

# Ingeniería Inversa y Repotenciación para la Optimización, Toma de Datos y Control del Colector Cilíndrico Parabólico de 7.2 m<sup>2</sup>

---

Orbea, E., Silva J.<sup>1</sup>

Guasumba, J., Páez, N.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

<sup>2</sup>Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, DECEM, GEER

Av. el Progreso S/N, Santa Clara, Sangolquí-Ecuador

---

## Resumen

El presente proyecto pretende realizar la automatización de la Cocina Solar Experimental, de tipo Cilíndrico Parabólica de 7.2 m<sup>2</sup> de área de apertura presentada como un prototipo de generación térmica que aprovecha la energía solar para transformarla en energía térmica.

Se logró alcanzar una temperatura en el aceite térmico de alrededor de 80°C a la salida de los concentradores y una eficiencia del 62% con una irradiancia de 900 W/m<sup>2</sup>. Un sistema de adquisición de datos formado por un microcontrolador, sensores y un Tablet permiten el manejo de las variables características del equipo en tiempo real, permitiendo llegar a conclusiones con el objetivo buscar sus posibles aplicaciones en la industria.

**Palabras clave:** Automatización, seguimiento solar, radiación solar directa, aceite térmico, cocina solar, línea focal.

## Abstract

This project aims to make the automation of Experimental Solar Kitchen, Cylindrical Parabolic type 7.2 m<sup>2</sup> aperture area presented as a prototype of thermal generation that transform solar energy into thermal energy.

It was possible to reach a thermal oil temperature of about 80°C at the exit of the concentrating collectors and an efficiency of 62% at an irradiance of 900

W/m<sup>2</sup>. A data acquisition system consists of a microcontroller, sensors and a Tablet show how the variables are changing in real time, giving conclusions in order find their potential applications in industry.

## **Introducción**

Un colector solar es una clase especial de intercambiador de calor que transforma la energía radiante en energía calorífica. Estos difieren en la forma de cómo intercambian calor. En el convencional, el intercambio de energía se da entre fluido-fluido. En el colector solar, la energía transferida, de naturaleza radiante, es desde una fuente distante a un fluido.

Los concentradores son un tipo específico de colector solar que aumentan la intensidad solar sobre una superficie absorbente. La funcionalidad de los concentradores se maximiza mientras mejor sea la capacidad de captar la radiación solar, esto se lo puede lograr manteniendo una constante posición normal a los rayos solares de los concentradores. A este tipo de colectores solares es necesario el montaje de un sistema de seguimiento que permita la concentración de los rayos solares sobre una línea en todo momento.

## **Definición del Problema**

La cocina solar al ser de tipo experimental necesita de elementos eléctricos y electrónicos que indiquen el comportamiento de la misma durante el día, desafortunadamente esta cocina no fue dotada con estos elementos, además con el transcurso de los años, ciertos componentes de esta cocina han tenido desperfectos, los mismos que deben ser reparados para que el estudio sea más preciso.

Los colectores cilíndricos parabólicos que componen esta cocina solar, necesitan también de un sistema de seguimiento solar para aprovechar al máximo el recurso solar, tomando en cuenta que nos encontramos en una zona donde la radiación solar es alta.

## **Objetivo**

Modernizar el colector solar del laboratorio de Energías Renovables con el fin doble de que haga seguimiento solar y que tenga un sistema de manejo de variables.

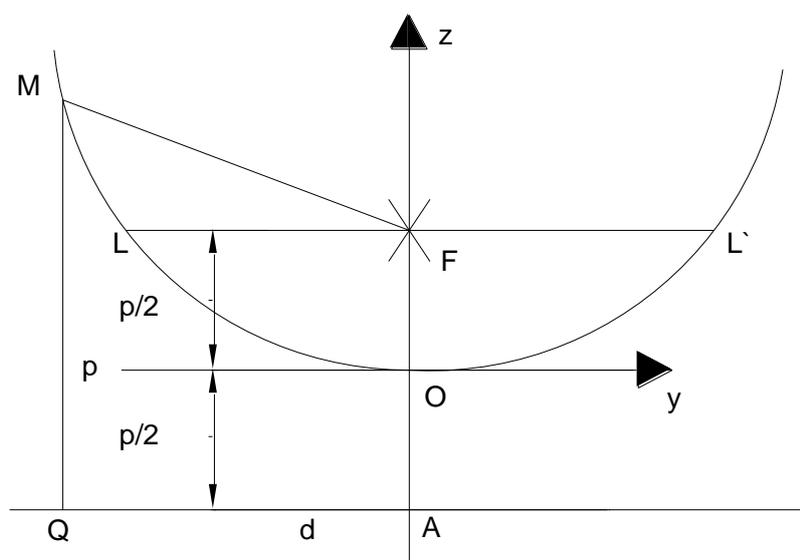
## Fundamentos Teóricos

### Características de los CCP

Los colectores cilíndricos parabólicos son sistemas ópticos que concentran la intensidad de radiación sobre una superficie absorbente. Este tipo de sistemas son usualmente utilizados para la obtención de temperaturas relativamente altas (alrededor de 200 °C), en forma económica. Los CCP aprovechan principalmente la radiación del sol, por lo que exigen una orientación permanente y precisa respecto al sol durante el día y el transcurso del año.

### Ecuación de la parábola

Conviene tomar como eje "z" el eje de la parábola, y como eje "y" la perpendicular a aquél trazada por el vértice de la curva es decir que  $V = O$ , es el origen de coordenadas. Véase figura 1.



**Figura 1** Geometría de la parábola<sup>1</sup>.

Sea  $d$  la directriz,  $F$  el foco,  $M \equiv (y, z)$  un punto arbitrario sobre la parábola y  $\overline{QM}$  la perpendicular a la directriz que contiene al punto  $M$ , que es paralela a  $\overline{FA}$ .

Entonces:

---

<sup>1</sup> Barbieri, A., Sodré, U. La Función Cuadrática (parábola). Primera ed. Brasil. Ensino Fundamental:. Projet Matweb. s.f. pp 25 – 30.

$$y^2 = 4Fz \quad (1)$$

Dada una parábola de boca B y distancia focal F véase figura 2. Se tiene las siguientes ecuaciones:

$$y^2 = 4Fz$$

$$y^2 = \frac{F}{B} 4Bz \quad (2)$$

Como:

$$z = \frac{y^2}{4F} \quad \text{En la boca de la parábola es:} \quad y = \frac{B}{2}$$

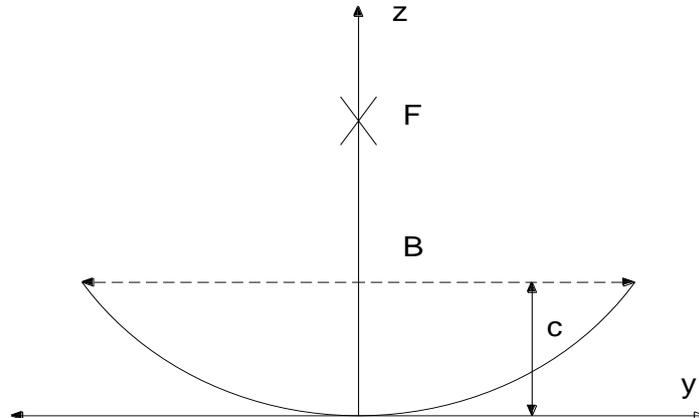
$$\therefore c = \frac{B^2}{16F} \quad \text{o, también} \quad c = \frac{B}{16\left(\frac{F}{B}\right)} \quad (3)$$

En donde:

B = Boca de la parábola

F = Distancia focal

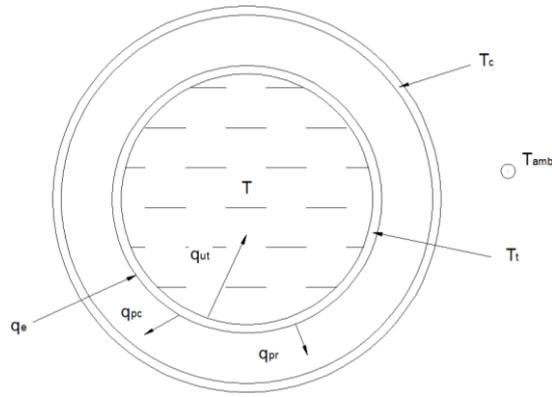
c = Profundidad de la parábola en el centro



**Figura 2 B:** Boca de la parábola, F: Distancia focal, c: Profundidad de la parábola en el centro.

### **Balance energético del colector solar de tipo cilíndrico parabólico**

### **Balance de energía en el tubo absorbedor**



**Figura 3** Calores que intervienen en el balance de energía en el tubo del absorbedor

$q_{pr}$  Calor perdido por radiación entre el tubo del absorbedor y la cubierta (W/m).

$q_{pc}$  Calor perdido por convección entre el tubo del absorbedor y el aire atrapado entre el tubo y la cubierta (W/m).

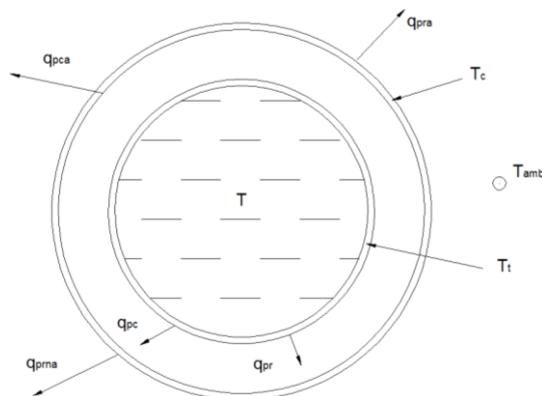
$$q_{pr} = \pi \cdot D_t \cdot \sigma \cdot \left[ \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_t} + \frac{1 - \varepsilon_t}{\varepsilon_c} \cdot \left( \frac{D_t}{D_{ci}} \right)} \right] \cdot (T_4^4 - T_2^4) \quad (4)$$

$$q_{pc} = \frac{2 \cdot \pi \cdot k_{ef} \cdot (T_4 - T_2)}{\ln \left( \frac{D_{ci}}{D_t} \right)} \quad (5)$$

$$q_e = G_b \cdot (B - D_c) \cdot \zeta \cdot \gamma \cdot \tau_{cu} \cdot \alpha_{ab} \quad (6)$$

$$q_{ut} = \frac{m C_p (T_5 - T_1)}{L} \quad (7)$$

### Balance de energía en la cubierta del absorbedor



**Figura 4** Calores que intervienen en el balance de energía en la cubierta del absorbedor

$q_{prna}$  Calor perdido por radiación entre cubierta y la superficie reflectante (W/m).

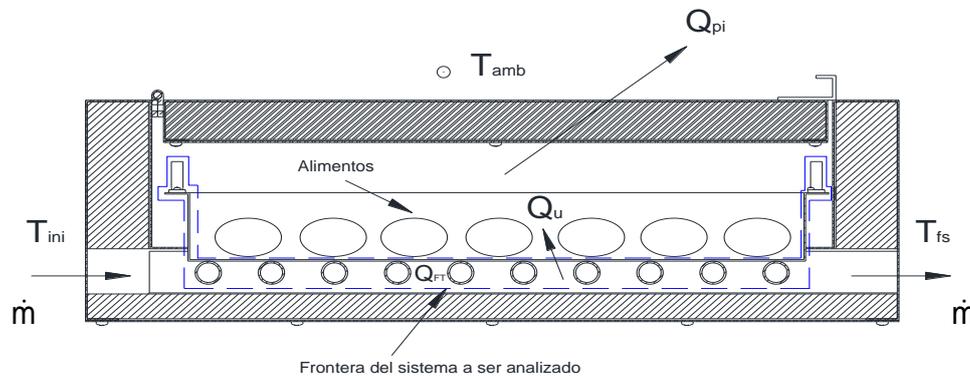
$q_{pra}$  Calor perdido por radiación entre la cubierta y el medio ambiente (W/m).

$q_{pca}$  Calor perdido por convección desde la cubierta al medio ambiente (W/m).

$$q_{prna} = \frac{\pi \cdot D_c \cdot \sigma \cdot (T_2^4 - T_3^4)}{\frac{1 - \varepsilon_c}{\varepsilon_c} + 1 + \frac{(1 - \varepsilon_s) \cdot \pi \cdot D_c}{\varepsilon_s \cdot S}} \quad (8) \quad q_{pra} = \pi \cdot D_c \cdot \varepsilon_c \cdot \sigma \cdot (T_2^4 - T_{sky}^4) \quad (9)$$

$$q_{pca} = \pi \cdot D_c \cdot h_v \cdot (T_2 - T_{12}) \quad (10) \quad \eta = \frac{\dot{q}_{ut}}{G_b \cdot (B - D_c)} \quad (11)$$

### Determinación de pérdidas de energía en la Cocina



**Figura 5** Factores que intervienen en el balance del sistema a ser analizado: arreglo de tubos de cobre, bandeja de cocción y fluido de trabajo.

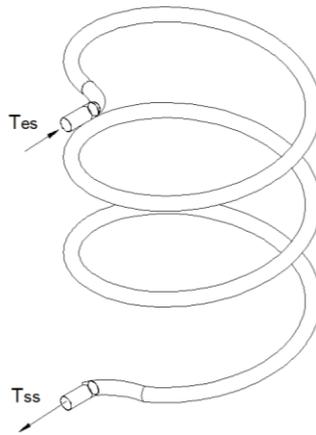
$Q_{pi}$  Calor total de pérdidas ( W ).

$Q_{FT}$  Variación del calor en la bandeja de cocción y el arreglo de tubos de cobre, incluido el fluido de trabajo ( W ).

$Q_u$  Calor útil que absorbe los alimentos y el aire al interior de la cocina ( W ).

$$Q_{pi} = U_p \cdot A_{coc} \cdot (T_7 - T_{12}) \quad (12) \quad Q_{FT} = \frac{T_{mf} - T_7}{R_{fp}} \quad (13)$$

## Balance en tanque calentador



**Figura 6** Serpentín

$$Q_A = \dot{m} \cdot C_P \cdot (T_{ss} - T_{es}) \quad (14)$$

## Análisis de los resultados obtenidos

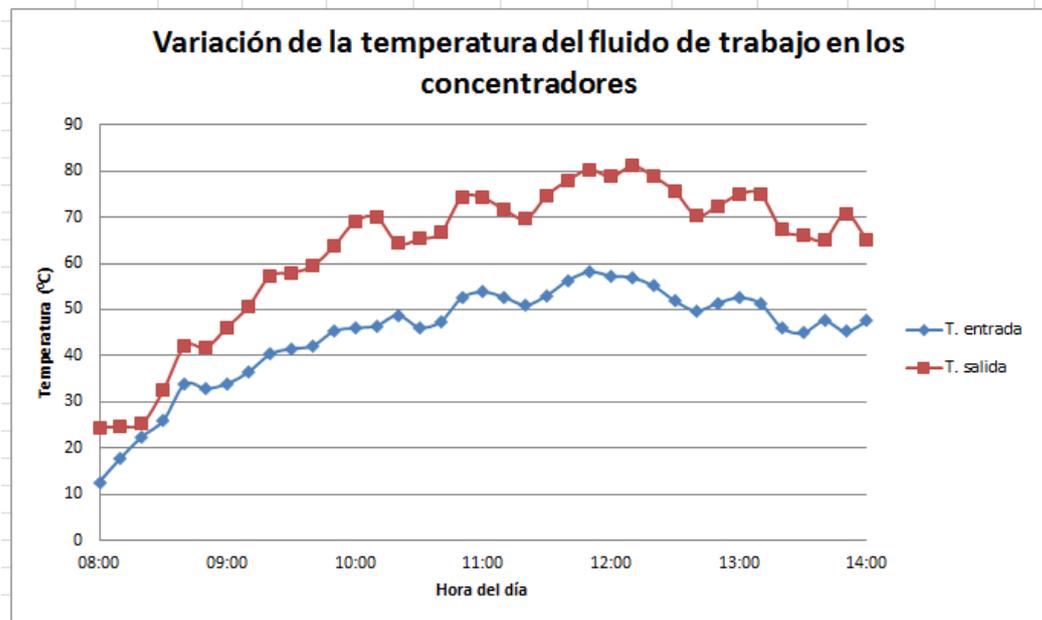
Se escogió un día al azar (5 de febrero del 2014), para el análisis de los resultados obtenidos los mismos que se indican en la siguiente tabla.

**Tabla 1** Datos Obtenidos CCP

TEMPERATURAS COLECTOR CIÍNDRICO PARABÓLICO								
CONCENTRADORES (°C)								
HORA	Entrada Concentrador	Cubierta Vidrio	Panel Concentrador	Tubo cobre	Salida Concentrador	Caudal (Kg/s)	Rad (W/m <sup>2</sup> )	Vel. Viento (m/s)
	T1	T2	T3	T4	T5	S1	RA	V
10:00	46,03	59,12	44,81	67,67	69,07	0,085	860,00	8,00
10:10	46,50	62,13	45,37	70,77	70,02	0,085	930,00	7,00
10:20	48,81	63,40	45,75	65,06	64,37	0,091	940,00	6,00
10:30	46,18	66,68	47,43	66,03	65,33	0,093	845,00	7,00
10:40	47,37	65,22	47,68	67,35	66,63	0,095	865,00	7,00
10:50	52,56	58,68	35,43	75,07	74,27	0,091	840,00	8,00
11:00	53,81	60,76	28,83	74,99	74,19	0,090	835,00	9,00
11:10	52,68	61,65	29,37	72,44	71,67	0,088	840,00	8,00
11:20	51,00	62,43	44,93	70,42	69,67	0,089	850,00	10,00
11:30	53,12	66,01	46,43	75,60	74,79	0,087	867,00	7,00
11:40	56,37	68,34	41,18	78,94	78,10	0,086	884,00	7,00
11:50	58,18	73,41	38,68	81,22	80,35	0,085	890,00	8,00
12:00	57,31	77,00	34,31	79,64	78,79	0,084	910,00	8,00

**Fuente:** Orbea, E., Silva J., Ingeniería Inversa del CCP, 2014

La siguiente figura muestra los datos correspondientes a las temperaturas del fluido de trabajo tanto a la entrada como a la salida de los concentradores.

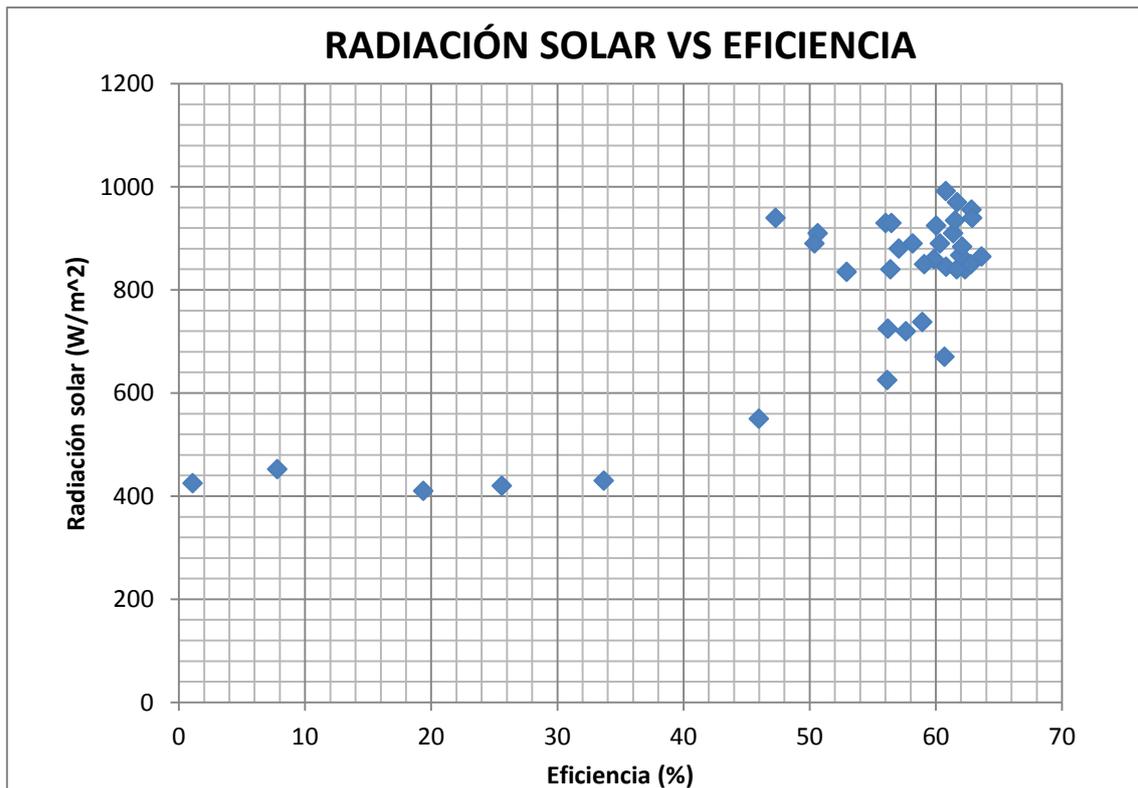


**Figura 7** Variación de la temperatura del fluido de trabajo en los concentradores

La figura 3 nos permite evidenciar que al equipo le toma un tiempo aproximado de una hora para alcanzar un equilibrio térmico, durante esta primera hora la razón de calentamiento del fluido de trabajo es relativamente baja debido a que la energía absorbida del Sol durante este tiempo ha permitido el calentamiento de los elementos del equipo.

Una vez estable el equipo es capaz de incrementar la temperatura del fluido de trabajo de unos 18 °C durante su paso por los concentradores llegando a un valor de temperatura máximo de alrededor de los 80 °C

La Figura 4 nos permite comprobar que la automatización del colector cilíndrico parabólico mejoró su capacidad, observando un aumento en su eficiencia con relación al prototipo inicial que llegaba a una eficiencia máxima de alrededor del 25%.



**Figura 8** Radiación solar vs Eficiencia

El seguimiento automático permitió aprovechar de mejor manera la componente directa de la radiación solar y permitió al equipo alcanzar una eficiencia máxima del 60%.

### Conclusiones

- Mediante la utilización de este equipo se logró obtener una potencia máxima de 541,170 W, con una irradiancia promedio de 801 W/m<sup>2</sup>; con éstas variables se llegó a tener una eficiencia máxima de 62%, es importante indicar que estos valores fueron tomados en invierno.
- Para realizar un seguimiento preciso se optó por un mecanismo que se comporte de tal manera que la velocidad de giro sea lenta y logre vencer las inercias generadas por los concentradores.

- La implementación del sistema electrónico en el colector, permitió un monitoreo constante y detallado de cada una de las variables de funcionamiento del colector en tiempo real.
- Al realizar estudios de estos nuevos métodos de generación de energía, se incentiva a realizar nuevas investigaciones y mejoras en los equipos actuales, con esto podemos conservar los recursos naturales.

## **Referencias**

Almanza, R., Muñoz, F. Ingeniería de la energía solar. Primera ed. México. El Colegio Nacional. 1993.

Benavides, S., Guasumba, J. Cocina Solar de Tipo Cilíndrico Parabólico, ESPE, 2006

Gutierrez, Wladimir; Implementación de Equipo Concentrador Solar Parabólico. 2005

Cengel, Y., Boles, M. Termodinámica Tomo I. 2da. ed. México. McGraw-Hill. 2000.

Incropera, F., Dewitt, D. Fundamentos de Transferencia de calor. 4a. ed. Mexico. Prentice Hall. 1999.

Shigley, J. Manual de Diseño Mecánico. Tomo I. México. McGraw Hill. 1989

Mott, R.L. Diseño de Elementos de Maquinas. Traducido del inglés por Arturo Cordova just. 2da. ed. México. Mc Graw-Hill. 2002.

## **Enlace**

<http://es.scribd.com/doc/214645557/Articulo-CientificoTesis>