umbral el sistema no funciona.

El método considera que el sistema opera todos los días del año, que los concentradores utilizan toda la radiación solar cuando trabajan sobre el nivel umbral  $X$  y que lo ha-

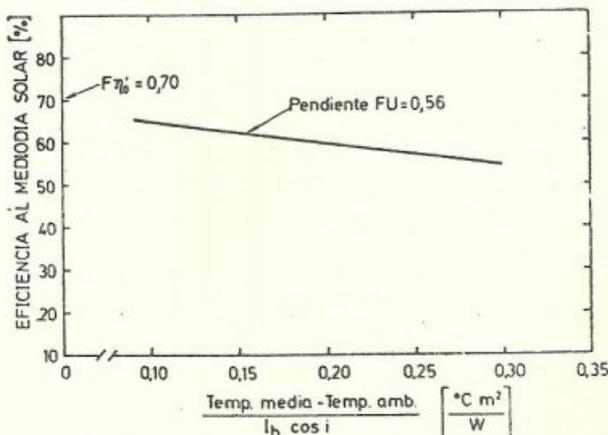


Fig. 2: Curva de eficiencia total de un concentrador cilíndrico-parabólico tomada al mediodía solar para diferentes temperaturas medias de operación. De Ref. 6.

cen a eficiencia constante. Las expresiones son válidas para latitud entre 25° y 45° (tanto norte como sur) y se recomienda que en caso de latitudes menores de 25°, como es el caso de la Quiaca, se use el valor de latitud de 25° para el cálculo.

Se calculó la energía entregada por los concentradores con eje horizontal y orientaciones Norte-Sur y Este-Oeste. En la Fig. 3 se dan los valores obtenidos para las siete localidades, las dos orientaciones y las dos temperaturas de salida del fluido de trabajo consideradas.

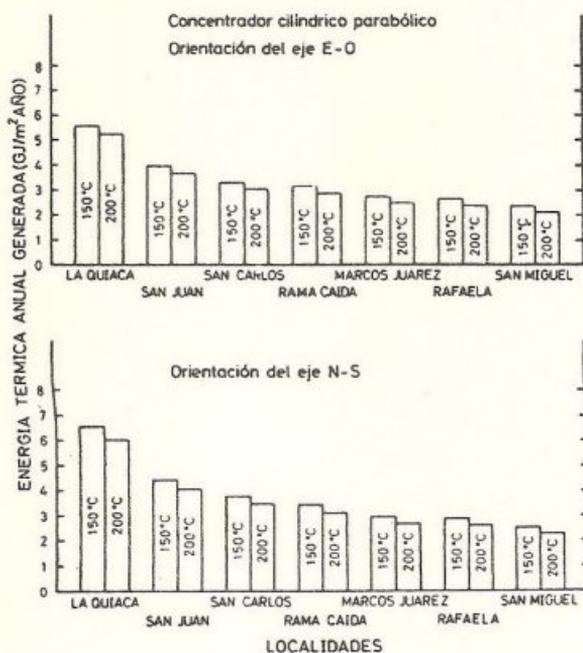


Fig. 3: Energía térmica anual total generada con concentradores cilíndrico-parabólicos para dos orientaciones de su eje de simetría.

### 3.- COSTO MAXIMO DE LOS CONCENTRADORES LXPRESADO EN Kg DE COMBUSTIBLE SUSTITUIDO.

Se considera que el costo de los concentradores, en esta etapa de su desarrollo, será competitivo con los sistemas convencionales cuando el mismo sea igual al costo del combustible que ahorra en diez años de operación, admitiéndose una vida útil de los equipos de 20 años. En la Argentina se usa comúnmente como combustible en las calderas, al fuel oil mezcla 70/30 (YPF lo denomina comercialmente Fuel Oil Int. 400(IF60), el cual tiene en promedio un poder calorífico de 45627 KJ/kg. Considerando una eficiencia de quemado del

65 %, se obtienen ~ 29300 KJ/kg de fuel oil mezcla. Esto es equivalente a decir que ~ 34 kg de fuel oil mezcla producen 1 GJ de energía térmica. a partir de esta relación es posible obtener el costo que se puede pagar por los concentradores en kg de fuel oil para cada una de las localidades consideradas.

Cabe aclarar que estamos considerando sólo el ahorro de combustible que se puede hacer con el sistema solar y tenemos en cuenta el posible ahorro de inversión en el sistema convencional al cual éste está acoplado. Por ejemplo, el sistema convencional incrementa su vida útil al operar menor tiempo, alargándose así los plazos de inversión para renovación de equipos y reparaciones mayores, lo que globalmente significa un menor costo total.

En la Tabla II se dan los kg de combustible ahorrado en 10 años de operación por m<sup>2</sup> de concentrador para las distintas localidades consideradas.

TABLA II

Localidades	kg de combustible ahorrado en 10 años de operación por m <sup>2</sup> de concentrador Orientación N-S	
	150 °C	200 °C
La Quiaca	2190	2050
San Juan	1500	1380
San Carlos	1290	1180
Rama Caída	1170	1070
Marcos Juárez	1020	920
Rafaela	990	890
San Miguel	860	770

### 4.- COMPARACION ENTRE COSTO ACTUAL Y COSTO COMPETITIVO DE LOS CONCENTRADORES.

Dado que en la Argentina, durante los últimos tres años, se han producido variaciones muy fuertes en la relación entre los costos industriales y el costo del combustible (ver. Fig. 4) resulta difícil obtener conclusiones válidas respecto del factor en que el costo actual estimado de los concentradores debe ser reducido a fin de alcanzar lo que denominamos costo competitivo, definido como el valor del combustible ahorrado mediante la operación de aquellos a lo largo de 10 años. No obstante, y a fin de tener un orden de magnitud de la



lo que hemos denominado costo competitivo. Hay que tener presente que en el análisis realizado no se han tenido en cuenta futuros incrementos del costo del combustible por encima del costo industrial, ni el hecho de que desde el punto de vista del país el costo real del combustible para zonas aisladas y apartadas, como ser la Puna, es mayor que el comercial.

Por lo tanto, se justifica concretar una política de desarrollo de los concentradores de radiación solar que permita alcanzar en un plazo razonable la tecnología que haga competitivo el uso de la energía solar a través de los mismos para la provisión de calor para la industria.

#### REFERENCIAS

- 1) Ari Rabl, "Yearly average performance of the principal solar collector types", SEIR/TR 631-716 (1981).
- 2) J.A.Moragues, "Conversión Fototérmica de energía solar en electricidad", CNEA-NT 22/80.
- 3) Datos de radiación solar, Año Geográfico Internacional, Secretaría de Aeronáutica, Servicio Meteorológico Nacional (1962)
- 4) Red Solarimétrica, Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales (1979-1981).
- 5) John A. Duffie, William A. Beckman "Solar Engineering of Thermal Processes", John Wiley & Sons, New York (1980).
- 6) Vernon E. Dudley, Robert M. Workhoven, "Concentration Solar Collector Test. Results. Collector Module Test Facility", January-December 1978. SAND 78-0977 (1978)
- 7) Estadística mensual del Instituto Nacional de Estadística y Censos. Ministerio de Economía.
- 8) Y.P.F. Dpto. Ventas a Reparticiones Públicas.