



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MÉXICO



FACULTAD DE INGENIERÍA

“Monitoreo y análisis de mediciones térmico-ópticas del concentrador solar CPC para degradación acelerada de micro plásticos”

REPORTE DE RESIDENCIA DE INVESTIGACIÓN
PARA OBTENER EL GRADO DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA
MECÁNICA

PRESENTA:
CARLOS HÉCTOR GONZÁLEZ CALDERÓN BERNAL

ASESOR:
DRA. MIRIAM SÁNCHEZ POZOS

REVISORES:
DRA. JOANNA JUAREZ MICHUA
DR. JULIO CESAR MARÍN AGUILAR

Toluca, Estado de México, diciembre 2025

Resumen

En el presente trabajo se realizó el monitoreo y análisis experimental del comportamiento térmico-óptico de dos concentradores solares tipo CPC (Concentrador Parabólico Compuesto), denominados CPC 1 y CPC 2, comparando su desempeño con un parámetro de referencia correspondiente al ambiente. El objetivo principal fue evaluar la respuesta de estos dispositivos ante condiciones reales de operación, mediante la medición simultánea de irradiancia solar global, infrarroja (IR), ultravioleta A (UVA), ultravioleta B (UVB) y temperatura, tanto en el interior de los concentradores como en el exterior.

Las mediciones se llevaron a cabo en la azotea del edificio “D” de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México, en la ciudad de Toluca, durante el periodo de enero a abril, dentro del intervalo horario de mayor irradiación solar (11:00 a 16:00 h). Para ello, se emplearon radiómetros y termopares tipo K, junto con un sistema de adquisición de datos en tiempo real, lo que permitió obtener una base de datos representativa del comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones climáticas.

A partir de los datos obtenidos, se determinó el rendimiento térmico-óptico de los concentradores mediante las ecuaciones correspondientes, evaluando la relación entre la energía radiante incidente y los niveles de temperatura alcanzados. Los resultados muestran que ambos CPC respondieron de manera coherente a los niveles de irradiancia, registrando incrementos significativos de temperatura respecto al ambiente, y evidenciando la influencia directa de las condiciones meteorológicas en su desempeño. Asimismo, el análisis comparativo entre CPC 1, CPC 2 y el ambiente permitió identificar tendencias generales y diferencias en su comportamiento térmico-óptico.

Este estudio aporta información relevante para la caracterización y optimización de concentradores solares tipo CPC, y forma parte de un proyecto mayor enfocado en la degradación acelerada de micro plásticos mediante radiación solar concentrada, donde los resultados obtenidos servirán como base para correlacionar los niveles de radiación y temperatura con los procesos de degradación de materiales plásticos.

Contenido

LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABLAS	X
NOMENCLATURA	XII
INTRODUCCIÓN	XIV
Duración y descripción del cargo desempeñado	XV
Importancia del problema.....	XVI
Objetivos del proyecto.....	XVIII
Competencias y aprendizajes adquiridos.....	XVIII
1. Antecedentes	1
1.1. El sol.....	1
1.2. Distribución espectral de la radiación Solar	1
1.3. Radiación solar	2
1.4. Posición al Sol	3
1.5. Geometría del movimiento del Sol.....	3
1.5.1. Coordenadas horarias	3
1.5.2. Coordenadas horizontales.....	4
1.6. Concentradores	5
1.7. Elementos de los Colectores Solares de Concentración	8
1.8. Concentrador Parabólico Compuesto.....	9
1.8.1. Geometría del CPC	10
1.8.2. Principales aplicaciones de los CPC	12
1.8.3. Temperaturas alcanzables.....	13
1.8.4. Balance energético y evaluación de la eficiencia de los CPC's	13
2. Equipos y Métodos.....	16
2.1. Equipos.....	16
2.2. Mantenimiento y Monitoreo del CPC	18
2.2.1. Descripción de las Actividades	19
2.3. Informe de actividades.....	21

2.3.1. Mantenimiento y acondicionamiento de dos concentradores solares CPC's	21
3. Resultados	29
3.1. Mes de Enero – CPC 1	29
3.2. Mes de Enero – CPC2	32
3.3. Mes de Febrero – CPC1	38
3.4. Mes de Febrero – CPC2	41
3.5. Mes de Febrero – Ambiente	44
3.6. Mes de Marzo – CPC1	47
3.7. Mes de Marzo – CPC2	50
3.8. Mes de Marzo – Ambiente	53
3.9. Mes de Abril – CPC1	56
3.10. Mes de Abril – CPC2	59
3.11. Mes de Abril – Ambiente	62
4. Comparativa de mediciones con base climatológica	65
4.1. Comportamiento General de CPC1, CPC2 y Ambiente (enero)	65
4.2. Comparativa con base de datos de NASA (enero)	68
4.3. Comportamiento General de CPC1, CPC2 y Ambiente (febrero)	69
4.4. Comparativa con base de datos de NASA (febrero)	70
4.5. Comportamiento General de CPC1, CPC2 y Ambiente (marzo)	72
4.6. Comparativa con base de datos de NASA (marzo)	74
4.7. Comportamiento General de CPC1, CPC2 y Ambiente (abril)	75
4.8. Comparativa con base de datos de NASA (abril)	77
5. Discusión	78
5.1. Cálculo de rendimiento térmico-óptico del CPC	81
5.2. Enero	81
5.3. Febrero	83
5.4. Marzo	85
5.5. Abril	87
Conclusión y trabajo futuro	89

Referencias	90
Anexos	92
A.1. Hoja de Cálculo de Valores 2025.....	93
A.2 Hoja de Cálculo de Valores Recolectados en febrero 2025.....	95
A.3 Hoja de Cálculo de Valores Recolectados en marzo 2025	97
A.4 Hoja de Cálculo de Valores Recolectados en abril 2025	99
A.5 Hoja de Cálculo de Valores NASA POWER vs Medidos	101
A.6 Como usar NASA POWER Data Access Viewer (DAV)	103
A.7 Orientación teórica y práctica del CPC	105

LISTA DE FIGURAS

Figura 0.1 Representación en donde se encuentran los concentradores (CPC 1 y CPC 2)	XVII
Figura 1.1. Espectro de las ondas electromagnéticas (Francisco,2018).	2
Figura 1.2. Rotación respecto Sol y Tierra modificado de (Ibáñez,2005).	3
Figura 1.3. (a) Ángulo cenital θ_z , pendiente β , ángulo de azimut de la superficie γ y ángulo de azimut solar para una superficie γ_s . (b) Vista en planta que muestra el ángulo de azimut solar γ_s de Duffie & Beckman, 2013.	5
Figura 1.4. a) Vista general de planta termo-solar de torre central con campo de heliostatos, b) cilindro-parabólico CCP y c) Concentrador Parabólico Compuesto (CPC).	6
Figura 1.5. Tipos de colectores solares de concentración: (a) absorbedores tubulares con reflector difuso posterior, (b) absorbedores tubulares con reflectores cóncavos especulares, (c) receptor plano con reflectores planos (V-trough), (d) concentrador plano multiseccional, (e) concentrador parabólico compuesto, (f) colector parabólico, (g) concentrador de Fresnel, (h) conjunto de reflectores (heliostatos) con receptor central. La concentración de luz en el receptor se logra mediante la disposición de los reflectores (espejos) alrededor del receptor (representado por círculos azules). Mark Fedkin - modificado de Duffie y Beckman, 2013.	8
Figura 1.6. Sección transversal de un CPC simétrico no truncado, adaptada de Duffie & Beckman, 2013	11
Figura 1.7. Un CPC truncado de modo que su relación de apertura y altura es aproximadamente la mitad del CPC completo.	12
Figura 1.8. Esquema del balance energético del CPC	13
Figura 2.1 a) CPC 1 y b) CPC 2	16
Figura 2.2. Radiómetros empleados	17
Figura 2.3. Marca Ahlborn Frontal y Trasero	18
Figura 2.4. Diagrama de Flujo del mantenimiento y monitoreo de los CPC's	19
Figura 2.5. Estructura metálica del CPC 2	21
Figura 2.6. Estructura metálica del CPC 2 con: a) primera aplicación y b) segunda aplicación de imprimación.	22
Figura 2.7. Dimensionamiento de las láminas reflectivas	23
Figura 2.8. Láminas reflectivas y cizalla en el laboratorio de máquinas.	24
Figura 2.9. Proceso de perforación, colocación y fijación de las láminas en la estructura del CPC2.	25
Figura 2.10. Ensamble de CPC 2.	26

Figura 2.11. Orientación del CPC 2.....	27
Figura 2.12 Concentrador Parabólico Compuesto 1 (CPC1)	28
Figura 3.1. Comportamiento promedio de las variables registradas para el CPC1 en el mes de enero: a) irradiancia global, b) infrarroja (IR), c) ultravioleta A (UVA), d) ultravioleta B (UVB), e) temperatura.	31
Figura 3.2. Comportamiento promedio de las variables registradas para el CPC2 en el mes de enero: a) irradiancia global, b) infrarroja (IR), c) ultravioleta A (UVA), d) ultravioleta B (UVB), e) temperatura.	34
Figura 3.3. Comportamiento promedio de las variables registradas para el Ambiente en el mes de enero: a) irradiancia global, b) infrarroja (IR), c) ultravioleta A (UVA), d) ultravioleta B (UVB), e) temperatura.	37
Figura 3.4. Comportamiento promedio de las variables registradas para el CPC1 en el mes de febrero: a) irradiancia global, b) infrarroja (IR), c) ultravioleta A (UVA), d) ultravioleta B (UVB), e) temperatura.	40
Figura 3.5. Comportamiento promedio de las variables registradas para el CPC2 en el mes de febrero: a) irradiancia global, b) infrarroja (IR), c) ultravioleta A (UVA), d) ultravioleta B (UVB), e) temperatura.	43
Figura 3.6. Comportamiento promedio de las variables registradas para el Ambiente en el mes de febrero: a) irradiancia global, b) infrarroja (IR), c) ultravioleta A (UVA), d) ultravioleta B (UVB), e) temperatura.	46
Figura 3.7. Comportamiento promedio de las variables registradas para el CPC1 en el mes de marzo: a) irradiancia global, b) infrarroja (IR), c) ultravioleta A (UVA), d) ultravioleta B (UVB), e) temperatura.	49
Figura 3.8. Comportamiento promedio de las variables registradas para el CPC2 en el mes de marzo: a) irradiancia global, b) infrarroja (IR), c) ultravioleta A (UVA), d) ultravioleta B (UVB), e) temperatura.	52
Figura 3.9. Comportamiento promedio de las variables registradas para el Ambiente en el mes de marzo: a) irradiancia global, b) infrarroja (IR), c) ultravioleta A (UVA), d) ultravioleta B (UVB), e) temperatura.	55
Figura 3.10. Comportamiento promedio de las variables registradas para el CPC1 en el mes de abril: a) irradiancia global, b) infrarroja (IR), c) ultravioleta A (UVA), d) ultravioleta B (UVB), e) temperatura.	58
Figura 3.11. Comportamiento promedio de las variables registradas para el CPC2 en el mes de abril: a) irradiancia global, b) infrarroja (IR), c) ultravioleta A (UVA), d) ultravioleta B (UVB), e) temperatura.	61
Figura 3.12. Comportamiento promedio de las variables registradas para el Ambiente en el mes de abril: a) irradiancia global, b) infrarroja (IR), c) ultravioleta A (UVA), d) ultravioleta B (UVB), e) temperatura.	64

Figura 4.1. Comportamiento general del mes de enero: a) CPC1, b) CPC2, c) Ambiente, d) Temperatura.	67
Figura 4.2. Comparativa con base de datos de NASA con datos medidos (enero): a) Global, b) UVA, c) UVB y d) Temperatura.	68
Figura 4.3. Comportamiento general del mes de febrero: a) CPC1, b) CPC2, c) Ambiente, d) Temperatura.	70
Figura 4.4. Comparativa con base de datos de NASA con datos medidos (enero): a) Global, b) UVA, c) UVB y d) Temperatura.	71
Figura 4.5. Comportamiento General del mes de marzo: a) CPC1, b) CPC2, c) Ambiente, d) Temperatura.	73
Figura 4.6. Comparativa con base de datos de NASA con datos medidos (enero): a) Global, b) UVA, c) UVB y d) Temperatura.	74
Figura 4.7. Comportamiento general del mes de abril: a) CPC1, b) CPC2, c) Ambiente, d) Temperatura.	76
Figura 4.8. Comparativa con base de datos de NASA con datos medidos (enero): a) Global, b) UVA, c) UVB y d) Temperatura.	77

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Radiómetros empleados	17
Tabla 3.1. Valores Promedio de irradiancia y temperatura para el CPC1 en el mes de enero.	30
Tabla 3.2. Valores Promedio de irradiancia y temperatura para el CPC2 en el mes de enero.	32
Tabla 3.3. Valores Promedio de irradiancia y temperatura para el Ambiente en el mes de enero.	35
Tabla 3.4. Valores Promedio de irradiancia y temperatura para el CPC1 en el mes de febrero.	38
Tabla 3.5. Valores Promedio de irradiancia y temperatura para el CPC2 en el mes de febrero.	41
Tabla 3.6. Valores Promedio de irradiancia y temperatura para el Ambiente en el mes de febrero.	44
Tabla 3.7. Valores Promedio de irradiancia y temperatura para el CPC1 en el mes de marzo.	47
Tabla 3.8. Valores Promedio de irradiancia y temperatura para el CPC2 en el mes de marzo.	50
Tabla 3.9. Valores Promedio de irradiancia y temperatura para el Ambiente en el mes de marzo.	53
Tabla 3.10. Valores Promedio de irradiancia y temperatura para el CPC1 en el mes de abril.	56
Tabla 3.11. Valores Promedio de irradiancia y temperatura para el CPC2 en el mes de abril.	59
Tabla 3.12. Valores Promedio de irradiancia y temperatura para el Ambiente en el mes de abril.	62
Tabla 5.1. Variación de la eficiencia óptica de los CPC's respecto al ángulo de incidencia base Alanod.	78
Tabla 5.2. Comparación del Comportamiento Térmico-Óptico de los Concentradores Solares CPC1 y CPC2.	80
Tabla 5.3. Cálculos CPC 's del mes de enero.	82
Tabla 5.4. Cálculos CPC 's del mes de febrero.	84
Tabla 5.5. Cálculos CPC 's del mes de marzo.	86
Tabla 5.6. Cálculos CPC 's del mes de abril.	88
Tabla A.0.1. Valores registrados en el mes de enero.	94
Tabla A.0.2. Valores registrados en el mes de febrero.	96
Tabla A.0.3. Valores registrados en el mes de marzo.	98

Tabla A.0.4. Valores registrados en el mes de abril.....	100
Tabla A.0.5. Comparativa de NASA vs Medidos.....	102
Tabla A.0.6 Días promedios recomendados para meses y valores de n por mes	105
Tabla A.7 Ángulos de orientación de CPC.....	106

NOMENCLATURA

Símbolo	Significado	Unidad
IR	Infrarrojo	$\frac{W}{m^2}$
UVA	Ultravioleta A	$\frac{W}{m^2}$
UVB	Ultravioleta B	$\frac{W}{m^2}$
ϕ_{inc}	Potencia radiante incidente	W
G_{global}	Irradiancia solar global medida	$\frac{W}{m^2}$
A_{ap}	Área de apertura del concentrador	m^2
Q_{rad}	Pérdidas de calor por radiación	W
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	$\frac{W}{m^2K^4}$
ε	Emisividad superficial	adimensional
A_{abs}	Área del absorbedor	m^2
T_{abs}	Temperatura del absorbedor	K
T_{amb}	Temperatura ambiente	K
Q_{conv}	Pérdidas de calor por convección	W
h_c	Coefficiente de transferencia de calor por convección	$\frac{W}{m^2K}$
Q_{loss}	Pérdida (en inglés "loss") total de calor	W
$Q_{\acute{u}til}$	Energía útil	W
η_{opt-th}	Eficiencia óptico-térmica	adimensional
$\eta_{opt-th}\%$	Eficiencia óptico-térmica porcentaje	adimensional
$\eta_{th}\%$	Eficiencia térmica global del concentrador	adimensional
ΔT	Diferencia de temperatura entre absorbedor y ambiente	K
φ	Latitud	°
β	Pendiente	°

γ	Ángulo de azimut de la superficie	°
γ_s	Ángulo de azimut solar	°
θ_z	Ángulo cenital	°
δ_s	Declinación Solar	°
δ	Declinación	°
ω	Ángulo horario	°
a_s	Ángulo acimut solar	°
θ_c	Ángulo medio de aceptación	°
C_i	Razón de concentración óptica	adimensional

INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento de la energía solar mediante concentradores tipo CPC (Concentrador Parabólico Compuesto) representa una alternativa viable para aplicaciones térmicas de baja y media temperatura, al permitir la concentración de la radiación sin necesidad de mecanismos de seguimiento.

En este trabajo se realizó un monitoreo experimental con dos concentradores solares CPC (denominados CPC 1 y CPC 2), además de un parámetro externo de referencia que corresponde al ambiente, es decir, fuera de los concentradores, con el fin de comparar el comportamiento de los concentradores frente a las condiciones climáticas reales. Para ello, se utilizaron radiómetros y termopares con los que se midieron de manera simultánea los valores de irradiancia global, infrarroja (IR), UVA, UVB y temperatura tanto en el interior de los concentradores como en el exterior.

El análisis se enfocó en registrar y evaluar el rendimiento térmico-óptico de los dos CPC's mediante las ecuaciones correspondientes, lo que permitió identificar tanto la eficiencia térmico-óptica como la eficiencia térmica dentro de los concentradores, así como las variaciones generadas por las condiciones meteorológicas durante los días de medición. De manera general, los resultados muestran que los CPC's respondieron de manera coherente a los niveles de irradiancia incidente, observándose un aumento en la temperatura interna en relación con el ambiente. Asimismo, la comparación entre CPC 1, CPC 2 y el parámetro externo ofrece una base clara para evaluar su rendimiento y establecer consideraciones para optimizaciones futuras.

En el presente trabajo se incluye el contenido de antecedentes relacionados con los concentradores solares CPC, un apartado introductorio sobre la geometría del movimiento del sol y una descripción de los diferentes tipos de concentradores. Posteriormente, se presenta información específica del CPC, incluyendo su geometría, principales aplicaciones, temperaturas alcanzables y las fórmulas utilizadas para la determinación del rendimiento térmico-óptico.

Asimismo, se presenta la duración y la descripción del cargo desempeñado, el cual correspondió al puesto de auxiliar de investigación en ingeniería mecánica. Dentro de este marco, se contextualiza la importancia del problema y se establecen los objetivos del proyecto, enfocados en monitorear y caracterizar el desempeño térmico-óptico de los CPC 1 y CPC 2.

El documento también incorpora un apartado sobre los equipos y métodos utilizados para el monitoreo, donde se describen los concentradores empleados y su funcionamiento óptico, así como las láminas reflectivas utilizadas (MIRO-SUN y MIRO 4 High Specular). Se incluye un diagrama de flujo que resume el proceso

llevado a cabo durante las sesiones de monitoreo y un informe de actividades titulado “Operaciones”, en el cual se detalla el mantenimiento y acondicionamiento de ambos CPC’s.

Dentro de las competencias y aprendizajes adquiridos durante el trabajo, se destaca el manejo de radiómetros y termopares especializados para la medición, tanto en los CPC’s como en el ambiente. Asimismo, se realizó una comparación con la base de datos climatológica de la NASA POWER, en la que se identificó que existió una correspondencia parcial con el comportamiento de los parámetros medidos experimentalmente.

En cuanto a los resultados, se presentan de manera mensual y por parámetro (CPC 1, CPC 2 y ambiente) desde enero hasta abril, siendo cada uno de ellos promedios de las mediciones completas obtenidas en ese periodo. Posteriormente, se desarrolla un análisis general del comportamiento de las tres variaciones (CPC 1, CPC 2 y ambiente) y de la temperatura, lo que permitió identificar tendencias globales.

Finalmente, se exponen las conclusiones obtenidas, tanto generales como personales, así como los principales resultados del trabajo. El documento se complementa con la bibliografía utilizada y los anexos que apoyan el desarrollo de la investigación.

Duración y descripción del cargo desempeñado

El cargo desempeñado como auxiliar de investigación de ingeniería mecánica en el Proyecto “Sistema fototérmico mecánico para degradación acelerada de micro plásticos en agua por radiación solar concentrada”, registrado en la convocatoria Proyectos de Investigación con Enfoque de Inclusión e Integridad en el Marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS/2025) con clave de registro 7219/2025CIB; dirigido por la Dra. Miriam Sánchez Pozos, investigadora adscrita a la Facultad de ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México, comprendió el periodo de septiembre 2024 a abril de 2025, efectuando actividades de monitoreo de concentradores solares CPC’s, que consistieron en:

- 1) Habilitar un CPC con absorbedor plano.
- 2) Dar mantenimiento preventivo al CPC.
- 3) Realizar las mediciones de radiación solar global, UVA, UVB e infrarroja en tiempo real, dentro y fuera del CPC.
- 4) Realizar las mediciones de temperatura en tiempo real, dentro y fuera del CPC.
- 5) Monitorear la orientación permanente del CPC.
- 6) Registrar los datos diarios de radiación y temperatura.

- 7) Graficar los datos de radiación y temperatura para analizarlos y determinar la tendencia durante los meses enero-abril.
- 8) Determinar el rendimiento térmico-óptico del CPC con base en la energía radiante que ingresa en este para ser concentrada, con respecto a los niveles de temperatura alcanzados.

Importancia del problema

Los concentradores solares fueron utilizados como dispositivos diseñados para captar y concentrar la radiación solar en un área reducida, incrementando así la densidad de energía disponible para diversos procesos, como la generación de calor, electricidad o reacciones fotoquímicas. Sin embargo, su desempeño estuvo directamente influenciado por las condiciones ambientales, entre las que destacaron la intensidad y tipo de radiación solar (ultravioleta, infrarroja y global), la nubosidad, la humedad relativa, la temperatura ambiente y la presencia de partículas en suspensión, como polvo o smog.

Dado que estos factores cambiaban constantemente a lo largo del día y de las estaciones del año, el funcionamiento térmico-óptico de los concentradores solares resultó altamente variable. Por esta razón, para caracterizar de manera precisa su comportamiento, fue imprescindible implementar un sistema de monitoreo continuo que registrara en tiempo real los niveles de radiación incidente en sus distintas longitudes de onda, así como otros parámetros ambientales.

Este monitoreo permitió evaluar la eficiencia de los concentradores bajo condiciones reales de operación y proporcionó datos fundamentales para optimizar su diseño, predecir su rendimiento a lo largo del tiempo y ajustar los procesos asociados (como el calentamiento de fluidos o la degradación de contaminantes) para que fueran lo más eficientes posible. Además, el análisis de estas mediciones contribuyó en el desarrollo de un proyecto de investigación que tiene como propósito dar seguimiento a la degradación de materiales plásticos de desecho, ya que, gracias a las mediciones y registro de las lecturas de radiación y temperatura, se podrá correlacionar los niveles de degradación de los plásticos con la intensidad de la radiación solar concentrada.

Para determinar el comportamiento térmico-óptico de los concentradores parabólicos compuestos (CPC), que se encuentran instalados en la azotea del edificio "D" de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México (Figura 0.1), en la ciudad de Toluca con una ubicación geográfica caracterizada por una latitud norte de $19^{\circ}28'26''$, longitud oeste de $99^{\circ}67'69''$ y una altitud de 2715 msnm (Alegría,2024). Se estableció un esquema de medición específico que permitió capturar de manera representativa las variaciones de radiación solar concentrada (radiación global, radiación infrarroja, radiación solar

UV) y su impacto en el funcionamiento del sistema para acelerar la degradación de los materiales plásticos de desecho.



Figura 0.1 Representación en donde se encuentran los concentradores (CPC 1 y CPC 2)

El periodo de observación se desarrolló entre los meses de enero y abril, aprovechando la incidencia solar característica de la temporada y la disponibilidad operativa del equipo. En una primera etapa, las mediciones se realizaron de lunes a viernes con el objetivo de obtener una base amplia de datos.

Las sesiones de medición se llevaron a cabo dentro del rango horario de mayor irradiación solar en la región, comprendido entre las 11:00 a.m. y las 4:00 p.m. Este intervalo fue seleccionado por concentrar el mayor potencial energético disponible, lo cual resultó fundamental para el análisis de la eficiencia térmico-óptica de los concentradores. Cabe mencionar que, en algunos días, las actividades de medición tuvieron que ser suspendidas debido a condiciones climáticas adversas, como nubosidad intensa o lluvia, que afectaban la fiabilidad de los datos recolectados.

Objetivos del proyecto

Monitorear la irradiancia y la temperatura dentro y fuera del concentrador solar CPC, por medio de termopares y radiómetros para cuantificar el desempeño térmico-óptico de éste.

A partir del objetivo general planteado, se pueden definir los siguientes objetivos específicos:

Monitorear las variables clave: Realizar mediciones continuas de temperatura e irradiancia en diferentes puntos y condiciones operativas dentro del concentrador CPC para obtener una base de datos representativa.

Caracterizar el desempeño térmico-óptico: Analizar la distribución y variabilidad de la temperatura e irradiancia en el concentrador, identificando zonas críticas y parámetros relevantes que influyen en la concentración de energía.

Competencias y aprendizajes adquiridos

Durante el desarrollo del presente proyecto se fortalecieron diversas competencias técnicas y analíticas relacionadas con el monitoreo de sistemas solares térmicos. Entre los aprendizajes más significativos destaca la capacidad de realizar mediciones experimentales de variables térmicas y ópticas clave, así como la interpretación de datos bajo condiciones ambientales reales.

Se adquirió experiencia en el uso de instrumentos especializados, como termopares tipo K para medición de temperatura y radiómetros para distintos rangos del espectro solar: irradiancia global, infrarroja (IR), ultravioleta A (UVA) y ultravioleta B (UVB). Además, se utilizó un dispositivo de adquisición de datos que permitió visualizar en tiempo real los valores registrados, lo cual facilitó el seguimiento de las condiciones durante los ensayos y la toma de decisiones en campo.

Estas actividades permitieron desarrollar habilidades para la caracterización térmica de sistemas pasivos, el manejo de equipos de laboratorio y el procesamiento de datos experimentales, enfocados en la evaluación del comportamiento de los concentradores solares tipo CPC.

1. Antecedentes

1.1. El sol

El Sol constituye la fuente primaria de energía para la Tierra, resultado de las reacciones nucleares que tienen lugar en su núcleo. Este astro emite, en apenas un segundo, más energía de la que la humanidad ha consumido a lo largo de toda su historia. Una fracción de esa energía se transfiere a nuestro planeta en forma de radiación electromagnética, cubriendo un amplio espectro que incluye longitudes de onda ultravioleta, visible e infrarroja. Se estima que la potencia solar recibida por la Tierra, medida fuera de su atmósfera, es del orden de 1.73×10^{14} kW (Ibáñez, 2005). Desde la perspectiva terrestre, el Sol se observa como un disco luminoso que subtende un ángulo aproximado de 32 minutos de arco, y completa una rotación sobre su eje cada cuatro semanas. Esta percepción angular y la intensidad de la radiación varían ligeramente en función de la latitud, la hora del día y las condiciones atmosféricas, factores que influyen directamente en la captación de energía solar.

1.2. Distribución espectral de la radiación Solar

La radiación solar que alcanza la superficie terrestre no es uniforme ni en intensidad ni en composición espectral. Esta energía se distribuye en diferentes longitudes de onda que conforman lo que se conoce como distribución espectral de la radiación solar. Aproximadamente un 99% de esta radiación se encuentra dentro del rango espectral de 280 nm a 3000 nm, abarcando principalmente tres regiones: ultravioleta (UV), visible e infrarroja (IR).

Dentro del espectro UV, que representa cerca del 5% de la energía solar total, se distinguen las bandas UVA (315–400 nm) y UVB (280–315 nm). Aunque esta fracción es relativamente pequeña en términos energéticos, su importancia es significativa en procesos fotoquímicos y en estudios de degradación de materiales, debido a su alta energía fotónica. Por otra parte, la región infrarroja (700–3000 nm) representa más del 50% de la energía solar incidente y es responsable del efecto térmico asociado a la radiación solar.

En este trabajo, el enfoque del monitoreo se centró en cuatro componentes fundamentales: radiación UVA, UVB, infrarroja (IR) y radiación global. La elección de estas bandas respondió al interés por comprender no solo la magnitud total de la radiación disponible, sino también cómo se distribuye y varía espectralmente, ya que cada banda puede incidir de manera distinta sobre el comportamiento térmico-óptico de los concentradores solares parabólicos compuestos (CPC).

Para facilitar la comprensión del alcance espectral considerado, se incluye la Figura 1.1, representativa del espectro electromagnético, donde se puede visualizar la ubicación específica de las bandas UVA, UVB, IR, y cómo se relacionan con el rango total de la radiación solar. Esta representación gráfica será útil para contextualizar los datos obtenidos en campo y reforzar la interpretación de los resultados experimentales (Duffie & Beckman, 2013).

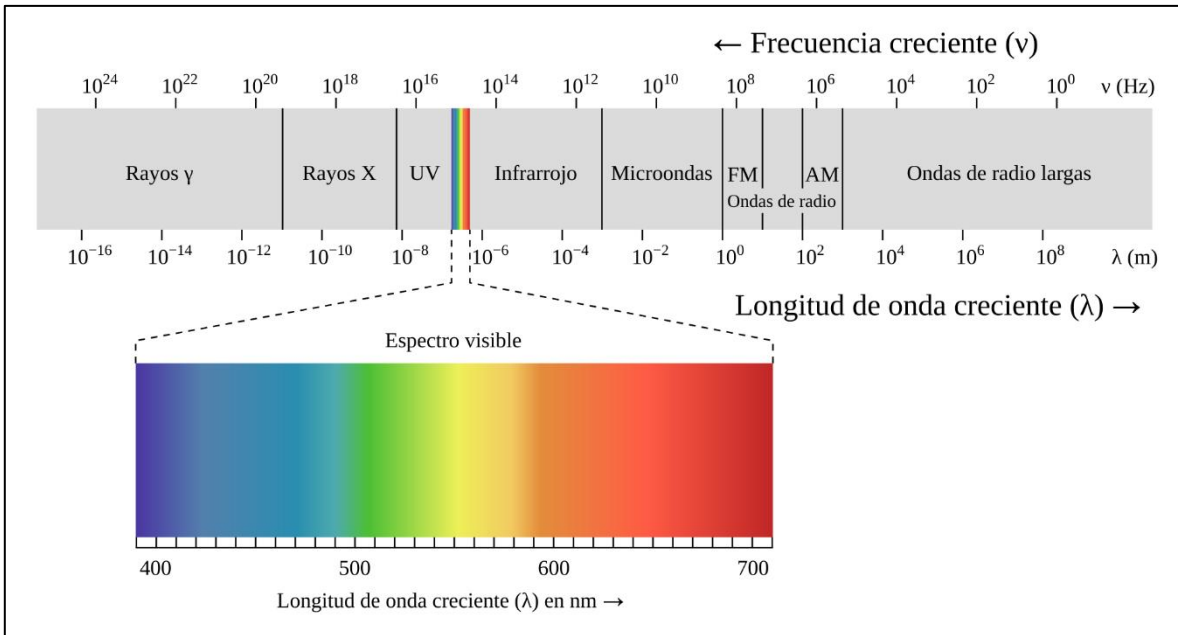


Figura 1.1. Espectro de las ondas electromagnéticas (Francisco, 2018).

1.3. Radiación solar

La irradiancia, se refiere al valor instantáneo de la energía solar que alcanza la superficie terrestre en un momento dado expresada en W/m^2 . Este parámetro es medido en tiempo real por estaciones meteorológicas automáticas, que se encargan de captar las fluctuaciones de la radiación solar. Los datos de irradiancia se almacenan, filtran y posteriormente se presentan a los usuarios en formatos estandarizados, como irradiación horaria, diaria o mensual, facilitando el acceso a información precisa y actualizada, un claro ejemplo sería la base de datos que proporciona la NASA.

Estas herramientas permiten acceder a registros históricos de irradiación para obtener promedios anuales, los cuales representan las condiciones promedio de radiación para un determinado periodo o ubicación. Esto es determinante si se desea realizar un análisis detallado del comportamiento de los sistemas solares a largo plazo.

1.4. Posición al Sol

Además de las condiciones atmosféricas, otro factor que determina la cantidad de radiación que incide sobre un captador solar es la posición aparente del Sol en el cielo, influye directamente en la cantidad de radiación que incide sobre un captador solar. Este fenómeno se debe a la traslación de la Tierra en una órbita elíptica alrededor del Sol y al hecho de que nuestro planeta se comporta como un giróscopo, manteniendo su eje de rotación inclinado unos 23.45° ($23^\circ 27'$) respecto al plano de la eclíptica (Figura 1.2). Esta inclinación es responsable de las estaciones y de la variación en la trayectoria solar diaria y anual. Comprender este movimiento es esencial para optimizar la orientación de los sistemas solares y maximizar su rendimiento energético a lo largo del año.

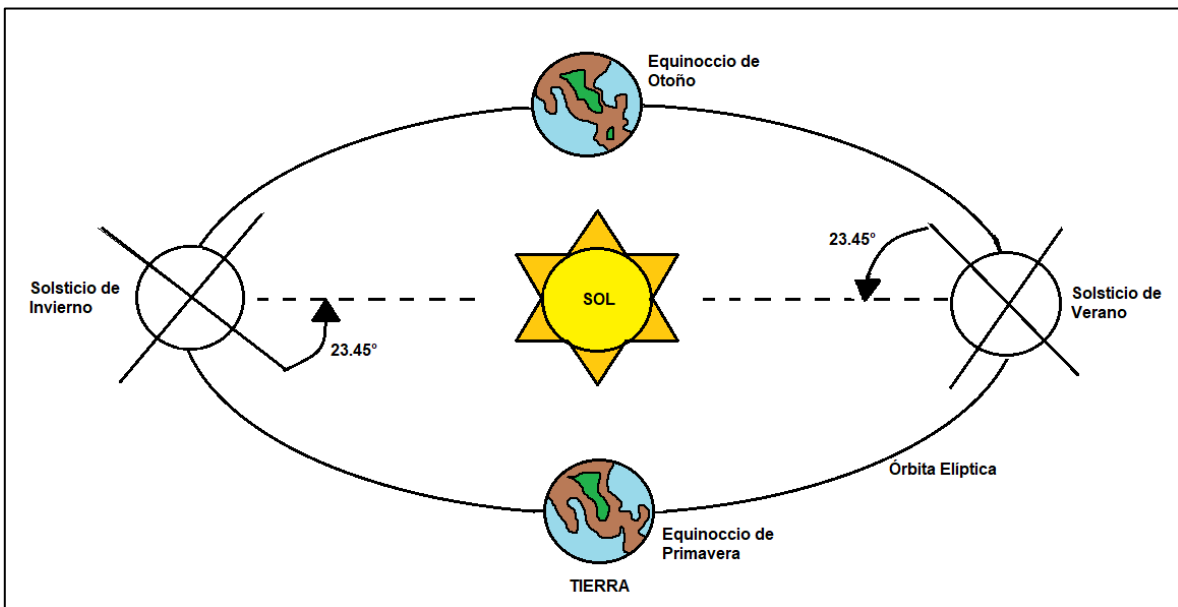


Figura 1.2. Rotación respecto Sol y Tierra modificado de (Ibáñez,2005).

Conocer la trayectoria solar y las variaciones estacionales permite optimizar el rendimiento de los concentradores solares y otros dispositivos de aprovechamiento energético, alineando sus superficies de captura de manera perpendicular a la dirección de la irradiación para aprovechar la mayor cantidad posible de esta.

1.5. Geometría del movimiento del Sol

1.5.1. Coordenadas horarias

De acuerdo con la Figura 1.2 tenemos:

- δ_s Declinación solar ($-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ$) : Ángulo entre el plano del ecuador y la línea que conecta el centro de la Tierra con el Sol. Varía a lo

largo del año debido a la inclinación del eje terrestre, y determina la altura máxima diaria del Sol.

- ω Ángulo horario: Medida angular del desplazamiento del Sol respecto al meridiano local, que indica su posición este-oeste durante el día. Cada hora es igual a 15° ; en las mañanas es negativo y tardes es positivo.

1.5.2. Coordenadas horizontales

La posición del Sol relativa a un receptor terrestre puede describirse mediante varios ángulos clave (Figura 1.3) en la geometría solar, son:

- a_s Ángulo acimut solar ($^\circ$): Elevación angular del Sol sobre el horizonte, determinante para calcular la radiación directa que incide sobre una superficie.
- Latitud geográfica ($-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$): Distancia angular de un punto de la superficie terrestre respecto al ecuador, medida hacia el norte o sur. Es fija para una ubicación y condiciona la trayectoria solar.
- Pendiente o Inclinación de superficie ($0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$): Ángulo entre el plano de un captador solar y el plano horizontal, clave para optimizar la captación de radiación según la época del año.
- Ángulo de azimut de la superficie ($-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$): Dirección horizontal del Sol medida desde el norte geográfico hacia el punto donde se encuentra su proyección sobre el horizonte.
- Ángulo de azimut solar (γ_s): Desplazamiento angular desde el sur de la proyección de la radiación de haz en el plano horizontal. Los desplazamientos al este del sur son negativos y los al oeste del sur son positivos.
- Ángulo cenital (θ_z): el ángulo entre la vertical y la línea hacia el sol, es decir, el ángulo de incidencia de la radiación solar en una superficie horizontal. Complementario de la altitud solar, representa el ángulo entre la vertical del observador y la posición del Sol.

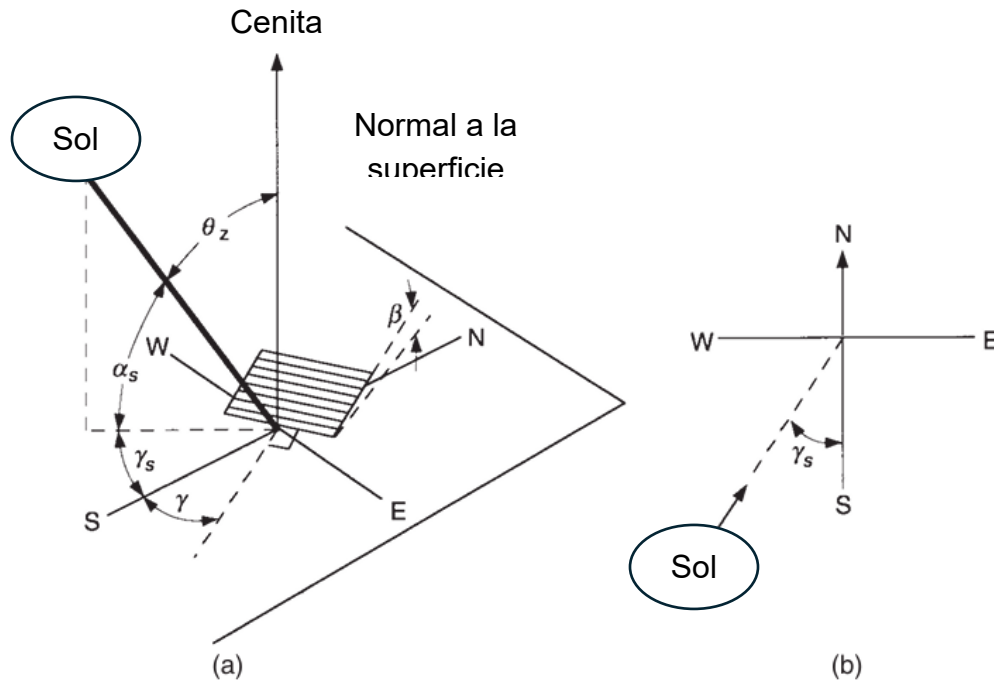


Figura 1.3. (a) Ángulo cenital (θ_z), pendiente (β), ángulo de azimut de la superficie (γ) y ángulo de azimut solar para una superficie (γ_s). (b) Vista en planta que muestra el ángulo de azimut solar (γ_s) de Duffie & Beckman, 2013.

En el Anexo G y en el apartado del Informe de Actividades correspondiente a la Operación 08, se menciona el procedimiento mediante el cual se orienta el concentrador, tanto de forma teórica, utilizando la geometría del movimiento del sol, y como de manera experimental, mediante la verificación y ajuste óptico bajo condiciones reales de radiación.

1.6. Concentradores

La esencia de la tecnología de concentración radica fundamentalmente en la reducción del dispositivo receptor de la radiación solar incidente debido a la posibilidad de concentrar la luz. El proceso se realiza mediante la interposición de un dispositivo óptico entre la fuente de radiación y la superficie de absorción capaz de concentrar la radiación incidente sobre una superficie más pequeña que la superficie de entrada, este dispositivo óptico es denominado comúnmente concentrador.

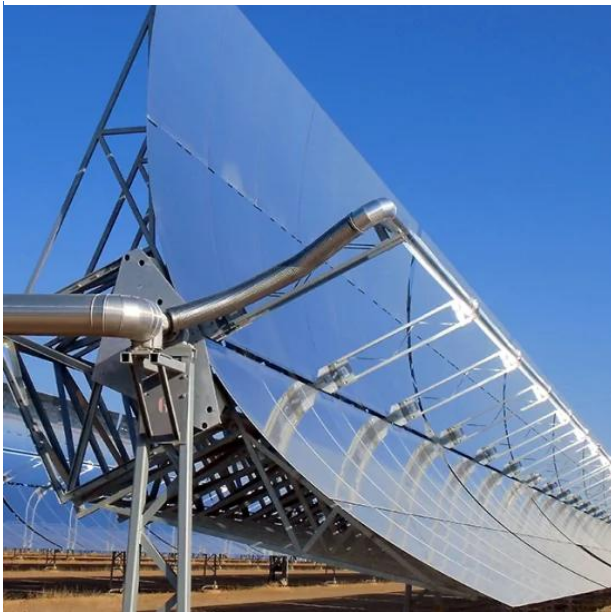
En los sistemas de aprovechamiento térmico, el uso de esta tecnología viene de la mano del aumento de densidad energética conseguida y, por lo tanto, del aumento de la temperatura de salida del fluido de trabajo. La temperatura de servicio se ve también aumentada por la reducción de las pérdidas del colector, debido fundamentalmente a la reducción de superficie disipada. A menor superficie

absorbadora, menor pérdida de calor, en comparación con el colector plano a la misma temperatura.

Los dispositivos de concentración más utilizados en sistemas térmicos son los CPC (Concentrador Parabólico Compuesto), los cilindro-parabólico CCP y los denominados generadores de torre central (Figura 2.4).



a)



b)



c)

Figura 1.4. a) Vista general de planta termo-solar de torre central con campo de heliostatos, b) cilindro-parabólico CCP y c) Concentrador Parabólico Compuesto (CPC).

Desde un punto de vista mecánico, los sistemas concentradores presentan un problema adicional a los sistemas estacionarios, a excepción de los sistemas de muy baja concentración, todos los demás necesitan ser orientados al sol, de manera que la radiación solar directa sea dirigida hacia la superficie captadora.

El colector o receptor es el elemento del sistema donde la radiación es absorbida y convertida a algún otro tipo de energía, incluye el absorbedor en los sistemas térmicos, las cubiertas transparentes y el aislante o el disipador térmico. El concentrador, es el sistema óptico encargado de dirigir la radiación hacia el colector. La abertura del sistema concentrador es el elemento que determina la máxima extensión del haz que llega a la imagen proveniente de un punto objeto situado en el eje del sistema.

Dado los diferentes elementos que incluye el generador de concentración y la variabilidad de cada uno de estos elementos, resulta una amplia tipología de generadores de concentración que habitualmente son clasificados a través de la descripción de cada elemento que lo forman: tipo de concentrador, tipo de colector y tipo de seguimiento solar (Figura 1.5).

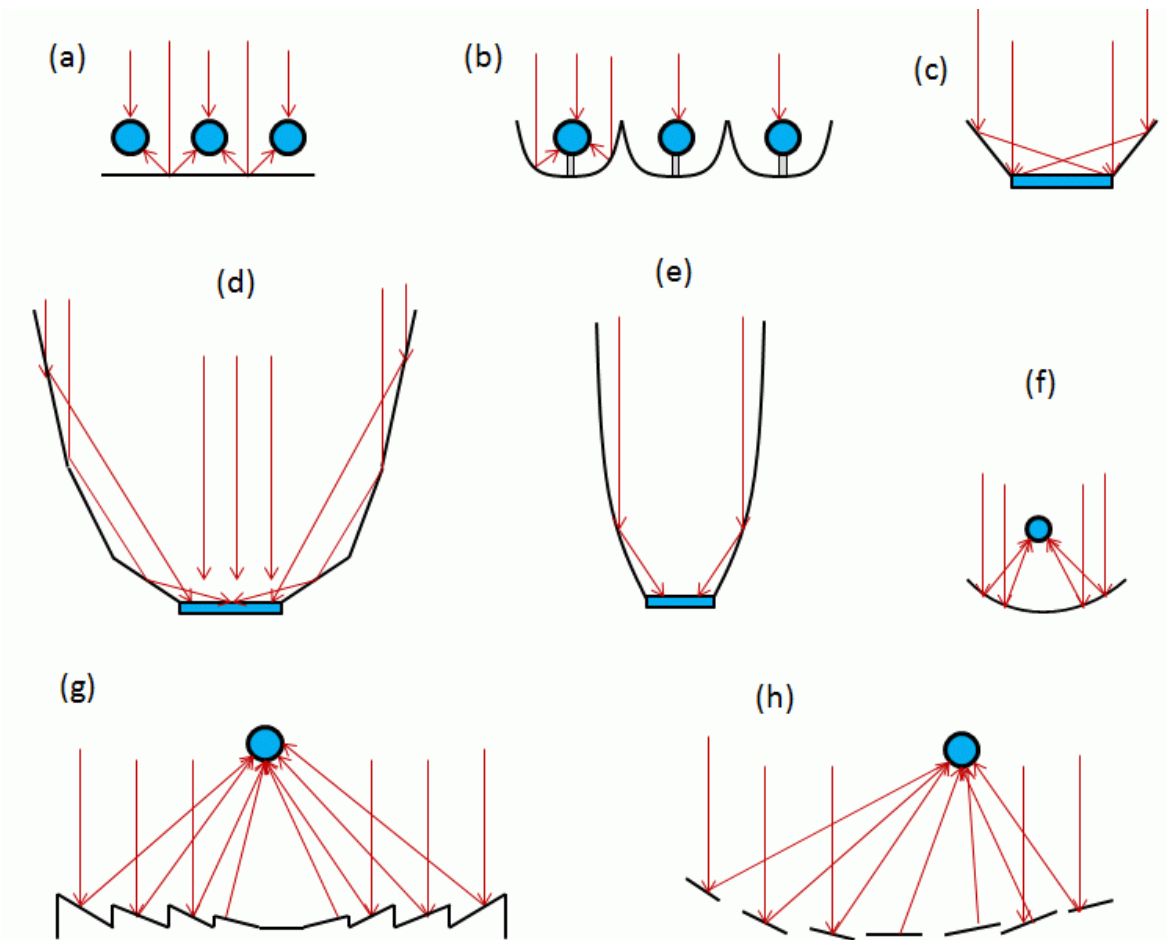


Figura 1.5. Tipos de colectores solares de concentración: (a) absorbedores tubulares con reflector difuso posterior, (b) absorbedores tubulares con reflectores cóncavos especulares, (c) receptor plano con reflectores planos (V-trough), (d) concentrador plano multiseccional, (e) concentrador parabólico compuesto, (f) colector parabólico, (g) concentrador de Fresnel, (h) conjunto de reflectores (heliostatos) con receptor central. La concentración de luz en el receptor se logra mediante la disposición de los reflectores (espejos) alrededor del receptor (representado por círculos azules). Mark Fedkin - modificado de Duffie y Beckman, 2013.

1.7. Elementos de los Colectores Solares de Concentración

En los sistemas de conversión de energía solar, es fundamental contar con un receptor que transforme la radiación solar en otra forma de energía. Este receptor puede ser un absorbedor térmico, que capta la energía para calentar un fluido, o una célula fotovoltaica, que convierte la luz en electricidad mediante el efecto

fotovoltaico. La cantidad de energía disponible para la conversión depende de la radiación solar que incide por unidad de área en el convertidor.

Para aumentar la energía utilizable, existen dos estrategias principales: ampliar la escala del sistema, lo que implica un mayor número de receptores y, por ende, más espacio y costos; o concentrar el flujo de radiación solar mediante dispositivos ópticos entre la fuente de luz (el sol) y el receptor. Este último enfoque utiliza colectores solares que integran un concentrador y un receptor, y se caracterizan por su apertura, es decir, el área por la cual la luz solar accede al sistema.

Los concentradores más comunes son los reflectores (espejos) y los refractores (lentes), que modifican y redirigen los rayos solares incidentes. Existen diversos diseños de ópticas de concentración, como los colectores con espejos de formas variadas, que se emplean en la conversión de energía solar a térmica (Figura 1.5). La concentración de la luz solar implica aumentar el flujo de energía al enfocarla en un área más pequeña, lo que conlleva beneficios como alcanzar temperaturas más altas en los colectores térmicos, reducir las pérdidas de calor debido a una menor superficie receptora y lograr una mayor tasa de conversión de energía en un área más reducida.

Los concentradores solares se dividen en dos categorías principales: los de imagen y la no generan imagen. Los primeros generan una imagen óptica del sol en el receptor, mientras que los segundos dispersan la luz solar sobre toda el área del receptor sin formar una imagen específica. Los concentradores no imagen suelen tener una relación de concentración menor (inferior a 10) en comparación con los de imagen.

Entre las tecnologías más adoptadas a escala industrial para la generación de energía solar por concentración se encuentran el colector parabólico, la torre solar, el plato parabólico y el reflector lineal de Fresnel. Estas tecnologías permiten alcanzar temperaturas de concentración elevadas, aproximadamente 400 °C para los colectores parabólicos y hasta 650 °C para las torres solares. (EME 812, s.f.).

1.8. Concentrador Parabólico Compuesto

Los concentradores parabólicos compuestos (CPC's) son dispositivos ópticos pasivos utilizados para concentrar la radiación solar sobre un receptor lineal. Su principio de funcionamiento se basa en la reflexión interna de los rayos solares dentro de una cavidad formada por superficies curvadas que maximizan el número de reflexiones hacia el receptor, incluso cuando la radiación incide en un rango amplio de ángulos. La eficiencia óptica η_{opt} de estos sistemas depende de diversos factores, entre los cuales se encuentran la reflectancia del material reflector, la geometría del CPC, el número de reflexiones que realiza un rayo dentro del concentrador y, de manera crítica, el ángulo de incidencia de la radiación solar.

Es posible construir colectores solares con capacidad de concentración que funcionen de manera estacional o durante todo el año, con requerimientos mínimos de seguimiento solar, evitando así complicaciones mecánicas. Estos dispositivos, conocidos como concentradores sin formación de imagen, tienen la capacidad de reflejar hacia el receptor toda la radiación incidente en la abertura, dentro de un amplio rango de ángulos de incidencia. Este rango se conoce como ángulo de aceptación del concentrador. Toda la radiación que incide dentro de dicho ángulo, incluida la radiación difusa, puede ser aprovechada por el colector.

Entre los tipos más representativos de concentradores sin formación de imagen se encuentran los concentradores parabólicos compuestos (CPC, por sus siglas en inglés). Estos dispositivos tienen su origen en experimentos de física de altas energías, específicamente en la detección de radiación Cherenkov, como lo documentaron Hinterberger y Winston en 1966. Paralelamente, Baranov y Melnikov desarrollaron dispositivos similares en la entonces URSS. Posteriormente, Winston (1974) reconoció el potencial de los CPC para aplicaciones en energía solar, lo que motivó estudios más detallados por parte de autores como Welford y Winston (1978), así como Rabl (1976a, 1976b), entre otros, (Duffie & Beckman, 2013).

1.8.1. Geometría del CPC

El diseño básico de un CPC se basa en una configuración bidimensional en forma de canal o trinchera, aunque también se han desarrollado modelos tridimensionales. Cada lado del CPC está formado por una parábola. En el caso de la parábola del lado derecho, su eje y foco están orientados de manera que el borde opuesto de la abertura sirve como punto de referencia geométrica. Cada parábola se extiende hasta que su superficie se vuelve paralela al eje del CPC.

El ángulo formado entre el eje del CPC (Figura 1.6) y la línea que conecta el foco de una de las parábolas con el borde opuesto de la abertura se denomina ángulo medio de aceptación θ_c . Cuando el reflector es perfectamente especular, cualquier rayo de radiación solar que incida dentro del intervalo de $\pm\theta_c$ será reflejado hacia el receptor ubicado en la base del concentrador.

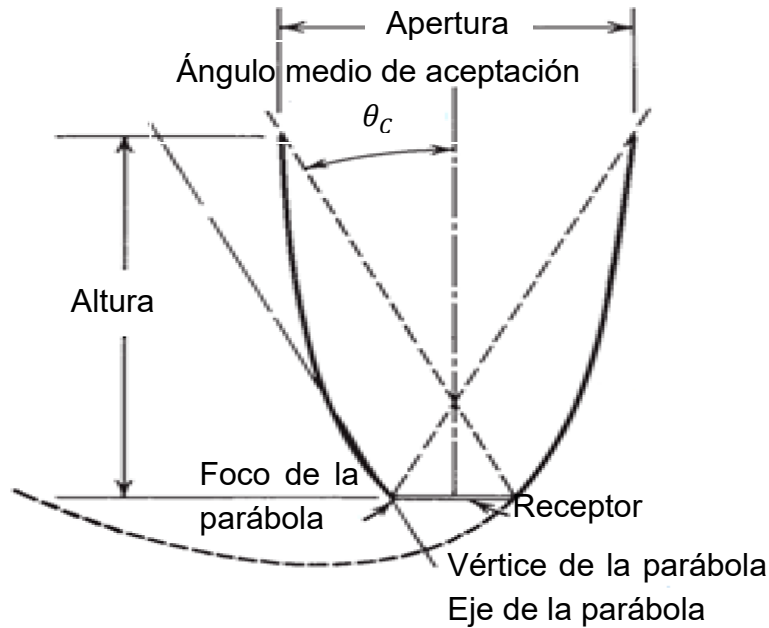


Figura 1.6. Sección transversal de un CPC simétrico no truncado, adaptada de Duffie & Beckman, 2013

Para un sistema bidimensional ideal mediante la ecuación 1.1.

$$C_i = 1/\text{sen } \theta_c \quad (1.1)$$

En este contexto, un CPC ideal es aquel cuyas parábolas no presentan errores geométricos ni pérdidas ópticas. Por lo tanto, un CPC ideal con un ángulo medio de aceptación de $23,5^\circ$ tendrá una razón de concentración óptica de $C_i = 2,51$, y uno con un semiángulo de aceptación de $11,75^\circ$ tendrá $C_i = 4,91$.

En los extremos superiores de las parábolas en el CPC, las superficies son paralelas al plano central de simetría del concentrador. Por lo tanto, los extremos superiores de los reflectores contribuyen poco a la radiación que llega al absorbedor, y el CPC puede truncarse para reducir su altura de h a h' , con el consiguiente ahorro en el área del reflector, pero con un mínimo sacrificio en el rendimiento. La Figura 1.7 muestra un CPC truncado (Duffie & Beckman, 2013). Los concentradores parabólicos compuestos (CPC) se utilizan ampliamente en sistemas solares térmicos debido a su capacidad para captar tanto radiación directa como difusa, sin necesidad de mecanismos de seguimiento solar activos. Esta versatilidad los hace

particularmente útiles en aplicaciones donde la simplicidad mecánica, la eficiencia térmica y el aprovechamiento de recursos solares variables son esenciales.

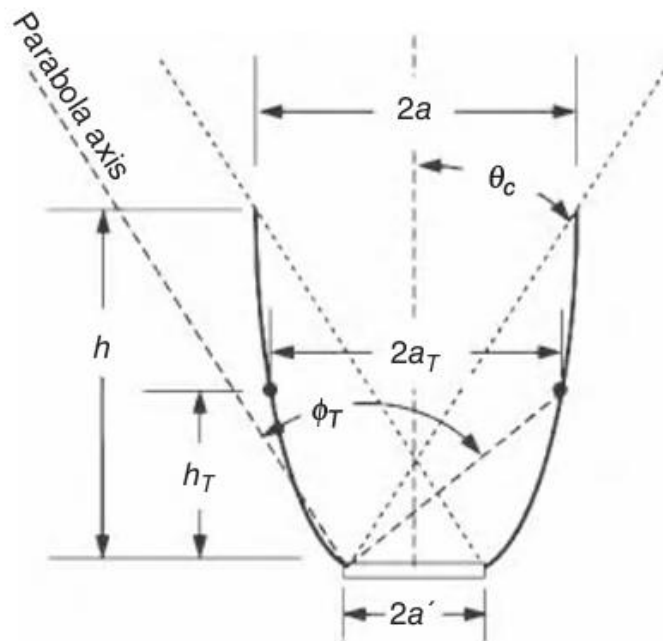


Figura 1.7. Un CPC truncado de modo que su relación de apertura y altura es aproximadamente la mitad del CPC completo.

1.8.2. Principales aplicaciones de los CPC

Entre sus aplicaciones más comunes destacan:

- Calentamiento de agua para uso doméstico o industrial, en sistemas termo sifónicos o de circulación forzada.
- Procesos de secado solar, especialmente en la industria agroalimentaria.
- Calentamiento de aire para climatización o procesos térmicos.
- Generación de vapor de baja a media presión, útil en procesos industriales o en sistemas híbridos (solar-gas).
- Sistemas de refrigeración por absorción, donde el calor generado se utiliza para accionar ciclos térmicos de enfriamiento.
- Desalinización de agua mediante evaporación solar.
- Precalentamiento de fluidos en plantas termoeléctricas, reduciendo el consumo de combustibles fósiles.

1.8.3. Temperaturas alcanzables

El rango de temperatura que puede alcanzar un CPC depende directamente de su razón de concentración, del tipo de fluido de trabajo y del aislamiento térmico del sistema. En general:

- Un CPC de baja concentración (relación menor a 5) puede alcanzar temperaturas entre 80 °C y 200 °C, lo cual es adecuado para calefacción, calentamiento de agua y procesos térmicos de baja temperatura.
- CPC's de media concentración ($5 < C_i < 10$) pueden lograr hasta 300 °C, dependiendo del diseño, los materiales reflectivos y las condiciones ambientales (Rabl, O'Gallagher & Winston, 1979).

1.8.4. Balance energético y evaluación de la eficiencia de los CPC's

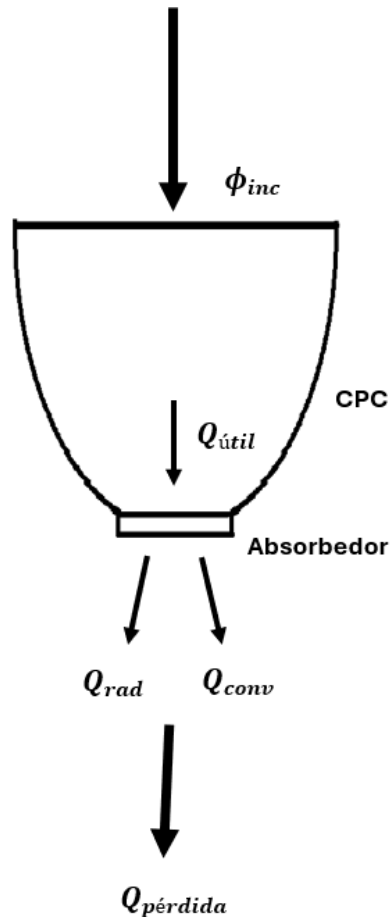


Figura 1.8. Esquema del balance energético del CPC

El análisis del comportamiento térmico-óptico de los concentradores solares compuestos parabólicos (CPC) se fundamenta en el balance de energía entre la radiación incidente y las pérdidas de calor hacia el ambiente (Figura 1.8).

La potencia radiante incidente en la apertura del concentrador se determina mediante la ecuación 1.2.

$$\phi_{inc} = G_{global} \cdot A_{ap} \quad [W] \quad (1.2)$$

Donde G_{global} es la irradiancia solar global medida (W/m^2) y A_{ap} el área de apertura del concentrador (m^2) (Duffie & Beckman, 2013).

Las pérdidas de calor se dividen en dos mecanismos principales: radiación y convección. La pérdida por radiación desde la superficie absorbente hacia el ambiente se calcula mediante la ley de Stefan–Boltzmann se determina mediante la ecuación 1.3.

$$Q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_{abs} \cdot (T_{abs}^4 - T_{amb}^4) \quad [W] \quad (1.3)$$

Donde ε es la emisividad superficial (adimensional), $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$ es la constante de Stefan-Boltzmann, A_{abs} el área del absorbedor (m^2), T_{abs} la temperatura del absorbedor (K) y T_{amb} la temperatura ambiente (K) (Kalogirou, 2014).

La pérdida por convección natural se determina mediante la ecuación 1.4.

$$Q_{conv} = h_c \cdot A_{abs} \cdot (T_{abs} - T_{amb}) \quad [W] \quad (1.4)$$

Donde h_c es el coeficiente de transferencia de calor por convección ($W/m^2 \cdot K$) (Hasanuzzaman, 2022).

De esta forma, la pérdida total de calor se determina mediante la ecuación 1.5.

$$Q_{pérdida} = Q_{rad} + Q_{conv} \quad [W] \quad (1.5)$$

Donde Q_{rad} son las pérdidas radiactivas y Q_{conv} son las pérdidas convectivas. La magnitud representa la energía solar que el sistema no logra aprovecha. (Flamant, 2022).

En el presente trabajo, al no existir extracción de fluido térmico, la energía útil se aproxima a partir del balance entre la radiación incidente y las pérdidas se determina mediante la ecuación 1.6. (Flamant, 2022).

$$Q_u = \phi_{inc} - Q_{pérdida} \quad [W] \quad (1.6)$$

La eficiencia térmica se determina mediante la ecuación 1.7.

$$\eta_{th} = Q_u / \phi_{inc} \quad (1.7)$$

Donde Q_u es la energía útil y ϕ_{inc} es la energía incidente (Flamant, 2022).

La eficiencia térmica–óptica (η_{opt-th}) se determinó mediante el método experimental simplificado, en el que se asume que, en régimen estacionario, la eficiencia resulta de la relación entre la energía útil obtenida y la radiación incidente en la apertura se determina mediante la ecuación 1.8.

$$\eta_{opt-th} = Q_{pérdida} / \phi_{inc} \quad (1.8)$$

Este método se empleó en lugar de la formulación estándar (Duffie & Beckman ,2013), que requiere el valor de la eficiencia óptica ideal (η_{opt}). La elección responde a la naturaleza experimental del presente estudio, donde se

dispuso de datos directos de radiación y temperatura medidos mediante radiómetros y termopares, lo que permite una estimación práctica de la eficiencia bajo condiciones reales de operación.

Para el cálculo de las pérdidas por radiación se consideró la emisividad superficial del material reflectivo empleado en los concentradores. Con valor de $\varepsilon = 0.03$, este valor corresponde a superficies altamente reflectivas de aluminio anodizado, cuya baja emisividad en el rango infrarrojo reduce significativamente las pérdidas radiactivas del absorbedor hacia el ambiente (Valladares, s.f.). De esta manera, al establecer una emisividad de $\varepsilon = 0.03$ en el modelo térmico de los concentradores, se reducen las pérdidas radiactivas estimadas. Este parámetro se incorpora directamente en el balance energético para cuantificar las pérdidas totales y, con ello, determinar la energía útil disponible en el absorbedor. En consecuencia, la eficiencia térmica–óptica calculada refleja no solo la calidad óptica de los concentradores, sino también la influencia de las características superficiales del material reflectivo en el comportamiento térmico global del sistema.

El coeficiente de transferencia convectiva h_c se estableció en $10 (W/m^2 \cdot K)$, valor representativo de condiciones de convección natural y brisa ligera en superficies expuestas al aire libre. Este valor se encuentra dentro del rango típico reportado en la literatura para colectores solares ($5\text{--}20 (W/m^2 \cdot K)$) y es ampliamente utilizado como estimación inicial en estudios experimentales de balance térmico (Duffie & Beckman, 2013; Incropera & DeWitt, 2007). La adopción de $h_c = 10$ permite simplificar el cálculo de las pérdidas convectivas. Cabe señalar que este parámetro puede variar en función de la geometría del absorbedor y de las condiciones de viento locales; sin embargo, para los fines del presente análisis resulta adecuado como aproximación de primer orden.

2. Equipos y Métodos

Los métodos y técnicas de investigación permiten obtener, analizar y sistematizar datos confiables que fundamenten el desarrollo científico y tecnológico. En el campo de la ingeniería, estas herramientas son esenciales para evaluar el comportamiento y desempeño de sistemas y dispositivos, así como para validar hipótesis y optimizar procesos.

2.1. Equipos

En el presente estudio, la medición representa una etapa fundamental para evaluar la eficiencia óptica del Concentrador Parabólico Compuesto (CPC). Este dispositivo está diseñado para concentrar la radiación solar sobre una superficie receptora, permitiendo su aprovechamiento térmico u óptico. Para el análisis, se trabajará con dos CPC's instalados en la azotea del edificio "D" de la Facultad de Ingeniería. (Figura 2.1)

Equipos utilizados:

- **Concentradores Parabólicos Compuestos (CPC):** Se utilizaron dos CPC's con características constructivas similares. Ambos están equipados con una cubierta protectora fabricada con un marco de aluminio y rejilla, diseñada para proteger las láminas reflectoras de condiciones climáticas adversas, como la lluvia o la acumulación de polvo. Es importante señalar que las cubiertas solo se colocan cuando los dispositivos no están en funcionamiento; durante las mediciones se retiran para permitir el libre paso de la radiación solar.



Figura 2.1 a) CPC 1 y b) CPC 2

En el presente estudio se compararon dos CPC que difieren principalmente en el tipo de lámina reflectiva utilizada: el CPC 1, que incorpora la lámina MIRO-SUN® reflective 90 weatherproof, y el CPC 2, que emplea la lámina MIRO® 4 High Specular (4400GP), ambas fabricadas por Alanod GmbH & Co. KG, empresa especializada en recubrimientos reflectivos de alta eficiencia.

La lámina MIRO-SUN® se compone de una base de aluminio de alta pureza (99,99%) con un tratamiento de anodizado y una capa reflectiva metálica aplicada mediante Physical Vapor Deposition (PVD), protegida finalmente por un lacado resistente a la intemperie. Presenta una reflectancia solar total del orden del 90 % y una reflectancia de luz total aproximada del 95%, con una fracción difusa que puede alcanzar hasta un 10% (Alanod, 2023a). Esta lámina está diseñada para aplicaciones exteriores prolongadas, con alta resistencia a la radiación UV, humedad, polvo y variaciones térmicas.

Por su parte, la lámina MIRO® 4 High Specular también utiliza aluminio de alta pureza recubierto por una capa PVD con tratamiento de espejo, optimizada para maximizar la reflectancia especular. Según el fabricante, esta lámina alcanza una reflectancia total $\geq 95\%$ con una reflectancia difusa $\leq 12\%$ y un brillo especular superior a 89 (DIN 5036-3, ISO 7668) (Alanod Westlake, 2022). Su diseño está orientado a aplicaciones donde se requiere una altísima precisión óptica, como en sistemas de concentración solar de alta densidad (CPV, CSP).

- **Radiómetros:** Se emplearán sensores para medir distintas bandas espectrales de la radiación solar de la marca ALMEMO (Figura 2.2) (Tabla 2.1):

Tabla 2.1. Radiómetros empleados

Sensor / Modelo	Parámetro medido	Rango de medición	Unidad
FL A623-UVA	Radiación UVA	0 – 50	W/m ²
FL A623-UVB	Radiación UVB	0 – 5	W/m ²
FL A623-IR	Radiación infrarroja	0 – 400	W/m ²
FL A623-GS	Radiación global total	0 – 1300	W/m ²
ZA 9030-FS2 Pt100-2	Temperatura (termopar Pt100)	0 – 204	°C



Figura 2.2. Radiómetros empleados

- **Sistema de adquisición de datos:** Permite la captura precisa y continua de datos provenientes de los sensores. Este sistema facilita el almacenamiento digital y la visualización en tiempo real de las condiciones de radiación durante las pruebas (Figura 2.3).



Figura 2.3. Marca Ahlborn Frontal y Trasero

2.2. Mantenimiento y Monitoreo del CPC

Con el fin de evaluar el desempeño térmico-óptico de los concentradores solares CPC, se llevó a cabo una serie de actividades organizadas de manera secuencial. Estas incluyeron desde la habilitación inicial de los equipos y la preparación de los sensores, hasta la recolección sistemática de datos, su análisis y la representación gráfica de los resultados. A continuación, se presenta un diagrama de flujo (Figura 2.4) que resume el proceso completo llevado a cabo durante las sesiones de monitoreo.

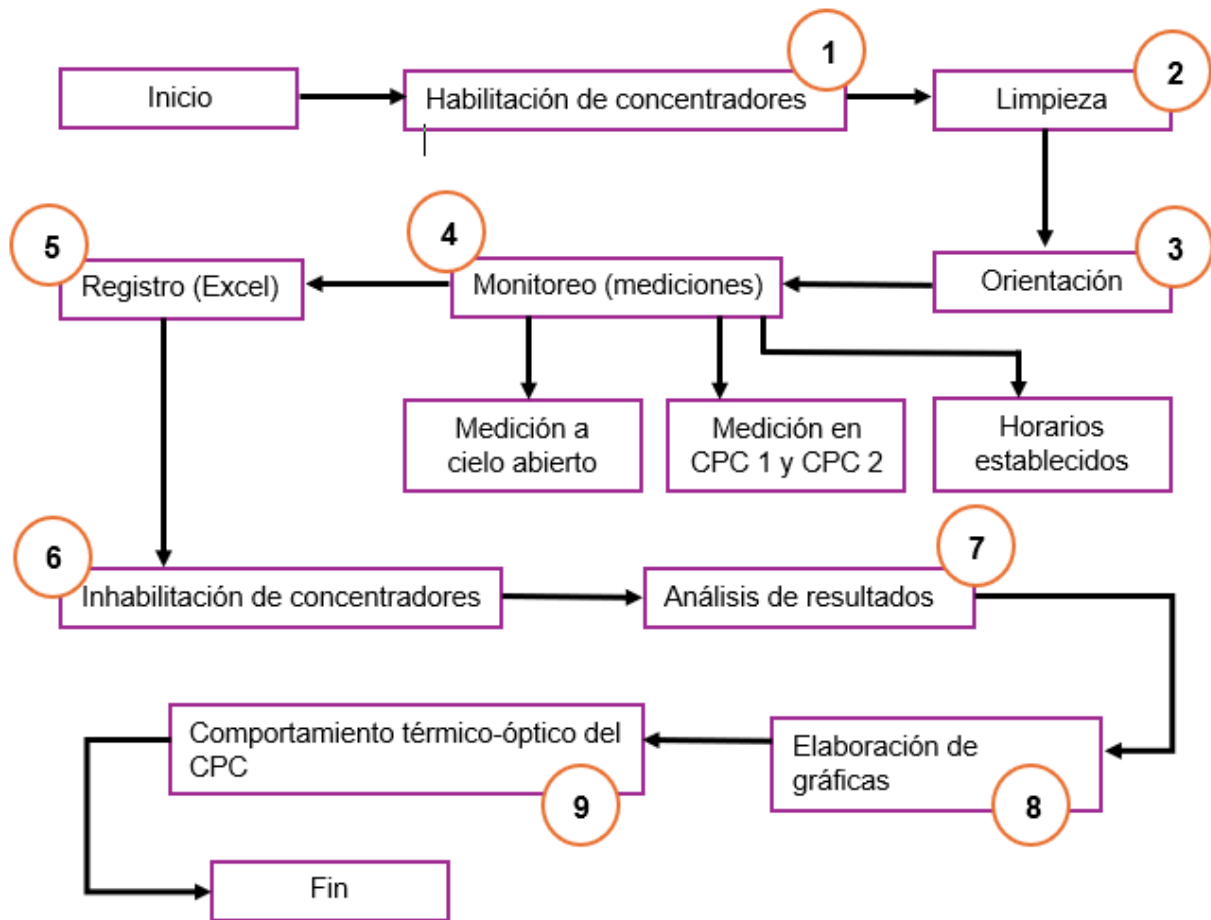


Figura 2.4. Diagrama de Flujo del mantenimiento y monitoreo de los CPC's

2.2.1. Descripción de las Actividades

1. **Habilitación de concentradores:** Se inició el proceso con la habilitación de los concentradores. Para ello, se retiraron cuidadosamente las cubiertas protectoras de los CPC 1 y CPC 2. Paralelamente, se verificó el estado físico del equipo, asegurándose de que no hubiera daños estructurales o suciedad excesiva.
2. **Limpieza:** Con el objetivo de evitar interferencias en las mediciones, se inspeccionaron visualmente las láminas reflectoras de cada CPC. En caso de presentar polvo o manchas visibles, se realizó una limpieza manual utilizando materiales no abrasivos, asegurando así condiciones óptimas para la captura de radiación.
3. **Orientación:** Una vez que los CPC estuvieron limpios y habilitados, se verificó su correcta orientación. Esto implicó el ajuste fino del ángulo y dirección de cada concentrador con respecto a la posición solar, buscando maximizar la captación de radiación solar y garantizar un alineamiento

preciso del haz reflejado. Este paso fue esencial para asegurar que las mediciones reflejaran el rendimiento real del sistema en condiciones ideales.

4. **Monitoreo (mediciones):** Las mediciones se realizaron mediante la colocación estratégica de sensores en tres configuraciones distintas: a cielo abierto, dentro del CPC 1 y dentro del CPC 2.

a) **Medición a cielo abierto:**

Los sensores se posicionaron en un área sin obstrucciones para registrar, durante un periodo de 30 segundos, los valores de cinco parámetros: radiación global, radiación UVA, radiación UVB, radiación infrarroja y temperatura ambiental. Estas mediciones establecieron una referencia base.

b) **Medición en CPC 1 y CPC 2:**

Posteriormente, se repitieron las mediciones anteriores colocando los sensores en el interior de cada CPC. Se utilizó el mismo protocolo de tiempo (30 segundos por medición) para garantizar comparabilidad entre condiciones abiertas y concentradas.

c) **Horarios establecidos:**

Las mediciones se llevaron a cabo en intervalos regulares, cada hora, dentro del rango de 11:00 a.m. a 4:00 p.m. Para cada horario se siguió una secuencia fija: medición a cielo abierto, seguida de mediciones en CPC 1 y CPC 2. Además, se registraron las condiciones atmosféricas durante cada intervalo, anotando si el cielo estaba despejado, parcialmente nublado o nublado.

5. **Registro (Excel):** Todos los valores obtenidos por los sensores fueron registrados manualmente en una libreta de campo. Posteriormente, esta información fue transcrita a una hoja de cálculo en Excel, donde se organizaron los datos por parámetro, hora y ubicación del sensor.

6. **Inhabilitación de concentradores:** Una vez concluidas las mediciones del día, se procedió a la inhabilitación de los CPC. Esto consistió en la desconexión segura del equipo de medición y la reinstalación de las cubiertas protectoras sobre los concentradores.

7. **Análisis de resultados:** Con los datos registrados, se procedió al análisis de los resultados. Se compararon los niveles de radiación y temperatura registrados a cielo abierto con los obtenidos dentro de los CPC, identificando diferencias relevantes que permitieran evaluar la eficiencia y comportamiento de los concentradores frente a diferentes tipos de radiación solar.

8. **Elaboración de gráficas:** Gráficas comparativas para cada uno de los parámetros medidos. Estas gráficas permitieron visualizar de manera clara

el comportamiento de los CPC a lo largo del día, así como identificar picos, tendencias y posibles anomalías en los datos recolectados.

9. **Comportamiento térmico-óptico del CPC:** El desempeño de cada CPC se evaluó mediante el análisis comparativo de los datos registrados con los radiómetros y los termopares. A partir de los radiómetros se determinó la radiación incidente y transmitida en el interior de cada concentrador, lo que permitió estimar la eficiencia óptica en función de la relación entre la energía radiante concentrada y la energía global incidente. De manera complementaria, los termopares permitieron registrar la evolución de la temperatura en la zona focal, con lo cual se determinó la capacidad de concentración y aprovechamiento térmico bajo distintas condiciones de irradiancia.

2.3. Informe de actividades

2.3.1. Mantenimiento y acondicionamiento de dos concentradores solares CPC's

2.3.1.1. Operación 1: Limpieza a estructura metálica del CPC 2

Se realizó la aplicación de una solución fosfatizante y desoxidante sobre las estructuras metálicas del concentrador solar. El objetivo fue remover la capa de óxido presente en las superficies, restaurar las condiciones óptimas del material y preparar la estructura para posteriores tratamientos o recubrimientos protectores. Como evidencia, se presenta la estructura en su estado inicial, donde se observa claramente la presencia de óxido antes del tratamiento (Figura 2.5).



Figura 2.5. Estructura metálica del CPC 2

2.3.1.2. Operación 2: Primera y segunda de imprimación del CPC 2

Se llevó a cabo la limpieza de las estructuras que conforman el Concentrador Parabólico Compuesto (CPC2) con el fin de eliminar polvo, residuos de óxido y otras impurezas superficiales, preparación necesaria para asegurar una correcta adherencia de la pintura. Posteriormente, se aplicó la primera imprimación color blanco (Figura 2.6), donde se evidencia el inicio del proceso de recubrimiento, y se continuó con la aplicación de una segunda capa del mismo material sobre las estructuras, con el propósito de reforzar la protección anticorrosiva y mejorar la base para los acabados finales (Figura 2.6).

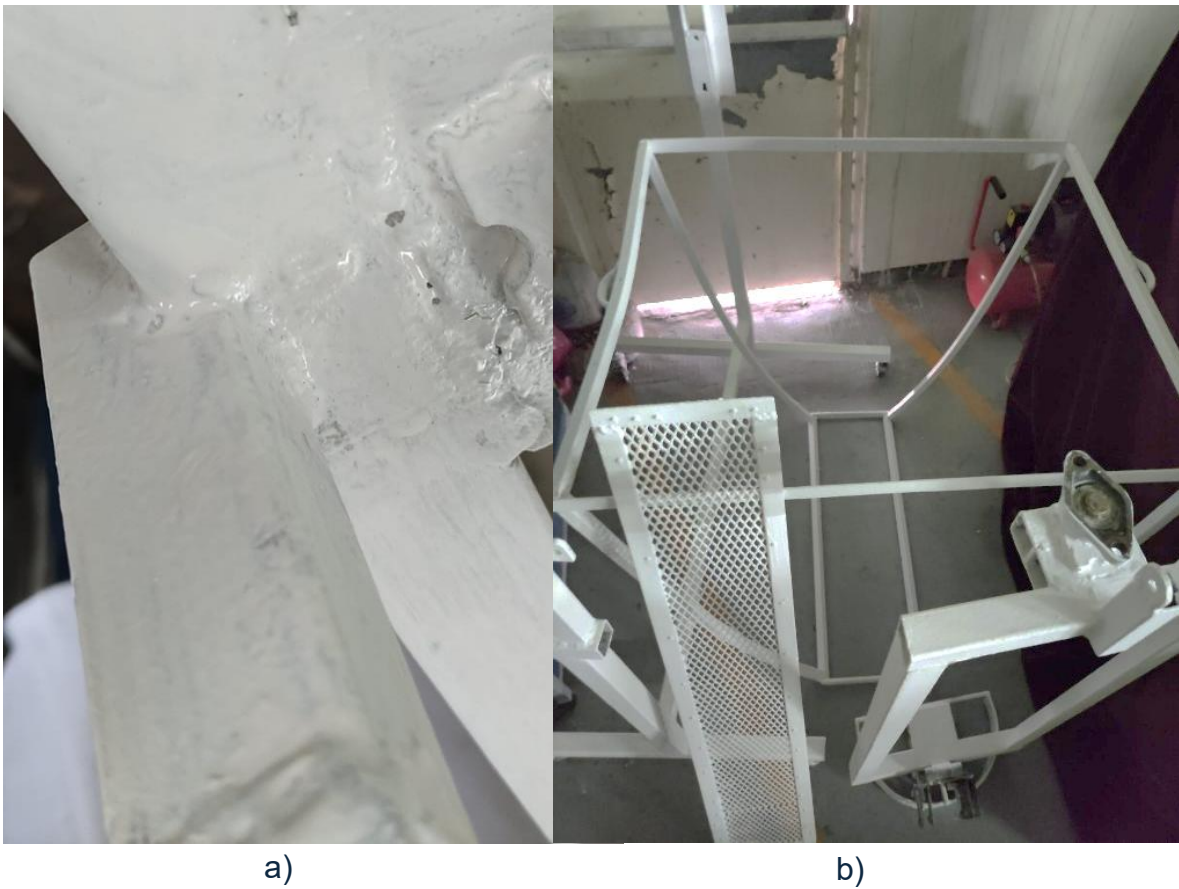


Figura 2.6. Estructura metálica del CPC 2 con: a) primera aplicación y b) segunda aplicación de imprimación.

2.3.1.3. Operación 3: Dimensionamiento de láminas reflectivas

Se trabajó con las láminas MIRO® 4 High Specular (4400GP) que serán utilizadas en el Concentrador Parabólico Compuesto (CPC2). Para adaptar las láminas a las dimensiones del concentrador, se elaboró un molde de cartón que permitió dimensionar correctamente los fragmentos que se utilizaron (Figura 2.7).



Figura 2.7. Dimensionamiento de las láminas reflectivas

2.3.1.4. Operación 4: Cortes de las láminas reflectivas

Con base en los moldes de cartón previamente elaborados, se realizó la preparación de las láminas MIRO® 4 High Specular (4400GP) para su corte. Se marcaron las dimensiones necesarias sobre la lámina (Figura 6.4), y posteriormente se procedió al corte utilizando una cizalla (Figura 6.4) en el laboratorio de máquinas de la Facultad de Ingeniería. Además, se adquirieron remaches de 1/8 de pulgada de diámetro, los cuales serán utilizados para la fijación de las láminas sobre la estructura del Concentrador Parabólico Compuesto (CPC2).



Figura 2.8. Láminas reflectivas y cizalla en el laboratorio de máquinas.

2.3.1.5. Operación 5: Remachado de lámina a estructura del CPC 2

Se llevó a cabo el proceso de fijación de las láminas MIRO® 4 High Specular (4400GP) sobre la estructura del Concentrador Parabólico Compuesto (CPC2) en el laboratorio de máquinas de la Facultad de Ingeniería. Para ello, se realizaron perforaciones en los puntos previamente marcados en las láminas utilizando un taladro con broca de 1/8 de pulgada, lo que permitió insertar los remaches y asegurar su unión con la superficie del concentrador. Posteriormente, las láminas fueron fijadas a la estructura mediante remaches de 1/8 de pulgada, empleando una remachadora equipada con punta de 3.2 mm. El objetivo de este procedimiento fue garantizar una sujeción firme y estable de las láminas reflectivas a la estructura del CPC2. En la Figura 2.9 se muestra el proceso de perforación, colocación y remachado, así como el resultado final con las láminas ya fijadas.

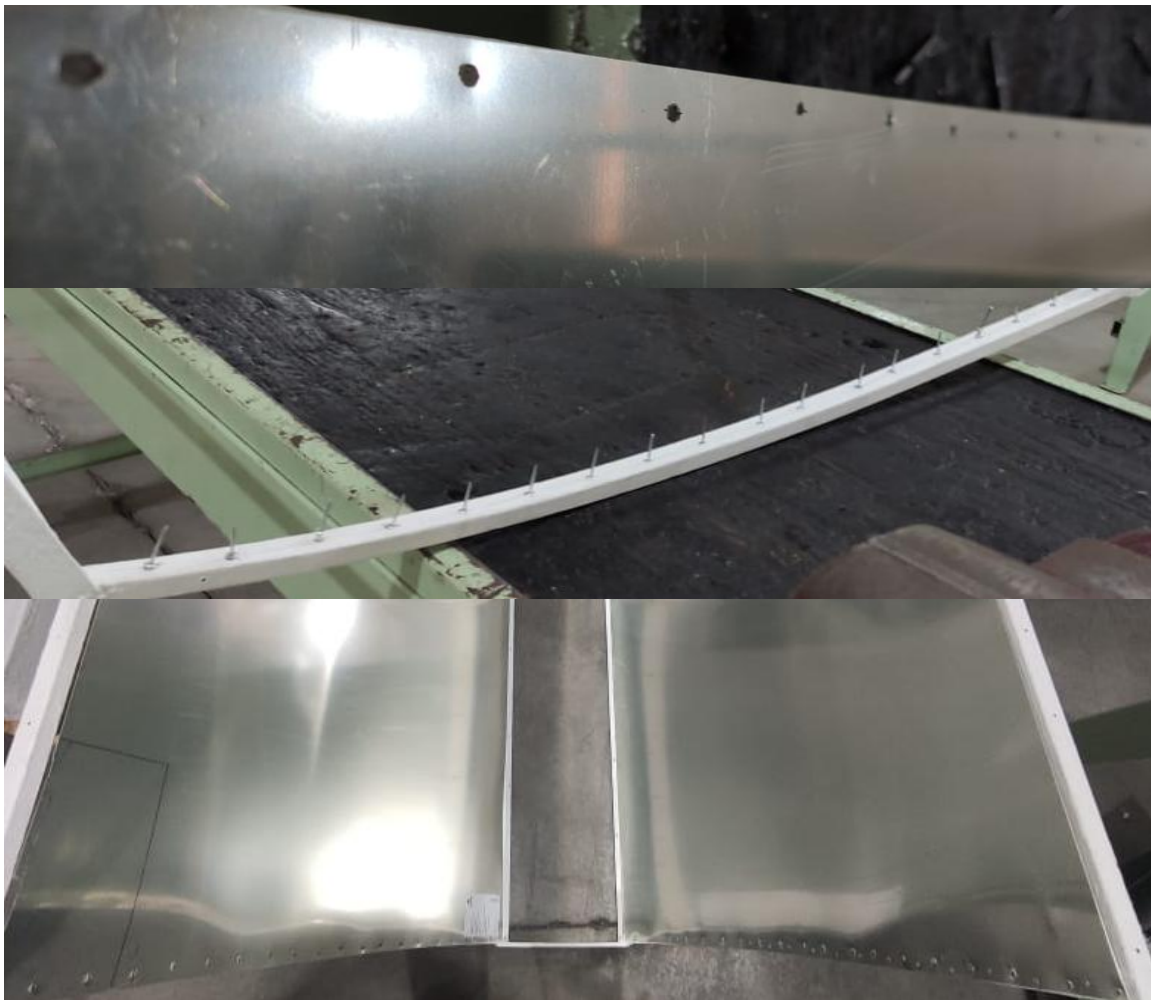


Figura 2.9. Proceso de perforación, colocación y fijación de las láminas en la estructura del CPC2.

2.3.1.6. Operación 6: Ensamble del CPC 2

Se realizó el ensamblaje final del Concentrador Parabólico Compuesto (CPC2), integrando todas las piezas estructurales y componentes previamente trabajados, incluyendo las láminas MIRO® 4 High Specular (4400GP) ya remachadas. Esta etapa marcó la culminación del proceso de construcción del dispositivo, dejando al CPC listo, como se muestra en la Figura 2.10.

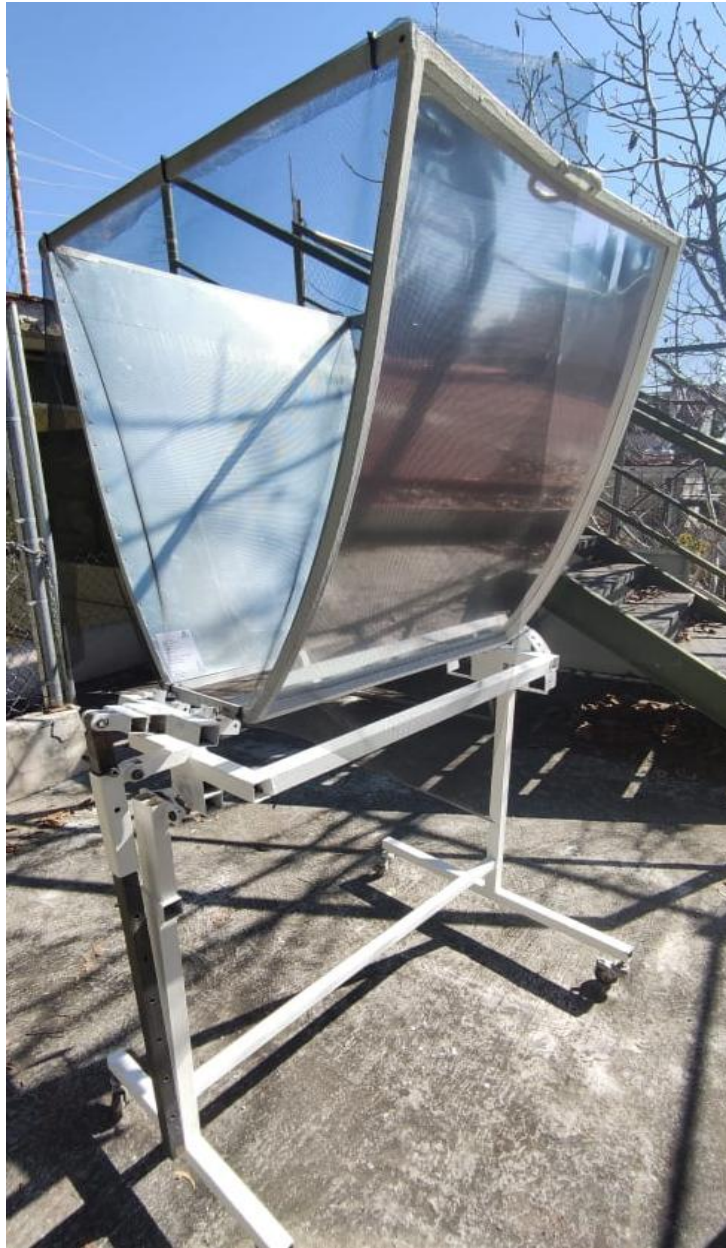


Figura 2.10. Ensamble de CPC 2.

2.3.1.7. Operación 7: Orientación del CPC 2

Se orientó (Figura 2.11) el Concentrador Parabólico Compuesto (CPC2) con el fin de visualizar la línea generada por la reflectancia sobre su superficie interna (colector), lo que permitió verificar el correcto alineamiento óptico del sistema.



Figura 2.11. Orientación del CPC 2.

2.3.1.8. Operación 8: Limpieza del CPC 1

Se comenzó a trabajar también con un segundo Concentrador Parabólico Compuesto (CPC 1), al cual se le realizó una limpieza superficial en las láminas reflectoras con el objetivo de eliminar el polvo acumulado que puede afectar negativamente la eficiencia de la reflectancia (Figura 2.12). Esta limpieza se lleva a cabo en ambos CPC cada vez que, a simple vista, se detecta suciedad sobre las superficies. Adicionalmente, el segundo concentrador contaba con una cubierta de vidrio, la cual fue removida para posteriormente instalarle una nueva cubierta fabricada con un marco de aluminio y rejilla, diseñada para ofrecer protección contra lluvias fuertes. Esta misma estructura también fue fabricada e instalada en el primer CPC, asegurando uniformidad en la protección de ambos dispositivos.



Figura 2.12 Concentrador Parabólico Compuesto 1 (CPC1)

3. Resultados

A continuación, se presentan los resultados correspondientes al comportamiento de la radiación ultravioleta (UVA y UVB), infrarroja (IR), global y la temperatura ambiente, medidos durante los diferentes meses del estudio. Para facilitar el análisis, los datos se agrupan por mes y se expresan como promedios horarios, permitiendo identificar patrones y variaciones en el comportamiento de las variables en función del tiempo.

En primer lugar, se describe el comportamiento de cada parámetro (UV, IR, global y temperatura) mes por mes, con el objetivo de identificar tendencias estacionales o variaciones relevantes en la intensidad de la radiación solar y sus efectos térmicos. Posteriormente, se realiza una comparación entre los valores medidos fuera del sistema y aquellos obtenidos dentro de los concentradores solares CPC 1 y CPC 2, lo cual permite analizar la eficiencia de concentración y el efecto térmico generado por cada uno.

Este análisis comparativo permite observar el grado de incremento o atenuación de las distintas radiaciones dentro del concentrador, así como la capacidad de los CPC para elevar la temperatura respecto al entorno. Los resultados son fundamentales para evaluar el desempeño térmico-óptico de cada dispositivo y su posible aplicación en procesos que requieran aprovechamiento de energía solar concentrada.

3.1. Mes de Enero – CPC 1

Durante el mes de enero, se registraron mediciones horarias entre las 11:00 a. m. y las 4:00 p. m. en el concentrador solar CPC1 (Tabla 3.1). A continuación, se describe el comportamiento promedio de las variables registradas: irradiancia global, infrarroja (IR), ultravioleta A (UVA), ultravioleta B (UVB) y temperatura.

La irradiancia global promedio mostró su valor más alto a las 11:00 a. m., con un promedio de 927.86 W/m^2 , disminuyendo progresivamente a lo largo del día hasta llegar a 417.33 W/m^2 a las 4:00 p. m. Esto indica que la captación de energía solar fue mayor en las horas cercanas al mediodía, aunque en este caso, el pico se alcanzó antes, posiblemente debido a condiciones ambientales como nubosidad o cambios de orientación solar.

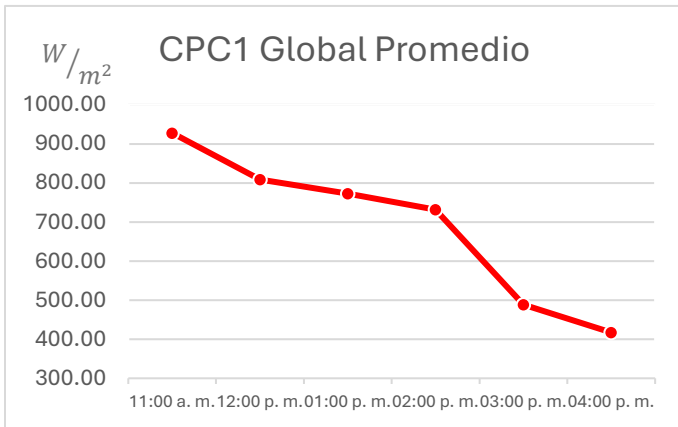
La irradiancia IR promedio siguió un patrón similar, comenzando con 466.55 W/m^2 a las 11:00 a. m. y descendiendo a 351.27 W/m^2 hacia las 4:00 p. m. Esto refleja una pérdida gradual de energía térmica disponible en el espectro infrarrojo conforme avanzó la tarde.

En cuanto a la radiación UVA promedio, se observó un comportamiento relativamente constante entre las 11:00 a. m. y la 1:00 p. m. (entre 55.29 y 50.48 W/m²), con una ligera disminución posterior hasta llegar a 45.90 W/m² a las 4:00 p. m. La radiación UVB, en cambio, alcanzó su valor máximo a la 1:00 p. m. (2.92 W/m²), siendo significativamente mayor respecto a otras horas del día, lo que puede deberse al ángulo solar y la menor dispersión atmosférica en ese momento. La temperatura promedio dentro del CPC1 mostró una tendencia descendente clara conforme avanzaron las horas. Inició con un valor de 51.68°C a las 11:00 a. m. y disminuyó hasta 29.63°C a las 4:00 p. m., lo cual se corresponde con la reducción progresiva de la irradiancia global y el IR. Esta variación térmica evidencia la capacidad del CPC para captar y conservar calor solar durante las horas de mayor intensidad solar.

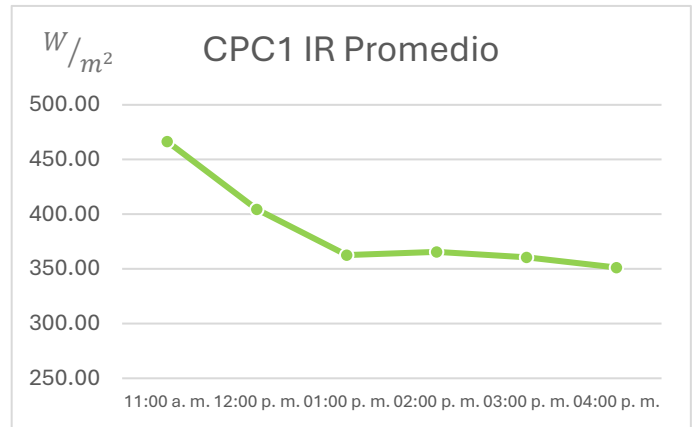
En resumen, el comportamiento promedio de las variables en enero indica que el concentrador CPC1 tuvo su mayor eficiencia de captación energética entre las 11:00 a. m. y la 1:00 p. m., tanto en términos de irradiancia como de temperatura interna. Durante el mes de enero, el comportamiento térmico-óptico del CPC1 muestra una clara correlación entre la radiación solar y la temperatura interna del dispositivo. La irradiancia global alcanza su punto máximo poco antes del mediodía, seguido de una disminución progresiva hasta las 4:00 p. m. Esta tendencia también se refleja en la irradiancia infrarroja, lo que indica una pérdida gradual de energía térmica conforme avanza el día. En cuanto a la irradiancia UVA, se mantiene relativamente constante hasta la 1:00 p. m., para después descender ligeramente, lo cual está relacionado con el cambio en el ángulo de incidencia solar. La irradiancia UVB, por su parte, presenta un pico pronunciado alrededor del mediodía, lo cual es característico de este tipo de radiación debido a su mayor concentración cuando el sol se encuentra en su punto más alto. Finalmente, la temperatura interna promedio del CPC1 disminuye de manera continua a lo largo del periodo analizado, en concordancia con la reducción en la intensidad de la radiación solar, evidenciando el impacto directo de esta sobre el calentamiento del sistema (Figura 3.1).

Tabla 3.1. Valores Promedio de irradiancia y temperatura para el CPC1 en el mes de enero.

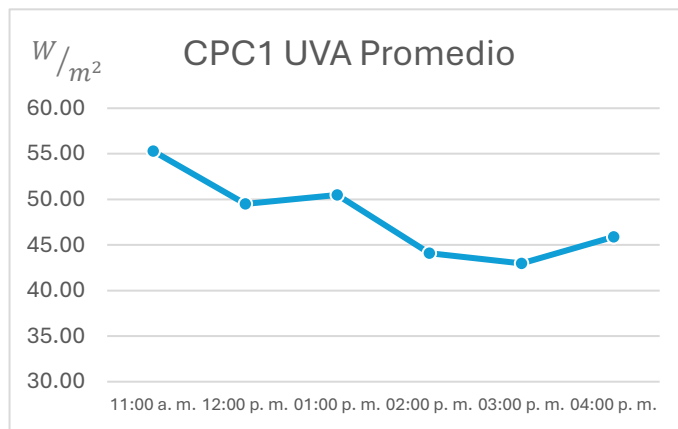
Hora	Valores Promedio de Irradiancia y temperatura				
	CPC1 Global [W/m ²]	CPC1 IR [W/m ²]	CPC1 UVA [W/m ²]	CPC1 UVB [W/m ²]	CPC1 Temp [°C]
11:00 a. m.	927.86	466.55	55.29	2.48	51.68
12:00 p. m.	808.43	404.63	49.50	2.46	46.48
01:00 p. m.	772.85	362.58	50.48	2.92	43.40
02:00 p. m.	731.45	365.64	44.11	2.69	41.23
03:00 p. m.	488.83	360.69	42.98	0.35	30.95
04:00 p. m.	417.33	351.27	45.9	0.29	29.63



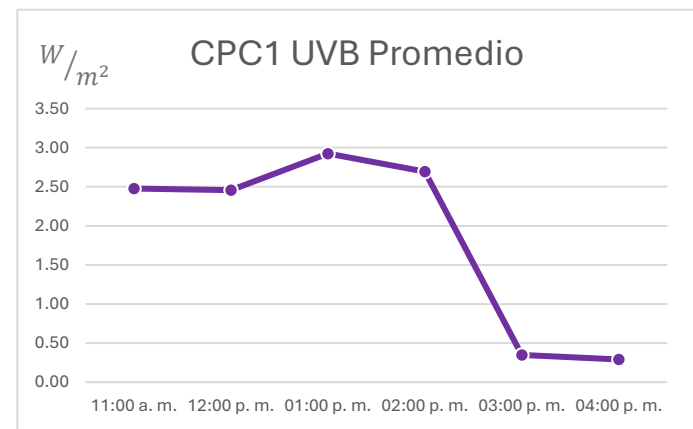
a)



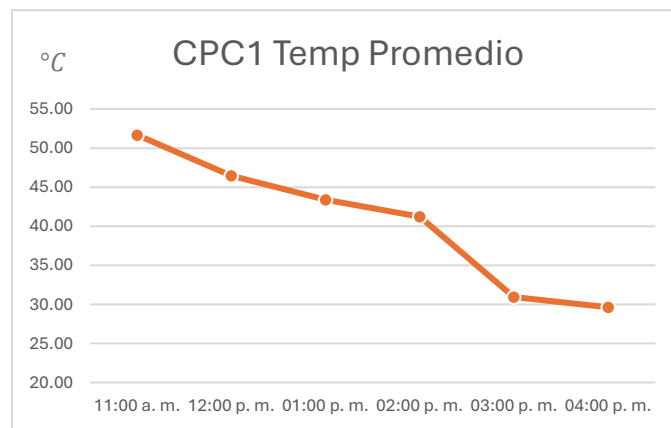
b)



c)



d)



e)

Figura 3.1. Comportamiento promedio de las variables registradas para el CPC1 en el mes de enero:
a) irradiancia global, b) infrarroja (IR), c) ultravioleta A (UVA), d) ultravioleta B (UVB), e) temperatura.

3.2. Mes de Enero – CPC2

Durante el mes de enero, se monitoreó el comportamiento del concentrador solar CPC2 entre las 11:00 a. m. y las 4:00 p. m. (Tabla 3.2), registrando valores promedio horarios para irradiancia global, infrarroja (IR), ultravioleta A (UVA), ultravioleta B (UVB) y temperatura interna.

La irradiancia global promedio alcanzó su punto máximo a las 11:00 a. m. con 1006.95 W/m^2 , mostrando un comportamiento descendente en el transcurso del día, hasta llegar a 474 W/m^2 a las 4:00 p. m. Este descenso indica una fuerte captación solar en la mañana, disminuyendo de forma paulatina conforme avanzó la tarde, tal como se espera en condiciones despejadas.

La irradiancia infrarroja (IR) promedio mostró un comportamiento similar, comenzando en 462.70 W/m^2 y descendiendo hasta 196.8 W/m^2 . La caída progresiva de este valor refleja una menor disponibilidad de energía térmica en el espectro infrarrojo conforme disminuye la incidencia solar directa.

En cuanto a la radiación UVA promedio, se mantuvo relativamente constante entre las 11:00 a. m. y la 1:00 p. m., con valores por encima de 49 W/m^2 , y luego fue disminuyendo hasta alcanzar 31.36 W/m^2 a las 4:00 p. m. Por otro lado, la radiación UVB tuvo un comportamiento más acentuado: comenzó en 3.20 W/m^2 , alcanzó su máximo de 4.97 W/m^2 a la 1:00 p. m. y luego descendió hasta 0.605 W/m^2 al final de la jornada, mostrando un patrón característico de mayor intensidad en las horas centrales del día.

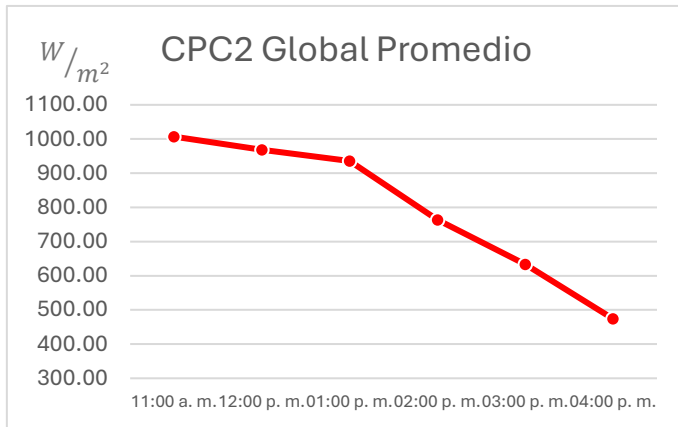
La temperatura promedio dentro del CPC2 fue menor en comparación con CPC1 en casi todos los horarios, iniciando en 41.04°C a las 11:00 a. m. y disminuyendo de forma continua hasta llegar a 20°C a las 4:00 p. m. Esto indica una menor capacidad de retención térmica que afectan su rendimiento térmico.

Tabla 3.2. Valores Promedio de irradiancia y temperatura para el CPC2 en el mes

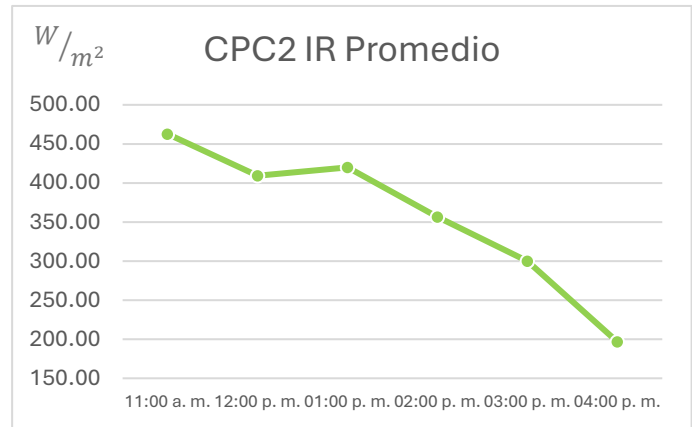
Hora	Valores Promedio de Irradiancia y temperatura				
	CPC2 Global [W/m ²]	CPC2 IR [W/m ²]	CPC2 UVA [W/m ²]	CPC2 UVB [W/m ²]	CPC2 Temp [°C]
11:00 a. m.	1006.95	462.70	55.07	3.20	41.04
12:00 p. m.	968.81	409.44	49.82	3.87	36.17
01:00 p. m.	935.54	420.12	50.75	4.97	38.22
02:00 p. m.	763.92	356.59	44.84	2.79	26.00
03:00 p. m.	633.17	300.10	42.13	1.11	22.93
04:00 p. m.	474	196.8	31.36	0.605	20

En resumen, CPC2 mostró un buen comportamiento en captación de radiación, pero una temperatura promedio dentro más baja en comparación con CPC1, lo que indica una menor eficiencia térmica.

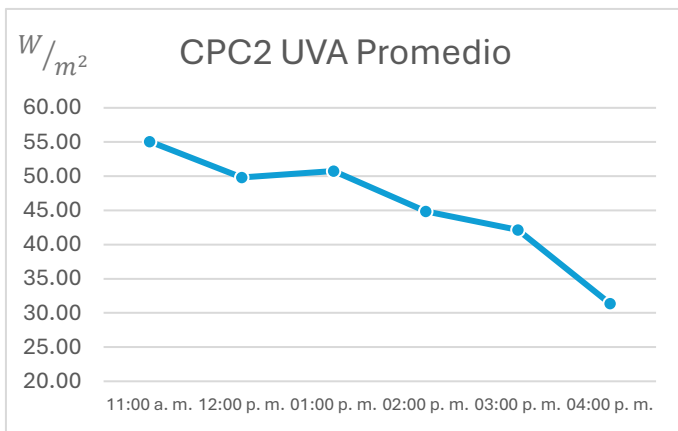
En el análisis correspondiente al mes de enero, el CPC2 muestra un comportamiento térmico-óptico muy similar al observado en el CPC1, lo cual refuerza la consistencia del fenómeno bajo condiciones de radiación solar similares. La irradiancia global alcanza su punto máximo poco antes del mediodía y presenta una disminución continua hasta las 4:00 p.m. Este patrón también se manifiesta en la irradiancia infrarroja, evidenciando la pérdida progresiva de energía térmica con el transcurso del día. En el caso de la irradiancia UVA, se aprecia una caída gradual conforme disminuye la incidencia directa del sol, lo que refleja una menor disponibilidad de energía en este rango del espectro. Por su parte, la irradiancia UVB presenta un pico pronunciado alrededor de la 1:00 p.m., comportamiento típico de esta componente debido a su mayor concentración durante el cenit solar. Finalmente, la temperatura interna promedio del CPC2 decrece de manera constante a medida que se reduce la intensidad de la radiación solar, lo que confirma la dependencia directa entre la captación de energía solar y el comportamiento térmico interno del concentrador (Figura 3.2).



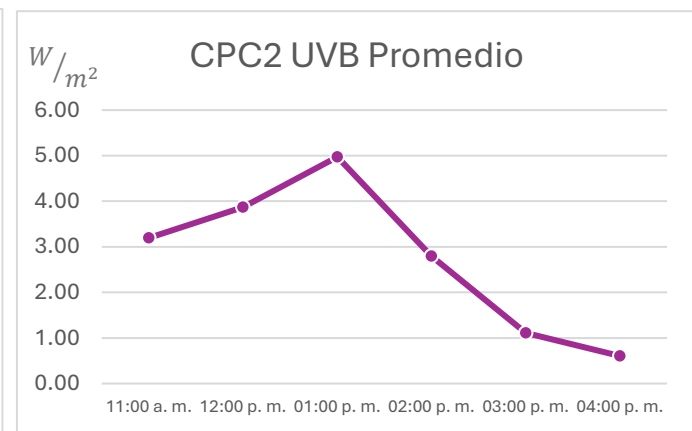
a)



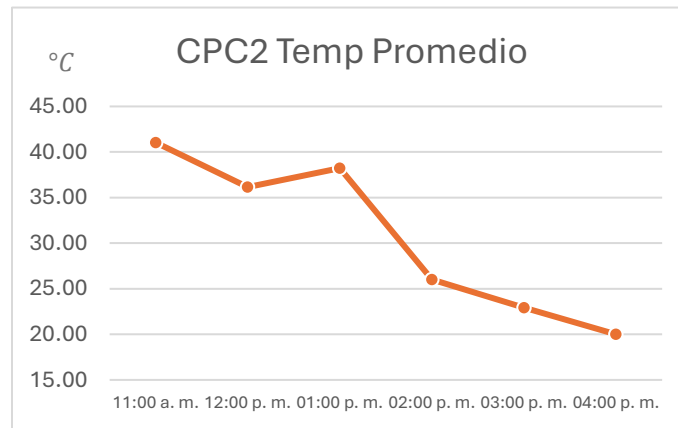
b)



c)



d)



e)

Figura 3.2. Comportamiento promedio de las variables registradas para el CPC2 en el mes de enero:
a) irradiancia global, b) infrarroja (IR), c) ultravioleta A (UVA), d) ultravioleta B (UVB), e) temperatura.

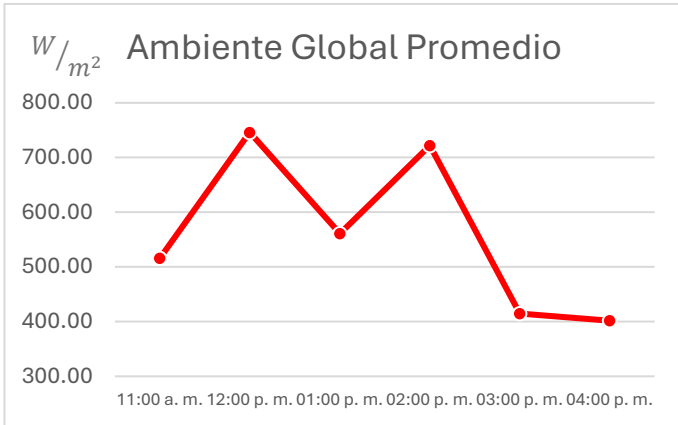
En cuanto a la radiación IR promedio, se observó un comportamiento variable con un valor inicial de 329.95 W/m² a las 11:00 a. m., disminuyendo a lo largo del día hasta 191.57 W/m² a las 4:00 p. m., con una caída más notoria después de las 2:00 p. m., lo cual refleja la pérdida gradual de energía térmica disponible en el entorno. La radiación UVA promedio se mantuvo alta en las primeras horas, con un valor máximo de 51.08 W/m² a las 11:00 a. m., bajando progresivamente hasta 23.18 W/m² al finalizar la jornada. La radiación UVB promedio fue menor en intensidad, con un máximo de 1.69 W/m² también a las 11:00 a. m., y descendiendo a 0.49 W/m² a las 4:00 p. m., mostrando una reducción significativa como resultado del cambio en el ángulo solar y mayor dispersión.

La temperatura ambiente promedio osciló en un rango estrecho, comenzando en 23.37°C a las 11:00 a. m., alcanzando un valor máximo de 29.80°C a las 4:00 p. m. A diferencia de los concentradores, donde la temperatura disminuyó, en el ambiente se observó un leve aumento hacia la tarde, posiblemente por acumulación térmica superficial y menor ventilación.

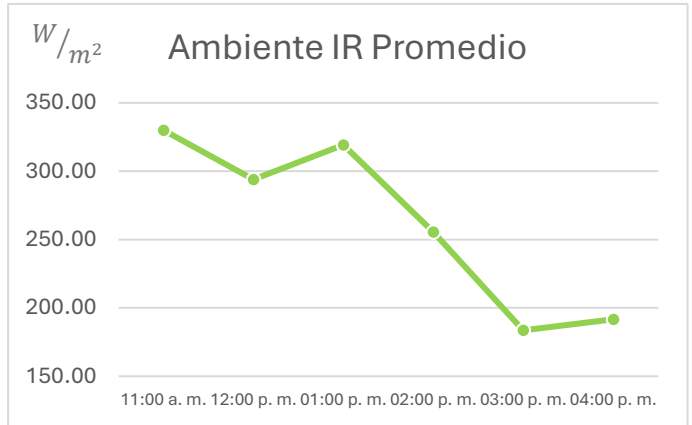
Tabla 3.3. Valores Promedio de irradiancia y temperatura para el Ambiente en el mes de enero.

Hora	Valores Promedio de Irradiancia y temperatura				
	Ambiente Global [W/m ²]	Ambiente IR [W/m ²]	Ambiente UVA [W/m ²]	Ambiente UVB [W/m ²]	Ambiente Temp [°C]
11:00 a. m.	516.22	329.95	51.08	1.69	23.37
12:00 p. m.	746.14	293.98	48.57	1.28	24.91
01:00 p. m.	561.03	319.30	49.93	1.34	25.78
02:00 p. m.	722.04	255.66	39.51	0.94	28.44
03:00 p. m.	414.88	183.66	27.39	0.60	25.19
04:00 p. m.	401.67	191.57	23.18	0.49	29.80

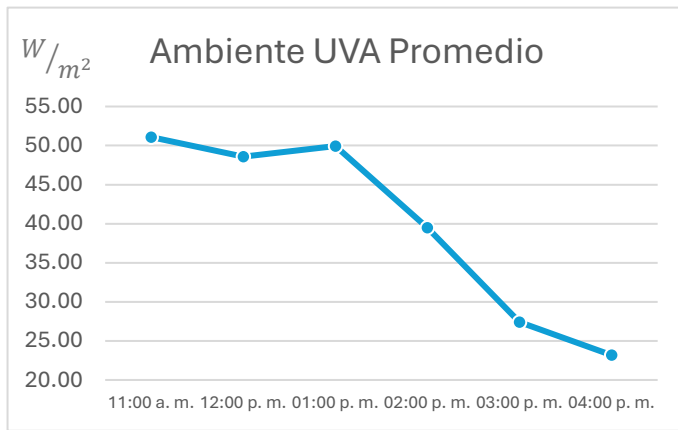
En el entorno ambiental durante enero, la irradiancia global alcanzó su punto máximo alrededor del mediodía solar, con un valor de 746.14 W/m^2 a las 12:00 p. m., disminuyendo gradualmente en las horas posteriores debido al cambio en la inclinación solar. La irradiancia infrarroja mostró un descenso continuo a lo largo del día, reflejando una reducción progresiva de la energía térmica disponible en el ambiente. La radiación UVA tuvo su mayor valor a las 11:00 a. m. y presentó una disminución sostenida hasta las 4:00 p.m., siguiendo el patrón típico de comportamiento de esta componente del espectro solar. En el caso de la radiación UVB, su valor más alto también se registró a las 11:00 a. m., con una notable reducción hacia la tarde, lo que resalta la sensibilidad de esta banda a los cambios en el ángulo solar. A diferencia de lo observado en los concentradores, la temperatura ambiente se mantuvo relativamente estable, con un ligero incremento hacia las 2:00 p.m., posiblemente asociado a la acumulación térmica en las superficies expuestas al sol (Figura 3.3).



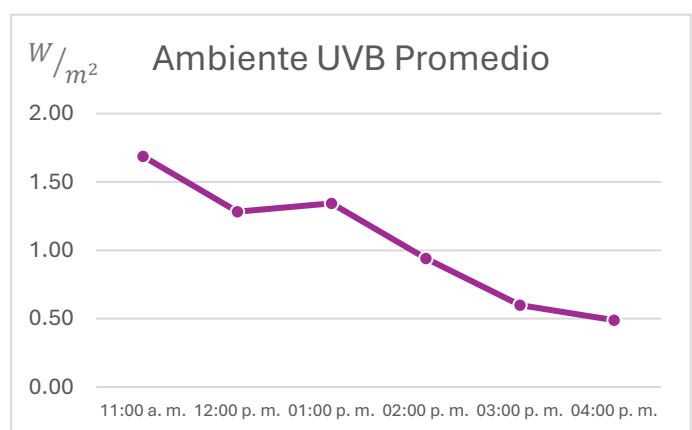
a)



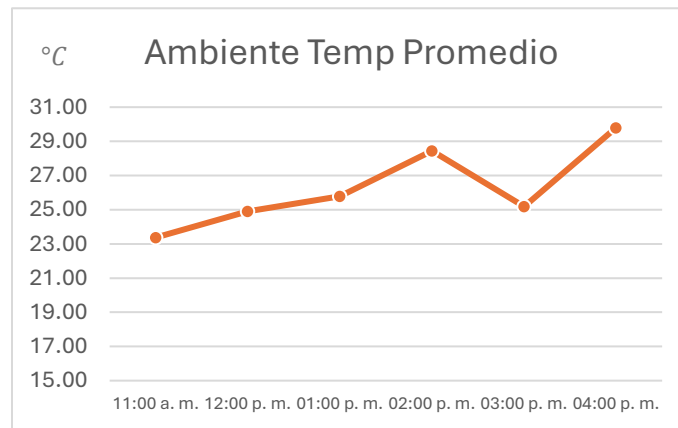
b)



c)



d)



e)

Figura 3.3. Comportamiento promedio de las variables registradas para el Ambiente en el mes de enero:
a) irradiancia global, b) infrarroja (IR), c) ultravioleta A (UVA), d) ultravioleta B (UVB), e) temperatura.

3.3. Mes de Febrero – CPC1

Durante el mes de febrero, se registraron mediciones dentro del CPC1 entre las 11:00 a. m. y las 3:00 p. m. (Tabla 3.4), considerando irradiancia global, infrarroja (IR), ultravioleta A (UVA), ultravioleta B (UVB) y temperatura interna.

La irradiancia global promedio dentro del CPC1 presentó su valor más alto a las 12:00 p. m. (888.10 W/m²), seguida de un valor también elevado a las 11:00 a. m. (816.51 W/m²), indicando una excelente captación solar en horas cercanas al mediodía. Posteriormente, se registró una disminución progresiva con 715.57 W/m² a la 1:00 p. m., 640.19 W/m² a las 2:00 p. m., y finalmente 409.85 W/m² a las 3:00 p. m., reflejando la caída esperada por la disminución en la inclinación solar.

En cuanto a la radiación IR promedio dentro del CPC1, se observó un descenso continuo desde un valor inicial de 418.30 W/m² a las 11:00 a. m., bajando a 373.17 W/m² a las 12:00 p. m., hasta alcanzar 185.54 W/m² a las 3:00 p. m. La caída más notoria se dio después de la 1:00 p. m., lo que indica una disminución significativa de la energía térmica retenida dentro del sistema conforme avanza la jornada.

La radiación UVA promedio tuvo su valor máximo también a las 11:00 a. m. con 52.70 W/m², decreciendo constantemente durante el día: 48.64 W/m² al mediodía, 40.66 W/m² a la 1:00 p. m., y llegando a 24.55 W/m² a las 3:00 p. m. Este comportamiento refleja la progresiva pérdida de intensidad de la radiación de onda corta, asociada al movimiento solar y al aumento en la dispersión atmosférica.

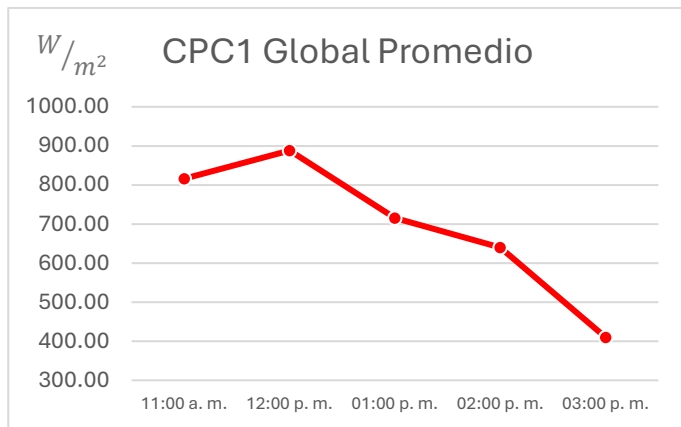
La radiación UVB promedio, de menor magnitud, alcanzó su valor máximo a las 12:00 p. m. con 2.54 W/m², seguida por 2.14 W/m² a las 11:00 a. m., y descendiendo abruptamente a partir de la 1:00 p. m. hasta llegar a 0.25 W/m² a las 3:00 p. m. Esta caída sugiere un comportamiento más sensible al cambio angular solar, especialmente en esta franja horaria.

Tabla 3.4. Valores Promedio de irradiancia y temperatura para el CPC1 en el mes de febrero

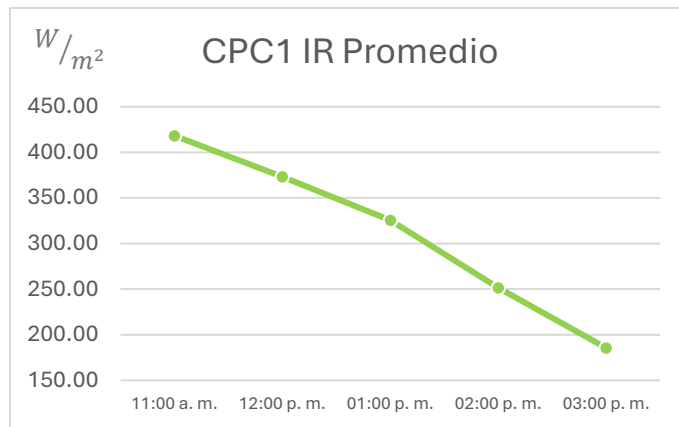
Hora	Valores Promedio de Irradiancia y temperatura				
	CPC1 Global [W/m ²]	CPC1 IR [W/m ²]	CPC1 UVA [W/m ²]	CPC1 UVB [W/m ²]	CPC1 Temp [°C]
11:00 a. m.	816.51	418.30	52.70	2.14	60.25
12:00 p. m.	888.10	373.17	48.64	2.54	57.15
01:00 p. m.	715.57	325.56	40.66	1.90	61.49
02:00 p. m.	640.19	251.42	35.63	0.59	47.79
03:00 p. m.	409.85	185.54	24.55	0.25	27.87

La temperatura interna promedio del CPC1 inició con un valor alto de 60.25°C a las 11:00 a. m., con una leve disminución al mediodía (57.15°C) y un pico térmico a la 1:00 p. m. (61.49°C), por acumulación de calor. Luego descendió considerablemente a 47.79°C a las 2:00 p. m., finalizando en 27.87°C a las 3:00 p. m., mostrando una rápida pérdida térmica hacia el final del día, atribuible a la menor irradiancia y mayor disipación.

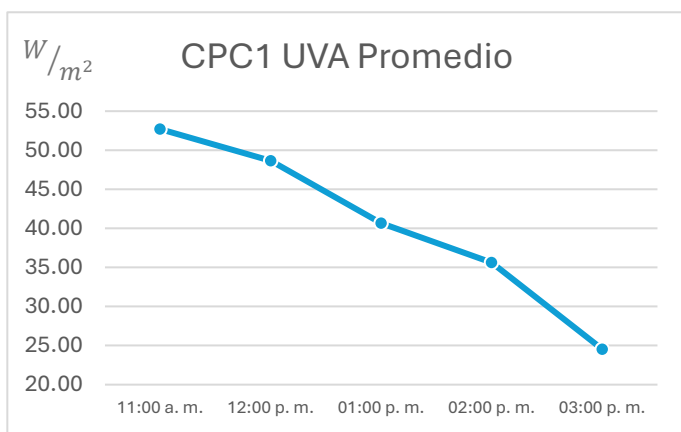
Durante febrero, el comportamiento térmico-óptico del CPC1 refleja una clara dependencia de la radiación solar incidente. La irradiancia global mostró un valor máximo de 888.10 W/m² a las 12:00 p. m., seguido de un descenso gradual conforme avanzó la tarde, debido a la disminución del ángulo de incidencia solar. La radiación infrarroja inició con un valor de 418.30 W/m² y experimentó una caída notable después de la 1:00 p. m., alcanzando apenas 185.54 W/m² a las 3:00 p. m., lo que representa una disminución significativa de la energía térmica disponible dentro del concentrador. La radiación UVA fue más intensa en las primeras horas, destacando los 52.70 W/m² a las 11:00 a. m., para luego disminuir paulatinamente hasta los 24.55 W/m² hacia el cierre del periodo de observación. En cuanto a la radiación UVB, se registró un pico al mediodía con 2.54 W/m², disminuyendo drásticamente a partir de la 1:00 p. m. hasta llegar a 0.25 W/m² a las 3:00 p. m., comportamiento que puede atribuirse a la dispersión atmosférica. Finalmente, la temperatura interna promedio del CPC1 alcanzó su punto más alto a la 1:00 p. m. con 61.49°C, y descendió abruptamente hacia el final del periodo hasta los 27.87°C, evidenciando pérdidas térmicas notables a medida que disminuyó la radiación incidente (Figura 3.4).



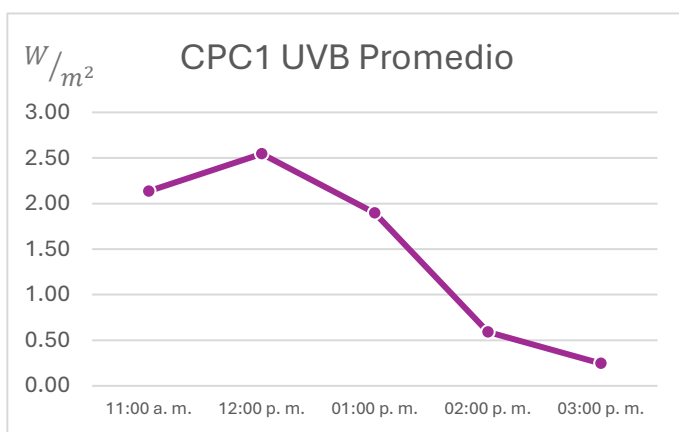
a)



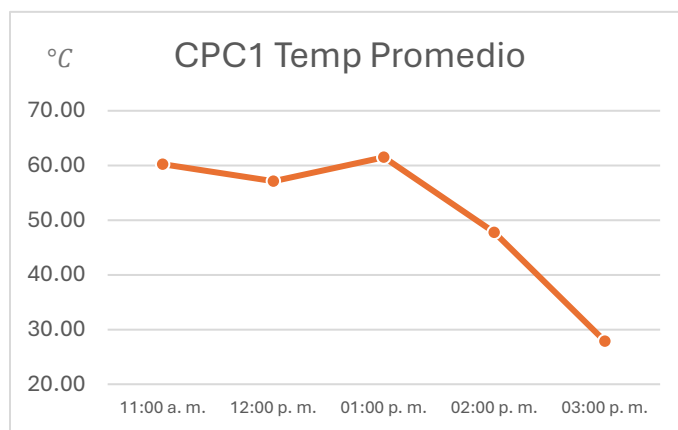
b)



c)



d)



e)

Figura 3.4. Comportamiento promedio de las variables registradas para el CPC1 en el mes de febrero:
a) irradiancia global, b) infrarroja (IR), c) ultravioleta A (UVA), d) ultravioleta B (UVB), e) temperatura.

3.4. Mes de Febrero – CPC2

Durante el mes de febrero, se realizaron mediciones en el concentrador solar CPC2 entre las 11:00 a. m. y las 3:00 p. m. (Tabla 3.5), considerando irradiancia global, radiación infrarroja (IR), ultravioleta A (UVA), ultravioleta B (UVB) y temperatura interna.

La irradiancia global promedio dentro del CPC2 alcanzó su valor máximo temprano, a las 11:00 a. m. (971.51 W/m^2), lo que sugiere una captación más efectiva en las primeras horas. A las 12:00 p. m. se mantuvo elevada (882.60 W/m^2), disminuyendo después a 781.93 W/m^2 a la 1:00 p. m., 698.98 W/m^2 a las 2:00 p. m., y finalmente 437.85 W/m^2 a las 3:00 p. m., mostrando una caída continua conforme disminuye el ángulo solar.

La radiación IR promedio siguió una tendencia descendente más marcada, iniciando en 453.44 W/m^2 a las 11:00 a. m., bajando a 356.83 W/m^2 al mediodía, y alcanzando 245.42 W/m^2 al final del periodo. Esta caída refleja la reducción en la energía térmica disponible dentro del concentrador conforme avanza la jornada.

En cuanto a la radiación UVA promedio, el valor máximo se registró también a las 11:00 a. m. (54.91 W/m^2), disminuyendo progresivamente hasta 30.92 W/m^2 a las 3:00 p. m. Esto refleja un comportamiento típico de la radiación de onda corta, influenciado por la posición solar y la dispersión atmosférica.

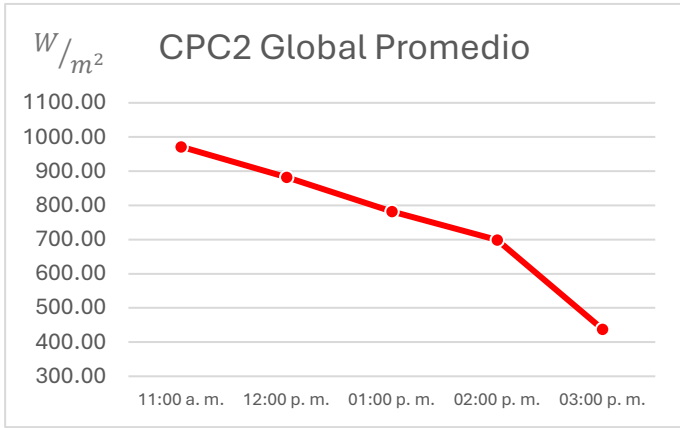
La radiación UVB promedio mostró un comportamiento similar, con el valor más alto a las 12:00 p. m. (3.76 W/m^2), seguido de 3.68 W/m^2 a las 11:00 a. m., y una caída abrupta hasta 0.74 W/m^2 a las 3:00 p. m., como resultado del cambio en la inclinación solar y el efecto de atenuación atmosférica.

La temperatura interna promedio del CPC2 aumentó ligeramente entre las 11:00 a. m. (51.91°C) y el mediodía (55.56°C), indicando buena acumulación térmica inicial. A partir de la 1:00 p. m., comenzó un descenso gradual, alcanzando 42.50°C , luego 39.74°C a las 2:00 p. m., y finalmente 28.21°C a las 3:00 p. m., en concordancia con la disminución de la irradiancia y la radiación térmica.

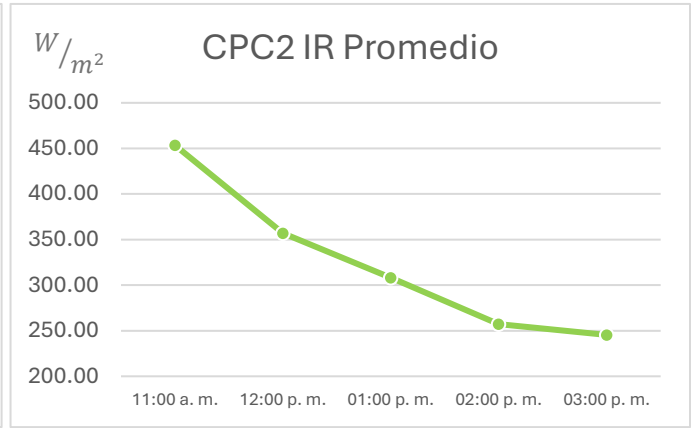
Tabla 3.5. Valores Promedio de irradiancia y temperatura para el CPC2 en el mes de febrero.

Hora	Valores Promedio de Irradiancia y temperatura				
	CPC2 Global [W/m ²]	CPC2 IR [W/m ²]	CPC2 UVA [W/m ²]	CPC2 UVB [W/m ²]	CPC2 Temp [°C]
11:00 a. m.	971.51	453.44	54.91	3.68	51.91
12:00 p. m.	882.60	356.83	49.07	3.76	55.56
01:00 p. m.	781.93	308.10	43.17	2.51	42.50
02:00 p. m.	698.98	257.43	41.26	1.71	39.74
03:00 p. m.	437.85	245.42	30.92	0.74	28.21

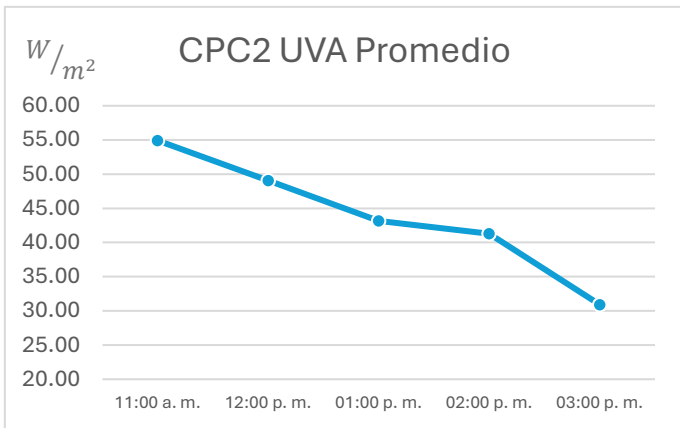
En el mes de febrero, el CPC2 presentó un desempeño térmico-óptico que evidencia una fuerte influencia de la radiación solar incidente. La irradiancia global alcanzó su valor máximo a las 11:00 a. m. con 971.51 W/m^2 , lo que indica una mayor captación solar en las primeras horas del día, seguida de una disminución progresiva conforme avanzó la jornada. La radiación infrarroja mostró un comportamiento decreciente continuo, partiendo de 453.44 W/m^2 y descendiendo hasta 245.42 W/m^2 a las 3:00 p. m., lo que refleja una pérdida sostenida de energía térmica en el interior del concentrador. En cuanto a la radiación UVA, se registró un pico de 54.91 W/m^2 a las 11:00 a. m. y una disminución constante hasta alcanzar 30.92 W/m^2 al final del periodo, comportamiento alineado con la reducción de la exposición solar directa. La radiación UVB alcanzó su valor máximo al mediodía con 3.76 W/m^2 , para luego descender de forma pronunciada hasta los 0.74 W/m^2 a las 3:00 p. m., producto de la atenuación atmosférica. Finalmente, la temperatura interna promedio del CPC2 se elevó hasta los 55.56°C al mediodía, disminuyendo gradualmente a medida que la irradiancia disminuyó, con un valor mínimo de 28.21°C hacia el final de la jornada, evidenciando el efecto térmico directo de la radiación sobre el sistema (Figura 3.5).



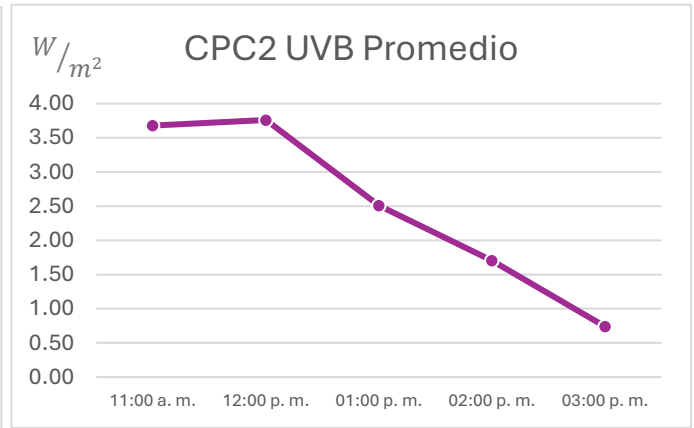
a)



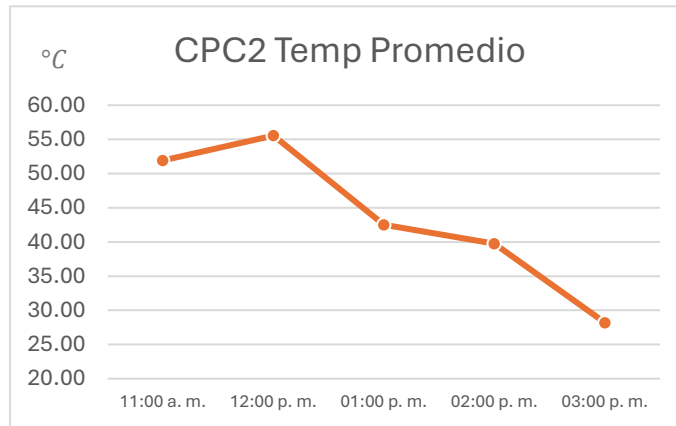
b)



c)



d)



e)

Figura 3.5. Comportamiento promedio de las variables registradas para el CPC2 en el mes de febrero:
a) irradiancia global, b) infrarroja (IR), c) ultravioleta A (UVA), d) ultravioleta B (UVB), e) temperatura.

3.5. Mes de Febrero – Ambiente

Durante el mes de febrero, se llevaron a cabo mediciones ambientales entre las 11:00 a. m. y las 3:00 p. m. (Tabla 3.6), considerando irradiancia global, radiación infrarroja (IR), ultravioleta A (UVA), ultravioleta B (UVB) y temperatura ambiente.

La irradiancia global promedio alcanzó su valor más alto a las 12:00 p. m. (827.80 W/m^2), seguido por 746.22 W/m^2 a las 1:00 p. m. y 702.33 W/m^2 a las 2:00 p. m., lo cual indica una buena disponibilidad solar durante la franja central del día. El valor más bajo se registró a las 11:00 a. m. (544.04 W/m^2), aumentando hacia el mediodía antes de disminuir hasta 479.28 W/m^2 a las 3:00 p. m.

La radiación IR promedio mostró una ligera fluctuación durante las primeras horas: comenzó con 282.57 W/m^2 a las 11:00 a. m., aumentando levemente a 283.84 W/m^2 a las 12:00 p. m., para luego disminuir de forma sostenida hasta llegar a 178.10 W/m^2 a las 3:00 p. m. Este comportamiento refleja la disminución de energía térmica ambiental disponible hacia la tarde.

En cuanto a la radiación UVA promedio, se observó un valor máximo de 48.05 W/m^2 a las 11:00 a. m., con una reducción progresiva hasta 25.09 W/m^2 a las 3:00 p. m., resultado de la variación en la inclinación solar y la mayor dispersión atmosférica conforme avanza el día.

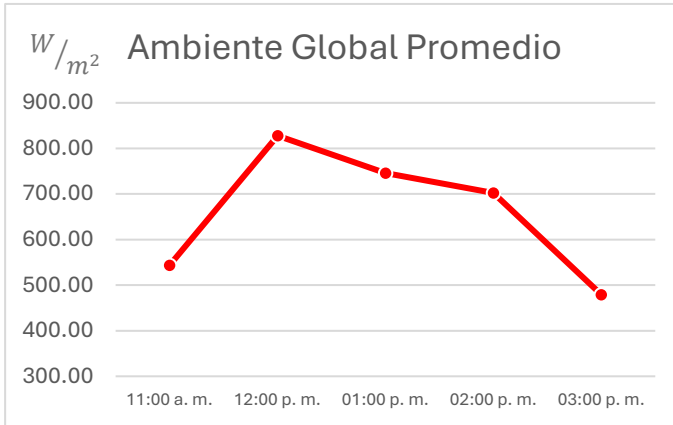
La radiación UVB promedio, de menor intensidad, presentó un patrón descendente desde 1.72 W/m^2 a las 11:00 a. m. hasta 0.58 W/m^2 a las 3:00 p. m. Esta caída refleja la sensibilidad de esta componente a las condiciones de dispersión y atenuación atmosférica.

La temperatura ambiente promedio osciló en un rango moderado. Se registró un aumento inicial de 22.04°C a las 11:00 a. m. a 24.71°C al mediodía. Posteriormente, descendió ligeramente, con valores alrededor de los $23\text{--}24^\circ\text{C}$, terminando en 22.76°C a las 3:00 p. m. Esta estabilidad sugiere una menor acumulación térmica en el entorno en comparación con los concentradores.

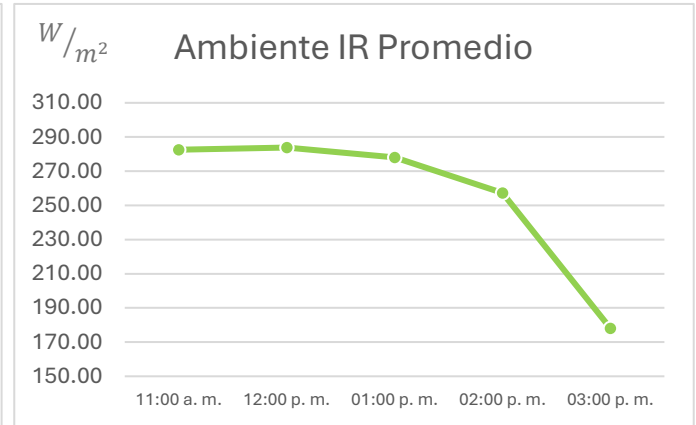
Tabla 3.6. Valores Promedio de irradiancia y temperatura para el Ambiente en el mes de febrero.

Hora	Valores Promedio de Irradiancia y temperatura				
	Ambiente Global [W/m^2]	Ambiente IR [W/m^2]	Ambiente UVA [W/m^2]	Ambiente UVB [W/m^2]	Ambiente Temp [$^\circ\text{C}$]
11:00 a. m.	544.04	282.57	48.05	1.72	22.04
12:00 p. m.	827.80	283.84	45.93	1.37	24.71
01:00 p. m.	746.22	278.06	42.79	1.24	23.24
02:00 p. m.	702.33	257.23	40.06	1.00	24.58
03:00 p. m.	479.28	178.10	25.09	0.58	22.76

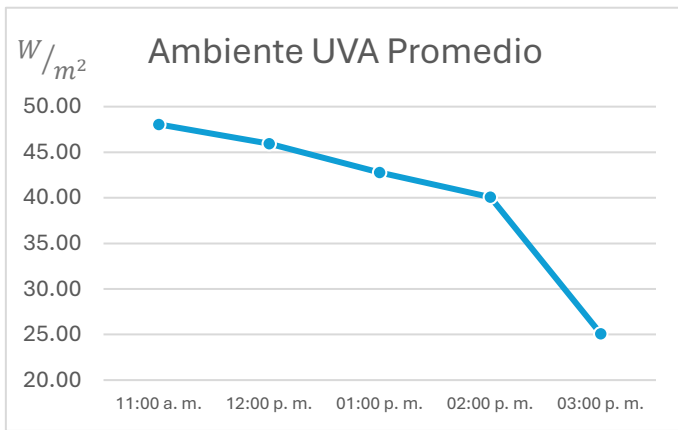
Durante febrero, las condiciones ambientales reflejaron el comportamiento típico de un día con buena exposición solar. La irradiancia global alcanzó su máximo valor a las 12:00 p. m. con 827.80 W/m^2 , seguida de una disminución progresiva hacia la tarde, finalizando en 479.28 W/m^2 . La radiación infrarroja se mantuvo relativamente estable hasta el mediodía, para luego disminuir de manera continua hasta alcanzar 178.10 W/m^2 a las 3:00 p. m., evidenciando una reducción sostenida de la energía térmica disponible en el entorno. La radiación UVA inició con 48.05 W/m^2 y mostró una tendencia descendente a lo largo del día, llegando a 25.09 W/m^2 , comportamiento relacionado con la variación del ángulo solar y la dispersión atmosférica. En cuanto a la radiación UVB, se registró un máximo de 1.72 W/m^2 a las 11:00 a. m., seguido de una caída sostenida hasta 0.58 W/m^2 a las 3:00 p. m., reflejando su alta sensibilidad a la atenuación atmosférica. La temperatura ambiente promedio presentó un ligero aumento hasta el mediodía, alcanzando los 24.71°C , para luego estabilizarse y descender moderadamente hacia el final del periodo, cerrando en 22.76°C , sin mostrar variaciones abruptas como en los sistemas concentradores (Figura 3.6).



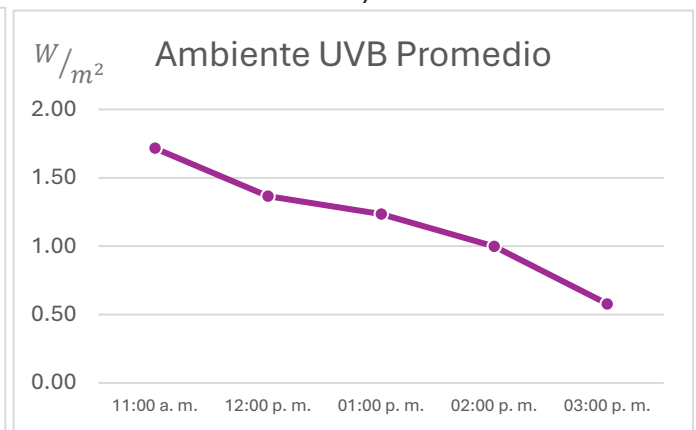
a)



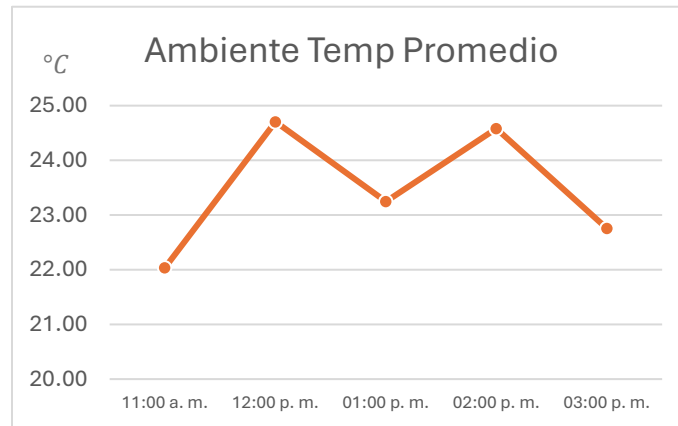
b)



c)



d)



e)

Figura 3.6. Comportamiento promedio de las variables registradas para el Ambiente en el mes de febrero:
a) irradiancia global, b) infrarroja (IR), c) ultravioleta A (UVA), d) ultravioleta B (UVB), e) temperatura.

3.6. Mes de Marzo – CPC1

Durante el mes de marzo, se llevaron a cabo mediciones dentro del concentrador solar CPC1 entre las 11:00 a. m. y las 3:00 p. m. (Tabla 3.7), registrando datos de irradiancia global, radiación infrarroja (IR), radiación ultravioleta A (UVA), ultravioleta B (UVB) y temperatura interna.

La irradiancia global promedio dentro del CPC1 presentó su valor más alto a las 11:00 a. m. (919.65 W/m²), con una ligera disminución al mediodía (859.93 W/m²) y a la 1:00 p. m. (848.52 W/m²), lo que indica una captación solar sostenida durante las primeras tres horas. A las 2:00 p. m., se observó un descenso más pronunciado (648.24 W/m²), aunque sorpresivamente volvió a incrementarse ligeramente a las 3:00 p. m. (747.67 W/m²), posiblemente debido a condiciones atmosféricas puntuales como cielos despejados o reflexión difusa.

La radiación IR promedio mostró una tendencia decreciente desde su punto máximo a las 11:00 a. m. (429.69 W/m²), bajando a 382.74 W/m² al mediodía y manteniéndose relativamente estable a la 1:00 p. m. (391.52 W/m²). Posteriormente, cayó drásticamente a 204.60 W/m² a las 2:00 p. m. y a tan solo 63.87 W/m² a las 3:00 p. m., reflejando una marcada disminución de energía térmica en el sistema.

La radiación UVA promedio alcanzó su valor máximo a las 11:00 a. m. (52.46 W/m²), disminuyendo a 44.33 W/m² al mediodía y luego presentando un repunte a 48.10 W/m² a la 1:00 p. m., comportamiento posiblemente atribuido a condiciones de nubosidad variable. A partir de las 2:00 p. m., los valores cayeron significativamente, registrando 30.21 W/m² y cerrando en 11.63 W/m² a las 3:00 p. m.

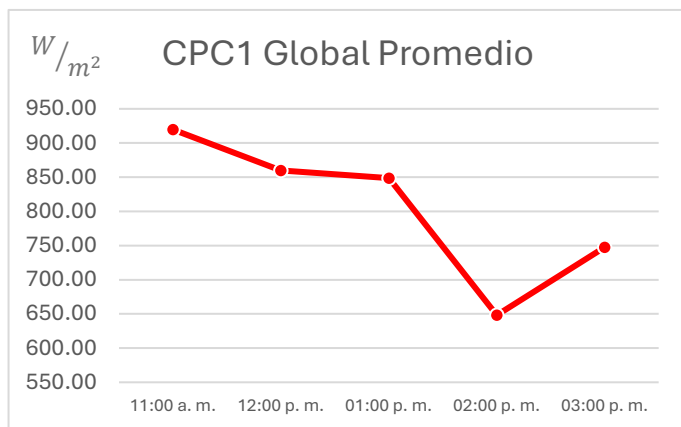
La radiación UVB promedio se mantuvo estable durante las primeras dos horas (2.69 y 2.68 W/m² respectivamente), descendiendo a 1.73 W/m² a la 1:00 p. m., y mostrando una caída más brusca por la tarde, con 0.61 W/m² a las 2:00 p. m. y 0.21 W/m² al finalizar el periodo.

Tabla 3.7. Valores Promedio de irradiancia y temperatura para el CPC1 en el mes de marzo.

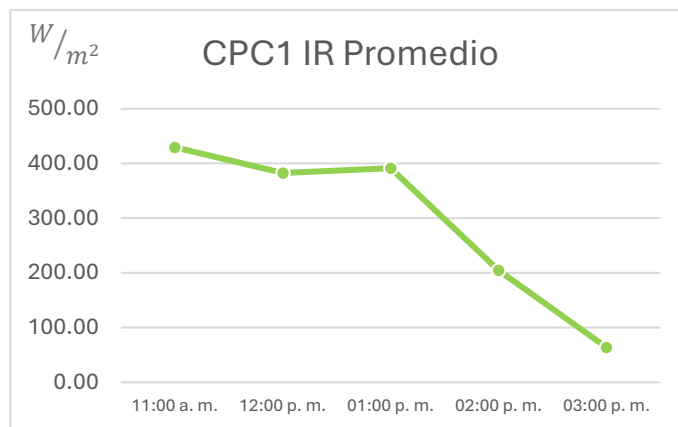
Hora	Valores Promedio de Irradiancia y temperatura				
	CPC1 Global [W/m ²]	CPC1 IR [W/m ²]	CPC1 UVA [W/m ²]	CPC1 UVB [W/m ²]	CPC1 Temp [°C]
11:00 a. m.	919.65	429.69	52.46	2.69	57.18
12:00 p. m.	859.93	382.74	44.33	2.68	53.13
01:00 p. m.	848.52	391.52	48.10	1.73	52.97
02:00 p. m.	648.24	204.60	30.21	0.61	34.69
03:00 p. m.	747.67	63.87	11.63	0.21	29.16

La temperatura interna promedio del CPC1 alcanzó su punto máximo a las 11:00 a. m. (57.18°C), seguido por una reducción constante a lo largo del día: 53.13°C a las 12:00 p. m., 52.97°C a la 1:00 p. m., y una caída más acentuada a las 2:00 p. m. (34.69°C) y 29.16°C a las 3:00 p. m., consistente con la reducción en irradiancia y radiación térmica.

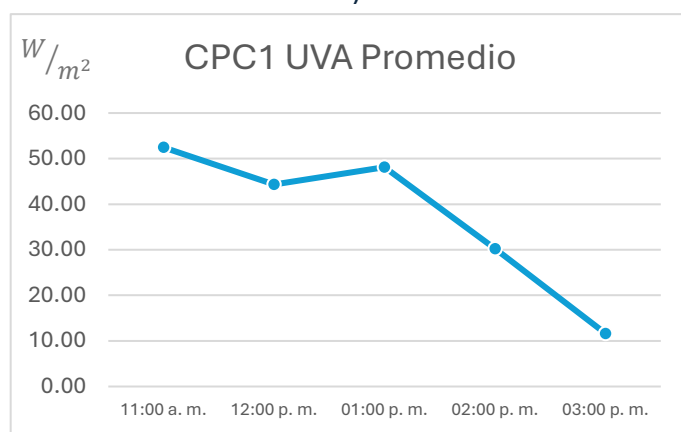
En el mes de marzo, el comportamiento térmico-óptico del CPC1 presentó variaciones destacadas asociadas a las condiciones atmosféricas locales. La irradiancia global alcanzó su valor máximo a las 11:00 a. m. con 919.65 W/m^2 , seguida de una disminución moderada hasta la 1:00 p. m., y un repunte inesperado a las 3:00 p. m., posiblemente originado por reflexiones solares o cambios en la nubosidad. La radiación infrarroja mostró un valor inicial elevado de 429.69 W/m^2 , que disminuyó de manera significativa durante la tarde hasta alcanzar 63.87 W/m^2 , reflejando una pérdida progresiva de energía térmica. En cuanto a la radiación UVA, se registró un pico de 52.46 W/m^2 a las 11:00 a. m., seguido de leves fluctuaciones hasta la 1:00 p. m., para luego descender abruptamente hasta 11.63 W/m^2 a las 3:00 p. m., comportamiento consistente con una menor exposición solar directa. La radiación UVB se mantuvo relativamente estable en las primeras horas, con valores cercanos a 2.7 W/m^2 , pero presentó una caída pronunciada durante la tarde, finalizando en 0.21 W/m^2 . Finalmente, la temperatura interna promedio del CPC1 alcanzó su punto máximo a las 11:00 a. m. con 57.18°C , descendiendo paulatinamente durante el resto del día hasta llegar a 29.16°C , en concordancia con la disminución de la irradiancia incidente (Figura 3.7).



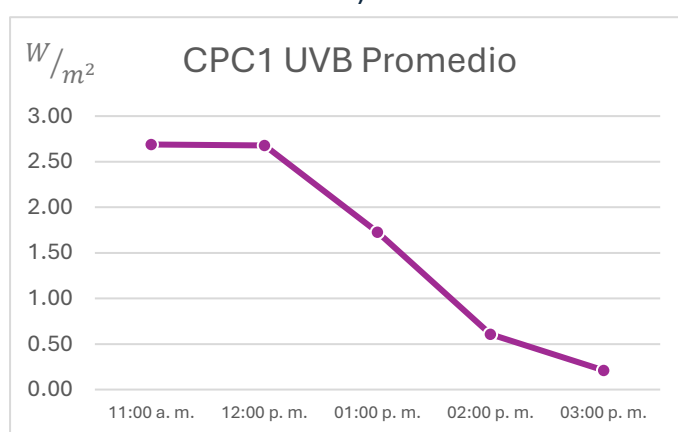
a)



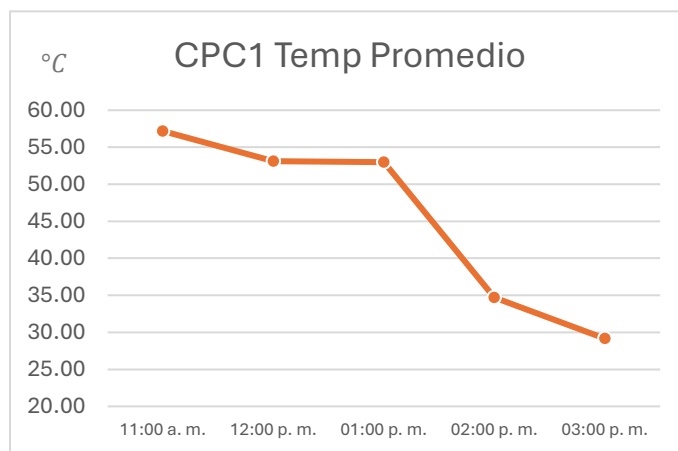
b)



c)



d)



e)

Figura 3.7. Comportamiento promedio de las variables registradas para el CPC1 en el mes de marzo:
a) irradiancia global, b) infrarroja (IR), c) ultravioleta A (UVA), d) ultravioleta B (UVB), e) temperatura.

3.7. Mes de Marzo – CPC2

Durante el mes de marzo, se realizaron mediciones dentro del concentrador solar CPC2 entre las 11:00 a. m. y las 3:00 p. m. (Tabla 3.8), registrando valores de irradiancia global, radiación infrarroja (IR), radiación ultravioleta A (UVA), ultravioleta B (UVB) y temperatura interna.

La irradiancia global promedio dentro del CPC2 mostró su valor máximo a las 11:00 a. m. (1047.33 W/m^2), destacando una captación solar muy alta en las primeras horas. Al mediodía se mantuvo elevada (1005.89 W/m^2) y luego decreció de forma continua a 949.89 W/m^2 a la 1:00 p. m., hasta llegar a mínimos de 595.33 W/m^2 a las 2:00 p. m. y 607.67 W/m^2 a las 3:00 p. m.

La radiación IR promedio presentó un patrón decreciente a lo largo del día: inició en 442.05 W/m^2 a las 11:00 a. m., bajó a 410.11 W/m^2 al mediodía y continuó descendiendo hasta alcanzar 245.70 W/m^2 a las 3:00 p. m., mostrando una pérdida gradual de energía térmica dentro del concentrador.

En cuanto a la radiación UVA promedio, su valor máximo fue a las 11:00 a. m. (54.22 W/m^2), con una reducción progresiva durante las primeras horas hasta 35.87 W/m^2 a las 2:00 p. m. Sorprendentemente, se registró un repunte a las 3:00 p. m. (55.40 W/m^2), lo cual podría estar asociado a condiciones atmosféricas cambiantes, como una reducción momentánea en la nubosidad.

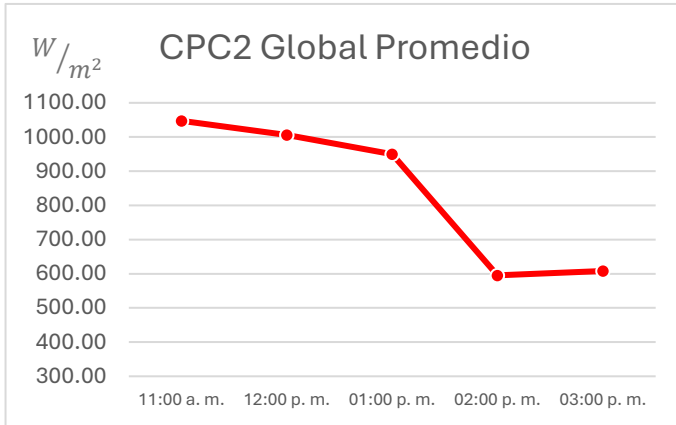
La radiación UVB promedio mostró su pico al mediodía (4.49 W/m^2), manteniéndose alta a las 11:00 a. m. (4.16 W/m^2) y disminuyendo drásticamente por la tarde hasta 0.93 W/m^2 a las 3:00 p. m., en respuesta al cambio en la inclinación solar y dispersión atmosférica.

La temperatura interna promedio del CPC2 alcanzó su punto máximo a las 11:00 a. m. (57.23°C), seguida de un descenso progresivo: 52.22°C al mediodía, 48.22°C a la 1:00 p. m., hasta los valores mínimos de 39.20°C a las 2:00 p. m. y 30.60°C a las 3:00 p. m. Esto refleja el impacto directo de la disminución de irradiancia y energía térmica.

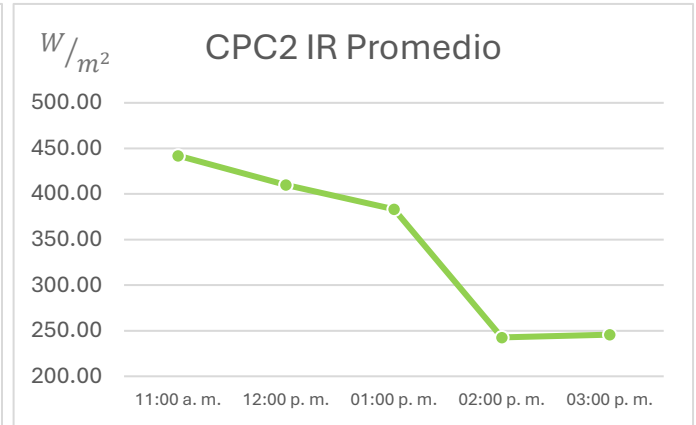
Tabla 3.8. Valores Promedio de irradiancia y temperatura para el CPC2 en el mes de marzo.

Hora	Valores Promedio de Irradiancia y temperatura				
	CPC2 Global [W/m ²]	CPC2 IR [W/m ²]	CPC2 UVA [W/m ²]	CPC2 UVB [W/m ²]	CPC2 Temp [°C]
11:00 a. m.	1047.33	442.05	54.22	4.16	57.23
12:00 p. m.	1005.89	410.11	50.12	4.49	52.22
01:00 p. m.	949.89	383.32	47.19	3.57	48.22
02:00 p. m.	595.33	242.68	35.87	1.35	39.20
03:00 p. m.	607.67	245.70	55.40	0.93	30.60

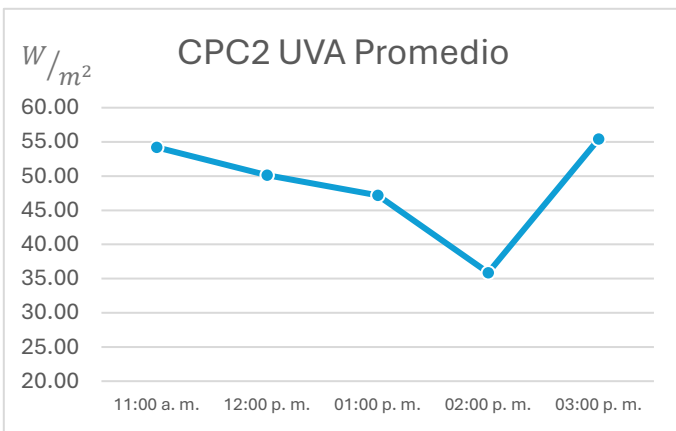
Durante marzo, el CPC2 mostró un comportamiento térmico-óptico influenciado por la dinámica solar y posibles efectos locales de reflexión. La irradiancia global alcanzó su valor máximo a las 11:00 a. m. con 1047.33 W/m^2 , seguida de una disminución progresiva durante la tarde, aunque con un repunte inesperado a las 3:00 p. m., posiblemente asociado a condiciones atmosféricas variables. La radiación infrarroja comenzó con un nivel elevado de 442.05 W/m^2 , disminuyendo de manera constante hasta alcanzar 245.70 W/m^2 al final del periodo, lo que evidencia una reducción continua de la energía térmica disponible en el sistema. En cuanto a la radiación UVA, se registró un pico de 54.22 W/m^2 a las 11:00 a. m., seguido de un descenso hacia las 2:00 p. m., y un repunte posterior a las 3:00 p. m. con un valor de 55.40 W/m^2 , fenómeno posiblemente causado por reflexión o dispersión atmosférica. La radiación UVB presentó su máximo al mediodía con 4.49 W/m^2 y una disminución sostenida hasta 0.93 W/m^2 , reflejando una clara atenuación de la radiación directa. Finalmente, la temperatura interna promedio del CPC2 alcanzó su punto más alto a las 11:00 a. m. con 57.23°C y descendió de manera paulatina hasta los 30.60°C , en coherencia con la reducción progresiva de la irradiancia solar (Figura 3.8).



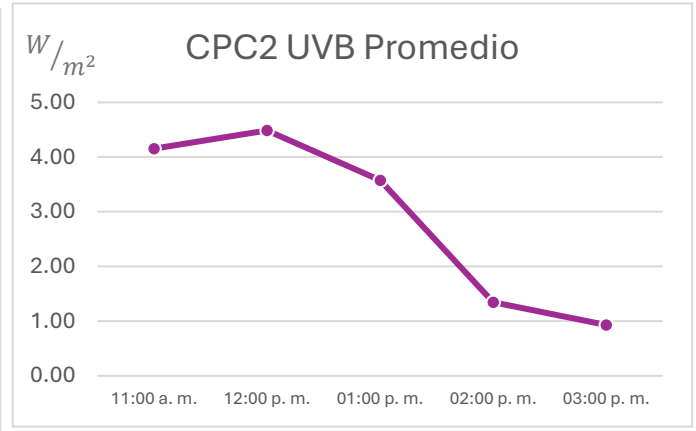
a)



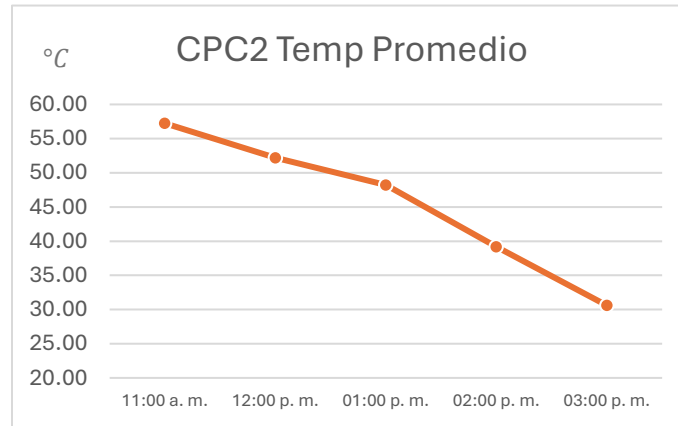
b)



c)



d)



e)

Figura 3.8. Comportamiento promedio de las variables registradas para el CPC2 en el mes de marzo:
a) irradiancia global, b) infrarroja (IR), c) ultravioleta A (UVA), d) ultravioleta B (UVB), e) temperatura.

3.8. Mes de Marzo – Ambiente

Durante el mes de marzo, se registraron mediciones ambientales entre las 11:00 a. m. y las 3:00 p. m. (Tabla 3.9), incluyendo irradiancia global, radiación infrarroja (IR), radiación ultravioleta A (UVA), ultravioleta B (UVB) y temperatura ambiente.

La irradiancia global promedio mostró su valor máximo a las 12:00 p. m. (888.04 W/m²), seguido de un valor muy similar a la 1:00 p. m. (872.41 W/m²). A las 11:00 a. m. el nivel fue menor (698.29 W/m²) y, aunque disminuyó a 758.76 W/m² a las 2:00 p. m., sorpresivamente se registró un repunte a las 3:00 p. m. (857.00 W/m²), lo que sugiere condiciones atmosféricas variables como despejes parciales o reflexión.

La radiación IR promedio presentó un comportamiento relativamente estable durante el mediodía: comenzó en 304.49 W/m² a las 11:00 a. m., oscilando en torno a 288–307 W/m² hasta la 1:00 p. m., para luego caer a 195.94 W/m² a las 2:00 p. m. y cerrar en 238.60 W/m² a las 3:00 p. m.

La radiación UVA promedio alcanzó su valor máximo a las 11:00 a. m. (50.85 W/m²), descendiendo de forma gradual a 35.01 W/m² a las 2:00 p. m., con un leve aumento posterior (38.49 W/m² a las 3:00 p. m.), probablemente debido a cambios en nubosidad o reflexión difusa.

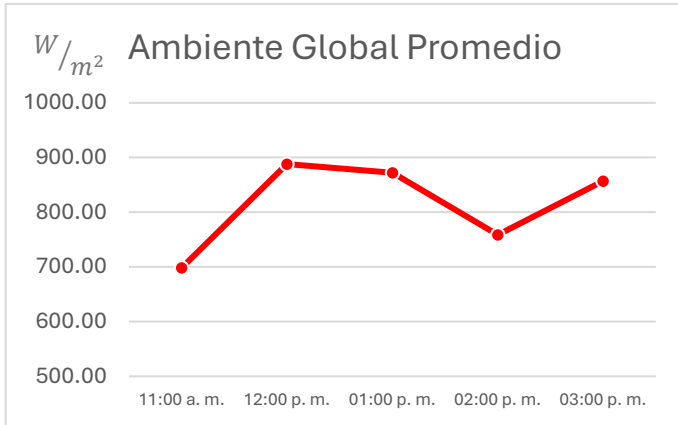
La radiación UVB promedio fue relativamente baja en intensidad, con valores máximos muy cercanos entre sí a lo largo del día: 1.59 W/m² al mediodía, 1.50 W/m² a las 11:00 a. m. y la 1:00 p. m., mostrando un descenso hacia las horas finales (0.96–0.98 W/m²).

La temperatura ambiente promedio mostró una oscilación típica de las condiciones ambientales: comenzó en 24.58°C a las 11:00 a. m., alcanzando un máximo de 31.96°C al mediodía. Posteriormente, descendió a 26.90°C a la 1:00 p. m., para cerrar el día con valores moderados de 24.63°C a las 2:00 p. m. y 27.49°C a las 3:00 p. m.

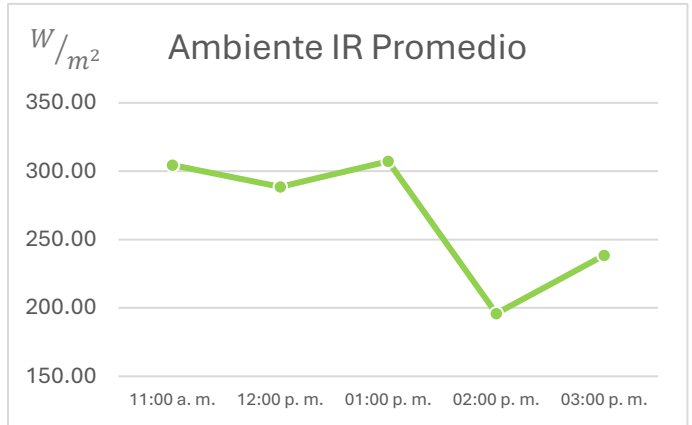
Tabla 3.9. Valores Promedio de irradiancia y temperatura para el Ambiente en el mes de marzo.

Hora	Valores Promedio de Irradiancia y temperatura				
	Ambiente Global [W/m ²]	Ambiente IR [W/m ²]	Ambiente UVA [W/m ²]	Ambiente UVB [W/m ²]	Ambiente Temp [°C]
11:00 a. m.	698.29	304.49	50.85	1.50	24.58
12:00 p. m.	888.04	288.51	47.49	1.59	31.96
01:00 p. m.	872.41	307.22	48.17	1.50	26.90
02:00 p. m.	758.76	195.94	35.01	0.98	24.63
03:00 p. m.	857.00	238.60	38.49	0.96	27.49

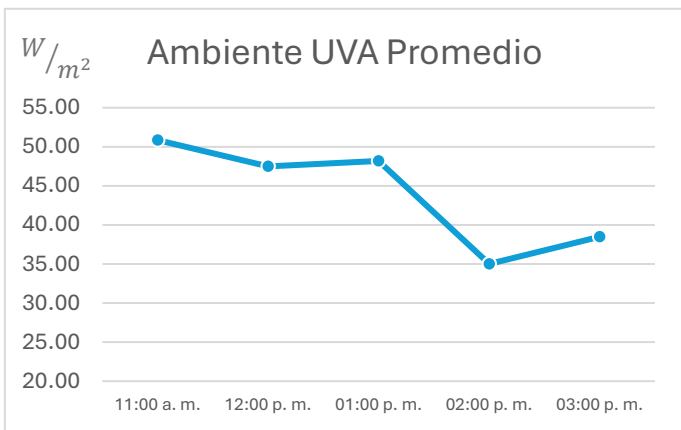
En el entorno ambiental durante marzo se observó una dinámica solar con ligeras fluctuaciones debidas a condiciones atmosféricas variables. La irradiancia global alcanzó su valor máximo al mediodía con 888.04 W/m^2 , seguido de un repunte inusual a las 3:00 p. m. con 857.00 W/m^2 , lo cual sugiere la presencia de reflexión o variaciones en la nubosidad. La radiación infrarroja se mantuvo estable hasta la 1:00 p. m., disminuyendo a 195.94 W/m^2 una hora después, y presentando un leve aumento a las 3:00 p. m., comportamiento que indica una ligera recuperación térmica posiblemente por efectos locales. La radiación UVA tuvo su punto máximo a las 11:00 a. m. con 50.85 W/m^2 , descendiendo gradualmente durante la tarde y mostrando un pequeño repunte al final del periodo. En cuanto a la radiación UVB, se alcanzó un valor máximo al mediodía con 1.59 W/m^2 , disminuyendo de manera moderada hasta cerrar en 0.96 W/m^2 a las 3:00 p. m., en línea con la disminución de la radiación directa. Finalmente, la temperatura ambiente promedio registró un pico térmico de 31.96°C al mediodía y descendió progresivamente hasta estabilizarse alrededor de los 27°C hacia el cierre del periodo, sin presentar oscilaciones abruptas (Figura 3.9).



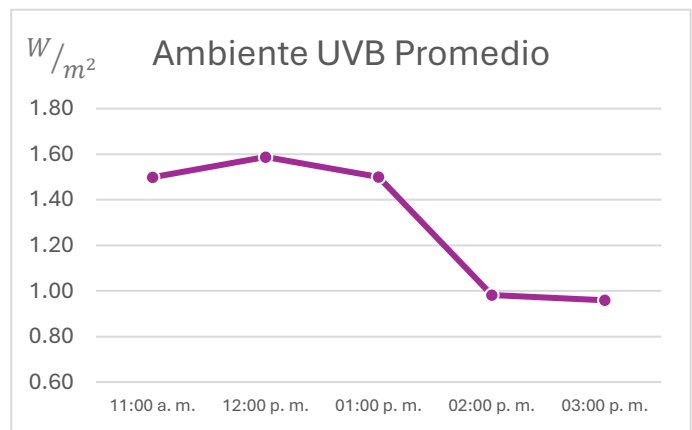
a)



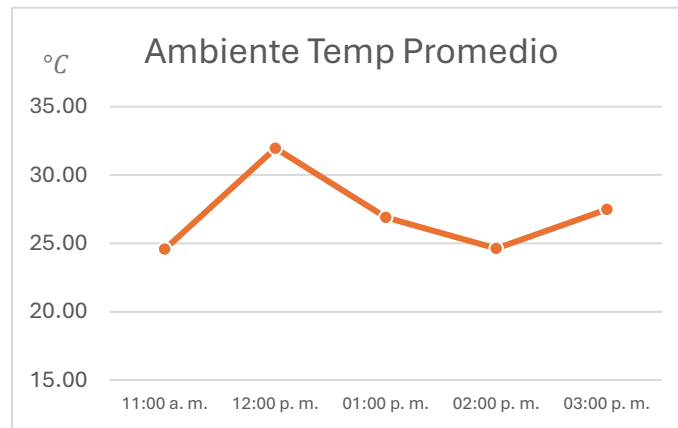
b)



c)



d)



e)

Figura 3.9. Comportamiento promedio de las variables registradas para el Ambiente en el mes de marzo:
a) irradiancia global, b) infrarroja (IR), c) ultravioleta A (UVA), d) ultravioleta B (UVB), e) temperatura.

3.9. Mes de Abril – CPC1

Durante el mes de abril, se realizaron mediciones dentro del CPC1 entre las 11:00 a. m. y las 2:00 p. m. (Tabla 3.10), considerando irradiancia global, radiación infrarroja (IR), radiación ultravioleta A (UVA), ultravioleta B (UVB) y temperatura interna.

La irradiancia global promedio dentro del CPC1 alcanzó su valor máximo a la 1:00 p. m. (1058.30 W/m²), destacando una excelente captación solar durante esa hora. Previamente se registraron valores también muy altos a las 12:00 p. m. (1043.22 W/m²) y 11:00 a. m. (997.06 W/m²). A las 2:00 p. m., el nivel disminuyó notablemente a 844.34 W/m², en línea con la disminución del ángulo solar.

La radiación IR promedio comenzó en 466.29 W/m² a las 11:00 a. m. y mostró un descenso progresivo durante el día: 450.05 W/m² a las 12:00 p. m., 444.74 W/m² a la 1:00 p. m., y un descenso más marcado a 184.78 W/m² a las 2:00 p. m., reflejando la pérdida de energía térmica por la tarde.

La radiación UVA promedio se mantuvo alta y estable entre las 11:00 a. m. y la 1:00 p. m., con valores cercanos a 55 W/m². A partir de las 2:00 p. m. se observó un descenso importante a 39.49 W/m², como resultado del cambio en la inclinación solar y el aumento de la dispersión.

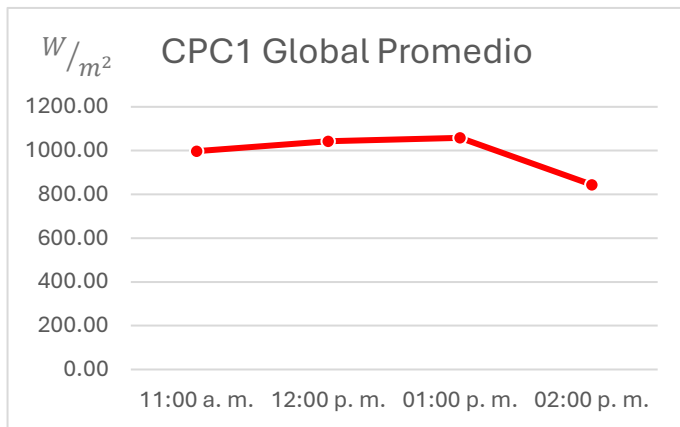
La radiación UVB promedio alcanzó su máximo a las 12:00 p. m. (3.98 W/m²), seguida de 3.09 W/m² a las 11:00 a. m., y un descenso progresivo durante la tarde, llegando a 0.99 W/m² a las 2:00 p. m.

La temperatura interna promedio del CPC1 mostró un comportamiento creciente hasta la 1:00 p. m., iniciando en 51.90°C a las 11:00 a. m., subiendo a 59.71°C al mediodía y alcanzando un máximo de 64.42°C a la 1:00 p. m. Posteriormente, descendió a 36.19°C a las 2:00 p. m., reflejando la pérdida térmica conforme disminuye la irradiancia.

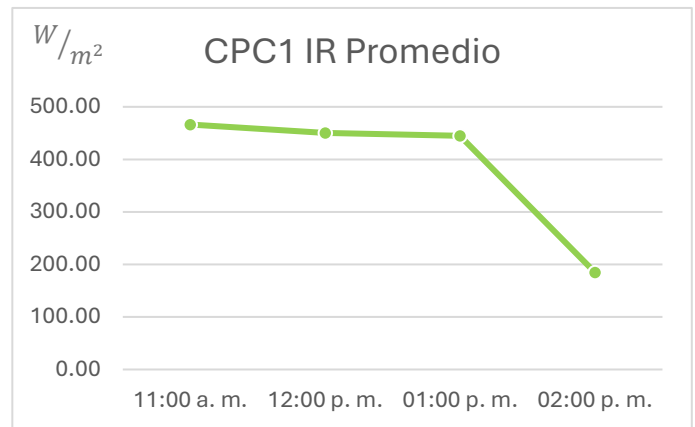
Tabla 3.10. Valores Promedio de irradiancia y temperatura para el CPC1 en el mes de abril.

Hora	Valores Promedio de Irradiancia y temperatura				
	CPC1 Global [W/m ²]	CPC1 IR [W/m ²]	CPC1 UVA [W/m ²]	CPC1 UVB [W/m ²]	CPC1 Temp [°C]
11:00 a. m.	997.06	466.29	55.32	3.09	51.90
12:00 p. m.	1043.22	450.05	54.98	3.98	59.71
01:00 p. m.	1058.30	444.74	54.84	2.66	64.42
02:00 p. m.	844.34	184.78	39.49	0.99	36.19

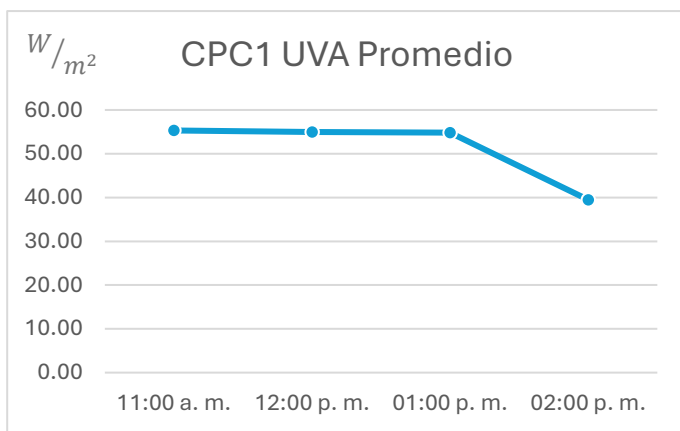
Durante abril, el comportamiento térmico-óptico del CPC1 evidenció una fuerte captación de radiación solar, especialmente hacia el mediodía y primeras horas de la tarde. La irradiancia global alcanzó su valor máximo a la 1:00 p.m. con 1058.30 W/m^2 , seguida de un descenso marcado hacia las horas posteriores, en correspondencia con la disminución del ángulo solar. La radiación infrarroja inició en un nivel elevado de 466.29 W/m^2 , mostrando una disminución progresiva hasta llegar a 184.78 W/m^2 a las 2:00 p. m., reflejando una pérdida significativa de energía térmica al avanzar la tarde. En cuanto a la radiación UVA, se mantuvo en valores cercanos a 55 W/m^2 hasta la 1:00 p. m., momento a partir del cual descendió notablemente hasta alcanzar 39.49 W/m^2 en las últimas mediciones, lo que muestra la reducción en la exposición directa. La radiación UVB presentó su valor más alto al mediodía con 3.98 W/m^2 , seguido de una disminución continua hasta llegar a 0.99 W/m^2 , comportamiento asociado a la dispersión solar. Finalmente, la temperatura interna promedio del CPC1 alcanzó un máximo de 64.42°C a la 1:00 p. m., disminuyendo de manera pronunciada en la hora siguiente hasta los 36.19°C , en coherencia con la reducción en la intensidad de la irradiancia solar incidente (Figura 3.10).



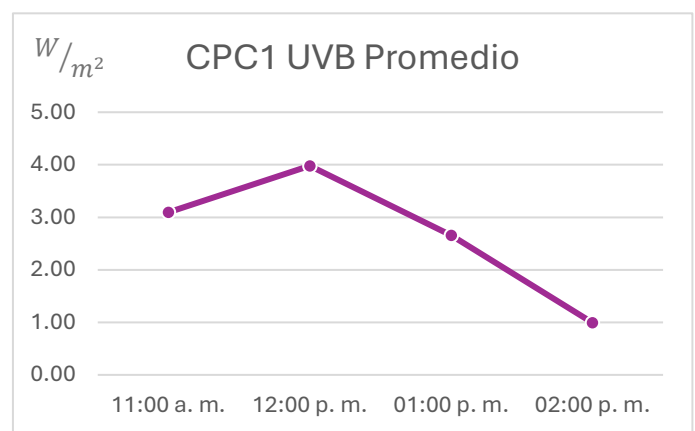
a)



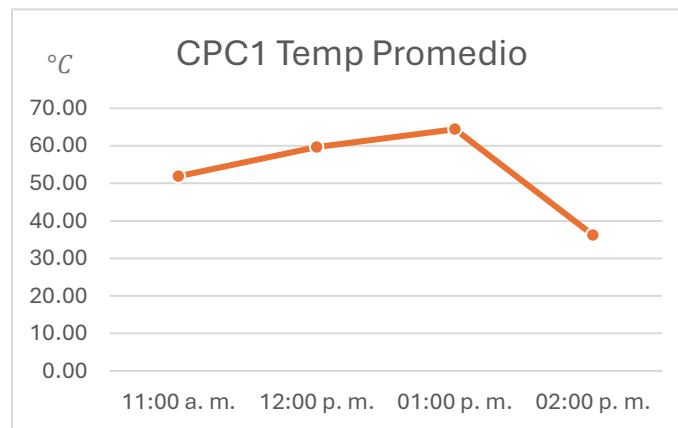
b)



c)



d)



e)

Figura 3.10. Comportamiento promedio de las variables registradas para el CPC1 en el mes de abril:
a) irradiancia global, b) infrarroja (IR), c) ultravioleta A (UVA), d) ultravioleta B (UVB), e) temperatura.

3.10. Mes de Abril – CPC2

Durante el mes de abril, se realizaron mediciones dentro del CPC2 entre las 11:00 a. m. y las 2:00 p. m. (Tabla 3.11), evaluando irradiancia global, radiación infrarroja (IR), radiación ultravioleta A (UVA), ultravioleta B (UVB) y temperatura interna.

La irradiancia global promedio dentro del CPC2 presentó su valor máximo al mediodía (1225.41 W/m²), seguido de valores también muy elevados a las 11:00 a. m. (1170.06 W/m²) y 1:00 p. m. (1199.04 W/m²). A las 2:00 p. m. se registró un descenso significativo a 781.34 W/m², en correspondencia con la reducción de la altura solar.

La radiación IR promedio se mantuvo alta y estable en las primeras horas: 441.97 W/m² a las 11:00 a. m., 462.13 W/m² al mediodía y 459.77 W/m² a la 1:00 p. m., antes de disminuir a 318.25 W/m² a las 2:00 p. m. Esto refleja la buena retención de energía térmica dentro del CPC2 durante el periodo de máxima captación solar.

La radiación UVA promedio mostró valores muy constantes a lo largo del día, con un rango entre 54.24 y 54.76 W/m² entre las 11:00 a. m. y la 1:00 p. m., disminuyendo a 51.26 W/m² a las 2:00 p. m., en línea con la variación en el ángulo solar.

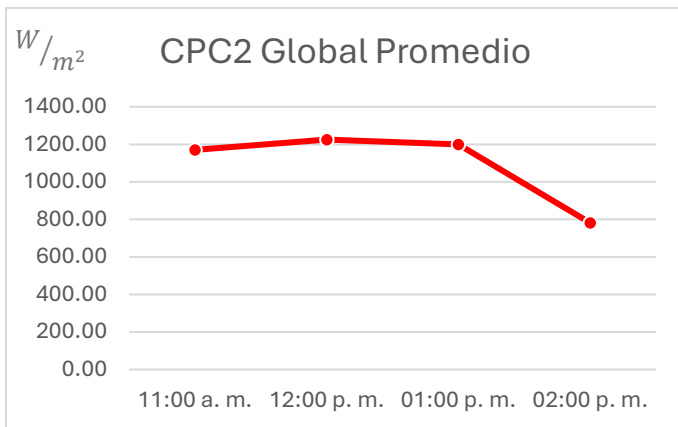
La radiación UVB promedio alcanzó su pico al mediodía (5.77 W/m²), siendo también alta a las 11:00 a. m. (4.85 W/m²) y con un descenso progresivo hacia las horas finales, registrando 1.48 W/m² a las 2:00 p. m.

La temperatura interna promedio del CPC2 mostró un incremento hasta el mediodía (69.90°C), comenzando en 57.93°C a las 11:00 a. m. y descendiendo después: 60.12°C a la 1:00 p. m. y 32.57°C a las 2:00 p. m., en correspondencia con la disminución de la irradiancia y la energía térmica acumulada.

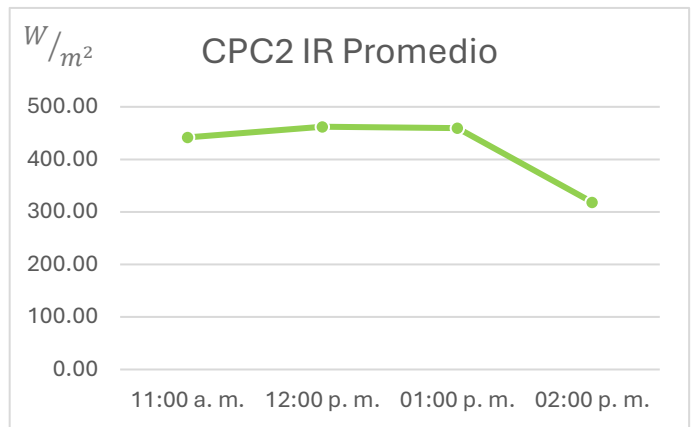
Tabla 3.11. Valores Promedio de irradiancia y temperatura para el CPC2 en el mes de abril.

Hora	Valores Promedio de Irradiancia y temperatura				
	CPC2 Global [W/m ²]	CPC2 IR [W/m ²]	CPC2 UVA [W/m ²]	CPC2 UVB [W/m ²]	CPC2 Temp [°C]
11:00 a. m.	1170.06	441.97	54.24	4.85	57.93
12:00 p. m.	1225.41	462.13	54.76	5.77	69.90
01:00 p. m.	1199.04	459.77	54.59	4.10	60.12
02:00 p. m.	781.34	318.25	51.26	1.48	32.57

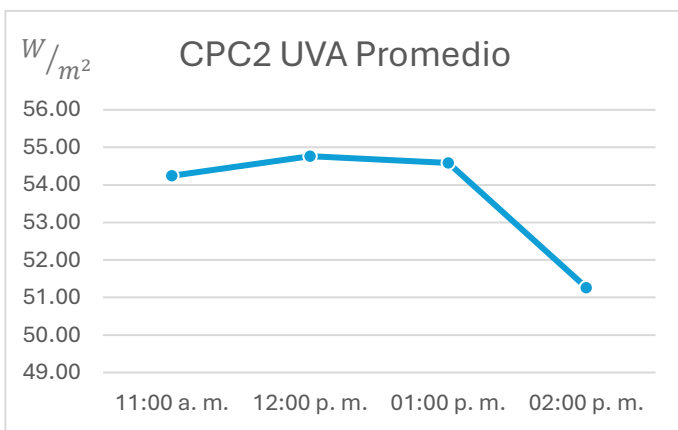
Durante el mes de abril, el CPC2 evidenció una captación solar considerable, con valores particularmente elevados en comparación con otros periodos. La irradiancia global alcanzó un pico al mediodía de 1225.41 W/m^2 , manteniéndose en niveles altos durante las horas previas y presentando una disminución significativa hacia las 2:00 p. m., en concordancia con la inclinación solar. La radiación infrarroja se mantuvo alta y estable hasta la 1:00 p. m., reflejando una intensa acumulación de energía térmica, y posteriormente descendió a 318.25 W/m^2 , lo que indica una pérdida de calor conforme disminuyó la irradiancia. En el caso de la radiación UVA, los valores fueron muy estables durante la mayor parte del día, con una leve disminución hasta 51.26 W/m^2 a las 2:00 p. m., reflejando la progresiva disminución de la radiación directa. La radiación UVB mostró su valor máximo al mediodía con 5.77 W/m^2 , seguido de un descenso progresivo hasta 1.48 W/m^2 al final del periodo de medición, respondiendo a la atenuación atmosférica típica de la tarde. Finalmente, la temperatura interna promedio del CPC2 alcanzó un máximo notable de 69.90°C al mediodía, disminuyendo de forma significativa hasta 32.57°C , lo cual evidencia el fuerte impacto térmico de la radiación solar sobre el sistema y su posterior disipación hacia el cierre del periodo (Figura 3.11).



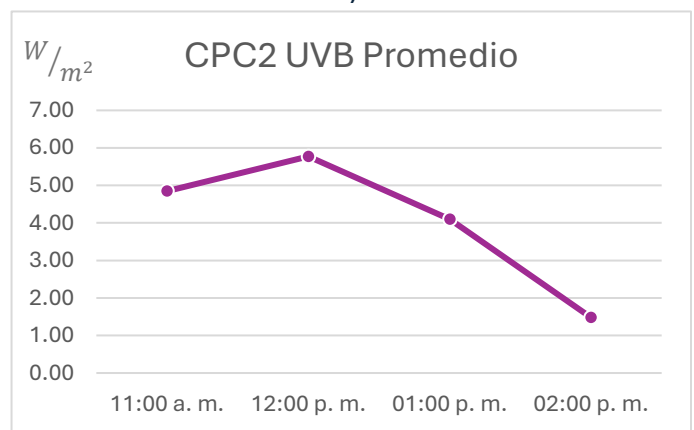
a)



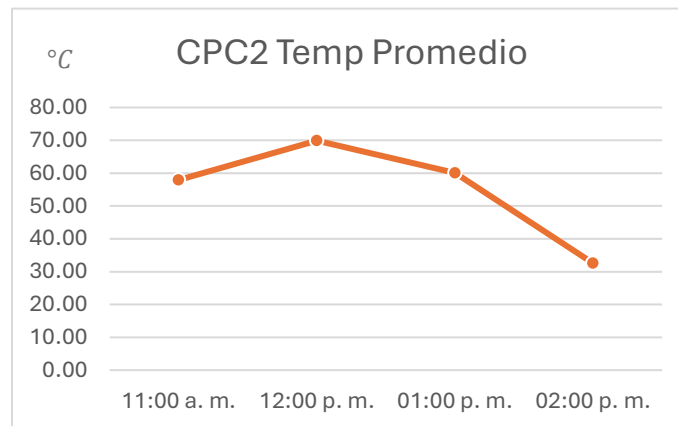
b)



c)



d)



e)

Figura 3.11. Comportamiento promedio de las variables registradas para el CPC2 en el mes de abril:
a) irradiancia global, b) infrarroja (IR), c) ultravioleta A (UVA), d) ultravioleta B (UVB), e) temperatura.

3.11. Mes de Abril – Ambiente

Durante el mes de abril, se llevaron a cabo mediciones ambientales entre las 11:00 a. m. y las 2:00 p. m. (Tabla 3.12), considerando irradiancia global, radiación infrarroja (IR), radiación ultravioleta A (UVA), ultravioleta B (UVB) y temperatura ambiente.

La irradiancia global promedio presentó su valor máximo a la 1:00 p. m. (1106.15 W/m^2), mostrando una disponibilidad solar muy elevada durante ese horario. Le siguieron 1038.07 W/m^2 al mediodía y 986.50 W/m^2 a las 2:00 p. m. A las 11:00 a. m. se registró un valor de 855.60 W/m^2 , reflejando el incremento progresivo de la radiación hasta el pico horario.

La radiación IR promedio mostró un comportamiento estable con ligeras variaciones: comenzó en 324.03 W/m^2 a las 11:00 a. m., alcanzó un máximo de 340.11 W/m^2 a la 1:00 p. m., y disminuyó a 293.97 W/m^2 a las 2:00 p. m. Este comportamiento es consistente con la tendencia de la irradiancia global.

La radiación UVA promedio se mantuvo bastante constante durante el periodo de medición, con valores superiores a 51 W/m^2 en todas las horas. El máximo se registró a la 1:00 p. m. (54.61 W/m^2), reflejando la alta intensidad solar de la jornada.

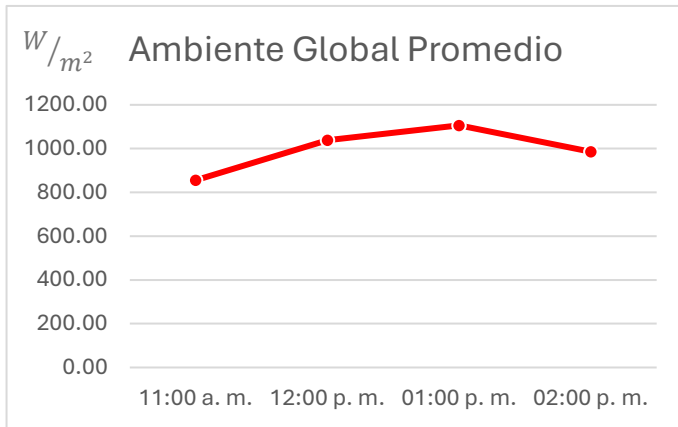
La radiación UVB promedio fue menor en intensidad, alcanzando un máximo de 1.85 W/m^2 al mediodía, con valores similares a lo largo del periodo y una disminución leve a 1.41 W/m^2 a las 2:00 p. m.

La temperatura ambiente mostró un incremento sostenido durante el día: comenzó en 24.98°C a las 11:00 a. m., alcanzó 26.53°C al mediodía, 29.33°C a la 1:00 p. m., y cerró en 30.97°C a las 2:00 p. m., evidenciando la acumulación térmica típica del entorno durante jornadas de alta irradiancia.

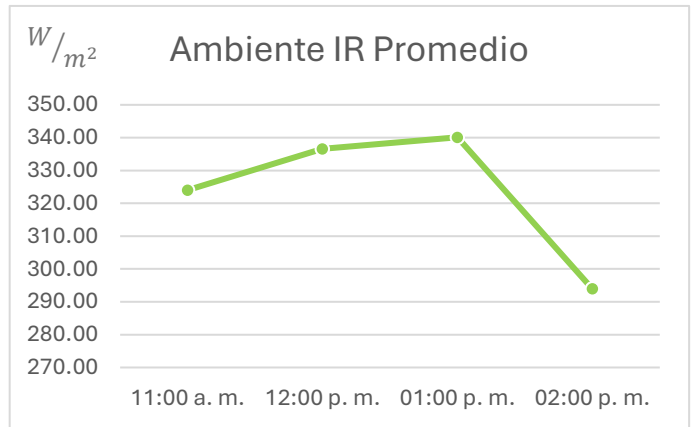
Tabla 3.12. Valores Promedio de irradiancia y temperatura para el Ambiente en el mes de abril.

Hora	Valores Promedio de Irradiancia y temperatura				
	Ambiente Global [W/m ²]	Ambiente IR [W/m ²]	Ambiente UVA [W/m ²]	Ambiente UVB [W/m ²]	Ambiente Temp [°C]
11:00 a. m.	855.60	324.03	54.10	1.67	24.98
12:00 p. m.	1038.07	336.56	52.87	1.85	26.53
01:00 p. m.	1106.15	340.11	54.61	1.78	29.33
02:00 p. m.	986.50	293.97	51.16	1.41	30.97

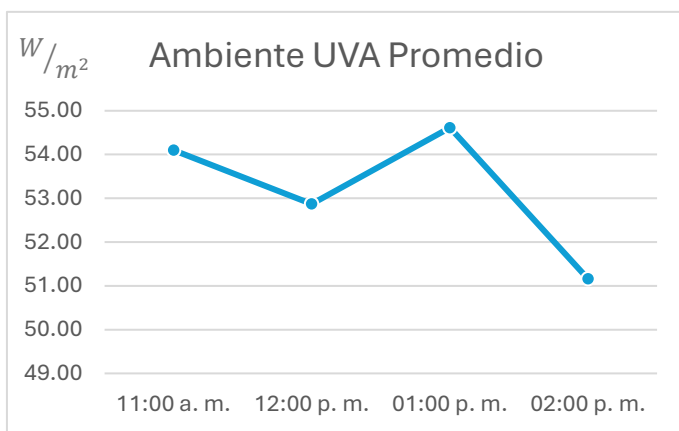
En abril, el entorno presentó una alta disponibilidad solar, con una irradiancia global que alcanzó los 1106.15 W/m^2 a la 1:00 p. m., lo que evidencia condiciones atmosféricas favorables para la captación solar. La radiación infrarroja ambiental se mantuvo relativamente estable, registrando un ligero pico de 340.11 W/m^2 también a la 1:00 p. m., seguido de un descenso moderado, lo cual indica una moderada disipación térmica en el ambiente. La radiación UVA se mantuvo elevada durante todo el periodo de medición, alcanzando su punto máximo de 54.61 W/m^2 a la misma hora, reflejando una alta intensidad de radiación solar directa. En cuanto a la radiación UVB, se observó un comportamiento típico con un pico al mediodía (1.85 W/m^2) y un descenso paulatino hasta 1.41 W/m^2 a las 2:00 p. m., lo que sugiere una reducción gradual de la energía ultravioleta más intensa. Finalmente, la temperatura ambiente mostró una tendencia ascendente continua, alcanzando su punto más alto de 30.97°C al final del periodo de medición, lo que coincide con el comportamiento térmico general de los demás parámetros observados (Figura 3.12).



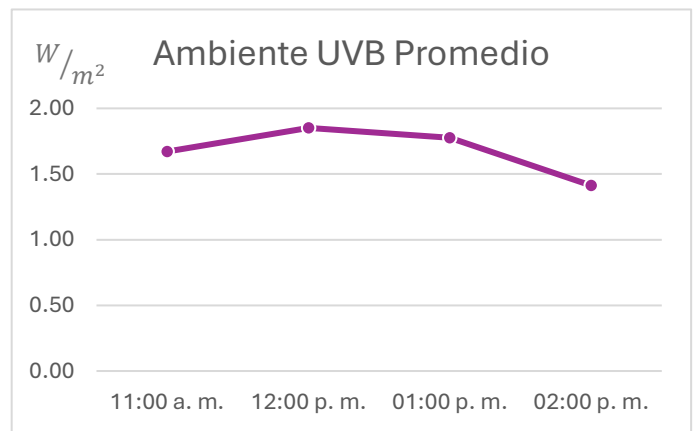
a)



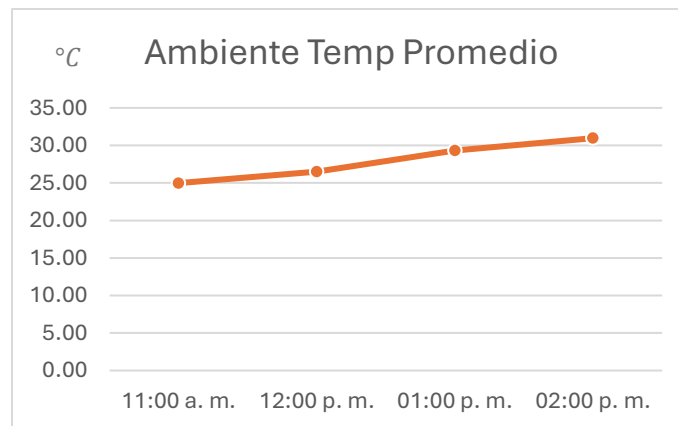
b)



c)



d)



e)

Figura 3.12. Comportamiento promedio de las variables registradas para el Ambiente en el mes de abril:
 a) irradiancia global, b) infrarroja (IR), c) ultravioleta A (UVA), d) ultravioleta B (UVB), e) temperatura.

4. Comparativa de mediciones con base climatológica

Para validar la confiabilidad de las mediciones realizadas, se seleccionaron algunos días representativos del registro experimental y se compararon con datos horarios de la base climatológica NASA POWER (A.5). En dicha base, la irradiancia global, UVA y UVB provienen de modelos satelitales de radiación solar que emplean información de nubosidad y balance radiactivo atmosférico, mientras que la temperatura ambiente corresponde a datos reanalizados obtenidos a partir de modelos meteorológicos globales.

La comparativa se efectuó empleando las mismas fechas y la misma hora de medición (12:00 p.m.) y únicamente se contrastaron los valores medidos fuera de los CPC, ya que representan la referencia ambiental. Los parámetros que se pudieron comparar fueron irradiancia global, UVA, UVB y temperatura.

Los resultados muestran que existe una correspondencia parcial en el comportamiento puntual de la radiación global y de las bandas espectrales UVA y UVB respecto a los valores de la NASA POWER, lo que puede atribuirse a que la base utiliza estimaciones satelitales sobre celdas de resolución espacial amplia, mientras que en este estudio las mediciones se realizaron mediante radiómetros. De igual manera, las temperaturas presentaron una correspondencia parcial si bien más cercana, aunque tampoco alcanzaron el nivel esperado de ajuste.

A pesar de las discrepancias puntuales en los valores comparados, se observó que los registros de NASA POWER y las mediciones locales muestran una tendencia en esencia similar: los parámetros ambientales presentan aumentos y disminuciones bajo condiciones atmosféricas análogas, lo cual respalda parcialmente la validez de los datos medidos en campo. A futuro, esta información será útil para mejorar la calibración de mediciones locales, apoyar el diseño de concentradores, optimizar procesos térmicos y aplicar estos conocimientos en proyectos relacionados con energía solar, eficiencia energética o degradación de contaminantes mediante radiación.

4.1. Comportamiento General de CPC1, CPC2 y Ambiente (enero)

En todos los casos, la irradiancia global alcanza su punto máximo entre las 11:00 a. m. y las 12:00 p. m., disminuyendo progresivamente durante la tarde. Sin embargo, CPC2 presentó el valor más alto con 1006.95 W/m² a las 11:00 a. m.,

seguido por CPC1 con 927.86 W/m^2 . La irradiancia global medida a cielo abierto fuera del CPC registró valores considerablemente menores, con un máximo de 746.14 W/m^2 a las 12:00 p. m., lo que confirma la capacidad de ambos CPC para concentrar la radiación solar.

La irradiancia infrarroja (IR) sigue una tendencia similar a la global, pero con diferencias más notables. CPC1 y CPC2 comienzan con valores cercanos (466.55 y 462.70 W/m^2 , respectivamente), pero la caída es más marcada en CPC2, descendiendo hasta 196.8 W/m^2 , mientras que CPC1 se mantiene más estable. La irradiancia IR medida a cielo abierto fuera del CPC parte de 329.95 W/m^2 y disminuye gradualmente, lo que muestra una menor capacidad de retención térmica en el entorno natural.

En el caso de la radiación UVA, tanto CPC1 como CPC2 mantienen valores estables durante las primeras horas del día, con máximos similares (55.29 W/m^2 en CPC1 y 55.07 W/m^2 en CPC2) a las 11:00 a. m. La irradiancia UVA medida a cielo abierto fuera del CPC, en cambio, comienza ligeramente por debajo (51.08 W/m^2) y presenta una caída más pronunciada, alcanzando apenas 23.18 W/m^2 a las 4:00 p. m.

La radiación UVB, aunque de menor magnitud, presenta diferencias interesantes. CPC2 muestra el mayor valor con 4.97 W/m^2 a la 1:00 p. m., lo cual puede deberse a una mejor orientación o reflectividad interna del concentrador. CPC1 también alcanza su pico a esa hora (2.92 W/m^2), mientras que la irradiancia UVB medida a cielo abierto fuera del CPC se mantiene por debajo de 1.7 W/m^2 en todo momento, indicando que ambos CPC logran captar y amplificar esta componente de alta energía.

En cuanto a la temperatura, la comparación es clara: CPC1 alcanza la mayor temperatura interna con 51.68°C , seguido de CPC2 con 41.04°C , mientras que el ambiente se mantiene mucho más bajo, iniciando en 23.37°C y finalizando en 29.80°C . La diferencia térmica entre los concentradores y el ambiente demuestra su capacidad para concentrar energía térmica. Sin embargo, se observa que CPC1 conserva mejor la temperatura durante el día, mientras que CPC2 muestra una caída más rápida, lo cual podría deberse a la diferencia en los materiales de las superficies reflectivas.

Dicho comportamiento se puede observar en las Figura 4.1a-d; en las cuales se muestra la tendencia del comportamiento de la irradiancia promedio para la UVA, UVB, IR, y global.

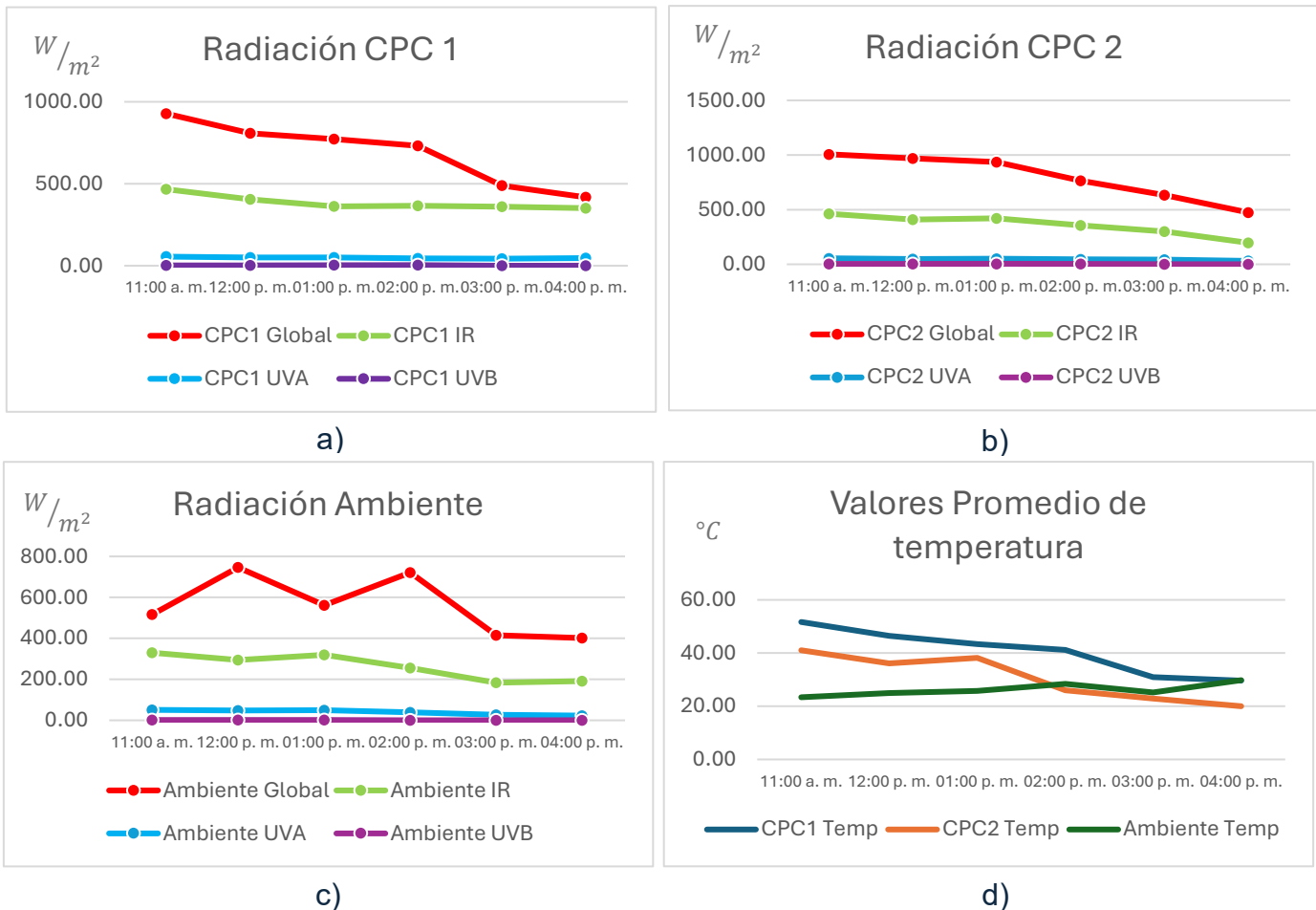


Figura 4.1. Comportamiento general del mes de enero: a) CPC1, b) CPC2, c) Ambiente, d) Temperatura.

En resumen, las gráficas generales permiten concluir que ambos concentradores solares CPC son efectivos en captar e intensificar la radiación solar, pero CPC1 presenta un mejor comportamiento térmico sostenido, mientras que CPC2 alcanza mayores valores de irradiancia momentáneamente, especialmente en UVB. Por su parte, el ambiente ofrece una base de comparación útil, confirmando que los concentradores modifican significativamente las condiciones internas respecto al entorno natural.

4.2. Comparativa con base de datos de NASA (enero)

Con el fin de respaldar la validez de las mediciones obtenidas experimentalmente, se realizó una comparación puntual con los datos proporcionados por la base de datos climatológica de la NASA POWER para el mes de enero.

La información detallada de las mediciones realizadas por día se encuentra en el A.5 correspondiente al mes de enero. Al contrastar algunos días representativos, se observó una concordancia en el comportamiento horario de los parámetros medidos y térmicos entre ambos conjuntos de datos, lo cual contribuye a validar la confiabilidad de las mediciones en campo y refuerza las conclusiones obtenidas a partir del análisis de los valores promedio mensuales. Dicho comportamiento se puede observar en las Figura 4.2a-d.

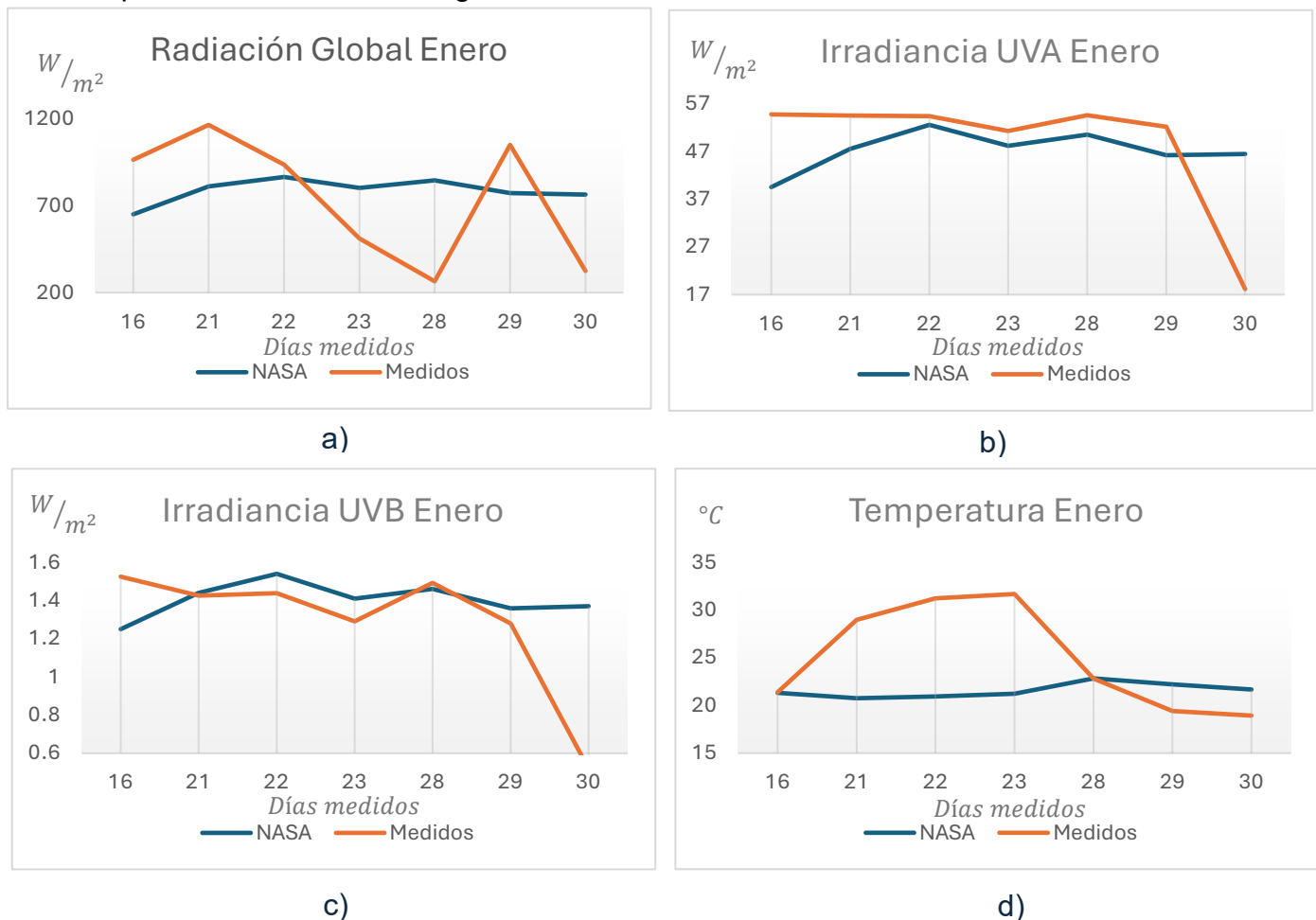


Figura 4.2. Comparativa con base de datos de NASA con datos medidos (enero): a) Global, b) UVA, c) UVB y d) Temperatura.

4.3. Comportamiento General de CPC1, CPC2 y Ambiente (febrero)

La irradiancia global alcanzó sus máximos valores entre las 11:00 a. m. y las 12:00 p. m. En este caso, CPC2 fue el sistema que registró el valor más alto (971.51 W/m^2 a las 11:00 a. m.), seguido de CPC1 con 888.10 W/m^2 al mediodía. Las mediciones de la irradiancia global medidas a cielo abierto se mantuvieron por debajo, con un máximo de 827.80 W/m^2 a las 12:00 p. m. Esto confirma el mayor potencial de CPC2 para captar y concentrar la radiación solar en febrero.

La irradiancia IR mostró una tendencia decreciente en todos los casos. CPC1 y CPC2 comenzaron con valores elevados (418.30 y 453.44 W/m^2 , respectivamente), pero CPC2 experimentó una reducción más marcada hacia la tarde. Las medidas de irradiancia IR a cielo abierto fuera de los concentradores partió de 282.57 W/m^2 a las 11:00 a. m. y descendió de manera más gradual, mostrando nuevamente una menor capacidad para retener energía térmica.

En UVA, ambos CPC mantuvieron valores más altos que a cielo abierto fuera de los concentradores durante las primeras horas, con máximos similares (52.70 W/m^2 en CPC1 y 54.91 W/m^2 en CPC2). La radiación UVA fuera de los concentradores presentó valores más bajos (48.05 W/m^2 a las 11:00 a. m.) y un descenso progresivo hacia la tarde.

En UVB, CPC2 sobresalió con el mayor valor (3.76 W/m^2 al mediodía), mientras que CPC1 alcanzó 2.54 W/m^2 a esa hora. Las mediciones a cielo abierto no superaron los 1.72 W/m^2 en ningún momento, demostrando la capacidad de los CPC para amplificar esta componente de alta energía.

En cuanto a la temperatura, CPC1 mostró el mayor pico térmico (61.49°C a la 1:00 p. m.), seguido por CPC2 (55.56°C al mediodía). La temperatura, en contraste, osciló entre 22.04 y 24.71°C , destacando la función de los CPC como sistemas acumuladores de calor.

Dicho comportamiento se puede observar en las Figura 4.3a-d; en las cuales se muestra la tendencia del comportamiento de la irradiancia promedio para la UVA, UVB, IR, y global.

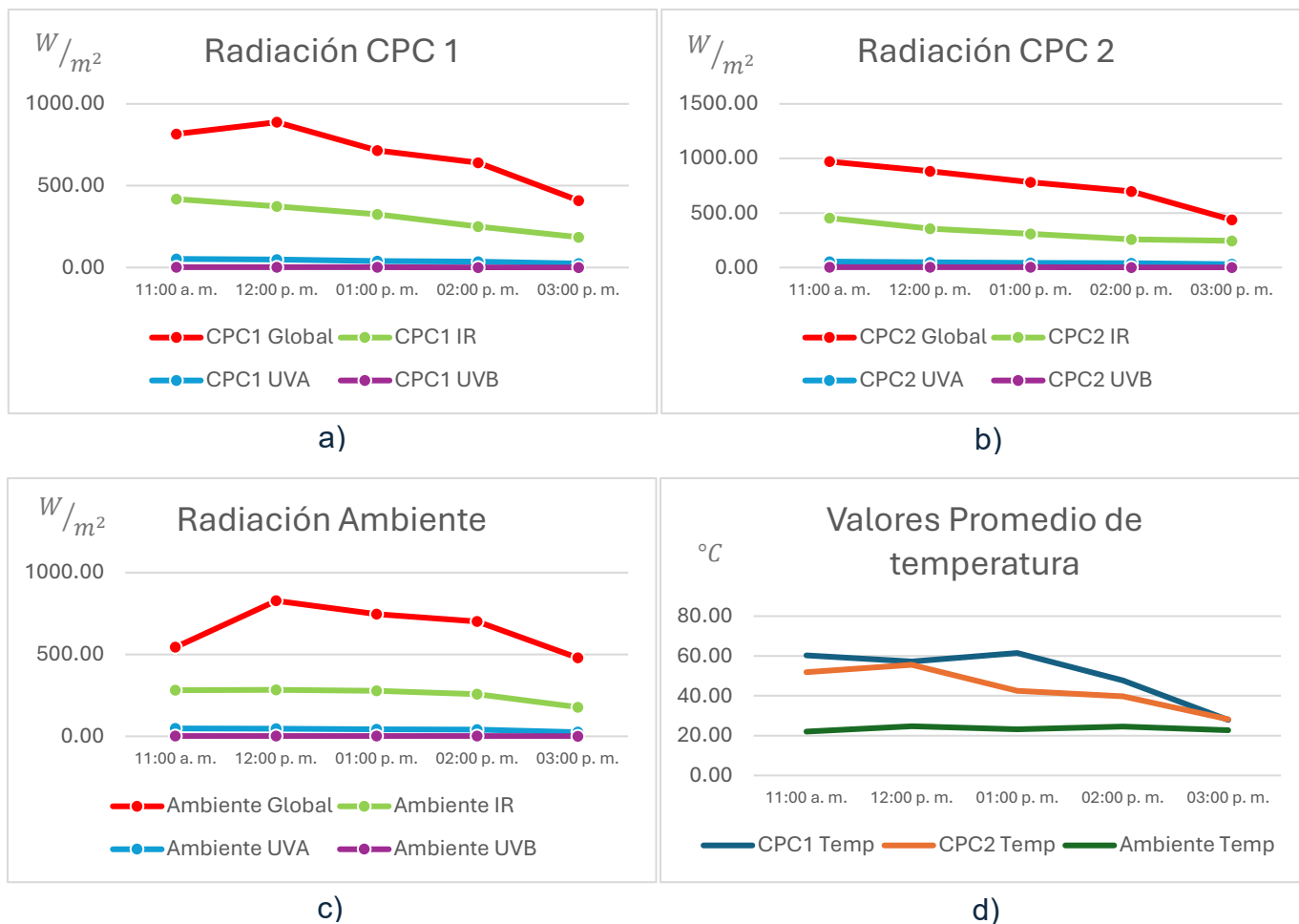


Figura 4.3. Comportamiento general del mes de febrero: a) CPC1, b) CPC2, c) Ambiente, d) Temperatura.

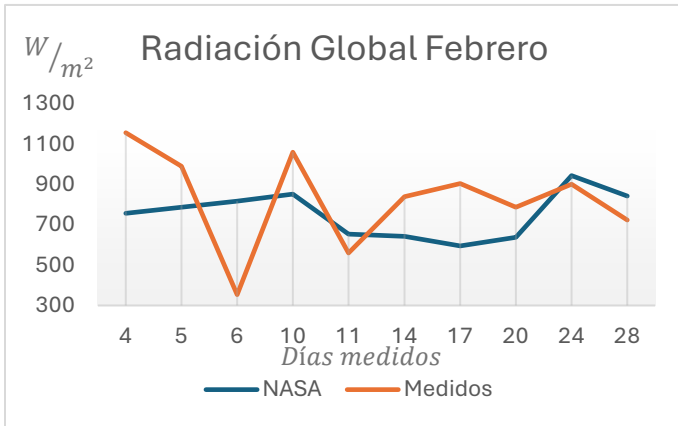
En resumen, en febrero CPC2 destacó por su mayor captación solar en irradiancia y UVB, mientras que CPC1 mostró una respuesta térmica ligeramente superior. El ambiente sirvió como base de comparación, confirmando el efecto concentrador de ambos dispositivos.

4.4. Comparativa con base de datos de NASA (febrero)

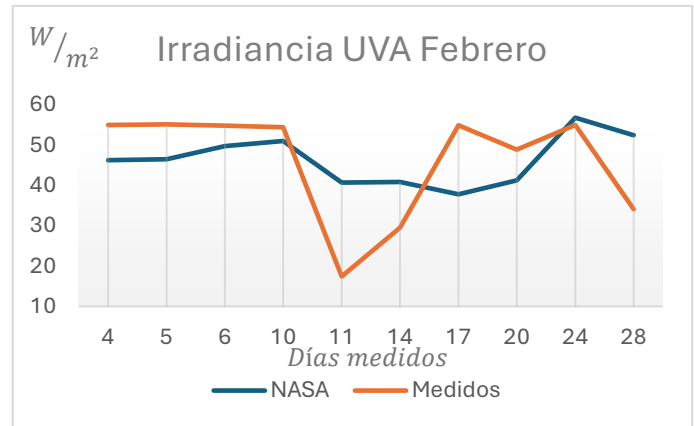
Con el fin de respaldar la validez de las mediciones obtenidas experimentalmente, se realizó una comparación puntual con los datos proporcionados por la base de datos climatológica de la NASA POWER para el mes de febrero.

La información detallada de las mediciones realizadas por día se encuentra en el A.5 correspondiente al mes de febrero. Al contrastar algunos días representativos, se observó una concordancia en el comportamiento horario de los parámetros medidos y térmicos entre ambos conjuntos de datos, lo cual contribuye a validar la

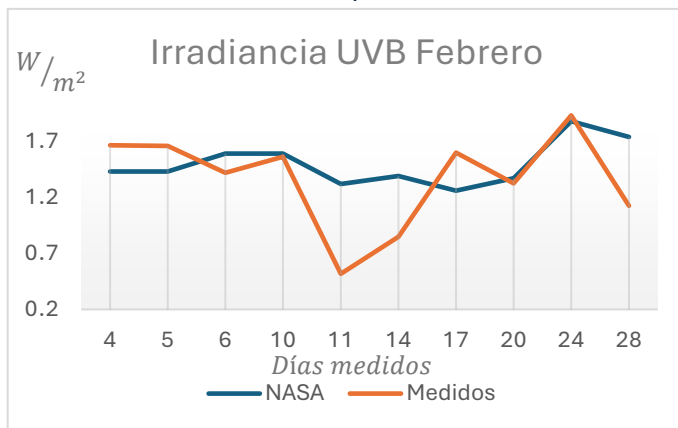
confiabilidad de las mediciones en campo y refuerza las conclusiones obtenidas a partir del análisis de los valores promedio mensuales. Dicho comportamiento se puede observar en las Figura 4.4a-d.



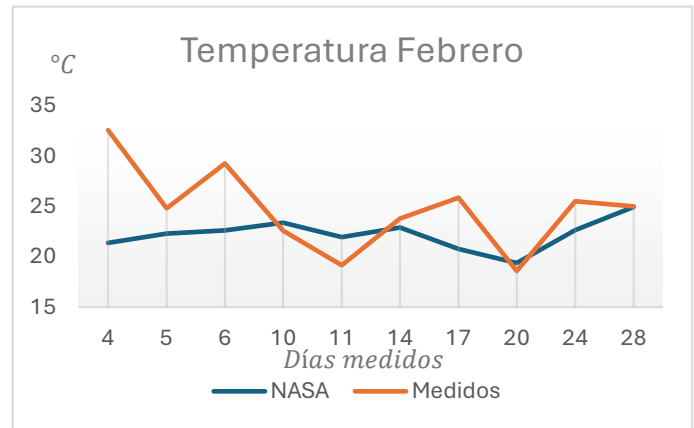
a)



b)



c)



d)

Figura 4.4. Comparativa con base de datos de NASA con datos medidos (enero): a) Global, b) UVA, c) UVB y d) Temperatura.

4.5. Comportamiento General de CPC1, CPC2 y Ambiente (marzo)

En marzo, las gráficas generales evidencian el desempeño de los sistemas bajo condiciones de mayor irradiancia estacional, mostrando un patrón consistente de los parámetros medidos.

La irradiancia global presentó los valores más altos en CPC2, con un máximo de 1170.06 W/m² a las 11:00 a. m. CPC1 registró un valor máximo de 1058.30 W/m² a la 1:00 p. m. Las mediciones de la irradiancia global medidas a cielo abierto mostraron también irradiancia elevada, alcanzando 1106.15 W/m² a la 1:00 p. m., reflejando condiciones atmosféricas particularmente favorables.

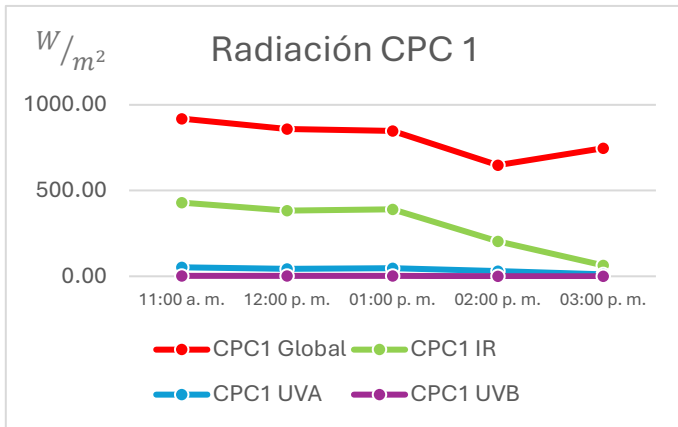
En irradiancia IR, CPC1 y CPC2 nuevamente superaron al ambiente durante todo el día. CPC2 comenzó en 442.05 W/m² y se mantuvo estable hasta la 1:00 p. m., mientras CPC1 mostró un patrón similar. Las medidas de irradiancia IR a cielo abierto fuera de los concentradores osciló entre 304.49 y 340.11 W/m².

Para UVA, los CPC y a cielo abierto fuera de los concentradores mostraron valores cercanos durante las primeras horas, pero los CPC lograron mantener mejor los niveles de captación, sobre todo CPC2, que sostuvo valores superiores a 54 W/m² hasta la 1:00 p. m.

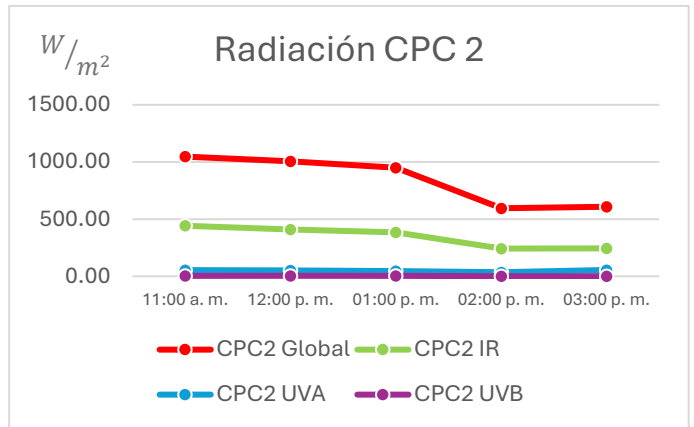
En UVB, CPC2 registró los valores más altos (4.16 W/m² a las 11:00 a. m. y 4.49 W/m² al mediodía), mientras que CPC1 alcanzó 2.69 y 2.68 W/m² en esas horas. Las mediciones a cielo abierto no superaron los 1.78 W/m², confirmando la mayor captación de radiación de alta energía en los concentradores.

La temperatura interna del CPC1 fue la más alta (64.42 °C a la 1:00 p. m.), seguida por CPC2 (60.12 °C). La temperatura, aunque cálida, nunca superó los 30 °C. Esto demuestra el fuerte efecto de acumulación térmica de los CPC.

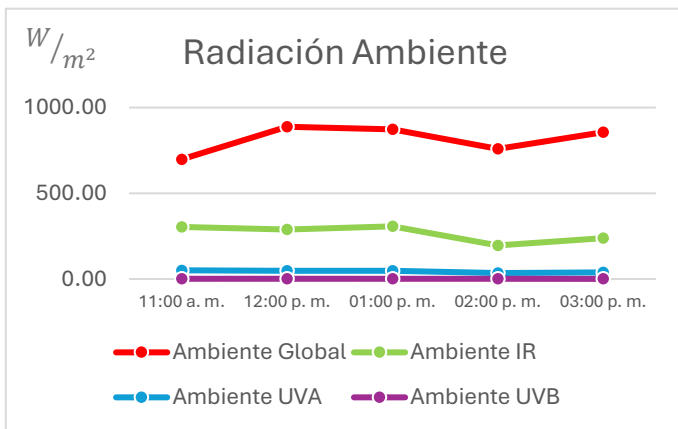
Dicho comportamiento se puede observar en las Figura 4.5a-d. En las cuales se muestra la tendencia del comportamiento de la irradiancia promedio para la UVA, UVB, IR, y global.



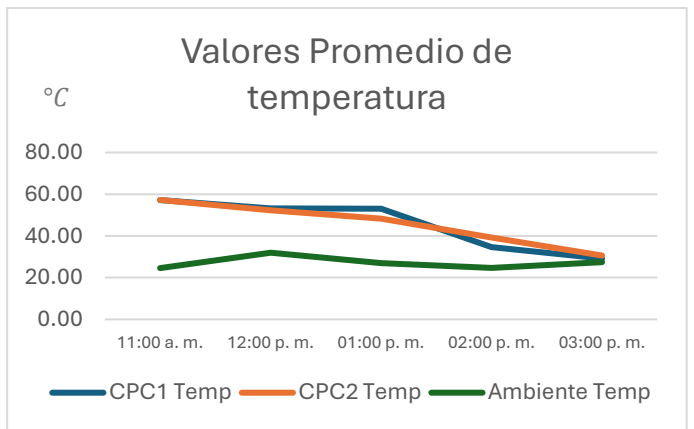
a)



b)



c)



d)

Figura 4.5. Comportamiento General del mes de marzo: a) CPC1, b) CPC2, c) Ambiente, d) Temperatura.

4.6. Comparativa con base de datos de NASA (marzo)

Con el fin de respaldar la validez de las mediciones obtenidas experimentalmente, se realizó una comparación puntual con los datos proporcionados por la base de datos climatológica de la NASA POWER para el mes de marzo.

La información detallada de las mediciones realizadas por día se encuentra en el A.5 correspondiente al mes de marzo. Al contrastar algunos días representativos, se observó una concordancia en el comportamiento horario de los parámetros medidos y térmicos entre ambos conjuntos de datos, lo cual contribuye a validar la confiabilidad de las mediciones en campo y refuerza las conclusiones obtenidas a partir del análisis de los valores promedio mensuales. Dicho comportamiento se puede observar en las Figura 4.6 a-d.

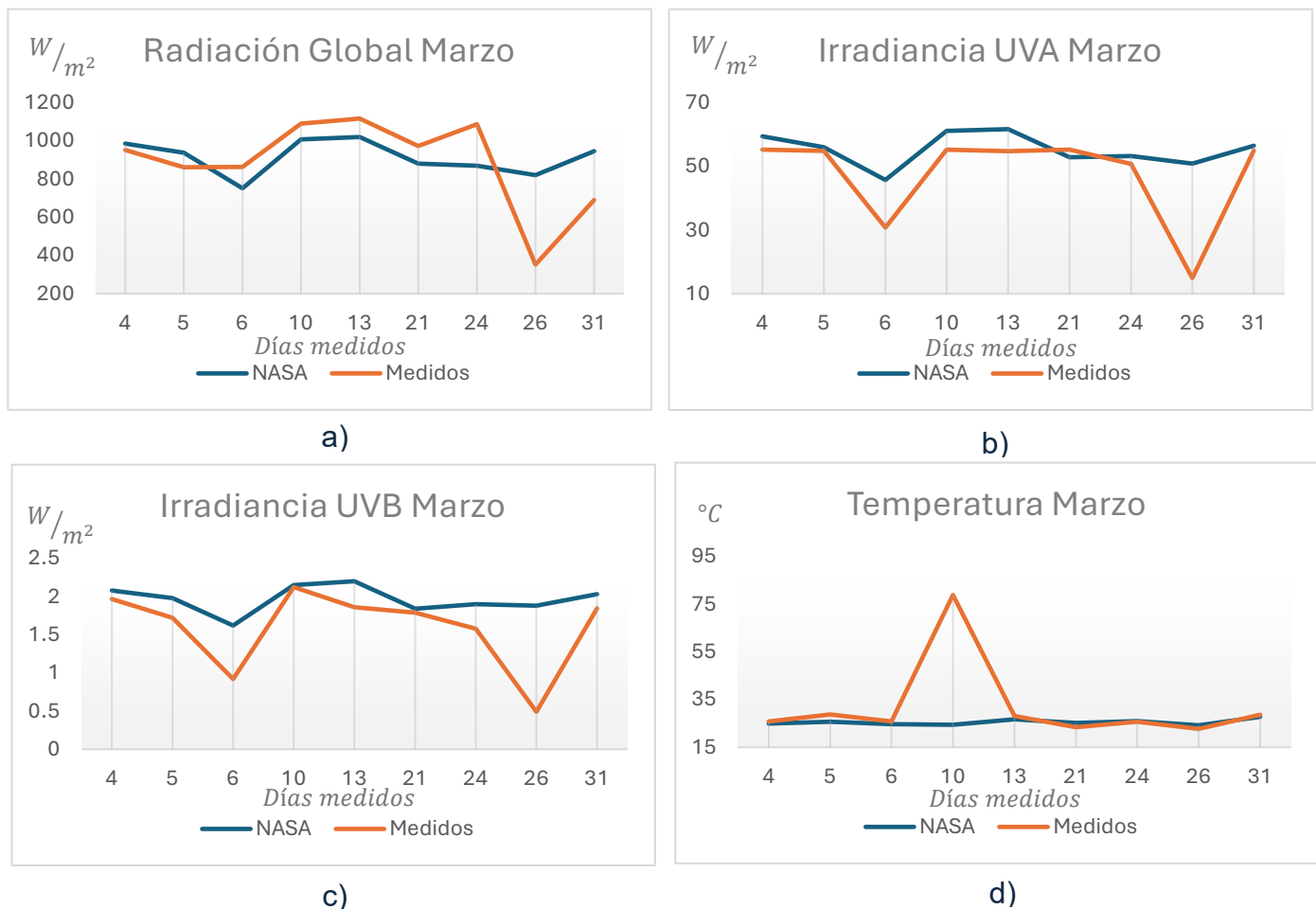


Figura 4.6. Comparativa con base de datos de NASA con datos medidos (enero): a) Global, b) UVA, c) UVB y d) Temperatura.

4.7. Comportamiento General de CPC1, CPC2 y Ambiente (abril)

Abril presentó condiciones óptimas de radiación, reflejadas en los valores de las gráficas generales de todos los parámetros medidos.

La irradiancia global fue notablemente superior en CPC2 (1225.41 W/m^2 al mediodía), con CPC1 también alcanzando un máximo de 1058.30 W/m^2 a la 1:00 p. m. Las mediciones de la irradiancia global medidas a cielo abierto registraron un valor destacado (1106.15 W/m^2 a la 1:00 p. m.), lo que confirma las excelentes condiciones solares del mes.

En irradiancia IR, CPC2 y CPC1 concentraron más energía que el ambiente en todo momento. CPC2 registró hasta 462.13 W/m^2 al mediodía, mientras CPC1 llegó a 466.29 W/m^2 a las 11:00 a. m. Las medidas de irradiancia IR a cielo abierto fuera de los concentradores permaneció por debajo, con un máximo de 340.11 W/m^2 .

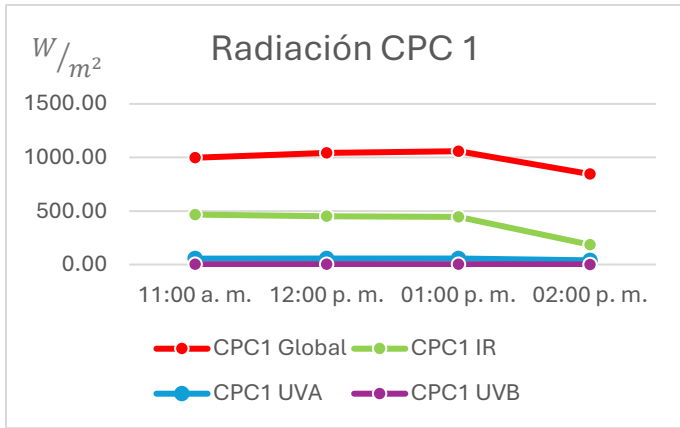
La radiación UVA fue muy estable, con CPC2 y CPC1 manteniendo valores alrededor de $54\text{--}55 \text{ W/m}^2$ durante las horas centrales, superando la radiación UVA fuera de los concentradores, que alcanzó un máximo de 54.61 W/m^2 .

En UVB, CPC2 mostró la mayor captación con un máximo de 5.77 W/m^2 al mediodía, seguido por CPC1 con 3.98 W/m^2 . La radiación UVB fuera de los concentradores no superaron 1.85 W/m^2 , evidenciando el efecto concentrador en esta componente de alta energía.

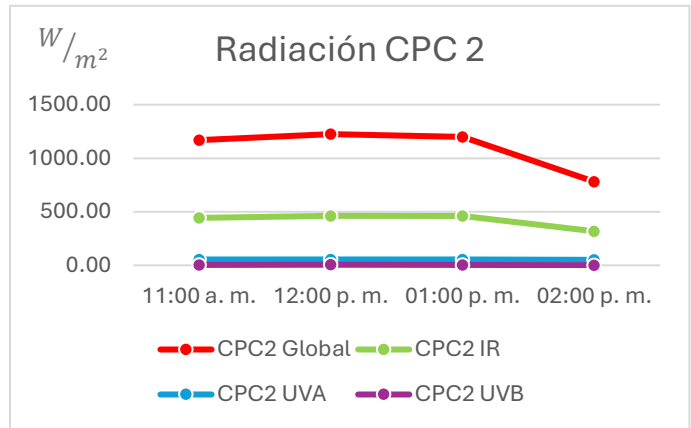
La temperatura interna fue notable: CPC2 alcanzó un máximo de $69.90 \text{ }^\circ\text{C}$ al mediodía, mientras CPC1 llegó a $64.42 \text{ }^\circ\text{C}$ a la 1:00 p. m. La temperatura, en contraste, no superó los $30.97 \text{ }^\circ\text{C}$.

En resumen, abril fue el mes con mayor captación solar y acumulación térmica en los CPC. CPC2 sobresalió en todos los parámetros ópticos, mientras que CPC1 mostró un rendimiento térmico muy alto, lo que los hace adecuados para aplicaciones de aprovechamiento solar de alta intensidad.

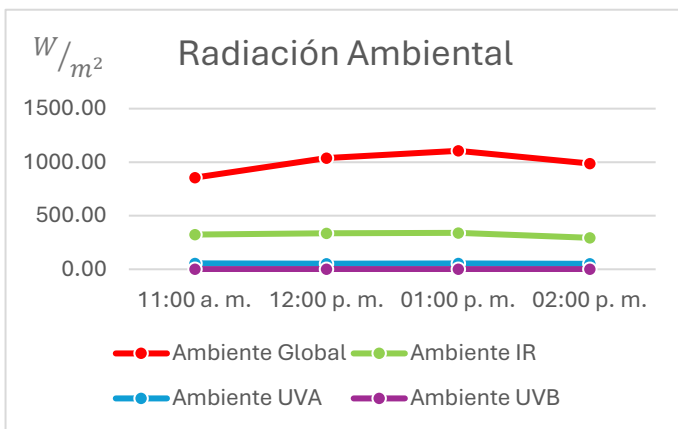
Dicho comportamiento se puede observar en las Figura 9.4a-d. En las cuales se muestra la tendencia del comportamiento de la irradiancia promedio para la UVA, UVB, IR, y global.



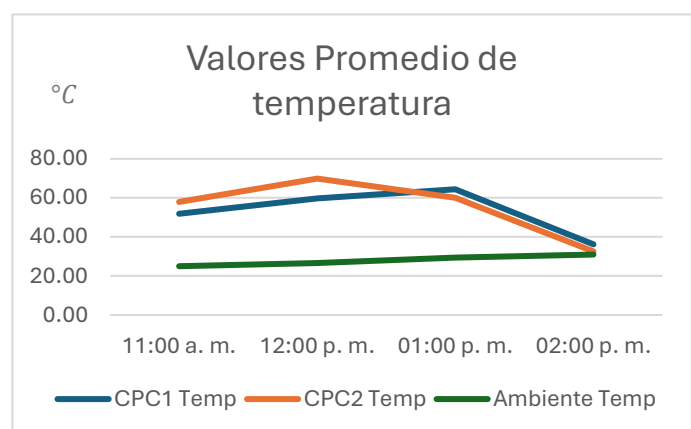
a)



b)



c)



d)

Figura 4.7. Comportamiento general del mes de abril: a) CPC1, b) CPC2, c) Ambiente, d) Temperatura.

4.8. Comparativa con base de datos de NASA (abril)

Con el fin de respaldar la validez de las mediciones obtenidas experimentalmente, se realizó una comparación puntual con los datos proporcionados por la base de datos climatológica de la NASA POWER para el mes de abril.

La información detallada de las mediciones realizadas por día se encuentra en el anexo E correspondiente al mes de abril. Al contrastar algunos días representativos, se observó una concordancia en el comportamiento horario de los parámetros medidos y térmicos entre ambos conjuntos de datos, lo cual contribuye a validar la confiabilidad de las mediciones en campo y refuerza las conclusiones obtenidas a partir del análisis de los valores promedio mensuales. Dicho comportamiento se puede observar en la Figura 4.8a-d.

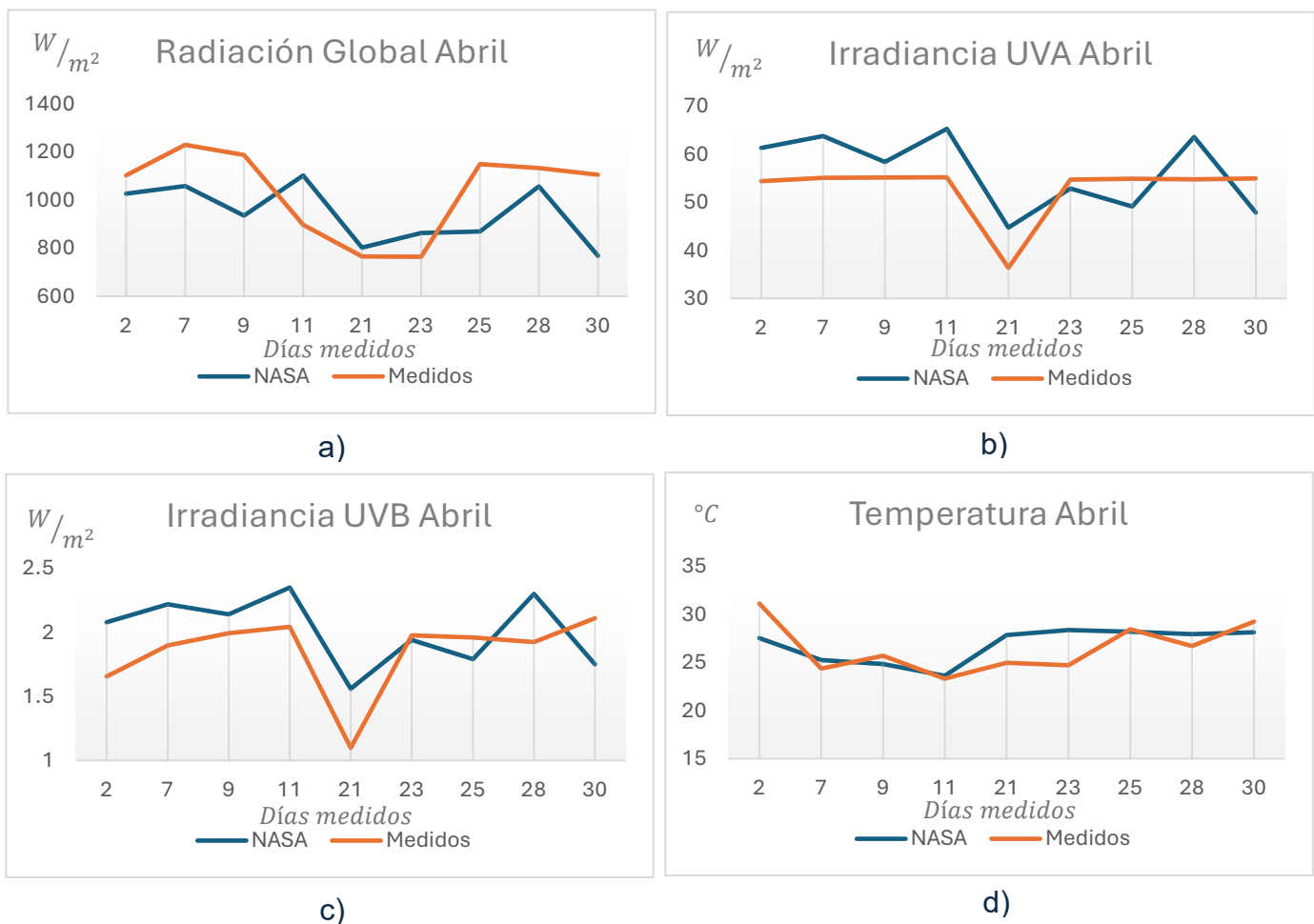


Figura 4.8. Comparativa con base de datos de NASA con datos medidos (enero): a) Global, b) UVA, c) UVB y d) Temperatura.

5. Discusión

En todos los meses, el CPC2 sobresalió por registrar los valores más altos de irradiación global, alcanzando un máximo absoluto de 1225.41 W/m² (abril). El CPC1 mantuvo valores ligeramente inferiores pero consistentes, mientras el ambiente quedó rezagado, confirmando la efectividad de los CPC en la concentración de radiación solar. Abril y marzo destacaron como los meses con mayor disponibilidad de energía solar.

Ambos CPC superaron al ambiente en captación de IR durante todas las jornadas. El CPC2 mostró una mayor concentración de energía térmica en los meses de alta irradiación (marzo y abril), mientras que el CPC1 presentó un comportamiento más estable en la retención de IR durante el día, especialmente en enero y febrero.

Los valores de UVA fueron similares entre los CPC, con ligeras ventajas para el CPC2 en la mayoría de las jornadas. El ambiente siempre se mantuvo por debajo, aunque en abril y marzo los valores ambientales fueron relativamente altos, reflejo de las excelentes condiciones solares de esos meses.

El CPC2 mostró un desempeño superior, alcanzando máximos de 5.77 W/m² (abril) y 4.97 W/m² (enero). El CPC1 también amplificó significativamente esta componente, aunque a menor escala. El ambiente en ningún mes superó los 1.85 W/m², evidenciando la capacidad concentradora de los CPC sobre esta radiación de alta energía.

El CPC1 sobresalió en desempeño térmico sostenido, alcanzando temperaturas máximas de 64.42°C (marzo) y 64.42°C (abril), mientras que el CPC2, aunque alcanzó picos térmicos mayores (hasta 69.90°C en abril), mostró descensos más rápidos hacia el final del día. El ambiente se mantuvo muy por debajo en todo momento, sin superar los 31°C, lo que destaca la función acumuladora de los CPC.

Con base en datos proporcionados por Alanod (2023), se obtuvieron los siguientes valores comparativos de eficiencia óptica para ambos CPC según distintos ángulos de incidencia (Tabla 5.1)

Tabla 5.1. Variación de la eficiencia óptica de los CPC's respecto al ángulo de incidencia base Alanod.

Ángulo de incidencia [°]	CPC 1 - MIRO SUN [°]	CPC 2 - MIRO 4 [°]
0	0.92	0.96
20	0.86	0.93
40	0.76	0.86
60	0.58	0.65
> 65	<0.50	<0.60

Estos resultados muestran que el CPC con MIRO 4 mantiene un rendimiento superior en ángulos de incidencia altos, lo que lo hace más adecuado para situaciones de baja altura solar (mañanas, tardes, invierno), mientras que MIRO-SUN presenta una disminución más pronunciada debido a su mayor componente difusa. Esta tendencia se confirma en el apartado de *Resultados principales*, donde los valores medidos de radiación y temperatura respaldan que el CPC con MIRO 4 presenta un mejor desempeño global frente al CPC con MIRO-SUN.

- El CPC2 lideró en captación óptica (irradiancia global, IR, UVB) en todos los meses evaluados, destacando particularmente en abril, donde se registraron los valores más altos. Este desempeño se atribuye en gran parte al uso de la lámina MIRO® 4 High Specular (4400GP), con alta reflectancia especular, lo que optimiza la dirección de la radiación hacia el receptor.
- El CPC1 mostró el mejor desempeño térmico sostenido, alcanzando y manteniendo temperaturas internas elevadas durante periodos prolongados. Su eficiencia térmica está relacionada con el uso de la lámina MIRO-SUN® reflective 90 weatherproof, diseñada para mantener una alta reflectancia difusa incluso bajo condiciones ambientales adversas, favoreciendo una distribución más uniforme del calor.
- El ambiente funcionó como referencia, permitiendo establecer comparaciones claras que evidencian la superioridad de ambos CPC, tanto en concentración como en almacenamiento de energía solar.
- Abril y marzo fueron los meses de mayor potencial solar, reflejado en los picos de irradiancia y temperatura observados. Estas condiciones reforzaron el desempeño óptimo de ambos CPC.
- Ambos CPC demostraron alta eficiencia en la captación y aprovechamiento de la radiación solar, siendo el CPC2 el más destacado en captación óptica y el CPC1 en términos de retención térmica.
- Los sistemas CPC superaron ampliamente al ambiente, validando su aplicabilidad en procesos solares de alta demanda energética, como secado térmico, calentamiento de fluidos o procesos de degradación asistida por energía solar.
- El análisis estacional evidenció la necesidad de ajustar estrategias operativas según el mes, optimizando así el aprovechamiento energético a lo largo del año.

Las diferencias observadas en el comportamiento de los dos CPC's pueden atribuirse principalmente a su diseño geométrico, materiales reflectivos y configuración estructural. El CPC2, al presentar una mayor apertura o mejor alineación focal, posee una capacidad superior de concentración óptica, lo que le permite alcanzar valores máximos de irradiancia más altos, especialmente en condiciones de alta radiación solar. Esto lo hace más eficiente para procesos que requieren una irradiancia intensa en periodos cortos (Tabla 5.2).

Tabla 5.2. Comparación del Comportamiento Térmico-Óptico de los Concentradores Solares CPC1 y CPC2.

Característica	CPC1	CPC2
Irradiancia global	Buena captación, pero menor que CPC2.	Mayor capacidad de concentración óptica; valores máximos más altos.
Irradiancia IR (infrarroja)	Estabilidad térmica superior; menor pérdida de IR por la tarde.	Captación inicial alta, pero caída más rápida de energía IR.
Radiación UVA	Valores estables, buenos niveles de captación.	Ligeramente superior a CPC1, especialmente en horas pico.
Radiación UVB	Amplificación de UVB moderada.	Mayor amplificación de UVB, con picos sobresalientes (ideal para UV).
Temperatura interna	Mayor estabilidad térmica; retiene calor por más tiempo.	Picos de temperatura más altos, pero descenso rápido por la tarde.
Ventajas principales	Mejor acumulación y conservación de calor; ideal para calor sostenido.	Máxima captación óptica; excelente para procesos que requieren alta irradiancia.
Desventajas principales	Menor captación de irradiancia puntual respecto a CPC2.	Menor retención de calor; caída térmica acelerada al final del día.

Por otro lado, el CPC1 presenta un diseño que favorece la estabilidad térmica y la acumulación de energía a lo largo del día. Su estructura permite una menor disipación del calor, resultando en temperaturas internas más constantes y sostenidas, incluso cuando disminuye la radiación solar. Esta característica lo hace más adecuado para aplicaciones donde se requiere mantener calor durante periodos prolongados, aunque su captación puntual de irradiancia sea menor que la del CPC2.

Estas diferencias en el desempeño responden a un balance entre concentración óptica y retención térmica, lo cual es clave para seleccionar el tipo de CPC adecuado según el objetivo del proceso solar específico.

5.1. Cálculo de rendimiento térmico-óptico del CPC

En el apartado de balance energético y evaluación de las eficiencias de los CPC, se presentaron previamente las fórmulas empleadas para el cálculo de estos parámetros, incluyendo la definición de la emisividad superficial y del coeficiente de transferencia de calor por convección, los cuales son determinantes en la estimación del coeficiente global de pérdidas y, en consecuencia, en la eficiencia resultante.

5.2. Enero

En términos de eficiencia en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se observa que tanto el CPC1 como el CPC2 alcanzan sus mejores desempeños en torno al mediodía, cuando la irradiancia global es mayor. En esas condiciones, la eficiencia termo-óptica presenta valores positivos del orden de 5 a 6%, mientras que hacia la tarde disminuye progresivamente hasta acercarse a cero, e incluso alcanzar valores negativos en el caso del CPC2 a las 4:00 p.m. Esto indica que, bajo irradiancias bajas, las pérdidas por convección y radiación superan a la energía solar concentrada, de modo que el sistema deja de entregar energía útil.

Por otro lado, la eficiencia térmica relativa se mantiene elevada en todo el periodo de análisis, con valores cercanos al 100%. Sin embargo, este indicador responde únicamente al balance entre la energía incidente y las pérdidas, por lo que no refleja con precisión el aprovechamiento neto del concentrador. En este sentido, la eficiencia termo-óptica constituye un parámetro más representativo, ya que incorpora simultáneamente las ganancias y las pérdidas.

En conjunto, los resultados muestran que el desempeño útil de ambos concentradores se concentra en las horas cercanas al mediodía, mientras que en condiciones de baja irradiancia la eficiencia práctica tiende a desaparecer.

Tabla 5.3. Cálculos CPC 's del mes de enero.

CPC1 Apertura 0.80 m ² y Absorbedor 0.15 m ²																		
Hora	G_{global} [W/m ²]	A_{ap} [m ²]	A_{abs} [m ²]	T_{abs} [°C]	T_{amb} [°C]	h_c [W/m ² ·K]	ϵ	T_{abs} [K]	T_{amb} [K]	ΔT [K]	Φ_{inc} [W]	Q_{conv} [W]	Q_{rad} [W]	Q_{loss} [W]	Q_{util} [W]	η_{opt-th}	η_{th}	
11:00 a. m.	927.86	0.80	0.15	51.68	23.37	10	0.09	324.83	296.52	28.30	742.29	42.45	2.60	45.06	697.23	0.0607	6.07%	93.93%
12:00 p. m.	808.43	0.80	0.15	46.48	24.91	10	0.09	319.63	298.06	21.57	646.74	32.35	1.95	34.30	612.45	0.0530	5.30%	94.70%
01:00 p. m.	772.85	0.80	0.15	43.40	25.78	10	0.09	316.55	298.93	17.62	618.28	26.43	1.57	28.00	590.28	0.0453	4.53%	95.47%
02:00 p. m.	731.45	0.80	0.15	41.23	28.44	10	0.09	314.38	301.59	12.79	585.16	19.18	1.14	20.33	564.83	0.0347	3.47%	96.53%
03:00 p. m.	488.83	0.80	0.15	30.95	25.19	10	0.09	304.10	298.34	5.75	391.07	8.63	0.48	9.11	381.96	0.0233	2.33%	97.67%
04:00 p. m.	417.33	0.80	0.15	29.63	29.80	10	0.09	302.78	302.95	-0.17	333.86	-0.26	-0.01	-0.27	334.13	-0.0008	-0.08%	100.08%

CPC2 Apertura 0.629 m ² y Absorbedor 0.1706 m ²																		
Hora	G_{global} [W/m ²]	A_{ap} [m ²]	A_{abs} [m ²]	T_{abs} [°C]	T_{amb} [°C]	h_c [W/m ² ·K]	ϵ	T_{abs} [K]	T_{amb} [K]	ΔT [K]	Φ_{inc} [W]	Q_{conv} [W]	Q_{rad} [W]	Q_{loss} [W]	Q_{util} [W]	η_{opt-th}	η_{th}	
11:00 a. m.	1006.95	0.629	0.171	41.04	23.37	10	0.09	314.19	296.52	17.67	633.37	30.14	1.75	31.90	601.48	0.0504	5.04%	94.96%
12:00 p. m.	968.81	0.629	0.171	36.17	24.91	10	0.09	309.32	298.06	11.26	609.38	19.21	1.10	20.31	589.08	0.0333	3.33%	96.67%
01:00 p. m.	935.54	0.629	0.171	38.22	25.78	10	0.09	311.37	298.93	12.44	588.46	21.22	1.23	22.45	566.01	0.0381	3.81%	96.19%
02:00 p. m.	763.92	0.629	0.171	26.00	28.44	10	0.09	299.15	301.59	-2.45	480.51	-4.18	-0.23	-4.41	484.92	-0.0092	-0.92%	100.92%
03:00 p. m.	633.17	0.629	0.171	22.93	25.19	10	0.09	296.08	298.34	-2.26	398.26	-3.86	-0.21	-4.07	402.33	-0.0102	-1.02%	101.02%
04:00 p. m.	474.00	0.629	0.171	20.00	29.80	10	0.09	293.15	302.95	-9.80	298.15	-16.72	-0.90	-17.62	315.77	-0.0591	-5.91%	105.91%

5.3. Febrero

En el CPC1 como el CPC2 presentan un incremento en su desempeño respecto a lo observado en enero (Tabla 5.4). La eficiencia termo-óptica alcanza valores más elevados, llegando en el caso del CPC1 hasta un 9.33% a las 11:00 a.m., y en el CPC2 hasta un 10.08% a las 12:00 p.m. Estos resultados muestran que, bajo condiciones de irradiancia más favorables, los concentradores logran aprovechar de manera más efectiva la energía solar concentrada.

Durante las horas centrales del día (11:00 a.m. - 2:00 p.m.), ambos CPC mantienen eficiencias termo-ópticas positivas, con valores en el rango de 7–10%, lo que contrasta con la tendencia observada en enero, donde los valores tendían rápidamente a disminuir hasta acercarse a cero o incluso volverse negativos. Esto indica que en febrero las condiciones ambientales favorecieron una mejor relación entre las ganancias ópticas y las pérdidas térmicas.

En cuanto a la eficiencia térmica relativa, se mantiene elevada en todo el periodo analizado, con valores superiores al 89% en ambos CPC. No obstante, al igual que en el caso anterior, este indicador debe considerarse como un parámetro de referencia, ya que el comportamiento más representativo del aprovechamiento neto corresponde a la eficiencia termo-óptica.

En conjunto, los resultados de febrero muestran que los concentradores alcanzan un mejor desempeño en comparación con el mes previo, con eficiencias termo-ópticas que se mantienen en niveles aceptables durante varias horas del día, lo que evidencia un funcionamiento más estable y favorable bajo las condiciones de irradiancia registradas.

Tabla 5.4. Cálculos CPC´s del mes de febrero.

CPC 1 Apertura 0.80 m ² y Absorbedor 0.15 m ²																		
Hora	G_{global} [W/m ²]	A_{ap} [m ²]	A_{abs} [m ²]	T_{abs} [°C]	T_{amb} [°C]	h_c [W/m ² ·K]	ϵ	T_{abs} [K]	T_{amb} [K]	ΔT [K]	Φ_{inc} [W]	Q_{conv} [W]	Q_{rad} [W]	Q_{loss} [W]	Q_{util} [W]	η_{opt-th}	η_{th} %	
11:00 a. m.	816.51	0.80	0.15	60.25	22.04	10	0.09	333.40	295.19	38.21	653.21	57.32	3.65	60.97	592.24	0.09333	9.33%	90.67%
12:00 p. m.	888.10	0.80	0.15	57.15	24.71	10	0.09	330.30	297.86	32.45	710.48	48.67	3.09	51.76	658.72	0.0728	7.28%	92.72%
01:00 p. m.	715.57	0.80	0.15	61.49	23.24	10	0.09	334.64	296.39	38.25	572.46	57.37	3.69	61.06	511.40	0.1067	10.67%	89.33%
02:00 p. m.	640.19	0.80	0.15	47.79	24.58	10	0.09	320.94	297.73	23.21	512.15	34.81	2.11	36.92	475.23	0.0721	7.21%	92.79%
03:00 p. m.	409.85	0.80	0.15	27.87	22.76	10	0.09	301.02	295.91	5.12	327.88	7.68	0.42	8.09	319.79	0.0247	2.47%	97.53%
CPC 2 Apertura 0.629 m ² y Absorbedor 0.1706 m ²																		
Hora	G_{global} [W/m ²]	A_{ap} [m ²]	A_{abs} [m ²]	T_{abs} [°C]	T_{amb} [°C]	h_c [W/m ² ·K]	ϵ	T_{abs} [K]	T_{amb} [K]	ΔT [K]	Φ_{inc} [W]	Q_{conv} [W]	Q_{rad} [W]	Q_{loss} [W]	Q_{util} [W]	η_{opt-th}	η_{th} %	
11:00 a. m.	971.51	0.629	0.171	51.91	22.04	10	0.09	325.06	295.19	29.88	611.08	50.97	3.11	54.08	557.00	0.0885	8.85%	91.15%
12:00 p. m.	882.80	0.629	0.171	55.56	24.71	10	0.09	328.71	297.86	30.85	555.15	52.63	3.31	55.94	499.21	0.1008	10.08%	89.92%
01:00 p. m.	781.93	0.629	0.171	42.50	23.24	10	0.09	315.65	296.39	19.25	491.83	32.84	1.92	34.77	457.07	0.0707	7.07%	92.93%
02:00 p. m.	698.98	0.629	0.171	39.74	24.58	10	0.09	312.89	297.73	15.16	439.66	25.86	1.50	27.37	412.29	0.0622	6.22%	93.78%
03:00 p. m.	437.85	0.629	0.171	28.21	22.76	10	0.09	301.36	295.91	5.45	275.41	9.30	0.51	9.81	265.60	0.0356	3.56%	96.44%

5.4. Marzo

Las eficiencias termo-ópticas de los concentradores presentan un comportamiento más moderado en comparación con febrero. En el caso del CPC1, los valores máximos alcanzan alrededor de 7.07% a las 11:00 a.m., mientras que el CPC2 logra hasta un 8.99% a la misma hora. Ambos equipos mantienen eficiencias positivas a lo largo de la jornada, aunque con una tendencia decreciente hacia la tarde, llegando a valores inferiores al 2% en las últimas mediciones.

Este comportamiento refleja que las condiciones de irradiancia en marzo permitieron un aprovechamiento adecuado de la energía solar durante las horas centrales, aunque con menor estabilidad que en febrero. En particular, el CPC2 muestra un mejor desempeño inicial en comparación con el CPC1, pero también evidencia una mayor caída de eficiencia conforme disminuye la radiación solar.

Por otro lado, la eficiencia térmica relativa permanece elevada en todo el periodo analizado, con valores superiores al 92% en ambos concentradores. Al igual que en los meses previos, este parámetro se mantiene cercano al 100%, aunque no refleja con precisión el aprovechamiento neto. Por ello, la eficiencia termo-óptica continúa siendo el indicador más representativo del desempeño real de los CPC.

En conjunto, los resultados de marzo muestran que los concentradores mantienen un funcionamiento aceptable en las horas cercanas al mediodía, con eficiencias termo-ópticas positivas pero menores a las registradas en febrero, lo que evidencia la influencia directa de la variación estacional de la irradiancia en el desempeño térmico-óptico de los sistemas (Tabla 5.5).

Tabla 5.5. Cálculos CPC 's del mes de marzo.

CPC1 Apertura 0.80 m ² y Absorbedor 0.15 m ²																	
Hora	G_{global} [W/m ²]	A_{ap} [m ²]	A_{abs} [m ²]	T_{abs} [°C]	T_{amb} [°C]	T_{amb} [W/m ² · K]	ϵ	T_{abs} [K]	T_{amb} [K]	ΔT [K]	Φ_{inc} [W]	Q_{conv} [W]	Q_{rad} [W]	Q_{loss} [W]	Q_{util} [W]	η_{opt-th}	η_{th} %
11:00 a. m.	919.65	0.80	0.15	57.18	24.58	10	0.09	330.33	297.73	32.60	735.72	48.91	3.10	52.00	683.71	0.0707	92.93%
12:00 p. m.	859.93	0.80	0.15	53.13	31.96	10	0.09	326.28	305.11	21.17	687.94	31.76	2.04	33.80	654.14	0.0491	95.09%
01:00 p. m.	848.52	0.80	0.15	52.97	26.90	10	0.09	326.12	300.05	26.07	678.81	39.11	2.45	41.56	637.25	0.0612	93.88%
02:00 p. m.	648.24	0.80	0.15	34.69	24.63	10	0.09	307.84	297.78	10.06	518.59	15.09	0.86	15.94	502.65	0.0307	96.93%
03:00 p. m.	747.67	0.80	0.15	29.16	27.49	10	0.09	302.31	300.64	1.67	598.14	2.51	0.14	2.65	595.49	0.0044	99.56%
CPC2 Apertura 0.629 m ² y Absorbedor 0.1706 m ²																	
Hora	G_{global} [W/m ²]	A_{ap} [m ²]	A_{abs} [m ²]	T_{abs} [°C]	T_{amb} [°C]	T_{amb} [W/m ² · K]	ϵ	T_{abs} [K]	T_{amb} [K]	ΔT [K]	Φ_{inc} [W]	Q_{conv} [W]	Q_{rad} [W]	Q_{loss} [W]	Q_{util} [W]	η_{opt-th}	η_{th} %
11:00 a. m.	1047.33	0.629	0.171	57.23	24.58	10	0.09	330.38	297.73	32.66	658.77	55.71	3.53	59.24	599.53	0.0899	91.01%
12:00 p. m.	1005.89	0.629	0.171	52.22	31.96	10	0.09	325.37	305.11	20.26	632.70	34.56	2.21	36.77	595.93	0.0581	94.19%
01:00 p. m.	949.89	0.629	0.171	48.22	26.90	10	0.09	321.37	300.05	21.32	597.48	36.37	2.23	38.60	558.88	0.0646	93.54%
02:00 p. m.	595.33	0.629	0.171	39.20	24.63	10	0.09	312.35	297.78	14.57	374.46	24.86	1.44	26.30	348.16	0.0702	92.98%
03:00 p. m.	607.67	0.629	0.171	30.60	27.49	10	0.09	303.75	300.64	3.11	382.22	5.31	0.30	5.60	376.62	0.0147	98.53%

5.5. Abril

Los resultados muestran que tanto el CPC1 como el CPC2 mantienen eficiencias termo-ópticas positivas durante todo el periodo analizado, aunque con valores relativamente bajos en comparación con meses anteriores (Tabla 5.6). En el caso del CPC1, la eficiencia máxima se alcanza al mediodía con un 6.35%, mientras que el CPC2 logra un desempeño ligeramente superior, llegando hasta un 10.26% en la misma franja horaria.

A lo largo del día, ambas configuraciones evidencian una disminución progresiva en la eficiencia termo-óptica, llegando a valores cercanos al 1% en las últimas horas registradas. Este comportamiento confirma que el aprovechamiento útil del sistema está fuertemente condicionado por la irradiancia incidente y las pérdidas térmicas, que aumentan su influencia en horarios alejados del mediodía solar.

En cuanto a la eficiencia térmica relativa, los valores se mantienen altos en ambos CPC, con registros por encima del 91% en todos los casos, lo que refleja un balance energético favorable entre la radiación incidente y las pérdidas. No obstante, al igual que en los meses anteriores, este indicador debe interpretarse con cautela, ya que la eficiencia termo-óptica continúa siendo la medida más representativa del desempeño práctico de los concentradores.

En conjunto, los resultados de abril evidencian que, si bien ambos sistemas logran mantener eficiencias positivas, el CPC2 presenta un mejor aprovechamiento en condiciones de alta irradiancia, mientras que el CPC1 conserva un comportamiento estable, pero con valores más moderados.

Tabla 5.6. Cálculos CPC 's del mes de abril.

CPC 1 Apertura 0.80 m ² y Absorbedor 0.15 m ²																		
Hora	G_{global} [W/m ²]	A_{ap} [m ²]	A_{abs} [m ²]	T_{abs} [°C]	T_{amb} [°C]	h_c [W/m ² ·K]	ϵ	T_{abs} [K]	T_{amb} [K]	ΔT [K]	Φ_{inc} [W]	Q_{conv} [W]	Q_{rad} [W]	Q_{loss} [W]	Q_{util} [W]	η_{opt-th} %	η_{th} %	
11:00 a. m.	997.06	0.80	0.15	51.90	24.98	10	0.09	325.05	298.13	26.93	797.65	40.39	2.50	42.89	754.76	0.0538	5.38%	94.62%
12:00 p. m.	1043.22	0.80	0.15	59.71	26.53	10	0.09	332.86	299.68	33.18	834.58	49.77	3.22	52.99	781.58	0.0635	6.35%	93.65%
01:00 p. m.	1058.30	0.80	0.15	64.42	29.33	10	0.09	337.57	302.48	35.09	846.64	52.63	3.53	56.16	790.48	0.0663	6.63%	93.37%
02:00 p. m.	844.34	0.80	0.15	36.19	30.97	10	0.09	309.34	304.12	5.22	675.47	7.84	0.46	8.30	667.17	0.0123	1.23%	98.77%
CPC 2 Apertura 0.629 m ² y Absorbedor 0.1706 m ²																		
Hora	G_{global} [W/m ²]	A_{ap} [m ²]	A_{abs} [m ²]	T_{abs} [°C]	T_{amb} [°C]	h_c [W/m ² ·K]	ϵ	T_{abs} [K]	T_{amb} [K]	ΔT [K]	Φ_{inc} [W]	Q_{conv} [W]	Q_{rad} [W]	Q_{loss} [W]	Q_{util} [W]	η_{opt-th} %	η_{th} %	
11:00 a. m.	1170.06	0.629	0.171	57.93	24.98	10	0.09	331.08	298.13	32.96	735.97	56.22	3.58	59.81	676.16	0.0813	8.13%	91.87%
12:00 p. m.	1225.41	0.629	0.171	69.90	26.53	10	0.09	343.05	299.68	43.37	770.78	73.99	5.04	79.03	691.75	0.1025	10.25%	89.75%
01:00 p. m.	1199.04	0.629	0.171	60.12	29.33	10	0.09	333.27	302.48	30.78	754.19	52.51	3.45	55.97	698.23	0.0742	7.42%	92.58%
02:00 p. m.	781.34	0.629	0.171	32.57	30.97	10	0.09	305.72	304.12	1.60	491.46	2.73	0.16	2.89	488.57	0.0059	0.59%	99.41%

Conclusión y trabajo futuro

El desarrollo de esta investigación en el área de energías sustentables resultó una experiencia enriquecedora y favorecedora, al permitirme participar en un proyecto de concentradores solares. Este trabajo implicó involucrarme en un tema que no formaba parte de mi formación previa en ingeniería mecánica, lo que representó un reto adicional. Me resultó interesante realizar actividades prácticas como el mantenimiento de los concentradores y el monitoreo con radiómetros en la azotea, ya que me brindaron un aprendizaje directo sobre la operación de estos sistemas. La elaboración del informe escrito representó un desafío importante, tanto en la redacción como en el proceso de búsqueda e integración de información, pues el tema resultó ser más extenso de lo que inicialmente imaginaba.

A partir de los resultados obtenidos y de la experiencia adquirida durante el desarrollo del proyecto, se identifican diversas oportunidades para fortalecer el estudio y la caracterización de los concentradores parabólicos compuestos (CPC). En primer lugar, se propone realizar una caracterización térmico-óptica a largo plazo, extendiendo las mediciones para evaluar la degradación de materiales, la estabilidad del sistema y el desempeño estacional de los CPC bajo diferentes condiciones ambientales. Esta continuidad permitirá obtener un entendimiento más profundo del comportamiento real del dispositivo en periodos prolongados de operación.

Asimismo, se recomienda avanzar hacia la implementación de un sistema experimental más robusto, incorporando sensores adicionales, mejorando la calibración de los instrumentos de medición y, de ser posible, automatizando la adquisición de datos para garantizar mayor precisión, repetibilidad y eficiencia en los ensayos.

Finalmente, se sugiere incrementar el uso de la plataforma NASA POWER Data Access Viewer, con el fin de enriquecer el análisis energético mediante la obtención de datos históricos, comparativos y de alta resolución relacionados con irradiancia, temperatura ambiente y otras variables climatológicas relevantes. El uso sistemático de esta herramienta contribuirá a mejorar la interpretación de resultados y a fortalecer la correlación entre mediciones experimentales y condiciones ambientales reales.

Estas propuestas representan una base sólida para ampliar y profundizar el estudio de los CPC en futuras investigaciones.

Referencias

Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes* (4th ed.). John Wiley & Sons.

Francisco, J. (2018, septiembre 10). *El espectro electromagnético: la longitud de onda*. <https://cifpn1.com/electronica/?p=4034>

Alegría Mejía, L. C. (2024). Método de degradación acelerada del PET empleando un concentrador solar parabólico compuesto. Tesis doctoral. Universidad Autónoma del Estado de México.

Ibáñez Plana, M., Rossell Polo, J. R., & Rossell Urrutia, J. I. (2005). *Energías renovables: Tecnología solar*. Ediciones Mundi-Prensa.

Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes* (4th ed.). John Wiley & Sons. [Figura 1.5 (a) Ángulo cenital, pendiente, ángulo de azimut de la superficie y ángulo de azimut solar para una superficie inclinada. (b) Vista en planta que muestra el ángulo de azimut solar.]

Sanea. (s.f.). *Plantas termo-solares de torre central* [Imagen 1.6 Vista general de planta termo-solar de torre central con campo de heliostatos]. Recuperado de <https://www.sanea.org/curso/5764/PLANTAS-TERMOSOLARES-DE-TORRE-CENTRAL/>

Generar Electricidad Aplicaciones Industriales Térmicas Solares Trough Parabólico 5.77m por 12m. (s/f). Made-in-china.com. Recuperado el 12 de noviembre de 2025, de https://es.made-in-china.com/co_mlsun-csp/product_Generate-Electricity-Solar-Thermal-Industrial-Applications-Parabolic-Trough-5-77m-by-12m_uorysruoy.html

EME 812: Utility Solar Power and Concentration. (s.f.). *The Pennsylvania State University*. Recuperado el 26 de junio de 2025, de <https://www.education.psu.edu/eme812/node/7>

Kalogirou, S. A. (2014). *Solar Energy Engineering: Processes and Systems* (2nd ed.). Academic Press.

Hasanuzzaman, M. (2022). *Technologies for Solar Thermal Energy*. Springer/CRC Press.

Flamant, G. (2022). *Concentrating Solar Thermal Energy: Fundamentals and Applications*. Wiley-ISTE.

Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2007). *Fundamentals of heat and mass transfer* (6th ed.). John Wiley & Sons.

Alanod GmbH & Co. KG. (2023a). *Solar Reflectors Brochure – MIRO® SUN*. Recuperado de: https://alanod.com/_Resources/Persistent/7/b/3/f/7b3f2ac3c5998bba6bcb3e5bdac6427b8e9fde09/Alanod-Solar-Reflectors-Brochure-EN.pdf

Alanod Westlake. (2022). *MIRO® 4 High Specular Datasheet (4400GP)*. Recuperado de: https://virteomdevcdn.blob.core.windows.net/site-alanod-westlake_com/uploaded_media/alanod-westlake_com/Data-Sheets/MIRO4-4400GP__1667932836.pdf

Alanod GmbH & Co. KG. (s.f.). *Applications in Solar Heat – Reflective Materials*. Recuperado de: <https://alanod.com/applications/solar-heat/solar-reflectors/>

Rabl, A., O’Gallagher, J., & Winston, R. (1979). *Performance of compound parabolic concentrators*. Solar Energy Research Institute. U.S. Department of Energy. Retrieved from <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc1084863/>

Dr. Octavio García Valladares (s.f) Concentrador Parabólico Compuesto (cpc). (Unam.mx. Recuperado el 19 de octubre de 2025, de http://www.fordecyt.ier.unam.mx/html/concentradorParab%C3%B3licoCompuesto_1.html

Anexos

A.1. Hoja de Cálculo de Valores 2025

Tabla A.0.1 Tabla A.0.1. Valores registrados en el mes de enero.

Tabla A.0.1. Valores registrados en el mes de enero.

Enero Info																
Fecha	Hora	CPC1 G	CPC1 IR	CPC1 UVA	CPC1 UVB	CPC 1 Temp	CPC 2 G	CPC 2 IR	CPC 2 UVA	CPC 2 UVB	CPC 2 Temp	Ambiente G	Ambiente IR	Ambiente UVA	Ambiente UVB	Ambiente TEMP
13/01/2025	11:00 a. m.	888.5	466	55.31	3.65	54	674.4	465.9	55.31	3.98	48.8	664.5	391.9	54.66	1.657	22.73
14/01/2025	11:00 a. m.	1140.6	465.3	55.13	4.485	64.28	1051.3	462.6	54.67	4.279	92.47	1039.3	343.13	54.59	7.451	23.47
16/01/2025	11:00 a. m.	666.33	467.37	55.51	2.987	55.28	1045.33	466.3	55.28	1.259	41.25	293.67	331.57	53.61	1.289	20.3
21/01/2025	11:00 a. m.	775.33	467.33	55.56	2.366	50.93	1094	465.87	55.3	2.39	40.5	518.33	333.87	51.05	1.1727	27.63
22/01/2025	11:00 a. m.	691	468.33	54.63	0.431	56.07	1123.33	466.8	55.5	2.094	37.23	447	334.7	48.49	1.05	26.17
22/01/2025	11:00 a. m.	1044	465.8	55.24	1.937	50.36	1202.66	463.5	54.85	5.219	36.86	967	349.5	54.8	1.425	29.8
23/01/2025	11:00 a. m.	633.33	467.87	55.59	0.46	63.06	1020.66	466.93	54.93	1.021	32.87	343.33	311.3	47.97	1.05	30.53
23/01/2025	11:00 a. m.	783.33	465.87	55.34	4.454	55.33	1172.33	464.27	55.05	5.725	34.23	387.33	348.86	54.71	1.408	24.53
28/01/2025	11:00 a. m.	744	467.6	55.56	2.432	54.66	967.67	465.93	55.27	2.003	39.97	501.67	320.97	50.14	1.166	19.7
28/01/2025	11:00 a. m.	755	465.8	55.05	4.235	53.43	1021.33	463.5	54.84	6.232	42.47	374.67	344.57	54.13	1.385	20.43
29/01/2025	11:00 a. m.	727.33	467.67	55.55	1.845	44.3	1089.67	466.37	55	2.03	22.07	448.67	324.53	48.22	1.057	20.47
29/01/2025	11:00 a. m.	602.67	463.73	54.88	2.361	36	827.67	463.27	54.76	3.529	35.47	375.33	213.37	37.3	0.966	19.13
30/01/2025	11:00 a. m.	744	468.5	55.78	0.404	48.03	1133.67	466.9	55.49	2.459	36	402	313.63	50.97	1.113	22.3
30/01/2025	11:00 a. m.	794.67	464.57	54.97	2.611	37.23	1093.33	429.7	54.78	2.551	34.4	464.33	357.4	54.5	1.432	20.17
16/01/2025	12:00 p. m.	997.66	464.87	55.03	4.144	50.73	1135.67	463.13	54.75	4.614	58.34	965.66	342.13	54.77	1.525	21.37
21/01/2025	12:00 p. m.	1096	466.33	55.17	4.125	43.83	1144.67	464	54.86	5.138	36	1166.67	380.83	54.54	1.426	28.97
22/01/2025	12:00 p. m.	906.33	445.13	55.28	2.058	54.27	1159.33	464.9	55.02	4.775	31.17	937.66	346.73	54.41	1.438	31.23
23/01/2025	12:00 p. m.	812	465.8	55.21	2.616	56.63	1056.67	464.06	54.95	3.636	32.73	511.66	333.37	51.27	1.291	31.67
28/01/2025	12:00 p. m.	605.67	446.3	55.06	2.168	48.77	989	450.5	54.79	2.519	42.77	265	350.5	54.6	1.493	22.8
29/01/2025	12:00 p. m.	1024.67	464.93	55.11	1.851	48.93	1046.67	464.07	54.92	5.839	33.97	1050.67	213.37	52.21	1.28	19.4
30/01/2025	12:00 p. m.	216.67	79.03	15.62	0.249	22.17	249.67	95.43	19.48	0.559	18.2	325.67	90.9	18.16	0.519	18.93
13/01/2025	01:00 p. m.	1068.33	465.3	55.09	4.256	23.5	761.6	466.87	55.43	6.236	33.5	758.7	417.83	55.2	1.677	19.9
14/01/2025	01:00 p. m.	992.3	465.27	55.14	4.977	42.77	1018.3	463.23	54.83	6.215	51.74	810.6	347.27	54.79	1.524	26.63
16/01/2025	01:00 p. m.	1109.67	465.03	54.89	2.553	45.61	1185.67	462.3	54.64	3.866	56.86	1004	344.4	54.16	1.45	25.13
21/01/2025	01:00 p. m.	796.33	368.6	54.66	1.517	39.73	1100	463.67	54.88	6.225	32.93	436.33	320.97	54.16	1.463	30.27
22/01/2025	01:00 p. m.	804	44.17	55	2.454	68.96	1072.33	463.17	54.79	6.225	33.26	736.66	334	53.32	1.345	32.93
23/01/2025	01:00 p. m.	609.67	465.53	55.13	3.925	54.47	1002.67	463.77	54.87	5.236	24.17	346	328.17	52.43	1.308	37.2
28/01/2025	01:00 p. m.	751.67	463.7	54.85	3.687	49.23	1075.33	462.83	54.65	6.026	46.7	414	340.17	54.01	1.419	21.33
29/01/2025	01:00 p. m.	667	464.5	54.98	2.685	36.73	1011.67	463.47	54.8	4.189	45.36	362	370.17	54.15	1.364	23.83
30/01/2025	01:00 p. m.	156.67	61.1	14.54	0.27	28.27	192.33	71.8	17.82	0.548	19.43	181	70.7	17.11	0.53	14.8
13/01/2025	02:00 p. m.	1035	465.87	55.3	3.383	44.1	861.3	347.4	54.39	1.795	41.1	1042.67	306.1	52.22	1.284	25.38
14/01/2025	02:00 p. m.	409.7	31.03	6.08	0.1	NA	100	29.9	5.92	0.165	NA	538	39.47	8.11	0.248	NA
16/01/2025	02:00 p. m.	696.33	465.8	55.19	1.702	NA	1088	464	54.94	3.342	NA	758.33	329.17	51.01	1.246	NA
21/01/2025	02:00 p. m.	1134	464.8	54.79	2.556	50.73	898	449.73	54.98	4.524	26.67	963	324.7	53.12	1.303	33.07
22/01/2025	02:00 p. m.	1104.33	464.9	55.05	0.731	45.53	970	464	54.69	4.423	21.4	1227.33	295.63	45.43	1.007	34.93
23/01/2025	02:00 p. m.	631.33	464.73	54.44	1.353	66.53	997	464.23	54.86	3.68	20.7	612.33	295.4	46.78	1.1	35.43
28/01/2025	02:00 p. m.	554	429.37	52.09	0.817	36.03	898.67	463.83	54.67	4.51	30.3	244.67	290.53	43.62	0.978	21.5
29/01/2025	02:00 p. m.	892.33	464.33	54.85	0.609	24.13	903.67	463.3	54.76	2.309	24.17	969	360.87	41.17	0.907	30.8
30/01/2025	02:00 p. m.	126	39.93	9.21	13	21.57	158.66	62.9	14.39	0.399	17.63	143	59.1	14.13	0.398	18
13/01/2025	03:00 p. m.	667.33	467.9	55.46	0.514	44.9	753.33	131.8	25.07	0.741	24.7	364.3	239.83	36.93	0.835	21.06
21/01/2025	03:00 p. m.	759	464.13	54.5	0.475	34.97	869.67	465.33	54.69	2.124	21.27	829.33	234.77	34.62	0.773	31.3
22/01/2025	03:00 p. m.	526.66	463.2	52.91	0.326	33.23	730.67	463.8	54.42	1.242	22.13	295.33	217.27	27.87	0.582	32.53
28/01/2025	03:00 p. m.	527	463.27	54.13	0.382	27.97	759.67	279.37	45.35	1.149	26.33	307	238.33	31.72	0.605	19.4
29/01/2025	03:00 p. m.	188.33	63.43	13.03	0.19	19.77	270.33	174.6	29.97	0.619	21.23	502.67	70.73	15.36	0.383	25.67
30/01/2025	03:00 p. m.	264.67	242.23	27.84	0.202	24.83	415.33	285.67	43.28	0.784	21.93	190.67	101	17.85	0.423	21.2
21/01/2025	04:00 p. m.	417.33	351.27	45.9	0.29	29.63	474	196.8	31.36	0.605	20	401.67	191.57	23.18	0.489	29.8

A.2 Hoja de Cálculo de Valores Recolectados en febrero 2025

Tabla A.0.2. Valores registrados en el mes de febrero.

Tabla A.0.2. Valores registrados en el mes de febrero.

Fecha	Hora	Febrero Info														
		CPC1 G	CPC1 IR	CPC1 UVA	CPC1 UVB	CPC 1 Temp	CPC 2 G	CPC 2 IR	CPC 2 UVA	CPC 2 UVB	CPC 2 Temp	Ambiente G	Ambiente IR	Ambiente UVA	Ambiente UVB	Ambiente TEMP
04/02/2025	11:00 a. m.	712.33	426.67	55.06	2.026	80.06	1066.67	464.2	54.97	5.747	66.15	565.33	364.37	54.98	7.562	29.46
05/02/2025	11:00 a. m.	1744	467.9	55.54	1.148	52.79	623.67	454.07	55.33	3.931	63.28	308	311.67	46.62	1.073	20.4
05/02/2025	11:00 a. m.	1028.67	465.1	55.14	4.254	62.49	1133.67	463.8	54.9	5.598	66.09	838.33	351.27	54.85	1.53	21.46
10/02/2025	11:00 a. m.	837.33	466.3	55.55	0.502	78.59	1141.33	465.97	55.33	5.055	57	875.66	308.1	48.73	1.147	25.6
10/02/2025	11:00 a. m.	755.67	462.27	54.68	4.069	74.04	1038.33	462.03	54.51	3.457	60	623.67	349.37	54.38	1.577	27.6
11/02/2025	11:00 a. m.	653.33	462.03	55.2	1.095	35.86	917.33	432.83	55.32	1.463	42.26	374.67	85.97	36.52	0.902	17.88
11/02/2025	11:00 a. m.	272.33	155.13	34.09	0.587	40.37	511.33	467.43	54.79	1.311	32.5	204	111.63	25.02	0.704	18.94
14/02/2025	11:00 a. m.	783.33	462.5	54.53	4.412	58.14	1307.67	461.1	54.29	6.179	48.57	333	341.3	54.01	1.506	21.27
14/02/2025	11:00 a. m.	455.66	446.7	55.06	1.368	51.64	804	464	54.97	3.996	42.37	140.67	203.03	43.06	1.317	20
17/02/2025	11:00 a. m.	710	427.33	55.3	2.293	65	1032.33	419.07	55.08	3.313	47.57	364	329	54.44	1.497	23.41
20/02/2025	11:00 a. m.	835.67	467.37	55.51	0.613	80	1022.67	466.2	55.26	1.539	45.12	597	320.37	54.31	1.316	19.91
20/02/2025	11:00 a. m.	629.33	217.37	40.52	0.735	40	696	428.63	55.52	1.86	34.31	707.33	36.22	36.22	17.31	17.31
24/02/2025	11:00 a. m.	1100	455.87	53.59	5.259	81.93	1250.67	423.87	53.31	4.782	65.73	723.33	351.63	53.38	1.807	22.78
28/02/2025	11:00 a. m.	727.67	426.93	55.56	0.553	46.09	981	464.9	55.15	2.078	52.93	485.33	305.8	49.72	1.256	22.25
28/02/2025	11:00 a. m.	1002.33	465.1	55.11	3.117	56.74	1046	463.43	54.85	4.892	54.82	1020.33	331.3	54.57	1.539	22.27
04/02/2025	12:00 p. m.	1145.33	463.97	55.06	4.723	67.82	1199.33	463	54.86	6.236	90.46	1156.67	362.77	55	1.664	32.55
05/02/2025	12:00 p. m.	928.33	465.3	55.22	3.779	74.55	1033	463.67	54.97	6.243	60.6	989.67	359.57	55.14	1.66	24.8
06/02/2025	12:00 p. m.	744	468.6	55.73	3.547	77.68	752	405	55.38	4.539	86.27	353.67	362.23	54.86	1.419	29.26
10/02/2025	12:00 p. m.	942.33	463.87	54.81	3.177	55	1212	356.53	54.5	4.298	74.03	1050.67	351.43	54.4	1.562	22.58
11/02/2025	12:00 p. m.	359.67	92.03	17.14	0.308	21.24	271.33	123.83	22.63	0.635	21.81	560	98.96	17.427	0.518	19.15
14/02/2025	12:00 p. m.	617	153.47	29.74	0.548	26.26	383	159.1	28.83	0.801	28.11	840.33	145.67	29.55	0.848	23.78
17/02/2025	12:00 p. m.	871.33	298.4	53.18	1.469	67	801	404.3	55.05	2.444	45.73	905.33	385.6	54.88	1.599	25.86
20/02/2025	12:00 p. m.	854.67	469.1	55.64	2.219	65	826.67	307.17	55.11	1.735	57.17	786.67	280.33	48.88	1.326	18.59
24/02/2025	12:00 p. m.	982.67	392.47	54.98	2.747	80.42	1261.33	421.33	54.61	4.88	49.44	902	355.67	55.01	1.932	25.5
28/02/2025	12:00 p. m.	435.637	464.5	54.93	2.93	36.55	1086.33	464.4	54.712	5.797	41.94	723	136.17	34.14	1.126	24.98
04/02/2025	01:00 p. m.	666	452.9	55.14	2.794	48.39	1037.67	464.43	54.96	3.582	68.43	746	401.33	53.54	1.343	20.46
05/02/2025	01:00 p. m.	885.67	464.87	55.04	3.323	69.54	980.67	420.5	54.86	3.71	74.05	955.66	350.17	54.67	1.505	27.25
06/02/2025	01:00 p. m.	273	462.73	54.69	2.683	45.73	962.33	461.93	54.53	3.759	43.85	756	362.43	53.46	1.37	25.03
11/02/2025	01:00 p. m.	774	89.53	16.86	0.301	19.89	106.88	275	20.94	0.588	20.09	277	105.73	19.52	0.556	19.15
14/02/2025	01:00 p. m.	789.33	464.77	55.02	3.07	85.00	947.67	345.60	53.75	1.60	28.20	609.67	396.53	54.95	1.69	26.62
17/02/2025	01:00 p. m.	484	68.87	13.04	0.224	23.46	261.33	86.2	15.98	0.463	23.48	701	83.87	15.01	0.438	23.05
20/02/2025	01:00 p. m.	941	467.53	55.46	1.892	93	1024	394.23	54.48	1.885	36.41	933.33	384.1	55.25	1.611	21.78
24/02/2025	01:00 p. m.	1104.67	401.03	39.6	2.374	143.09	1324	418.37	53.95	6.195	62.93	953.67	346.77	53.36	1.783	N/A
28/02/2025	01:00 p. m.	522.5	57.8	21.07	0.416	25.32	224.67	74.77	25.09	0.813	25.02	783.67	71.57	25.37	0.821	22.6
04/02/2025	02:00 p. m.	356.33	170.83	29.9	0.375	24.11	472	209.83	36.59	0.886	24.04	631	184.9	30.87	0.765	23.86
05/02/2025	02:00 p. m.	853.33	464.13	54.8	0.677	53.77	1124	462.3	54.66	1.923	44.98	869	339.93	50.69	1.202	25.14
06/02/2025	02:00 p. m.	764.67	201.27	31.31	0.39	24.38	480	73.23	29.25	0.79	28.44	997.67	288.3	38.82	0.94	22.00
10/02/2025	02:00 p. m.	719	391.03	45.46	0.655	57	869.33	252.1	49.94	1.351	64.26	862	311.6	45.06	1.063	25.18
14/02/2025	02:00 p. m.	643.00	441.23	54.63	1.16	90.00	960.50	382.90	53.17	2.40	37.10	476.00	398.23	52.18	1.17	25.57
17/02/2025	02:00 p. m.	180.67	71.2	14.01	0.254	21.95	181.33	89.7	18.05	0.463	22.21	178.67	75.27	15.18	0.449	20.87
20/02/2025	02:00 p. m.	532.67	85.83	19.09	0.345	45	293.67	107.67	23.75	0.675	23.48	822.33	100.43	22.04	0.629	20.63
24/02/2025	02:00 p. m.	971.33	211.43	39.6	1.035	62.91	1072.67	460.73	53.95	4.041	63.41	959.33	304.57	53.36	1.417	28.76
28/02/2025	02:00 p. m.	740.67	225.83	31.84	0.425	50.98	837.33	278.37	52.02	1.58	49.73	535	311.87	52.33	1.344	29.2
04/02/2025	03:00 p. m.	242	148.57	19.9	0.224	19.95	329.33	152.2	18.73	0.416	21.1	308.33	107.07	19.1	0.458	18.66
05/02/2025	03:00 p. m.	199	50.8	10.5	0.17	21.17	172.67	65.83	13.39	0.358	22.14	583.67	56.43	11.28	0.31	19.76
06/02/2025	03:00 p. m.	569.00	464.27	39.57	0.26	30.71	890.33	462.73	53.98	0.97	28.26	424.67	281.30	28.91	0.58	22.22
10/02/2025	03:00 p. m.	521	188.63	24.98	0.294	33.3	298.07	30.19	0.634	0.93	31.15	739.33	244.7	27.85	0.595	25.73
14/02/2025	03:00 p. m.	203.00	50.03	12.03	0.20	20.92	165.00	50.60	12.28	0.34	21.61	106.50	73.40	16.53	0.42	20.28
17/02/2025	03:00 p. m.	235	84.83	16.54	0.237	22.84	249	134.45	20.33	0.475	21.52	226.33	83.77	15.75	0.38	21.15
20/02/2025	03:00 p. m.	464.33	231.73	31.19	0.285	25.08	383.23	383.23	55.06	1.146	32.86	367	231.3	35.32	0.792	21.68
24/02/2025	03:00 p. m.	641.67	265.6	42	0.36	44.67	547	362.3	49.27	1.771	42.43	887	261.97	41.28	0.998	31.55
28/02/2025	03:00 p. m.	613.67	185.43	24.21	0.177	32.23	299.33	516	29.03	0.543	32.81	670.67	263	29.81	0.668	23.78

A.3 Hoja de Cálculo de Valores Recolectados en marzo 2025

Tabla A.0.3. Valores registrados en el mes de marzo.

Tabla A.0.3. Valores registrados en el mes de marzo.

Marzo Global																
Fecha	Hora	CPC1 G	CPC1 IR	CPC1 UVA	CPC1 UVB	CPC 1 Temp	CPC 2 G	CPC 2 IR	CPC 2 UVA	CPC 2 UVB	CPC 2 Temp	Ambiente G	Ambiente IR	Ambiente UVA	Ambiente UVB	Ambiente TEMP
04/03/2025	11:00 a. m.	899.33	465.77	55.21	2.207	44.94	1217.67	463	54.77	1.993	41.368	569.67	332.3	54.93	1.547	21.45
04/03/2025	11:00 a. m.	858.33	543.4	55.08	3.113	43.15	1061	463.73	54.91	6.076	53.73	1012.67	352.6	55.04	1.81	24.52
05/03/2025	11:00 a. m.	819.67	467.03	55.47	4.102	71.94	1232	464.8	55.08	6.249	65.8	597.33	332.13	55.14	1.647	28.22
06/03/2025	11:00 a. m.	1121.67	445.2	54.69	3.308	92.64	1120.67	459.47	54.15	4.758	79.78	1176.33	329.27	54.36	1.514	25.05
10/03/2025	11:00 a. m.	756	468.73	55.55	4.065	60.2	1174	454.73	55.26	6.039	72.72	393.33	333.97	54.99	1.636	24.89
13/03/2025	11:00 a. m.	1063.73	311.68	55.1	3.539	68.45	1152.67	456.33	53.76	2.848	53	1136.67	318.9	55.91	1.46	21.86
13/03/2025	11:00 a. m.	773	444.87	55.13	3.996	79.45	1123.67	463.8	55.94	5.931	88.15	931	346.43	55	1.766	28.06
21/03/2025	11:00 a. m.	744	468.37	55.7	3.156	38.51	743	466.97	55.49	4.673	43.77	354.33	285.63	48.13	1.285	23.64
21/03/2025	11:00 a. m.	614	467.73	55.53	0.455	56.7	998.33	466.67	55.36	4.033	56.36	268	314.57	53.61	1.461	22.38
24/03/2025	11:00 a. m.	902.67	466.3	55.35	2.471	55.59	1055.67	465.83	55.15	5.806	40.91	1087.67	344.33	55.26	1.706	27.18
26/03/2025	11:00 a. m.	554.33	108.03	29.67	0.618	66	300	152.97	44.16	1.434	64.5	771.67	77.3	27.03	0.939	24.81
31/03/2025	11:00 a. m.	746.67	391.57	38.87	0.433	35.09	958	466.33	55.28	2.116	34.55	427.33	228.23	34.98	0.988	25.06
31/03/2025	11:00 a. m.	1022.67	465.73	55.22	3.289	43.21	1360.33	462.17	54.61	3.496	56.02	633.67	313.77	49.46	1.4	24.61
04/03/2025	12:00 p. m.	953	465.9	55.27	5.025	56.1	1100.33	464.77	55.08	6.171	50.58	953	358.8	55.32	1.966	25.79
05/03/2025	12:00 p. m.	1058.33	390.93	54.94	2.307	48.93	1244	461.87	54.55	3.784	44.66	862	342.2	54.93	1.721	28.76
06/03/2025	12:00 p. m.	555	202.27	0.65	0.541	58.88	648.67	368.93	51.36	1.673	57.22	864.33	145.6	30.86	0.918	25.84
10/03/2025	12:00 p. m.	983	464.33	55.01	2.167	55.69	1131.67	462.77	54.81	5.406	61.55	1090.67	360.03	55.27	2.123	78.78
13/03/2025	12:00 p. m.	1073	463.77	54.86	2.454	66.48	1353.67	461.64	54.58	5.833	76.42	1117.33	346.7	54.83	1.858	28.09
21/03/2025	12:00 p. m.	1017	466.87	55.44	4.408	58.38	1209	463.63	54.85	5.492	41.72	973.33	334.5	55.32	1.788	23.42
24/03/2025	12:00 p. m.	1012.67	466.17	55.27	3.524	52.73	1055.67	465.1	55.12	5.267	67.5	1087.67	271.3	50.81	1.58	25.65
26/03/2025	12:00 p. m.	283.33	59.03	12.35	0.246	22.82	191.67	78.17	15.79	0.511	23.11	352.67	70.63	14.98	0.491	22.7
31/03/2025	12:00 p. m.	804	465.37	55.14	3.432	60.19	1118.33	464.07	54.96	6.24	47.2	691.33	366.83	55.06	1.846	28.6
04/03/2025	01:00 p. m.	981	472.7	55.21	2.053	42.75	1099.67	464.4	54.99	3.861	39.11	1075.33	336	55.02	1.732	26.2
05/03/2025	01:00 p. m.	788.33	445.4	54.99	1.252	81.67	953.33	463.93	54.9	3.878	60.85	614.67	334.1	54	1.533	31.4
06/03/2025	01:00 p. m.	763.33	236.03	31.56	0.497	34.9	594.67	120.27	20.97	0.63	25.69	719.67	271.47	32.05	0.883	23.15
10/03/2025	01:00 p. m.	728.33	457.3	55.21	1.971	35.44	1101	464.4	54.96	5.195	44.81	800.67	346.47	55.16	1.868	24.7
13/03/2025	01:00 p. m.	1096.33	465.5	54.96	1.239	49.31	1177.67	462.3	54.63	3.941	46.08	1221	328.03	54.2	1.611	27.33
21/03/2025	01:00 p. m.	1212	463.73	54.86	3.001	64.19	1241.33	460.67	54.38	4.981	61.06	1136	355.7	54.94	1.803	28.28
24/03/2025	01:00 p. m.	888	465.57	55.11	2.409	67.27	952.67	464.43	54.96	4.385	69.78	1056.33	353.23	54.79	1.692	29
26/03/2025	01:00 p. m.	209.33	52.98	16.06	0.334	23.14	219	86.93	20.21	0.667	22.52	201	80.63	18.63	0.628	21.76
31/03/2025	01:00 p. m.	970	464.5	54.92	2.798	78.06	1209.67	462.57	54.72	4.619	64.08	1027	359.33	54.75	1.747	30.28
04/03/2025	02:00 p. m.	872.67	255.03	34.84	0.43	34.58	895.33	463.67	54.87	2.85	31.08	1083.67	289.53	50.95	1.381	26.51
05/03/2025	02:00 p. m.	573	84.7	23.25	0.396	36.9	400	130.27	30.81	0.884	34.72	871.67	125.8	27.71	0.792	24.16
06/03/2025	02:00 p. m.	149.67	54.97	10.04	0.382	22.24	196	66.77	12.63	0.63	21.99	193	60.6	11.63	0.353	21.43
10/03/2025	02:00 p. m.	921.33	466.4	54.75	1.135	31	1169.33	405.87	50.75	2.274	29.6	417	299.6	53.33	1.486	25
21/03/2025	02:00 p. m.	608	275.3	43.61	0.757	40.75	425.67	95.57	32.06	0.982	63.22	892.33	118.3	31.83	0.949	23.79
24/03/2025	02:00 p. m.	445.33	58.5	11.26	0.197	25.24	212.67	83.33	15.35	0.461	25.54	702.67	89.67	17.35	0.53	24.3
31/03/2025	02:00 p. m.	967.67	237.3	33.7	1.1647	52.1	868.33	463.3	54.63	1.588	68.25	1151	388.07	52.25	1.3797	27.21
04/03/2025	03:00 p. m.	747.67	63.87	11.63	0.211	29.16	607.67	245.7	55.4	0.93	30.6	857	238.6	38.49	0.959	27.49

A.4 Hoja de Cálculo de Valores Recolectados en abril 2025

Tabla A.0.4. Valores registrados en el mes de abril.

Tabla A.0.4. Valores registrados en el mes de abril.

		Abril Global														
Fecha	Hora	CPC1 G	CPC1 IR	CPC1 UVA	CPC1 UVB	CPC1 Temp	CPC2 G	CPC2 IR	CPC2 UVA	CPC2 UVB	CPC2 Temp	Ambiente G	Ambiente IR	Ambiente UVA	Ambiente UVB	Ambiente TEMP
02/04/2025	11:00 a. m.	826	467	55.5	0.581	65.53	1077.67	485.23	55.18	3.083	48.8	764.33	301.47	47.97	1.255	25.42
02/04/2025	11:00 a. m.	1033.33	465.73	55.21	3.32	60.31	1054.66	464.77	55.06	6.246	54.94	977.33	340.23	54.84	1.659	26.44
07/04/2025	11:00 a. m.	688	474.97	55.71	0.563	33.81	1093.67	467.1	55.56	6.272	41.29	531.67	325.57	55.43	1.648	23.65
07/04/2025	11:00 a. m.	1074	465.16	55.15	5.6596	47.17	1201	462.17	54.65	6.2197	43.01	698.33	368.73	55.29	2.043	24.12
09/04/2025	11:00 a. m.	953.67	467.2	55.47	4.024	36.13	1208.33	464.97	55.13	4.4	34.01	636.33	304	52.2	1.513	23.58
09/04/2025	11:00 a. m.	915	465.2	55.17	5.869	45.41	1241.67	461.9	54.52	6.217	36.97	543.33	340.2	55.23	1.918	23.27
11/04/2025	11:00 a. m.	744	469.27	55.85	0.635	43.01	781	467.8	55.63	5.822	28.62	755.33	317.43	54.97	1.555	25.36
11/04/2025	11:00 a. m.	851.67	463.2	55.34	5.212	54.73	1130.67	465.03	55.15	6.112	58.57	862	366.47	55.34	1.954	22.98
21/04/2025	11:00 a. m.	813.67	465.17	55.15	3.845	58.75	1149	465.17	55.15	1.285	49.2	673.33	339.7	54.75	1.708	23.51
23/04/2025	11:00 a. m.	930	466	55.55	0.665	64.61	1197.67	462.8	54.86	4.095	72.18	1109	286.47	52.74	1.468	21.96
23/04/2025	11:00 a. m.	1075.67	464.37	54.97	2.824	59.97	1255.67	461.67	54.51	3.72	75.97	1134.67	331.5	54.97	1.83	25.86
25/04/2025	11:00 a. m.	998.67	465.77	55.28	0.691	36	1221.33	463.33	54.95	3.531	43.66	1120.67	298	53.81	1.484	23.51
25/04/2025	11:00 a. m.	1045	464.93	55.1	4.77	46.04	1124	463.8	54.91	5.607	51.43	1053	335.17	54.94	1.807	26.77
28/04/2025	11:00 a. m.	976.67	466.83	55.42	5.327	72.76	1185.67	465.67	55.23	5.754	123.8	1141.67	335.77	55.42	1.908	26.81
30/04/2025	11:00 a. m.	1101.67	465.6	55.24	0.968	48.06	1513	460	54.45	3.05	46.64	760.33	289.17	52.87	1.157	26.33
30/04/2025	11:00 a. m.	926	464.27	54.96	4.537	58.16	1286	461.83	54.53	6.212	117.85	928.33	324.63	54.85	1.838	30.07
02/04/2025	12:00 p. m.	1051.67	335.37	54.97	2.668	60.85	1075	463.57	54.87	6.033	68.02	1103.33	439.73	54.4	1.656	31.15
07/04/2025	12:00 p. m.	1359.33	465.3	55.16	4.987	43.67	1272	462.93	55.75	6.229	45.79	1231	353.07	55.13	1.898	24.38
09/04/2025	12:00 p. m.	1088.33	465.2	55.07	3.759	70.31	1305.33	461.6	54.65	6.222	84.03	1189	340.2	55.16	1.993	25.7
11/04/2025	12:00 p. m.	781	466.03	55.23	4.346	57.35	1214	464.47	55.06	6.243	109.38	897.67	361.37	55.23	2.043	23.33
21/04/2025	12:00 p. m.	685.67	465.5	55.19	2.531	40.07	1142	463.07	54.81	2.41	42.53	765.67	140.33	36.39	1.098	24.99
23/04/2025	12:00 p. m.	1265	461.43	54.55	5.682	55	1392.67	458.17	54.01	6.17	51.5	764.67	341.67	54.74	1.977	24.74
25/04/2025	12:00 p. m.	1096.67	464.17	54.95	3.77	51	1149.67	462.97	54.81	6.229	64.32	1150.33	356.6	54.95	1.961	28.46
28/04/2025	12:00 p. m.	991.67	464.17	54.89	4.34	72.48	1087	462.73	54.74	6.222	79.28	1134.33	341.9	54.81	1.924	26.72
30/04/2025	12:00 p. m.	1069.67	463.27	54.82	3.732	86.65	1391	459.7	54.18	6.189	84.24	1106.67	354.17	54.99	2.11	29.28
02/04/2025	01:00 p. m.	1048	464.57	54.97	3.24	70.17	1068.33	463.1	54.78	6.07	75.39	1105.33	321.77	53.85	1.576	31.39
07/04/2025	01:00 p. m.	1220.67	462.57	54.62	2.607	62.18	1344.67	461.07	54.34	3.786	49.03	1139.67	351.03	55.1	1.912	24.67
09/04/2025	01:00 p. m.	912	406.57	54.86	2.567	46.56	1096.33	436.03	54.39	2.256	54.25	920.33	333.5	54.84	1.85	26.83
11/04/2025	01:00 p. m.	943.33	465.2	54.98	2.687	51.5	1151.67	465.53	54.82	2.417	89.18	1056.33	345.1	54.86	1.868	26.18
21/04/2025	01:00 p. m.	1062.67	463.8	54.85	2.481	59.1	1381	460.6	54.38	4.644	50.86	1030.67	366.7	54.14	1.59	29.66
23/04/2025	01:00 p. m.	1225	471.57	55.07	3.753	76.64	1197	462.2	54.6	2.739	46.56	1232.33	336.23	54.8	1.736	31.68
25/04/2025	01:00 p. m.	974	464.07	54.76	2.838	86.81	1043.33	461.97	54.62	6.216	53.39	1099.33	336.77	54.51	1.776	34.8
28/04/2025	01:00 p. m.	1060	339.1	54.6	1.548	72.55	1018.67	462.5	54.74	6.224	54.75	1158	335.93	54.62	1.819	29.09
30/04/2025	01:00 p. m.	1079	465.17	54.89	2.209	54.27	1490.33	464.9	54.6	2.543	67.63	1213.33	334	54.8	1.864	29.7
02/04/2025	02:00 p. m.	912	249.13	54.54	1.469	40.35	749.67	275.53	47.91	1.315	35.75	1090.67	285	49	1.316	28.87
07/04/2025	02:00 p. m.	776.67	120.43	24.43	0.519	32.03	813	360.97	54.61	1.645	29.38	882.33	302.93	53.32	1.509	33.06

A.5 Hoja de Cálculo de Valores NASA POWER vs Medidos

Tabla A.0.5. Comparativa de NASA vs Medidos.

Tabla A.0.5. Comparativa de NASA vs Medidos.

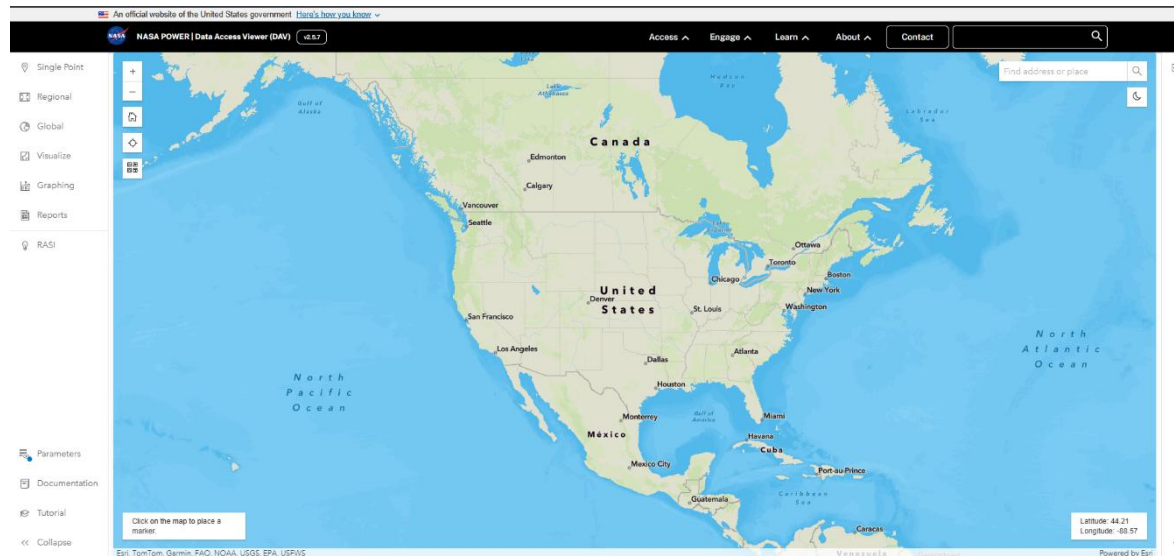
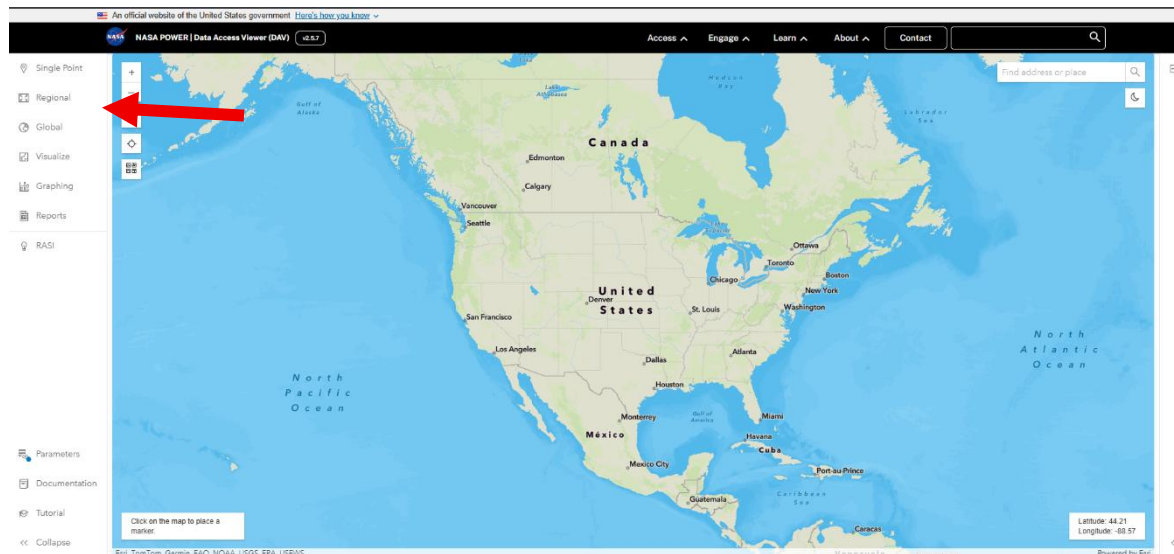
NASA						Medidos					
Fecha	Hora	Global Nubes	UVA (W/m ²)	UVB (W/m ²)	Temp °C	Fecha	Hora	Ambiente G	Ambiente UVA	Ambiente UVB	Ambiente TEMP
16/01/2025	12:00 p. m.	651.17	39.53	1.25	21.33	16/01/2025	12:00 p. m.	965.66	54.77	1.525	21.37
21/01/2025	12:00 p. m.	812	47.56	1.44	20.75	21/01/2025	12:00 p. m.	1166.67	54.54	1.426	28.97
22/01/2025	12:00 p. m.	866.45	52.58	1.54	20.93	22/01/2025	12:00 p. m.	937.66	54.41	1.438	31.23
23/01/2025	12:00 p. m.	802.67	48.21	1.41	21.23	23/01/2025	12:00 p. m.	511.66	51.27	1.291	31.67
28/01/2025	12:00 p. m.	846.42	50.53	1.46	22.83	28/01/2025	12:00 p. m.	265	54.6	1.493	22.8
29/01/2025	12:00 p. m.	774.03	46.23	1.36	22.2	29/01/2025	12:00 p. m.	1050.67	52.21	1.28	19.4
30/01/2025	12:00 p. m.	764.33	46.48	1.37	21.66	30/01/2025	12:00 p. m.	325.67	18.16	0.519	18.93
04/02/2025	12:00 p. m.	757.78	46.26	1.43	21.39	04/02/2025	12:00 p. m.	1156.67	55	1.664	32.55
05/02/2025	12:00 p. m.	787.72	46.5	1.43	22.29	05/02/2025	12:00 p. m.	989.67	55.14	1.66	24.8
06/02/2025	12:00 p. m.	816.65	49.77	1.59	22.62	06/02/2025	12:00 p. m.	353.67	54.86	1.419	29.26
10/02/2025	12:00 p. m.	851.95	50.99	1.59	23.39	10/02/2025	12:00 p. m.	1060.67	54.4	1.562	22.58
11/02/2025	12:00 p. m.	653.83	40.7	1.32	21.95	11/02/2025	12:00 p. m.	560	17.427	0.518	19.15
14/02/2025	12:00 p. m.	643.55	40.87	1.39	22.9	14/02/2025	12:00 p. m.	840.33	29.55	0.848	23.78
17/02/2025	12:00 p. m.	595.38	37.8	1.26	20.78	17/02/2025	12:00 p. m.	905.33	54.88	1.599	25.86
20/02/2025	12:00 p. m.	638.08	41.28	1.37	19.38	20/02/2025	12:00 p. m.	786.67	48.88	1.326	18.59
24/02/2025	12:00 p. m.	944.05	56.79	1.88	22.66	24/02/2025	12:00 p. m.	902	55.01	1.932	25.5
28/02/2025	12:00 p. m.	842.35	52.43	1.74	24.94	28/02/2025	12:00 p. m.	723	34.14	1.126	24.98
04/03/2025	12:00 p. m.	986.12	59.46	2.08	24.9	04/03/2025	12:00 p. m.	953	55.32	1.966	25.79
05/03/2025	12:00 p. m.	938.28	56.07	1.98	25.73	05/03/2025	12:00 p. m.	862	54.93	1.721	28.76
06/03/2025	12:00 p. m.	752.2	45.79	1.62	24.72	06/03/2025	12:00 p. m.	864.33	30.86	0.918	25.84
10/03/2025	12:00 p. m.	1007.95	61.18	2.15	24.38	10/03/2025	12:00 p. m.	1090.67	55.27	2.123	78.78
13/02/2025	12:00 p. m.	1020.65	61.76	2.2	26.67	13/02/2025	12:00 p. m.	1117.33	54.83	1.858	28.09
21/03/2025	12:00 p. m.	881.92	52.94	1.84	25.23	21/03/2025	12:00 p. m.	973.33	55.32	1.788	23.42
24/03/2025	12:00 p. m.	871.1	53.27	1.9	25.98	24/03/2025	12:00 p. m.	1087.67	50.81	1.58	25.65
26/03/2025	12:00 p. m.	821.08	50.92	1.88	24.2	26/03/2025	12:00 p. m.	352.67	14.98	0.491	22.7
31/03/2025	12:00 p. m.	946.12	56.59	2.03	27.74	31/03/2025	12:00 p. m.	691.33	55.06	1.846	28.6
02/04/2025	12:00 p. m.	1027.5	61.33	2.08	27.56	02/04/2025	12:00 p. m.	1103.33	54.4	1.656	31.15
07/04/2025	12:00 p. m.	1058.8	63.79	2.22	25.26	07/04/2025	12:00 p. m.	1231	55.13	1.898	24.38
09/04/2025	12:00 p. m.	935.45	58.41	2.14	24.85	09/04/2025	12:00 p. m.	1189	55.16	1.993	25.7
11/04/2025	12:00 p. m.	1103.3	65.32	2.35	23.63	11/04/2025	12:00 p. m.	897.67	55.23	2.043	23.33
21/04/2025	12:00 p. m.	802.2	44.75	1.56	27.87	21/04/2025	12:00 p. m.	765.67	36.39	1.098	24.99
23/04/2025	12:00 p. m.	863.7	52.87	1.94	28.39	23/04/2025	12:00 p. m.	764.67	54.74	1.977	24.74
25/04/2025	12:00 p. m.	869.67	49.15	1.79	28.21	25/04/2025	12:00 p. m.	1150.33	54.95	1.961	28.46
28/04/2025	12:00 p. m.	1058.43	63.63	2.3	27.97	28/04/2025	12:00 p. m.	1134.33	54.81	1.924	26.72
30/04/2025	12:00 p. m.	768.7	47.88	1.75	28.14	30/04/2025	12:00 p. m.	1106.67	54.99	2.11	29.28

A.6 Como usar NASA POWER | Data Access Viewer (DAV)

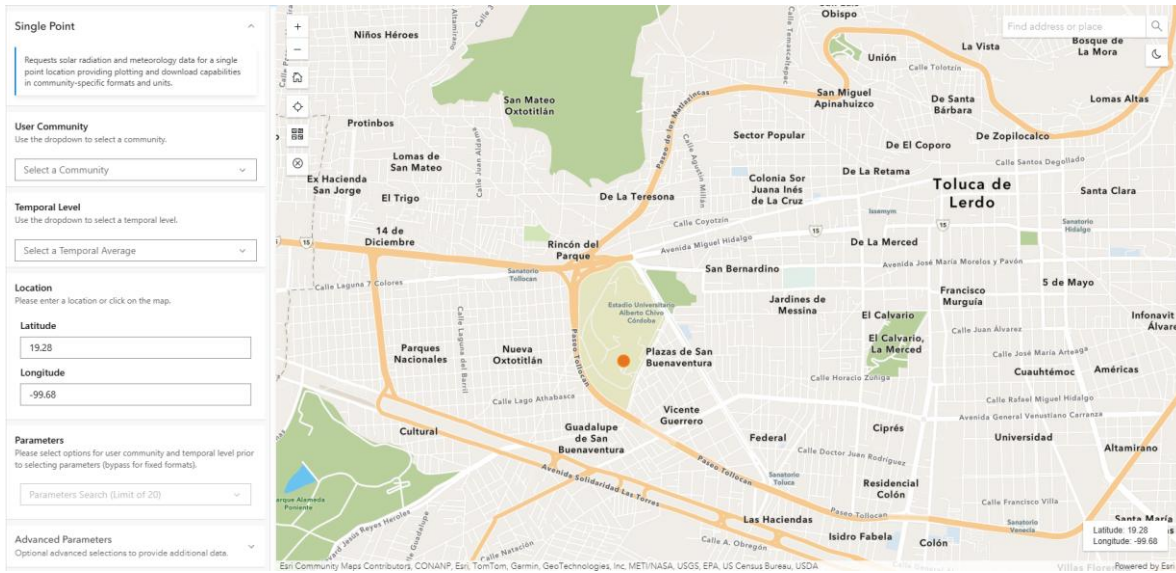
Instrucciones:

Acceder a <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

Dirigirse a la opción de Single Point



Con la rueda del mouse, ubicar la posición del estudio, y realizar clic para colocar el punto de estudio (Latitud y Longitud)

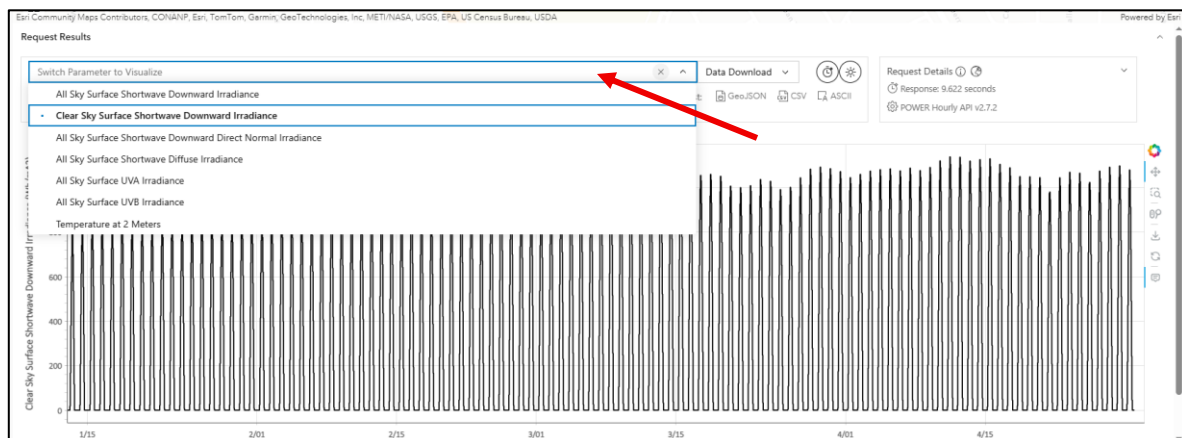


Ahora seleccionaremos las opciones de User Community la opción de Renewable Energy, en Temporal Level la opción de Hourly, en Time Extent colocamos las fechas del estudio que serian el inicio de las mediciones hasta su fin, que son: 13/01/2025 al 30/04/2025.

Escoger los parámetros que necesitas consultar, en este caso, all sky surface shortwave downward irradiance, clear sky surface shortwave downward irradiance, all sky surface shortwave downward direct normal irradiance, all sky surface shortwave diffuse irradiance, all sky surface UVA irradiance and UVB irradiance, temperature at 2 meters.

Submit, para que cargue la información solicitada.

Saldrá el request results y ya con el mouse puedes navegar los resultados y cambiar el parámetro que quieres visualizar.



A.7 Orientación teórica y práctica del CPC

La orientación de los concentradores solares es un aspecto fundamental para garantizar el aprovechamiento óptimo de la radiación incidente. En el caso del Concentrador Parabólico Compuesto (CPC), dicha orientación define la dirección y el ángulo con los que la radiación solar ingresa al plano de apertura, lo que influye directamente en la eficiencia térmica del sistema.

La declinación δ se puede encontrar a partir de la ecuación 8 aproximada de Cooper (1969):

$$\delta = 23.45 \sin(360 \cdot 284 + n/365) \quad (8)$$

Para la sustitución usaremos los valores de la Tabla A.0.6 de Duffie, 2013.

Tabla A.0.6 Días promedios recomendados para meses y valores de n por mes

Month	n for i th Day of Month	For Average Day of Month		
		Date	n	δ
January	i	17	17	-20.9
February	$31 + i$	16	47	-13.0
March	$59 + i$	16	75	-2.4
April	$90 + i$	15	105	9.4

Orientación teórica

En el enfoque teórico, se asume que el concentrador se encuentra perfectamente alineado con el meridiano local, es decir, a mediodía solar ($\omega = 0$), cuando el sol se ubica en su máxima altura y su proyección se encuentra dirigida exactamente hacia el sur en el hemisferio norte. En esta condición, el ángulo azimutal solar (γ_s) es igual a 0° , y el ángulo cenital (θ_z) puede expresarse directamente. Además de ϕ que es la latitud del lugar y δ la declinación solar.

En consecuencia, la pendiente óptima del CPC mediante la ecuación 9.

$$\beta = | \phi - \delta | \quad (9)$$

Este valor corresponde a la inclinación mensual teórica que maximiza la captación de radiación solar directa al mediodía solar. La Tabla A.7 presenta los valores calculados bajo estas condiciones, considerando una latitud de 19.63° y la variación de la declinación solar mensual.

Orientación práctica

Esta técnica experimental se llevó a cabo durante el mediodía solar, momento en el cual el sol alcanza su posición más alta en el cielo y los rayos incidentes llegan de forma casi perpendicular al plano del concentrador. En ese instante es posible visualizar claramente la línea de reflectancia generada sobre la superficie interna del colector, la cual debe coincidir con el eje central del CPC.

De esta manera, al alinear el concentrador de modo que dicha línea se observe en el centro del colector, se garantiza el correcto alineamiento óptico del sistema, asegurando que la radiación reflejada incida simétricamente sobre el absorbedor y que la apertura del concentrador quede orientada hacia el sur geográfico.

Tabla A.7 Ángulos de orientación de CPC

Mes	Latitud ϕ (°)	Declinación δ (°)	$\phi - \delta$ (°)	$\cos \theta_z$	θ_z (°)	Pendiente β (°)
ene-17	19.63	-20.9	40.53	0.76	40.53	40.53
feb-16	19.63	-13	32.63	0.8421	32.63	32.63
mar-16	19.63	-2.4	22.03	0.9269	22.03	22.03
abr-15	19.63	9.4	10.23	0.98	10.23	10.23