

## APLICACIÓN DEL MÉTODO DE LA UTILIZABILIDAD EN COLECTORES SOLARES DE TUBOS EVACUADOS TIPO WATER-IN-GLASS PARA ESTIMAR SU RENDIMIENTO A LARGO PLAZO EN RÍO CUARTO

**María V. Milanesio<sup>1</sup>, Alba I. Lema<sup>1</sup>, Adrián F. Valetti<sup>2</sup>, Jorge R. Barral<sup>1</sup>, Pablo D. Galimberti<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Grupo de Energía Solar – Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de Río Cuarto

<sup>2</sup>Facultad de Ciencias Económicas – Universidad Nacional de Río Cuarto

Tel. 358-4676246 e-mail: [mmilanesio@ing.unrc.edu.ar](mailto:mmilanesio@ing.unrc.edu.ar)

**RESUMEN:** La predicción del rendimiento a largo plazo resulta fundamental para el diseño y la optimización de sistemas solares térmicos, en este contexto, el método de la utilizabilidad constituye una herramienta valiosa. El presente trabajo describe la aplicación del método de la utilizabilidad horaria y diaria a un colector solar de tubos evacuados sin almacenamiento térmico. Si bien el método requiere un nivel crítico de irradiancia constante, esta limitación se atenúa al emplearlo en sistemas de alta inercia térmica, como son los colectores tipo “water in glass”. Al integrar los parámetros de rendimiento del colector, con el método de la utilizabilidad y datos climáticos experimentales de Río Cuarto, se ofrece una estimación precisa del aporte energético a largo plazo. El trabajo describe la infraestructura utilizada, detalla la formulación matemática y presenta los resultados obtenidos; a partir del análisis de estos últimos, se ofrecen conclusiones sobre el desempeño a largo plazo del colector instalado en Río Cuarto. Las curvas de utilizabilidad obtenidas, constituyen una herramienta útil para comprender qué proporción de la energía solar incidente es realmente aprovechable en función de las condiciones de operación y el umbral de irradiancia requerido.

**Palabras clave:** utilizabilidad, evaluación energética, umbral crítico de irradiancia.

### INTRODUCCIÓN

La energía solar térmica se ha consolidado como una solución valiosa y sostenible frente a las crecientes necesidades energéticas globales, ofreciendo una alternativa limpia y renovable a las fuentes de energía convencionales (Njoku et al., 2020). En el ámbito de los sistemas térmicos solares, los colectores son componentes cruciales que captan la radiación solar y la convierten en calor útil para diversas aplicaciones, como el calentamiento de agua sanitaria, la climatización de piscinas y los sistemas de calefacción (Barral et al., 2017). La estimación precisa del desempeño de estos sistemas es imprescindible para su diseño eficiente y optimización (Karatasou et al., 2006).

Aunque los colectores de placa plana han sido históricamente los más utilizados, en los últimos años, los colectores de tubos evacuados han adquirido una presencia cada vez mayor en el mercado internacional y particularmente en Argentina (Barral et al., 2017). Su principal ventaja radica en sus bajas pérdidas de calor, tanto convectivas (debido al vacío entre la superficie absorbedora y el vidrio exterior), como radiativas (gracias al uso de una superficie selectiva) (Qiu et al., 2015). Aunque inicialmente eran costosos, las mejoras en los procesos de fabricación y las economías de escala los han hecho muy competitivos frente a los colectores de placa plana tradicionales (Barral et al., 2017).

La correcta estimación del rendimiento energético de estos sistemas es esencial para optimizar su diseño y operación. En este sentido, el método de la utilizabilidad (o curva  $\phi$ ) se ha consolidado como una herramienta ampliamente reconocida en el campo de la ingeniería solar (Klein y Beckman, 1984; Armenta-Deu y De Andrés, 1991) para evaluar el rendimiento a largo plazo de colectores solares planos.



Dicho método se basa en determinar la fracción de la irradiancia solar incidente sobre la superficie del colector que excede un valor crítico (Duffie y Beckman, 2013; Karatasou et al., 2006), este valor crítico representa la irradiancia mínima necesaria para superar las pérdidas energéticas del colector, siendo la irradiancia por encima de este nivel, la porción "utilizable". El concepto fue formulado inicialmente por Whillier y posteriormente generalizado por varios autores (Kalogirou, 2024).

Una de las principales ventajas del método de la utilizabilidad es su capacidad para separar las variables climáticas de los parámetros intrínsecos del colector (Karatasou et al., 2006), facilitando la predicción de su aporte energético a largo plazo. De este modo, el método de la utilizabilidad, resulta especialmente valioso para comparar configuraciones de diseño o analizar el impacto de distintas condiciones de operación sin necesidad de recurrir a modelos excesivamente complejos.

Sin embargo, la aplicación de este método a colectores de tubos evacuados, del tipo "water-in-glass", presenta dificultades derivadas de su elevada inercia térmica, que complica la obtención de parámetros en condiciones de equilibrio (Barral et al., 2017). Además, la variabilidad instantánea de la irradiancia, especialmente en días con nubosidad, puede conducir a que las curvas de utilizabilidad horaria o diaria subestimen el rendimiento real (Suehrcke y McCormick, 1989). El uso de datos experimentales locales se plantea entonces como un recurso indispensable para superar estas limitaciones y obtener predicciones más realistas.

En la localidad de Río Cuarto, Argentina (33,09° S, 64,25° O), se han desarrollado estudios previos que aplicaron el método de la utilizabilidad a colectores solares de aire de placa plana (Pontin et al., 2012). Sin embargo, no existen suficientes antecedentes referidos a colectores de tubos evacuados tipo water-in-glass, a pesar de su creciente relevancia en el mercado regional y global.

El objetivo principal de este trabajo es aplicar el método de la utilizabilidad, integrando parámetros de rendimiento de colectores water-in-glass con datos climáticos experimentales de Río Cuarto, para estimar su capacidad de suministro de energía útil a largo plazo. De este modo, se busca contribuir al diseño, optimización y expansión del uso de esta tecnología en sistemas solares térmicos activos de la región, ofreciendo una base sólida para futuras aplicaciones e investigaciones.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

En este trabajo se aplica el método de la utilizabilidad al colector de tubos evacuados que se muestra en la figura 1, es del tipo "water in glass" y está ubicado en el Laboratorio de Energía Solar de la Universidad Nacional de Río Cuarto.

### ***Descripción del colector de agua de tubos evacuados "water in glass"***

El colector objeto de estudio, está formado por 25 tubos que se inervan en la parte superior a un cabezal de sección cuadrada. Cada tubo de 58 mm de diámetro por 1,80 m de largo, llega a contener 2,8 litros de agua, con una masa de agua de aproximadamente 70 kg cuando está en funcionamiento y está pensado para funcionar en forma activa con la impulsión de una bomba.

No posee tanque de almacenamiento, el almacenamiento es posible diseñarlo de manera independiente y no es necesario que el tanque aislado se ubique por encima de los tubos.

El colector está montado sobre una estructura soporte que lo posiciona a 45° respecto de la horizontal, que es un ángulo adecuado para esta región del país. Para una descripción más detallada, se puede consultar Barral et al., 2017.

### ***Datos Meteorológicos utilizados***

Para los cálculos de la utilizabilidad y calor útil, se utilizan datos instantáneos de irradiancia sobre el plano del colector y temperatura ambiente. Estos datos climáticos, se midieron para Río Cuarto, desde el 01 de enero de 2019 hasta el 31 de diciembre de 2022.

Los registros de temperatura ambiente, se obtuvieron mediante una estación meteorológica marca Davis Vantage Pro II, que además de la temperatura ambiente, provee registros de humedad relativa, velocidad y dirección del viento y irradiancia solar global horizontal, entre otras variables.



Figura 1. Colector de tubos evacuados “water in glass”

Para la medición de irradiancia solar global en el plano del colector, se utilizó además un piranómetro EKO modelo SPB-801, con una sensibilidad de  $7 \text{ [mV/(kW/m}^2\text{)]}$ , resistencia interna de  $500 \Omega$ , dispuesto en forma coplanar con el plano de captación del colector solar. Este instrumento se vinculó a un registrador Agilent 34970A provisto de una placa con múltiples entradas que, al conectarse a una PC, permite monitorear los valores medidos en tiempo real y acceder a los datos almacenados.

Los datos de irradiancia solar global y temperatura ambiente, se registraron cada 10 minutos, generando una base de datos de 221820 datos por cada variable, estos datos se procesaron para obtener valores medios de irradiancia sobre plano inclinado y temperatura ambiente cada 1 hora.

#### **Formulación matemática de la utilizabilidad**

El concepto de utilizabilidad se deriva directamente de la ecuación de Hottel-Whillier-Bliss (ecuación 1), que relaciona la tasa de recolección de energía útil transferida al fluido,  $\dot{q}_u$ , con los parámetros de diseño del colector  $F_R(\tau\alpha)$  y  $F_R U_L$ , y las condiciones climáticas representadas por la irradiancia solar global sobre el plano inclinado,  $I_T$ , y la temperatura ambiente,  $T_a$ , (Klein y Beckman, 1984).

$$\dot{q}_u = A \left[ F_R(\tau\alpha) I_T - F_R U_L (T_e - T_a) \right]^+ \quad (1)$$

El superíndice + se usa para indicar que solo se consideran valores positivos de la cantidad entre corchetes (en la práctica, podría usarse un controlador para prevenir la circulación del fluido siempre que la irradiancia solar no sea suficiente para superar las pérdidas térmicas del colector), mientras que los parámetros del colector  $F_R(\tau\alpha)$  y  $F_R U_L$ , se tomaron de un trabajo anterior (Barral et al., 2007).

Las variables y símbolos que intervienen en todas las ecuaciones de aquí en adelante, cuando no se describan directamente en el texto, se detallan en la sección "Nomenclatura", ubicada al final del artículo. Se ha dispuesto de este modo, con el fin de evitar una extensión innecesaria de la publicación. La ecuación (1) puede reordenarse como:

$$\dot{q}_u = AF_R(\tau\alpha) \left[ I_T - \underbrace{\frac{F_R U_L}{F_R(\tau\alpha)}(T_e - T_a)}_{I_C} \right]^+ = AF_R(\tau\alpha) [I_T - I_C]^+ \quad (2)$$

donde  $I_C$  es el nivel crítico de irradiancia definido como:

$$I_C = \frac{F_R U_L}{F_R(\tau\alpha)}(T_e - T_a) \quad (3)$$

y representa el valor de irradiancia para el cual la potencia radiante absorbida y las pérdidas son iguales, luego la potencia útil es nula. Este nivel crítico de irradiancia se encuentra estableciendo  $\dot{q}_u = 0$  en la ecuación (1):

A partir de la ecuación (2) es posible calcular  $\bar{Q}_{u-i}$ , que es la recolección de energía promedio mensual a largo plazo para un período horario específico, por ejemplo, de 10:00 a 11:00 AM en marzo. Este cálculo se realiza aproximando  $I_T$  como la irradiancia solar promedio sobre superficie inclinada durante el intervalo de tiempo  $\Delta t = 1$  hora. En este caso,

$$\bar{Q}_{u-i} = AF_R(\tau\alpha) \frac{\sum^N [I_T - I_C]^+ \Delta t}{N} \quad (4)$$

donde  $N$  representa un gran número de observaciones de irradiancia, suficientes para representar las condiciones promedio a largo plazo. Por ejemplo, si  $\bar{Q}_{u-i}$  es la recolección de energía promedio mensual horaria entre las 10:00 y las 11:00 AM durante el mes de marzo, y si se disponen datos cada una hora, durante 4 años, el valor de  $N$  vendrá dado por:  $N=31 \times 4$ .

En una base horaria ( $\Delta t=1$  hora), la utilizabilidad horaria,  $\phi$ , es una estadística que depende del nivel crítico de irradiancia, la hora del día, la ubicación y la orientación de la superficie. Se define como la fracción de la irradiancia horaria a largo plazo, que está por encima del nivel crítico y se puede expresar como:

$$\phi = \frac{\sum^N (I_T - I_C)^+ \Delta t}{\sum^N I_T \Delta t} = \frac{\sum^N (I_T - I_C)^+}{N \bar{I}_T} \quad (5)$$

donde  $\bar{I}_T$  es el promedio en una hora a largo plazo de la irradiancia solar global  $I_T$  y viene dada por:

$$\bar{I}_T = \frac{\sum^N I_T \Delta t}{\sum^N \Delta t} = \frac{1}{N} \sum^N I_T \quad (6)$$

La metodología del cálculo de la utilizabilidad, presupone un régimen de operación de estado estacionario del colector, y si bien el régimen de trabajo real de un colector no es de estado estacionario debido a la fluctuación de la irradiancia solar y de la temperatura ambiente, se considera que no existen cambios bruscos en el período de una hora y se opera con valores promedio horarios mensuales de temperatura ambiente y irradiancia solar incidente sobre el plano del colector.

En términos de  $\phi$ , la ecuación (4) se convierte en:

$$\bar{Q}_{u-i} = AF_R (\tau\alpha) \bar{I}_T \phi \Delta t \quad (7)$$

Cuando se quiere considerar el nivel crítico de irradiancia como un valor constante para todas las horas del día, resulta conveniente el uso de la utilizabilidad diaria. La utilizabilidad diaria,  $\bar{\phi}$ , puede definirse como la fracción promedio mensual de la irradiancia solar por encima del nivel crítico durante el período entre el amanecer y el atardecer, o puede evaluarse utilizando la utilizabilidad horaria como un promedio ponderado por la irradiancia promedio horario de todas las horas de luz del día.

$$\bar{\phi} = \frac{\sum_{\text{horas de sol}} \bar{I}_T \phi}{\sum_{\text{horas de sol}} \bar{I}_T} \quad (8)$$

o podría evaluarse numéricamente a partir de la ecuación (8).

$$\bar{\phi} = \frac{\sum_{\text{horas de sol}} \sum_N (I_T - I_C)^+ \Delta t}{\sum_{\text{horas de sol}} \sum_N I_T} = \frac{\sum_{\text{horas de sol}} \sum_N (I_T - I_C)^+ \Delta t}{\bar{H}_T N} \quad (9)$$

donde  $\bar{H}_T$  es la irradiación total diaria promedio mensual sobre una superficie inclinada.

### Curvas de utilizabilidad horaria

Las curvas de utilizabilidad horaria ( $\phi$  vs  $X_C$ ), son representaciones gráficas que permiten predecir el rendimiento a largo plazo del sistema solar en estudio. En ordenadas se representa la utilizabilidad ( $\phi$ ), mientras que, en abscisas, se representa una relación de intensidad crítica adimensional que se define como el cociente entre la irradiancia crítica sobre plano inclinado y la irradiancia promedio horario a largo plazo, y se expresa como:

$$X_C = \frac{I_C}{\bar{I}_T} \quad (10)$$

Para calcular el nivel crítico de irradiancia horaria,  $I_C$ , se utilizó la ecuación 3, la cual requiere los parámetros de diseño del colector,  $F_R U_L$  y  $F_R (\tau\alpha)$ , la temperatura de entrada del fluido,  $T_e$ , y la temperatura ambiente promedio para esa hora,  $T_a$ . Por ejemplo, la  $T_a$ , para la hora comprendida entre las 10:00 y 11:00 AM del mes de marzo, se obtiene promediando los valores de temperatura ambiente para esa hora durante todo el mes de marzo y durante los 4 años que integran la base de datos. Por otro lado, a los fines de disponer de suficientes puntos para graficar las curvas de utilizabilidad, se computaron valores de  $T_e$ , en un rango que va desde los 15°C hasta los 95°C, variando cada 1°C, de este modo se obtienen para cada curva de utilizabilidad horaria, un total de 80 puntos (la  $T_a$  es la temperatura ambiente promedio para esa hora y permanece constante en esa hora).

Es necesario destacar que si la temperatura de entrada del fluido,  $T_e$ , es menor que la temperatura ambiente promedio horario,  $T_a$ , el  $X_C$  es menor que cero, y si bien estos resultados pueden interpretarse físicamente como que el colector está transfiriendo calor al medio ambiente, generando una utilizabilidad mayor a 1, en el presente estudio, estos resultados, se descartaron.

El procesamiento del gran caudal de datos, se realizó mediante un programa de cálculo elaborado en Excel, que permitía acceder a la resolución gráfica de las curvas de utilizabilidad para los diferentes

intervalos de una hora en cada mes, obteniéndose de este modo una curva de utilizabilidad horaria media mensual,  $\phi$  vs.  $X_C$ , para cada hora en un mes determinado.

En resumen, la obtención de las curvas de utilizabilidad horaria requiere de la determinación experimental de los parámetros característicos del colector, el cálculo de un nivel de irradiancia crítico basado en las condiciones de operación ( $T_e$ ), y la agregación de datos de irradiancia promedio horarios para determinar la fracción de potencia utilizable por encima de ese umbral. El resultado se grafica como una curva que permite una evaluación rápida del desempeño del colector.

### **Tasa de calor útil**

Para una hora y mes determinado, por ejemplo, de 10 a 11 AM en marzo, la tasa de energía útil promedio a largo plazo ( $\dot{q}_{u-i}$ ) puede expresarse como:

$$\dot{q}_{u-i} = A_c F_R (\tau\alpha) \bar{I}_T \phi \quad (11)$$

Para obtener la tasa de calor útil ( $\dot{q}_u$ ) durante un período extendido (por ejemplo, un mes) a partir de la utilizabilidad horaria, se suman las contribuciones horarias para todas las horas entre el amanecer y el atardecer, y se multiplica por el número de días ( $n$ ) en el mes:

$$\dot{q}_u = n \sum_{\substack{\text{horas} \\ \text{desol}}} q_{u-i} \quad (12)$$

### **Parámetros del Colector. Test de Eficiencia Térmica.**

Los parámetros del colector motivo de este estudio,  $F_R U_L$  y  $F_R (\tau\alpha)$ , son características físicas primarias del colector y se tomaron de un trabajo anterior (Barral et al., 2017), en el cual se describe el ensayo realizado al colector de tubos evacuados, siguiendo las normas ANSI/ASHRAE STANDARD 93-2003.

El ensayo realizado permitió computar la eficiencia instantánea del colector,  $\eta$ , a partir de la ecuación 13, donde todos los términos que allí figuran son datos conocidos o se midieron durante el ensayo.

$$\eta = \dot{m} c_p \frac{(T_s - T_e)}{A_c I_T} \quad (13)$$

El numerador representa la potencia de calentamiento que recibe el agua al circular por el colector,  $\dot{q}_u$ , mientras que el denominador computa la potencia radiativa recibida en el plano del colector. Si bien el término  $\eta$ , indica rendimiento térmico instantáneo, para la determinación del mismo, el colector debe estar operando en estado estacionario, con el flujo másico recomendado por el fabricante, o el que establezca la norma en su defecto

Si en la ecuación (13), reemplazamos el numerador,  $\dot{q}_u$ , por lo indicado en la ecuación (1), obtenemos la ecuación (14), la cual presenta una relación lineal entre el rendimiento térmico del colector y una variable en abscisas dada por una diferencia de temperatura entre la temperatura de entrada del fluido y la temperatura ambiente, dividida por la irradiancia global incidente en el plano del colector. Por lo tanto, de acuerdo a la ecuación 13, el valor de  $F_R (\tau\alpha)$  será la ordenada al origen, mientras que  $F_R U_L$  vendrá dada por el valor de la pendiente.

$$\eta = F_R (\tau\alpha) - F_R U_L \frac{(T_e - T_a)}{I_T} \quad (14)$$

A continuación, se resume el proceso de realización del test, que permitió determinar los parámetros del colector. La descripción exhaustiva del ensayo, puede consultarse el artículo Barral et al., 2017.

El ensayo para determinar el rendimiento del colector solar de tubos evacuados, requirió un pre-acondicionamiento del sistema antes de cada medición, ya que alcanzar el estado estacionario que requiere el test, en este tipo de colectores, es un proceso lento como consecuencia de la alta inercia térmica. La mejor estrategia encontrada para alcanzar el estado estacionario, consistió en estabilizar previamente el manifold, esto implicaba hacer circular agua por el colector y mantenerlo cubierto por una media sombra hasta que las temperaturas de entrada y salida se estabilizaran con una diferencia de 1 °C. Simultáneamente, de acuerdo al punto del ensayo a determinar, se calentaba agua en un tanque de 400 litros hasta la temperatura de entrada deseada. Una vez estabilizado el colector, se retira la media sombra, y comienza a circular por el colector, el agua proveniente del tanque, en estas condiciones el agua, comienza a calentarse por efecto de la radiación solar.

Cada medición se realizó repitiendo el proceso de estabilización y verificando que las temperaturas de entrada y salida del agua, así como en el cabezal, permanezcan constantes durante unos minutos antes de registrar los datos. Con el sistema en régimen estable, se realiza la medición de la irradiancia solar global, mediante un piranómetro EKO y se registra la temperatura en la entrada y salida del manifold.

La eficiencia se calcula con la ecuación 13, donde todos los términos que allí figuran son datos conocidos o se miden durante el ensayo y luego se grafican los puntos mostrados en la figura 2, por último, mediante técnicas de regresión lineal, se obtiene la recta ajustada de la eficiencia térmica del colector de acuerdo al modelo de Hottel-Whillier-Bliss (ecuación 14) y de ésta última, el valor de los parámetros, siendo  $F_R U_L = 4,99$  (°C m<sup>2</sup>/W) y  $F_R (\tau\alpha) = 0,576$ .

Las pruebas se realizaron a razón de un punto por día al mediodía solar, de modo de poder asegurar irradiancia estable y controlando la constancia, tanto de la temperatura ambiente como la temperatura de entrada del agua.

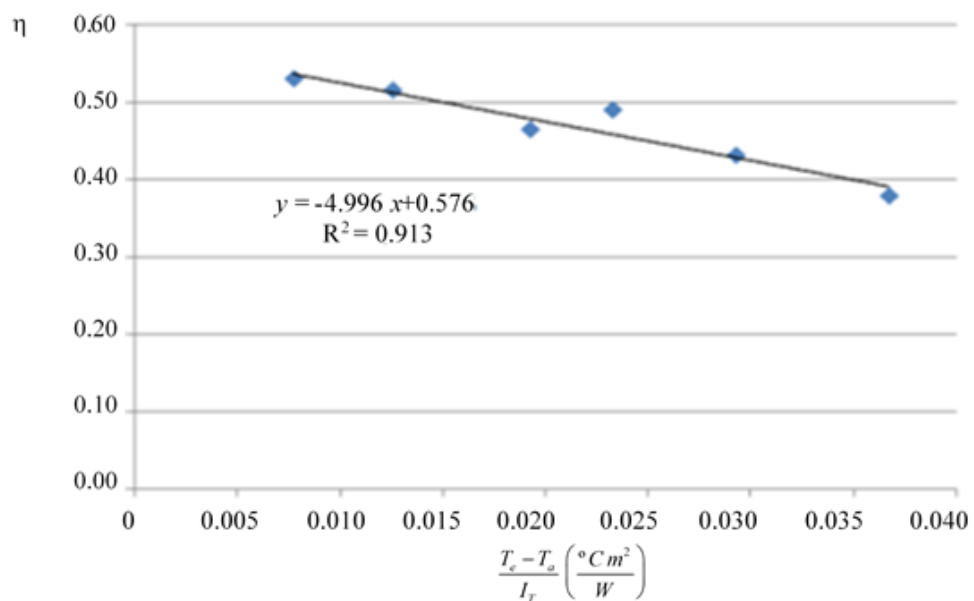


Figura 2. Curva de rendimiento térmico del colector “water in glass”, pensado como colector de placa plana en funcionamiento de estado estacionario tomada de Barral et al., 2007

## RESULTADOS OBTENIDOS

A partir de las ecuaciones (5) y (8) se calculó la utilizabilidad horaria y diaria y se las representó gráficamente vs.  $X_C$ , calculada a partir de la ecuación (10).

Las figuras 3 y 4, muestran los resultados obtenidos para los meses de enero y julio respectivamente, y la curva límite para días idénticos, que modela un escenario teórico donde no existe variación en la irradiancia solar incidente y la utilizabilidad cae bruscamente a cero cuando el  $X_C=1$ .

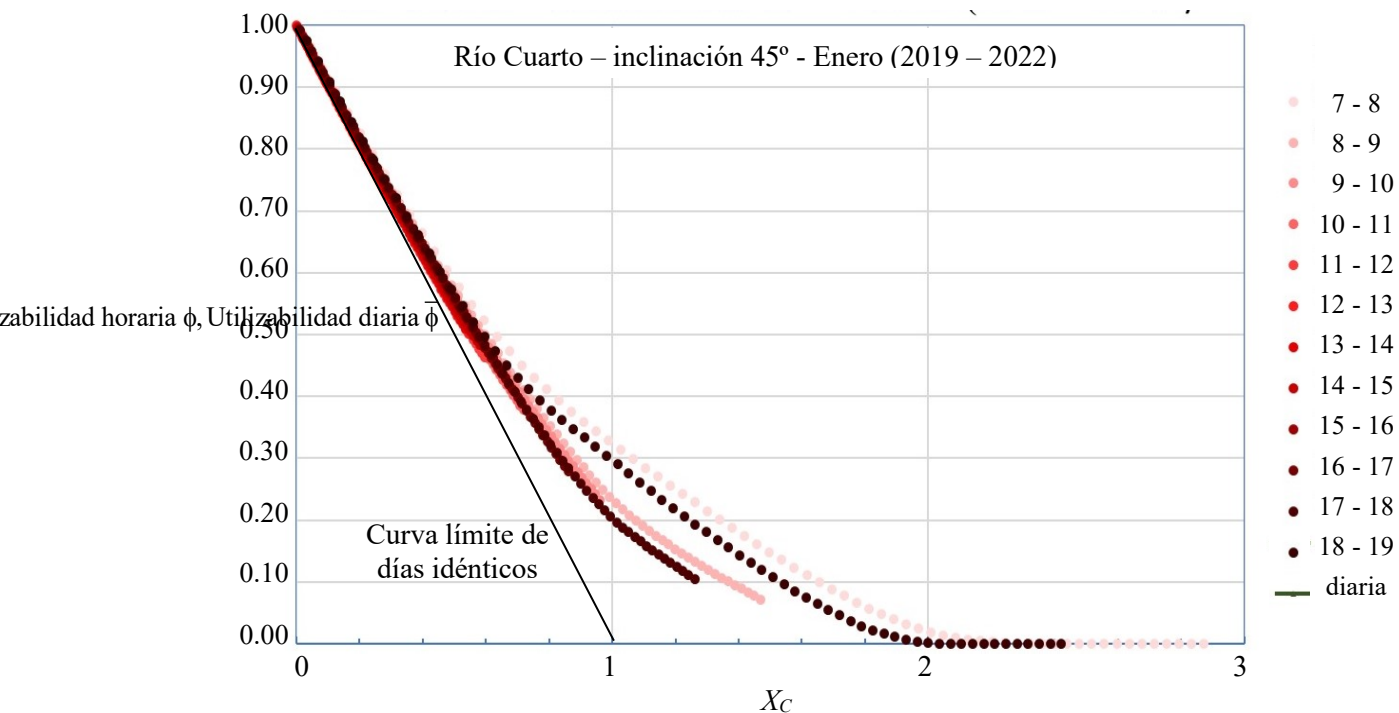


Figura 3. Curva de utilizabilidad horaria y diaria para el mes de enero

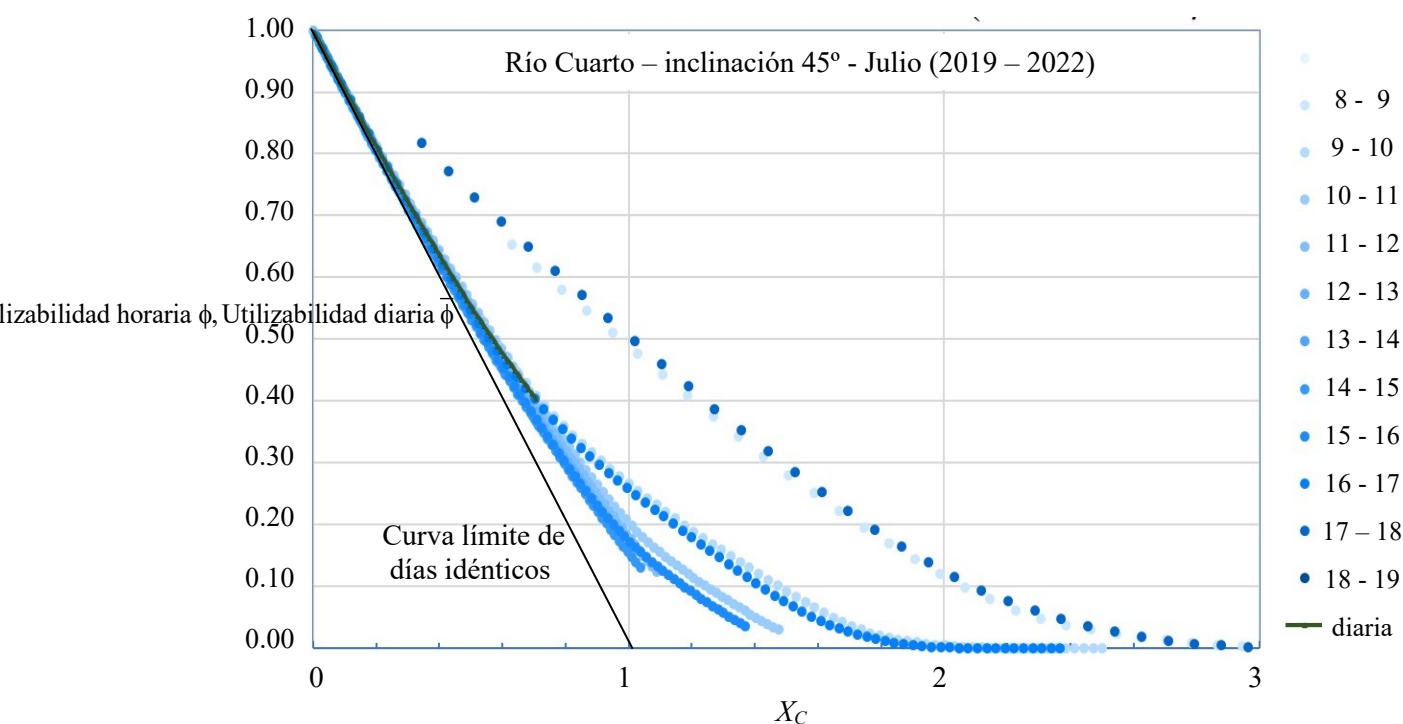


Figura 4. Curva de utilizabilidad horaria y diaria para el mes de julio

Se graficaron para los meses de enero (figura 3) y julio (figura 4), la utilizabilidad diaria y horaria, desde las 7:00 h hasta las 19:00 h para el mes de enero, mientras que, para el mes de julio debido al menor número de horas de sol, se presentan los resultados desde las 9:00 hasta las 19:00 h.

Las figuras 5 y 6, presentan la utilizabilidad horaria para dos períodos horarios diferentes y para todos los meses del año.

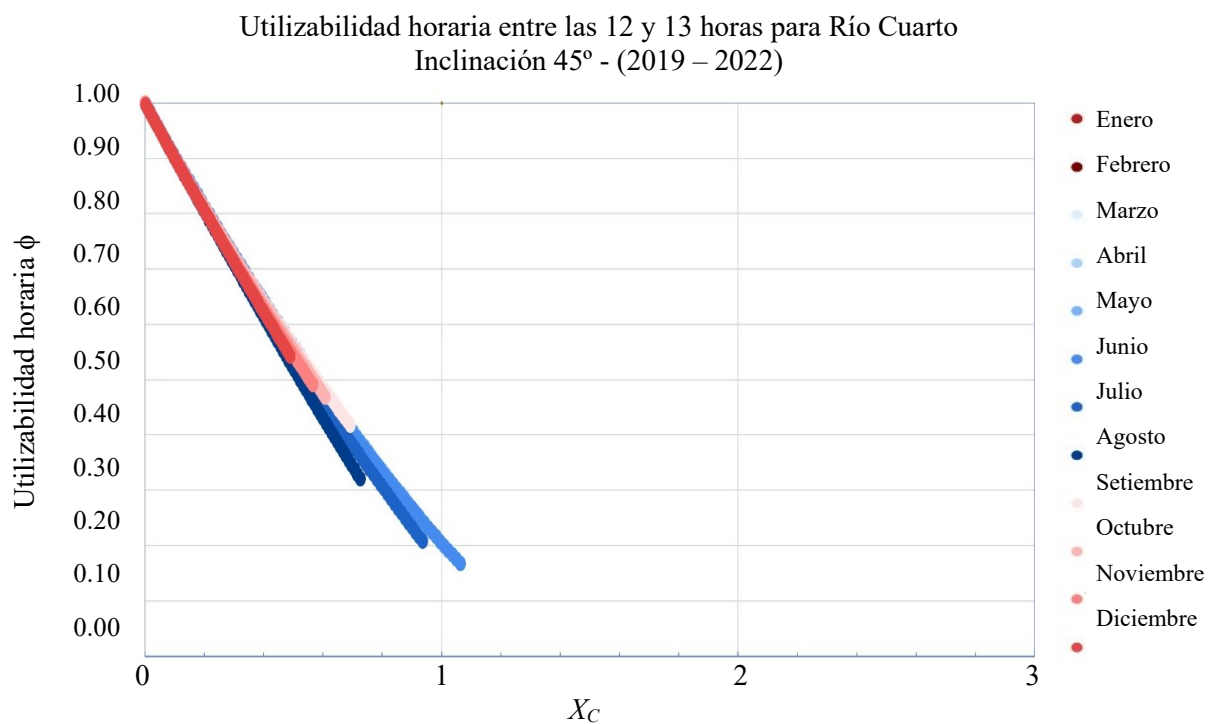


Figura 5. Curva de utilizabilidad horaria (12:00 h – 13:00 h) para todos los meses del año

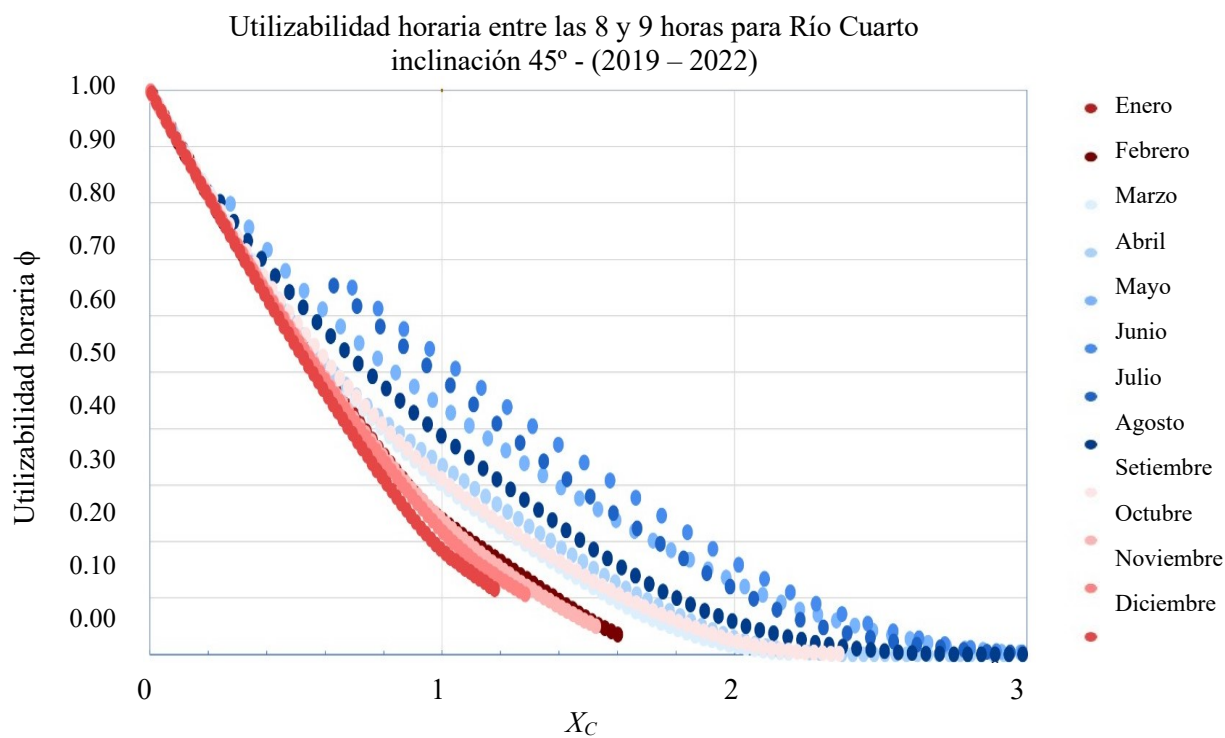


Figura 6. Curva de utilizabilidad horaria (12:00 h – 13:00 h) para todos los meses del año

## DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos y de la discusión de los mismos, es posible concluir que la metodología de la utilizabilidad es una herramienta que puede aplicarse a los colectores solares de tubos evacuados del tipo “water in glass” para predecir el comportamiento de los mismos a largo plazo.

La diferencia entre las curvas límite para días idénticos y las curvas de utilizabilidad mostradas en las figuras 3 y 4, permiten advertir que, para la ciudad de Río Cuarto, no es adecuado suponer una intensidad de irradiancia constante a largo plazo, ya que las curvas de utilizabilidad para valores de  $X_C$  mayores a aproximadamente 0.5, se alejan considerablemente de la curva límite para días idénticos.

Las curvas de utilizabilidad horaria obtenidas para un mes determinado (figuras 3 y 4) son muy similares a las curvas generadas a partir de datos diarios, especialmente en un rango de  $\pm 2.5$  horas del mediodía solar, tal como lo sugieren Karatasou et al. (2006).

De las curvas de utilizabilidad mostradas en las figuras 3 y 4, y de acuerdo a las ecuaciones (11) y (12), se evidencia que la tasa de calor útil o potencia neta del colector, disminuye a medida que aumenta  $X_C$ . Esto puede explicarse debido a que el desempeño del colector, para una temperatura ambiente fija, decae con el aumento de la temperatura de entrada del agua, debido a que aumentan las pérdidas con el medio. Otro modo de analizar este comportamiento, es que al aumentar la temperatura de entrada y permanecer fija la temperatura ambiente, aumenta la irradiancia crítica,  $I_C$  (ecuación 3), y se requiere un nivel de irradiancia más alto para que el colector sea útil, entonces, una menor fracción de la irradiancia total disponible estará por encima de ese umbral crítico.

De acuerdo a las figuras 5 y 6, es posible afirmar que la distribución de las curvas de utilizabilidad depende de la época del año. Para épocas del año más frías, las curvas de utilizabilidad se extienden hacia la derecha. Esto se debe a dos razones, por un lado, durante las épocas más frías del año, disminuye la irradiancia global horaria promedio mensual y por el otro, debido a la dependencia del umbral crítico de irradiancia con la temperatura ambiente que, para una misma temperatura de entrada, la diferencia ( $T_e - T_a$ ) aumenta en épocas más frías, como consecuencia de las temperaturas ambientes más bajas.

La forma de las curvas obtenidas en todas las figuras, permite concluir que el método de la utilizabilidad se aplica a procesos no lineales caracterizados por una entrada fluctuante y un umbral por encima del cual existe una relación lineal de entrada a salida.

Por otro lado, si bien utilizabilidad es una herramienta que ha evolucionado en los últimos años (Njoku et al., 2020), aplicándose a numerosos sistemas solares y validándose en diversas regiones, el método tiene la limitación de requerir un nivel de irradiancia crítica constante, lo que equivale a suponer, que la diferencia ( $T_e - T_a$ ) permanece constante.

Otra limitación, es que la utilizabilidad solo proporciona la tasa de calor útil, pero no la calidad. Esto significa que no puede modelar fenómenos como la estratificación de tanques de almacenamiento, que requieren el conocimiento de la temperatura fluctuante de salida del colector. Por ello, el método de utilizabilidad se utiliza a menudo solo para calcular un límite superior o inferior en el rendimiento del sistema, para el cual es apropiado un nivel crítico constante. Sin embargo, sigue siendo una herramienta valiosa para el diseño y la optimización de sistemas solares térmicos.

## NOMENCLATURA

$A_c$	área efectiva del colector ( $m^2$ )
$c_p$	calor específico del agua ( $Joule\ kg^{-1}/^{\circ}C$ )
$F_R$	factor de remoción de calor del colector (adimensional)
$F_R(\tau\alpha)$	ordenada al origen de la recta de eficiencia instantánea (adimensional)
$F_R U_L$	pendiente de la recta de eficiencia instantánea ( $W/m^2\ ^{\circ}C$ )
$\bar{H}$	irradiación total diaria promedio mensual sobre superficie inclinada ( $W\ h/m^2$ )

$I_T$	Irradiancia solar o potencia instantánea del flujo de radiación solar que incide sobre una superficie inclinada por unidad de área (W/m <sup>2</sup> )
$\bar{I}_T$	Irradiancia global horaria media mensual sobre superficie inclinada (W/m <sup>2</sup> )
$I_c$	Irradiancia solar crítica (W/m <sup>2</sup> )
$\dot{m}$	caudal másico que circula por el colector (kg/s)
$n$	cantidad de días en un mes
$N$	número de observaciones o datos
$\dot{q}_u$	tasa de recolección de energía útil (W)
$\dot{q}_{u-i}$	tasa de energía útil promedio a largo plazo para una hora y mes determinado (W)
$\bar{Q}_i$	recolección de energía promedio a largo plazo para una hora específica (W h)
$\bar{Q}_{u-i}$	recolección de energía promedio mensual a largo plazo para un período horario específico (W h)
$T_e$	temperatura de entrada del fluido (°C)
$T_s$	temperatura de salida del fluido (°C)
$T_a$	temperatura ambiente (°C)
$U_L$	coeficiente global de pérdidas térmicas del colector (W/ °C m <sup>2</sup> )
$X_C$	relación de intensidad crítica (adimensional)
$\Delta t$	intervalo de tiempo de 1 hora
$\phi$	utilizabilidad horaria (adimensional)
$\bar{\phi}$	utilizabilidad diaria (adimensional)
$(\tau\alpha)$	producto transmitancia-absortancia (adimensional)
$\eta$	eficiencia instantánea del colector (adimensional)

## REFERENCIAS

- Armenta-Deu, C., De Andrés, M. C. (1991). Correlation of a New Utilizability Function to Experimental Data for Southwestern Europe. *Renewable Energy*, 1(5/6), 571-582.
- Barral, G. R., Lucchini, J. M., & Garnica, J. H. (2017). Cálculo de sistemas de calentamiento de agua activos que utilizan colectores de tubos evacuados del tipo water-in-glass. *ASADES Acta de la XL Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente*, 5, 03.69-03.80.
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes* (Fourth Edition). John Wiley and Sons, Inc.
- Kalogirou, S. A. (2024). Chapter 11 - Designing and Modeling Solar Energy Systems. En *Solar Energy Engineering* (pp. 601-712). Elsevier Inc.
- Karatasou, S., Santamouris, M., Geros, V. (2006). On the calculation of solar utilizability for south oriented flat plate collectors tilted to an angle equal to the local latitude. *Solar Energy*, 80(12), 1600-1610.
- Klein, S. A., Beckman, W. A. (1984). Review of Solar Radiation Utilizability. *ASME Journal of Solar Energy Engineering*, 106(4), 393-402.
- Liu, B. Y. H. y Jordan, R. C. (1963). A Rational Procedure for Predicting The Long-Term Average Performance of Flat-Plate Solar-Energy Collectors. *Solar Energy* 7
- Njoku, M. C., Nwaji, G. N., Ofong, I., Ogueke, N. V., Anyanwu, E. E. (2020). Evaluation of Flat-Plate Solar Thermal Collector Daily Utilizability for Some Nigerian Cities. *Journal of Engineering Research and Application*, 10(2), 12-21.
- Pontin, M., Lema, A., Morseto, J., & Ruestch, L. (2012). Funcionamiento Eficiente de un Colector Solar Plano con el Método de la utilizabilidad. *CADI 2012*.
- Qiu, S., Ruth, M., Ghosh, S. (2015). Evacuated tube collectors: A notable driver behind the solar water heater industry in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 580-588.
- Suehrcke, H; McCormick P. G. (1989). Solar radiation utilizability. *Solar Energy*. Volume 43, Issue 6, Pages 339-345

**APPLICATION OF THE UTILIZABILITY METHOD FOR THE ENERGY EVALUATION  
OF “WATER-IN-GLASS” TYPE EVACUATED TUBE SOLAR COLLECTORS: AN  
EXPERIMENTAL METHODOLOGICAL APPROACH BASED ON CLIMATIC DATA  
FROM RÍO CUARTO**

**ABSTRACT** The prediction of long-term performance is a fundamental aspect in the design and optimization of solar thermal systems. Within this framework, the utilizability method serves as a valuable analytical tool. The present study reports the application of both the hourly and daily utilizability approaches to an evacuated tube solar collector without thermal storage. Although the method requires a constant critical radiation level, this constraint is alleviated when implemented in systems exhibiting high thermal inertia, such as water-in-glass collectors. By integrating the collector's performance parameters with the utilizability method and experimental climatic data from Río Cuarto, this work provides an accurate estimation of the long-term energy contribution. The study presents a detailed description of the experimental infrastructure, the mathematical formulation, and the analysis of the results, from which conclusions are drawn regarding the long-term performance of the collector in the specific location of Río Cuarto. The resulting utilizability curves constitute a practical tool for assessing the fraction of incident solar energy that can be effectively harnessed, depending on the operating conditions and the required radiation threshold.

**Keywords:** utilizability, energy evaluation, critical radiation threshold.