**IV CONFERENCIA INTERNACIONAL EN DESARROLLO ENERGÉTICO SOSTENIBLE**

**Comparación entre Colectores Cilindro Parabólicos (PTC) y Colectores Compuestos Parabólicos (CPC) en Aplicaciones de Calor de Proceso Industrial en Cuba**

***Comparison between Parabolic Trough Collectors (PTC) and Parabolic Compound Collectors (CPC) in Industrial Process Heat Applications in Cuba.***

**Ariam Rojas Acosta1,** **Idalberto Herrera Moya2, Manuel Alejandro Rubio Rodríguez**

1-Ariam Rojas Acosta. UCLV, Cuba. ariamr@uclv.cu:

2-Idalberto Herrera Moya. UCLV idalbertohm@uclv.edu.cu:

3-Manuel Alejandro Rubio Rodríguez. UCLV, Cuba. manuelrr@uclv.edu.cu:

**Resumen:**

* **Problemática:**

El sector industrial cubano, responsable del 34% del consumo energético nacional, depende en un 92% de combustibles fósiles, con emisiones de 0.34 kgCO₂/kWth. La radiación difusa (39% del total en Cuba) limita tecnologías como los PTC, que no aprovechan este recurso, mientras los CPC emergen como alternativa técnica y económicamente viable.

* **Objetivo(s):**
1. Comparar el desempeño energético de PTC y CPC bajo condiciones cubanas (613 W/m², 25% difusa) (Caso de estudio).
2. Evaluar viabilidad económica (CAPEX, OPEX, LCOH, VAN, PR, TIR) y ambiental (tCO₂ evitadas) mediante análisis de sensibilidad.
* **Metodología:**
1. Modelado térmico-óptico bajo condiciones locales (613 W/m², 25% difusa).
2. Análisis económico (CAPEX, OPEX, LCOH, VAN, PR, TIR)
3. Evaluación ambiental (tCO₂ evitadas, kgCO₂/kWth)
4. Validación con estudios internacionales comparables
* **Resultados y discusión:**

**Eficiencia energética:**

CPC mostró 58% de eficiencia global anual (vs 51% PTC), captando 35% de radiación difusa (0% PTC)

**Viabilidad económica:**

CPC mantuvieron VAN positivo hasta 380 USD/m² (PTC solo hasta 330 USD/m²).

LCOH promedio en escenarios viables: 23.5 USD/MWh (CPC) vs 31.5 USD/MWh (PTC).

TIR >15% en CPC para CAPEX <280 USD/m² (PTC requirió <200 USD/m²)

**Impacto ambiental:**

 CPC evitarían 991 tCO₂ en 25 años (10% más que PTC)

* **Conclusiones:**

Los CPC demostraron ventajas decisivas en condiciones cubanas:

1. 7% mayor eficiencia energética anual
2. 25% menor LCOH en escenarios viables.
3. Mayor resiliencia financiera ante variaciones de costos.
4. 10% más reducción de emisiones que PTC

Se recomienda su implementación prioritaria en proyectos de calor industrial en Cuba, particularmente en instalaciones con demandas térmicas medias (80-250°C).

***Abstract:***

***Problem Statement:***

*Cuba's industrial sector (34% of national energy consumption) depends 92% on fossil fuels (0.34 kgCO₂/kWth). The high diffuse radiation (39% of total) limits conventional technologies like PTCs, while CPCs emerge as a technically and economically viable alternative.*

***Objective(s):***

1. *Compare energy performance of PTCs and CPCs under Cuban conditions (613 W/m², 25% diffuse)*
2. *Evaluate economic viability (CAPEX, OPEX, LCOH, VAN, PR, TIR) and environmental impact (tCO₂ avoided) through sensitivity analysis.*

***Methodology:***

1. *Thermo-optical modeling under local conditions (613 W/m², 25% diffuse).*
2. *Economic analysis using financial indicators (CAPEX, OPEX, LCOH, NPV, IRR).*
3. *Environmental assessment quantifying avoided emissions.*
4. *Validation with comparable international studies.*

***Results and Discussion:***

***Energy efficiency:***

 *CPCs showed 58% annual efficiency (vs 51% PTCs), capturing 35% diffuse radiation (0% PTCs).*

***Economic viability:***

*CPCs maintained positive NPV up to 380 USD/m² (PTCs only to 330 USD/m²).*

*Average LCOH in feasible scenarios: 23.5 USD/MWh (CPCs) vs 31.5 USD/MWh (PTCs).*

*IRR >15% for CPCs at CAPEX <280 USD/m² (PTCs required <200 USD/m²).*

***Environmental impact:***

*CPCs would avoid 991 tCO₂ in 25 years (10% more than PTCs).*

***Conclusions:***

*CPCs demonstrated decisive advantages under Cuban conditions:*

1. *7% higher annual energy efficiency.*
2. *25% lower LCOH in viable scenarios.*
3. *Greater financial resilience to cost variations.*
4. *10% greater emissions reduction than PTCs.*

*Priority implementation is recommended for Cuban industrial heat projects, particularly in medium-temperature demand installations (80-250°C).*

**Palabras Clave:** Colectores solares térmicos; PTC; CPC; Calor de proceso industrial; LCOH; Radiación difusa; Cuba.

 ***Keywords:*** *Solar thermal collectors; PTC; CPC; Industrial process heat; LCOH; Diffuse radiation; Cuba.*

**1. Introducción**

Mientras el mundo avanza hacia la transición energética para reducir el 30% de las emisiones globales de CO₂ vinculadas a la industria(Agency, 2025). Cuba enfrenta una crisis multidimensional: la descarbonización no es solo un imperativo ambiental, sino una condición para sobrevivir a un colapso económico y social. Con el 34% de su consumo energético industrial dependiendo en un 92% de combustibles fósiles ((ONEI), 2025) —y una intensidad de emisiones de 0.34 kgCO₂/kWth—, el país sufre las consecuencias de una vulnerabilidad extrema: centros productivos paralizados, pérdidas millonarias y apagones prolongados que exacerban el malestar ciudadano.

La actual crisis, agravada por la escasez de combustible y la obsolescencia de la infraestructura, ha convertido la seguridad energética en una prioridad nacional. En este escenario, las energías renovables —particularmente la solar térmica— emergen no solo como herramientas de descarbonización, sino como pilares para reactivar la industria y aliviar la presión sobre un sistema energético al límite. El potencial es significativo: aunque no existen estimaciones oficiales que cuantifiquen con precisión la demanda de calor de media temperatura (80–250 °C) en la industria cubana, estudios internacionales indican que cerca del 45 % de la demanda energética industrial global corresponde a este tipo de procesos térmicos ((IEA), 2022). Considerando que sectores clave del país, como el alimentario, químico y textil, operan mayoritariamente en ese rango, resulta razonable utilizar dicha proporción como una aproximación contextual. Sin embargo, las tecnologías convencionales como los Colectores Cilindro-Parabólicos (PTC) presentan limitaciones en regiones con alta radiación difusa, como Cuba (39% del total)(Atlas, 2023), donde su eficiencia disminuye significativamente (Mayada A. Alamr, 2022).

**1.2 Avances tecnológicos: PTC vs. CPC**

Estudios recientes destacan que los Colectores Compuestos Parabólicos (CPC) superan a los PTC en entornos con radiación dispersa, al captar tanto radiación directa como difusa (Kumar et al., 2024). Investigaciones en climas tropicales (Brandão et al., 2024); (Pramuang and Exell, 2007) confirman que los CPC logran eficiencias anuales un 25–30% mayores que los PTC bajo condiciones similares a las cubanas, gracias a su capacidad para aprovechar radiación difusa y menor dependencia de seguimiento solar. Estudios en Brasil (CPC: 67% eficiencia térmica) y Camerún (PTC: 45% ahorro energético) respaldan esta diferencia, destacando la ventaja de los CPC en entornos con alta humedad y nubosidad (Omgba et al., 2025). No obstante, la literatura evidencia vacíos en:

1. Falta de estudios comparativos PTC-CPC que cuantifiquen su rendimiento energético bajo el régimen climático cubano, particularmente en:
	* Eficiencia global considerando alta difusión atmosférica
	* Pérdidas térmicas en condiciones de elevada humedad
	* Variabilidad estacional del recurso solar
2. Falta de estudios económicos comparativos adaptados al contexto cubano, especialmente en métricas clave como CAPEX (Inversión Inicial): Costos de estructura, montaje y componentes OPEX (Costos Operativos): Mantenimiento, Costo Nivelado de Calor (LCOH), Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y Período de recuperación de la inversión (PE).
3. Evaluaciones del impacto ambiental específicas para la industria cubana.

1.3 Planteamiento del problema y objetivos

La combinación de alta radiación difusa, altos costos de combustibles fósiles y la necesidad de reducir emisiones en Cuba justifica este estudio, que busca:

1. Comparar el desempeño energético de PTC y CPC bajo condiciones cubanas (613 W/m², 25% difusa), tomando como caso de estudio el Comedor Central Universitario de la Universidad Marta Abreu.
2. Evaluar la viabilidad económico-ambiental mediante análisis comparativo de indicadores financieros (CAPEX, OPEX, LCOH, VAN, TIR) y de sostenibilidad (tCO₂ evitadas, kgCO₂/kWht), considerando variaciones en costos de instalación según contextos geográficos (países tropicales con alta radiación difusa vs. regiones con predominio de radiación directa).

**2. Metodología**

La investigación se desarrolló bajo un enfoque analítico-teórico, combinando modelado teórico, simulación numérica y evaluación técnico-económica-ambiental. A continuación, se detallan las etapas, métodos y técnicas empleadas:

**2.1 Tipo de investigación**

Estudio de caso aplicado al Comedor Central "Marta Abreu" (Villa Clara, Cuba).

Métodos principales:

1. Modelado térmico-óptico (análisis de rendimiento energético).
2. Diseño geométrico parametrizado (optimización bajo condiciones locales).
3. Evaluación económica (indicadores CAPEX, OPEX, LCOH, VAN y TIR).
4. Análisis de impacto ambiental (huella de carbono evitada).

**2.2 Etapas del proceso**

Caracterización inicial de tecnologías (PTC y CPC)

1. Rendimiento térmico: Cálculo basado en las propiedades del receptor(Gaia Solar Co., 2023) y fluidodinámicas del fluido caloportador (coeficientes de transferencia de calor, pérdidas convectivas/radiativas(Duffie and Beckman, 2013, Cengel and Cimbala, 2006), caída de presión según(Quiben, 2005)).
2. Rendimiento óptico: Simulación de trayectoria solar (según modelos descritos en el libro John A. Duffie y William A. Beckman:"Solar Engineering of Thermal Processes"). considerando las propiedades ópticas de los materiales seleccionados (reflectividad, absortividad, emisividad).
3. Diseño geométrico y optimización

Parámetros clave:

Ubicación geográfica (coordenadas, radiación solar anual/mensual)(Banco Mundial, 2023, Laboratory, 2024).

Ángulos indicativos de la orientación de la radiación solar (Direction of Beam Radiation, Ratio of Beam Radiation on Tilted Surface) según (SunEarthTools.com, 2024, Solarg, 2024).

Herramientas: algoritmos de optimización (Macros en Excel: Se desarrollaron rutinas en VBA (Visual Basic for Applications) para:

1. Automatizar el cálculo de escenarios (variación de parámetros geométricos, orientación).
2. Evaluación energética global.
3. Cálculo de la energía útil aprovechada (balance térmico: energía captada vs. pérdidas)(Duffie and Beckman, 2013).
4. Determinación de la demanda térmica del comedor (perfiles horarios de consumo, datos históricos).

Configuración del sistema híbrido

Balance masa-energía: Modelado del sistema híbrido (PTC + Fuel Oil) y (CPC + Fuel Oil) en EES.

Dimensionamiento: Número óptimo de colectores (maximizando TIR y minimizando LCOH).

Análisis económico-ambiental

Indicadores financieros:

CAPEX (Inversión Inicial): Costos de estructura, montaje y componentes OPEX (Costos Operativos): Mantenimiento(REVE, 2023), Costo Nivelado de Calor (LCOH)(OUALI et al., 2024), Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y Período de recuperación de la inversión (PE)((IDAE), 2025).

Impacto ambiental:

Emisiones evitadas de CO₂ (ton/año) y kgCO₂/kWth (según factor de emisión local)((MITECO), 2016).

**2.3 Técnicas de recolección y validación de datos**

Datos meteorológicos: Plataformas Global Solar Atlas (irradiancia, temperatura ambiente, velocidad del viento, humedad relativa, presión atmosférica, temperatura de rocío).

Validación: Comparación con estudios similares (benchmarking).

Incertidumbre: Análisis de sensibilidad (variación de parámetros como costos de materiales o radiación).

1. **Resultados y discusión**

**4.1 Desempeño energético**

Captación de radiación solar:

La Figura 1 compara la eficiencia global anual de los colectores PTC y CPC bajo las condiciones climáticas de Cuba (613 W/m² de irradiación, 25% difusa). Los resultados revelan que:

El sistema CPC demostró una capacidad superior para aprovechar la radiación difusa, captando un 35% de este tipo de radiación, mientras que el PTC no logró aprovecharla (0%). En radiación directa, el CPC alcanzó una eficiencia del 70%, ligeramente superior al 69% del PTC.

La eficiencia global anual del CPC fue del 58%, superando al 51% del PTC, lo que evidencia su adaptabilidad a las condiciones climáticas de Cuba, donde la radiación difusa representa el 39% del total anual.

Figura 1. Comparación de la eficiencia global entre PTC y CPC bajo condiciones locales (Fuente: elaboración propia).

La superioridad de los CPC se explica por:

Diseño óptico: Los colectores CPC, al no requerir seguimiento solar continuo, minimizan pérdidas por desalineación en días nublados (Pranesh et al., 2019).

Pérdidas térmicas: Los PTC son más sensibles a la humedad ambiental (típica en Cuba), que incrementa las pérdidas convectivas en el tubo absorbedor(Brandão et al., 2024).

Demanda térmica del comedor central:

El análisis energético mostró que el sistema CPC cubrió el 14% de la demanda térmica anual, frente al 13% del PTC, reduciendo aproximadamente en 1/6 la dependencia de combustibles fósiles en el caso de estudio.

3.2 Evaluación económica

El análisis de sensibilidad revela diferencias críticas en la viabilidad financiera de ambas tecnologías bajo condiciones variables:

Para PTC:

1. El rango de CAPEX analizado va desde 280 USD/m² hasta 1,200 USD/m².

2. Los valores de LCOH para un proyecto viable oscilan entre 29 y 34 USD/MWht.

3. El VAN es positivo solo en los escenarios con costos de instalación entre (280-330 USD/m²).

4. La TIR disminuye rápidamente al aumentar el CAPEX, siendo viable (>15%) solo para instalaciones por debajo de 330 USD/m².

Para CPC:

1. El rango de CAPEX analizado comprende desde 130 USD/m² hasta 930 USD/m².

2. Los valores de LCOH para un proyecto viable varían entre 12 y 35 USD/MWht.

3. El VAN muestra viabilidad en un rango más amplio (hasta 380 USD/m²).

4. La TIR supera el 20% en instalaciones por debajo de 280 USD/m².

Tabla 1. Resumen de indicadores económicos para PTC y CPC para escenarios viables (Fuente: elaboración propia).

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | PTC | CPC |  Ventaja CPC |
| LCOH(USD/MWh | 23.5 | 31.5 | -8% |
| TI(%) | 10 | 10 | 0% |
| TIR(%) | 15 | 28,7 | 13.7% |
| PR(a) | 12 | 8 | -4 años |
| VAN(USD) | 11794 | 31229 | 19435 USD |

Discusión:

El Costo Nivelado de Calor (LCOH) de los CPC fue 8% menor que el de los PTC, gracias a menores costos operativos (OPEX) y mayor eficiencia energética.

Los CPC mostraron mayor resiliencia financiera, manteniendo VAN positivo hasta 380 USD/m² (vs. 330 USD/m² para PTC), clave para entornos con limitaciones de inversión inicial(Omgba et al., 2025).

**3.3 Impacto ambiental**

Los CPC evitarían 991 tCO₂ en 25 años (10% más que los PTC), siendo equivalente para ambos casos las emisiones específicas con un valor de 0.29 kgCO₂/kWth.

Esta ventaja se alinea con estudios globales que destacan el potencial de los CPC en la descarbonización industrial(Kumar et al., 2024).

Este resultado refuerza su alineación con los objetivos de descarbonización del sector industrial en Cuba.

**3.4 Discusión**

Los resultados obtenidos confirman que, en entornos con alta radiación difusa como Cuba, los Colectores Compuestos Parabólicos (CPC) presentan ventajas técnicas y económicas decisivas frente a los Colectores Cilindro-Parabólicos (PTC). Estas diferencias se acentúan en aplicaciones de calor de proceso industrial, donde la demanda térmica constante prioriza la eficiencia energética y la rentabilidad a largo plazo.

1. Superioridad Técnica de los CPC

Mayor eficiencia energética (+7%): Los CPC alcanzan un 58% de eficiencia global anual frente al 51% de los PTC, debido a su capacidad para captar 35% de radiación difusa (vs. 0% en PTC). Este rendimiento es consistente con estudios en climas tropicales(Brandão et al., 2024); (Pramuang and Exell, 2007), donde los CPC superan a los PTC bajo condiciones de radiación difusa predominante.

2. Ventajas Económicas Clave

a) Mayor Rango de Viabilidad Económica

Los CPC mantienen VAN positivo (>0) y TIR >15% incluso con costos de instalación (CAPEX) de hasta 380 USD/m², mientras que los PTC ya muestran VAN negativo (-5,455 USD) en ese mismo escenario (Anexo, Tabla-1).

Esto se debe a su menor LCOH (23.5 USD/MWh vs. 31.5 USD/MWh en PTC), lo que los hace 25% más económicos en operación.

b) Resiliencia Financiera

Los PTC requieren que su CAPEX sea 20-25% menor que el de los CPC para ser competitivos. En Cuba, donde los CPC aprovechan mejor la radiación difusa, esta brecha se amplía.

3. Impacto Ambiental

Los CPC evitarían 991 tCO₂ en 25 años (10% más que los PTC), reforzando su alineación con políticas de descarbonización industrial (Carrión-Chamba et al., 2022).

4. Novedades y Contribuciones

Este estudio es el primero en Cuba que integra:

1. Modelado termo-óptico adaptado a condiciones locales (613 W/m², 25% difusa).
2. Algoritmos de optimización en VBA para evaluar escenarios técnico-económicos, permitiendo replicabilidad en otros climas tropicales.
3. Análisis de sensibilidad que demuestra la robustez de los CPC ante variaciones en CAPEX y radiación solar.

5. Limitaciones y Trabajos Futuros

1. La viabilidad de CPC y PTC en este estudio dependió críticamente de la redistribución artificial de la demanda térmica, lo que limita su aplicabilidad directa a industrias con perfiles rígidos. Futuros trabajos deberán explorar su desempeño en sectores con demandas variables (ej. alimentario), integrando almacenamiento térmico.
2. Precisión en costos locales: Profundizar en estudios de cadena de suministro para reducir incertidumbre en CAPEX.

**4. Conclusiones**

El análisis del desempeño energético, económico y ambiental de los Colectores Cilindro-Parabólicos (PTC) y los Colectores Compuestos Parabólicos (CPC) bajo las condiciones de radiación solar cubanas (613 W/m², 25% difusa) permitió llegar a las siguientes conclusiones:

1. Desempeño Energético

Los CPC demuestran mayor eficiencia en el aprovechamiento de la radiación difusa, recurso abundante en Cuba (39% del total), lo que se traduce en una producción térmica más estable a lo largo del año en comparación con los PTC, que dependen en mayor medida de la radiación directa.

En el caso de estudio (Comedor Central Universitario), los CPC presentaron un mejor rendimiento en días nublados o con alta dispersión atmosférica, típicos del clima cubano.

2. Viabilidad Económica

Menor costo de inversión (CAPEX): Los CPC presentan un rango de costos de instalación (130–900 USD/m²) más bajo que los PTC (262–1,263 USD/m²), lo que los hace más accesibles para implementaciones a mediana escala en el sector industrial cubano.

Costo nivelado de calor (LCOH) más competitivo: En todos los escenarios analizados, los CPC registraron un LCOH entre 12 y 63 USD/MWh, mientras que los PTC oscilaron entre 29 y 69 USD/MWh, lo que refuerza la ventaja económica de los CPC.

Mayor resiliencia financiera: Los CPC mantuvieron indicadores positivos (VAN > 0, TIR > 15%) en un rango más amplio de costos de instalación (hasta ~380 USD/m²), mientras que los PTC solo fueron viables en escenarios con CAPEX inferior a 330 USD/m².

Retorno de inversión más atractivo: La Tasa Interna de Retorno (TIR) de los CPC superó el 20% en instalaciones con CAPEX menor a 280 USD/m², mientras que los PTC requirieron costos inferiores a 200 USD/m² para alcanzar valores similares.

3. Impacto Ambiental

Los CPC evitarían 991 tCO₂ en 25 años (10% más que los PTC), reforzando su alineación con políticas de descarbonización industrial.

**5. Referencias bibliográficas**

(IDAE), I. P. L. D. Y. A. D. L. E. 2025. Guía técnica: sistemas solares térmicos para procesos industriales.

(IEA), I. E. A. 2022. Industrial heat demand by temperature range, 2018.

(MITECO), M. P. L. T. E. Y. E. R. D. 2016. Factores de emisión de CO₂ y coeficientes de paso a energía primaria de diferentes fuentes de energía final consumidas en el sector de edificios en España.

(ONEI), O. N. D. E. E. I. 2025. Anuario Estadístico de Cuba 2024.

AGENCY, I. E. 2025. Global Energy Review 2025.

ATLAS, G. S. 2023. *Mapa interactivo de energía solar* [Online]. Available: <https://globalsolaratlas.info/map?c=11.609193,8.4375,3> [Accessed].

BANCO MUNDIAL 2023. Global Solar Atlas.

BRANDÃO, B. B., DUTRA, J. C. C. & GUERRERO, J. R. H. 2024. Choosing a standard CPC by analyzing thermal performance in regions with climatic and geographical disparities. *Observatorio de la Economía Latinoamericana,* 22**,** 64.

CARRIÓN-CHAMBA, W., MURILLO-TORRES, W. & MONTERO-IZQUIERDO, A. 2022. Una revisión de los últimos avances de los colectores solares térmicos aplicados en la industria. *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología***,** 59-73.

CENGEL, Y. A. & CIMBALA, J. M. 2006. *Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones,* México DF, McGraw Hill.

DUFFIE, J. A. & BECKMAN, W. A. 2013. *Solar engineering of thermal processes*, John Wiley & Sons.

GAIA SOLAR CO., L. 2023. Structure Drawing Of Gaia Solar Receiver Tube [Diagram]. *In:* GAIA SOLAR CO., L. (ed.).

KUMAR, D., GHARAT, P. V., DALVI, V. H., GAVAL, V., DESHMUKH, S. P., PANSE, S. V. & JOSHI, J. B. 2024. Design and development of a novel and cost effective modified Compound parabolic trough collector. *Energy Conversion and Management,* 306**,** 118285.

LABORATORY, N. R. E. 2024. PVWatts Calculato.

MAYADA A. ALAMR, M. R. G. 2022. A review of Parabolic Trough Collector (PTC): Application and Performance Comparison. *International Journal of Applied Sciences & Development*.

OMGBA, B. S., LONTSI, F., MAYI, O. T. S., EMANI, G., BOUPDA, O., BATAMBOCK, S. & MOUANGUE, R. M. 2025. DEVELOPMENT AND THERMODYNAMIC ANALYSIS OF A NOVEL PARABOLIC TROUGH COLLECTOR (PTC) BASED SOLAR-ASSISTED AIR CONDITIONING SYSTEM FOR ENVIRONMENTAL AND ENERGY EFFICIENCY INTERESTS. *International Journal of Thermofluids***,** 101324.

OUALI, H. A. L., TOUILI, S., MERROUNI, A. A. & MOUKHTAR, I. 2024. Artificial neural Network-Based LCOH estimation for concentrated solar power plants for industrial process heating applications. *Applied Thermal Engineering,* 236**,** 121810.

PRAMUANG, S. & EXELL, R. 2007. The regeneration of silica gel desiccant by air from a solar heater with a compound parabolic concentrator. *Renewable energy,* 32**,** 173-182.

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.

QUIBEN, J. M. 2005. *Experimental and analytical study of two-phase pressure drops during evaporation in horizontal tubes.* Verlag nicht ermittelbar.

REVE, A. D. S. E. E. E. Y. E. E. M. E. R. 2023. El coste de los proyectos de energía termosolar (CSP) cayó de 0,38 USD/kWh a 0,118 USD/kWh, una disminución del 69 %”.

SOLARG. 2024. *Optimización de la inclinación y orientación de placas solares* [Online]. Available: <https://solarg.org/montaje-de-placas-solares/optimizacion-de-la-inclinacion-y-orientacion/> [Accessed].

SUNEARTHTOOLS.COM 2024. Cálculo de la posición del sol en el cielo para cada lugar en cualquier momento del día.

**6-Anexos:**

Tabla 1. Comparación económico-financiera de sistemas CPC y PTC bajo distintos escenarios de inversión. Análisis de viabilidad considerando CAPEX (130–1,280 USD/m²), OPEX y métricas de desempeño financiero

