



**ESPE**

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y TRANSFERENCIA DE  
TECNOLOGÍA**

**MAESTRÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES  
IV PROMOCIÓN**

**“IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS DE UN MOTOR STIRLING TIPO  
BETA UTILIZANDO UN CONCENTRADOR SOLAR PARABÓLICO  
ESFÉRICO”**

**AUTOR: DANNY BAYARDO VILLARREAL CERDA**

**DIRECTOR: ING. MSc. JOSÉ GUASUMBA C.**

**Sangolquí, 2016**



ESPE

---

# CONTENIDO

## RESUMEN

1. Generalidades.
2. Marco Teórico
3. Aplicaciones de la Energía Solar Concentrada
4. Dimensionamiento del Motor Stirling Tipo  $\beta$
5. Implementación del Sistema
6. Pruebas de Operación
7. Conclusiones y Recomendaciones



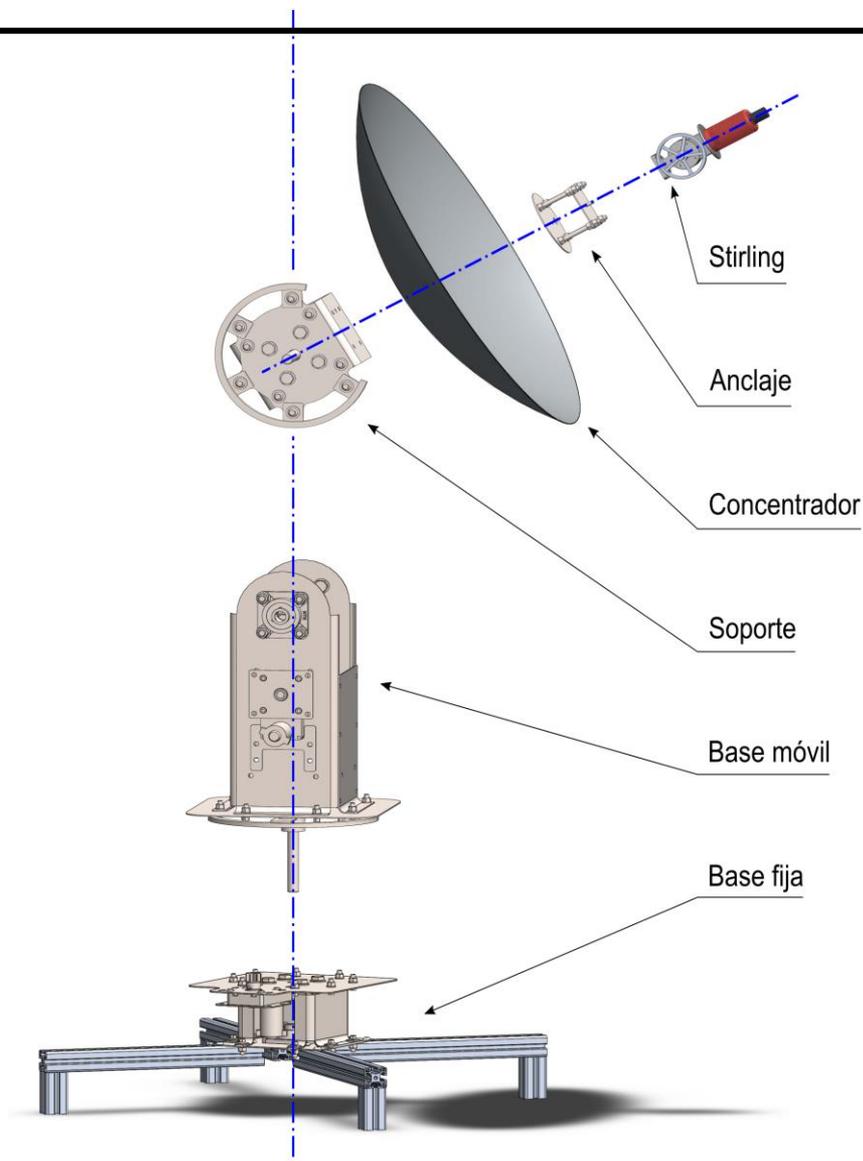
ESPE

## RESUMEN

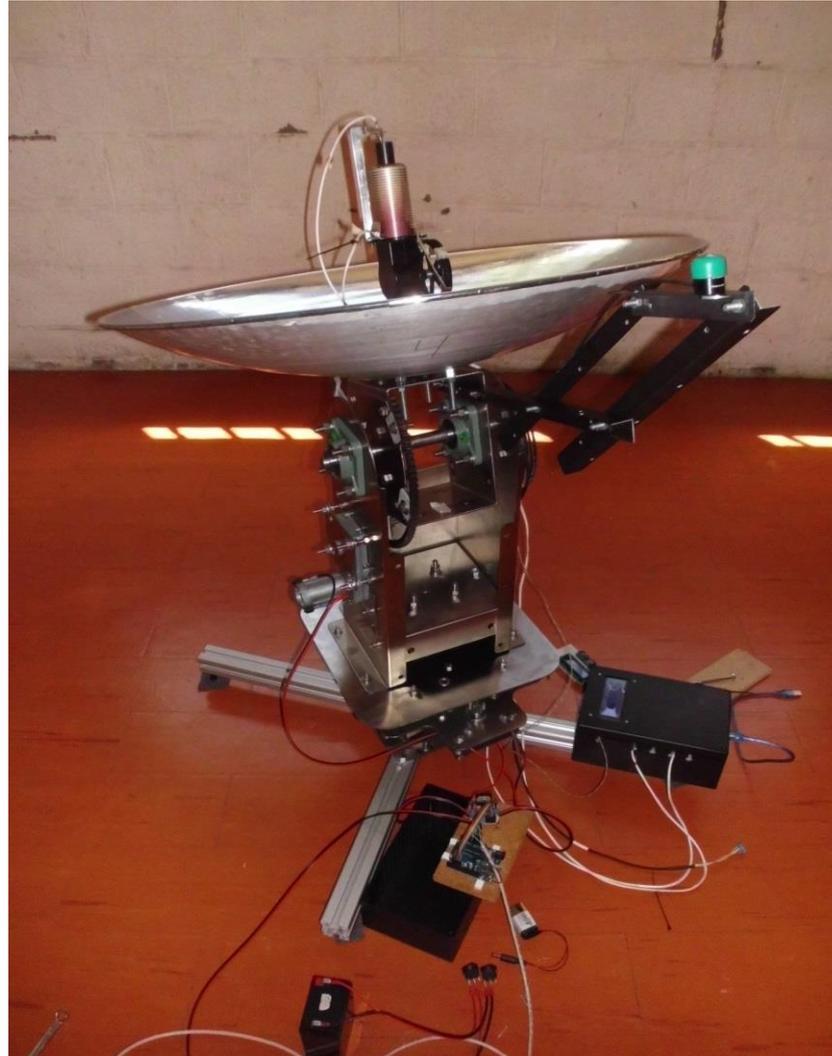
---

La presente investigación está relacionada con la implementación y pruebas de un motor Stirling tipo Beta que utiliza radiación concentrada por un espejo parabólico, que suministra a la cámara de reacción un calor útil de  $74.52 W_t$ , al incidir una irradiancia de  $975.34 W/m^2$ . El reflector y absorbedor tienen una razón de concentración RC de 289, con lo que se alcanza una temperatura focal de  $204.63 ^\circ C$ . Las pérdidas en el sistema son de  $110.2 W_t$  y la eficiencia energética promedio de 48.8%.

# PROTOTIPO: CONCENTRADOR Y MOTOR STIRLING



# FOTOGRAFÍA DEL EQUIPO





ESPE

## 1.- GENERALIDADES

---

La reducción de las reservas de combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas natural), debida a una desproporcionada explotación, sumada a una creciente tendencia al uso de productos agrícolas como materia prima para bio-combustibles, con la consiguiente destrucción de ecosistemas y un incremento en el precio de alimentos relacionados con este tipo de combustibles, obliga a que sea necesario un uso cada vez más eficiente de la energía y que ésta provenga de fuentes renovables.



ESPE

## 1.2 Definición del problema

---

Los motores Stirling tipo Beta, funcionan a nivel experimental y práctico, mediante el uso de fuentes de calor proveniente de la combustión externa de diversos combustibles. En el caso del Ecuador no se dispone de aplicaciones para el uso de la radiación solar concentrada, que permita calentar un fluido de proceso para mover los mecanismos del Motor Stirling. En ésta investigación se aborda la temática del uso de la energía solar directa.



## 1.3 Objetivo general

Realizar la investigación experimental sobre el funcionamiento de un motor Stirling tipo beta con radiación solar concentrada con un espejo parabólico esférico a fin de determinar sus parámetros energéticos.



## 1.4 Objetivos específicos

---

- Analizar la radiación solar directa que es concentrada por un espejo parabólico sobre un foco difuso y puntual.
- Realizar el dimensionamiento del motor Stirling Tipo beta y su implementación utilizando un Concentrador Solar de forma parabólica.
- Determinar los parámetros energéticos del sistema de captación de la energía solar.
- Caracterizar las principales variables de funcionamiento del motor Stirling y del reflector de forma parabólica.



## 1.5 Alcance

---

En la presente investigación se realiza el estudio de la radiación solar mediante el uso de un piranómetro de Silicio, el dimensionamiento y desarrollo experimental del motor Stirling tipo Beta con sistema de concentración de la radiación solar mediante espejo parabólico. A continuación se realizan las pruebas de funcionamiento del sistema y el análisis de resultados.



## 1.6 Justificación e importancia

---

- En Ecuador se propone el cambio de la Matriz Energética Nacional, debido a la caída de los ingresos petroleros y reducción de las reservas de combustibles fósiles. Las alternativas a seguir se sustentan en el desarrollo de investigaciones que permitan el aprovechamiento de la energía solar térmica, de media, baja y alta temperatura.



ESPE

---

- En el aspecto económico se necesita la reducción de costos en la implementación de recursos tecnológicos alternativos y en la parte ambiental los nuevos sistemas energéticos deben ser compatibles con el ambiente. Con el desarrollo de este proyecto se propone fortalecer los conceptos matemáticos y técnicos sobre el uso del Motor Stirling con sistemas de concentración.



ESPE

## 2. MARCO TEÓRICO

---

### **La energía solar directa**

La irradiación directa, es aquella que proviene desde el Sol y atraviesa la atmosfera sin disminuir su intensidad, la longitud de onda de esta radiación es de 0.3 a 3  $\mu\text{m}$

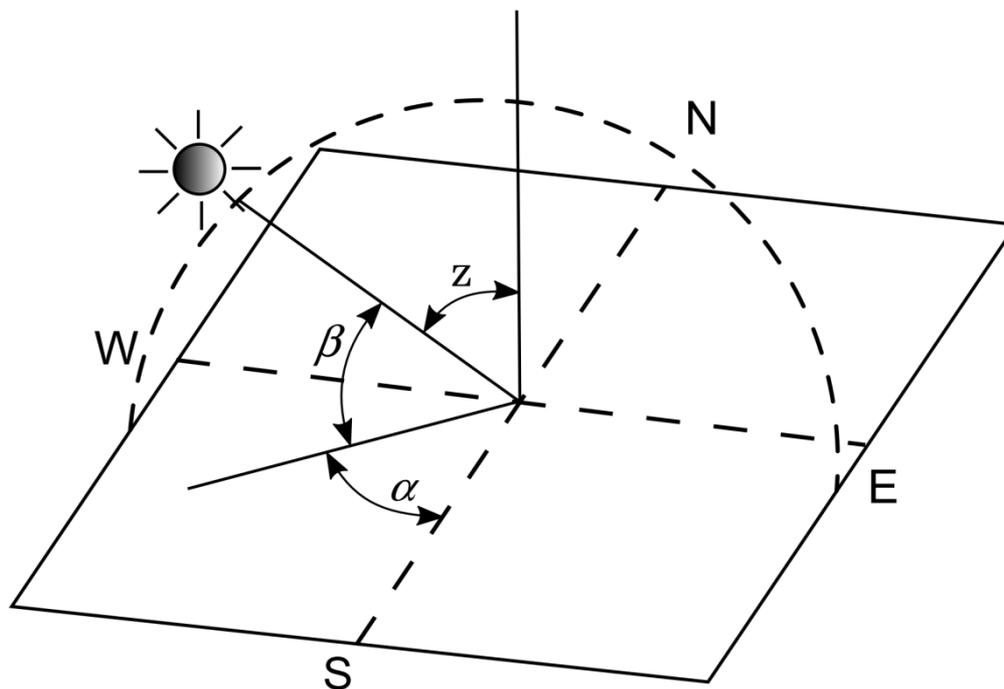


## La energía solar concentrada

---

Si sobre un espejo parabólico incide una irradiancia  $I$ , el reflector suministra al absorbedor  $I \rho \alpha$ ; por otra parte, la cantidad de radiación concentrada depende de RC que es la relación entre el área de apertura del espejo reflector y el área del absorbedor

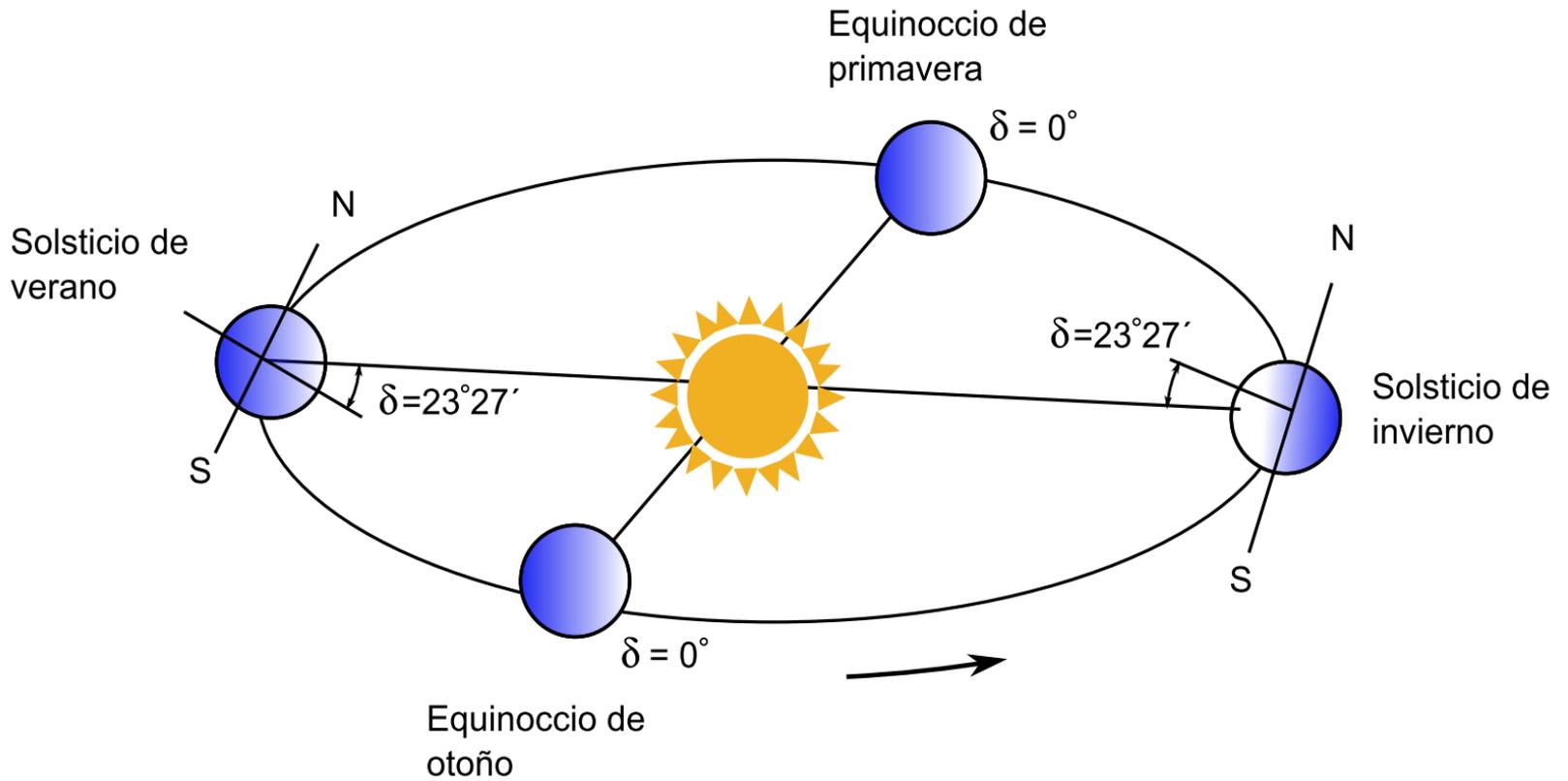
# Geometría Solar



**Definición de la altura solar,  $\beta$ , acimut,  $\alpha$   
y zenit,  $z$ .**

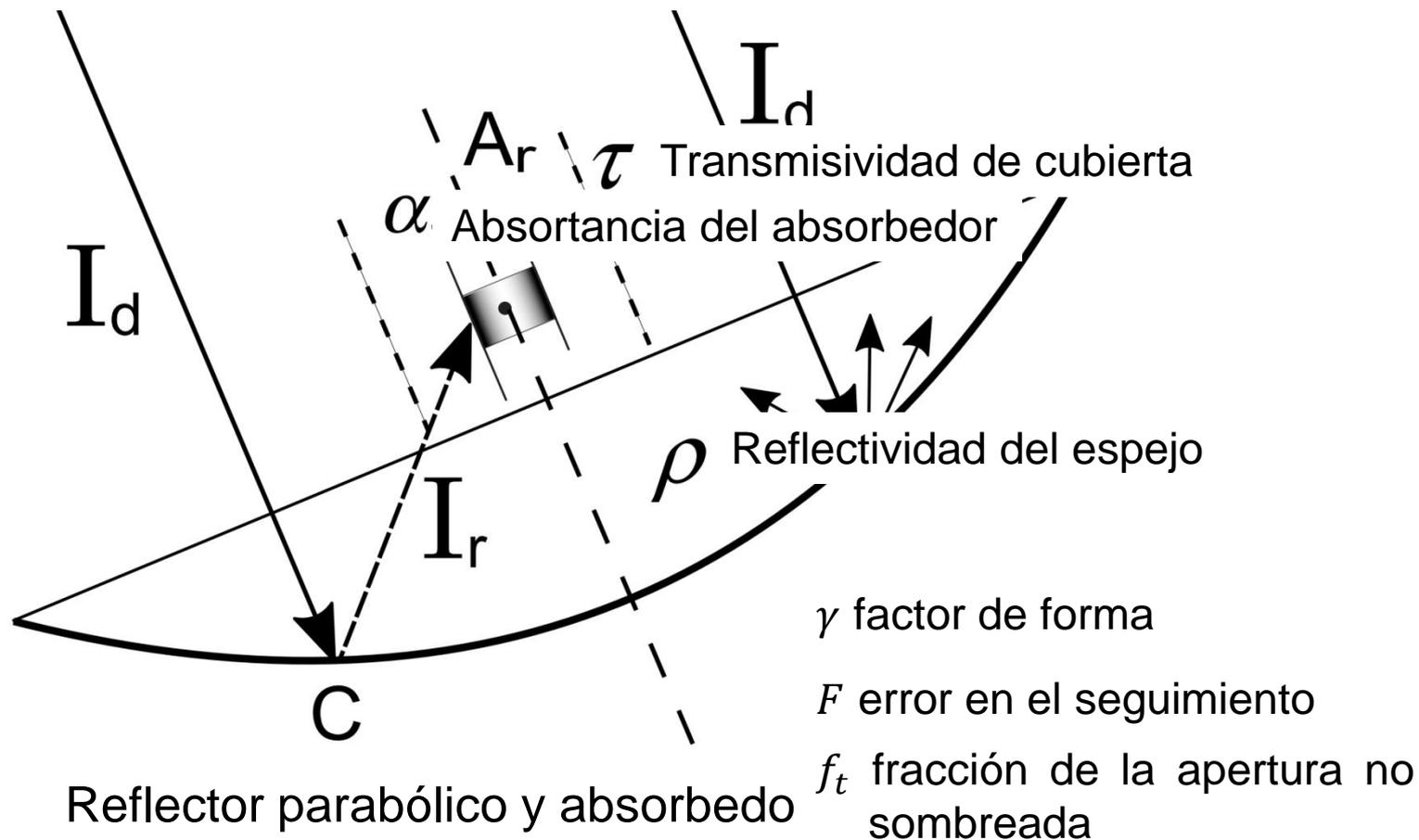


ESPE



**Angulo de declinación**

# Balance de Energía





ESPE

---

Con un balance de energía se puede establecer que el calor útil entregado al fluido de trabajo está dado por la energía recibida por el absorbedor, menos las pérdidas de calor al medio ambiente:

$$Q_u := Q_{abs} - Q_{pc} - Q_t$$



ESPE

---

La energía recibida por el absorbedor ( $Q_{abs}$ ) está dada por:

$$Q_{abs} = \eta_0 A_a I_d$$

Siendo

$\eta_0$  = Eficiencia óptica;  $A_a$  = Área de apertura;  $I_d$  = Radiación solar directa incidente sobre el espejo concentrador.



ESPE

---

La eficiencia óptica  $\eta_0$  está dada por:

$$\eta_0 = \rho \tau \alpha \gamma F f_t$$

$$\eta_0 = 0.49$$

$\rho$  reflectividad del espejo;  $\tau$  transmisividad de cubierta (=1);  $\alpha$  absorptancia del absorbedor;  $\gamma$  factor de forma;  $F$  error en el seguimiento;  $f_t$  fracción de la apertura no sombreada por soportes y absorbedor



ESPE

---

Área de apertura

$$A_a := \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

$$A_a = 0.385 \text{ m}^2$$

Radiación solar directa incidente sobre el espejo concentrador

$$I_d = 975.34 \frac{W}{m^2}$$

Como resultado se obtiene que:

$$Q_{abs} = 184.7 \text{ W}$$



## Calor perdido por CR

---

$$Q_{pc} := U \cdot A_r \cdot (T_{max} - T_a)$$

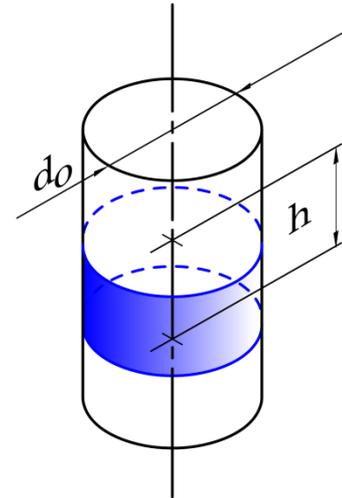
Siendo

$U$  = Coeficiente global de transferencia de calor;  $A_r$  = Área del absorbedor;  $T_{max}$  = Temperatura del absorbedor, en °C;  $T_a$  = Temperatura del aire ambiente, en °C.

## Coeficiente global de transferencia de calor

$$U := \frac{1}{\frac{1}{h_e} + \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{k_a} + \frac{r_o}{r_i \cdot h_i}}$$

$$U = 6.494 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$





ESPE

Área de incidencia de la luz concentrada

$$A_r := \pi d_o h$$

$$A_r = 1.33 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Temperatura del absorbedor

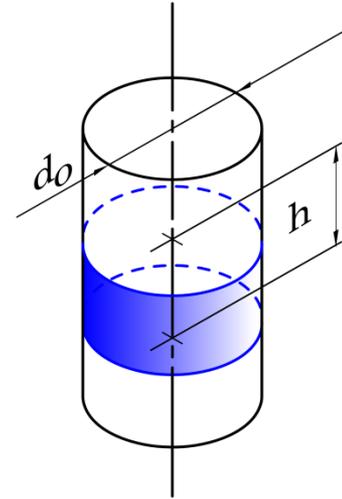
$$T_{max} := 204.63 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Temperatura del aire ambiente

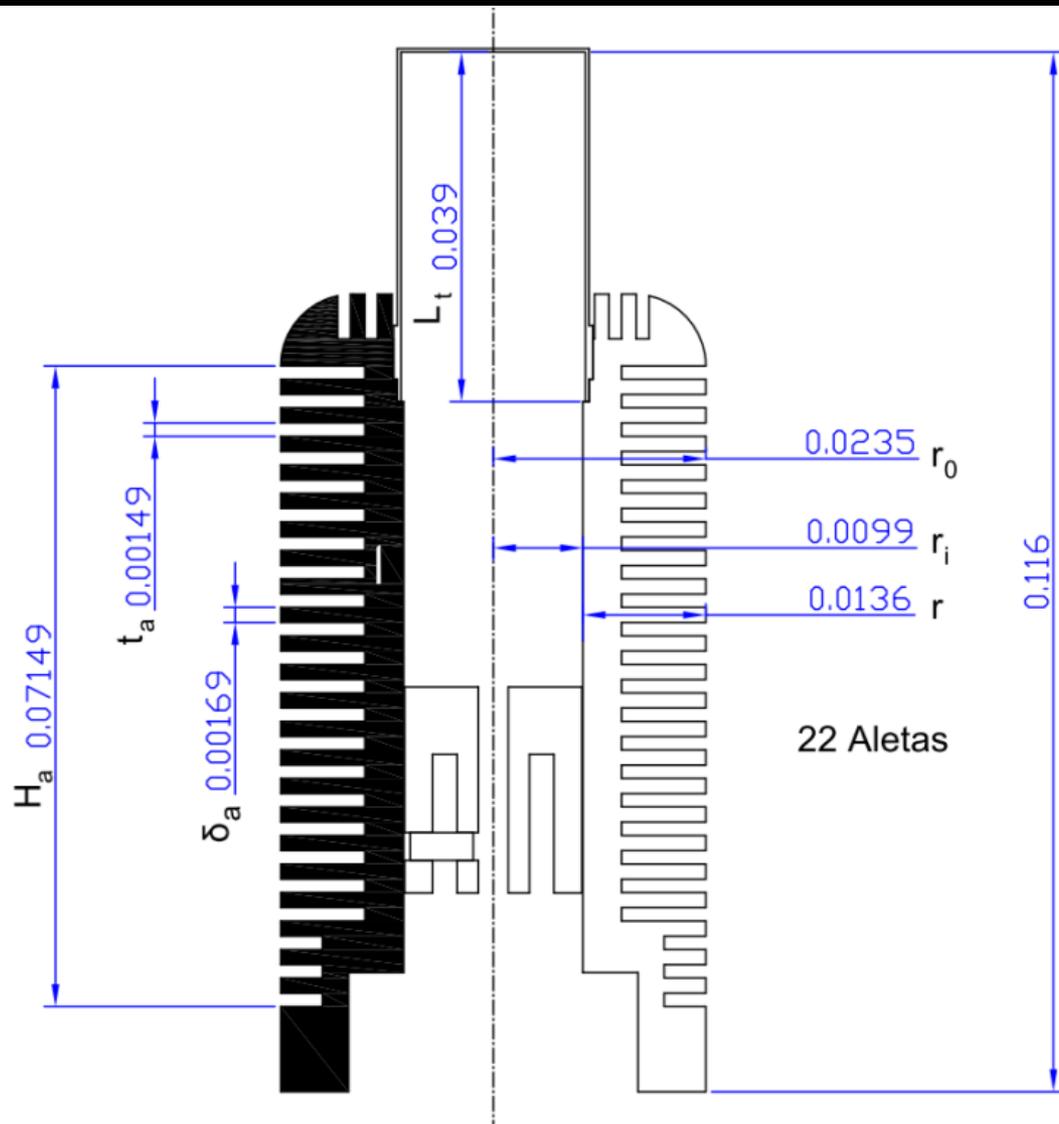
$$T_a := 23.9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

A partir de los valores anteriores se obtiene que:

$$Q_{pc} = 1.563 \text{ W}$$



# Calor perdido por las Aletas





ESPE

---

$$Q_t := h_c \cdot A_t \left( 1 - \frac{N_a \cdot A_f \cdot (1 - n_f)}{A_t} \right) \cdot \theta_b$$

$$h_c := 6.22 \frac{W}{m^2 K}$$

$$A_t := 3.12 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2$$

$$N_a := 22$$

$$A_f := 3.11 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$n_f := 9.34 \cdot 10^{-3}$$

$$\theta_b := 71.61 \text{ K}$$

$$Q_t = 108.6 \text{ W}$$



## Calor útil

---

$$Q_u := Q_{abs} - Q_{pc} - Q_t$$

$$Q_u = 74.52 \text{ W}$$

$$P_e = 12 \text{ W}$$

Con la potencia de 12 W se puede encender una luminaria en corriente continua



## Eficiencia instantánea (del concentrador)

---

$$\eta_c = \eta_o - \frac{U \cdot (T_{max} - T_a)}{I_d} \cdot \frac{1}{RC}$$

$$\eta_o = 0.49$$

$$U = 6.494 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

$$T_{max} := 204.63 \text{ } ^\circ C$$

$$T_a := 23.9 \text{ } ^\circ C$$

$$I_d = 975.34 \frac{W}{m^2}$$

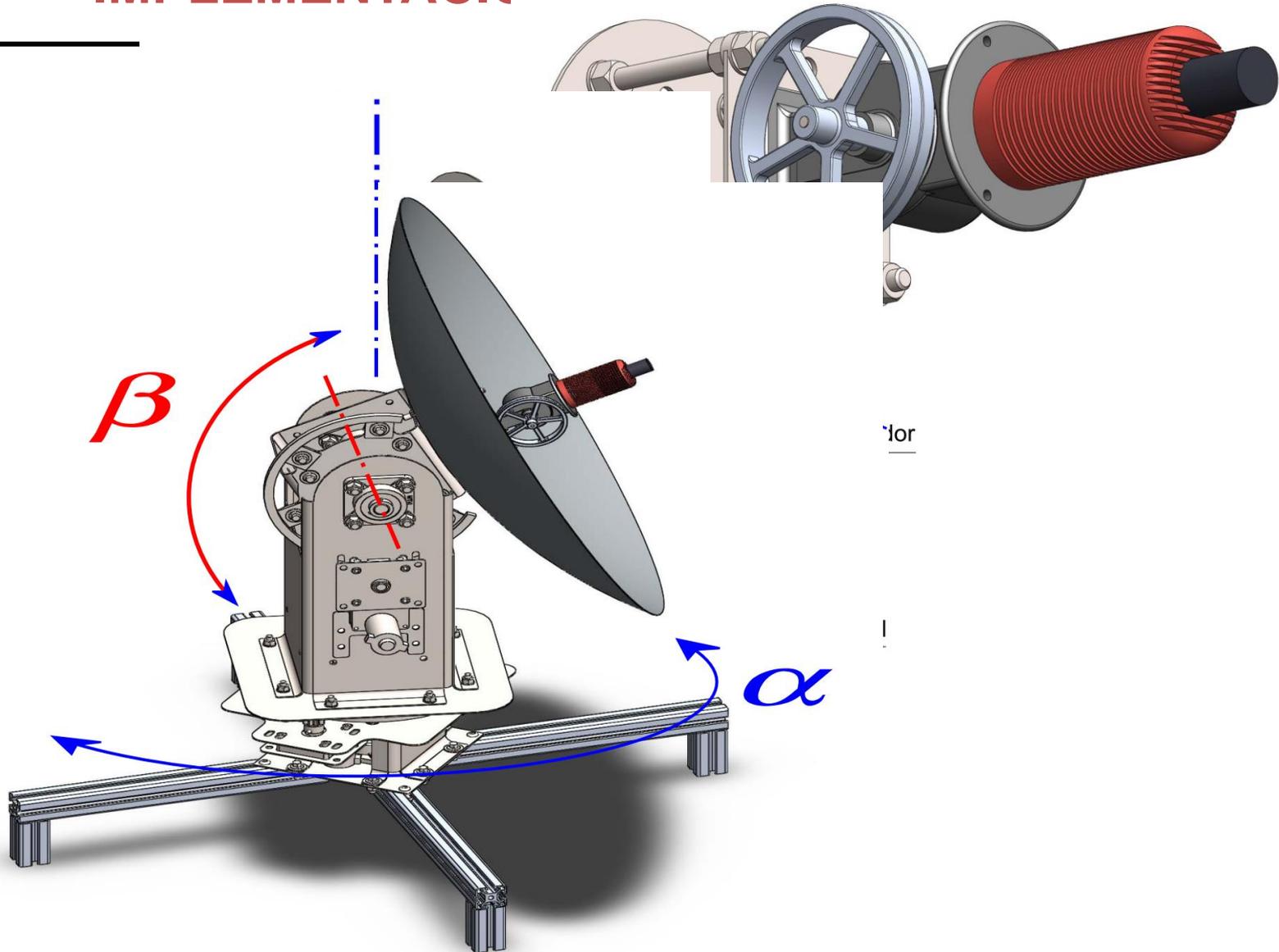
$$RC = 288.92$$

$$\eta_c = 0.488$$

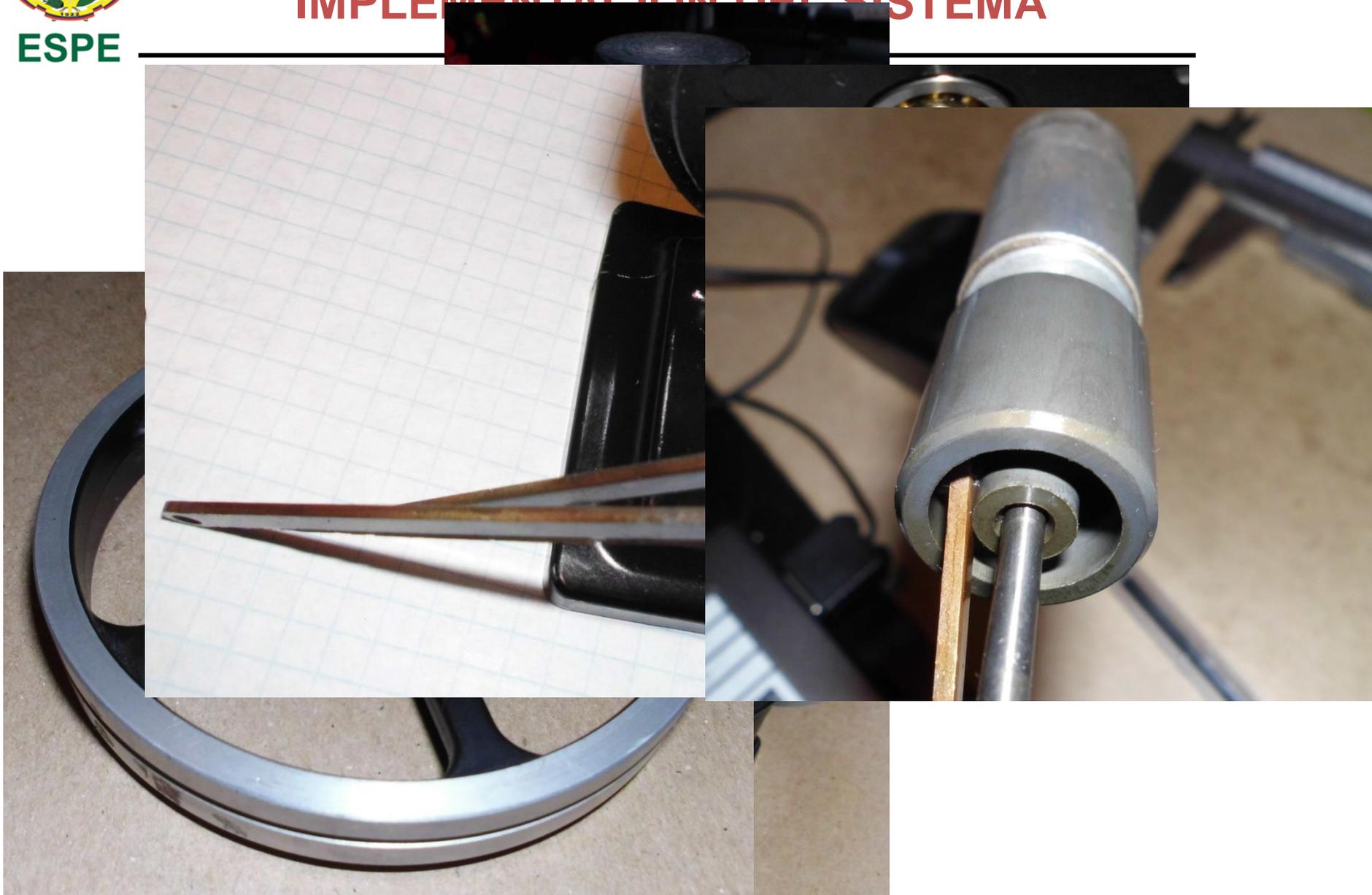


ESPE

# IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA



# IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA





# IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

---

[Simulación 1](#)

[Simulación 2](#)



ESPE

## PRUEBAS DE OPERACIÓN

---

### Parámetros:

Durante la toma de datos se determinaron los siguientes parámetros: Tiempo , Temperatura ambiente  $T_a$  (°C), Irradiancia solar  $I$  (W/m<sup>2</sup>), velocidad del viento  $V_a$  (m/s), humedad relativa  $HR$  (%), temperatura de aletas de enfriamiento  $T_c$  (°C), temperatura de cámara de reacción  $T_h$  (°C) y velocidad angular del volante de inercia (rpm).



ESPE

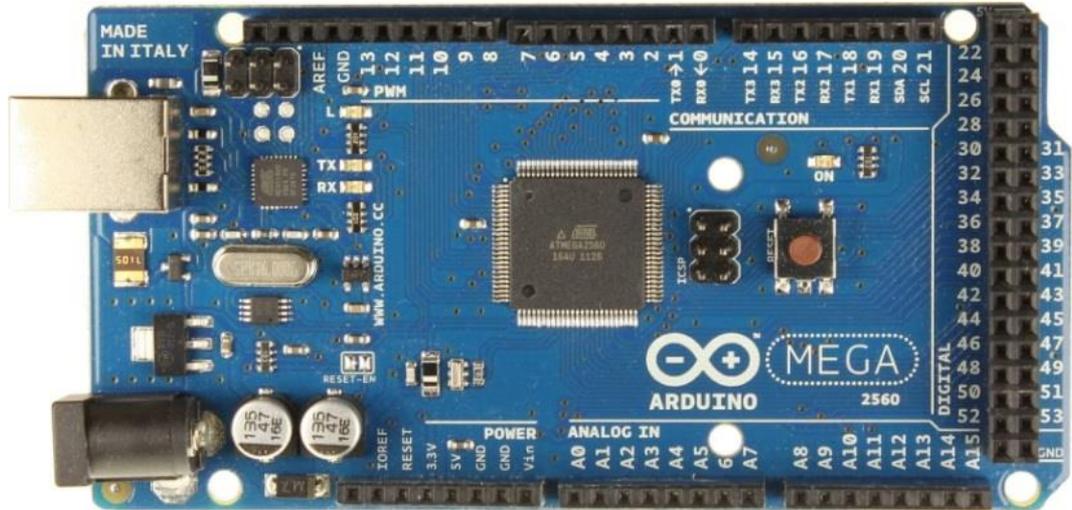
---

## **Sensores:**

Para manejar el conjunto de medidas y realizarlas de manera simultánea se hace uso de una tarjeta Arduino Mega 2560, que va a estar encargada de recibir la información proveniente de todos los sensores y enviarla a una base de datos tipo texto. La tarjeta se va a conectar directamente a un computador portátil, por lo que no es necesario un sistema independiente de almacenamiento de datos.



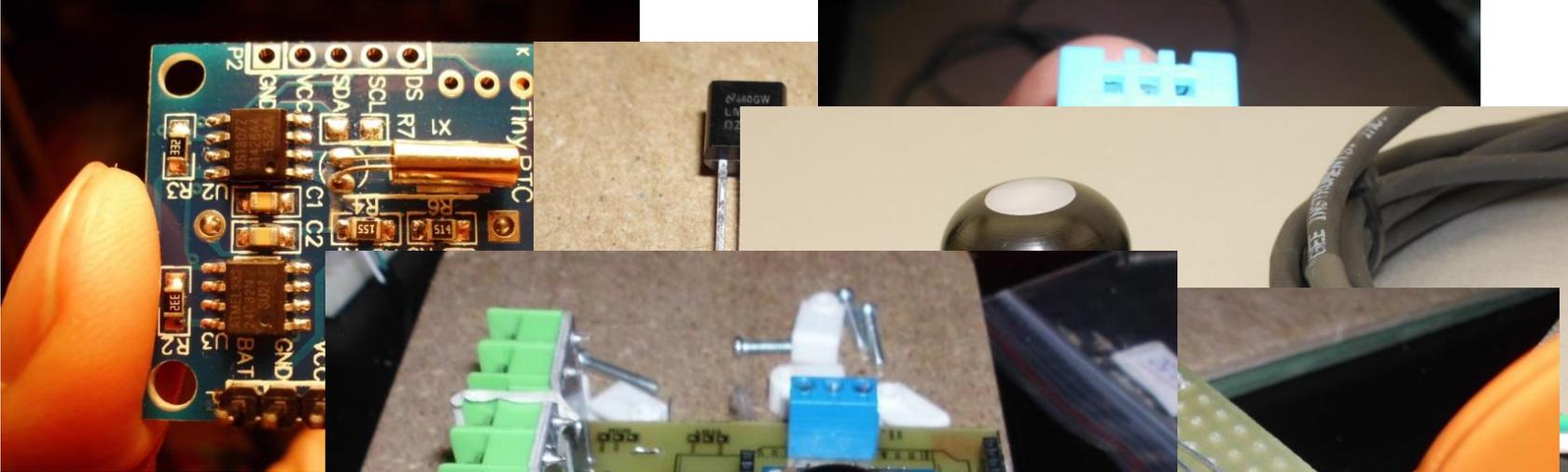
ESPE



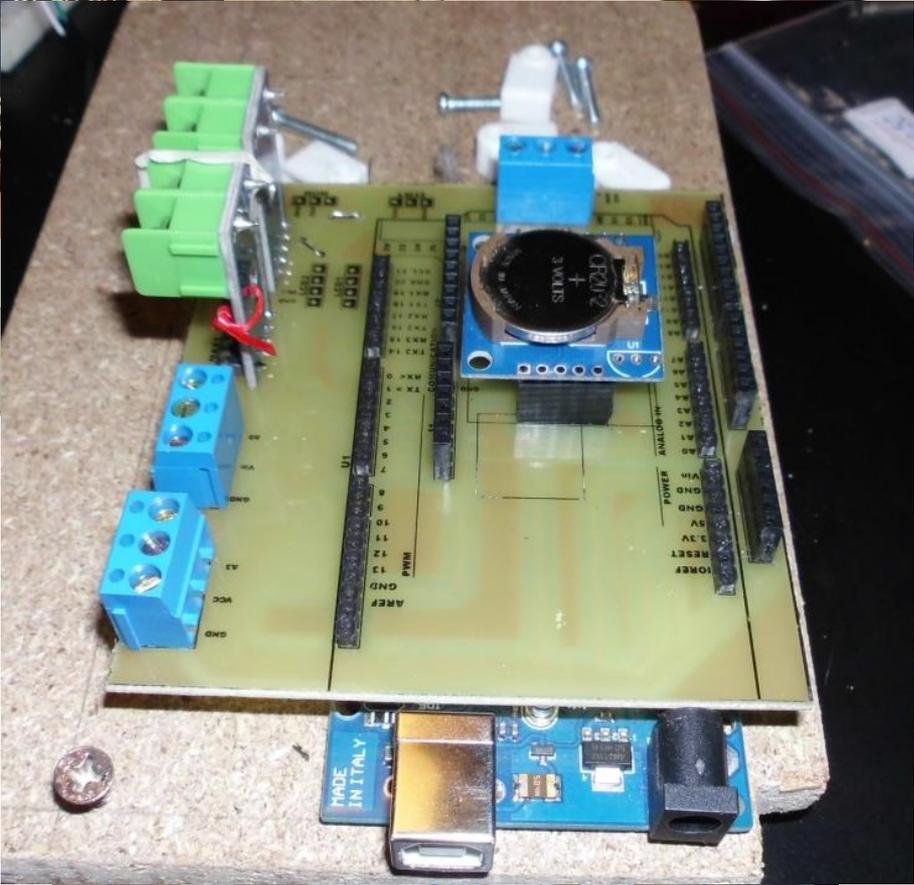
Arduino Mega 2560



ESPE



COMPUTADOR PERSONAL





## Protocolo experimental

---

- Armado del sistema Motor Stirling y Concentrador Solar
- Limpieza del espejo concentrador
- Conexión a computador personal
- Inicio del programa de captura de datos (Coolterm).
- Orientación del eje del espejo concentrador en la dirección de la radiación solar directa
- Arranque manual del motor Stirling
- Reorientación del espejo concentrador cada 4 minutos para mantener la alineación con el Sol.



# Toma de Datos

**Tabla 2**  
**Datos ensayo E2-2**

E2-2 Fecha: 2016-03-08 Tiempo de funcionamiento: 88.08 minutos = 1.47 horas

Orden	Hora	Tiempo min	Ta °C	I W/m <sup>2</sup>	Va m/s	HR %	Tc °C	Th °C	Velocidad rpm
1	09:45:13	00:00:00	40.9	976.05	0.16	27.31	118.36	166.80	320.49
2	09:48:38	00:03:25	38.9	953.14	0.12	28.38	111.24	153.03	301.29
3	09:52:03	00:06:50	38.7	963.20	0.10	28.34	108.02	151.39	332.68
4	09:55:28	00:10:15	36.3	951.83	0.09	29.60	107.48	148.21	271.20
5	09:58:54	00:13:41	38.0	951.13	0.11	29.00	108.38	154.63	352.80
6	10:02:19	00:17:06	38.9	965.68	0.14	28.26	108.32	160.66	368.31
7	10:05:44	00:20:31	38.8	990.08	0.13	28.29	110.33	160.38	363.51
8	10:09:09	00:23:56	38.3	981.49	0.14	28.68	106.38	151.55	284.68
9	10:12:34	00:27:21	37.3	980.73	0.17	29.28	107.00	150.37	288.74
10	10:15:59	00:30:46	39.6	981.81	0.13	28.03	109.24	178.83	450.09
11	10:19:24	00:34:11	41.0	991.01	0.15	27.17	110.17	182.69	407.45
12	10:22:49	00:37:36	37.2	987.57	0.29	29.09	103.44	175.84	466.71
13	10:26:14	00:41:01	41.4	985.69	0.09	26.98	111.34	190.29	402.46

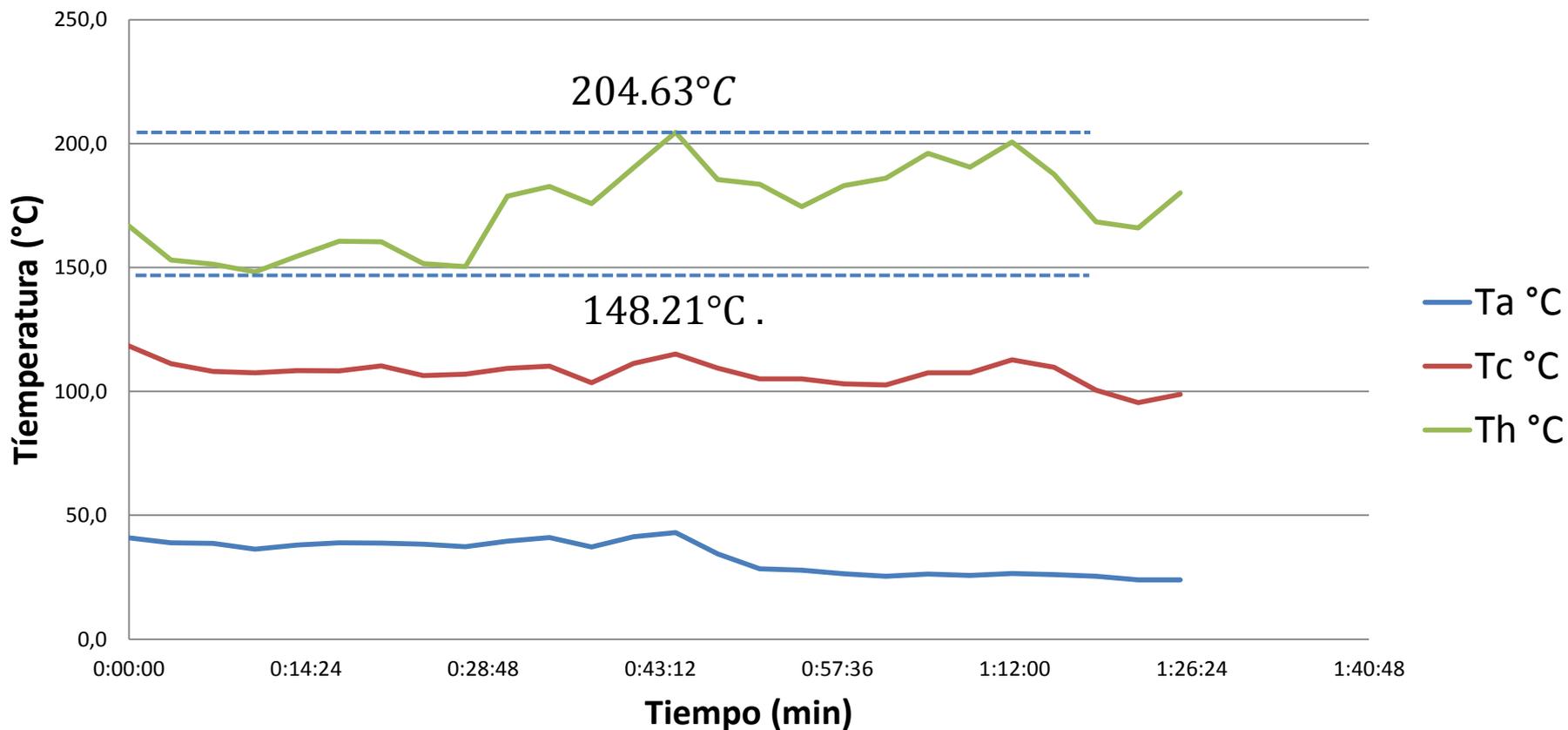


**ESPE**

Orden	Hora	Tiempo min	Ta °C	I W/m <sup>2</sup>	Va m/s	HR %	Tc °C	Th °C	Velocidad rpm
14	10:29:39	00:44:26	43.0	975.70	0.11	26.22	115.15	204.63	507.88
15	10:33:05	00:47:52	34.5	959.25	0.19	30.55	109.43	185.45	414.83
16	10:36:30	00:51:17	28.4	974.81	0.11	33.65	105.10	183.65	380.31
17	10:39:55	00:54:42	27.8	987.03	0.15	34.00	105.04	174.55	425.17
18	10:43:20	00:58:07	26.4	985.06	0.20	34.48	103.00	183.05	407.08
19	10:46:45	01:01:32	25.4	992.44	0.36	35.00	102.57	186.08	439.38
20	10:50:10	01:04:57	26.3	977.17	0.17	34.43	107.47	196.15	432.18
21	10:53:35	01:08:22	25.8	975.95	0.14	34.94	107.54	190.48	456.37
22	10:57:00	01:11:47	26.5	978.72	0.29	34.23	112.78	200.72	492.00
23	11:00:25	01:15:12	26.1	972.20	0.28	34.52	109.69	187.65	372.00
24	11:03:51	01:18:38	25.4	976.02	0.44	35.00	100.53	168.40	369.42
25	11:07:16	01:22:03	24.0	984.10	0.44	35.49	95.51	165.93	359.82
26	11:10:41	01:25:28	23.9	961.07	0.48	35.18	98.80	180.10	371.53
$\bar{x}$			33.4	975.34	0.20	31.00	107.40	174.29	386.09
<b>Max</b>			43.0	992.44	0.48	35.49	118.36	204.63	507.88
<b>Min</b>			23.9	951.13	0.09	26.22	95.51	148.21	271.20



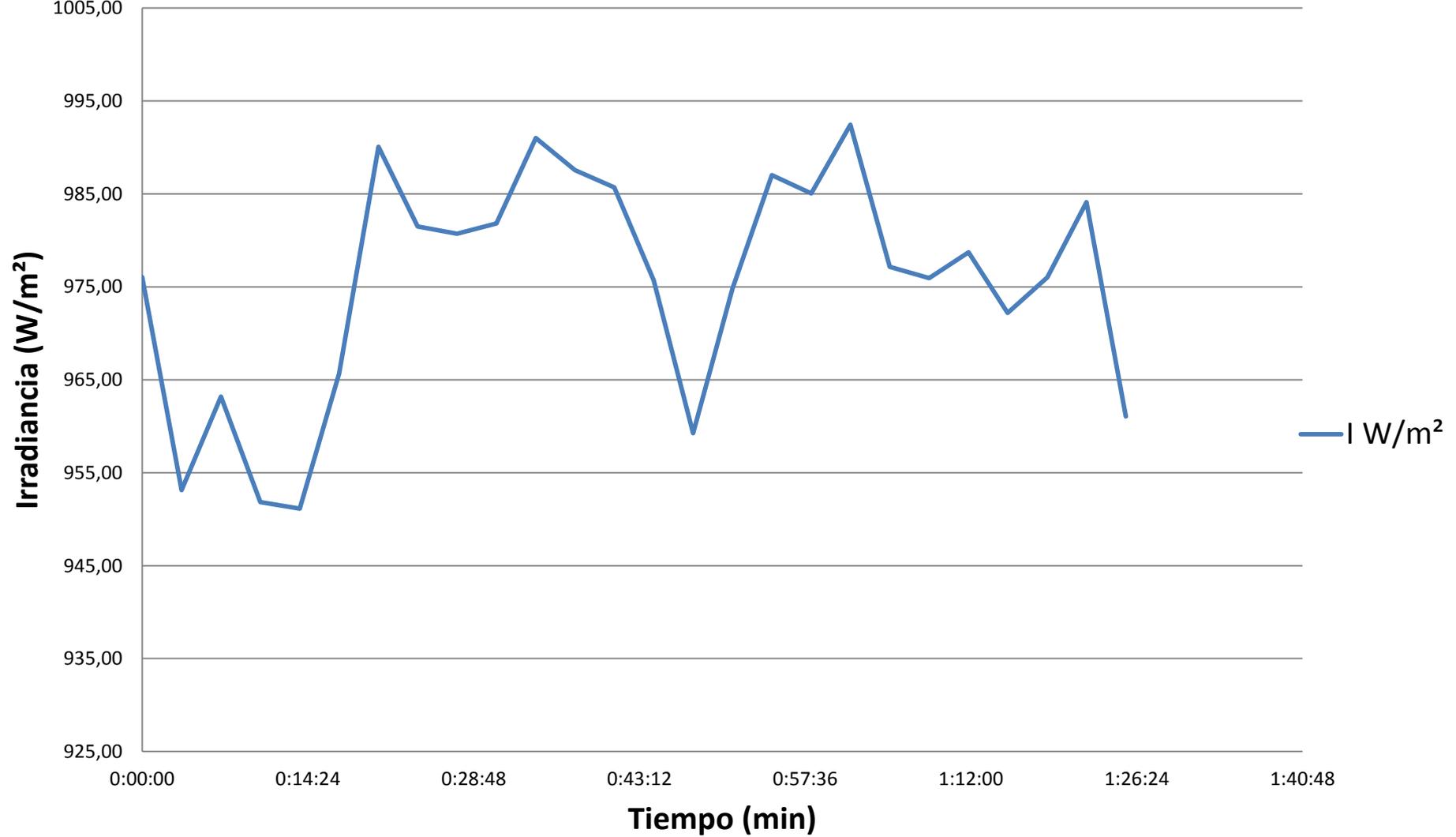
# Análisis de Resultados





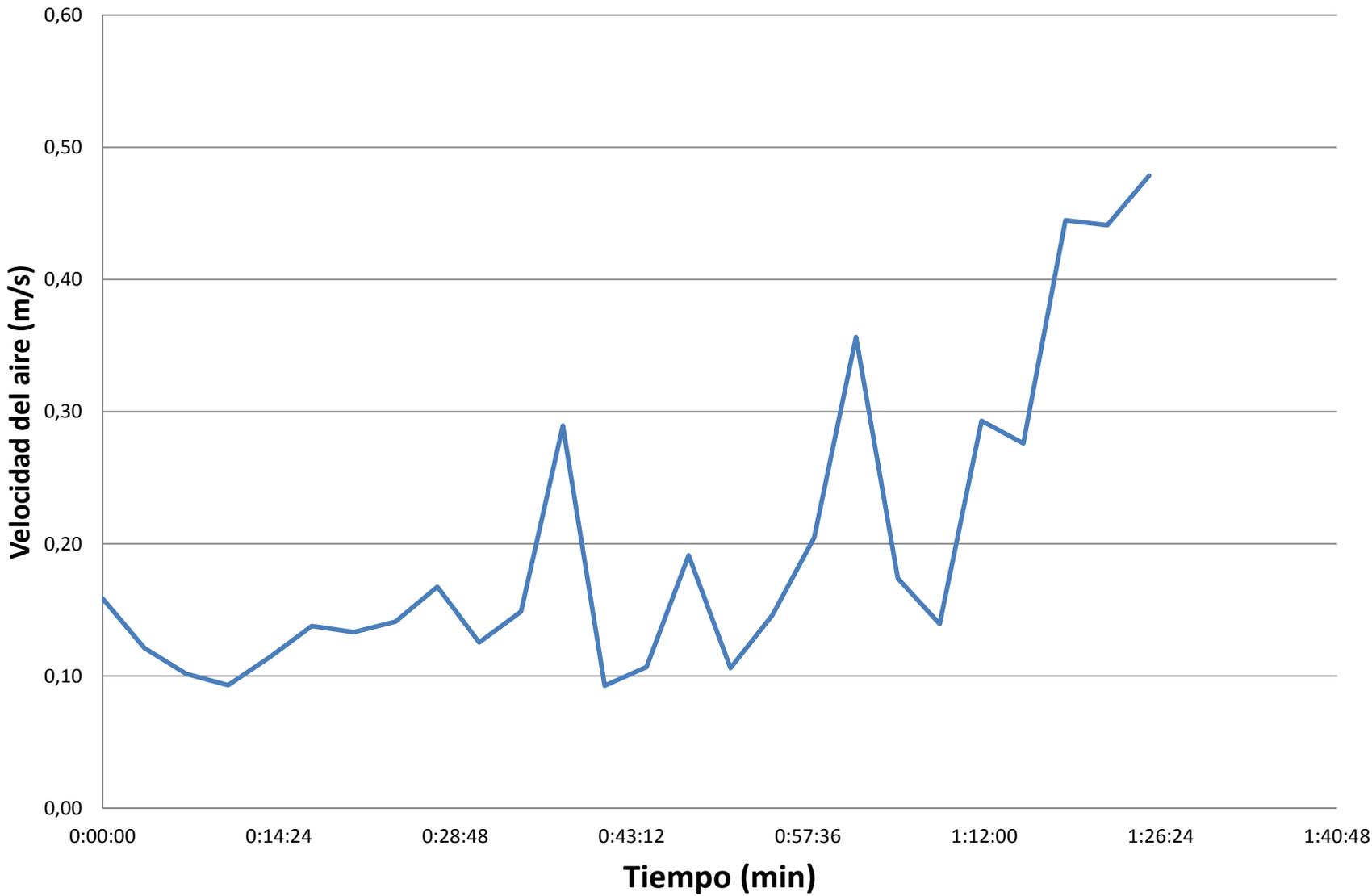
**ESPE**

1005,00





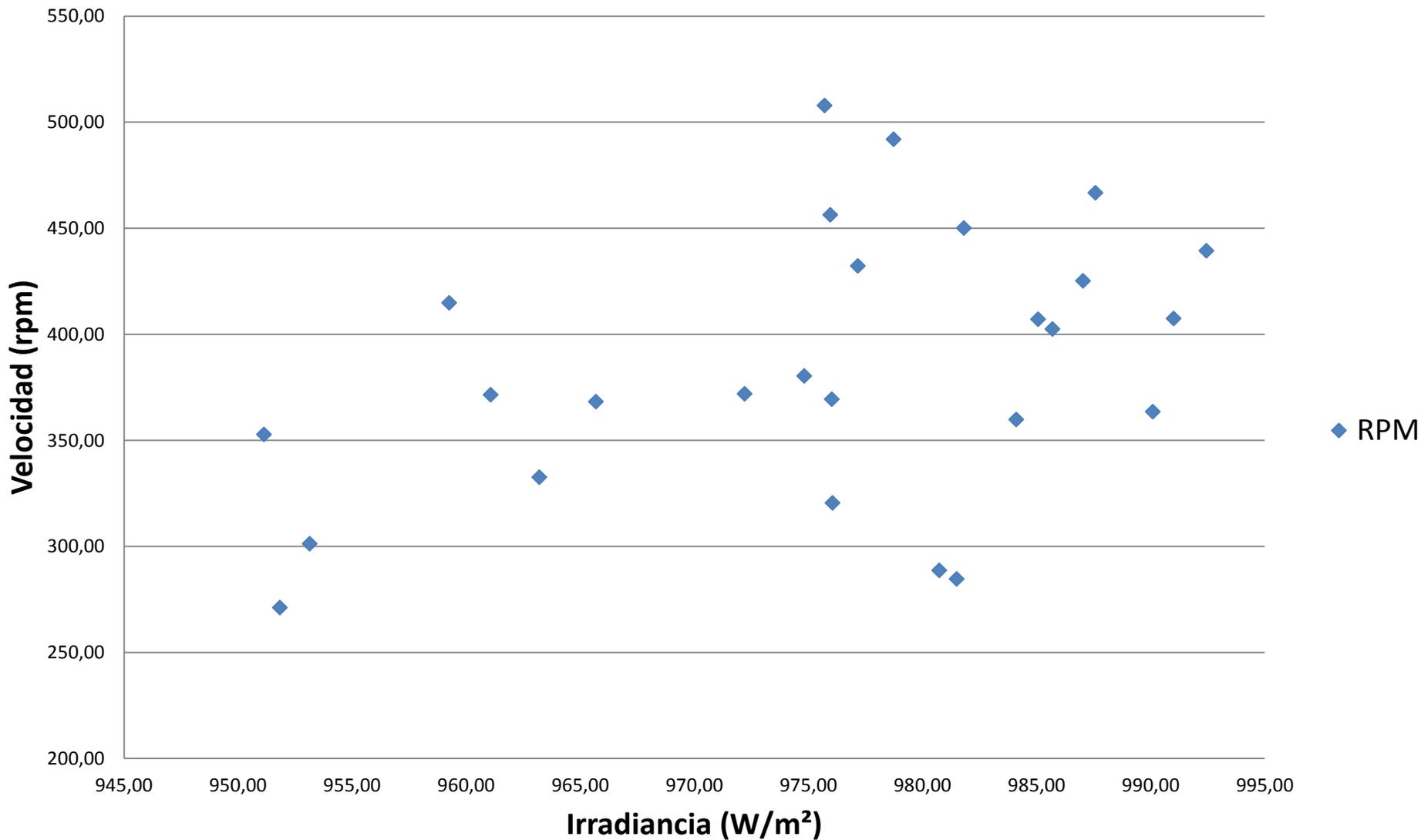
**ESPE**





**ESPE**

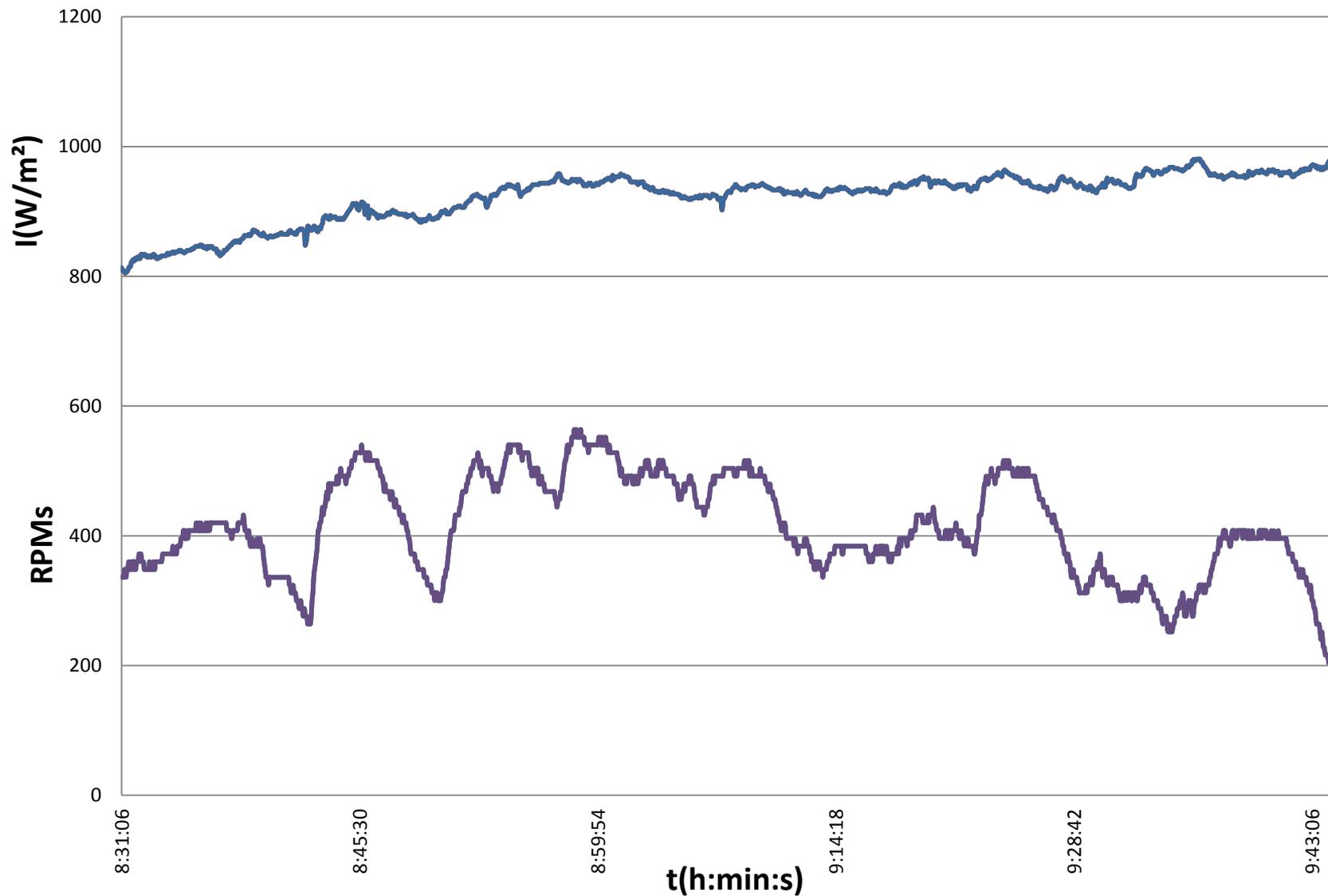
## RPM vs. Irradiancia





**ESPE**

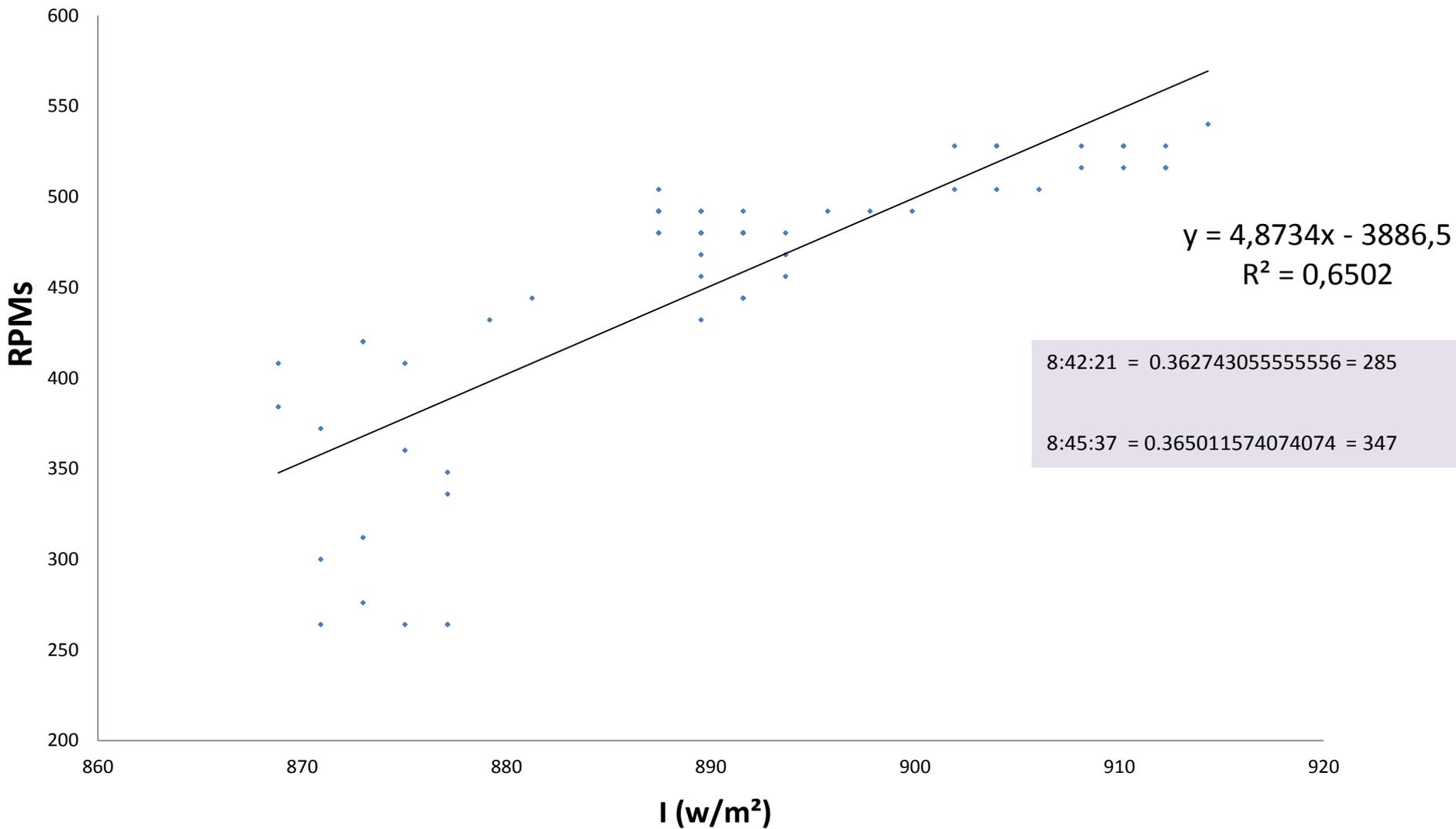
## Irradiancia ---- RPMs vs Tiempo





**ESPE**

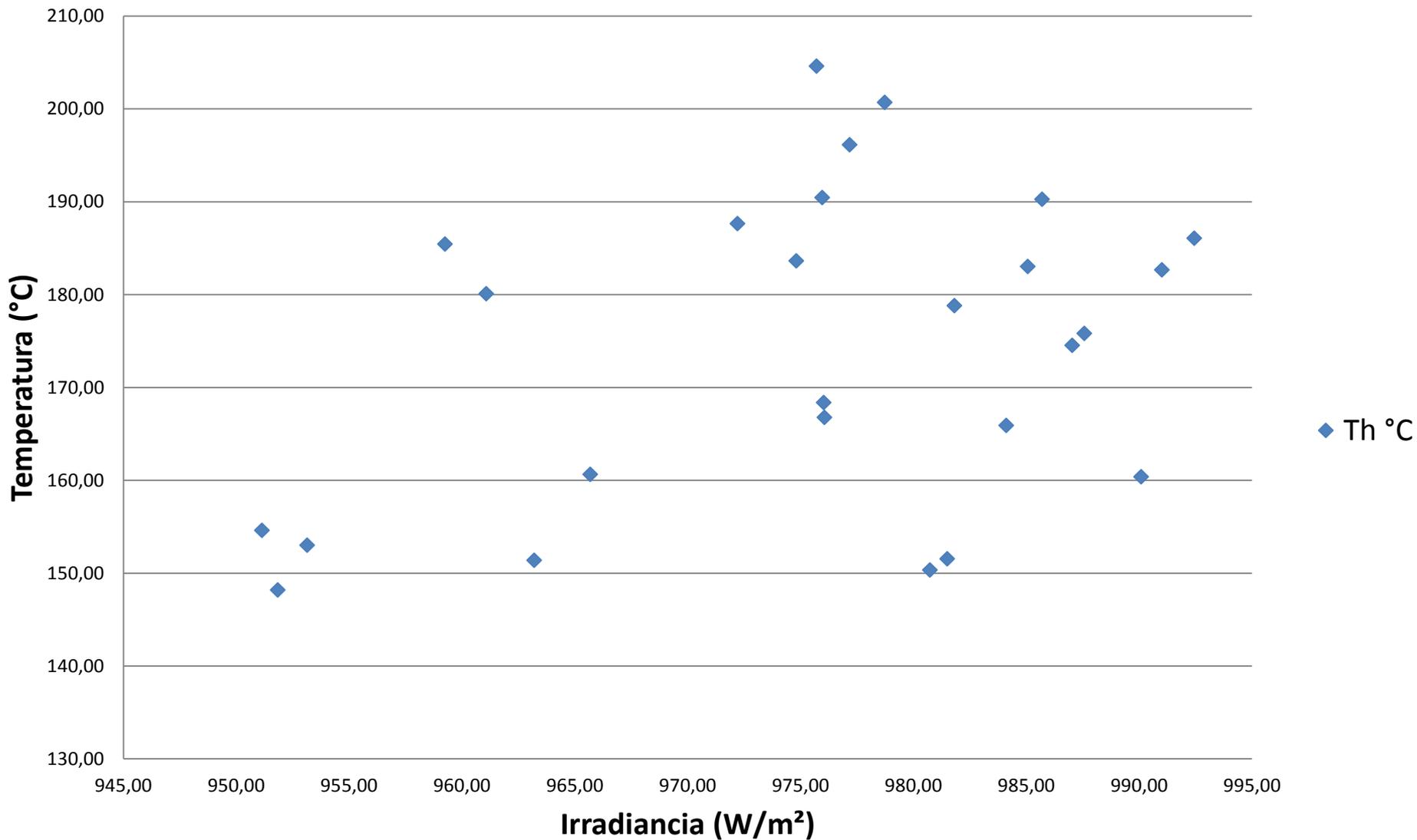
## RPM vs Irradiancia





**ESPE**

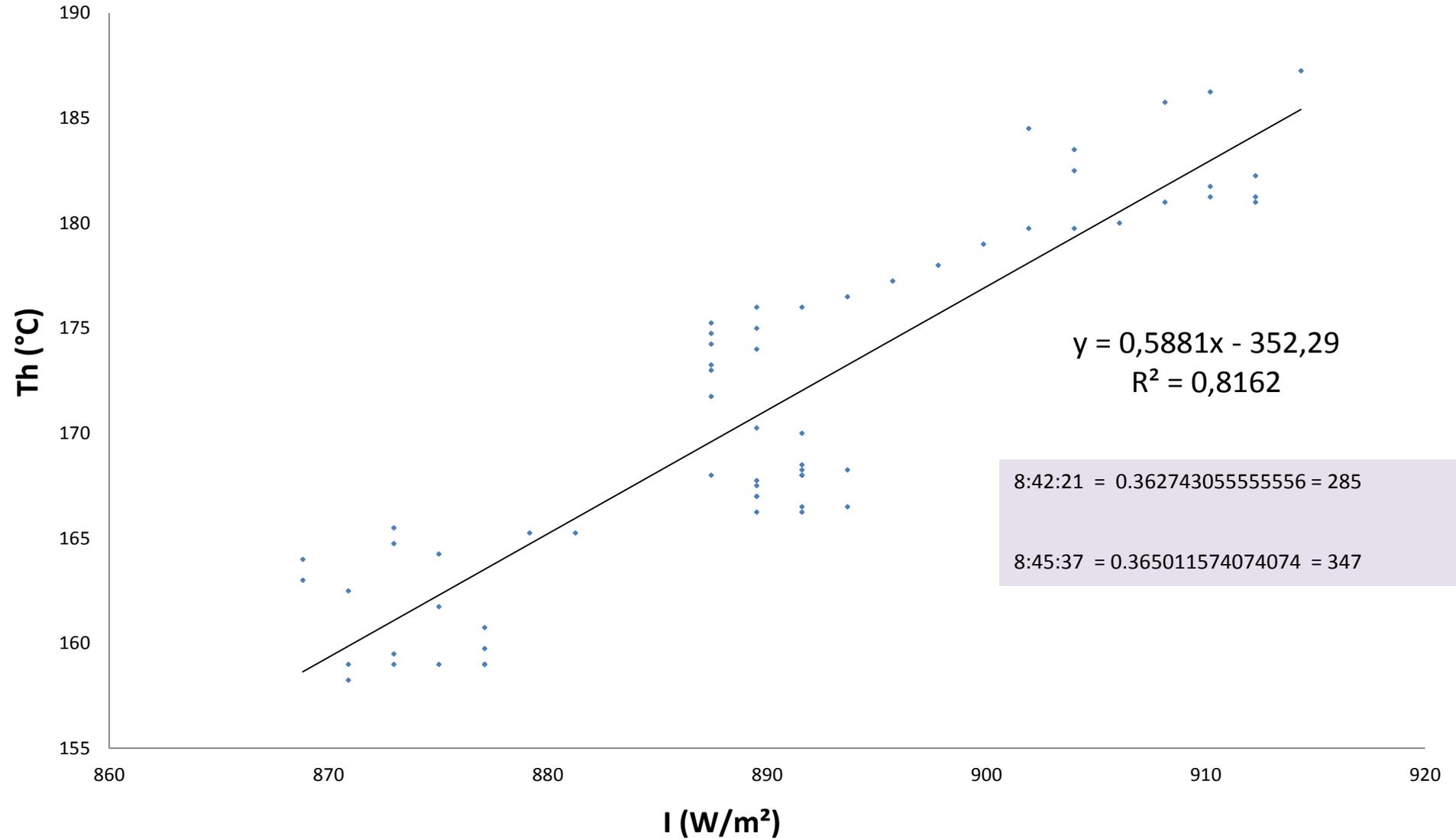
## Temperatura de CR vs. Irradiancia





ESPE

## Temperatura de CR vs. Irradiancia





ESPE

---

## CONCLUSIONES

- El motor Stirling tipo Beta es un dispositivo que para su accionamiento utiliza diversas fuentes de energía térmica, calor residual proveniente de la quema de combustibles fósiles, combustión de biomasa, calor proveniente de la energía geotérmica, y en los últimos años se ha logrado avances mediante el uso de radiación solar concentrada.



ESPE

---

- En la operación del Motor Stirling no se produce combustión interna, ya que el calor es suministrado en forma externa a la cámara de reacción. Por lo tanto no emite sustancias contaminantes. Para su funcionamiento es necesario acoplar el mecanismo biela manivela que convierte la velocidad axial en velocidad de rotación, a través del cigüeñal y de éste al volante de inercia.



ESPE

---

- Los parámetros de funcionamiento del motor Stirling tipo Beta, desarrollados en ésta investigación experimental son: Potencia del concentrador  $200W_t$ , Irradiancia solar en el rango de 600 a  $1000 W/m^2$  , velocidad del motor 600 revoluciones por minuto, desplazamiento del pistón de aluminio 18 mm , velocidad axial 0.5 m/s , temperatura máxima de cámara de reacción  $204.63 ^\circ C$ .



ESPE

---

- Debido a que en el sitio donde se desarrolló el experimento, la nubosidad es muy variable y el índice de claridad inferior al 50%, el tiempo de operación máxima del motor ha sido de 1.47 horas. Esto significa que para potenciales aplicaciones de ésta tecnología la zona de ensayo debe tener irradiancia solar sobre los  $600 \text{ W/m}^2$  y una duración de la radiación directa incidente sobre las 4 horas.



ESPE

---

- El efecto del desbordamiento de la radiación solar concentrada o “spillage” se debe considerar debido a las imperfecciones ópticas del espejo concentrador. Éste factor no es posible de medir de forma directa con los instrumentos disponibles, ya que no fueron diseñados para rangos de Irradiancia concentrada



ESPE

---

- El funcionamiento del motor Stirling se ve afectado por la pérdida de energía térmica que se presenta por convección y radiación hacia el ambiente, pérdidas por fricción en el interior del cilindro, variación de la radiación solar directa (existencia de mucha nubosidad), pérdidas mecánicas debido a los efectos térmicos sobre los mecanismos de movimiento, por la expansión y contracción de los materiales



ESPE

---

- La reducción del valor del gradiente de temperatura origina un estancamiento en la velocidad de rotación del cigüeñal del motor.



ESPE

## PROYECCIONES FUTURAS

---

Es necesario continuar con las investigaciones tecnológicas relacionadas con el desarrollo de motores Stirling, para el aprovechamiento de la energía solar térmica de media y alta temperatura. Para el caso de Ecuador que necesita actualizar su matriz energética, basada en el uso de fuentes renovables, es importante viabilizar las siguientes investigaciones:



ESPE

---

- Desarrollo de motores Stirling tipo Beta que utilicen como fluido de proceso gases como Helio, y cámaras de enfriamiento de alto rendimiento.



ESPE

---

- En lo que tiene que ver con sistemas de concentración se propone que se realicen investigaciones y el posterior desarrollo de espejos de concentración o lentes con diámetros superiores a los 4 metros para alcanzar razones de concentración de 1600 soles y temperaturas superiores a los 1000 °C para realizar tratamiento térmico de materiales, recubrimientos superficiales y la posible aplicación en fundición con baja emisión de contaminantes.



ESPE

---

- Disponer de un mapa de irradiancia solar que permita definir aplicaciones de media y alta entalpía con diversos fluidos de proceso y su posterior conversión en electricidad, para lo cual es necesario el estudio de la radiación solar local, la climatología, determinación de índices de nubosidad y claridad, con lo que se pueda potencializar el uso de la radiación solar concentrada.



**GRACIAS POR SU  
ATENCIÓN**