

Estudio del comportamiento de colectores solares ante la variación de sus parámetros fundamentales

Study of the behavior of solar collectors before the variation of their fundamental parameters

Nicolás Ariel Bon - Becario - UTN Facultad Regional Santa Fe - nicobon73@gmail.com

Johann Miguel Schmidt Waigel - Becario - UTN Facultad Regional Santa Fe - johannschmidt60@gmail.com

Resumen

El desarrollo productivo y económico del país trae aparejado una necesidad implícita de optimizar el gasto de energía y minimizar el alto impacto que genera en diferentes ámbitos. Los costos del aprovisionamiento de energía y las externalidades, sobre todo ambientales, comenzaron a generar una nueva visión al respecto.

El presente trabajo desarrolla y resume el funcionamiento y evaluación de un sistema solar térmico, analizado mediante un banco de pruebas, utilizado para el calentamiento de agua sanitaria. El mismo, funciona mediante el aprovechamiento de una fuente de energía alternativa, como lo es la energía solar.

Se lograrán obtener parámetros del comportamiento de este en diferentes condiciones, como así también en diferentes épocas del año.

Palabras clave: Gastó de energía; Funcionamiento; Sistema solar térmico; Energía alternativa.

Abstract

The productive and economic development of the country is accompanied by an implicit need to optimize energy expenditure and minimize the high impact it has on various aspects. The costs of energy supply and, especially, environmental externalities have begun to generate a new perspective on this matter. This paper elaborates on and summarizes the operation and evaluation of a thermal solar system, analyzed through a test bench, used for heating domestic water. It operates by harnessing an alternative energy source, namely solar energy. Parameters of its performance will be obtained under different conditions, as well as during different times of the year.

Keywords: Energy expenditure; Operation; Thermal solar system; Alternative energy.

Introducción

En la actualidad, el gasto energético que se realiza para calentar agua se ve reflejado en un enorme costo económico, sin olvidar el daño que genera al ambiente la utilización de métodos convencionales de generación de energía.

Estudios demuestran que el sol arroja sobre la tierra cuatro mil veces más energías que la que consumimos, específica *Almanza (2003)*. Por lo tanto, sería importante beneficiarse de esta fuente de energía gratuita, limpia e inagotable. Es por esto por lo que diferentes laboratorios de desarrollo tecnológico alrededor del mundo están en la constante búsqueda de tecnologías que permitan aprovechar de manera eficiente la energía solar *Arbane (2013)*.

Se torna inevitable pensar que en el corto y mediano plazo la matriz energética mundial seguirá mutando hacia fuentes de generación de energías alternativas, acompañado de las mejoras tecnológicas y el aumento de la eficiencia que se está observando en la fabricación de este tipo de equipos.

Los sistemas solares térmicos aprovechan la energía radiante del sol para calentar agua o cualquier otro fluido, que posteriormente, será utilizado en diversas aplicaciones, como agua caliente sanitaria, climatización, procesos industriales u otros usos.

En Argentina, la tecnología de los colectores solares está todavía en una etapa de desarrollo. Existen varios fabricantes nacionales, pero tecnológicamente limitados, y con un grado de desarrollo intermedio. Es nuestra responsabilidad como institución, y sobre todo como jóvenes investigadores involucrarnos y trabajar juntamente con el sector privado para aportar conocimiento y desarrollo a nuestro país.

El proyecto desarrollado tiene como objetivo principal contribuir a la optimización de equipos que aprovechan la energía solar para el calentamiento de agua, obteniendo información cuantitativa del rendimiento real de los equipos por medio de un banco de ensayos, el cual fue construido en el marco del proyecto.

Los ensayos realizados para evaluar la performance de los equipos se enmarcan en el protocolo establecido por el Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM), más precisamente las normas **IRAM 210004 (2016)** Métodos de ensayos exteriores para la caracterización y predicción del rendimiento anual de los sistemas solares.

La permanente evolución del mercado requiere una necesaria evolución de las propuestas tecnológicas que lo satisfagan, siendo necesaria una permanente búsqueda de nuevas y mejores soluciones en los productos ofrecidos.

Con la mirada puesta en el futuro, se afirma que este tipo de proyectos tendrán un rol protagónico en los próximos años, ya que el planeta amenaza día a día con el agotamiento de fuentes de energía convencionales según **Quadri (2016)**, y es hora de que cada uno de nosotros empecemos a tomar un papel fundamental en el cuidado y preservación del medio ambiente.

Una vez finalizado el trabajo este nos permitirá predecir el rendimiento actual del mismo en diferentes condiciones meteorológicas, y hacer proyecciones del rendimiento futuro modificando los valores de estas condiciones. Además, cabe destacar que estos parámetros térmicos dan una caracterización del comportamiento térmico a corto plazo y son útiles para el diseño y la caracterización a largo plazo de instalaciones solares de calentamiento de agua **Hernández et al. (2007)**.

Metodología

Determinación del Rendimiento

Los ensayos y pruebas a los equipos solares se realizaron por medio de un banco de ensayos. El mismo consiste en una serie de sensores de temperatura y equipos necesarios para la realización de este, se detalla en la **Figura 1** un diagrama esquemático del circuito hidráulico como también las referencias de cada símbolo.

Cabe aclarar que actualmente no se cuenta con el funcionamiento del piranómetro como así tampoco del anemómetro, por lo que dichos datos son obtenidos de una estación meteorológica aledaña a la UTN - Facultad Regional Santa Fe (FRSF). **PWS Weather “estación General Paz”, (2023)**.

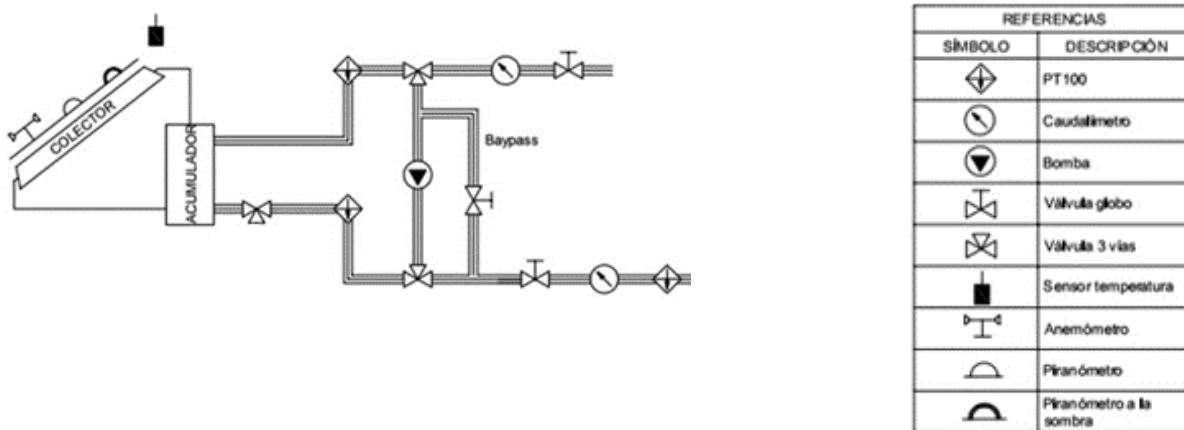


Figura 1. Diagrama esquemático del banco de ensayos y símbolos.

Para la realización de los ensayos el banco presentado anteriormente utiliza un controlador lógico programable o más conocido como PLC, de la empresa Schneider Electric. Se utiliza el modelo TM221CE40R y se le anexa al mismo un módulo de entradas analógicas modelo Modicon TM3-M221.

De esta manera se logra una mayor confiabilidad en los resultados, lo que deriva en la disminución de errores de medición.

El colector solar es del tipo tubos de vacío marca KingShip, cuenta con 30 tubos y un tanque de almacenamiento de 300 litros. El mismo está instalado en el segundo piso de la UTN - FRSF con orientación norte e inclinación de 50°; el cual se utiliza para alimentar una sección de la UTN-FRSF, como así también un dispenser de agua caliente.

De una forma reducida y simple el procedimiento utilizado consiste en realizar mediciones de ciertos parámetros climáticos, como la temperatura ambiente, radiación solar y temperatura del agua de red para luego mediante la metodología existente en **IRAM 210004 (2016)** obtener los resultados de rendimiento y comportamiento del colector.

El periodo de ensayo dura aproximadamente 12 horas de corrido luego de obtener en el colector la temperatura $t(\text{main})$.

La obtención de los datos del ensayo se realizó en un mismo ordenador, donde se procedió a grabar la pantalla para de esa manera poder visualizar tanto el comportamiento de la temperatura del fluido mediante el programa “EcoStruxure Machine Expert - Basic”, como así también monitorear la cantidad de agua de red entrante tanto en caudal instantáneo como acumulado, para esto se utilizó el programa “Arduino IDE”.

Resultados y discusión

El análisis se centra en los resultados del ensayo correspondiente al rendimiento y la energía útil generada por el equipo.

Cabe aclarar que los valores como los resultados obtenidos no son valores absolutos sino una aproximación representativa del comportamiento del colector solar evaluado.

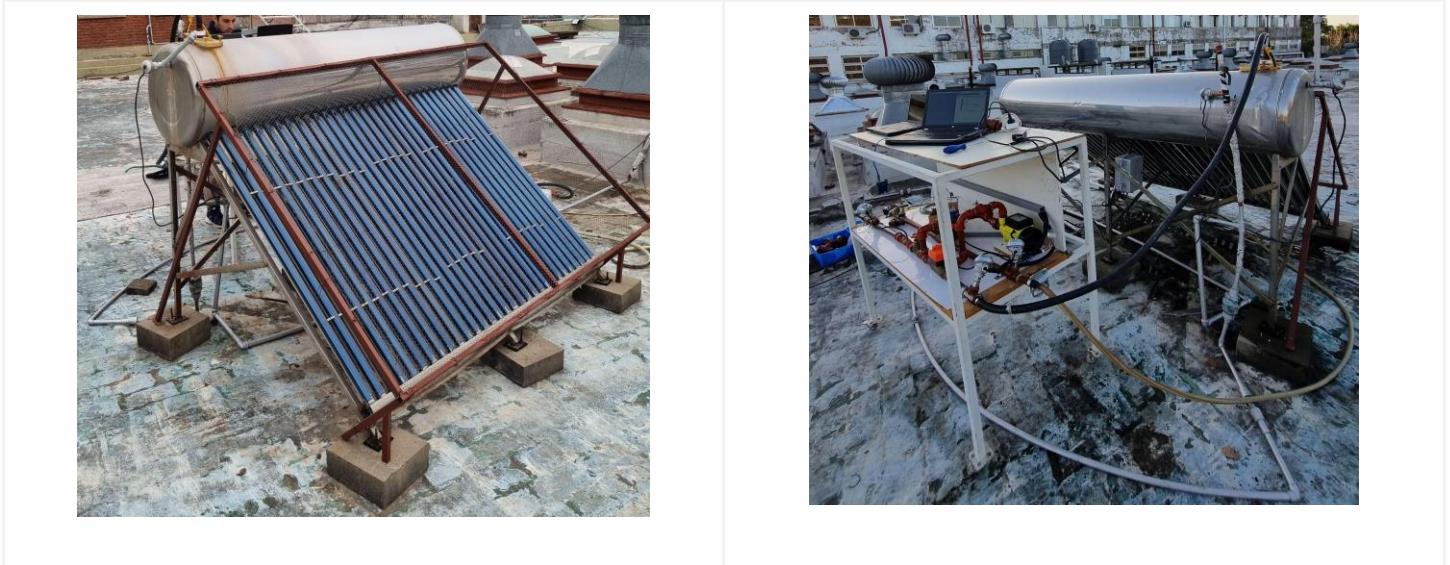


Figura 2. Colector solar utilizado

Rendimiento

El procedimiento en cuestión tiene como finalidad obtener un valor de rendimiento instantáneo del colector (η), es decir, se busca determinar un coeficiente que luego pueda ser utilizado para predecir el comportamiento de los equipos en diferentes condiciones ambientales. El mismo se obtiene mediante la ecuación (1), expresada a continuación.

$$\eta = \eta_0 - a_1 \left(\frac{t_m - t_a}{I_g} \right) \quad (1)$$

En la siguiente tabla se presentan las unidades de los distintos parámetros, con su respectiva

Descripción	Unidades
Coeficiente de rendimiento óptico " η_o "	0,55
Coeficiente de pérdidas térmicas de 1° grado " a_1 "	2,1(W/Km ²)
Temperatura media del fluido caloportador " t_m "	K
Temperatura de ambiente " t_a "	K
Irradiancia solar " I_g "	W/m ²

Tabla 1. Unidades utilizadas y coeficientes de cálculo.

En la siguiente tabla se representan los valores obtenidos de los ensayos realizados hasta la fecha.

Fecha ensayo	12-06-23	22-08-23	25-08-23
Temperatura media del fluido caloportador " t_m "	304,11	302,10	300,05
Temperatura de ambiente " t_a "	292,15	292,15	291,15
Irradiancia solar (W/m ²)	281,58	375,83	406,91

Tabla 2. Valores obtenidos de cada ensayo para determinar la ecuación (1).

El valor de la irradiancia solar " I_g " que se muestra en la **Tabla 2**. Hace referencia al promedio de la radiación solar en un día de ensayo, obteniendo las mediciones de *PWS Weather "estación General Paz", (2023)* y haciendo un promedio de estas respecto a las doce horas que dura el ensayo según *IRAM 210004, (2016)*.

Se representan los datos obtenidos de los ensayos realizados hasta la fecha.

Ensayo Otoño 12-06-23		Ensayo Invierno 22-08-23		Ensayo Invierno 25-08-23	
$t_a = 292.15$ (K)		$t_a = 292.15$ (K)		$t_a = 291.15$ (K)	
Volumen (m3)	Temperatura (K)	Volumen (m3)	Temperatura (K)	Volumen (m3)	Temperatura (K)
0,000	315,15	0,000	311,15	0,000	308,15
0,027	315,15	0,073	311,15	0,000	308,15
0,067	314,15	0,137	310,15	0,057	308,15
0,117	313,15	0,147	309,15	0,092	307,15
0,170	312,15	0,240	308,15	0,167	306,15
0,323	311,15	0,267	307,15	0,221	305,15
0,328	310,15	0,357	306,15	0,304	304,15
0,338	309,15	0,423	305,15	0,352	303,15
0,453	308,15	0,497	304,15	0,448	302,15
0,543	307,15	0,590	303,15	0,530	301,15
0,600	306,15	0,707	302,15	0,629	300,15
0,688	305,15	0,823	301,15	0,702	299,15
0,776	304,15	0,943	300,15	0,823	298,15
0,888	303,15	1,107	299,15	0,982	297,15

0,973	302,15	1,293	298,15	1,155	296,15
1,119	301,15	1,460	297,15	1,318	295,15
1,233	300,15	1,710	296,15	1,507	294,15
1,385	299,15	1,980	295,15	2,013	293,15
1,525	298,15	2,460	294,15	2,275	292,15
1,729	297,15	2,667	293,15	2,655	291,15
1,990	296,15	3,033	292,15	3,000	291,15
2,221	295,15	-	-	-	-
2,552	294,15	-	-	-	-
2,833	293,15	-	-	-	-
3,217	292,15	-	-	-	-

Tabla 3. Valores experimentales de diferentes ensayos.

Mediante la ecuación (1) y utilizando los datos plasmados en las **Tabla 1. Tabla 2.** calculamos el rendimiento para cada día de ensayo:

$$\eta = 0,55 - 2,1(W/Km^2) \left(\frac{(304,11 - 292,15)K}{281,58 W/m^2} \right) = 0,46$$

De igual manera se realizan los cálculos y se obtienen los rendimientos para los demás días de ensayo. Tales valores se encuentran en la **Tabla 4.**

Rendimiento Ensayo 12/06/23	$\eta=0,46$
Rendimiento Ensayo 22/08/23	$\eta=0,49$
Rendimiento Ensayo 25/08/23	$\eta=0,50$

Tabla 4. Rendimientos del colector.

Producción del colector

La potencia útil extraída, se representa con la siguiente ecuación.

$$\dot{Q} = \dot{m} c_f \Delta T \tag{2}$$

Se presentan las unidades de los distintos parámetros, con su respectiva referencia.

Descripción	Unidades
Potencia útil extraída \dot{Q}	MJ/s
Caudal másico del fluido caloportador \dot{m}	Kg/s
Poder calorífico fluido caloportador c_f	J/KgK
Delta de temperaturas ΔT (Salida/ingreso colector)	K

Tabla 5. Unidades utilizadas calculo potencia útil extraída.

A continuación, se procede a calcular cada término de la **ecuación (2)**

El caudal másico del fluido caloportador, se representa con la siguiente ecuación.

$$\dot{m} = \frac{L \varphi}{s \varphi'} \tag{3}$$

En la siguiente tabla, se presentan las unidades de los distintos parámetros, con su respectiva referencia.

Descripción	Unidades
Litros de fluido caloportador “L”	L
Duración del ensayo “s”	s
Densidad del fluido caloportador a temperatura ambiente “ φ ”	Kg/m ³
Densidad del fluido caloportador a temperatura media “ φ' ”	Kg/m ³

Tabla 6. Unidades utilizadas cálculo caudal másico.

Se representan los datos obtenidos de los ensayos realizados hasta la fecha.

Fecha ensayo	12-06-23	22-08-23	25-08-23
Litros de fluido caloportador (L)	965	909	900
Duración del ensayo (s)	4200	5100	4260
Densidad del fluido caloportador a temperatura ambiente “ φ ” (Kg/m ³)	1000	1000	1000
Densidad del fluido caloportador a temperatura media “ φ' ” (Kg/m ³)	996	996	996,725

Tabla 7. Valores utilizados calculo caudal másico.

Mediante la ecuación (3) y utilizando los datos de la **Tabla 7.** se obtiene el caudal másico del fluido caloportador. Se desarrolla el cálculo para el primer ensayo.

$$m' = \frac{965 (L)}{4200 (s)} * \frac{1000 (Kg/m^3)}{996 (Kg/m^3)} = 0,22 (Kg/s)$$

De igual manera se desarrolla el cálculo para los ensayos subsiguientes.

El poder calorífico del fluido caloportador en este caso agua se toma un valor medio representativo del perfil de temperatura. El delta de temperaturas se obtiene respecto a la diferencia entre la temperatura máxima alcanzada por el colector menos la temperatura de ingreso **Tabla 3.**

En la siguiente tabla se representan los datos obtenidos de los ensayos realizados hasta la fecha.

Fecha ensayo	12-06-23	22-08-23	25-08-23
Caudal másico del fluido caloportador “ m' ” (Kg/s)	0,22	0,18	0,21
Poder calorífico fluido caloportador “Cf” (J/KgK)	4178	4179	4179
Delta de temperaturas “ ΔT ” (Salida/ingreso colector) (K)	23	19	17

Tabla 8. Valores utilizados calculo potencia útil extraída.

Mediante la ecuación (2) y utilizando los datos plasmados en la **Tabla 8.** calculamos la producción del colector para cada día de ensayo.

$$\dot{Q} = 0,22 \left(\frac{Kg}{s} \right) * 4178 \left(\frac{J}{KgK} \right) * 23(K) = 0,022 (MJ/s)$$

De igual manera se desarrolla el cálculo para los ensayos subsiguientes.

En la siguiente tabla se representan los datos obtenidos de los ensayos realizados hasta la fecha.

Fecha ensayo	12-06-23	22-08-23	25-08-23
Potencia útil extraída "Q" (MJ/s)	0,022	0,014	0,015

Tabla 9. Resultados cálculo de potencia extraída.

Para poder determinar la irradiancia solar diaria sobre el plano del colector se procede a determinar el incremento de temperatura, considerando también la potencia Q calculada anteriormente **Tabla 9**.

Determinación del incremento de temperatura.

$$\text{Incremento de temperatura} = T_d - T_{\text{main}} \quad (4)$$

En la siguiente tabla, se presentan las unidades de los distintos parámetros, con su respectiva referencia.

Descripción	Unidades
Temperatura del agua de extracción "Td"	°C
Temperatura suministro agua fría "Tmain"	°C

Tabla 10. Unidades utilizadas para cálculo de Incremento de temperatura.

Se representan los datos obtenidos de los ensayos realizados hasta la fecha.

Fecha Ensayo	12-06-23	22-08-23	25-08-23
Temperatura del agua de extracción "Td" (°C)	42	38	35
Temperatura suministro agua fría "Tmain" (°C)	19	19	18

Tabla 11. Valores utilizados para cálculo de incremento de temperatura.

Mediante la ecuación (4) y utilizando los datos de la **Tabla 11**, se obtiene el incremento de temperatura. A continuación, se desarrolla el cálculo para el primer ensayo.

$$\text{Incremento de temperatura} = 42^{\circ}\text{C} - 19^{\circ}\text{C} = 23^{\circ}\text{C}$$

De igual manera se realizan los cálculos para los ensayos subsiguientes.

Fecha ensayo	12-06-23	22-08-23	25-08-23
Incremento de temperatura	23	19	17

Tabla 12. Resultados cálculo de incremento de temperatura.

La irradiancia en el plano del colector (H) fue obtenida de una estación meteorológica aledaña a la UTN - Facultad Regional Santa Fe (FRSF). *PWS Weather "estación General Paz", (2023)*. Dichos datos fueron llevados a la unidad que la norma solicita y se muestran a continuación, "H", se obtiene, considerando las 12 horas del día solar junto con la irradiancia solar promedio "Ig" dada en la **Tabla 2**.

$$\text{Irradiancia en el plano del colector (MJ/m}^2\text{)} I = I_g * \Delta T \quad (5)$$

En la siguiente tabla, se presentan las unidades de los distintos parámetros, con su respectiva referencia.

Descripción	Unidades
Irradiancia solar "I _g "	(W/m ²)
Delta de tiempo en las doce horas solares "ΔT"	s

Tabla 13. Unidades utilizadas cálculo de irradiancia plano del colector.

Se representan los datos obtenidos de los ensayos realizados hasta la fecha.

Fecha Ensayo	12-06-23	22-08-23	25-08-23
Irradiancia solar "I _g " (W/m ²)	281,58	375,83	406,91
Delta de tiempo en las doce horas solares "ΔT" (s)	43200	43200	43200

Tabla 14. Valores para cálculo de irradiancia en el plano del colector.

Mediante la ecuación (5) y utilizando los datos de la **Tabla 14**, se obtiene la Irradiancia en el plano del colector. A continuación, se desarrolla el cálculo para el primer ensayo.

$$I = 281,58(W/m^2) * 43200(s) = 12164256 (J/m^2) \equiv 12,16 (MJ/m^2)$$

De igual manera se desarrolla el cálculo para los ensayos subsiguientes.

En la siguiente tabla se representan los datos obtenidos de los ensayos realizados hasta la fecha.

Fecha ensayo	12-06-23	22-08-23	25-08-23
Irradiancia en el plano del colector (MJ/m ²)	12,16	16,23	17,58

Tabla 15. Resultados cálculo de Irradiancia en el plano del colector.

Los gráficos siguientes se confeccionaron mediante los cálculos anteriores, y muestran el comportamiento del colector solar evaluado.

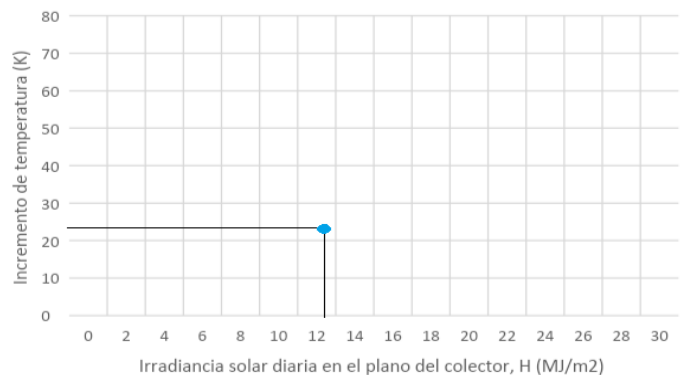
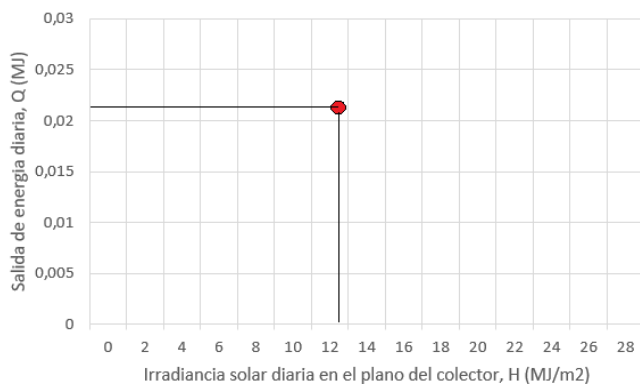


Figura 4. Diagrama de entrada en función de salida e incremento de la temperatura ensayo 12-06-23.

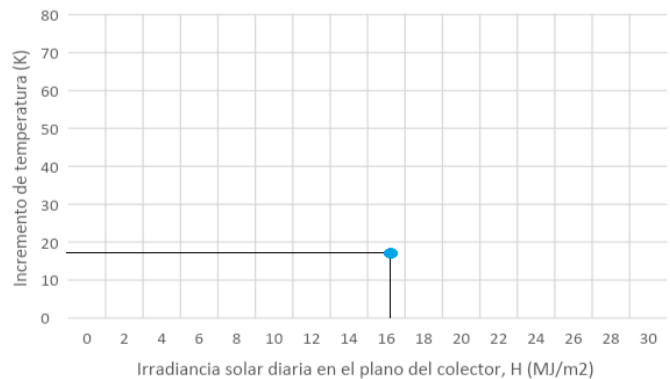
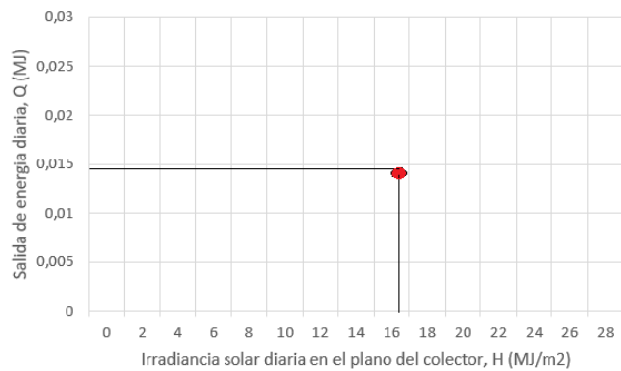


Figura 5. Diagrama de entrada en función de salida e incremento de la temperatura ensayo 22-08-23.

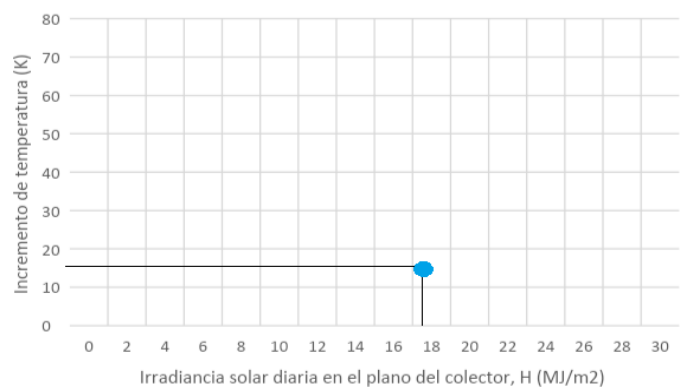
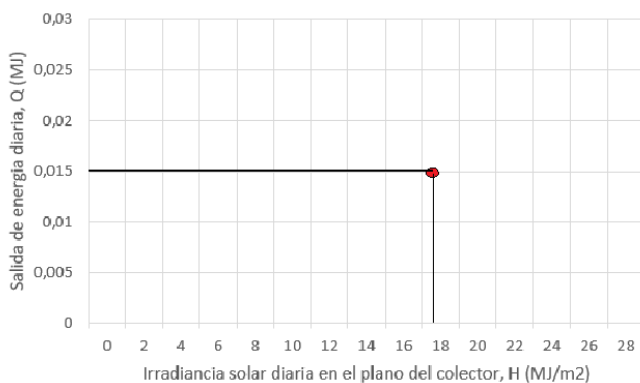


Figura 6. Diagrama de entrada en función de salida e incremento de la temperatura ensayo 25-08-23.

Conclusión

En el presente informe detallamos el rendimiento de un equipo solar térmico de tubos de vacío, donde para determinar el mismo fue necesario calcular ciertos parámetros. Para luego con los procedimientos de la norma *IRAM 210004, (2016)* llegar a obtener la eficiencia del equipo, el mismo depende de varios parámetros: inclinación, temperatura ambiente, radiación solar, velocidad del viento y caudal de circulación. En nuestro caso mediante la ecuación (1) y con los valores expuestos en **Tabla 1; Tabla 2 y Tabla 3**, logramos el cálculo de los rendimientos del colector **Tabla 4**. Determinando que el día 12-06 el rendimiento decrece en función de una menor irradiación solar. Esta impacta directamente en la ecuación (1) de manera tal que un aumento de esta produce un incremento de la performance del colector.

Ahora considerando la captación de radiación en el plano del colector se puede determinar la energía útil almacenada aplicando la ecuación (2), esta representa un parámetro importante dado que muestra la cantidad de energía térmica que se puede generar a partir de un cierto valor de radiación solar. Con los resultados obtenidos de los diferentes ensayos se observa que el día 12-06 la potencia extraída **Tabla 9** fue mayor. Este comportamiento no es lógico cotejando con los ensayos posteriores, ya que ese día fue el de menor irradiación solar, por lo tanto, la potencia útil debería ser menor al de las pruebas del 22-08 y 25-08. Consideramos que esta discrepancia se puede dar debido a que el depósito del colector solar mantuvo una inercia térmica.

Podemos concluir que el rendimiento de un equipo depende de varios factores, no obstante, en este proyecto seguiremos analizando y ensayando diferentes tipos de colectores solares para lograr determinar de forma más exacta el comportamiento de estos dispositivos ante la variación de los parámetros climáticos.

El fin de este proyecto es analizar las posibles mejoras que se pueden implementar a los dispositivos tanto técnicas como en su instalación para poder obtener de estos el mayor rendimiento y eficiencia posible.

Como jóvenes investigadores nos vemos involucrados en esta problemática, dado que la implementación de estos equipos para el uso doméstico representa en gran parte una reducción del uso de energías no renovables.

Agradecimientos

Agradecimiento al Grupo de Estudio Sobre Energía de UTN - FRSF por brindar un hogar de estudio y capacitación, y al equipo de trabajo por transmitir conocimientos y experiencias adquiridas. De manera especial agradecer al Ing. D´ Andrea Adrián y al Ing. Pacheco Gustavo, por el apoyo total en el desempeño diario de nuestras actividades.

Referencias bibliográficas

Quadri, N. (2016). Energía solar (6ª edición). Editorial Alsina.

Almanza S., Muñoz F. (2003). Ingeniería de la energía solar (2ª edición). México.

Hernández, J., Willson, H., Ten, A., Duharte, G., Rodriguez, J. (2007). Métodos de ensayos del comportamiento térmico del colector solar integral "COMPACSOL". Revista tecnología química, Vol. XXVII, No.

PWS Weather. (2023). Estación General Paz. Recuperado de [\[https://www.pwsweather.com/station/pws/ESTGRALPAZ?timespan=day&date=2023-08-22\]](https://www.pwsweather.com/station/pws/ESTGRALPAZ?timespan=day&date=2023-08-22).

IRAM 210004. (2016). Energía solar. Sistemas de calentamiento de agua sanitaria. Método de ensayo exterior para la caracterización y predicción del rendimiento anual de los sistemas solares. Parte 7.6 - 8.2 - 8.3.

IRAM 210002-1. (2016). Energía solar. Colectores solares térmicos. Parte 1 - Métodos de ensayo para determinar el rendimiento térmico de los colectores solares con cubierta para el calentamiento de líquidos.