

## COSTO DEL kWh GENERADO POR CONCENTRADOR SOLAR FRESNEL LINEAL\*

**Marcelo Gea, Fernando Tilca y Luis Saravia.**

Instituto de Investigación en Energías No Convencionales (INENCO)

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas – Universidad Nacional de Salta

e-mail: marcelogea@gmail.com - fertilca@gmail.com.

**RESUMEN:** Se realiza la determinación del costo del kWh eléctrico que generará un concentrador solar tipo Fresnel lineal, de 1 MW de potencia instalada. Un prototipo de dimensiones menores (43 m<sup>2</sup> de espejos) ya se encuentra construido por nuestro grupo de trabajo. El costo de materiales y construcción, como también el rendimiento que se utilizaron en este cálculo, son los mismos del prototipo. Para la determinación del costo del kWh se utilizó el método del costo nivelado de la energía. Se consideran financiamiento, gastos de operación, gerenciamiento y mantenimiento. Se hizo un estudio de sensibilidad del costo respecto de las principales variables que pueden afectarlo. El resultado obtenido para el precio del kWh es cercano al promedio entre el precio que paga el programa GENREN al kWh eólico y fotovoltaico.

**Palabras clave:** energía solar, concentrador Fresnel lineal, precio del kWh solar, precio energía solar.

### INTRODUCCIÓN

Argentina posee en el noroeste áreas con niveles de radiación solar de los más altos a nivel sudamericano y mundial (figura 1), que pueden aprovecharse para la generación de energía eléctrica a granel. Sumado a lo anterior, por una parte el problema energético global debido a la disminución de reservas de combustibles fósiles y por otra parte la contaminación ambiental generada por las centrales convencionales, hacen necesaria la búsqueda de nuevas fuentes de energía no contaminantes. La producción de energía térmica y/o eléctrica por vía solar responde a esta necesidad.

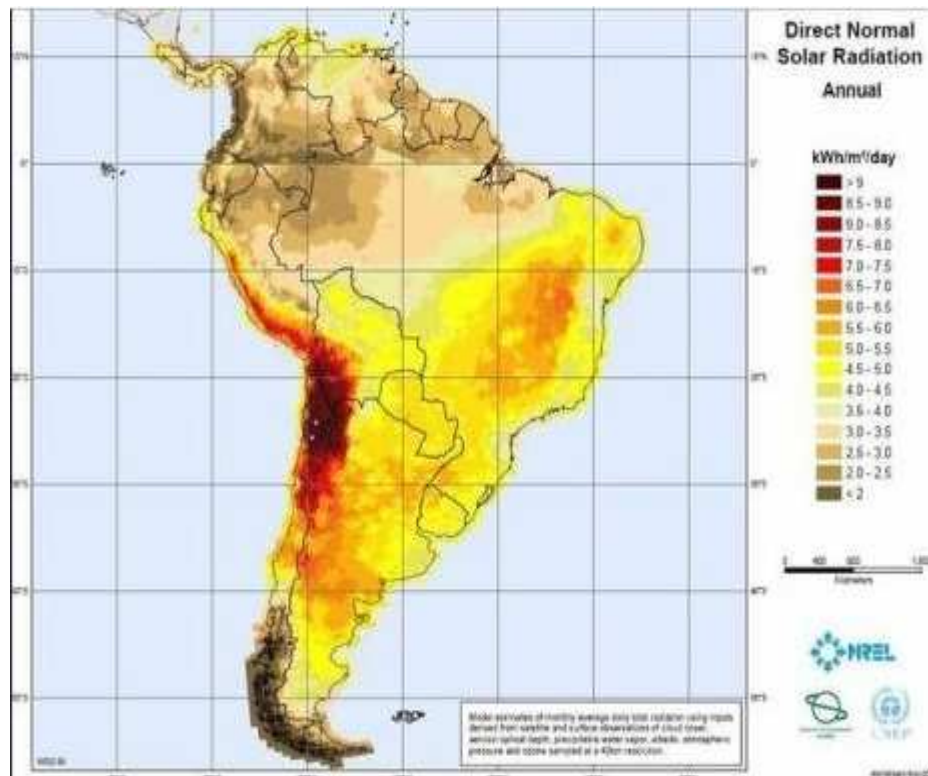


Figura 1: Radiación solar normal directa en Sudamérica. Mediciones de más de 20 años realizadas por la NASA. La escala, desde arriba hacia abajo, dice >9; 8.5-9.0; 8.0-8.5, etc. (kWh/m<sup>2</sup>/día).

El grupo de trabajo del que formamos parte ha diseñado, construido y puesto a funcionar en diversos ensayos, un prototipo de CFL (CFL: Concentrador Fresnel Lineal) de 43 m<sup>2</sup> de espejos (Saravia et al, 2008; Gea et al., 2009; Gea et. al, 2010) que se presenta en la figura 2. Esta tecnología ha sido seleccionada entre varias alternativas solares para generación en gran escala (torre central, parábolas lineales o motores Stirling) porque tiene varias ventajas:

\*Trabajo parcialmente financiado por el Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta

- Su construcción completa puede realizarse con materiales y mano de obra locales.
- Tiene costos menores que las otras tecnologías por el uso de espejos planos de bajo costo.
- Es de tipo modular, como consecuencia las mayores potencias se obtienen por repetición del módulo básico.



Figura 2: Foto del concentrador Fresnel lineal de 43 m<sup>2</sup>

Es interesante conocer que con este tipo de tecnología de centrales solares, con los niveles de radiación solar de los Valles Calchaquíes y Puna del NOA, se utilizaría un cuadrado de unos 25 km de lado como área necesaria para albergar los espejos, para generar toda la energía eléctrica que consume nuestro país (120000 GWh/año), considerando rendimientos reales.

Nuestro grupo de trabajo espera la aprobación de proyectos para iniciar la construcción de un equipo CFL de una potencia instalada de 150 kW. En este marco, vemos que sería de suma utilidad determinar el costo de generación del kWh eléctrico, trabajo que presentamos en este artículo.

## METODOLOGÍA

Se ha utilizado el método desarrollado por el CREE (Centro Regional de Energía Eólica), que utiliza conceptos desarrollados por el Comité Ejecutivo de la Agencia Internacional de Energía Para el Estudio y Desarrollo de los Sistemas Conversores de Energía Eólica (IEAP) de la Comunidad Económica Europea. Este método calcula el costo nivelado de la energía (conocido como LEC por sus siglas en inglés) que consiste en la anualización actualizada de los costos de inversión y mantenimiento del equipo dividida la energía generada en un año. La estimación del costo utiliza el valor llamado interés verdadero que refleja el costo total durante la vida útil, y tiene en cuenta una estimación del costo actualizado.

El costo que estima el método no refleja exactamente todos los aspectos económicos de la producción de energía, durante la amortización del costo los distintos factores característicos cambian de diferentes maneras debido a la impredecible inflación y desarrollo de precios. Sin embargo el método da una estimación del costo muy acercado al real.

La tasa de interés del financiamiento considerada es del 10 %, tanto durante la construcción como durante la amortización; el financiamiento es del 100%. El cálculo se hace para una central solar de potencia instalada de 1 MW, porque las turbinas de vapor comerciales son de esta potencia, para estas características de fluido (300 C y 50 Atm); para esta potencia, el área de espejos es de 10000 m<sup>2</sup>. La eficiencia del sistema es el producto entre las eficiencias de la generación y la térmica. En este primer cálculo no se considera acumulación de calor. La Tabla 1 indica las características técnicas y de producción de la central solar.

El costo del colector se ha determinado en base al prototipo construido en nuestra Universidad, por unidad de área. La Tabla 2 indica el valor de la inversión inicial de la planta, y los gastos de operación y mantenimiento. El costo de la turbina de 1 MW se obtiene del trabajo de John Farrell (2011).

Características técnicas y producción	
Potencia eléctrica	1 MW
Eficiencia de la generación	33%
Área del colector	10000 m <sup>2</sup>

Eficiencia térmica	40%
Eficiencia del sistema	13.2%
Radiación global media	21 MJ/m2 día
Producción Anual de energía	2810.5 MWh/año
Factor de capacidad	0.32
Vida útil	20 años

Tabla 1: características técnicas y de producción de la planta.

Inversión inicial		
Turbina 1 MW	1475 US / kW	1475000 US
Colector	382 US / m2	3820000 US
Terreno	5 US / m2	50000 US
Proyecto		5000 US
Total		<b>5350000 US</b>
Total / MW		<b>5350000 US / MW</b>
Tiempo de construcción	8 meses	
Operación y mantenimiento		
Gerenciamiento	2500 x 13	32500 US
Operarios	5 x 13 x 1125	73125 US
Mantenimiento	1% del costo total	53500 US
Total		159125 US
Total/MW		<b>159.13 US/MW</b>

Tabla 2: inversión inicial de la central solar térmica, y gastos de operación y mantenimiento.

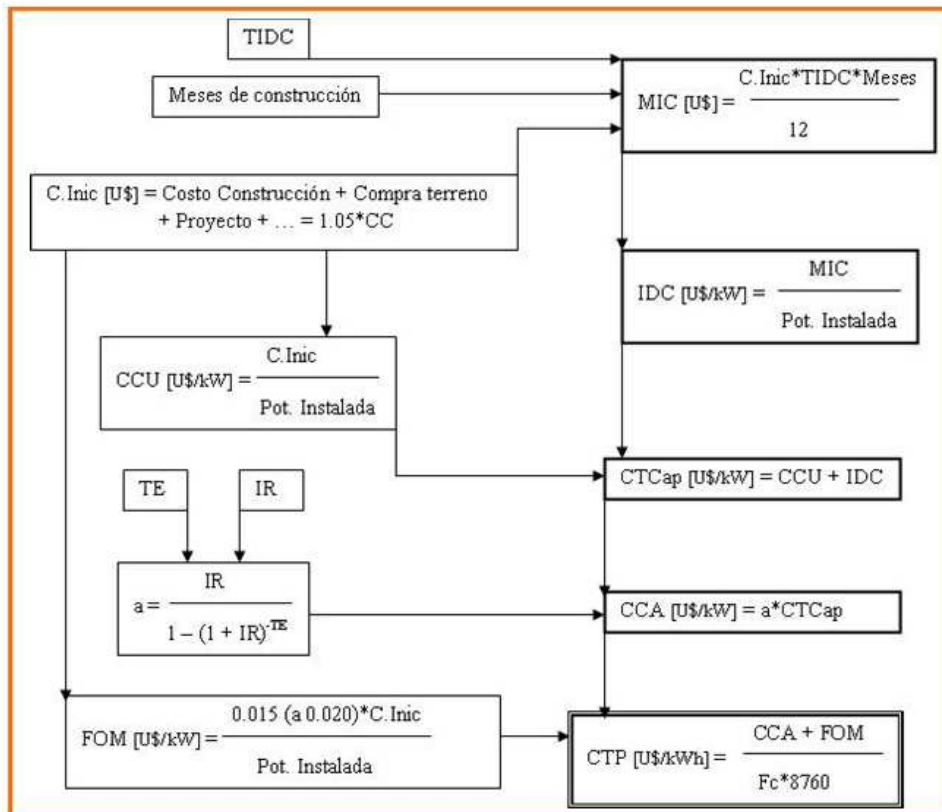


Figura 3: esquema del diagrama de flujo seguido para el cálculo del costo del kWh.

La Figura 3 indica esquemáticamente, el diagrama de flujo seguido para el cálculo del costo del kWh. En la Nomenclatura se indica el significado de cada abreviatura.

El resultado obtenido es un costo de 0.295 US\$/kWh. Si tenemos en cuenta el precio de otras centrales generadoras que utilizan fuentes renovables, como por ejemplo la que proviene de parques eólicos y de plantas solares fotovoltaicas, en ambos casos en ambos casos impulsadas por el programa GENREN del Gobierno Nacional, observamos lo siguiente: el precio a pagar por la energía eólica es de 0.127 US\$/kWh, mientras que por la fotovoltaica es de 0.577 US\$/kWh. El costo del kWh generado por una planta como la que estamos analizando es un poco por debajo de la media del precio de las otras dos.

### ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Es de interés ver la variación del costo de la energía generada en función de la variación de uno de los parámetros que intervienen en su conformación, manteniendo constantes los otros parámetros. Esto se denomina análisis de sensibilidad. Se ha realizado el análisis de la sensibilidad del costo del kWh respecto de la variación de los valores de los siguientes parámetros: radiación solar, tasa de interés e inversión inicial. El gráfico obtenido se muestra en la Figura 4.

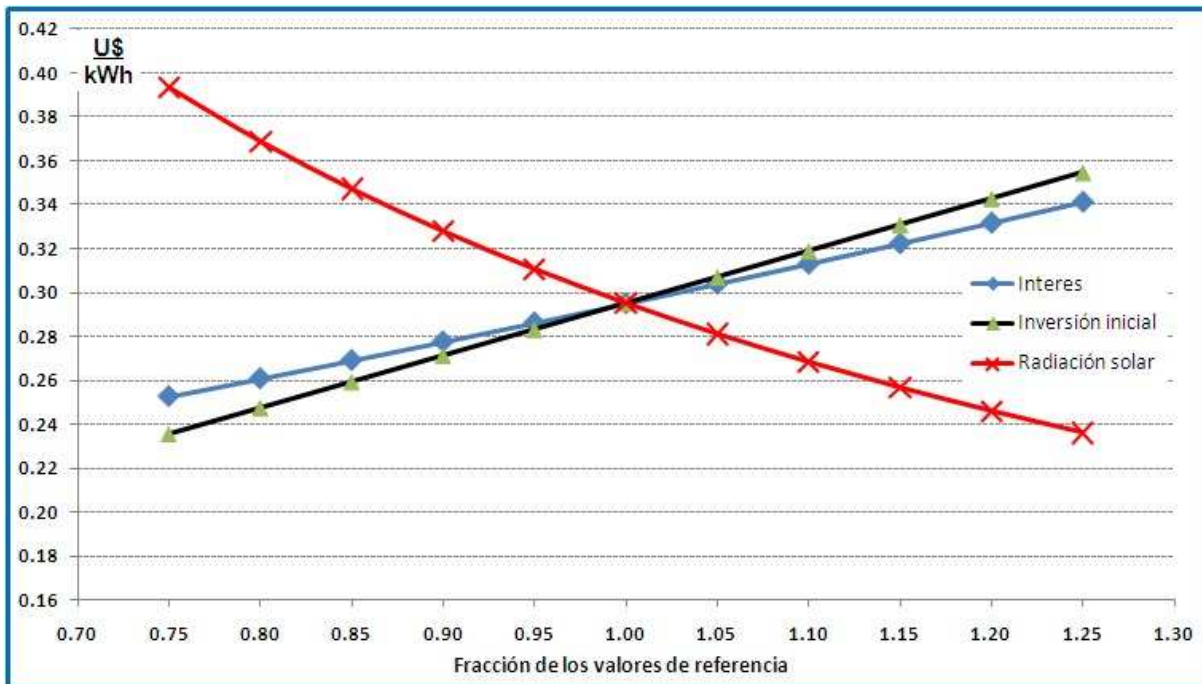


Figura 4: variación del costo del kWh en función de la tasa de interés, de la inversión inicial y de la radiación solar.

En el gráfico de la Figura 4 se observa que el costo del kWh es, de mayor a menor, sensible al valor de la radiación solar, luego al valor de la inversión inicial, y luego a la tasa de interés del préstamo. Vemos entonces la importancia de disponer de lugares con buen recurso solar. En cuanto a la inversión inicial, la mayor parte del costo corresponde a los dispositivos reflectantes que contienen a los espejos, al absorbedor y a la turbina.

### INCORPORACION DE ACUMULACION TÉRMICA

La energía solar térmica de concentración puede llegar a ser más ‘despachable’ con la incorporación del almacenamiento térmico. Esto significa que puede disponerse de la energía desde la central en otros momentos, no sólo bajo condiciones de mucho sol. Esta tecnología almacena parte de la energía térmica recogida por el campo solar para convertirla más adelante en electricidad. El almacenamiento puede adaptar a la demanda el perfil de la energía producida a lo largo del día y puede aumentar el rendimiento energético total de una planta para una potencia máxima dada de la turbina. Esto se logra almacenando el exceso de energía de un campo solar mayor antes de su uso en la turbina. Las plantas con almacenamiento pueden operarse con un factor de capacidad alta.

El dimensionado del sistema de acumulación térmica se realiza a partir de las horas de prórroga, es decir, del número de horas posteriores a la puesta de sol en las que se plantea generación de electricidad. También es necesario definir el *múltiplo solar*, que es la relación entre la potencia térmica máxima del colector dividida la potencia térmica correspondiente a la portencia eléctrica nominal de la central.

De un estudio de centrales solares térmicas de concentración con acumulación térmica en funcionamiento (Winter et al., 1991) se conoce que con un múltiplo solar de 1,6 y una capacidad de almacenamiento de 5 horas se obtiene normalmente un factor de capacidad del 40 %.

Para la determinación del costo de la acumulación térmica se utiliza una tecnología conocida que es el uso de hormigón (Gea et. al, 2009). Las características del acumulador de hormigón, costos, tecnología, producción y financiamiento se presentan

en la figura 5. El análisis de sensibilidad se presenta en la figura 6. Puede hacerse una comparación con el cálculo previo de una central sin acumulación térmica. Al incorporar los costos del acumulador y el aumento del área del campo de colectores de 10000 m<sup>2</sup> a 12000 m<sup>2</sup> el un costo de la potencia instalada pasa a ser de 7000000 U\$S/MW, frente a los 5300000 U\$S/MW para el caso sin acumulación. Sin embargo, el hecho de haber aumentado el factor de capacidad de 0,32 a 0,40 debido al uso de acumulación, la energía anual producida pasa de 2810,5 MWh a 3505 MWh lo que explica un costo de la energía menor.

Características del hormigón	
calor específico	900 J/kg C
densidad	2400 kg / m <sup>3</sup>
Intervalo de temperaturas	40 C
Costo m <sup>3</sup> de Ho	3580 \$ / m <sup>3</sup>

Características técnicas y producción	
Potencia eléctrica de diseño	1000 kW
Multiplo solar	1.6
Tiempo de acumulación	5 horas
Factor de capacidad	40%
Eficiencia de conversión	33.00%
Potencia termica pico a generar	4848 kW
Radiación disponible pico	0.68 kW / m <sup>2</sup>
Eficiencia térmica respecto a directa	0.6
Area de colectores	12000 m <sup>2</sup>
Energía anual generada	3504000 kWh
Vida útil	20 años

Costos Acumulación	
Energía a acumular	15151.5 kWh
Eficiencia	0.9
Masa	1683501.7 kg
Vol	701.5 m <sup>3</sup>
Largo	4384.1 m
Energía acumulada / m <sup>3</sup>	21.6 kWh/m <sup>3</sup>
Costo	643903 U\$
Costo por kWh	166 \$/kWh
Costo por kWh	42 U\$/kWh

Financiamiento	
Fracción a financiar	100%
Tasa durante la construcción	10%
Tasa para la amortización	10%

Costo de la energía	
Costo de la energía (Levelized cost)	0.269 U\$ / kWh

Figura 5: Las características del acumulador, las características técnicas, producción, financiamiento y costo de la energía

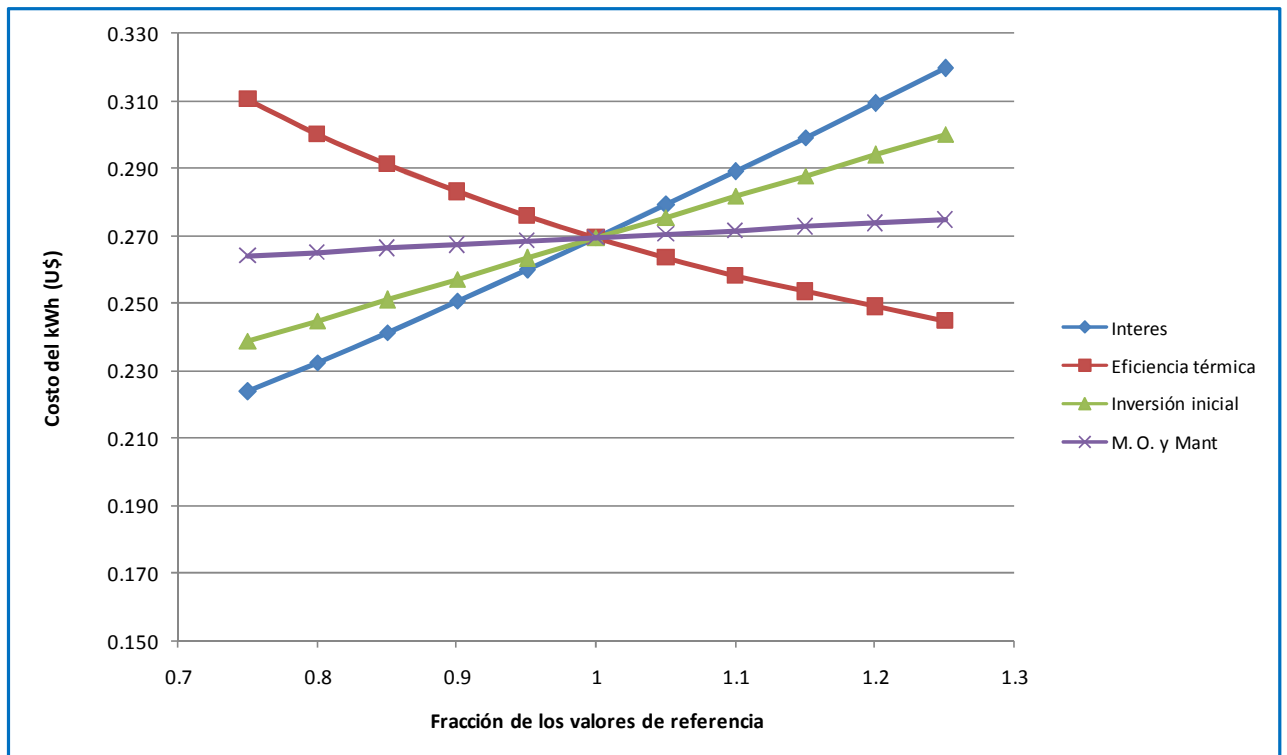


Figura 6: variación del costo del kWh en función de la tasa de interés, de la inversión inicial, de los costos de mano de obra y mantenimiento y de la eficiencia térmica

## CONCLUSIONES

Se ha determinado el costo de generación del kWh eléctrico de una central solar térmica tipo Fresnel lineal, de potencia instalada del orden de 1 MW. Los costos de construcción de los dispositivos reflectores, el absorbedor y el acumulador térmico se han determinado a partir de costos reales obtenidos en la construcción del prototipo del que disponemos en nuestra universidad. El rendimiento térmico del equipo es el obtenido al poner en funcionamiento, para diversos ensayos llevados a cabo, del prototipo mencionado.

El costo calculado de la generación de energía eléctrica mediante este tipo de plantas solares, es de 0.295 U\$/kWh sin acumulación y de 0.269 U\$/kWh con acumulación. El programa GENREN del Gobierno Nacional, va a pagar por la energía eólica un precio de 0.127 U\$/kWh, mientras que por la fotovoltaica un precio de 0.577 U\$/kWh. Si bien en el caso nuestro se trata de costo, mientras que en los casos eólico y fotovoltaico se trata de precio, estos valores sirven para tener una idea de la ubicación del precio del caso solar térmico.

## NOMENCLATURA

El significado de la nomenclatura de la Figura 3, es el siguiente:

TIDC: tasa de interés durante la construcción.

IR: interés real anual, para calcular la amortización del total de la inversión del capital.

C.Inic [U\$]: Costo Inicial=Costo Construcción CC + Compra terreno + Proyecto + ... = 1.05\*CC

Costo de Construcción [U\$] = (U\$/kW instalado)\*Potencia total instalada.

CCU [U\$/kW]: Costo de la Construcción Unitario, por kW.

MIC [U\$]: Monto de Interés durante la construcción.

IDC [U\$/kW]: Interés Durante la Construcción, por kW.

CTCap [U\$/kW]: Costo Total del Capital.

TE: Vida útil económica, 20 años en este caso.

a: factor de anualización o de recuperación del capital, para calcular la amortización anual constante.

CCA [U\$/kW]: Costo del Capital Anualizado, es costo de la inversión total, regulado por factor de anualización.

FOM [U\$/kW]: Costos Fijos de Operación y Mantenimiento.

Fc: Factor de Capacidad de la central térmica. Cociente entre energía generada y la que generaría si la central trabajara todas las horas del año a plena potencia.

CTP [U\$/kWh]: Costo Total de Producción, es el costo del kWh.

## REFERENCIAS

Gea M., Tilca F., Placco C., Caso R., Machaca A. y Saravia L. (2009). Acumulación Térmica en Hormigón de la Energía Solar Captada por un Concentrador tipo Fresnel Lineal para Generación de Vapor. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 11.

Gea M., Saravia L., Altamirano M., Placco C., Bárcena H. y Hongn M. (2010). Aspectos Ópticos y Geométricos de un Concentrador Fresnel Lineal para Aplicaciones Térmicas. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 11.

John Farrell (2011), Concentrating Solar Thermal Power, Distributed. Página web: <http://www.renewableenergyworld.com/rea/blog/post/2011/01/title?empid=WNL-Friday-January14-2011>.

Saravia L., Gea M., Fernández C., Caso R., Hoyos D. y Salvo N. (2008). Diseño y construcción de un concentrador lineal Fresnel de 24 m<sup>2</sup> de área. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 11.

Winter C. J., Sizmann R.L., Vant-Hull L.L.(1991). Solar Power Plants. Fundamentals, Technology, Systems, Economics. Springer-Verlag. New York.

## ABSTRACT

It makes the determination of the cost of kWh electric generated by a linear Fresnel concentrator, installed capacity of about 1 MW. A prototype of smaller sizes (43 m<sup>2</sup> mirrors) is built by our working group. The efficiency used in this work is measured in this prototype. To calculate the cost we used a method used to calculate the price per kWh of wind farm based in levelized energy cost method. The interest taken is 10% annual, are considered expenses for operating, management and maintenance. There was a sensitivity study of the cost in terms of major variables that can affect it. The result obtained for the price per kWh is close to the average between the price paid per kWh the GENREN program by the wind farm and photovoltaic kWh.

**Keywords:** renewable energy price, linear Fresnel concentrator, kWh solar price, solar energy price.