



### III CONFERENCIA INTERNACIONAL EN DESARROLLO ENERGÉTICO SOSTENIBLE

#### Diseño de un colector térmico tipo sin imagen para aplicaciones industriales en el contexto cubano.

#### *Design of a non-image type thermal collector for industrial applications in the Cuban context.*

Ariam Rojas Acosta.

1-Ariam Rojas Acosta. UCLV, Cuba. [ariamr@uclv.cu](mailto:ariamr@uclv.cu):

#### Resumen:

**Problemática:** En Cuba, la industria consume el 34% de la energía del país dependiendo principalmente de combustibles fósiles, provocando altas emisiones de gases contaminantes (MUNDIAL, B. Cuba,2023). Para reducir esta dependencia y mitigar el impacto ambiental, es clave promover las energías renovables en la industria. Cuba posee una alta radiación solar por su ubicación geográfica, lo que favorece el uso de tecnologías que aprovechen esta energía. Sin embargo, los colectores solares convencionales pierden la radiación difusa, que puede alcanzar el 52% de la radiación solar total en la isla (Energía solar en Cuba, 2020). Por tanto, se necesitan colectores solares que capten esta energía, sean económicos, aportando a la sostenibilidad en la industria cubana.

- **Objetivo:** Desarrollar un diseño de colector solar capaz de maximizar la captura de energía solar difusa, con un costo razonable para su implementación.
- **Metodología:** Se aplicaron y adaptaron elementos disponibles en el mercado para su diseño, se analizó el impacto en su eficiencia para el caso de estudio, se evaluó la implementación del mismo desde el punto de vista técnico, ambiental y económico.
- **Resultados y discusión:** El colector diseñado logró una eficiencia global del 40%. Ahorrando un 30% de fueloil en el proceso, evitando la emisión de 91 toneladas de CO<sub>2</sub> al año. El proyecto resultó económicamente viable, con un VPN de \$66455, una TIR del 25% y un período de recuperación de 5 años y un mes.
- **Conclusiones:** Se diseñó un colector que capta más energía difusa, es económico y sostenible para la industria cubana.



**Abstract:**

**Problem:** *In Cuba, the industry consumes 34% of the country's energy, depending mainly on fossil fuels, causing high emissions of polluting gases (WORLD BANK, B. Cuba, 2023). To reduce this dependence and mitigate the environmental impact, it is key to promote renewable energies in the industry. Cuba has a high solar radiation due to its geographical location, which favors the use of technologies that take advantage of this energy. However, conventional solar collectors lose diffuse radiation, which can reach 52% of the total solar radiation on the island (Solar energy in Cuba, 2020). Therefore, solar collectors are needed that capture this energy, are economical, contributing to sustainability in the Cuban industry.*

•**Objective:** *To develop a design of a solar collector capable of maximizing the capture of diffuse solar energy, with a reasonable cost for its implementation.*

•**Methodology:** *Elements available on the market were applied and adapted for its design, the impact on its efficiency for the case study was analyzed, and its implementation was evaluated from a technical, environmental and economic point of view.*

•**Results and discussion:** *The designed collector achieved an overall efficiency of 40%. Saving 30% of fuel oil in the process, avoiding the emission of 91 tons of CO<sub>2</sub> per year. The project was economically viable, with a NPV of \$66455, an IRR of 25% and a payback period of 5 years and one month.*

•**Conclusions:** *A collector was designed that captures more diffuse energy, is economical and sustainable for the Cuban industry.*

**Palabras Clave:** *Colector sin imágenes; Aplicaciones industriales; Tecnologías térmicas solares.*

**Keywords:** *Nonimaging collector; Industrial applications; Solar thermal technologies.*



## **1. Introducción**

La industria es responsable del 37% del consumo global de energía y del 24% de las emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con la energía (AIE., 2021). En Cuba, los combustibles fósiles representaron el 97,4% del consumo total de energía primaria en 2019 (Cuba, 2019). Ante esta situación, es imprescindible desarrollar tecnologías que permitan reducir la dependencia de los combustibles fósiles y mitigar el impacto ambiental de la actividad industrial.

### **1.1 Planteamiento del problema:**

En Cuba, el sector industrial es responsable del 34% del consumo total de energía primaria en el país, dependiendo en gran medida de los combustibles fósiles para satisfacer sus necesidades energéticas (MUNDIAL, B. Cuba, 2023). Esta dependencia provoca una alta emisión de gases de efecto invernadero y un impacto negativo en el medio ambiente. La promoción de tecnologías de energía renovable en la industria es crucial para reducir esta dependencia y mitigar el impacto ambiental. Sin embargo, los diseños convencionales de colectores solares tienen limitaciones en cuanto a su capacidad para aprovechar la radiación solar difusa, lo que representa una fuente importante de energía solar desaprovechada. Según un estudio realizado en Cuba, la radiación difusa puede representar hasta el 52% de la radiación solar total recibida en un día (Energía solar en Cuba, 2020). Esto es especialmente relevante para Cuba, ya que es una isla con alto componente de radiación difusa. Además, los diseños convencionales de colectores solares con imagen requieren de un seguimiento preciso del sol, lo cual puede generar costos adicionales y dificultades operativas. Por lo tanto, existe la necesidad de desarrollar diseños de colectores solares sin imagen capaces de maximizar la captura de energía solar difusa y directa, adaptándose al espectro solar y los errores de seguimiento, y con un costo razonable para su implementación en la industria cubana.

### **1.2 Justificación:**

La investigación propuesta busca desarrollar un diseño de colector solar sin imagen que sea capaz de maximizar la captura de energía solar difusa, adaptándose al espectro solar y los errores de seguimiento, y con un costo razonable para su implementación en la industria cubana. Esto permitiría aumentar la eficiencia en la generación de energía solar y reducir la dependencia de los combustibles fósiles, lo que contribuiría a la



protección del medio ambiente y la mitigación del cambio climático. Además, el diseño propuesto no requeriría de un seguimiento preciso del sol, lo que permitiría una operación más sencilla y menos costosa.

### 1.3 Objetivos de la investigación:

Objetivo general: Desarrollar un diseño de colector solar capaz de maximizar la captura de energía solar difusa, con un costo razonable para su implementación en la industria cubana.

Objetivos específicos:

1. Realizar una exhaustiva revisión bibliográfica acerca de los distintos tipos de colectores solares y sus aplicaciones.
2. Analizar el impacto, en la eficiencia del colector diseñado para el caso de estudio.
3. Evaluar la implementación del colector diseñado para el caso de estudio en las siguientes variables:
  - Prefactibilidad
  - Ambiental.
4. Comparar los resultados obtenidos con los valores teóricos estimados por otros autores para colectores solares compuestos parabólicos.

## 2. Metodología

El tipo de investigación que se realizó fue experimental, con el fin de diseñar un colector solar sin imagen capaz de maximizar la captura de energía solar difusa, con un costo razonable para su implementación en la industria cubana.

Se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica acerca de los distintos tipos de colectores solares y sus aplicaciones.

Las variables que se consideraron en el experimento fueron:

- **Variable independiente:** la radiación solar incidente sobre el colector ( $W/m^2$ ), extraída de la base de dato de Global Solar Atlas.

- **Variable dependiente:** el calor útil extraído por el fluido ( $W$ ), calculado con la ecuación 1 a partir de la estimación del coeficiente total de pérdida de calor del colector ( $U_L$ )( $W/m^2C$ ) de Rabl(1976b). Factor de eliminación de calor del colector ( $F_R$ ), Factor de eficiencia del colector ( $F'$ ), Factor de flujo del colector ( $F''$ ), área de apertura de un colector completo ( $A_a$ )( $m^2$ ), Área del receptor ( $A_r$ )( $m^2$ ), radiación solar media mensual



absorbida por unidad de superficie(S)(kW/m<sup>2</sup>) la temperatura promedio del agua T<sub>ave</sub>(°C) y la temperatura ambiente Ta(°C).

$$Q_u = F_R \cdot A_a \cdot \left[ S - \frac{A_r}{A_a} \cdot U_L \cdot (T_{ave} - T_a) \right] \quad 1$$

$$F'' = \frac{F_R}{F'} = \frac{\dot{m} \cdot C_p}{A_r \cdot U_L \cdot F'} \cdot \left[ 1 - \exp \left( - \frac{A_r \cdot U_L \cdot F'}{\dot{m} \cdot C_p} \right) \right] \quad 2$$

- Variables controladas: el caudal del fluido (kg/s), orientación del colector y el tipo de fluido (agua).

La eficiencia térmica “η<sub>T</sub>” de un CPC es definida como el cociente de la energía útil capturada o ganada, con la radiación incidente en el plano de apertura;

$$\eta_T = \frac{Q_u}{A_a \cdot S} \quad 3$$

Donde:

η<sub>T</sub> = eficiencia térmica del colector.

Q<sub>u</sub> = potencia útil.

A = potencia útil.

a = área de apertura del colector (m<sup>2</sup>)

S = radiación solar absorbida en el plano de apertura (W/m).

**El procedimiento que se siguió fue el siguiente:**

1. Se dimensiona un prototipo de colector solar compuesto parabólico truncado (CPC) a partir de la siguientes parámetros iniciales: ángulo medio de aceptación del concentrador parabólico compuesto (θ<sub>c</sub>)(°), longitud de la apertura(a)(m), longitud de la apertura de un colector truncado aT(m), distancia focal de la parábola f (m), altura del colector completo h (m) y la pendiente del colector β(°).
2. Se diseña el prototipo de colector solar truncado CPC con una estructura metálica, dos hojas parabólicas de placa de hierro, una superficie reflectante de espejo doble y semidoble y tres tubos receptores de cobre.
3. Se toma las propiedades de los materiales como: absorptancia(α), reflectancia(ρ), transmitancia(τ) y la emitancia(ε), determinado la eficiencia y el calor útil del colector promedio a lo largo de todo un año.



4. Se determina la demanda de energía consumida en el sistema para el caso de estudio del comedor central.
5. Se determina el número de colectores necesarios para suplir la demanda del sistema.
6. Se calcula el costo de inversión de construir el colector según los materiales seleccionados y los accesorios utilizados en la integración del lazo de colectores al sistema, así como el costo de mantener la instalación.
7. Se evalúa la cantidad de combustible que se dejó de consumir en la caldera debido a la inyección de energía renovable, considerando tanto el escenario en el que el colector captura radiación difusa como aquel en el que no lo hace.
8. Se comprueba las variables económicas y medioambientales como: VAN, TIR, PR y toneladas de CO<sub>2</sub> deja de emitir, considerando tanto el escenario en el que el colector captura radiación difusa como aquel en el que no lo hace.
9. Se comparan los resultados obtenidos con los valores teóricos estimados por otros autores para colectores solares compuestos parabólicos.

### **3. Resultados y discusión**

#### **3.1. Revisión bibliográfica acerca de los distintos tipos de colectores solares y sus aplicaciones.**

Después de evaluar cuidadosamente los objetivos planteados en este trabajo, se decidió seleccionar un colector solar compuesto por un diseño parabólico truncado (CPC) ver (Duffie et al., 2020). Esta elección se debió a que el CPC demostró ser el tipo de colector que mejor se ajustaba a dichos objetivos. El CPC destaca por su alta eficiencia térmica y su capacidad de adaptación a las condiciones climáticas de la isla. Además, su construcción es relativamente sencilla y su forma truncada permite un ahorro de materiales sin comprometer en gran medida la eficiencia del colector.

#### **3.2. Análisis del impacto, en la eficiencia del colector construido para el caso de estudio.**

##### **3.2.1. Dimensionamiento del prototipo de colector solar compuesto parabólico truncado (CPC).**

###### **3.2.1.1. Parámetros iniciales para el dimensionamiento**

A continuación, se muestra los parámetros iniciales tomados para el dimensionamiento del prototipo.



Tabla 1. Parámetros iniciales para el dimensionamiento (fuente: elaboración propia).

$\theta_c(^{\circ})$	29
a(m)	1.058
aT(m)	0.893
f (m)	0.605
h(m)	3.322
$\beta(^{\circ})$	33

Se seleccionó el ángulo de aceptación medio  $\theta_c$  igual a  $29^{\circ}$  cubriendo la declinación del sol desde el solsticio de verano hasta el solsticio de invierno en un 85 % evitando la necesidad de un sistema de seguimiento solar. La altura del colector, en una escala de 2.6:1, es de 1.278 m. Al truncar la parábola, la altura del colector se reduce a  $h/2.6$  sin afectar significativamente la eficiencia del sistema. Esta relación de concentración es casi la misma para el colector completo y el truncado, pero la configuración truncada ofrece ahorros de material en la altura del colector, lo cual es más viable.

Es importante destacar que los valores de a, a' y  $\theta$  propuestos en la tabla 1 se obtuvieron mediante iteraciones y dimensionamiento de los receptores para lograr la mejor eficiencia.

Al dimensionar un colector CPC con truncamiento, se debe considerar cómo este procedimiento afecta los parámetros geométricos del colector. El truncamiento de la parábola provoca cambios en los parámetros a,  $\theta$ , C y h. La semiapertura de entrada "a" disminuye, mientras que el semiángulo de aceptación  $\theta_c$  aumenta y la concentración y altura se reducen.

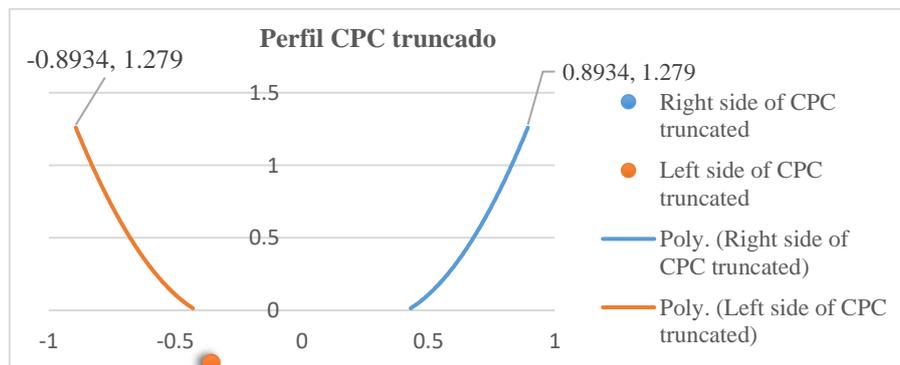


Figura 1. Perfil del colector CPC sometido al proceso de truncamiento (fuente: elaboración propia).



Tabla 2. Parámetros de la superficie del colector (fuente: elaboración propia).

Parámetro	Valor
Longitud inicial de la semiapertura de entrada del colector CPC (a) (m)	1.058
Longitud inicial de la semiapertura de salida del colector CPC (a') (m)	0.430
Altura inicial del colector CPC (h) (m)	3.322
Longitud modificada de la semiapertura de entrada del colector CPC truncado (aT) (m)	0.893
Longitud modificada de la semiapertura de salida del colector CPC truncado (a') (m)	0.430
Altura modificada del colector CPC truncado (h <sub>T</sub> ) (m)	1.278
Longitud (L) (m)	2
Semiángulo de aceptación de la parábola a una altura de L (θ <sub>c</sub> °)	29
Relación de concentración (C)	2.076

### 3.2.1.2. Superficie reflectante

La superficie reflectante elegida es un espejo que se seleccionó en segmentos en forma de tiras de 2 metros de largo, para ser fijados a las láminas de hierro en forma de parábolas. Para los primeros 30 cm de longitud de parábola desde la base, se seleccionaron tiras de espejo de 3 cm de ancho ya que como sabemos en toda parábola dicha zona tiene una curvatura pronunciada. En la parte superior de las hojas en forma de parábola se seleccionó tiras de espejo con un espesor de 5 cm. debido a la poca curvatura que se presenta en este tramo. De esta forma las tiras de espejo seguirán la curvatura de la parábola del colector CPC y concentrarán la radiación en la superficie absorbente.

Tabla 3. Detalles de la superficie reflectante del CPC (fuente: elaboración propia).

Datos de la superficie reflectante del colector CPC	
Tipo de material	Espejo
Área de la superficie reflectante del colector (m <sup>2</sup> )	3.572
Tiras de vidrio en los primeros 70 cm de la parábola para el CPC	
Ancho (cm)	3
Espesor (mm)	4
Longitud (m)	2
Número de piezas de vidrio para el colector CPC (ambos lados)	40
Tiras de vidrio en la parte superior del colector CPC (menos curvadas)	
Ancho (cm)	5
Espesor (mm)	3
Longitud (m)	2
Número de piezas de vidrio para el colector CPC (ambos lados)	8
Propiedades del material	
Absorbancia (α)	0.02
Reflectancia (r)	0.97
Transmitancia (τ)	0.01
Emisividad de la superficie cilindro-parabólica	0.94



### 3.2.1.2. Superficie receptora

La superficie receptora como se ha mencionado anteriormente contará de 3 tuberías de cobre dispuestas en paralelo en la base del colector cilindro parabólico compuesto.

El tubo de cobre, por su durabilidad, su propiedad anticorrosiva y sus propiedades térmicas, es la mejor elección para este tipo de sistemas.

Tabla 4. Características de la superficie receptora (fuente: elaboración propia).

Datos de la Superficie Receptora	
Tipo de material	Cobre
Diámetro exterior del receptor	0.054 m
Espesor del receptor	0.004 m
Diámetro interior del receptor	0.050 m
Longitud de cada receptor	2 m
Número de tubos por colector	3
Propiedades del material	Cobre
Absorbancia ( $\alpha$ )	0.95
Emisividad ( $\epsilon$ )	0.05
Reflectancia ( $r$ )	0.16
Transmitancia( $\tau_c$ )	0.90
Conductividad térmica (K)	385 W/m.°C
Cubierta 1 y 2	
- Emisividad del vidrio ( $\epsilon_c$ )	0.88
Placa	
- Emisividad de la placa ( $\epsilon_c$ )	0.95

### 3.2.1.3. Sistema

El agua sale de la caldera en estado de líquido saturado a una presión de 5 bares y se dirige a una bomba de circulación. Esta bomba eleva la presión del agua hasta 11 bares, lo que facilita su flujo por el campo de colectores, compensa las pérdidas del sistema y amplía el rango de temperatura en el que opera el campo solar. A lo largo de este recorrido, el agua recibe la energía térmica del campo solar sin llegar a evaporarse, pues solo circula agua líquida por los colectores solares.

El agua líquida al salir de los colectores tiene una presión prácticamente igual a la presión de la bomba (Gates. (2021)), debido a que la pérdida de presión en el lazo de colectores es muy pequeña y se puede ignorar. A continuación, pasa por una válvula de regulación diferencial que mantiene una diferencia de presión constante entre la línea y la caldera. Una vez dentro del generador de vapor, debido a la mayor presión y temperatura, el agua experimenta un proceso de evaporación instantánea, generando vapor que se mezcla con el vapor generado por la caldera. La fracción líquida se

incorpora nuevamente al volumen de agua, que luego regresa a la bomba de circulación para seguir el ciclo hasta llegar al concentrador solar (ver figura 2).

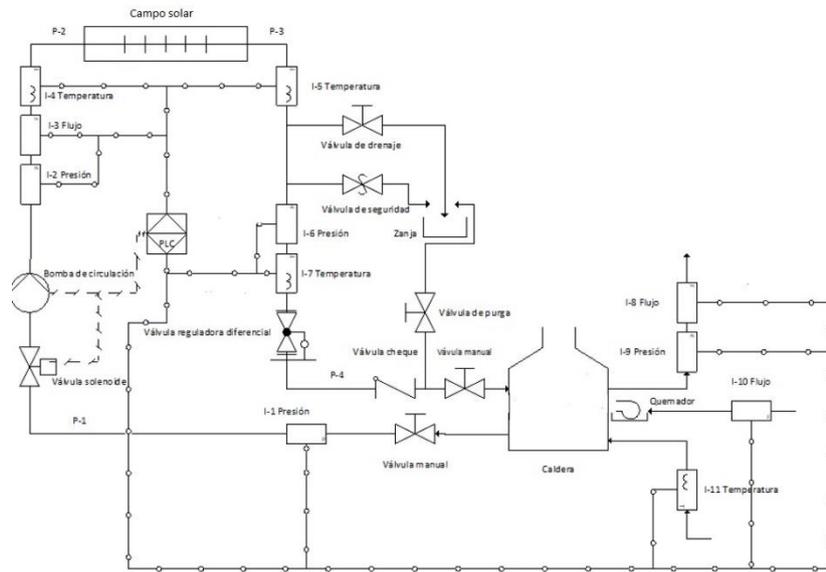


Figura 2. Esquema monolineal de EES para la integración híbrida solar (Caso del comedor central de la UCLV). Fuente: (Elaborado por Rubio, 2020).

Tabla 5. Datos del sistema termo-solar (fuente: elaboración propia).

<b>Datos del sistema de calefacción</b>	
Tipo de fluido	Agua
Flujo masivo promedio total (kg/s)	0.14
Temperatura promedio de entrada del fluido (°C)	152
Temperatura promedio de salida del fluido (°C)	163
Tiempo promedio de funcionamiento del sistema (horas)	4
Temperatura del aire (°C)	DATOS GSA
Radiación para la ciudad de Santa Clara (kWh/m <sup>2</sup> )	DATOS GSA

Conociendo los datos anteriores, se procede a mostrar en la tabla 6 las características que determinarán el caudal en nuestro colector:

Tabla 6. Características del flujo en el colector (fuente: elaboración propia).

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Tipo de fluido	Agua
Flujo total de masa promedio	0.14 kg/s
Velocidad del fluido promedio	0.07 m/s
Conductividad térmica	0.60 W/m·°C
Tiempo de funcionamiento promedio	4 horas

Las temperaturas representativas para el análisis térmico se muestran en la tabla 7. Se debe tener en cuenta que la temperatura de entrada al colector,  $T_i$ , es de 152°C, paulatinamente mientras el agua circula por el colector aumenta la temperatura del



volumen de agua en el campo solar, lo que lleva a una salida de fluido que tiene una temperatura de aproximadamente 163°C.

Tabla 7. Temperaturas (fuente: elaboración propia).

Variable	Valor
Temperatura promedio de entrada al colector ( $T_i$ ) (°C)	152
Temperatura de salida del colector ( $T_o$ ) (°C)	152.2
Temperatura ambiente ( $T_a$ ) (°C)	DATO GSA
Temperatura promedio del agua ( $T_{ave}$ ) (°C)	151.1

### 3.2.1.4. Determinación de la demanda de energía consumida del sistema para el caso de estudio.

Para la determinación de la demanda se estableció lo siguiente: El comedor ofrece tres servicios diarios de lunes a viernes, con una ocupación promedio del 80% de su capacidad (960 comensales por turno), y consume 1 kg de vapor por hora por comensal. Los fines de semana y las vacaciones, el comedor trabaja hasta las 7:00 p.m., con una ocupación promedio del 20% y 5% de su capacidad (240 y 60 comensales por turno, respectivamente)

Tabla 8. Análisis térmico del CPC (fuente: elaboración propia).

S (Radiación solar total promedio absorbida por área) ( $W/m^2$ )	486
hrpc1 (Coeficiente de transferencia de calor por radiación de la placa a la cubierta 1) ( $W/m^2$ )	0,24
hrc1c2 (Coeficiente de transferencia de calor por radiación de la placa a la cubierta 1) ( $W/m^2$ )	0,13
hrc2a (Coeficiente de transferencia de calor por radiación de la cubierta 2 al ambiente) ( $W/m^2$ )	5,26
hw (Coeficiente de transferencia de calor por convección) ( $W/m \cdot ^\circ C$ )	16,2
hfi (Coeficiente de transferencia de calor por convección del receptor al fluido) ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )	441
UL. Coeficiente global de pérdidas térmicas al exterior. ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )	2,85
F'. Factor de eficiencia del colector	0,99
F''. Factor de flujo del colector	0,92
FR. Factor de transferencia de calor	0,98
Qu (Potencia útil promedio) (W)	1171
Qd (energía demandada promedio) (kWh/día)	297



$\eta_c$ (Eficiencia térmica del colector)	0,66
$\eta_o$ (Eficiencia óptica del colector)	0.60
Número de colectores	100

**3.3 Evaluación de la implementación del colector diseñado en el caso de estudio, tomando en cuenta las variables de prefactibilidad y ambientales.**

**3.3.1. Cálculo del costo de inversión de construir el colector según los materiales seleccionados y los accesorios utilizados en la integración del lazo de colectores al sistema, así como el costo de mantener la instalación.**

Tabla 9. Cálculo del costo de inversión de construir el colector según los materiales seleccionados (fuente: elaboración propia).

Costo total del CPC por unidad (euro)	316
Costo total de materiales para el sistema (euro)	24 480
Costo de mantener la instalación.	1120 euro/año

**3.3.2. Evaluación de la cantidad de combustible que se dejó de consumir en la caldera debido a la inyección de energía renovable, considerando tanto el escenario en el que el colector captura radiación difusa como aquel en el que no lo hace.**

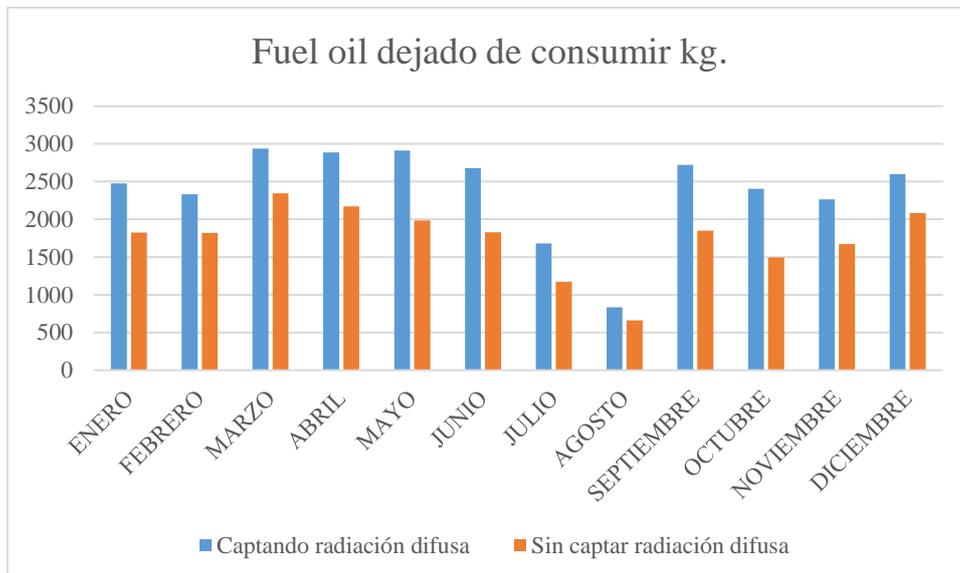


Figura 3. Fuel oil que no se consumió debido a la inserción del campo solar (kg). Fuente: elaboración propia).

Se realizó una evaluación para determinar la cantidad de combustible que dejó de consumirse en la caldera debido a la inyección de energía renovable. En el escenario en



el que el colector captura radiación difusa, se observó una reducción del consumo de combustible del 30%. Por otro lado, en el escenario en el que el colector no captura radiación difusa, la reducción fue de solo un 19%.

Estos resultados indican que la captura de radiación difusa por parte del colector tiene un impacto significativo en la disminución del consumo de combustible en la caldera. La diferencia entre el 30% y el 19% sugiere que la captura de radiación difusa contribuye de manera efectiva a la generación de energía renovable y a la reducción de la dependencia de combustibles fósiles.

**3.3.3. Comprobación de las variables económicas y medioambientales como: VAN, TIR, PR y toneladas de CO<sub>2</sub> deja de emitir, considerando tanto el escenario en el que el colector captura radiación difusa como aquel en el que no lo hace.**

**✚ Prefactibilidad**

**Tasa interna de retorno (TIR)**

**Capturando radiación difusa**

La TIR calculada dio un valor de 25% superando a la tasa de descuento en aproximadamente 15 puntos porcentuales, por lo que el proyecto es aceptable.

**Sin captar radiación difusa.**

La TIR calculada dio un valor de 19 % superando a la tasa de descuento en aproximadamente 9 puntos porcentuales, por lo que el proyecto es aceptable.

**Valor presente neto (VAN)**

**Capturando radiación difusa**

El valor presente neto es positivo con un valor que asciende a 66 500 euros.

**Sin captar radiación difusa.**

El valor presente neto es positivo con un valor que asciende a 35 800 euros.

**Período de recuperación (PBP)**

**Capturando radiación difusa**

El tiempo que se recupera esta inversión es de 5 años y un mes.

**Sin captar radiación difusa.**

El tiempo que se recupera esta inversión es de 6 años y 5 meses.

**✚ Ambiental**

**Cálculo del impacto ambiental que representa la ejecución del proyecto propuesto en la obra (toneladas de CO<sub>2</sub> no emitidas en un año).**



### Capturando radiación difusa

Se consigue una reducción media de emisiones de CO<sub>2</sub> al año de 91 toneladas.

### Sin captar radiación difusa.

Se consigue una reducción media de emisiones de CO<sub>2</sub> al año de 66 toneladas.

### 3.3.4. Comparación de los resultados obtenidos con los valores teóricos estimados por otros autores para colectores solares compuestos parabólicos.

Tabla 10. Resumen de los resultados obtenidos con valores reportados por otros autores para colectores compuestos parabólicos (fuente: elaboración propia).

Artículo	Relación de concentración	Ángulo de aceptación	Longitud (m)	Altura (m)	Apertura (m)	Diámetro exterior del tubo (m)	Rendimiento óptico (%)	Rendimiento térmico (%)
Diseño de un colector CPC para aplicaciones de baja temperatura	2,5	30°	2	1,5	1,2	0,038	66	60
Análisis térmico y económico de un sistema solar CPC para calentamiento de agua	2,3	28°	1,8	1,2	0,9	0,035	64	58
Modelado y simulación de un colector CPC con tubo absorbedor al vacío	2,1	26°	2	1,4	1,05	0,047	68	62
Colector CPC-V	2,076	29°	2	1,278	1,786	0,054	60	66

Se ha diseñado un colector CPC-V con una relación de concentración de 2,076 y un ángulo de aceptación de 29°. El colector tiene una longitud de 2 m, una altura de 1,278 m y una apertura de 1,786 m. Los tubos absorbedores son al vacío con un diámetro exterior de 0,054 m y un recubrimiento selectivo. El rendimiento óptico del colector es del 60% y el rendimiento térmico es del 66%.

Se ha comparado el colector CPC-V con otros tres colectores CPC con tubo absorbedor convencional, cuyos resultados se han tomado de la literatura. Se ha observado que el colector CPC-V tiene una menor relación de concentración que los otros colectores, lo que implica que tiene una menor capacidad de concentrar la radiación solar. Sin embargo, el colector CPC-V tiene un mayor ángulo de aceptación que dos de los otros



tres colectores, lo que significa que puede captar más radiación solar difusa y tolerar mayores errores de seguimiento.

El colector CPC-V tiene una longitud igual a la del primer y tercer colector, pero una altura menor a esos dos colectores. Esto implica que el colector CPC-V tiene una menor superficie de captación. Esto puede perjudicar el rendimiento óptico del colector, pero también disminuye el coste y el peso del mismo.

El colector CPC-V utiliza tubos absorbedores al vacío con un diámetro exterior mayor que el de los otros colectores. El tubo al vacío reduce las pérdidas por convección y radiación del fluido caloportador, lo que mejora el rendimiento térmico del colector. El diámetro exterior mayor también implica una mayor área de captación de radiación solar: Al tener un receptor con un diámetro exterior más grande, se aumenta el área de captación de radiación solar. Esto significa que el colector puede recibir una mayor cantidad de energía solar, lo que potencialmente resulta en una mayor producción de energía renovable.

Mayor capacidad de transferencia de calor: Un receptor con un diámetro exterior más grande también puede tener una mayor capacidad de transferencia de calor. Esto se debe a que un área de superficie más grande permite una mayor transferencia de energía térmica desde el receptor hacia el fluido de trabajo, como agua o aceite térmico. Como resultado, se puede obtener una mayor eficiencia en la conversión de energía solar en energía térmica utilizable.

Mejor rendimiento en condiciones de radiación difusa: La captación de radiación difusa es aquella que proviene de diferentes direcciones y no solo de la dirección directa del sol. Un receptor con un diámetro exterior más grande puede tener una mejor capacidad para captar y aprovechar la radiación difusa. Esto es especialmente relevante en áreas con climas nublados o con mayor presencia de nubes, donde la radiación solar directa puede ser limitada.

Consideraciones de diseño y costos: Sin embargo, es importante tener en cuenta que un receptor con un diámetro exterior más grande también implica consideraciones de diseño y costos adicionales. Se requerirá un diseño y fabricación adecuados para adaptar el receptor al colector cilindro compuesto parabólico truncado. Además, un receptor más grande puede aumentar los costos de materiales y construcción del sistema.



El rendimiento óptico del colector CPC-V es menor que el de los otros colectores. No poseer sistema de seguimiento implica que el colector para este caso pierda un 15 % de la energía que pudiera haber captado por este concepto.

#### 4. Conclusiones

En conclusión, se lograron alcanzar los objetivos establecidos para el desarrollo de un diseño de colector solar que maximice la captura de energía solar difusa, al mismo tiempo que sea asequible para su implementación en la industria cubana.

1. La revisión bibliográfica realizada permitió seleccionar el colector solar cilindro parabólico compuesto como la opción óptima para maximizar la captura de energía solar difusa en el contexto industrial cubano. Este diseño ofrece una solución eficiente, efectiva y económicamente viable para aprovechar al máximo el potencial de la energía solar en la industria cubana.
2. Se realizó un análisis detallado del impacto en la eficiencia del colector diseñado, logrando una eficiencia global del 40%. Se consideraron factores como la geometría, los materiales utilizados y los mecanismos de captura de energía solar difusa, lo que permitió maximizar la captura de energía solar difusa en un 99.5% e inyectar un 10% más de energía renovable al proceso. Esto garantiza un alto rendimiento en la captura de este tipo de radiación.
3. Se evaluó la implementación del colector diseñado en el caso de estudio, considerando variables como la prefactibilidad y el impacto ambiental. El colector diseñado logró ahorrar un 30% de fueloil en el proceso, evitando la emisión de 91 toneladas de CO<sub>2</sub> al año. El proyecto resultó económicamente viable, con un valor presente neto (VPN) de \$66,455, una tasa interna de retorno (TIR) del 25% y un período de recuperación de 5 años y un mes.
4. En comparación de los resultados obtenidos con los valores teóricos estimados por otros autores para colectores solares compuestos parabólicos, el colector CPC-V presenta ventajas en la captación de radiación difusa y el rendimiento térmico debido a su diseño y características específicas. Aunque tiene limitaciones en la concentración de radiación solar y la falta de sistema de seguimiento, su eficiencia y capacidad de aprovechar la energía solar difusa lo



hacen una opción viable en ciertos contextos y consideraciones de diseño y costos.

## 5. Referencias bibliográficas

1. Abdullahi, B., Abubakar, S. B., Muhammad, N. M. A., Al-Dadah, R., & Mahmoud, S. (2019). Optimum tilt angle for solar collectors used in Kano, Nigeria. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 56, 31-42.
2. Agency, I. E. (2021). *World Energy Outlook 2021*.
3. AIE. (2021). *Industry - Analysis*.
4. Alvarez, O., & Jesús, G. (2021). *ATLAS DE RADIACIÓN SOLAR DE LA REPÚBLICA DE CUBA*.
5. Apple. (2023). Apple y sus proveedores globales expanden la energía renovable a 13.7 gigavatios [Online]. Available: <https://www.apple.com/co/newsroom/2023/04/apple-and-global-suppliers-expand-renewable-energy-to-13-point-7-gigawatts/> [Accessed].
6. Arenas, L. F. A.-G. Y. M. L. (2012). Estimation of diffuse solar radiation in the tropics: A case study for Costa Rica. *Solar Energy*, 86, 2504-2514.
7. Carlos Andrés García-Velásquez, L. G. O.-Q., Jorge Enrique Rodríguez-Ariza (2021). Una revisión de los últimos avances de los colectores solares térmicos aplicados en la industria. 25, 1-18.
8. Cuba, M. D. E. Y. M. D. (2019). *Informe Anual 2019*. La Habana, Cuba.
9. Duffie, J. A., Beckman, W. A., & Blair, N. (2020). *Solar engineering of thermal processes, photovoltaics and wind*, John Wiley & Sons.
10. ECURED. (2023). *Energía solar en Cuba*. [Online]. Available: [https://www.ecured.cu/Energ%C3%ADa\\_solar\\_en\\_Cuba](https://www.ecured.cu/Energ%C3%ADa_solar_en_Cuba) [Accessed].
11. EFIHABITAT (2023). *Radiación directa, difusa y reflejada*.
12. Español, N. G. E. (2019). *Energía solar en Cuba: desafíos y oportunidades*.
13. Farajzadeh, E., Movahed, S., & Hosseini, R. (2018). Experimental and numerical investigations on the effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O nanofluids on thermal efficiency of the flat plate solar collector. *Renewable Energy*, 118, 122-130.
14. García, J. A., García, A., Martín, M. C., & Velasco, E. (2019). Una revisión de los últimos avances de los colectores solares térmicos aplicados en la industria. *Ingeniería Energética*, 40, 206-216.



15. Gates Corporation. Fluid Flow Pressure Calculator. Recuperado de: <https://www.gates.com/us/en/knowledge-center/calculators/fluid-flow-pressure-calculator.html>
16. Hub, E. S. (2023). Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) [Online]. Available: [https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis\\_en](https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis_en) [Accessed].
17. IEA (2021). Solar PV – Analysis.” IEA, 2021.
18. IRENA (2017). IRENA PUBLICATIONS: THE SHORT GUIDE. In: Dhabi, A. (Ed.).
19. IRENA (2021). Energías renovables en Cuba: Perspectivas, investigación, proyectos y avances.
20. IRENA (IRENA), A. I. D. E. R. (2019). Costos de generación de energía renovable en 2019.
21. IRENA (IRENA), A. I. D. E. R. (2021). Perspectivas de la transición energética mundial. In: IRENA (Ed.).
22. IRENA (IRENA), I. R. E. A. (2022). Renewable Energy Market Analysis: Africa and its Regions. Editorial: International Renewable Energy Agency (IRENA). Abu Dhabi, United Arab Emirates.
23. Jadav, A., & Van Niekerk, J. (2015). Low Concentrating Solar Collectors for Economical Generation of Low-Medium Temperature Industrial Process Heat.
24. Jorge E. González, J. C. A., Carlos A. Patiño y Andrés F. Osorio (2019). Estimation of diffuse solar radiation in Colombia using satellite data. 12.
25. Kalogirou, S. A. (2021). Solar thermal systems for industrial applications: A state-of-the-art review. Renewable and Sustainable Energy Reviews.
26. Kelly, N. A., & Gibson, T. L. (2011). Increasing the solar photovoltaic energy capture on sunny and cloudy days. Solar Energy, 85, 111-125.
27. Miguel Ángel Gaertner, J. M. G., María Jesús Casado, María Luisa Martín y José Antonio (2001). Radiación solar difusa y directa en la Península Ibérica: estimación y aplicaciones. Revista de Climatología 1, 1-12.
28. Ming Qu, Z. Z., Yulong Ding y Ruzhu Wang (2013). 16, 380-406.
29. Mundial, B. (2023). Cuba [Online]. Available: <https://datos.bancomundial.org/pais/cuba> [Accessed 19-06-2023].



30. PepsiCo. (2022). Renewable energy - PepsiCo [Online]. Available: <https://www.pepsico.com/our-impact/esg-topics-a-z/renewable-energy> [Accessed].
31. Pranesh, V., Velraj, R., Christopher, S., & Kumaresan, V. (2019). A 50 year review of basic and applied research in compound parabolic concentrating solar thermal collector for domestic and industrial applications. *Solar Energy*, 187, 293-340.
32. Rajendran, D. R., Ganapathy Sundaram, E., Jawahar, P., Sivakumar, V., Mahian, O., & Bellos, E. (2020). Review on influencing parameters in the performance of concentrated solar power collector based on materials, heat transfer fluids and design. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 140, 33-51.
33. REN21 (2021). Informe mundial de energías renovables 2021.
34. RenovablesVerdes. (2021). Colectores solares: características, usos y funcionamiento. [Online]. [Accessed 28-06-2023 2023].
35. Research, G. V. (2023). Building-integrated Photovoltaics Market Size Report. In: Research, G. V. (Ed.). Estados Unidos.
36. Salud, O. P. D. L. (2022). Perfil de País - Cuba | Salud en las Américas.
37. Solar, C.-C. D. I. D. L. E. (2023). Ciesol - Centro de Investigaciones de la Energía Solar [Online]. España. Available: <https://ciesol.com/> [Accessed].
38. Tian, M., Su, Y., Zheng, H., Pei, G., Li, G., & Riffat, S. (2018). A review on the recent research progress in the compound parabolic concentrator (CPC) for solar energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1272-1296.
39. Tian, Y., & Zhao, C.-Y. (2013). A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. *Applied energy*, 104, 538-553.
40. Winston, R. (2010). *Nonimaging Optics*.
41. Winston, R., Miñano, J. C., Benitez, P. G., Shatz, N., & Bortz, J. C. (2005). *Nonimaging optics* Amsterdam.
42. Yahyaoui, I. (2018). *Advances in renewable energies and power technologies: volume 1: solar and wind energies*, Elsevier.
43. Yao Liu, X. T., Yuchen Lin, Heping Tan, Minzan Li (2021). Non-imaging solar collectors: A technology review. 138.