

**DISEÑO, CONTROL Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA
DE CONCENTRACIÓN SOLAR CON SEGUIMIENTO DE ALTA
PRECISIÓN**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

**DOCTORA EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA
EN MECATRÓNICA
Y DISEÑO MECÁNICO**

PRESENTA
**MTRA. ROSA FABIOLA
FUENTES MORALES**

DIRECTOR
DR. ARTURO DÍAZ PONCE

AGUASCALIENTES, AGS, OCTUBRE DEL 2024.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi esposo Darío, cuya paciencia, apoyo y amor incondicional han sido fundamentales para la culminación de esta tesis doctoral. Su comprensión durante los momentos de estrés y su constante aliento cuando más lo necesitaba han sido invaluable. Gracias por creer en mí incluso cuando yo dudaba y por ser mi pilar en todo momento. Este logro no habría sido posible sin tu compañía y dedicación. Te amo y te agradezco de todo corazón por estar a mi lado en este camino.

A mis hijos, Donovan y Yael. Ustedes han sido mi fuente de inspiración y fortaleza. Han soportado mis ausencias y han comprendido los momentos en que el trabajo me ha apartado de nuestras actividades como familia. Su apoyo incondicional y su capacidad para sacarme una sonrisa en los momentos más difíciles han sido fundamentales para que pudiera seguir adelante. Les dedico esta tesis con todo mi amor y gratitud, esperando que este esfuerzo les sirva de ejemplo y motivación para perseguir sus propios sueños y metas.

A mi director de tesis, el Dr. Arturo Díaz Ponce, por su conocimiento, paciencia y dedicación que han sido fundamentales para el desarrollo de este trabajo. Su retroalimentación constructiva y su atención al detalle han mejorado significativamente la calidad de mi investigación. Así como al Dr. Manuel Ignacio Peña Cruz y el Dr. Fernando Martell Chávez por sus enseñanzas y su apoyo profesional.

Finalmente, quiero agradecer al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo económico recibido y al Centro de Investigaciones en Óptica (CIO) por la oportunidad de cursar el posgrado y por facilitarme las herramientas necesarias para la realización de este trabajo de tesis.

Dedicatoria

*Dedicado a
mi esposo Darío y mis hijos
Donovan y Yael*

Resumen

Los sistemas híbridos de concentración solar son más eficientes para generar electricidad y calor a partir de la radiación solar que los sistemas térmicos y fotovoltaicos por separado. Sin embargo, su viabilidad técnico-económica se ha visto limitada por su elevado costo y complejidad de fabricación. En esta tesis se presenta un prototipo de concentrador solar térmico-fotovoltaico de disco parabólico que abarca el diseño, simulación óptica, construcción y caracterización eléctrica del sistema. El prototipo consiste de un colector parabólico y un receptor con cuatro celdas fotovoltaicas de triple unión que en conjunto con elementos ópticos secundarios garantizan una distribución uniforme de energía en las celdas. Además, para mantener la temperatura del receptor dentro de su rango de trabajo se propone un sistema de enfriamiento activo con aletas rectas como canales de fácil de construcción para hacer circular agua como fluido refrigerante. Además, se presenta la optimización del sistema de seguimiento solar mediante la implementación de una estrategia de control en lazo cerrado.

En condiciones de cielo despejado, el sistema alcanzó una concentración real promedio de 414.8 soles con un error de seguimiento promedio absoluto de 0.23° y 0.34° en el eje acimutal y cenital. El DMA fue de 0.124° y 0.132° para los ejes acimutal y cenital respectivamente, alcanzando una eficiencia eléctrica promedio de 29.75 %, una de las más altas reportadas para este tipo de sistemas. Este trabajo contribuye significativamente al avance en la madurez tecnológica de los sistemas de concentración térmicos fotovoltaicos, reduciendo la brecha entre prototipos y productos comerciales.

Índice de contenido

Nomenclatura	IX
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Justificación	6
1.3. Planteamiento del problema	8
1.4. Hipótesis	8
1.5. Objetivo general	8
1.5.1. Objetivos específicos	8
2. Marco teórico	9
2.1. Sistemas de concentración fotovoltaicos	9
2.2. Sistemas de energía termosolar de concentración	11
2.3. Sistemas de cogeneración de energía térmica-fotovoltaica	13
2.3.1. Métodos de enfriamiento en sistemas térmicos fotovoltaicos	14
2.4. Parámetros de una celda fotovoltaica	16
2.4.1. Eficiencia y curva I-V de una celda fotovoltaica	16
2.4.2. Efectos de la Irradiancia	17
2.4.3. Efectos de la temperatura	18
2.5. Concentrador solar PD-CPVT	19
2.6. Sistemas de seguimiento solar	20
2.7. Impacto del error de seguimiento solar en módulos CPV	22
2.8. Clasificación de los algoritmos de control aplicados en sistemas de seguimiento solar	24
2.8.1. Estrategia de seguimiento solar de lazo abierto	25
2.8.2. Estrategia de seguimiento solar de lazo cerrado	29
2.8.3. Estrategia de seguimiento solar de lazo híbrido	33
2.9. Clasificación alternativa de algoritmos de control aplicados en sistemas de seguimien- to solar	38
2.10. Modelo matemático de un servomecanismo con salida en posición	39
3. Metodología	42
3.1. Celdas fotovoltaicas y elemento óptico secundario	42
3.2. Colector de disco parabólico	43
3.2.1. Fotogrametría	44
3.3. Diseño y análisis óptico	44
3.3.1. Análisis del factor de concentración	45
3.3.2. Análisis de no uniformidad del receptor CPVT	45
3.4. Diseño y construcción del sistema PD-CPVT	47
3.4.1. Receptor CPV	47
3.4.2. Estructura de soporte	47
3.4.3. Sistema de enfriamiento activo	48

3.5.	Sistema de seguimiento solar	50
3.5.1.	Estimación paramétrica del servo-mecanismo	50
3.5.2.	Diagrama general de control	54
3.5.3.	Caracterización de la precisión de seguimiento solar	55
3.5.4.	Implementación de algoritmos de control clásico en el seguidor solar	55
3.5.5.	Sintonización de los controladores	56
3.5.6.	Índices de desempeño	58
3.5.7.	Propuesta de algoritmo de control para el seguidor solar	59
3.5.8.	Efecto windup	60
3.5.9.	Estrategia anti-windup retro cálculo	61
3.5.10.	Implementación del anti-windup	63
3.5.11.	Análisis del consumo eléctrico de los servomotores del seguidor solar em- pleando algoritmos de control clásico	66
3.6.	Evaluación del rendimiento eléctrico del PD-CPVT	67
3.6.1.	Configuración experimental	68
4.	Resultados	70
4.1.	Resultados del análisis óptico	70
4.1.1.	Medición del flujo solar promedio de forma experimental	71
4.2.	Caracterización eléctrica sin el sistema de enfriamiento activo	72
4.3.	Caracterización eléctrica con el sistema de enfriamiento activo	74
4.4.	Resultado del análisis del consumo eléctrico de los servomotores del seguidor solar empleando algoritmos de control clásico	77
4.5.	Resultados pruebas de seguimiento solar implementando algoritmos de control clásico	79
4.6.	Resultados implementación del anti-windup	80
4.6.1.	Análisis comparativo del control PI y PI con anti-windup (Pruebas de segui- miento solar)	82
4.7.	Resultados de pruebas de seguimiento solar en el PD-CPVT	83
5.	Conclusiones	85
6.	Recomendaciones	87
	Bibliografía	97
	Anexos	97

Índice de tablas

2.1. Colectores solares ordenados de acuerdo a su concentración [53].	11
2.2. Factores que condicionan la precisión de seguimiento solar [72].	22
2.3. Algoritmos de control de lazo abierto, lazo cerrado e híbrido aplicados en sistemas de seguimiento solar [72].	25
2.4. Ventajas y desventajas de la estrategia de seguimiento de lazo abierto en sistemas de seguimiento solar [72].	26
2.5. Ventajas y desventajas de la estrategia de seguimiento de lazo cerrado en sistemas de seguimiento solar [72].	30
2.6. Ventajas y desventajas de la estrategia de seguimiento de lazo híbrido en sistemas de seguimiento solar [72].	35
3.1. Parámetros de diseño del disco parabólico.	44
3.2. Ganancias del modelo matemático (motor acimutal).	54
3.3. Ganancias del modelo matemático (motor cenital).	54
3.4. Error de propagación en el cálculo de la eficiencia eléctrica.	69
4.1. Índices de desempeño, error de seguimiento y consumo energético eje acimutal.	79
4.2. Índices de desempeño, error de seguimiento y consumo energético eje cenital.	79
4.3. Datos de pruebas experimentales motor acimutal.	80
4.4. Datos de pruebas experimentales motor cenital.	81
4.5. Índices de desempeño control PI con y sin anti-windup eje acimutal.	81
4.6. Índices de desempeño control PI con y sin anti-windup eje cenital.	82
4.7. Datos de pruebas experimentales control PI/ control PI anti-windup motor acimutal.	82
4.8. Datos de pruebas experimentales control PI/ control PI anti-windup motor cenital.	83

Índice de figuras

1.1. Demanda de calor en la industria a nivel global [46].	7
2.1. Comparación entre celda convencional y multi-unión [48].	9
2.2. Relación ángulo de aceptación-eficiencia de un MFC [50].	10
2.3. Sistemas de concentración solar [54].	12
2.4. Sistemas de cogeneración de energía térmica fotovoltaica [14].	13
2.5. Enfriamiento pasivo [21].	15
2.6. Enfriamiento activo [21].	15
2.7. Representación de una celda solar en circuito abierto y corto circuito [55].	16
2.8. Curva I-V, P-V	17
2.9. Curva característica I-V de una celda solar en función de la irradiancia [55].	18
2.10. Curva característica I-V de una celda solar en función de su temperatura [55].	18
2.11. Esquema concentrador PD-CPVT [57].	19
2.12. Tipos de seguidores solares [59].	21
2.13. Simulador solar CPV Helios 3198 [83].	23
2.14. Ángulo de aceptación a 1000 W/m^2 medido en el módulo CPV A en el simulador solar [72].	24
2.15. Ángulo de aceptación a 1000 W/m^2 medido en el módulo CPV B en el simulador solar [72].	24
2.16. Diagrama de bloques estrategia de control de lazo abierto [72].	26
2.17. Diagrama de flujo estrategia de control de lazo abierto [72].	27
2.18. Diagrama de bloques estrategia de control de lazo cerrado [72].	29
2.19. Comparación entre dos FOVs de sensores solares [72].	30
2.20. Diagrama de flujo estrategia de control de lazo cerrado [72].	31
2.21. Diagrama de bloques estrategia de control de lazo híbrido [72].	34
2.22. Método de localización solar mediante la estrategia de control híbrida [72].	35
2.23. Diagrama de flujo estrategia de control de lazo híbrido [72].	36
2.24. Clasificación alternativa de algoritmos de control aplicados en sistemas de seguimiento solar basada en la unidad de control [72].	39
2.25. Diagrama eléctrico y mecánico de un servomecanismo [146].	39
2.26. Diagrama de bloques de un servomecanismo [146].	40
2.27. Diagrama de bloques de un servomecanismo con realimentación de corriente [146].	41
2.28. Diagrama de bloques de segundo orden de un servomecanismo [146].	41
3.1. Características del SOE y cover utilizado.	43
3.2. Dimensiones del colector.	43
3.3. Técnica de fotogrametría.	44
3.4. Diseño óptico del receptor CPVT.	45
3.5. Distribución de flujo incidente a diferentes distancias del punto focal.	46
3.6. Diseño del receptor.	47
3.7. Construcción del receptor.	47

3.8.	Diseño de la estructura de soporte del PD-CPVT.	48
3.9.	Construcción de la estructura de soporte del PD-CPVT.	48
3.10.	Diseño del sistema de enfriamiento.	49
3.11.	Construcción del sistema de enfriamiento.	50
3.12.	Diagrama de conexión identificación paramétrica.	52
3.13.	Diagrama de bloques en Simulink® para la estimación paramétrica del motor-reductor.	52
3.14.	Sintonización del control PD.	53
3.15.	Señal de ruido blanco.	53
3.16.	Diagrama de control del seguidor solar.	54
3.17.	Ilustración de la ubicación de los sensores solares y el error angular.	55
3.18.	Sistema de control IMC [158].	57
3.19.	Estructura clásica de un sistema de control retroalimentado [158].	57
3.20.	Diagrama del controlador PI.	61
3.21.	Efecto windup ante un cambio de referencia.	61
3.22.	Diagrama de bloques anti wind-up	62
3.23.	Experimento 1: Control PI sin anti-windup.	64
3.24.	Experimento 2: PI con anti-windup con límites de saturación $[-0.5, 0.5]^\circ$ y $T=6s$	64
3.25.	Experimento 3: PI con anti-windup con límites de saturación $[-1.2, 1.2]^\circ$ y $T=20s$	65
3.26.	Experimento 4: PI con anti-windup con límites de saturación $[-1, 1]^\circ$ y $T=10s$	66
3.27.	Elementos empleados para la medición del consumo energético de los motores del seguidor solar.	67
3.28.	Sistema PD-CPVT montado en el seguidor solar.	68
3.29.	Analizador fotovoltaico Solmetric.	69
4.1.	Comportamiento del índice de no uniformidad y del flujo incidente medio del receptor CPVT.	70
4.2.	Mapa de distribución de flujo de las cuatro celdas solares.	71
4.3.	Arreglo experimental sensor Gardon.	71
4.4.	Resultados experimentales del rendimiento eléctrico del PD-CPVT propuesto de un típico día soleado sin el sistema de enfriamiento	73
4.5.	Resultados experimentales de un típico día soleado con el sistema de enfriamiento activo (25/06/23).	75
4.6.	Resultados experimentales de diez días de experimentación.	76
4.7.	Resultados experimentales del error de seguimiento de los algoritmos de control on-off, PI y PID.	78
4.8.	Resultados experimentales del error de seguimiento de un típico día soleado (25/06/23).	83
4.9.	Resultados experimentales del STE_{prom} de diez días de experimentación.	84
6.1.	Diagrama en Simulink® control PI anti-windup eje acimutal.	107
6.2.	Diagrama en Simulink® control PI anti-windup eje cenital.	108
6.3.	Diagrama en Simulink® control PI empleando decodificadores.	109
6.4.	Diagrama en Simulink® estimación paramétrica.	110

Nomenclatura

η_e	Eficiencia eléctrica	CPV	Concentración fotovoltaica
ϕ	Ángulo de borde	CPVT	Concentración fotovoltaica térmica
θ_i	Ángulo de incidencia	CSP	Energía de concentración solar (Concentrated Solar Power)
$^\circ$	Grados	DHI	Radiación solar difusa (Diffuse Horizontal Irradiance)
Cr	Factor de concentración	DNI	Radiación solar directa (Direct Normal Irradiance)
D	Diámetro del receptor	EAM	Error absoluto máximo
f	Distancia focal del receptor respecto al eje horizontal	ETC	Colector de tubo evacuado
FF	Factor de forma	FPC	Colector de placa plana
I_m	Intensidad máxima	GHI	Radiación solar global (Global Horizontal Irradiance)
I_{sc}	Corriente de corto circuito	HCPV	Sistema fotovoltaico de alta concentración
m	Metros lineales	HCPVT	Sistema fotovoltaico de alta concentración fotovoltaica térmica
m^2	Metros cuadrados	HFC	Colector de campo de heliostatos
P_m	Potencia máxima	HSP	horas de sol pico
ref	Señal de referencia	IEC	Integral del error cuadrático
V_m	Voltaje máximo	IECT	Integral del error cuadrático por tiempo
V_{oc}	Voltaje de circuito abierto	L	Longitud de la parábola reflectora
W	Watts	LCPV	Sistema fotovoltaico de baja concentración
x	Eje horizontal de la parábola	LFR	Reflector lineal Fresnel
y	Línea focal de la parábola	MFC	Módulo fotovoltaico de concentración
ANES	Asociación nacional de energía solar	PC	Computadora personal (Personal Computer)
CIO	Centro de Investigaciones en Óptica A.C.	PD-CPVT	Concentrador fotovoltaico térmico de disco parabólico
CPC	Colector parabólico compuesto	PDR	Reflector de disco parabólico
		PTC	Concentrador de canal parabólico (Parabolic Trough Collector)

PV	Panel fotovoltaico	SPA	Algoritmo de posición solar
PVT	Sistema solar fotovoltaico térmico	STE	Error total de seguimiento
SIGER	sistema de información geográfica de las energías renovables	VTC	Variación total de control
SOE	Elemento óptico secundario	°C	Grados centígrados

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

Históricamente, el desarrollo de la sociedad ha dependido del uso de fuentes energéticas primarias de origen fósil. Sin embargo, el uso indiscriminado de estas fuentes ha causado un deterioro ambiental global que podría alcanzar niveles insostenibles si no se aplican medidas correctivas de manera oportuna. Entre las evidencias más claras de la degradación del ecosistema se encuentran el calentamiento global, la reducción de la capa de ozono y la lluvia ácida [1]. Ante esta situación, surge la necesidad de desarrollar fuentes de energía alternativas que reemplacen a los combustibles fósiles. Actualmente, se continúan buscando soluciones para enfrentar esta crisis inminente. La energía solar es un ejemplo destacado de energía renovable, ya que puede aprovecharse directamente para obtener energía térmica o transformarse en energía eléctrica. Para un sistema de aprovechamiento de energía solar, la primera condición es captar la mayor cantidad de energía posible, lo que requiere que la superficie colectora esté siempre perpendicular a los rayos solares. Por lo tanto, una captación óptima solo se logra si la superficie cuenta con un mecanismo de seguimiento del Sol.

Un seguidor solar es un mecanismo autónomo capaz de seguir el movimiento aparente del Sol durante el día, su finalidad es la de posicionar dispositivos de captación de radiación solar de manera perpendicular a los rayos solares con el objetivo de aumentar su eficiencia de conversión de energía solar en energía eléctrica y/o térmica. Los seguidores solares se clasifican como pasivos (carecen de control electrónico) y activos (por control electrónico) que a su vez se clasifican de acuerdo con su rango de movimiento (un eje y dos ejes) y a su algoritmo de seguimiento (punto luminoso y programación astronómica). El seguidor solar pasivo, básicamente cambia de posición basado en la diferencia de presiones de un gas, regularmente freón, generado por el calor transmitido por el Sol. La ventaja de este sistema de control es que no requiere de electricidad y es menos frágil. Sin embargo, la precisión es baja [2].

El seguidor de mono eje, en el que la rotación de la superficie de captación se hace sobre un solo eje, este puede ser horizontal, vertical u oblicuo. La limitación de este tipo de seguidor consiste en que no puede realizar un seguimiento completo del sol ya que solo puede seguir el acimut o la inclinación solar, pero no ambos. Escobar y colaboradores [3] implementaron un seguidor solar de un eje, usaron dos celdas fotovoltaicas dispuestas de tal forma que los voltajes fueran iguales cuando los rayos luminosos incidieran perpendicularmente sobre la superficie colectora y definieron un sentido de giro cuando el valor de los sensores fuera diferente. Este tipo de seguimiento representa un grado mínimo de complejidad y su costo es menor en comparación con otros tipos de seguidores.

El seguidor de dos ejes, que cuenta con dos grados de libertad y realiza un seguimiento total del Sol, tanto en inclinación como en azimut, aunque el rendimiento de la instalación puede ser superior en comparación con los de un solo eje, el de dos ejes es más costoso [3]. Machado y colaboradores [4], desarrollaron e implementaron un seguidor solar a dos ejes por punto luminoso. Explicaron que en este tipo de seguidores el algoritmo de seguimiento es más sencillo, pero presentan poca fiabilidad

ya que en días nublados el sistema se encuentra estático y deberá alcanzar la orientación correcta lo más rápido posible cuando el Sol vuelva a estar despejado. El seguidor con programación astronómica presenta una total independencia de las condiciones climáticas ya que su algoritmo no requiere de sensores que indiquen cual es el punto más luminoso. El seguimiento en este caso depende únicamente de una serie de ecuaciones que predicen la ubicación del Sol en cualquier momento. Aunque este tipo de seguidor resulta ser de gran precisión, la implementación del algoritmo representa un alto grado de complejidad debido a que es necesario la instrumentación del seguidor solar debido a que dichos algoritmos necesitan estar direccionados hacia una coordenada específica, posición geográfica, fecha y hora, inclinación, entre otros. Además, generalmente estos programas requieren de una buena capacidad de procesamiento por parte del controlador. Mirdanies describe el uso de un algoritmo astronómico programado en lenguaje C para dos grados de libertad del mecanismo de seguimiento solar, el sistema no usa ningún sensor por lo que es más económico y se le puede aplicar en cualquier lugar [5]. De la Cruz en [6] propuso un sistema de seguimiento solar astronómico con una ley adaptable. El control tiene la capacidad de adaptarse a los cambios de la cantidad de horas solares durante el año y a la vez corrige el error de seguimiento, en este proyecto solo se presentaron datos simulados, pero no se llegó a la implementación. Sánchez y Martell en [7] cuantificaron en un 56 % la ventaja en la generación fotovoltaica en la implementación de un seguimiento solar acimutal con respecto a la generación en una orientación fija en la ciudad de Aguascalientes, Aguascalientes México.

El sector industrial ha adoptado múltiples tecnologías de energía solar de concentración (CSP, por sus siglas en inglés) para aprovechar el calor solar, como colectores cilindro parabólicos, sistemas de lentes Fresnel, receptores centrales y sistemas de disco parabólico. Por otro lado, la tecnología de concentración fotovoltaica (CPV, por sus siglas en inglés) ha logrado avances significativos en la generación de electricidad. Esta tecnología combina componentes ópticos de bajo costo con celdas solares de múltiple unión para lograr mayores eficiencias [8]. Los modelos híbridos, también conocidos como sistemas térmicos fotovoltaicos concentrados (CPVT, por sus siglas en inglés), pueden producir calor y electricidad simultáneamente, lo que aumenta la eficiencia general de la conversión de energía solar [9]. Esto también reduce la temperatura de funcionamiento de las celdas fotovoltaicas, extendiendo así su vida útil. Como resultado, los sistemas CPVT tienen un rendimiento superior en comparación con los sistemas CSP o CPV separados [10]-[12]. Estos sistemas utilizan el calor generado por las celdas fotovoltaicas para una variedad de propósitos, como generar agua caliente para uso doméstico, calentar o enfriar espacios, teñir telas, secar y desalinizar [13]-[15].

Para mejorar el rendimiento de los sistemas CSP, CPV y CPVT es necesario considerar el empleo de un sistema de seguimiento solar de acuerdo a sus características. Sharaf y Orhan [9] realizaron una revisión exhaustiva del diseño y los componentes que conforman los CPVT; concluyeron que el sistema de seguimiento solar debe contar con la precisión adecuada de acuerdo al factor de concentración solar requerido. En el caso de sistemas CPVT con ópticas de enfoque lineal (baja y media concentración), un sistema de seguimiento solar de un eje será el adecuado, mientras que para los sistemas de óptica de enfoque puntual (alta y ultra alta concentración) será indispensable el empleo de un sistema de seguimiento solar de dos ejes. De otra forma, el sistema obtendría elevadas pérdidas ópticas debido a la inadecuada focalización de la radiación solar sobre su receptor y por ende bajo rendimiento a pesar de tener buena calidad en otros aspectos de diseño antes mencionados.

Los sistemas CPVT utilizan una configuración óptica avanzada para concentrar la luz solar en una superficie pequeña, precisamente donde se colocan una o varias celdas fotovoltaicas. Mediante este proceso, una cantidad significativa de la radiación incidente se convierte en electricidad, mientras que la parte restante se transforma en calor. Un sistema de refrigeración extrae el calor generado para evitar daños a la celda solar, que se puede clasificar en dos grupos: pasivo y activo. Por un lado, en sistemas de baja concentración, un sistema de enfriamiento pasivo que utiliza convección natural es adecuado. Un sistema de este tipo no requiere energía adicional para enfriar las celdas fotovoltaicas. Sin embargo, el calor disipado normalmente no se aprovecha. Por otro lado, los sistemas

de enfriamiento activo se utilizan generalmente en sistemas de alta temperatura con altas tasas de concentración [16]. Estos sistemas utilizan la convección forzada como método de transferencia de calor mediante la circulación de aire [17], agua [18], aceites [19], sales o nanofluidos [20] debajo de la celda para disminuir su temperatura y mejorar su eficiencia eléctrica. El sistema de refrigeración activo debe ser sencillo, fiable y capaz de soportar la luz solar concentrada. Esto tiene en cuenta la geometría del elemento óptico, las dimensiones de la celda, los requisitos de temperatura de la celda y las condiciones climáticas de la región [15]. Se ha descubierto que diversas técnicas de enfriamiento, como técnicas de impacto de chorro, microcanales, división espectral y los métodos de enfriamiento combinados, son efectivos para mantener la temperatura de los sistemas CPVT independientemente de las condiciones climáticas, sin embargo, estos métodos son costosos de implementar [21].

Algunas de las características deseables para el fluido de trabajo en sistemas CPV incluyen bajo punto de fusión, alto punto de ebullición, estabilidad térmica, baja corrosión con aleaciones metálicas, baja viscosidad, alta conductividad térmica, alta capacidad calorífica para el almacenamiento de energía y bajo costo [22]. El agua es uno de los fluidos más utilizados en estos sistemas debido a su eficiencia térmica, accesibilidad y bajo costo. Sin embargo, es fundamental tener en cuenta que las condiciones de funcionamiento limitan estos sistemas, ya que el agua puede congelarse a bajas temperaturas. Herez y colaboradores [14] realizaron una investigación detallada de los sistemas PVT y CPVT que utilizaban agua o aire como fluido de trabajo. Los autores concluyeron que los sistemas a base de agua tenían mayores eficiencias termoeléctricas en comparación a los que utilizaban aire debido a sus propiedades térmicas. Según un estudio reciente de Izadi y Assad [23], se ha sugerido que agregar nanopartículas sólidas a fluidos básicos, como el agua puede aumentar su conductividad térmica y capacidad calorífica. Esta combinación se llama nanofluido. Las nanopartículas utilizadas para este propósito suelen ser metales (como Al, Cu, Ag, Au, Fe), óxidos (como Al_2O_3 , CuO, TiO_2) o carbono, mientras que el fluido base suele ser un líquido como agua, etilenglicol o aceite. En comparación con otros fluidos, los nanofluidos son una excelente opción para aplicaciones solares debido a su alto coeficiente de absorción térmica y a la prevención de obstrucción de bombas y tuberías [24]. La utilización de esta tecnología tiene un impacto notable en el rendimiento de refrigeración y el funcionamiento térmico en los sistemas CPV [21]. Sin embargo, debido a la inconsistencia de trabajos experimentales entre los diferentes estudios, las débiles propiedades de suspensión, la falta de teorías, modelos y altos costos, no ha sido factible expandir su aplicación a la escala comercial [23].

En el diseño de sistemas CPVT, es importante considerar varios factores, como seleccionar el colector térmico, el absorbente y el fluido de trabajo adecuados en función de la temperatura y la aplicación deseadas [14], [25]. Además, es crucial establecer el factor de concentración deseado para seleccionar el tipo de celdas fotovoltaicas y la tecnología de concentración. Los sistemas CPVT se clasifican según su relación de concentración, que incluye concentración baja (10 soles), media (10-100 soles), alta (>100 soles) y ultra (>1000 soles) [12]. La generación de energía eléctrica-térmica depende de varios factores, como el diseño del sistema, el método de extracción de calor, la irradiancia, la temperatura ambiente, la velocidad del viento, la temperatura del fluido circulante y el caudal [13], [26]. Recientemente, se han desarrollado varios tipos, tamaños y componentes de sistemas CPVT. Las configuraciones más utilizadas incluyen los sistemas de colector parabólico compuesto (CPC), Fresnel lineal y colector cilindroparabólico (PTC) [14].

En un estudio realizado por Jaaz y colaboradores [27], se analizó el desempeño de un sistema térmico fotovoltaico. Los investigadores compararon el rendimiento del sistema con y sin CPC. El experimento utilizó un módulo solar de silicio policristalino con enfriamiento por impacto de chorro. Los resultados del estudio indicaron que el uso de un CPC mejoró la eficiencia eléctrica del sistema en un 7%. La técnica de enfriamiento utilizada mejoró la producción de energía en un 36% con CPC y 20% sin CPC. De manera similar, Khalid y colaboradores [28] desarrollaron dos sistemas CPC de baja concentración en estado casi estacionario para su empleo en aplicaciones domésticas y de cogeneración térmica-eléctrica en edificios. El primero fue un CPC truncado en la posición

más baja, el segundo fue truncado en la posición más alta; ambos se compararon con un CPC sin truncamiento todos con una relación de concentración de 2. Usando software de trazado de rayos Monte Carlo, los autores evaluaron el Índice de no uniformidad en el flujo solar para cada sistema. Los resultados revelaron que los diseños truncados lograron una eficiencia óptica del 98 %, mientras que el CPC no truncado logró el 95 % de eficiencia. Normalmente los CPC suelen tener una relación de concentración más baja en comparación con otros sistemas como los PTC, Fresnel o disco parabólico. Esto conduce a una menor temperatura y eficiencia fotovoltaica. Además, debido a su menor capacidad de concentración, es posible que los sistemas CPC no alcancen la temperatura requerida para ciertas aplicaciones.

Diversos estudios en la literatura han informado sobre sistemas CPVT basados en PTC. Sin embargo, debido a su concentración lineal, estos sistemas híbridos tienen a alcanzar niveles de temperatura más bajos que los sistemas de enfoque puntual. Además, el uso de celdas de alta concentración no es rentable. El prototipo CPVT lineal diseñado por Karathanassis y colaboradores [29] utilizó un sistema PTC y celdas solares monocristalinas en tres diseños diferentes, con anchos de 40 mm y 60 mm. Cada configuración constaba de 10 celdas conectadas en serie para formar un receptor fotovoltaico de 0.5 m de largo. Además, emplearon dos tipos de disipadores de calor de microcanales (uno con ancho constante y otro con ancho variable escalonado), ambos utilizando agua como fluido de trabajo. Se evaluó el rendimiento del sistema combinando tres variaciones del receptor con el disipador de calor. El sistema logró un rendimiento global del 50 %, con un 44 % de eficiencia térmica y un 6 % de eficiencia eléctrica, independientemente del tipo de disipador de calor empleado. De manera similar, Li y colaboradores [30] realizaron un estudio comparando el rendimiento de celdas fotovoltaicas hechas de arseniuro de galio (GaAs) y silicio en un sistema CPVT basado en un sistema PTC. La matriz de celdas de silicio se dividió en cuatro módulos, cada uno con 96 celdas, mientras que la matriz de celdas de GaAs se dividió en cuatro módulos, cada uno con 40 celdas conectadas en serie. Los resultados mostraron que, con celdas de GaAs, el sistema alcanzó una eficiencia global del 59.72 %, con una eficiencia térmica del 49.8 % y una eficiencia eléctrica del 9.88 %. En cambio, con celdas de silicio, la eficiencia térmica fue del 42.4 % y la eficiencia eléctrica del 7.51 %. El estudio concluyó que las celdas de GaAs superaban a las de silicio en este sistema específico. Otro trabajo destacado es el de Liew [31], quien presentó un estudio detallado sobre un sistema CPVT híbrido basado en un PTC. Este sistema consta de tres elementos principales: celdas fotovoltaicas, el receptor térmico y el filtro selectivo de longitud de onda adherido a la superficie de las celdas. La función del filtro es separar el espectro solar útil, dirigirlo hacia las celdas para su absorción y mejorar así su eficiencia. Para analizar el rendimiento del sistema, se consideraron parámetros como la irradiancia solar, la temperatura ambiente, el flujo másico y la temperatura del fluido de entrada. El estudio concluyó que la temperatura ambiente y la irradiancia solar están directamente relacionadas con la eficiencia del PTC. La eficiencia híbrida total alcanzada fue del 71.5 %.

Los sistemas CPVT que utilizan lentes de Fresnel tienen varias ventajas. Pueden alcanzar altos niveles de concentración solar, permitiendo el uso de celdas de alta concentración. Pueden ser más rentables y más fáciles de fabricar en comparación con otras tecnologías. Además, las lentes de Fresnel, al ser ligeras y delgadas, permiten una estructura de soporte más sencilla, y su diseño plano reduce los costos de mantenimiento. Además, requieren menos espacio para su instalación debido a su diseño compacto y eficiente. En este contexto, Kong y sus colaboradores [32] desarrollaron un sistema CPVT estático de enfoque puntual de baja concentración. El concentrador se diseñó utilizando lentes de Fresnel y dos espejos planos. El módulo solar consta de 18 celdas fotovoltaicas conectadas en serie, las cuales están adheridas a un receptor de aluminio que está aislado en su parte posterior. Se utilizó agua como fluido de transferencia de calor. El sistema logró alcanzar eficiencias eléctrica y térmica máximas del 10 % y 56 %, respectivamente.

De forma similar, en un estudio de Xu y colaboradores en [33], realizaron la modelación y simulación eléctrica-térmica de un módulo CPVT compuesto por 15 lentes de Fresnel de enfoque

puntual, cada una con celdas solares de triple unión y su respectivo elemento óptico secundario (SOE, por sus siglas en inglés) conectadas en serie. Por la parte inferior del módulo se colocaron tubos por los cuales circula agua para eliminar el calor. Los modelos se aplicaron para analizar y predecir el rendimiento del módulo. Los resultados obtenidos en la simulación se compararon con los resultados experimentales logrando gran similitud. El sistema obtuvo eficiencias eléctrica y térmica del 28 % y 60 % respectivamente. Del mismo modo Chen y colaboradores en [34] desarrollaron un CPVT empleando lentes de Fresnel en combinación con un sistema de destilación de membrana multiefecto al vacío. El sistema produce electricidad y agua dulce a partir de la desalinización del agua de mar. El sistema logró una eficiencia eléctrica y térmica del 25 % y 48 % respectivamente convirtiendo aproximadamente el 70 % de la irradiancia solar en energía útil. Finalmente, Variava y sus colaboradores en [35] analizaron el rendimiento de un CPVT de enfoque puntual tipo Fresnel utilizando cuatro tipos de absorbentes térmicos: canal rectangular, trapezoidal, panel hexagonal y patrón chevron. Se llevó a cabo el modelado matemático y la simulación de cada uno mediante análisis de elementos finitos, con el objetivo de evaluar su rendimiento y el impacto de cambios en la velocidad del fluido y el caudal. Se utilizó agua como fluido de transferencia de calor y se consideró un módulo fotovoltaico con celdas de GaAs. El estudio encontró que con un caudal de 30 kg/h, la eficiencia global del sistema fue del 49.3 % para el absorbente de canal rectangular, del 41.2 % para el absorbente de panel hexagonal absorbente, 41.1 % para el absorbente con patrón de chevrón y 40.9 % para el para el absorbente de canal trapezoidal. El estudio concluyó que la mayor superficie de contacto del absorbente de canal rectangular con el fluido contribuyó al aumento en la tasa de transferencia de calor, lo que condujo a una mejora general de la eficiencia total del sistema.

Pocos trabajos en la literatura han desarrollado sistemas de concentración fotovoltaica de disco parabólico (PD-CPVT), principalmente debido a su complejidad estructural, altos costos, requisitos y falta de madurez tecnológica [9], [36]. Sin embargo, algunos trabajos de simulación analizan el rendimiento de esta tecnología. En su investigación, Buonomano y colaboradores [37] investigaron el rendimiento termodinámico de un sistema PD-CPVT que utilizaba un sistema de seguimiento de dos ejes. Desarrollaron un modelo matemático basado en balances de energía de dimensión cero de los volúmenes de control del sistema. Los resultados mostraron que la eficiencia eléctrica varió entre el 19 % y el 25 %, mientras que la eficiencia óptica térmica fue ligeramente inferior al 60 %. En un estudio relacionado, Renno y Petito [38] propusieron un modelo teórico de un sistema PD-CPVT para uso doméstico. La simulación utilizó el software Matlab® y tuvo en cuenta la óptica del concentrador, las celdas de triple unión y un sistema de seguimiento solar de dos ejes. El estudio tuvo como objetivo desarrollar una configuración óptima del sistema y evaluar su viabilidad en términos de energía y economía. Helmers y Kramer en [39] presentaron un modelo que permite predecir el desempeño de sistemas térmicos fotovoltaicos (PVT) y CPVT basándose en consideraciones de balance energético, transferencia de calor y temperatura del absorbente. Se utilizó la regresión multilínea para derivar parametrizaciones lineales de la energía eléctrica-térmica. La precisión del modelo se confirmó mediante los datos de medición obtenidos de un PD-CPVT con un factor de concentración de 522 soles, celdas de arseniuro de galio y un intercambiador de calor de microcanales. Como resultado se logró una eficiencia eléctrica de 19.9 %. De manera similar Sharaf y Orhan en [40] analizaron dos configuraciones térmicas de un sistema PD-CPVT en serie y paralelo. El estudio consideró receptores compuestos por celdas fotovoltaicas de múltiple unión, generadores termoeléctricos segmentados y extractores de calor de mini canales. El análisis se realizó desde las perspectivas óptica, termodinámica y exergoeconómica. Los resultados mostraron que la configuración térmica en serie era la más efectiva en la producción de energía eléctrica, mientras que la configuración térmica en paralelo era la más adecuada para aplicaciones de alta temperatura.

El desarrollo experimental de los sistemas PD-CPVT se encuentra todavía en sus primeras etapas. Sin embargo, se han reportado algunos trabajos experimentales en la literatura. Kribus y colaboradores [41] introdujeron un PD-CPVT en miniatura que emplea celdas de múltiple unión enfriadas por una placa en su parte posterior. El sistema demostró mayor eficiencia térmica y eléctrica que un

sistema de placa plana. En concreto, la eficiencia eléctrica fue del 12 %, mientras que la eficiencia térmica fue del 48 %. En su estudio, Chayet y colaboradores [42] desarrollaron un sistema de espejo parabólico rentable que empleaba 1200 espejos planos, cada uno con un área de superficie de 100 cm². Los autores emplearon una serie de celdas de triple unión como receptor e integraron un intercambiador de calor de microcanales para enfriarlos, cubriendo un área de 156 cm². El sistema logró una eficiencia eléctrica del 21 % y una eficiencia térmica del 50 %. El estudio realizado por Paredes y colaboradores [43] introdujeron un prototipo de un sistema PD-CPVT. El sistema tenía un área de recolección de 4.3 metros cuadrados y estaba compuesto por una matriz de 5x5 de celdas de triple unión. El sistema utilizaba un mecanismo activo de refrigeración líquida basado en microcanales. El prototipo logró una concentración de 955 soles y una eficiencia eléctrica global del 32.3 %. De manera similar, Schmitz y colaboradores [44] desarrollaron y caracterizaron un sistema PD-CPVT multifocal. El sistema constaba de seis receptores, cada uno estaba formado por 36 celdas de triple unión que estaban conectadas en una configuración en serie paralelo. Se utilizaron chips de refrigeración de microcanales de alto rendimiento para enfriar las celdas. Según los resultados experimentales cada receptor alcanzó un flujo de radiación promedio de 1374 soles. La eficiencia eléctrica reportada fue del 28.5 % en modo fotovoltaico y del 26.6 % en modo cogeneración.

En la literatura se han reportado diferentes tecnologías de concentración en el diseño de sistemas CPVT, cada una con sus ventajas y desventajas. Un inconveniente notable de los sistemas CPC es que su baja concentración hace que no sea práctico utilizar celdas solares de concentración. Los sistemas CPVT que utilizan lentes Fresnel requieren una limpieza más frecuente y son más susceptibles a la degradación con el tiempo. Además, la transmitancia de la lente Fresnel suele ser menor que la reflectividad de los materiales reflectantes. Por el contrario, los sistemas PD-CPVT tienen una ventaja sobre los sistemas de lentes de Fresnel de enfoque puntual debido a menores requisitos de mantenimiento, menores pérdidas ópticas y mayores concentraciones. Sin embargo, debido a su complejidad, estos sistemas se encuentran actualmente en las primeras etapas de investigación, siendo necesario estudiar con más detalle su diseño, fabricación y comportamiento. Finalmente, los sistemas CPVT con PTC no alcanzan concentraciones elevadas debido a su naturaleza de concentración lineal.

En este trabajo de tesis se presenta el desarrollo detallado de un prototipo de PD-CPVT de alta concentración que sigue una metodología definida para cumplir con criterios específicos con respecto al rendimiento óptico. El desarrollo completo y la validación experimental incluye el diseño, construcción y caracterización eléctrica de un prototipo de PD-CPVT de alta concentración. Se analiza la viabilidad técnica de utilizar la tecnología de disco parabólico en el desarrollo de sistemas CPVT. Se detallan los materiales de los elementos principales del sistema propuesto: las celdas fotovoltaicas, el elemento óptico secundario y el colector de disco parabólico. Además, se presenta el diseño y análisis óptico y se detalla el diseño y construcción del receptor de las celdas fotovoltaicas, la estructura de soporte y el sistema de enfriamiento activo. Así mismo, se implementa un algoritmo de control proporcional-integral con anti-windup en los motores del seguidor solar con el objetivo de disminuir el error de seguimiento solar y estudiar de forma experimental su impacto en la eficiencia eléctrica del sistema.

1.2. Justificación

La situación geográfica de México es favorable para el aprovechamiento de la energía solar, ya que tiene una de las más altas radiaciones del planeta [45]. La irradiación del Sol en Aguascalientes es una de las más altas en México y, por tanto, el estado tiene un gran potencial en generación de energía solar. Aguascalientes es el quinto estado a nivel nacional que recibe más horas de sol pico (HSP), lo cual lo convierte en un lugar idóneo para el desarrollo de planes de energías alternativas. Mientras las naciones europeas con más potencia solar apenas alcanzan las 4 horas solar pico al

día; Aguascalientes registra 6 horas y 27 minutos de horas solar pico de acuerdo con datos del SIGER (Sistema de información geográfica de las energías renovables). Sin embargo, pese al gran potencial que se tiene no existe un aprovechamiento alto de este recurso en la producción de energía eléctrica. Por otro lado, actualmente existe una gran demanda de calor en la industria a nivel global. Según datos de ANES (Asociación nacional de energía solar) el 74 % de las industrias utilizan energía térmica y el 26 % electricidad. Para la generación de calor el 90 % usan carbón, gas natural y petróleo y sólo el 9 % energías renovables (ver Figura 1.1). Es por esto que el uso de la energía solar en forma de electricidad y calor, representa grandes oportunidades de reducción de costos y emisiones en los principales sectores que demandan energía como el sector eléctrico, industrial, residencial y de servicios.

Con el desarrollo del sistema PD-CPVT se pretende impactar en la generación de calor y electricidad buscando contribuir a la generación distribuida de energía renovable a pequeña escala, de acuerdo a la nueva ley para el aprovechamiento de energías renovables que tiene por objeto regular el aprovechamiento de fuentes de energía renovables y las tecnologías limpias para generar electricidad con fines distintos a la prestación del servicio público de energía eléctrica, así como establecer la estrategia nacional y los instrumentos para el financiamiento de la transición energética. Se pretende impactar en el gasto en energía del consumidor de tarifas domésticas de alto consumo y de tarifas comerciales conectadas en baja tensión.

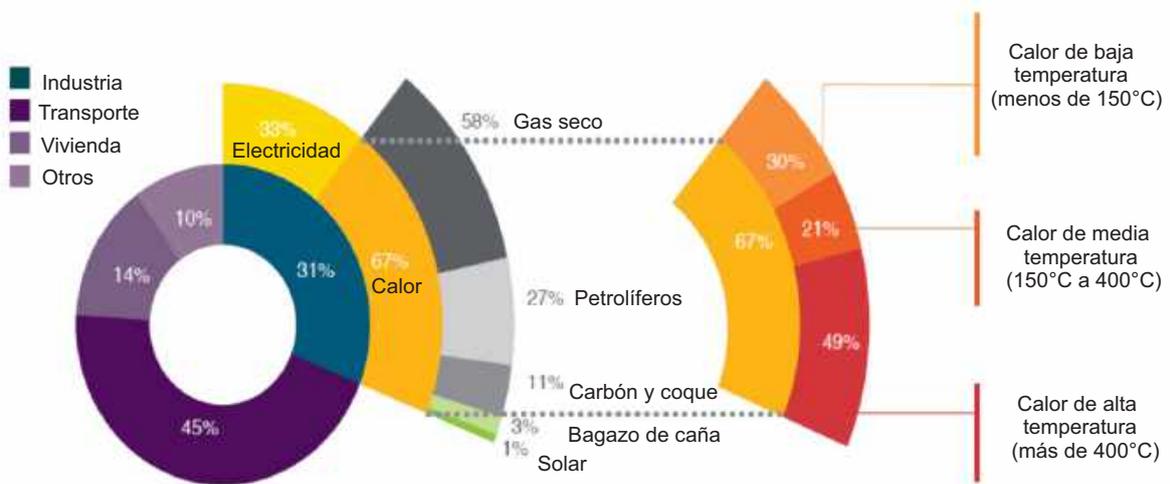


Figura 1.1: Demanda de calor en la industria a nivel global [46].

1.3. Planteamiento del problema

En los últimos años, la energía solar térmica fotovoltaica ha experimentado un crecimiento exponencial a nivel mundial, esto debido a la necesidad de enfrentar los retos actuales en materia de generación de energía. En México, esta tecnología hasta ahora ha sido poco aprovechada debido principalmente a la escasa oferta de tecnología certificada, la falta de conocimiento sobre este tipo de sistemas y su elevado costo de fabricación y venta. Sin embargo, es importante destacar que mediante su empleo se pueden lograr altas eficiencias de conversión de energía eléctrica-térmica, sobre todo mediante los sistemas de concentración de enfoque puntual como los PD-CPVT. Hay varios factores que se deben considerar para alcanzar un nivel de eficiencia óptimo en este tipo de sistemas como: su diseño óptico y mecánico, calidad de los materiales de construcción, tipo de celdas fotovoltaicas utilizadas, efectividad del sistema de enfriamiento y la precisión del sistema de seguimiento solar. En el caso del PD-CPVT que se plantea en este trabajo la optimización del seguimiento solar representa un reto importante ya que se puede mejorar la eficiencia general del sistema de concentración solar sin necesidad de realizar modificaciones a su estructura reduciendo costos adicionales.

1.4. Hipótesis

El diseño y construcción de un sistema PD-CPVT en conjunto con el empleo de un algoritmo de control robusto en el sistema de seguimiento solar permitirá la generación de calor y electricidad mediante el aprovechamiento de la energía solar con una eficiencia eléctrica superior al 30 %, contribuyendo significativamente al avance en la madurez tecnológica de los sistemas CPVT, reduciendo la brecha entre prototipos y productos comerciales.

1.5. Objetivo general

Diseñar, construir y evaluar un sistema de concentración solar híbrido de disco parabólico con una eficiencia eléctrica superior al 30 %, capaz de realizar el seguimiento solar de dos ejes con un error de seguimiento $\leq 0.1^\circ$ mediante un algoritmo de control robusto ante perturbaciones mecánicas y climatológicas, de bajo consumo eléctrico y con señales de control suaves para evitar el desgaste excesivo de actuadores.

1.5.1. Objetivos específicos

1. Diseño y construcción de un sistema de seguimiento solar de dos ejes.
2. Implementación de un algoritmo de control en lazo cerrado para el sistema de seguimiento solar de dos ejes instalado en el Centro de Investigaciones en Óptica, Aguascalientes.
3. Simulación opto-energética del sistema de concentración.
4. Diseño y construcción de un sistema de concentración de disco parabólico.
5. Integración del receptor al sistema de concentración, instrumentación y montaje.
6. Caracterización eléctrica del sistema desarrollado.
7. Evaluación técnica del sistema de concentración con seguimiento solar.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Sistemas de concentración fotovoltaicos

Un sistema de concentración solar fotovoltaico consta de una estructura mecánica con una configuración óptica (lentes o espejos) con el objetivo de concentrar la radiación solar de un área grande en un área pequeña, en la cual se localiza la celda multi-unión; asimismo, típicamente los concentradores están dotados de un sistema de seguimiento solar y un sistema de control para mejorar su rendimiento. Las celdas multi-unión son capaces de transformar la energía solar recibida en energía eléctrica, sin embargo, no toda la radiación recibida es aprovechada, por lo que existe disipación en forma de calor; el aprovechamiento del calor para un proceso posterior convierte al sistema en un concentrador solar térmico-fotovoltaico. Actualmente, existen diversas estrategias y materiales semiconductores para fabricar celdas fotovoltaicas y pueden ser clasificadas en dos grupos: Celdas convencionales y multi-unión. Las celdas convencionales están diseñadas para aprovechar tanto la radiación solar directa como la difusa. El costo comercial de estas celdas es bajo; sin embargo, alcanzan una eficiencia menor en comparación a las multi-unión. Por otro lado, las celdas multi-unión están compuestas por varios materiales semiconductores que absorben diferentes rangos del espectro electromagnético con el objetivo de aumentar la eficiencia de conversión de energía solar en energía eléctrica (ver Figura 2.1). Además, con el empleo de lentes ópticos de concentración es posible concentrar la energía solar en una pequeña región donde se encuentra la celda fotovoltaica para alcanzar eficiencias récord de hasta el 46 % bajo condiciones controladas [47] y su eficiencia sigue creciendo continuamente.

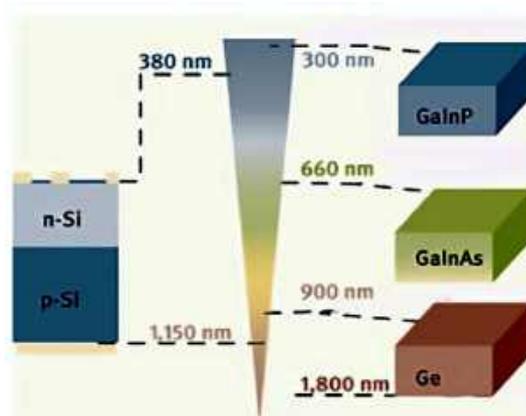


Figura 2.1: Comparación entre celda convencional y multi-unión [48].

Al grupo de celdas fotovoltaicas conectadas entre sí se le conoce como módulo fotovoltaico convencional. De la misma manera, el conjunto de celdas fotovoltaicas de concentración conforma un módulo fotovoltaico de concentración (MFC). La principal diferencia de estos módulos es su eficiencia de conversión. Un módulo solar convencional comercial tiene una eficiencia aproximada del 20 %. Por otro lado, un MFC puede alcanzar un nivel de concentración mayor a 1000 soles, esto significa que la radiación solar incidente en la celda es 1000 veces mayor que la radiación solar directa sin el uso del lente de Fresnel. Dichos módulos alcanzan una eficiencia aproximada del 30 % en módulos comerciales y 38.9 % bajo condiciones controladas [49]. Es importante mencionar que generalmente a mayor concentración la eficiencia del MFC también aumenta; sin embargo, aumenta la precisión requerida del sistema de seguimiento. Además, el terreno necesario para generar la misma energía es menor con un MFC que el requerido por un módulo convencional. Los elementos ópticos que se suelen utilizar para concentrar la energía incidente sobre la celda pueden ser tanto reflexivas (espejos) como refractivas (lentes de Fresnel), a estos elementos se les denomina primario. Por lo general se suele dotar adicionalmente de un segundo elemento óptico (secundario) que se coloca próximo a la celda y cuyo objetivo principal es aumentar la aceptación para asegurar una distribución uniforme de la energía incidente en la celda. El ángulo de aceptación representa el ángulo de desviación entre los rayos solares y la normal de los lentes de Fresnel de un MFC donde la eficiencia del módulo se reduce a 90 %, normalmente en el orden de minutos de arco (ver Figura 2.2). Generalmente el ángulo de aceptación (θ) de un MFC es inversamente proporcional al nivel de concentración solar, esto es, a mayor concentración solar el ángulo de aceptación de un MFC disminuye. Sin embargo, este ángulo también depende del diseño óptico de los lentes de concentración [50].

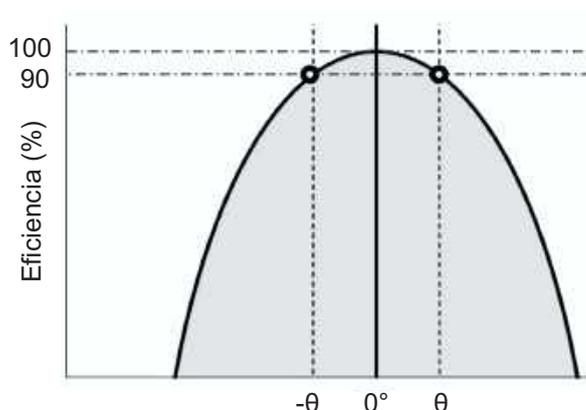


Figura 2.2: Relación ángulo de aceptación-eficiencia de un MFC [50].

Para mantener los MFC con un ángulo de desviación por debajo del ángulo de aceptación y asegurar una eficiencia superior al 90 % es necesario considerar dos problemas. El primero está relacionado con varios factores, incluyendo la instalación, montaje y rigidez del sistema de concentración. El segundo, corresponde a la precisión del sistema de seguimiento, que a su vez se relaciona con la calidad del sensor solar y a factores mecánicos incluyendo la fricción y el juego en la caja de engranes y el motor utilizados para impulsar al seguidor solar [51]. En la literatura se pueden clasificar los sistemas fotovoltaicos de concentración debido al nivel de soles que soportan [52]:

Sistema fotovoltaico de baja concentración (LCPV): Los PV de baja concentración son sistemas con una concentración solar de 2-100 soles. Normalmente se utilizan celdas solares de silicio convencionales, en estas concentraciones, el flujo de calor es lo suficientemente bajo como para que

las celdas no tengan que enfriarse activamente.

Sistema fotovoltaico de media concentración (MCPV): Son sistemas con concentración de 100 a 300 soles, requieren seguimiento solar en dos ejes y un sistema de enfriamiento, lo que los hace más complejos.

Sistema fotovoltaico de alta concentración (HCPV): Emplean ópticas de concentración que consisten en reflectores de platos o lentes de Fresnel que concentran la luz solar a intensidades de más de 100 soles. Las celdas solares requieren disipadores de calor de alta capacidad para evitar la destrucción térmica y para gestionar el rendimiento eléctrico relacionado con la temperatura y las pérdidas de vida útil. Actualmente, las celdas solares multi-unión se prefieren a las celdas convencionales, ya que son más eficientes y tienen un coeficiente de temperatura más bajo (menos pérdida de eficiencia con un aumento de la temperatura).

2.2. Sistemas de energía termosolar de concentración

Los colectores solares son dispositivos que absorben la radiación solar y la convierten en calor que es transferido a un fluido (aire, agua o aceite) que circula a través del colector. Ese calor puede ser aprovechado para diferentes aplicaciones como: calentamiento de agua a nivel doméstico, sistemas de calefacción de espacios, procesos industriales que requieren agua a alta temperatura, entre otros. Básicamente, existen dos tipos de colectores solares: sistemas de baja temperatura (sin concentración) y sistemas de media y alta temperatura (con concentración). Los colectores sin concentración son estacionarios, es decir, están fijos de forma permanente y tienen la misma área para interceptar y absorber la radiación solar. Hay 3 tipos de colectores en esta categoría: colector de placa plana (FPC), CPC y colector de tubo evacuado (ETC) [53]. Con respecto a los colectores solares con concentración, también llamados sistemas de energía termosolar de concentración (CSP, por sus siglas en inglés), cuentan con un sistema de seguimiento solar y mediante el uso de espejos o lentes interceptan y concentran la radiación solar en un área de recepción más pequeña, aumentando así el flujo de radiación. En esta categoría se encuentran: PTC, colector de canal cilíndrico (CTC), reflector lineal de Fresnel (LFR), reflector de disco parabólico (PDR) y colector de campo de helióstatos (HFC) [53]. En la tabla 2.1 se presenta un resumen de la clasificación de los tipos de colectores solares de acuerdo a su tasa de concentración.

Tabla 2.1: Colectores solares ordenados de acuerdo a su concentración [53].

Movimiento	Tipo de colector	Tipo de absorbedor	Tasa de concentración	Rango de temperatura °C
Estacionario	FPC	Plano	1	30-80
	ETC	Plano	1	50-200
	CPC	Tubular	1-5	60-300
Seguimiento en un eje	CPC	Tubular	5-15	60-300
	LFR	Tubular	10-40	60-250
	CTC	Tubular	15-50	60-300
	PTC	Tubular	10-85	60-400
Seguimiento en dos ejes	PDR	Puntual	600-2000	100-1500
	HFC	Puntual	300-1500	150-2000

En la Figura 2.3 se muestran las diferentes topologías en sistemas CSP. A continuación se describe cada una de ellas [52]:

1. **Canal parabólico:** utiliza un espejo parabólico lineal que concentra los rayos solares en un tubo-receptor ubicado en la línea focal de la parábola reflectora para calentar algún fluido que circula por el interior del receptor.
2. **Fresnel:** existen dos tipos, el primero está compuesto por un lente especial fabricado comúnmente de algún polímero y diseñado para enfocar los rayos solares en un receptor puntual. El segundo es lineal, consiste en espejos planos que concentran la luz solar en un receptor longitudinal ubicado en la parte superior del sistema a lo largo de la estructura.
3. **Torre central:** consiste en un campo de helióstatos que concentran la radiación solar de manera puntual en la parte superior de una torre ubicada en el centro de dicha área, lo que provoca una alta concentración de radiación solar. este tipo de sistemas necesitan un seguimiento de doble eje.
4. **Disco parabólico:** con el uso de un espejo en forma de disco parabólico se concentra la energía solar hacia un punto focal en relación a las dimensiones de dicho disco. este tipo de sistemas necesitan un mecanismo de seguimiento de doble eje para seguir completamente el Sol respecto a su elevación y ángulo acimutal.

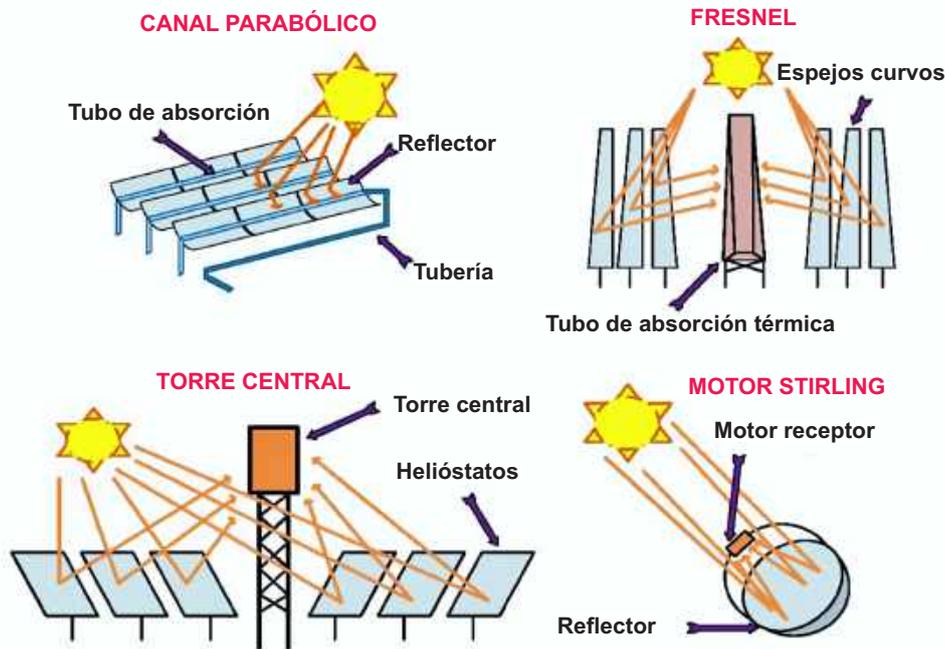


Figura 2.3: Sistemas de concentración solar [54].

Algunas ventajas que ofrecen los sistemas CSP con respecto a los colectores estacionarios son las siguientes: el fluido de trabajo puede alcanzar temperaturas más altas, por lo que alcanzan una mayor eficiencia térmica debido a la pequeña área de pérdida de calor en relación con el área del receptor. Las superficies reflectantes requieren menos material y son estructuralmente más simples que los FPC y por lo tanto, más económicos. Algunas desventajas son: los sistemas CSP aprovechan poca o ninguna radiación difusa, según la relación de concentración. Se requiere algún tipo de sistema de

seguimiento solar. Las superficies reflectantes solares pueden perder su reflectancia con el tiempo y pueden requerir una limpieza periódica y remodelación.

2.3. Sistemas de cogeneración de energía térmica-fotovoltaica

La combinación de los sistemas de energía solar es una tendencia que tiene como objetivo optimizar los beneficios de la energía solar. Los sistemas de cogeneración de energía térmica fotovoltaica combinan colectores solares térmicos y la energía solar fotovoltaica para permitir la generación simultánea de calor y electricidad. Los sistemas Fotovoltaicos Térmicos (PVT, por sus siglas en inglés) se han clasificado en función de varias características como: el tipo de celda fotovoltaica, colector térmico, fluido de trabajo, acristalamiento y absorbente térmico (ver Fig 2.4).

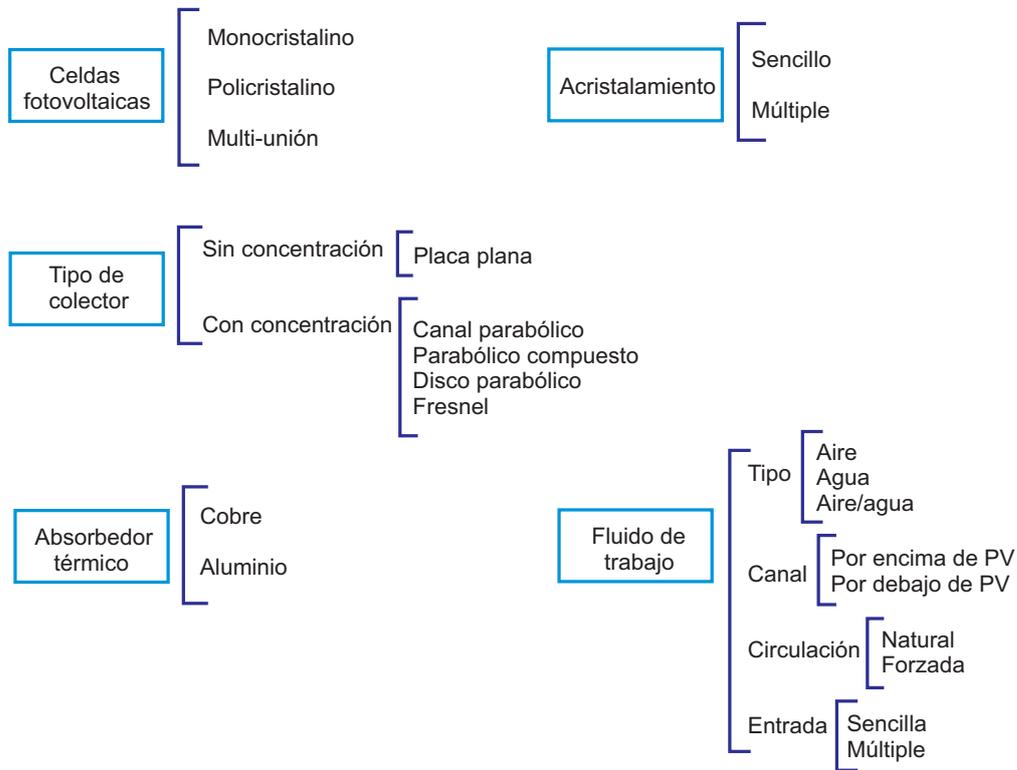


Figura 2.4: Sistemas de cogeneración de energía térmica fotovoltaica [14].

Celda fotovoltaica: Las celdas fotovoltaicas más utilizadas son el silicio monocristalino, silicio policristalino y celdas multi-unión. Las celdas fotovoltaicas multi-unión son las más utilizadas en sistemas con concentración.

Colector térmico: Se dividen en dos grupos, colectores sin concentración (tubos) y con concentración (canal parabólico, parabólico compuesto, disco parabólico y Fresnel). La selección del colector solar depende de la aplicación y de la temperatura requerida. Las topologías más utilizadas son los sistemas de canal parabólico y Fresnel.

Fluido de trabajo: se clasifican basándose en la circulación del fluido de trabajo (circulación natural o forzada), fluido de trabajo (agua, aire o agua/aire), ubicación (arriba o abajo del PV) y entrada del fluido (simple o múltiple). Se han obtenido mayores eficiencias eléctricas, térmicas y

totales en sistema PVT a base de agua.

Acristalamiento: Es un componente vital ya que protege los paneles de diversos impactos ambientales. Es fundamental para maximizar la energía térmica producida, aunque no es recomendable si se requiere una gran cantidad de energía eléctrica ya que dependiendo de su transmisividad puede impedir la absorción de un porcentaje de la radiación solar por parte de las celdas fotovoltaicas.

Absorbedor térmico: tiene un impacto vital en la eficiencia eléctrica del sistema PV. El absorbedor térmico se encuentra entre las celdas fotovoltaicas y fluido. Tiene un papel importante en la transferencia de calor de las celdas. El absorbedor térmico depende del tipo de colector utilizado. Los principales materiales para su construcción son el cobre y el aluminio.

En los sistemas CPVT, el calor generado en las celdas fotovoltaicas se recolecta para posteriormente ser utilizado en diversas aplicaciones como: la producción de agua caliente sanitaria, el calentamiento o refrigeración de espacios, teñir tejidos, secado y desalinización [13], [14]. La principal ventaja de estos sistemas radica en la generación de calor y electricidad en un mismo sistema, que aumentan la eficiencia de conversión total de la energía solar, la prolongación de la vida útil de las celdas fotovoltaicas al reducir su temperatura de trabajo y un menor costo de construcción e instalación que los sistemas CSP o CPV por separado [10]-[12].

Hay varios factores que deben tenerse en cuenta al diseñar un CPVT, como la selección adecuada del tipo de colector térmico, el fluido de trabajo y el absorbente térmico en función de la aplicación y la temperatura requerida [14], [25]. Así mismo, es de vital importancia conocer la relación de concentración deseada para elegir el tipo de celdas fotovoltaicas y el CSP adecuado. Los sistemas CPV se clasifican por categorías de concentración baja (10x), media (10-100x), alta (>100x) y ultra alta (>1000x) [12]. Cuanto mayor es la concentración solar, mayor es la temperatura de las celdas, por lo que también crece la necesidad de un sistema de disipación de calor.

2.3.1. Métodos de enfriamiento en sistemas térmicos fotovoltaicos

El aumento de la temperatura de los módulos fotovoltaicos reduce la eficiencia y destruye su estructura. Buscando solucionar este problema se emplean intercambiadores de calor para mantener una temperatura óptima y un flujo de calor uniforme en las celdas a lo largo del día. Hasta ahora se han desarrollado diferentes técnicas de enfriamiento en sistemas PVT, sin embargo, es importante elegir el sistema adecuado [21]. Los métodos de enfriamiento en se clasifican en: activos y pasivos.

Sistemas pasivos: Estas tecnologías eliminan el calor del módulo fotovoltaico utilizando convección natural. Se utilizan en sistemas de baja concentración y dependen en gran medida de las condiciones climáticas. Las ventajas de este tipo de sistemas es que no requieren electricidad, son de bajo costo, fácil manufactura y mantenimiento; por otro lado, tienen como desventaja la baja transferencia de calor y son lentos en términos de enfriamiento. Ejemplos de este tipo de tecnología se muestran en la Figura 2.5

Sistemas activos: Los sistemas activos operan mediante un ventilador o bomba. Estas tecnologías son mucho más eficientes, especialmente en zonas desérticas. Tienen una alta transferencia de calor y el potencial de disipar flujos de calor muy intensos por lo que son empleados en sistemas con altos índices de concentración. Sin embargo, presentan un alto costo inicial además del consumo eléctrico. Ejemplos de este tipo de sistemas se presentan en la Figura 2.6.

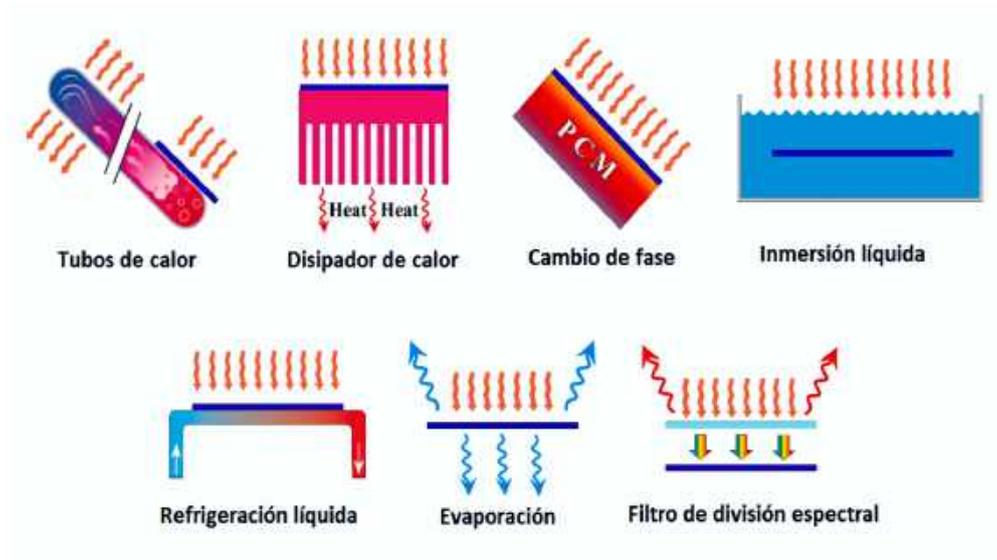


Figura 2.5: Enfriamiento pasivo [21].

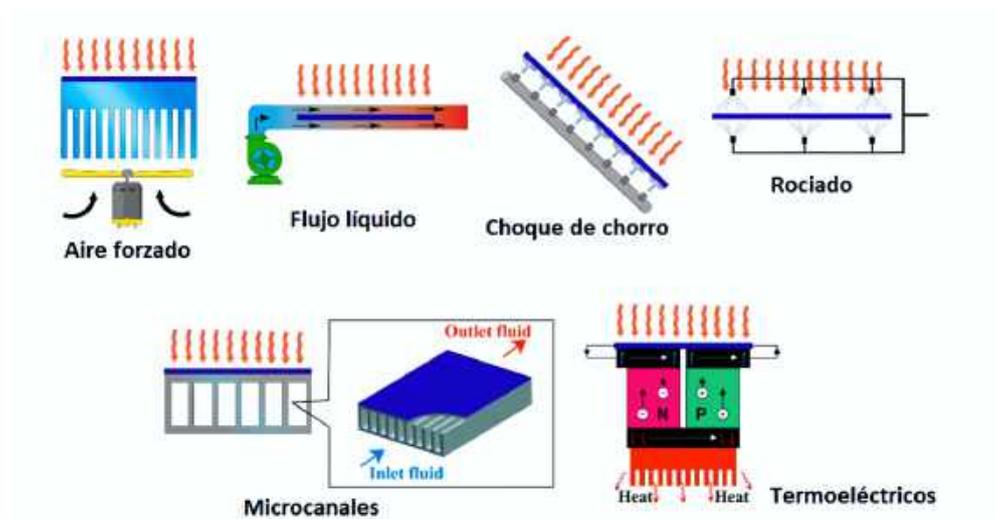


Figura 2.6: Enfriamiento activo [21].

Gharzi en [21] realizó una investigación detallada de los sistemas de enfriamiento concluyendo que la mayoría de los sistemas CPVT utilizan agua o aire como fluido de trabajo, siendo los sistemas basados en agua los que han obtenido mayores eficiencias termoeléctricas. Así mismo, las técnicas de impacto de chorro, división espectral y las técnicas combinadas han resultado las más eficientes independientemente de las condiciones meteorológicas.

2.4. Parámetros de una celda fotovoltaica

Una celda solar es una unión P-N con un contacto en la región P y otro en la región N que permiten la conexión con un circuito eléctrico. Por la atracción entre cargas positivas y negativas, los electrones libres de la región N se difunden en la región P, produciéndose la recombinación con los huecos más próximos a la región N. En la región N se crean iones positivos y en la región P iones negativos que no son libres para recombinarse. Esta distribución de cargas en la unión establece un campo eléctrico o barrera de potencial que impide el paso del resto de electrones de la región N a la región P, deteniendo la difusión y manteniendo separados a los portadores de carga de cada región. Cuando incide luz en la celda solar, se acumulan huecos en la región P y electrones en la región N. La acumulación de éstos produce una diferencia de potencial que es proporcional a la luz incidente. La diferencia de potencial se opone a la diferencia de potencial generada por la barrera de potencial de la unión P-N empujando los electrones a la región P y los huecos hacia la región N recombinando pares electrón-hueco. La diferencia de potencial alcanzada recibe el nombre de voltaje de circuito abierto (V_{oc}) (ver Figura 2.7a).

Al cortocircuitar una celda solar, uniendo las regiones N y P con un conductor con resistencia nula, los electrones de la región N se desplazan a través del conductor y se recombinan con los huecos de la zona P. La corriente que circulará por el conductor se mantendrá mientras exista luz incidiendo en la celda solar y es proporcional a dicha iluminación. Esta corriente recibe el nombre de corriente de corto circuito (I_{sc}) (ver Figura 2.7b).

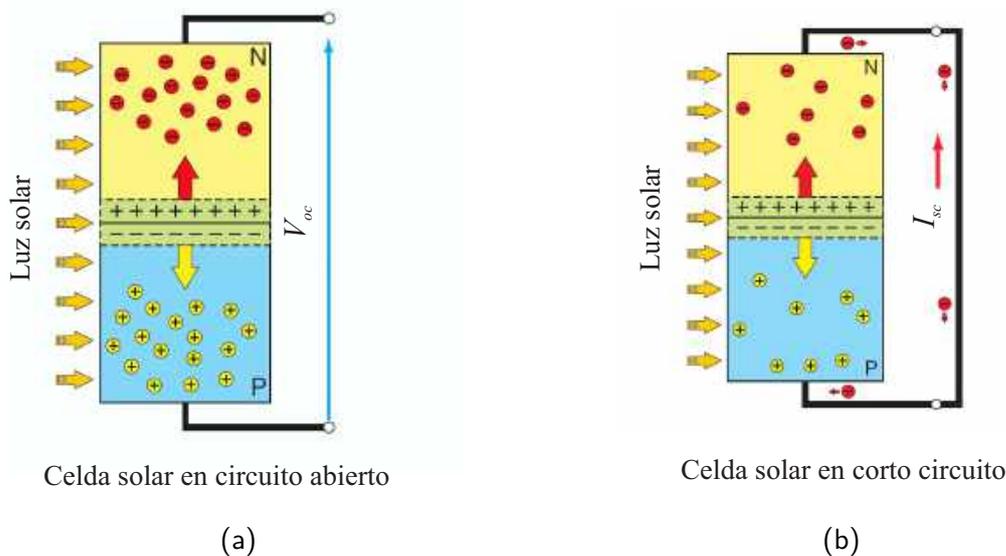


Figura 2.7: Representación de una celda solar en circuito abierto y corto circuito [55].

2.4.1. Eficiencia y curva I-V de una celda fotovoltaica

La curva de intensidad-voltaje o curva I-V es la curva característica de una celda fotovoltaica y representa los puntos de funcionamiento de corriente y voltaje medidos experimentalmente a una irradiancia y temperatura de la celda definida. Por medio de la curva I-V es posible medir la eficiencia de una celda o bien de un módulo fotovoltaico. Al graficar el voltaje en función de corriente, se obtiene una curva, en esta curva se puede observar que cuando el voltaje es cero, la corriente está en su máximo valor, en cambio cuando el voltaje es máximo, la corriente es igual a cero, estos valores corresponden a I_{sc} y V_{oc} (ver Figura 2.8). La potencia máxima (P_m) es el valor resultante del producto de la intensidad máxima (I_m) y la tensión máxima (V_m), representa la

potencia máxima que provee la celda (ver Ecuación 2.1). El factor de forma (FF) está relacionado con la eficiencia del módulo y está representado por el área rectangular bajo la curva en el punto de máxima potencia (ver Figura 2.8). A partir de estos parámetros, es posible calcular la eficiencia eléctrica (η_e) del módulo fotovoltaico de concentración mediante la Ecuación 2.2 donde Cr es el factor de concentración y A_c el área de las celdas.

La corriente de corto circuito varía con relación a la radiación del Sol y el área de las celdas; el voltaje de circuito abierto está determinado por las propiedades del material semiconductor, la iluminación y la temperatura, si la temperatura de la celda aumenta, el valor de voltaje de circuito abierto disminuye [56].

$$P_m = V_m \cdot I_m \tag{2.1}$$

$$\eta_e = \frac{V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF}{Cr \cdot G \cdot A_c} \tag{2.2}$$

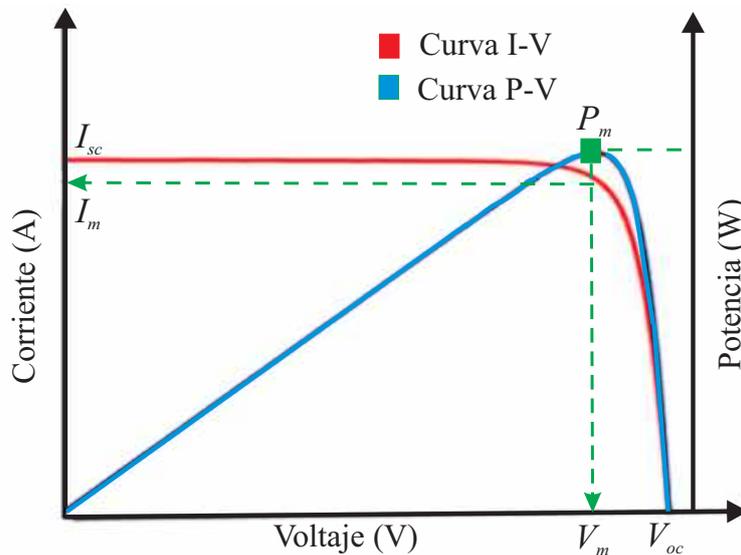


Figura 2.8: Curva I-V, P-V

2.4.2. Efectos de la Irradiancia

La tensión y la corriente generada en una celda dependerá de la radiación solar incidente recibida. La corriente de corto circuito de la celda es directamente proporcional a la irradiancia como se muestra en la Figura 2.9. I_{sc} disminuye a medida que se reduce la irradiancia. V_{oc} varía ligeramente con la irradiancia, aunque también decrece, para efectos prácticos se puede considerar constante.

La exposición prolongada a la alta irradiancia y temperaturas extremas puede acelerar la degradación de las celdas fotovoltaicas reduciendo su vida útil. La irradiancia tiene un efecto significativo en la operación y eficiencia de las celdas fotovoltaicas. Comprender estos efectos es esencial para diseñar, instalar y operar sistemas fotovoltaicos que maximicen la producción de energía y mantengan la longevidad de los módulos fotovoltaicos.

Las celdas fotovoltaicas de alta concentración requieren una gestión térmica efectiva para disipar el calor generado, un seguimiento solar de alta precisión para mantener la alineación correcta con el Sol y un diseño óptico avanzado para asegurar la uniformidad de la iluminación.

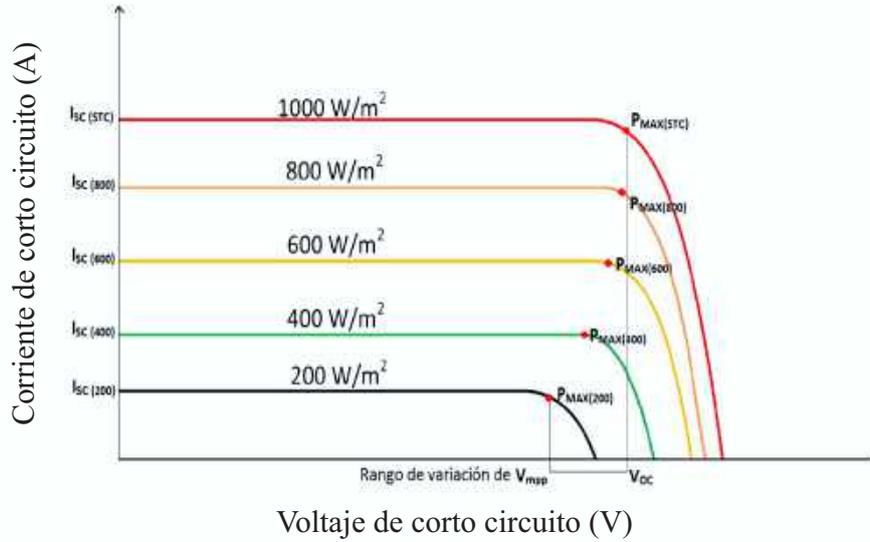


Figura 2.9: Curva característica I-V de una celda solar en función de la irradiancia [55].

2.4.3. Efectos de la temperatura

La temperatura afecta de manera considerable a V_{oc} como se muestra en la Figura 2.10. V_{oc} disminuye conforme aumenta la temperatura. I_{sc} aumenta ligeramente, debido a que la variación es muy pequeña para efectos prácticos se puede considerar constante. Es evidente que si el voltaje de la celda disminuye cuando aumenta la temperatura y la corriente prácticamente se mantiene constante, la potencia entregada por la celda disminuirá con el incremento de temperatura. La temperatura influye directamente en la eficiencia de las celdas fotovoltaicas. A medida que la temperatura aumenta, la eficiencia de conversión disminuye, principalmente debido a la reducción del voltaje de salida. La gestión térmica y el diseño adecuado de los sistemas son esenciales para mitigar estos efectos y mantener el rendimiento óptimo de los módulos fotovoltaicos.

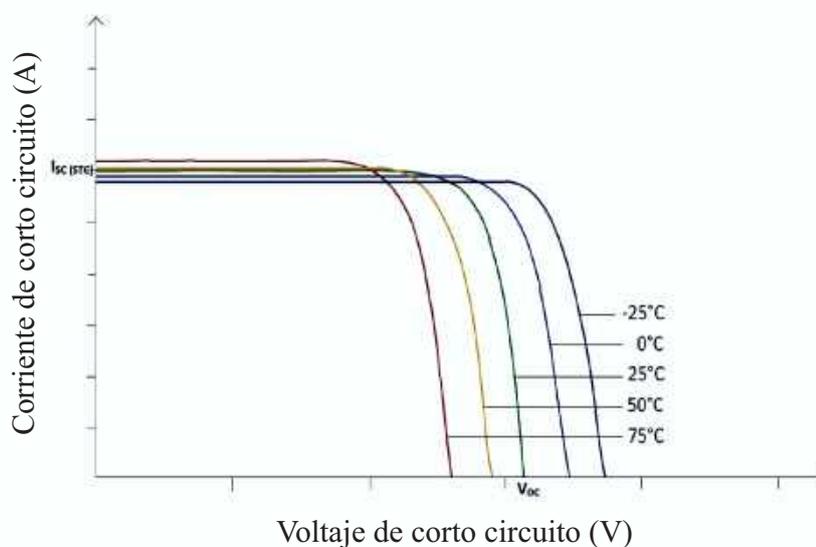


Figura 2.10: Curva característica I-V de una celda solar en función de su temperatura [55].

2.5. Concentrador solar PD-CPVT

Los sistemas de concentración solar de disco parabólico PD-CPVT se componen básicamente de los siguientes elementos:

- **Concentrador:** es la superficie reflexiva del sistema. Tiene forma de paraboloide de revolución y su tamaño depende de la energía que se desea generar en determinado tiempo y bajo las condiciones de radiación determinadas.
- **Receptor:** el receptor está conformado por celdas fotovoltaicas multi-unión y un sistema de enfriamiento para las celdas. El receptor tiene dos funciones fundamentales, por un lado absorber la radiación solar reflejada por el concentrador, y por el otro transferir la energía absorbida a las celdas fotovoltaicas para producir electricidad y al fluido de trabajo para obtener calor (ver Figura 2.11).
- **Sistema de seguimiento:** los sistemas de concentración solar de disco parabólico realizan el seguimiento solar en dos ejes. Se realiza según dos tipos de montaje: seguimiento en acimut-elevación, en el que el movimiento se realiza en dos ejes y seguimiento polar, en el que el movimiento de un eje es muy lento, pues solo debe seguir las variaciones estacionales del Sol y el movimiento en el otro eje es a velocidad constante.

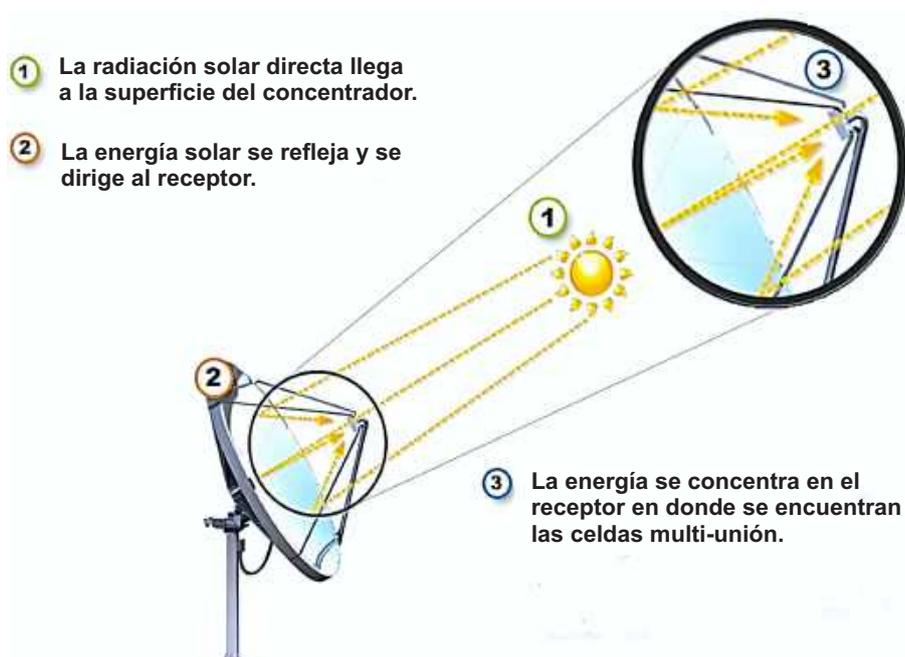


Figura 2.11: Esquema concentrador PD-CPVT [57].

2.6. Sistemas de seguimiento solar

Los seguidores solares generalmente se emplean en sistemas CSP, CPV y CPVT en los cuales es imprescindible captar la máxima cantidad de radiación solar directa a lo largo del día para mantener una eficiencia óptima [58]. Para lograr esto, es necesario que el sistema en todo momento permanezca perpendicular a los rayos del Sol. Al utilizar dispositivos de concentración óptica, es importante utilizar un seguidor solar con la precisión adecuada con respecto a un factor de concentración óptica específico. En caso contrario, el concentrador sufriría elevadas pérdidas ópticas por la inadecuada focalización de la radiación solar sobre su receptor, a pesar de tener buena calidad.

Los seguidores solares de un eje se emplean en sistemas de concentración solar media y baja (10-60x) como los sistemas PTC y Fresnel lineal [9]. Estos sistemas pueden ser orientados en dirección este-oeste, teniendo seguimiento solar de norte a sur, o pueden orientarse en dirección norte-sur y realizar el seguimiento solar de este a oeste. Una orientación norte-sur, permite recolectar un poco más de energía en promedio a lo largo de todo el año, en comparación con una orientación este-oeste. Sin embargo, al orientar el sistema norte-sur, se puede alcanzar un importante pico de energía durante el verano, y una disminución de energía a lo largo del invierno. Del mismo modo, estos sistemas se pueden orientar horizontalmente, verticalmente o inclinados. Las características de cada uno de ellos se menciona a continuación.

1. **Horizontal:** El eje de rotación para el seguidor solar de eje único, es horizontal con respecto al piso. Ya que estas instalaciones son de geometría sencilla, suelen ser el tipo de arreglo que se utiliza en campos extensos de producción de energía; ya que se comparte el eje de rotación, varios paneles, CPV o CPVT pueden ser movidos por el mismo mecanismo de control, asegurando que todos se moverán de igual manera.
2. **Vertical:** El eje de rotación en esta configuración es vertical con respecto al piso, siendo prácticamente un poste que gira sobre su propio eje.
3. **Inclinado:** Cuando el eje de rotación no se encuentra ni horizontal ni vertical, entonces se dice que la configuración es inclinada. Este tipo de colocación utiliza el eje de rotación con un ángulo apropiado a un promedio estacional de inclinación del Sol según la latitud.

Por otro lado, los seguidores solares de dos ejes se requieren para sistemas con relaciones de concentración más altas (60-1500X) como sistemas de disco parabólico, lente de Fresnel y torre central [9]. Los seguidores solares de dos ejes cuentan con dos grados de libertad, que funcionan como ejes de rotación; realizan el ajuste de su posición de forma periódica y necesitan ser orientados permanentemente hacia el Sol debido a su limitado ángulo de aceptación. Los seguidores de dos ejes se clasifican en: dos ejes en un marco y dos ejes en una base giratoria. Sus características se mencionan a continuación.

1. **Dos ejes en un marco:** El eje primario puede ser compartido por varios seguidores para bajar los costos de instalación.
2. **Dos ejes en una base giratoria:** El eje primario de este seguidor es vertical al suelo, en algunas ocasiones sostiene una base giratoria sobre la cual se encuentra el eje secundario, en otros modelos el eje es únicamente un tubo que gira.

En la Figura 2.12 se presentan diferentes tipos de seguidores solares de uno y dos ejes, cada uno con sus diversas configuraciones y formas de montaje.

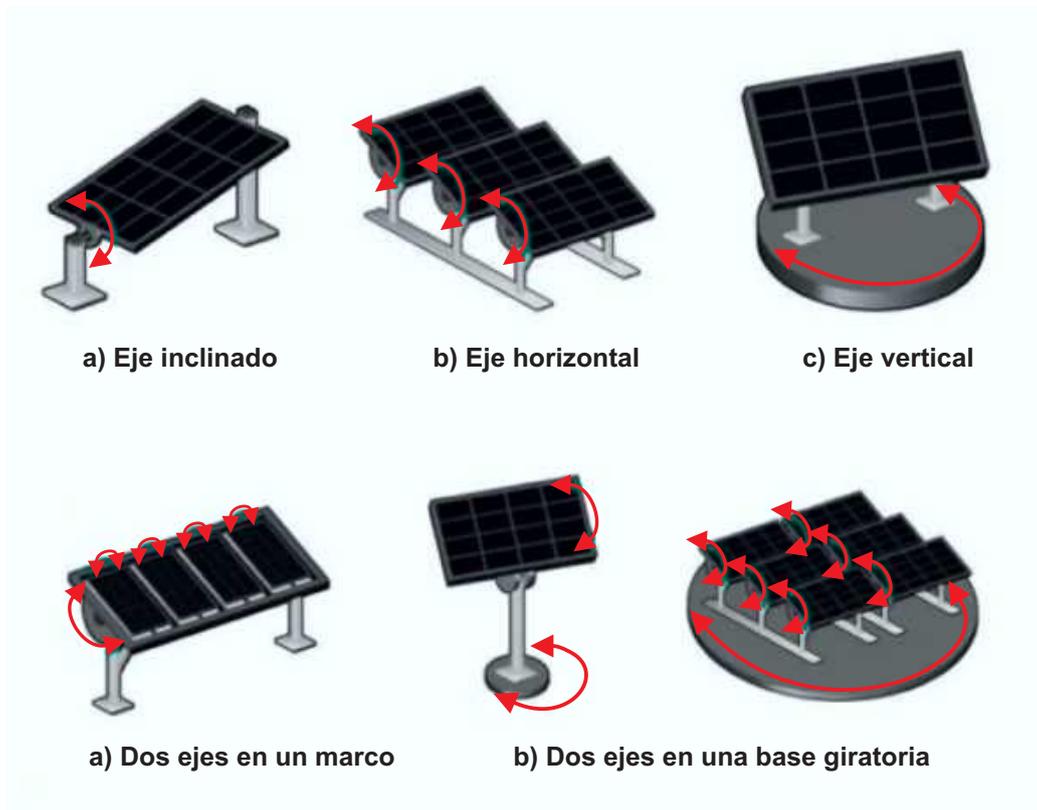


Figura 2.12: Tipos de seguidores solares [59].

Normalmente, los seguidores solares incluyen varios componentes, como subsistemas de transmisión mecánica, motores eléctricos, sensores de posición del Sol, algoritmos de posición solar, unidades de control e interruptores de límite [60]. Los objetivos de un seguidor solar son lograr una alta precisión de seguimiento solar, robustez frente a perturbaciones, alta estabilidad, señales de control suaves y facilidad de implementación. Además, el consumo de energía del seguidor solar debería ser del 2 % al 3 % del aumento de energía en un sistema de generación de energía solar [61]. Sefa y colaboradores [62] presentaron la comparación de los principales parámetros constructivos de un seguidor solar. Una de las principales diferencias es la precisión del seguimiento solar, que aumenta la eficiencia de conversión de la energía solar en energía térmica o eléctrica [63]. Comúnmente, la precisión mínima de seguimiento solar requerida se establece mediante el ángulo de aceptación del sistema de concentración, generalmente definido como el ángulo de desviación en el que la generación de energía disminuye por debajo del 90 % [64]. Cuanto más preciso sea el seguimiento solar, mayor será la eficiencia de los sistemas de generación de energía solar [65]-[69].

Los factores de reducción de rendimiento de los sistemas que aprovechan la energía solar se clasifican en dos tipos principales: (1) factores relacionados con la precisión del seguidor solar y (2) factores que explican o consideran una reducción del ángulo de aceptación de los sistemas [64]. De la misma manera, los factores que condicionan la precisión de seguimiento solar se pueden clasificar según su naturaleza como se muestra en la Tabla 2.2. Por un lado, el componente definido por software incluye todos los problemas donde el software es el foco y se utiliza para proporcionar la solución, como lo son los algoritmos de control, algoritmo de posicionamiento solar, frecuencia del seguidor solar, entre otros. Este componente se puede abordar rápidamente sin necesidad de modificaciones mecánicas. Por otro lado, el componente definido por hardware se refiere a las partes físicas que requieren cambios importantes para mejorar el rendimiento del seguidor solar, por ejemplo, dispositivos electrónicos, sensores, actuadores, unidades de control, etc. La forma más barata y, a veces, más sencilla de aumentar la precisión y exactitud de un seguidor solar es optimizar el software de control.

Un simple cambio en el algoritmo de control puede mejorar significativamente el rendimiento del seguidor solar. Por ejemplo, Garrido y Díaz en [70] presentaron un estudio de rendimiento de un prototipo de seguidor solar de un eje controlado por dos algoritmos de control de lazo cerrado diferentes. La precisión del seguidor solar alcanzada fue diferente en ambos algoritmos. De manera similar, Fathabadi en [71] presentó una comparación de dos estrategias de seguimiento solar en el mismo mecanismo de seguimiento: lazo abierto y lazo cerrado. Los resultados concluyeron que la estrategia de seguimiento en lazo cerrado obtuvo mayor producción de energía en un módulo fotovoltaico con respecto a la estrategia en lazo abierto.

Como se mencionó anteriormente, el ángulo de aceptación de los sistemas CSP y CPV define la tolerancia de precisión de seguimiento solar. Este ángulo varía según las características constructivas de cada sistema y generalmente es de décimas de grado.

En el caso de los sistemas fotovoltaicos convencionales, la precisión de seguimiento no es un factor crucial porque su ángulo de aceptación es muy grande en relación con el ángulo de aceptación de los sistemas CSP y CPV.

Tabla 2.2: Factores que condicionan la precisión de seguimiento solar [72].

<p>Componente definido por software</p> <ul style="list-style-type: none"> · Estrategia de seguimiento (lazo abierto, cerrado e híbrido) [73], [74]. · Algoritmo de control (On-off, PI, PID, etc) [73], [74]. · Frecuencia de seguimiento [75]. · Algoritmo de posición solar [64]. · Desviación del posicionamiento geográfico[63].
<p>Componente definido por hardware</p> <ul style="list-style-type: none"> · Tipo de seguidor solar. · Tipo de actuador y relación de transmisión. · Unidad de control [64]. · Backlash de los actuadores [76]. · Características del sensor solar [64]. · Falta de coincidencia de fotosensores. · Desviación de la instalación [64], [76], [77]. · Falta de mantenimiento [64], [78]. · Falta de calibración de los sensores [76]. · Errores por efectos del viento [64], [76], [79].

2.7. Impacto del error de seguimiento solar en módulos CPV

En los sistemas CPV, se utiliza una gran cantidad de elementos ópticos para concentrar la luz solar en celdas fotovoltaicas multiunión de pequeño tamaño. Los módulos CPV comerciales típicos constan de un conjunto de lentes Fresnel. Cada lente de Fresnel enfoca la luz en una única celda solar (foco puntual), que está interconectada eléctricamente en serie para lograr un módulo de dos terminales. Se necesitan seguidores solares de dos ejes de alta precisión para mantener los módulos CPV perpendiculares a los rayos solares.

En los módulos HCPV, los niveles de concentración disponibles comercialmente están entre 500X y 1300X y los ángulos de aceptación de los módulos son bastante pequeños (entre 0.7° y 1.9°)[80], [81]. La alta eficiencia es una de las claves motivacionales para desarrollar sistemas HCPV más competitivos en términos de costos, de acuerdo con el costo nivelado de la energía [82].

La sensibilidad de la respuesta eléctrica de un módulo CPV respecto al error total de seguimiento (STE) se puede medir con simuladores solares especiales, como el Helios 3198 que se muestra en la Figura 2.13 [83]. Para realizar una prueba, los módulos CPV se montan sobre una estructura de soporte ajustable. Al controlar la posición de la estructura, los módulos se pueden medir en diferentes ángulos de inclinación con respecto a la dirección de la luz colimada. Por tanto, se puede obtener la respuesta eléctrica de los módulos para diferentes STE. Una carga electrónica sincronizada con la lámpara de Xenón registra las medidas eléctricas. En las Figuras 2.14 y 2.15 se presentan las mediciones realizadas en dos módulos CPV de diferentes fabricantes, módulo A y B. Aunque se mide toda la curva corriente-tensión (IV), los gráficos resumen los parámetros eléctricos más importantes del módulo CPV: tensión de circuito abierto, corriente de cortocircuito y potencia máxima. Como se muestra, el STE influye principalmente en el I_{sc} , manteniendo el V_{oc} casi constante. La P_m disminuye más rápidamente que la I_{sc} debido a la degradación del factor de forma a medida que aumenta el STE. El módulo CPV A alcanza el 90% de la I_{sc} inicial para un STE de 0.69° , mientras que el módulo CPV B alcanza el 90% de la I_{sc} inicial para un STE de 0.90° . Así, el módulo CPV B muestra una mejor respuesta angular. Este tipo de gráficos ilustran el impacto crítico del STE en la generación de electricidad de los sistemas CPV [84].

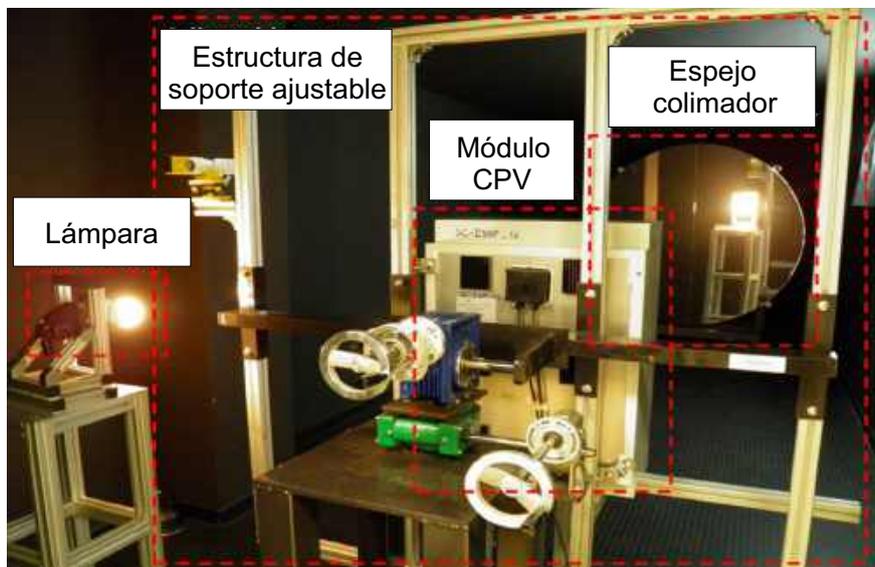


Figura 2.13: Simulador solar CPV Helios 3198 [83].

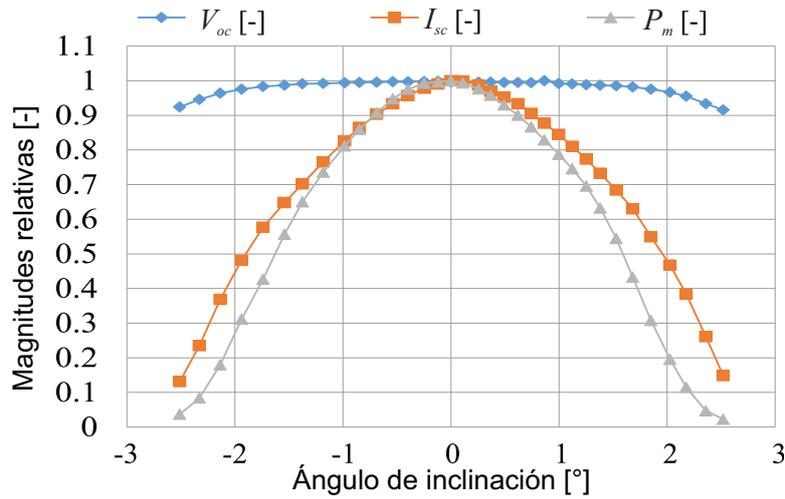


Figura 2.14: Ángulo de aceptación a 1000 W/m^2 medido en el módulo CPV A en el simulador solar [72].

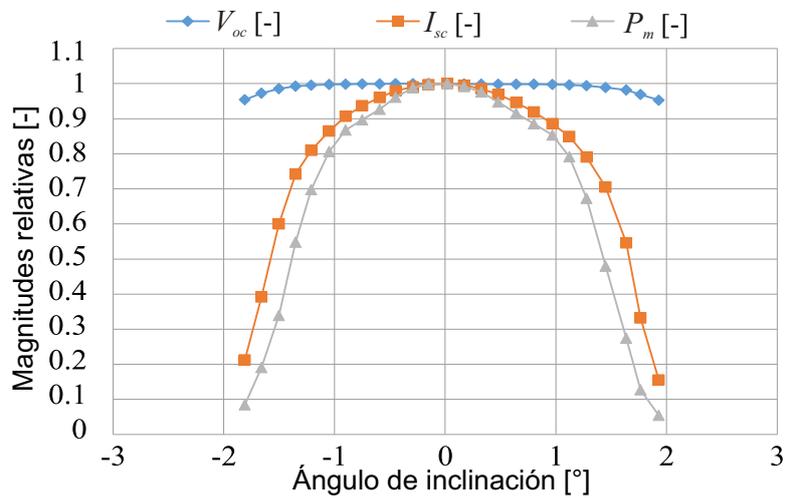


Figura 2.15: Ángulo de aceptación a 1000 W/m^2 medido en el módulo CPV B en el simulador solar [72].

2.8. Clasificación de los algoritmos de control aplicados en sistemas de seguimiento solar

Con el fin de analizar las diferentes estrategias de seguimiento solar y los algoritmos de control aplicados en seguidores solares, se presenta una clasificación de los trabajos relacionados con sistemas de seguimiento solar encontrados en la literatura. Esta clasificación se realizó según la estrategia de seguimiento solar: lazo abierto, lazo cerrado o lazo híbrido, como se puede observar en la Tabla 2.3. En esta tabla se muestra que se implementaron los algoritmos de control clásicos: on-off, PI y PID en el 67.55 % de los trabajos encontrados en la literatura, siendo el control on-off el algoritmo de control más utilizado. Además, de los estudios de investigación analizados, el 28.95 % implementó una estrategia de lazo abierto, el 54.39 % aplica una estrategia de lazo cerrado y solo el 16.67 % utilizó una estrategia de lazo híbrido. Vale la pena señalar que solo se consideraron estudios en los que se presentan algoritmos de control o en los que los algoritmos pueden determinarse directamente. Los resultados o principales hallazgos de los trabajos revisados se obtuvieron directamente de lo reportado.

Es necesario, sin embargo, señalar que no fueron caracterizados bajo las mismas condiciones de prueba/simulación, por lo que no se puede establecer un criterio de evaluación universal.

Tabla 2.3: Algoritmos de control de lazo abierto, lazo cerrado e híbrido aplicados en sistemas de seguimiento solar [72].

Algoritmo de control	Lazo abierto (28.95 %)	Lazo cerrado (54.39 %)	Lazo híbrido (16.67 %)	Promedio (100 %)
Control clásico (67.55 %)				
On-off	57.58 %	59.68 %	47.37 %	57.02 %
Proporcional-integral-derivativo	6.06 %	3.23 %	15.79 %	6.14 %
Proporcional-integral	3.03 %	3.23 %	10.53 %	4.39 %
Control moderno (32.45 %)				
Lógica difusa	6.06 %	14.52 %	5.26 %	10.53 %
Modo deslizante	9.09 %	1.61 %	-	3.51 %
PID-Lógica difusa	3.03 %	3.23 %	-	2.63 %
Adaptivo	3.03 %	-	5.26 %	1.75 %
Redes neuronales	-	3.23 %	-	1.75 %
Adaptivo modo deslizante	-	1.61 %	-	0.88 %
IMC-PID	-	1.61 %	-	0.88 %
Neuro-fuzzy logic	-	1.61 %	-	0.88 %
Cascada	-	1.61 %	-	0.88 %
Predictivo	3.03 %	-	-	0.88 %
Optimización paramétrica	3.03 %	-	-	0.88 %
Distribuido	-	-	5.26 %	0.88 %
Regulador lineal cuadrático	-	1.61 %	-	0.88 %
Machine learning	-	1.61 %	-	0.88 %
Kinematic synthesis	3.03 %	-	-	0.88 %
ANFIS	3.03 %	-	-	0.88 %
Control robusto	-	1.61 %	-	0.88 %
Red bayesiana	-	-	5.26 %	0.88 %
Logic-based supervisor	-	-	5.26 %	0.88 %

2.8.1. Estrategia de seguimiento solar de lazo abierto

En esta estrategia se emplea un algoritmo de posicionamiento solar basado en coordenadas solares para estimar la posición aparente del Sol con respecto a una ubicación geográfica (latitud y longitud), fecha y hora realizando el cálculo para cada día del año (ver Figura 2.16). Este algoritmo suele programarse en una unidad de control electrónico como una computadora (PC), Arduino, un microcontrolador (μ C) o en un controlador lógico programable (PLC). Una vez que el algoritmo de posicionamiento solar calcula los ángulos solares cenital y acimutal, es necesario transformarlos en la unidad de control en posición angular para los actuadores del seguidor solar. Finalmente, los ángulos de rotación son comandados a través de una señal de control (u) hacia el seguidor para alinear automáticamente el sistema CSP o CPV al vector solar. Esta estrategia se implementa comúnmente en seguidores solares de baja precisión y algunas de sus ventajas y desventajas se muestran en la tabla 2.4. Esta estrategia tiene la ventaja de que es independiente de las condiciones climatológicas y no requiere del empleo de un sensor solar. Sin embargo, hay diferentes factores que influyen en su precisión como: el efecto del viento, desviación en la orientación del sistema o la desalineación en la instalación de la carga útil.

Tabla 2.4: Ventajas y desventajas de la estrategia de seguimiento de lazo abierto en sistemas de seguimiento solar [72].

Ventajas

- No requiere un sensor solar.
- Facilidad y bajo costo de implementación.
- Su funcionamiento es independiente de las condiciones climatológicas.

Desventajas

- Baja precisión de seguimiento.
- Requiere un algoritmo de posicionamiento solar con los datos geográficos y horario de seguimiento solar.
- Requiere un sensor para la caracterización del error total de seguimiento.
- Requiere constante calibración.
- Puede resultar inestable ante una perturbación eléctrica o mecánica.

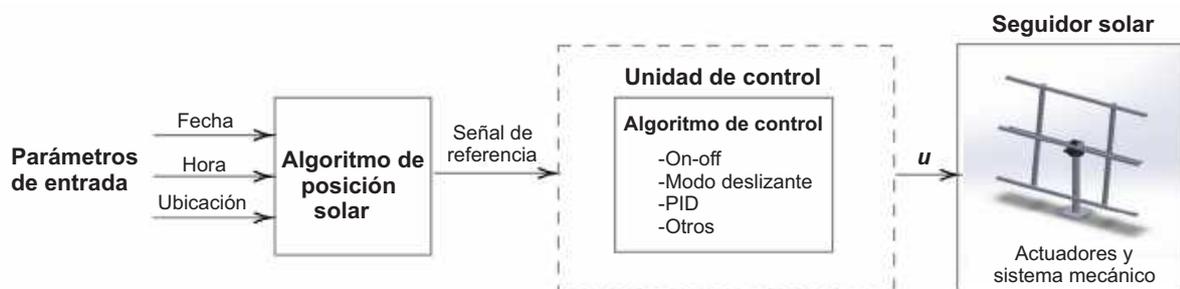


Figura 2.16: Diagrama de bloques estrategia de control de lazo abierto [72].

En la estrategia de seguimiento solar de lazo abierto, los algoritmos de posicionamiento solar requieren conocer parámetros como la ubicación geográfica, la hora, la fecha, así como la orientación de los sistemas de seguimiento solar [85]-[90]. Los ángulos de acimut y cenit generados por el algoritmo de posición solar representan el punto de ajuste del control de lazo abierto como se ve en la Figura 2.16. En este método, el error introducido por el uso de fotosensores en sistemas de lazo cerrado pueden evitarse ya que su funcionamiento es independiente de las condiciones climáticas. Aunque un controlador de lazo abierto opera con un algoritmo de posición solar muy preciso, se ve afectado, sin embargo, en el campo por un conjunto de fuentes de error que pueden degradar altamente su precisión de seguimiento final [64]:

1. Inexactitudes del algoritmo de posición solar o en los parámetros de entrada.
2. Errores o suposiciones realizadas en el proceso de transformación de las coordenadas solares en ángulos de rotación de los actuadores.
3. Tolerancia de los procesos de fabricación, montaje e instalación.
4. Flexión gravitacional en seguidores de gran apertura.
5. Resolución del sistema mecánico del sistema de seguimiento solar.

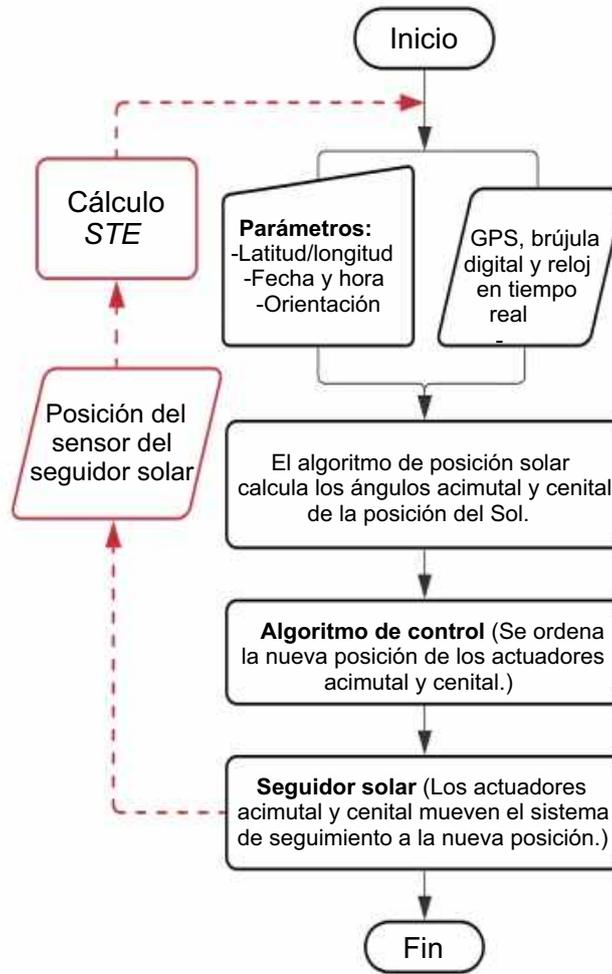


Figura 2.17: Diagrama de flujo estrategia de control de lazo abierto [72].

La Figura 2.17 muestra un diagrama de flujo típico de una estrategia de seguimiento solar de lazo abierto. En primer lugar, para calcular la posición aparente del Sol, es necesario introducir manualmente la latitud, longitud, orientación del sistema de seguimiento solar, fecha y hora. Lo anterior se puede evitar utilizando un sensor GPS, un magnetómetro y un reloj de tiempo real. Considerando esto, un algoritmo de posición solar calcula los ángulos acimutal y cenital de la posición aparente del Sol. Estos ángulos representan el punto de ajuste del algoritmo de control, que finalmente ordena la posición deseada a los actuadores del sistema de seguimiento (como en la Figura 2.16). Como se mencionó anteriormente, los sistemas de seguimiento solar de lazo abierto no emplean un sensor solar, por lo que no es posible proporcionar retroalimentación de control con la posición del Sol. Algunos autores utilizaron codificadores, o pulsos enviados a motores paso a paso ST, para medir la posición del seguidor solar [71], [87], [91].

El detalle de los estudios que implementan la estrategia de seguimiento solar de lazo abierto se presentan en la Tabla 2.3, de los cuales el 57.58 % implementa un control on-off, el 9.09 % un control de modo deslizante, el 6.06 % un control proporcional-integral-derivativo (PID) y Lógica difusa, y un 21.21 % otros tipos de controladores. Es importante enfatizar que en esta estrategia la retroalimentación de control requerida de algunos algoritmos se realiza mediante codificadores o cualquier sensor de posición como se muestra en la Figura 2.17; sin embargo, no existe ningún sensor solar que mida directamente y proporcione información sobre la posición aparente del Sol. Así mismo, es importante mencionar que la mayoría son trabajos experimentales y solo algunos de ellos reportan la precisión de seguimiento solar alcanzada. También, cada trabajo utiliza diferentes instrumentos y métodos para medir el error total de seguimiento, como los transportadores digitales de Fathabadi en [71], un inclinómetro digital de Sallaberry en [92], o una cámara CCD de [87].

Como se puede observar en la Tabla 2.3, el algoritmo de control on-off es el más utilizado en cualquiera de las tres estrategias de seguimiento solar debido a su facilidad y bajo costo de implementación. Este control es un algoritmo de estado discreto que produce una desviación continua del valor del punto de ajuste. Fathabadi en [71] describió un algoritmo de control on-off en lazo abierto para un sistema fotovoltaico con seguimiento solar, que capturó un 24.59 % más de energía solar durante un año con respecto a un sistema fotovoltaico fijo. El STE alcanzado fue de 0.43° . De manera similar, se obtuvo un 42.6 %, 24 %, 41.34 % y 33 % más de energía en los sistemas fotovoltaicos con seguimiento solar controlados por un algoritmo de control on-off en comparación con los sistemas fotovoltaicos fijos en las obras de Sungur [93], Ruelas y colaboradores [94], Abdallah y Nijmeh [95] y Rezoug y Chenni [96], respectivamente. Sallaberry y colaboradores [92] propusieron un procedimiento adaptado del estándar IEC 62817 para la caracterización de sistemas de seguimiento solar de un eje controlados con algoritmos on-off de lazo abierto. Las pérdidas ópticas se estimaron mediante simulación de trazado de rayos y el STE alcanzado fue de $\pm 0,4^\circ$, que se midió experimentalmente con un inclinómetro digital. Otra investigación interesante presentó una estrategia de seguimiento solar con un algoritmo de control on-off que se activa con diferentes frecuencias de seguimiento solar [75]. Se demostró que esta estrategia ahorra energía y mejora la confiabilidad del sistema de seguimiento solar. Yang y colaboradores [97] encontraron hallazgos similares. Elagib y Osman [98], que utilizaron un GPS y un módulo de reloj en tiempo real para determinar los parámetros de entrada de un algoritmo de posición solar programado en un μC . El algoritmo de posición solar estima la posición del Sol y establece el punto de ajuste de lazo abierto de un control on-off para el seguidor.

El control de modo deslizante es el segundo algoritmo de control más utilizado en sistemas de seguimiento solar de lazo abierto. Este algoritmo es un control no lineal robusto con acción discontinua, por lo que puede implementarse mediante convertidores de potencia con una respuesta de encendido y apagado. El algoritmo de control obliga al sistema a deslizarse a lo largo de los límites de las estructuras de control y aunque un control en modo deslizante puede producir errores extremadamente pequeños, siempre existe vibración en la señal de control. Por lo tanto, su implementación en sistemas de seguimiento solar no es muy común ya que requiere conmutación de alta frecuencia, lo que podría generar fatiga en los actuadores y mayor consumo energético.

Rhif en [99] y [100] presentó, respectivamente, resultados de simulación y experimentales de la implementación de un control de modo deslizante en un seguidor solar de lazo abierto. El segundo empleó un observador de modo deslizante que reemplaza al sensor de velocidad. Las mediciones experimentales muestran un aumento de la producción de energía de más del 40 % en un sistema fotovoltaico convencional. De manera similar, Keshtkar en [101] presentó una simulación de un control de modo deslizante de alto orden que asegura la convergencia en tiempo finito de los estados a la trayectoria deseada, así como la capacidad de compensaciones de perturbaciones acotadas en el seguidor solar. Los autores concluyeron que el control de modo deslizante presentaba baja sensibilidad a perturbaciones e incertidumbres externas en el modelo matemático del sistema de seguimiento solar.

Existen varios estudios experimentales que han implementado algoritmos de control clásicos en sistemas de seguimiento solar de lazo abierto. El control clásico intenta resolver problemas de control de sistemas lineales mediante una respuesta continua. Normalmente, en la práctica, estos controladores se sintonizan manualmente estableciendo sus parámetros hasta obtener la respuesta deseada. Li y colaboradores [102] presentaron un prototipo de estufa solar diseñada con una lente Fresnel gigante con seguimiento solar a través de un control PI. En este sistema, el punto de ajuste de lazo abierto se estableció a través de un algoritmo de posición solar, el cual utiliza un GPS para los parámetros de entrada. Debido a la frecuencia de un seguidor solar de un control on-off, se modeló y evaluó experimentalmente el desenfoque de la lente Fresnel. En los trabajos de [103] y [104], se empleó un algoritmo de control PID en sistemas de seguimiento solar de dos ejes para módulos fotovoltaicos. Estos seguidores fueron controlados en lazo abierto con un algoritmo de posición solar con GPS. Los STE medidos por los codificadores fueron $\pm 0.5^\circ$ y $\pm 0.1^\circ$,

respectivamente. La generación de energía fue, respectivamente, un 26.9% y un 40.7% más que un sistema fotovoltaico de inclinación fija en condiciones despejadas. Finalmente, Bedaouche y colaboradores en [105] realizaron la simulación de un control PID con lógica difusa autoajutable para un seguidor solar. Se mostró la respuesta al escalón entre el PID clásico y el control propuesto. Los autores mencionaron que el control propuesto logró una alta precisión de seguimiento pero el STE no es el indicado.

Es bien sabido que la facilidad de implementación es uno de los principales requisitos de los algoritmos de control para sistemas de seguimiento solar. Existen algunos estudios que emplean algoritmos de control modernos para seguidores solares: optimización paramétrica [106], control de lógica difusa [76], [107], un sistema de inferencia neuronal difusa adaptativo (ANFIS) [108] y un modelo predictivo [109]. Estos controladores pretenden conseguir una mayor precisión de seguimiento solar, robustez frente a perturbaciones y un menor consumo energético. Todos los algoritmos de control modernos mencionadas fueron programados en una PC bajo el ambiente Matlab® porque cuenta con un toolbox que facilita la implementación del sistema de control. Sin embargo, en la práctica no es ni económica ni técnicamente viable tener un PC en sistemas de seguimiento solar. La implementación de estos controladores en un microprocesador o en un PLC aumentaría la complejidad.

2.8.2. Estrategia de seguimiento solar de lazo cerrado

En esta estrategia de control se emplean sensores solares para realizar la retroalimentación de control. En la Figura 2.18 se presenta el diagrama de bloques que representa a este tipo de sistemas. Es necesario establecer un punto de ajuste de lazo cerrado, típicamente igual a cero para seguidores solares que emplean sensores solares basados en matrices de fotodiodos. La señal de error de control (e) se calcula como la diferencia de la señal de referencia (r) menos la de retroalimentación del sensor solar (ss). Posteriormente esta señal es empleada por un algoritmo de control que se implementa en una unidad de control (PC, μC , FPGA, Arduino® o Raspberry Pi®) que modifica la posición de los motores del seguidor solar hasta llegar a 0° , logrando con esto que el seguidor solar se mantenga perpendicular a los rayos del Sol. La principal ventaja de esta estrategia de control es que logra una mayor precisión de seguimiento que los sistemas de lazo abierto debido al empleo de sensores solares. Sin embargo, los sensores solares se ven limitados debido a que solo detectan la posición del Sol cuando éste se encuentra dentro de su campo de visión. Así mismo, son susceptibles a las perturbaciones climáticas y la radiación solar difusa. La Tabla 2.5 resume algunas ventajas y desventajas encontradas en los trabajos de Luque-Heredia [73], Khalil [110], Satue [111].

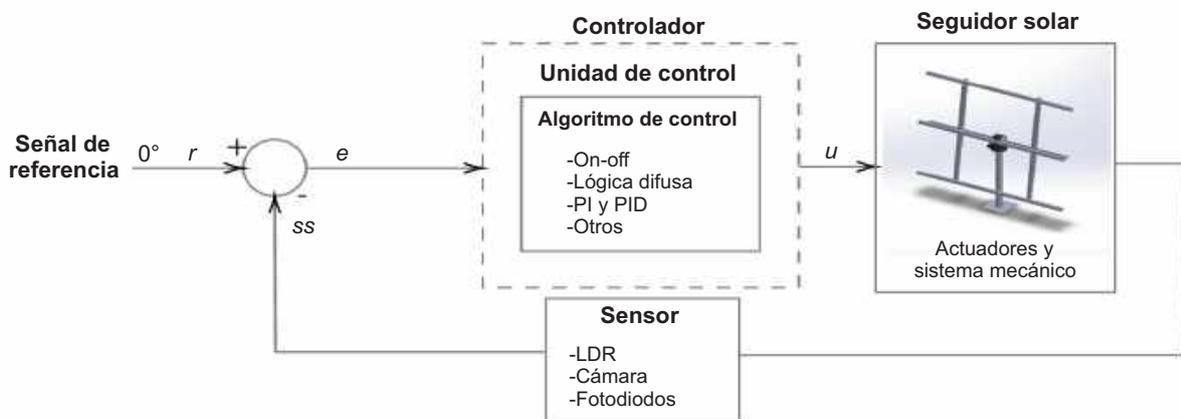


Figura 2.18: Diagrama de bloques estrategia de control de lazo cerrado [72].

Tabla 2.5: Ventajas y desventajas de la estrategia de seguimiento de lazo cerrado en sistemas de seguimiento solar [72].

Ventajas
<ul style="list-style-type: none"> · No requiere un algoritmo de posición solar. · Alta precisión de seguimiento. · No lo restringe la ubicación geográfica.
Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> · Requiere de un sensor solar. · Su funcionamiento depende de las condiciones climáticas como nubosidad y radiación difusa. · La ubicación solar está limitada al FOV del sensor solar. · La complejidad y los costos de implementación son mayores que los de un sistema de seguimiento de lazo abierto. · La precisión de seguimiento se puede reducir mediante el uso de decodificadores o sensores de baja precisión. · La mayoría de los fotosensores empleados en sensores solares no tienen una respuesta lineal bajo diferentes temperaturas y valores de radiación.

Una de las principales limitaciones de una estrategia de seguimiento solar de lazo cerrado es su dependencia del sensor solar utilizado. Por ejemplo, la posición del Sol solo se puede detectar cuando el Sol está dentro del campo de visión (FOV) del sensor solar [112]. Generalmente, un sensor con un FOV más grande (FOV_a en la Figura 2.19) tiene menor precisión y exactitud en comparación con un sensor con un FOV más pequeño (FOV_b en la Figura 2.19). Esto se debe a la medición del ruido inducido por la irradiancia horizontal difusa (DHI) causada por la nubosidad o los reflejos. Un sensor solar con un campo de visión más pequeño captura principalmente la irradiancia normal directa (DNI) y puede lograr una mayor precisión. Cuando el Sol esté fuera del FOV del sensor por hora de inicio del seguimiento solar, nubosidad o problemas de control, el sistema requerirá una prelocalización mediante un algoritmo de posición solar u otro método. Esto se conoce como estrategia de seguimiento solar de lazo híbrido.

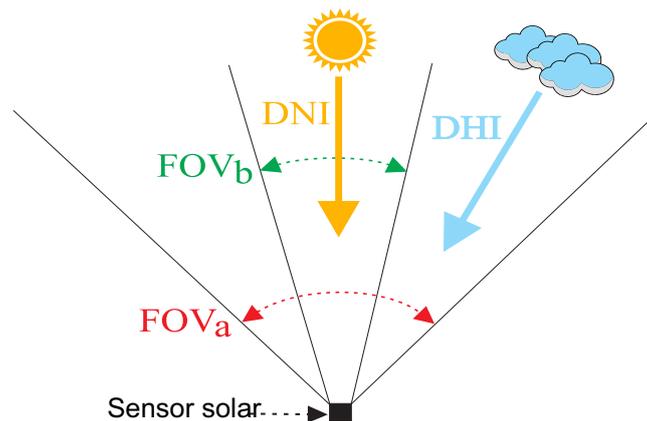


Figura 2.19: Comparación entre dos FOVs de sensores solares [72].

La Figura 2.20 muestra un diagrama de flujo típico de una estrategia de seguimiento solar de lazo cerrado aplicada a sistemas de seguimiento solar. Como se mencionó anteriormente, al inicio es necesario medir la posición aparente del Sol a través de un sensor solar para poder calcular el STE. Luego, el STE se puede comparar con una histéresis predefinida, generalmente utilizada en un control de encendido y apagado. Algunos algoritmos de control no requieren histéresis: una diferencia entre el umbral superior e inferior de los tiempos de apagado y encendido del controlador. Si el control on-

off se utiliza sin histéresis, el sistema produciría oscilaciones/vibraciones y aumentaría el consumo de energía debido al calentamiento generado, lo que podría fatigar el elemento final de control, provocando por ejemplo, desgaste en los motores o en los componentes mecánicos de reducción. Es importante tener en cuenta que con el uso de relaciones de transmisión de reducción altas en los actuadores del sistema de seguimiento solar, las vibraciones/oscilaciones probablemente no se puedan observar directamente en el seguidor solar. Estos ocurren, sin embargo, a nivel del motor, lo que podría afectar la vida útil de los actuadores. Por lo tanto, si el valor absoluto del STE es menor o igual a la histéresis, los sistemas de seguimiento solar no se mueven y regresan al inicio de la secuencia de posicionamiento; ver el diagrama de flujo. De lo contrario, el algoritmo de control impulsa los actuadores a la nueva posición azimut/cenit y el seguidor sigue al Sol automáticamente. El proceso de seguimiento solar continúa hasta que el sistema está alineado perpendicularmente a la luz solar, lo que significa que el STE es menor o igual a la histéresis. Es importante mencionar que una histéresis grande disminuye la precisión del seguimiento solar.

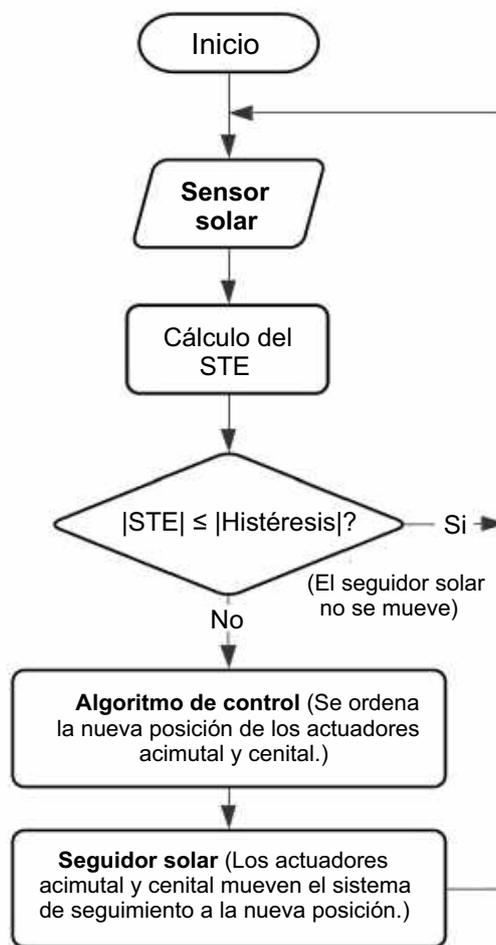


Figura 2.20: Diagrama de flujo estrategia de control de lazo cerrado [72].

Como se mencionó anteriormente, el circuito cerrado es la estrategia más utilizada en sistemas de seguimiento solar; ver Tabla 2.3. En esta revisión se encontraron un total de 62 manuscritos que utilizan esta estrategia, de los cuales el 59.68 % implementa un control on-off, el 14.52 % lógica difusa, el 3.23 % para PI y PID, y el 19.34 % utiliza otro tipo de controladores. Con respecto al control on-off en lazo cerrado, la mayoría de los estudios emplean señales de conjuntos de fotosensores de bajo costo, como fotodiodos o resistencias dependientes de la luz (LDR), para proporcionar retroalimentación al sistema de control. Debido a la simplicidad de implementación y el bajo costo computacional de este algoritmo de control, se puede implementar en sistemas integrados de bajo

costo como Arduino o incluso en un μC convencional. Varios trabajos han utilizado un Arduino como unidad de control de bajo costo, como por ejemplo en [113]-[115], en los que la producción de energía aumentó un 18 %, 36.26 % y 44.89 %, respectivamente con respecto a un sistema fotovoltaico fijo. De manera similar, Motahhir y colaboradores [116] desarrollaron un banco de pruebas para un prototipo de sistema de seguimiento solar de dos ejes que puede utilizarse para investigación y como plataforma de enseñanza. Por otro lado, Arturo y Alejandro [117] y Abdollahpour y colaboradores [118] implementaron un algoritmo de control de lazo cerrado on-off con retroalimentación mediante cámaras web. Sus resultados mostraron un STE de 0.1° y 0.2° , respectivamente. El uso de un dispositivo de carga acoplada (CCD) o cámaras complementarias de semiconductores de óxido metálico (CMOS) puede evitar algunos problemas asociados con las perturbaciones climáticas, como la respuesta no lineal ante diferentes niveles de radiación solar o cambios de temperatura, que se presentan en otros tipos de sensores como LDR o fotodiodos. En otro estudio realizado por Kribus y colaboradores [119] propusieron un algoritmo de control similar para un campo de helióstatos con un STE $<0,017^\circ$. Este sistema adquiere, mediante cámaras CCD, imágenes del receptor para proporcionar retroalimentación de control mediante una comparación del brillo promedio de las imágenes. De manera similar, Fathabadi en [71] diseñó e implementó un seguidor de dos ejes basado en un sensor de irradiancia con un STE de 0.14° . El uso de control on-off en lazo cerrado con retroalimentación proporcionada por un sensor solar permitió capturar entre un 27,7 % y un 42,7 % más de energía en diferentes estaciones del año con respecto a un sistema fotovoltaico fijo. Los autores concluyeron que los sistemas de seguimiento solar de lazo cerrado son más precisos pero más complicados y costosos de implementar que los sistemas de lazo abierto.

El rendimiento de los algoritmos de control de lógica difusa se ha estudiado mediante simulaciones numéricas en una estrategia de lazo cerrado. Ozuna y colaboradores [120] y Batayneh [121] propusieron, respectivamente, un control de posición y velocidad de los actuadores del sistema de seguimiento solar. Estos parámetros se determinaron a partir de tablas de inferencia difusa en el entorno Matlab/Simulink®. Luego de realizar diversas pruebas de estabilidad del sistema, se concluyó que es factible su implementación experimental. De manera similar, en el trabajo de Usta y colaboradores [122] se implementaron diferentes funciones de membresía para el diseño del control de lógica difusa para sistemas de seguimiento solar de un eje: triangular, gaussiana, de Cauchy y en forma de campana. Los autores concluyeron que la función de membresía del triángulo tiene una respuesta rápida y un bajo exceso. La función de membresía en forma de campana arrojó el peor resultado. En cuanto a los estudios experimentales, la investigación presentada por Fernández y colaboradores en [123] propusieron el diseño de un controlador basado en reglas difusas para un sistema HCPV que se implementó a través del enfoque tecnológico del Internet de las Cosas. En este estudio, se comparan dos algoritmos de control basados en el conocimiento. El primero se basa en un dispositivo señalador y el segundo se basa en la medición de la corriente eléctrica generada por módulos HCPV. Se concluyó que el segundo mostró el mejor desempeño del seguidor solar. De manera similar, Hamed y El-Moghany [124] implementaron un control de lógica difusa en un sistema de seguimiento solar mediante un FPGA en el entorno Matlab/Simulink®. Este controlador emplea el método Mamdani, que consta de tres partes: fuzzificación, sistema basado en reglas y defuzzificación. El panel fotovoltaico generó un 24 % más de energía que un sistema fotovoltaico fijo. Finalmente, El-Moghany y Hamed [125] y Yan y Jiaying [126] emplearon un control de lógica difusa programado en un μC para sistemas de seguimiento solar de lazo cerrado para reducir el consumo de energía de los motores. El último trabajo mostró un aumento en la energía generada por un módulo fotovoltaico del 22,5 % en comparación con un sistema fotovoltaico fijo. Todos los trabajos de control de lógica difusa mencionados emplearon conjuntos de fotosensores para proporcionar la retroalimentación del sensor.

El control clásico también se utiliza en estrategias de seguimiento solar de lazo cerrado. Carballo y colaboradores en [127] desarrollaron una herramienta de aprendizaje que emplea un algoritmo de control PI en los entornos de Mathematica® y Simulink®. Debido a su flexibilidad, este sistema

permite al usuario experimentar con algoritmos de procesamiento de imágenes y algoritmos de control aplicados en sistemas de seguimiento solar. De manera similar, Sabir y Ali [128] simularon un controlador PID para un sistema de seguimiento solar de dos ejes en Matlab/Simulink®. Este diseño de controlador se formuló como un problema de optimización y el ajuste se realizó utilizando algoritmos basados en inteligencia de enjambre. Oladayo y Titus [129] propusieron otro estudio de simulación de un algoritmo de control PID para sistemas de seguimiento solar de dos ejes. En este trabajo, la sintonización del controlador se realizó mediante un modelo de control interno (IMC) en el entorno Matlab®. Los resultados obtenidos mostraron una respuesta rápida, estable y bajo sobretiro en el seguidor solar; por lo que se concluyó que la estrategia IMC es una herramienta efectiva para optimizar el control PID.

Algunos trabajos utilizan algoritmos de control modernos para comandar y manipular las señales eléctricas a los actuadores del sistema de seguimiento solar. En cuanto a los estudios experimentales, en el trabajo de Aldair y colaboradores [130], se desarrolló e implementó un controlador de lógica neurodifusa utilizando una FPGA para un sistema de seguimiento solar de dos ejes con actuadores lineales. Los resultados experimentales mostraron que este controlador es más robusto que el de control de lógica difusa y el controlador PI. Este sistema era capaz de recolectar un 50.6% más de energía diaria que un panel fotovoltaico fijo. De manera similar, Garrido y Díaz [70] propusieron un algoritmo de control en cascada para un prototipo de seguimiento solar de un eje con un STE de 0.014°. Este control utilizó un esquema con un control clásico no lineal interno y externo. Hay otros estudios interesantes que emplearon algoritmos de control modernos mediante simulaciones numéricas: control de modo deslizante, en el que un enfoque de control equivalente utilizando un filtro de paso bajo permitió reducir los efectos de vibración [131]; el regulador cuadrático lineal (LQR), donde los resultados de la simulación mostraron que es factible aplicarlo a un sistema real [132]; control robusto, en el que se demostró el rechazo efectivo a perturbaciones constantes [133]; y finalmente el aprendizaje automático, donde se demostró la gestión de la dinámica de los datos de los sensores en comparación con otras técnicas de aprendizaje automático [134].

2.8.3. Estrategia de seguimiento solar de lazo híbrido

Es una combinación de los dos casos anteriores. Se basa en dos lazos de control: un control grueso en lazo abierto y un control fino realizado en lazo cerrado. Los lazos no se activan al mismo tiempo, se intercalan entre sí dependiendo de las condiciones climatológicas. Sin embargo, existen estudios como el de Safan [74] donde se utilizan algoritmos de ponderación entre ambos lazos para calcular la señal de control del seguidor solar. Es importante mencionar que los algoritmos de control de ambos lazos podrían ser diferentes, como en el estudio de Yeh y Lee [135].

La Figura 2.21 muestra que existen dos posibilidades para establecer la referencia o punto de ajuste del sistema de control: una en modo de lazo abierto (línea roja) y otra en modo de lazo cerrado (línea verde). La unidad de control tiene la capacidad de realizar el cambio en tiempo real entre ambos modos si se ha completado la pre-localización del seguidor solar. Posteriormente el algoritmo de control programado en la unidad de control genera una señal de control u para mover los actuadores del seguidor solar. La Figura 2.22 simula el comportamiento de una estrategia de lazo híbrido durante un día (8 a 18h). Por simplicidad se consideró el eje acimutal; los ángulos de acimut del Sol son los únicos representativos. Los detalles de los modos de seguimiento se describen a continuación.

Modo de lazo abierto: Este control implementa un algoritmo de posición solar para estimar la trayectoria aparente del Sol con el fin de generar un punto de ajuste para prelocalizar inicialmente el seguidor. Este modo de seguimiento se ejecuta cuando la posición del seguidor solar no está dentro de la histéresis de seguimiento permitida, la cual se establece según el STE permitido del sistema captador de energía solar o por el FOV del sensor solar utilizado en el lazo cerrado. El seguimiento solar en lazo abierto se activa en dos situaciones: al inicio del seguimiento solar al amanecer y cuando

el sensor solar no es capaz de detectar la posición del Sol, en caso de nubosidad. Al iniciar el sistema de seguimiento, el seguidor debe realizar una prelocalización inicial como se puede observar en la zona Z1 de la Figura 2.22. A lo largo del día, incluso cuando el seguidor solar se ejecuta en modo de lazo cerrado, la posición del seguidor puede salir de la histéresis, como se observa en la zona Z3 de la Figura 2.22, que desactiva el lazo cerrado y activa el seguimiento de lazo abierto. Debido a todos los factores que afectan la estrategia de lazo abierto, su precisión de seguimiento es baja; por lo tanto, después de la prelocalización, la unidad de control cambia a un modo de seguimiento de lazo cerrado.

Modo de lazo cerrado: Este control emplea sensores solares basados en LDR o fotodiodos para retroalimentar el circuito de control; sin embargo, algunos autores utilizan cámaras o la energía generada en las celdas o los módulos fotovoltaicos. Después del modo de lazo abierto, cuando la posición del seguidor solar está dentro de la histéresis de seguimiento permitida, la unidad de control apaga el modo de lazo abierto y establece un punto de ajuste para corregir la posición del seguidor solar, como se muestra en las zonas Z2 y Z4 de la Figura 2.22. Las principales ventajas y desventajas de la estrategia de lazo híbrido se presentan en la tabla 2.6. Esta estrategia de control no se ve afectada por factores que disminuyen la precisión del seguidor solar, como la desviación en la instalación del seguidor solar, errores en la estimación de la posición aparente del Sol por parte del algoritmo de posición solar o errores causados por las condiciones climáticas. En consecuencia, esta estrategia de control presenta mayor confiabilidad, rendimiento y precisión de seguimiento que las estrategias de control en lazo abierto y en lazo cerrado, por lo que es utilizado comunmente en sistemas CPV o HCPV, donde el rendimiento disminuye drásticamente por pequeños errores de seguimiento solar. Es importante tener en cuenta que en esta estrategia de control como la de lazo abierto y cerrado, es necesario considerar los factores de ahorro de energía para evitar un consumo excesivo por una reorientación innecesaria del seguidor solar. Por lo tanto, la frecuencia y tolerancia del seguimiento solar dependerá de la relación costo beneficio de cada sistema de captación de energía solar.

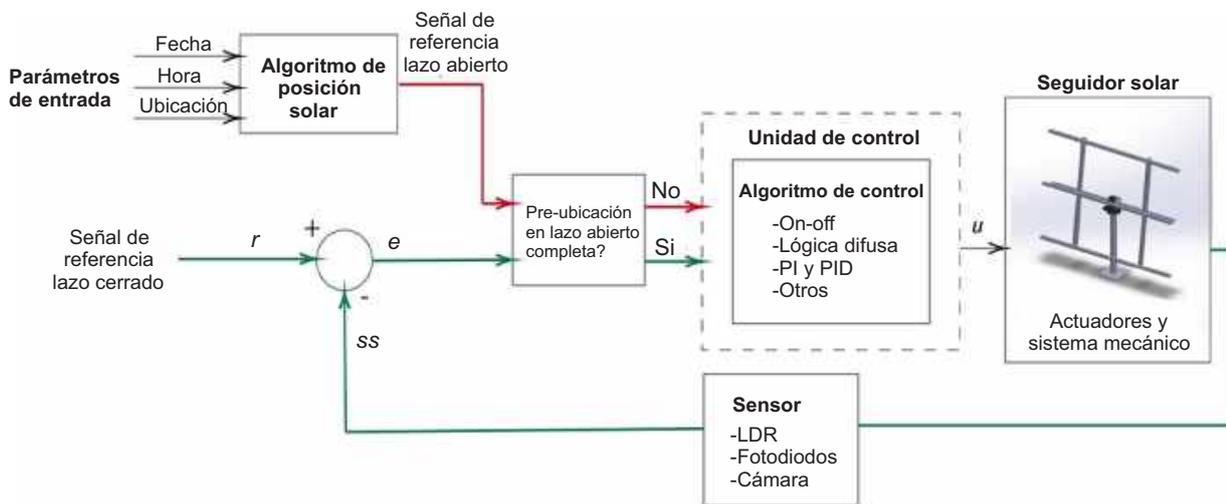


Figura 2.21: Diagrama de bloques estrategia de control de lazo híbrido [72].

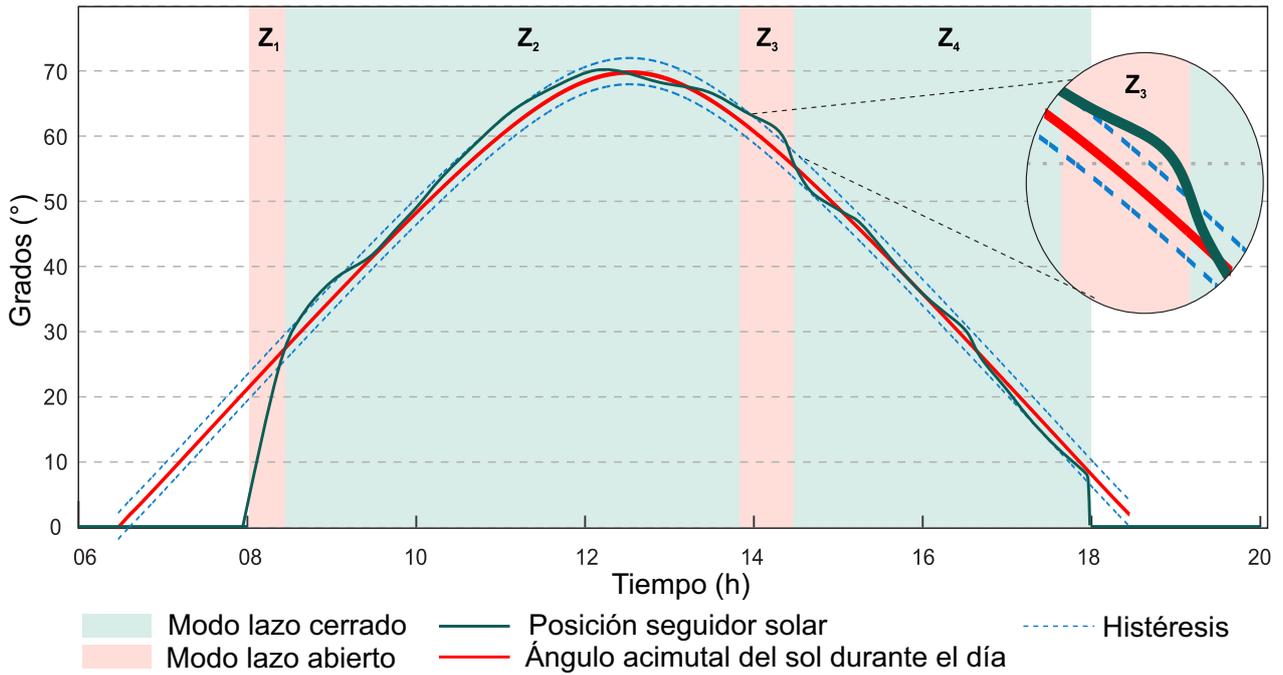


Figura 2.22: Método de localización solar mediante la estrategia de control híbrida [72].

Tabla 2.6: Ventajas y desventajas de la estrategia de seguimiento de lazo híbrido en sistemas de seguimiento solar [72].

Ventajas

- La precisión y exactitud del seguimiento solar son generalmente altas.
- El seguimiento solar se puede realizar incluso en condiciones de nubosidad.
- No requiere calibración continua.

Desventajas

- Requiere la ubicación, hora, fecha y orientación del sistema de seguimiento solar.
- Su implementación es más costosa y compleja que la de lazo abierto y lazo cerrado.
- Requiere un algoritmo de posición solar.
- Requiere un sensor solar.

Para enfatizar el principio de operación de una estrategia de seguimiento solar de lazo híbrido, la Figura 2.23 muestra un diagrama de flujo de una estrategia híbrida típica que emplea un algoritmo de posición solar en el lazo abierto para realizar el control aproximado, y un sensor solar retroalimenta al lazo cerrado para realizar el control fino. A cada condición del proceso se le asigna un número para facilitar la explicación.

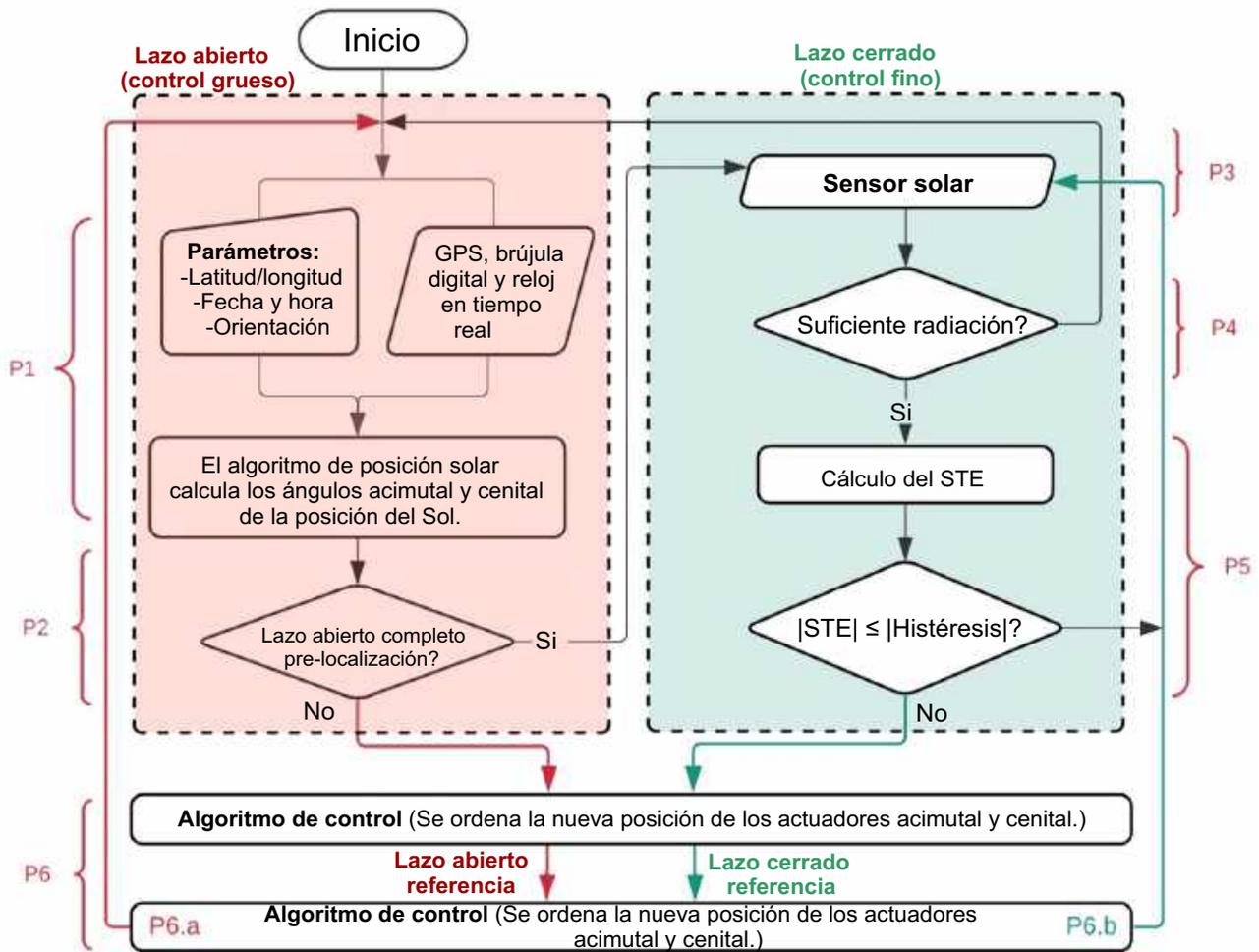


Figura 2.23: Diagrama de flujo estrategia de control de lazo híbrido [72].

- P1. Al iniciar el seguimiento solar, al igual que con la estrategia de lazo abierto, es necesario conocer los parámetros para localizar la posición del Sol utilizando un algoritmo de posicionamiento solar. Estos pueden ingresarse manualmente o generarse mediante GPS.
- P2. A continuación es necesario verificar si se ha realizado la prelocalización completa en lazo abierto. En el caso de que la pre-localización haya finalizado, el sistema continúa con el proceso P3. Generalmente la preubicación se realiza mediante dos métodos: 1) Cuando la posición del Sol está dentro del FOV del sensor solar como se ve en la Figura 2.22 y el sensor solar genera suficiente corriente o voltaje y 2) cuando el STE es menor que un valor preespecificado en el sistema de control (requiere un sensor de posición). Sin embargo, si el proceso de prelocalización no ha finalizado, el sistema pasa al proceso de seguimiento solar P6.
- P3. En esta condición de proceso, los sistemas de seguimiento solar comienzan a operar en lazo cerrado. La posición del Sol se calcula procesando las señales obtenidas de un sensor solar.
- P4. Utilizando las señales del sensor solar, el sistema verifica que la radiación solar sea suficiente para funcionar en lazo cerrado. Si el sensor solar no recibe suficiente radiación solar debido a una oclusión provocada por una nube, el sistema vuelve a P1. Esta estrategia garantiza que incluso en condiciones de nubosidad el sistema de seguimiento solar pueda seguir funcionando calculando la posición del Sol con el algoritmo de posicionamiento solar.
- P5. El sistema calcula el STE. Generalmente se compara con una histéresis predefinida para reducir

el consumo de energía en el seguidor solar. Si STE es menor o igual a la histéresis, el sistema regresa a P3. En algoritmos de control donde no hay histéresis, solo se calcula el STE y continúa en la siguiente etapa del proceso.

P6. Hay dos formas de llegar a esta condición de proceso.

- a. Desde P2 (lazo abierto). Se establece un punto de consigna con un algoritmo de posición solar. El algoritmo de control comanda la nueva posición angular y los actuadores acimutal y cenital mueven el seguidor solar a una nueva posición. Después de este proceso, el sistema regresa a P1 para continuar con el seguimiento solar de lazo abierto.
- b. Desde P5 (lazo cerrado). El punto de consigna generalmente se establece en 0. El algoritmo de control comanda la nueva posición angular y los actuadores mueven el seguidor solar a la nueva posición. Después de este proceso, el sistema regresa a P3 para continuar con el seguimiento solar en lazo cerrado.

De los trabajos considerados en esta revisión, el 16.67 % utiliza una estrategia de seguimiento solar híbrida como se observa en la Tabla 2.3, de los cuales el 47.37 % implementa un control on-off, el 15.79 % un PID, el 10.53 % un control PI y el 26.31 % otros tipos de algoritmos de control. Como en el caso de lazo abierto y cerrado, el algoritmo de control onoff es el más utilizado en la estrategia de seguimiento solar híbrida debido a su facilidad y bajo costo de implementación. En los trabajos de Yao [136], Burhan y colaboradores [77], Song y colaboradores [137], Zhang y colaboradores [79] y Liu y colaboradores [138], propusieron varias estrategias de seguimiento solar utilizando una innovadora matriz de fotosensores. Estos estudios lograron STE de 0.15° , $<0.3^\circ$, 0.1° , $<0.91^\circ$ y 0.5° , respectivamente. Es importante resaltar que la mayoría de las veces estos estudios carecen de la metodología para estimar el STE. De manera similar, un estudio de Ferdaus y colaboradores [139] presentaron un sistema de seguimiento solar híbrido de dos ejes controlado por un algoritmo de control on-off que generaba un 25.62 % más de energía promedio que un sistema fotovoltaico fijo y la misma energía que un sistema seguimiento solar continuo basado en una matriz LDR. El ahorro de energía en el sistema híbrido, sin embargo, fue un 44.44 % mayor que en el seguimiento solar continuo. Finalmente, otro estudio utiliza la segunda derivada de la energía producida para el movimiento óptimo de un sistema de seguimiento solar de uno y dos ejes [140]. Los autores mencionan que el método propuesto puede lograr una mayor producción de energía anual de hasta un 2 % en comparación con los sistemas de seguimiento solar de lazo cerrado con una frecuencia de seguimiento cada 2 h.

Los algoritmos de control clásico se utilizan en estrategias híbridas debido a su facilidad de implementación y ajuste. Rubio y colaboradores [63] presentaron una estrategia basada en un algoritmo de posición solar como control grueso y retroalimentación dinámica como control fino. Este trabajo utilizó un controlador PI con un STE experimental de 0.15° , y el aumento de energía logrado en comparación con una estrategia de seguimiento solar de lazo abierto fue del 40 %. Además, los mismos autores diseñaron e implementaron una rutina de corrección de errores para sustituir el controlador PI del trabajo anterior [73]. Por otro lado, en el trabajo de Mao y colaboradores [141] se emplea un controlador PID en un sistema híbrido que utiliza un algoritmo de posicionamiento solar mediante un GPS y un fotosensor de cuatro cuadrantes. El STE informado fue de 0.15° . De la misma manera, un controlador PID MDOF-SUI para un sistema de seguimiento solar se simuló en el entorno Matlab/Simulink® [74]. La salida del controlador se establece mediante una ecuación de pesaje del control grueso realizado por un SPA y el control fino realizado con un sensor solar.

Recientemente, también se ha estudiado el rendimiento de los sistemas de seguimiento solar híbridos impulsados por algoritmos de control modernos. Hammad y colaboradores [142] simularon el desempeño de una estrategia híbrida a través de un algoritmo de posición solar y con retroalimentación de un sensor de posición del Sol. Este trabajo emplea un control adaptativo para accionar los actuadores, mostrando una rápida convergencia. En la investigación de Kim y Cho [143] se propuso

un sistema CPV con seguimiento solar a través de cuatro métodos para calcular la posición del Sol, el cual es seleccionado por una red bayesiana de reconocimiento climático. Tres de estos algoritmos se basan en el procesamiento digital de imágenes adquiridas por una cámara web estenopeica y el cuarto algoritmo utiliza un algoritmo de posición solar para estimar la posición del Sol. El trabajo de Azizi y Ghaffari [144] presentó un control de lógica difusa con un STE $<0.15^\circ$ donde el control aproximado se realiza mediante LDR y el control fino mediante un método de procesamiento de imágenes adquiridas con una cámara. Cuando el nivel de radiación solar no es lo suficientemente grande, los autores consideran un modo de ahorro de energía en el que se realiza un retraso el seguimiento solar y el sistema mantiene la última posición. Finalmente, Alorda y colaboradores [145] presentan un novedoso concentrador solar de espejo fijo. En este estudio, el colector se mueve para recibir la radiación solar reflejada en los espejos fijos a través de un seguidor solar de un eje impulsado por un control distribuido colaborativo que intenta mantener la máxima eficiencia de conversión de energía en el sistema. La estrategia híbrida se realizó mediante un algoritmo de posición solar y un algoritmo de ajuste fino que busca la posición óptima para capturar la máxima concentración de flujo. Este sistema se implementó como un sistema distribuido de red de área de controlador (CAN). Es importante destacar que en cualquier estrategia de seguimiento solar es más complicado implementar un algoritmo de control moderno que una algoritmo de control clásico. Por lo tanto, algunas de los algoritmos de control modernos estudiados en la literatura solo se han reportado en simulaciones numéricas.

2.9. Clasificación alternativa de algoritmos de control aplicados en sistemas de seguimiento solar

La selección de la unidad de control depende de diferentes factores, como su velocidad de procesamiento, coste, autonomía, consumo energético, disponibilidad en el mercado, complejidad de programación, entre otros, existiendo dos principales unidades de control para seguidores solares: PCs y μ Cs. La Figura 2.24 muestra una clasificación alternativa de algoritmos de control aplicada a sistemas de seguimiento solar teniendo en cuenta su unidad de control. Los trabajos se realizan principalmente utilizando Matlab/Simulink® y LabVIEW®, los cuales cuentan con cajas de herramientas específicas para sistemas de control que facilitan la programación, caracterización y análisis del rendimiento del sistema.

La principal desventaja de una PC es su falta de autonomía y su elevado costo. Del mismo modo, los μ C y PC son las principales unidades de control para estudios experimentales. En lo que respecta a los algoritmos de control clásicos, el control on-off se ha ejecutado prácticamente en cualquier unidad de control: PC, μ C, electrónica básica, PLC, Raspberry Pi, Arduino, PLA y relé inteligente. Los algoritmos PI y PID se ejecutan regularmente en μ C o PC porque requieren una mayor velocidad de procesamiento y su complejidad es mayor que el control on-off.

La ejecución de estos algoritmos en μ Cs requiere la discretización de las señales, lo que hace relativamente más compleja su implementación. Las unidades de control adecuadas para algoritmos clásicos podrían ser las μ C y sistemas embebidos de bajo costo debido a la facilidad de programación, bajo costo, autonomía, bajo consumo energético y alta disponibilidad y variedad en el mercado. Por el contrario, los algoritmos de control modernos no se implementan en sistemas integrados de bajo costo debido a su alta complejidad de programación y la alta capacidad computacional requerida; Estos algoritmos de control son aptos para ser programadas en μ C o PC.

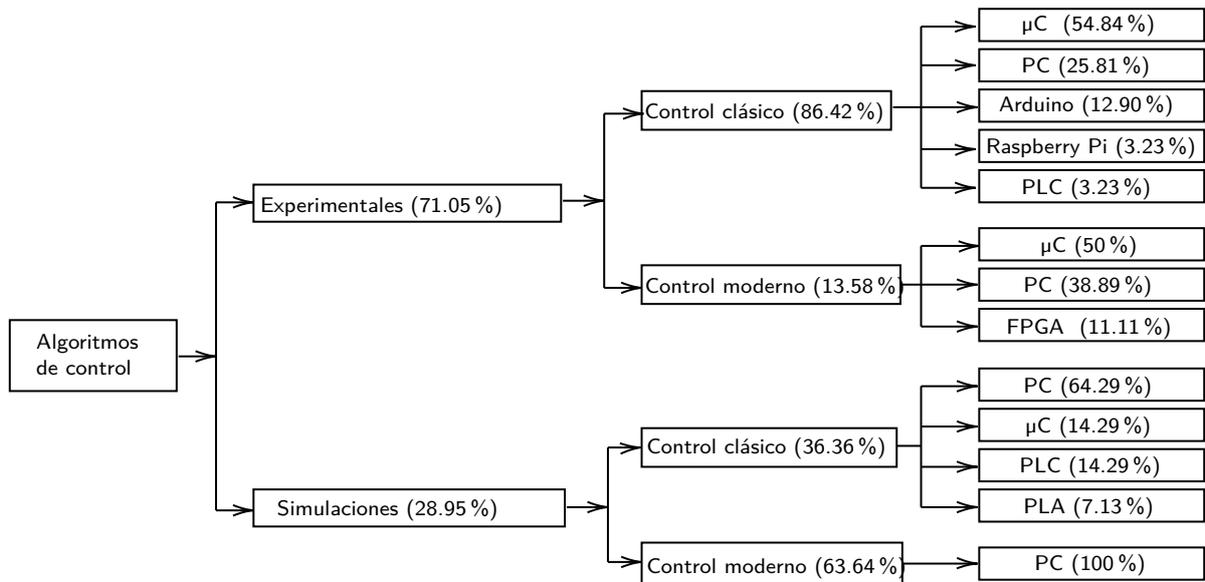


Figura 2.24: Clasificación alternativa de algoritmos de control aplicados en sistemas de seguimiento solar basada en la unidad de control [72].

2.10. Modelo matemático de un servomecanismo con salida en posición

El diagrama eléctrico y mecánico de un motor de CD se muestra en la Figura 2.25.

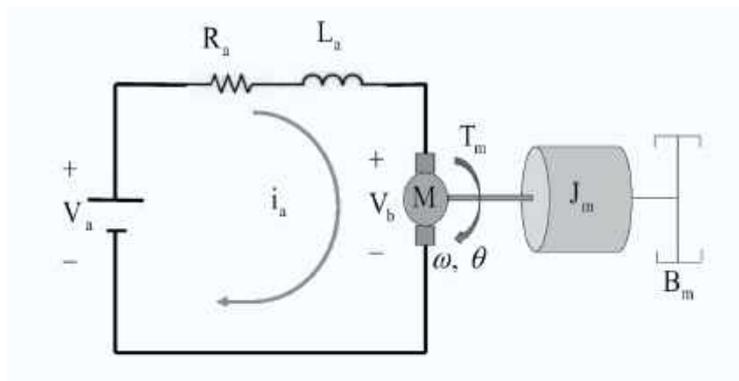


Figura 2.25: Diagrama eléctrico y mecánico de un servomecanismo [146].

Empleando la ley de mallas de Kirchhoff se obtiene la Ecuación diferencial (2.3) que representa el sistema eléctrico,

$$V_a - V_b = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt}, \quad (2.3)$$

donde i_a , R_a y L_a son la corriente, resistencia y la inductancia de la armadura, respectivamente. V_a es el voltaje de entrada aplicado a la armadura, V_b representa el voltaje de la fuerza contraelectromotriz

que es proporcional a la constante de fuerza electromotriz K_b multiplicada por la velocidad angular del motor como se muestra en la Ecuación 2.4,

$$V_b = K_b \frac{d\theta}{dt}. \quad (2.4)$$

Mediante la segunda ley de Newton el sistema mecánico se representa en la ecuación 2.5,

$$J_m \frac{d^2\theta}{dt^2} + B_m \frac{d\theta}{dt} = T_m, \quad (2.5)$$

donde J_m representa el momento de inercia, B_m el coeficiente de fricción viscosa y T_m es el par electromagnético del motor. La relación par-corriente entre el sistema eléctrico y el sistema mecánico es $T_m = K i_a$, donde K es la constante de par del motor. Si el voltaje V_a se produce mediante una etapa de amplificación de potencia se tiene que $V_a = K_a v$, donde K_a es la ganancia de amplificación y v el voltaje de entrada.

El diagrama de bloques en donde se relaciona la parte eléctrica y mecánica del motor se presenta en la Figura 2.26. Considerando una retroalimentación de corriente, donde β representa la ganancia de amplificación de corriente, se obtiene el diagrama de bloques de la Figura 2.27. Simplificando el diagrama de bloques y comparando con la desigualdad 2.6 y suponiendo un valor de β elevado, se obtiene el modelo que se presenta en la Figura 2.28.

$$\frac{R_a + K_A \beta}{L_a} > \frac{B_m}{J_m}. \quad (2.6)$$

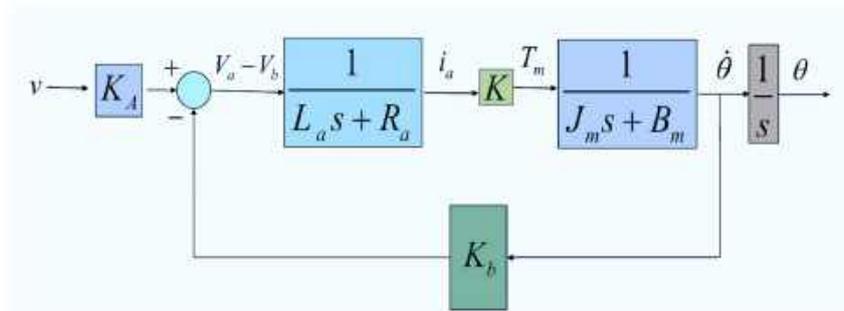


Figura 2.26: Diagrama de bloques de un servomecanismo [146].

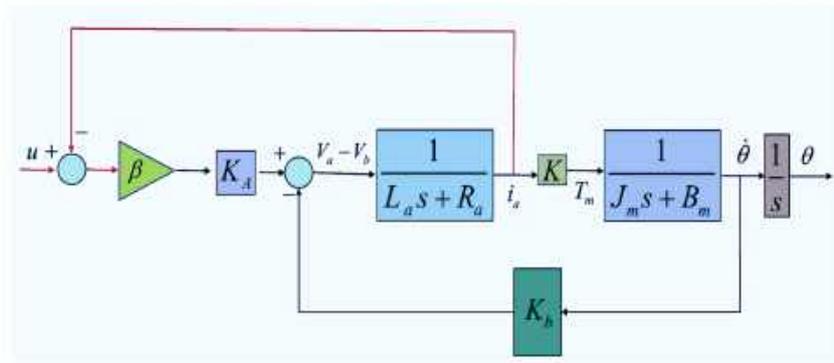


Figura 2.27: Diagrama de bloques de un servomecanismo con realimentación de corriente [146].

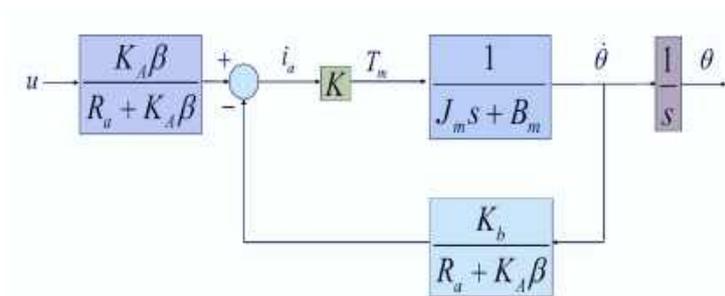


Figura 2.28: Diagrama de bloques de segundo orden de un servomecanismo [146].

Reduciendo el diagrama de bloques de la Figura 2.28 se obtiene la función de transferencia que representa el sistema, que esta dada por la Ecuación 2.7

$$\frac{\theta(s)}{u(s)} = \frac{b}{s(s+a)}, \quad (2.7)$$

en donde se definen las variables a y b en las Ecuaciones, 2.8 y 2.9.

$$a = \frac{KK_b}{(R_a + K_A\beta)} + B_m, \quad (2.8)$$

$$b = \frac{KK_A\beta}{(R_a + K_A\beta) J_m}. \quad (2.9)$$

Capítulo 3

Metodología

En este capítulo se describe la metodología empleada en el diseño, construcción, caracterización eléctrica y evaluación del algoritmo de control propuesto para el sistema PD-CPVT. Primero, se detallan los materiales de los principales componentes del sistema: las celdas fotovoltaicas, el SOE y el colector de disco parabólico (Sección 3.1 y 3.2). A continuación, se aborda el diseño y análisis óptico del receptor (Sección 3.3). Además, se explican el diseño y construcción del receptor, la estructura de soporte y el sistema de enfriamiento activo (Sección 3.4). Posteriormente se presenta la obtención del modelo matemático de los motores del seguidor solar mediante el método de identificación paramétrica (Sección 3.5.1). Después, se llevan a cabo pruebas experimentales implementando algoritmos de control clásico para seleccionar el más adecuado para el seguidor solar (Sección 3.5.4). Posteriormente, se presenta la propuesta y la implementación del algoritmo de control en el sistema (Sección 3.5.7). También se presenta un análisis del consumo eléctrico de los servomotores del seguidor solar empleando algoritmos de control clásico (Sección 3.5.11). Finalmente, se presenta la evaluación del rendimiento eléctrico del sistema PD-CPVT y la configuración experimental utilizada (Sección 3.6).

3.1. Celdas fotovoltaicas y elemento óptico secundario

El sistema PD-CPVT propuesto requiere un receptor diseñado con celdas fotovoltaicas de triple unión de 5.5 x 5.5 mm. Estas celdas están compuestas de Fosforo de Indio y Galio/Arseniuro de Galio/Germanio (InGaP/InGaAs/Ge), y fueron elegidas por su alta calidad y disponibilidad en el mercado. Además, la celda tiene una eficiencia del 39% y ha sido optimizada para operar a 1000 soles y 25°C bajo el espectro de referencia directa ASTM G173-03. Sin embargo, a partir de concentraciones superiores a 200 soles, la eficiencia está por encima del 38% [147]. Para el funcionamiento eficiente de estas celdas, es importante utilizar un elemento óptico secundario (SOE) que pueda distribuir la energía de manera uniforme. Estos elementos redirigen la luz solar hacia la celda y minimizan el efecto de los errores de seguimiento solar, lo que resulta en una alta eficiencia eléctrica [148]. En este estudio, se utilizaron SOE refractivas de vidrio BK7 tipo caleidoscopio. Su parte superior tiene forma de elipse, mientras que la parte inferior tiene forma de pirámide con una superficie cuadrada que coincide con las dimensiones de la celda. El SOE tiene un ángulo de apertura de 79.04° (ver Figura 3.1a). El SOE fue diseñado para otro sistema con diferentes parámetros de concentración; por lo tanto, se construyó una cubierta de geometría piramidal hecha de material altamente reflectante para cubrir los lados de la pirámide SOE para optimizar la eficiencia del sistema al dirigir los rayos hacia la celda fotovoltaica, como se muestra en la Figura 3.1b. Estas cubiertas fueron hechas de aluminio altamente reflectante y unidas a una lámina de aluminio rectangular mediante pestañas. Luego se aseguró la lámina para soportar los SOEs en la parte inferior.

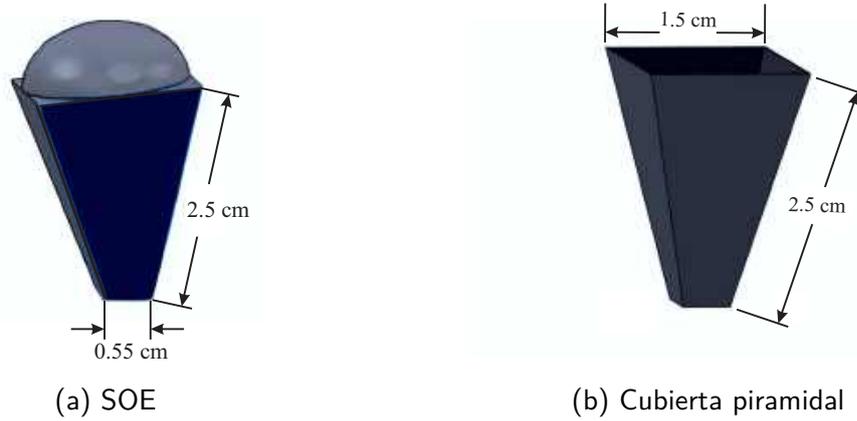


Figura 3.1: Características del SOE y cover utilizado.

3.2. Colector de disco parabólico

La tecnología CPV suele utilizar lentes de Fresnel como elemento de concentración solar porque son económicas, livianas, adaptables y fáciles de manejar. Sin embargo, estas lentes tienen algunos inconvenientes, entre ellos una baja resistencia mecánica y una alta susceptibilidad a la suciedad y la degradación con el tiempo. Además, en comparación con los concentradores parabólicos, estas lentes generalmente tienen una eficiencia óptica más baja, son más complejas de fabricar y tienen mayores limitaciones de concentración.

Por lo anterior, el sistema propuesto emplea un espejo parabólico de acrílico para la construcción del concentrador [149]. Este espejo tiene una reflectividad del 97 %, diámetro $D=89.53$ cm y profundidad $d=8.46$ cm (ver Figura 3.2). Con las ecuaciones de Thakkar en [150], se calculó el área de apertura $A=6296\text{cm}^2$, distancia focal $f=59.18$ cm y un ángulo de borde $\phi = 41.43^\circ$. Para realizar un diseño preciso y análisis óptico del sistema propuesto, se utilizó la técnica de fotogrametría para validar las dimensiones del colector.

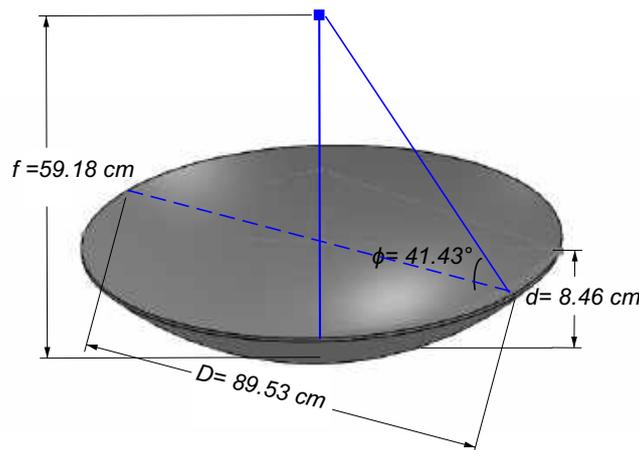


Figura 3.2: Dimensiones del colector.

3.2.1. Fotogrametría

La fotogrametría es una técnica de medición que implica adquirir imágenes de un objeto para definir sus propiedades geométricas. Esta técnica utiliza la información de múltiples imágenes tomadas desde diferentes perspectivas para evaluar la estructura tridimensional de un objeto [151]. Esta técnica se utilizó para calcular los parámetros geométricos del espejo parabólico con precisión. Al principio, se aplicó una malla de puntos retrorreflexivos y tres objetivos codificados utilizados como puntos de referencia en la parte posterior de la superficie del colector utilizando material auto adhesivo. Luego, se capturaron 21 imágenes de la superficie del espejo desde diferentes ángulos (ver Figura 3.3a). Finalmente, el software Photomodeler® calculó la distancia entre los puntos de referencia de las imágenes, determinando la curvatura del colector de disco parabólico como se ve en la Figura 3.3b. Con estos parámetros fue posible calcular los valores de A , f y ϕ . La tabla 3.1 muestra una comparación entre los parámetros enumerados en la hoja de datos y las mediciones reales. Se puede observar que las dimensiones del disco parabólico estimadas mediante la técnica de fotogrametría son muy cercanas a las proporcionadas por el fabricante, lo que indica una alta calidad de fabricación. Así las medidas estimadas de fotogrametría se emplearon tanto para fines de simulación como de diseño.

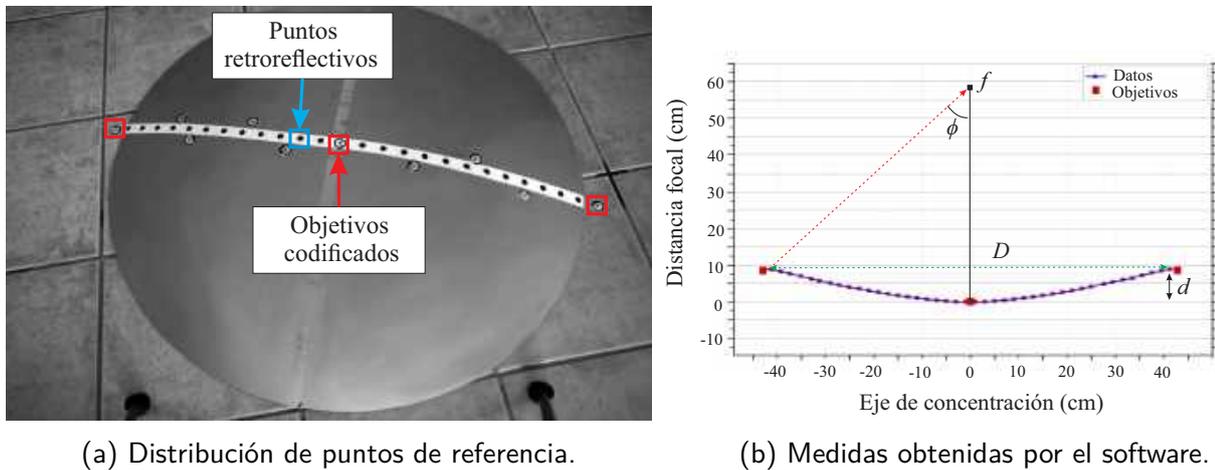


Figura 3.3: Técnica de fotogrametría.

Tabla 3.1: Parámetros de diseño del disco parabólico.

Parámetros	Datos fabricante (cm)	Software (cm)
Diámetro (cm)	89.53	89.50
Área de apertura (cm ²)	6296	6291
Profundidad (cm)	8.46	8.45
Distancia focal (cm)	59.18	59.20
Ángulo de borde (°)	41.53	41.40

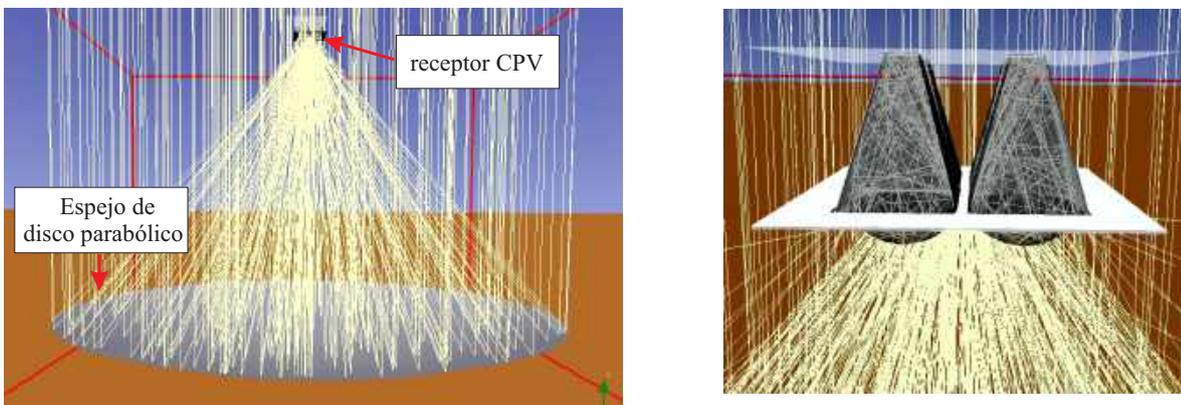
3.3. Diseño y análisis óptico

Para analizar la concentración y distribución espacial del flujo de radiación en el punto focal del disco colector, se realizó una simulación de trazado de rayos utilizando el software Tonatiuh® [152]. Este método se utiliza comúnmente para diseñar, optimizar y dimensionar sistemas solares con capacidades de concentración. La simulación tiene en cuenta varios factores, como la geometría,

los materiales utilizados, la forma de la fuente solar, el número de rayos y la inclinación, entre otros. La simulación se centró en el concentrador, receptor y SOE como elementos principales. La configuración utilizada en la simulación es la siguiente: forma solar tipo pillbox, irradiancia solar de $1 \times 10^3 \text{ W/m}^2$ y ángulo de elevación solar de 90° para asegurar que los rayos del Sol siempre incidan perpendicularmente en la superficie. El espejo parabólico y la cubierta SOE se definieron con material especular estándar y reflectividades del 97 % y 95 %, respectivamente. Los parámetros del vidrio del SOE se configuraron con un índice de refracción de 1.51, una transmisividad de 0.8 y una reflectividad de 0.245 [153].

3.3.1. Análisis del factor de concentración

La celda fotovoltaica con el SOE se colocó en el punto focal del disco parabólico en la simulación, lo que resultó en un factor de concentración promedio de 1961 soles. Sin embargo, este nivel de concentración excedió la capacidad de la celda, que está diseñada para manejar un máximo de 1000 soles [147]. Para abordar este problema, se desarrolló una matriz formada por un conjunto de cuatro celdas y se conectaron en serie para reducir el factor de concentración a un nivel que la celda pudiera soportar. Este conjunto de celdas se colocó fuera del foco del concentrador para garantizar uniformidad y altos niveles de radiación en todas las celdas. La Figura 3.4a ilustra los elementos considerados en la simulación, y la Figura 3.4b muestra la trayectoria de los fotones en la matriz de cuatro celdas con sus respectivos SOEs. La concentración solar promedio alcanzada en las cuatro celdas fue de 460 soles, que se encuentra dentro del rango de operación de la celda fotovoltaica y asegura que la celda tenga una eficiencia eléctrica mayor al 38 % [147]. Es fundamental aclarar que este resultado no considera errores aleatorios que ocurren por seguimiento solar, instalación o la flexión de la estructura del seguidor, pérdidas espectrales, pérdidas por desajuste eléctrico debido a la conexión en serie de las cuatro celdas, por lo que se espera que los valores experimentales obtenidos por el prototipo sean menores.



(a) Espejo de disco parabólico y receptor CPV. (b) Trayectoria de los fotones en la matriz de celdas.

Figura 3.4: Diseño óptico del receptor CPVT.

3.3.2. Análisis de no uniformidad del receptor CPVT

La ubicación ideal del receptor CPVT estuvo determinada principalmente por dos parámetros: el flujo de radiación y el índice de no uniformidad (N_i) en el receptor. Este último cuantifica la distribución del flujo de radiación en el receptor y se calcula con base en la Ecuación 3.1. Un índice de uniformidad cercano a cero indica una mejor distribución [154].

$$N_i = \left| \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \right|, \quad (3.1)$$

donde I_{max} es el máximo valor y I_{min} es el valor mínimo de flujo luminoso en el receptor, respectivamente.

La Figura 3.5 muestra los comportamientos de la distribución del flujo incidente en la celda superior izquierda del conjunto de cuatro celdas a diferentes distancias del foco del colector (df). Cuando el receptor está precisamente en el punto focal f , situado a 59.2 cm de la base del colector, $df=0$ cm. En ese momento, el índice de no uniformidad fue de 0.521 y el flujo medio fue 3.05×10^5 W/m². Cuando el receptor se mueve por encima del punto focal distancias negativas, por ejemplo, $df=-1.2$ cm, $df=-0.8$ cm y $df=0.4$ cm, los índices de no uniformidad resultantes fueron 0.459, 0.549 y 0.564, respectivamente (ver Figura 3.5b, 3.5c, 3.5d). Además, los flujos promedio fueron 3.29×10^5 W/m², 3.49×10^5 W/m² y 3.39×10^5 W/m², en el mismo orden. Por el contrario, cuando el receptor se mueve después del punto focal, en este caso, cuando $df=0.4$ cm y $df=0.8$ cm, los índices de no uniformidad son 0.402 y 0.370, respectivamente (ver Figura 3.5e, 3.5f). Los flujos medios fueron 2.73×10^5 W/m² y 2.93×10^5 W/m², en ese orden. En todos los análisis presentados en la Figura 3.5, es evidente que la distribución del flujo no es uniforme en la celda fotovoltaica. Algunas áreas muestran un alto nivel de concentración, mientras que otras tienen una concentración baja o nula. Esto crea estrés térmico en la celda fotovoltaica, lo que lleva a una reducción significativa de su rendimiento e incluso puede causar daños irreversibles [155]. Además, se observó que el comportamiento promedio del flujo es no lineal cuando el receptor se mueve antes y después del punto focal. El índice de no uniformidad y el flujo promedio son considerablemente afectados cuando el receptor CPVT se desplaza ligeramente. Con el fin de encontrar la posición óptima con mayor flujo de radiación promedio y un índice de no uniformidad más bajo, el rendimiento de la simulación del receptor CPVT se analizó con df de -1,2 cm a 4,8 cm. Los resultados se presentan en la Sección 4.

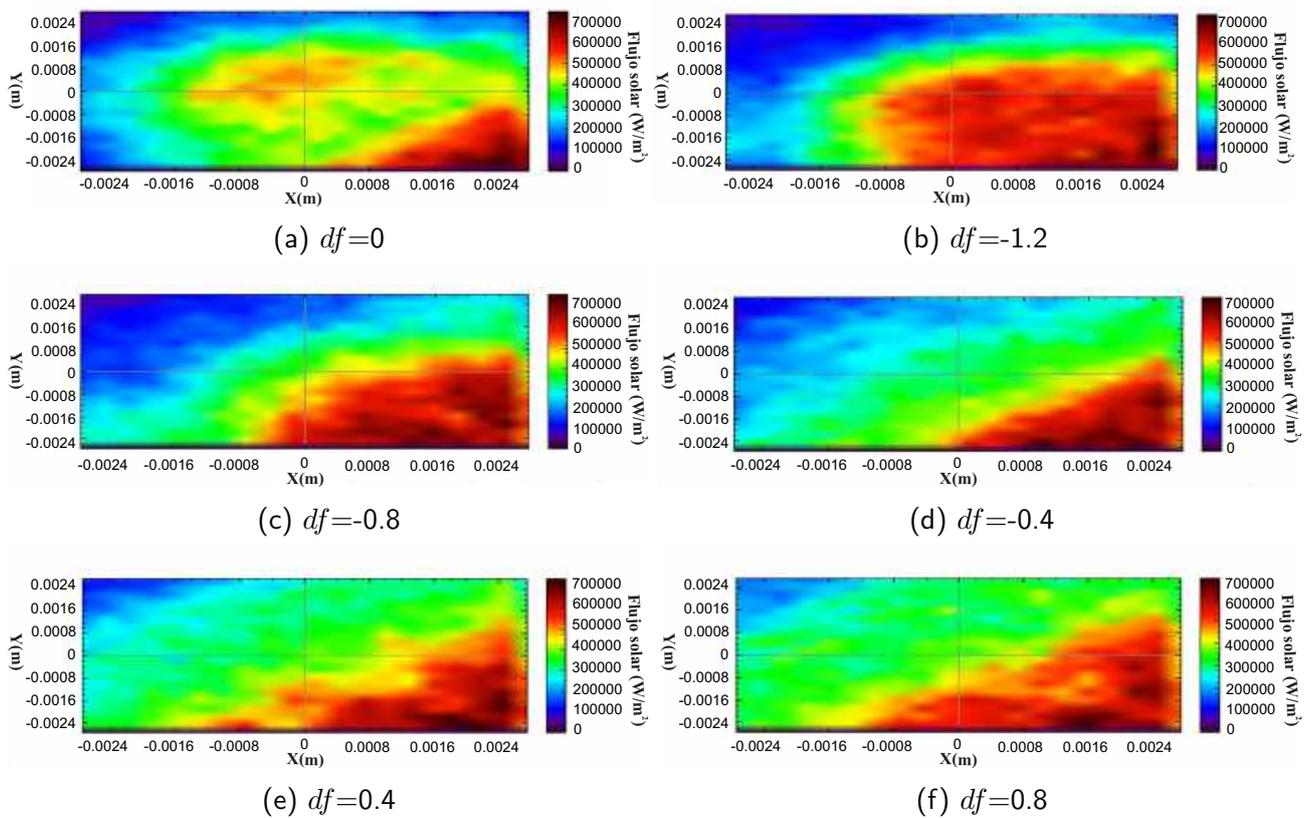


Figura 3.5: Distribución de flujo incidente a diferentes distancias del punto focal.

3.4. Diseño y construcción del sistema PD-CPVT

Esta sección describe el diseño y la construcción del sistema PD-CPVT y su sistema de enfriamiento. Se detallan los materiales utilizados en la fabricación de ambos sistemas, destacando sus propiedades técnicas y su adecuación a los requerimientos del sistema. Además, se presentan las especificaciones técnicas clave que sustentan el diseño y su funcionalidad.

3.4.1. Receptor CPV

El receptor propuesto fue diseñado con elementos removibles. Dispone de una base para las celdas CPV, una estructura de soporte para los SOE, una cubierta protectora y caja para fijar todos los elementos. La estructura de soporte de los SOEs tiene forma rectangular con extremos doblados a 90°. Esta estructura permite una alineación precisa de los SOEs y cubre las celdas CPV, como se muestra en la Figura 3.6a. La cubierta protectora del receptor cubre todos los componentes y está asegurada a la base de las celdas (ver Figura 3.6b). Estos elementos fueron fabricados con aluminio calibre 16, que es un material liviano, resistente a la corrosión y altamente conductor térmico. El soporte para los SOEs, la cubierta para los SOEs y la caja de protección se muestran en la Figura 3.7a, 3.7b y 3.7c respectivamente.

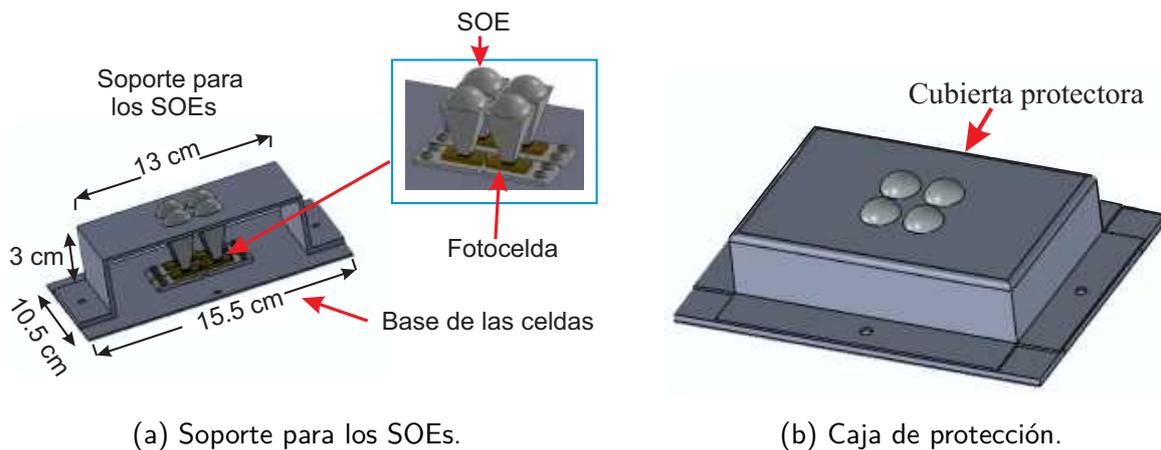


Figura 3.6: Diseño del receptor.



Figura 3.7: Construcción del receptor.

3.4.2. Estructura de soporte

El sistema PD-CPVT está expuesto a diversos factores ambientales a lo largo del día, como cargas de viento, vibraciones, humedad y altas temperaturas. Por lo tanto, es crucial garantizar que

la estructura de soporte que sostiene el colector parabólico y el receptor solar sea muy resistente y duradera. La estructura propuesta comprende principalmente la base del colector, la base del receptor, y las barras de soporte con varillas roscadas como se muestra en la Figura 3.8a. Para crear la base del colector, se soldaron dos barras planas de acero para formar una cruz que luego se dobló para que coincidiera con la curvatura del espejo. Se agregaron cerraduras a la base para facilitar la fijación al marco del seguidor solar (ver Figura 3.8b). La base rectangular del receptor fue diseñada específicamente para atornillarse a su caja protectora. Está formado por cuatro placas de sujeción que se encargan de su fijación segura. La base del colector está conectada al receptor mediante cuatro barras de soporte con varillas roscadas para mantener la distancia focal mencionada anteriormente. Se utilizaron pestañas de acero cubiertas con goma para sujetar el espejo en su lugar de forma segura y evitar daños a la superficie reflejante. La Figura 3.9a muestra la integración de la base del receptor con las barras de soporte. La vista trasera se muestra en la Figura 3.9b, mientras que su vista lateral del sistema PD-CPVT se muestra en la Figura 3.9c.

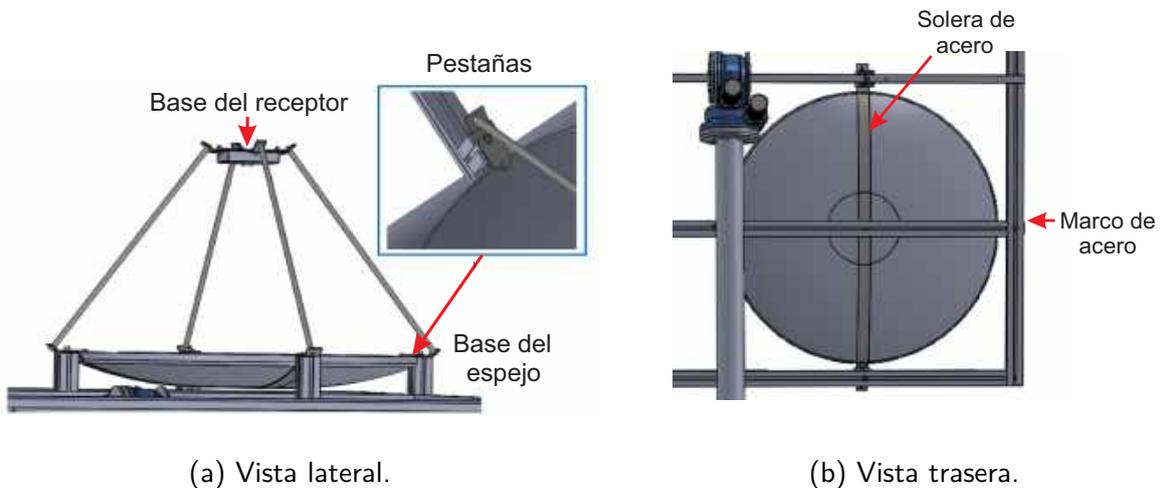


Figura 3.8: Diseño de la estructura de soporte del PD-CPVT.

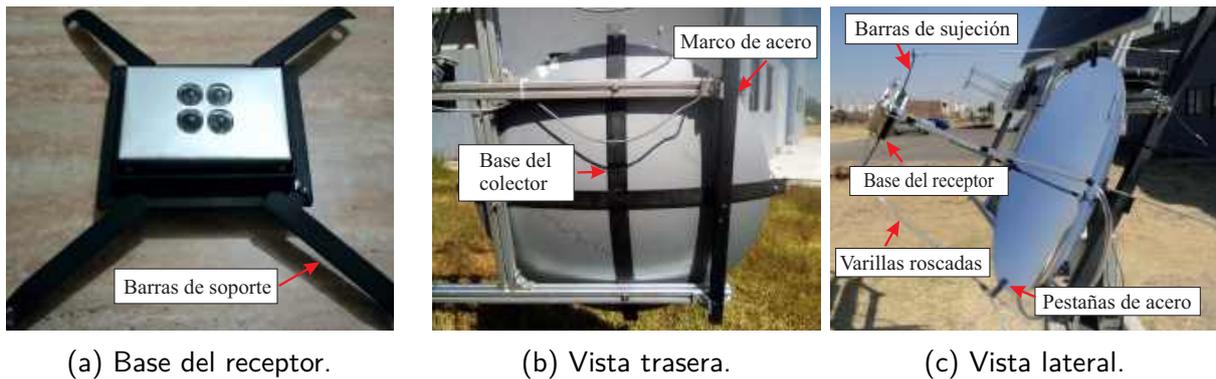


Figura 3.9: Construcción de la estructura de soporte del PD-CPVT.

3.4.3. Sistema de enfriamiento activo

Las celdas CPV requieren un sistema de enfriamiento que las mantenga a una temperatura ideal durante todo el día para mantener una alta eficiencia de conversión de energía y evitar daños por sobrecalentamiento. Basado en los resultados de la simulación óptica y la experimentación, el nivel de concentración en cada celda solar es superior a 100 soles. Como resultado, es factible utilizar un disipador de calor activo con aletas rectas que sirvan como canales para la circulación de agua como

fluido refrigerante. El disipador de calor propuesto tiene ocho aletas rectangulares perpendiculares a la base, que hacen contacto con la parte posterior de las celdas (consulte la Figura 3.10a). Las dimensiones del disipador de calor, las aletas y su separación se muestran en la Figura 3.10b. Además, se diseñó una cubierta protectora para encerrar el disipador de calor, que contiene el agua que circula por los canales. Cuenta con un tubo para entrada y salida de fluido, que se puede ver en la Figura 3.10c. Con base en el tamaño del disipador de calor y las propiedades de sus aletas, fue factible determinar especificaciones adicionales como el diámetro de los tubos de entrada y salida de fluido, el flujo másico y la capacidad de la bomba de agua [156]. En primer lugar, el diámetro de los tubos de entrada/salida de fluido de 8 mm se obtuvo de la Ecuación 3.2, considerando la altura de las aletas ($b = 0.3\text{cm}$) y su separación ($Wc = 0.5\text{cm}$),

$$Dh = \frac{4bWc}{2(b + Wc)}. \tag{3.2}$$

Luego, se pudo determinar el flujo másico (m) que circula por todos los canales del disipador de calor, que es la magnitud física que representa la variación de la masa del fluido con respecto al tiempo en un área específica. A partir de Dh , el número de Reynolds ($Re = 2000$), el número de aletas ($N = 8$) y la viscosidad del fluido ($\mu = 792.4 \times 10^{-6}$), el flujo másico m fue calculado a partir de la Ecuación 3.3,

$$m = \frac{ReNbWc\mu}{Dh}. \tag{3.3}$$

Finalmente, conociendo el valor de $m = 0.237\text{kg/s}$ y la densidad del agua ($\rho = 996\text{kg/m}^3$), la capacidad mínima requerida de la bomba de agua (ΔV) se calculó mediante la Ecuación 3.4, obteniendo un $\Delta V = 14.3\text{Lpm}$. Es importante mencionar que en futuros trabajos se presentará la simulación detallada y caracterización térmica del disipador de calor.

$$\Delta V = \frac{m}{\rho}. \tag{3.4}$$

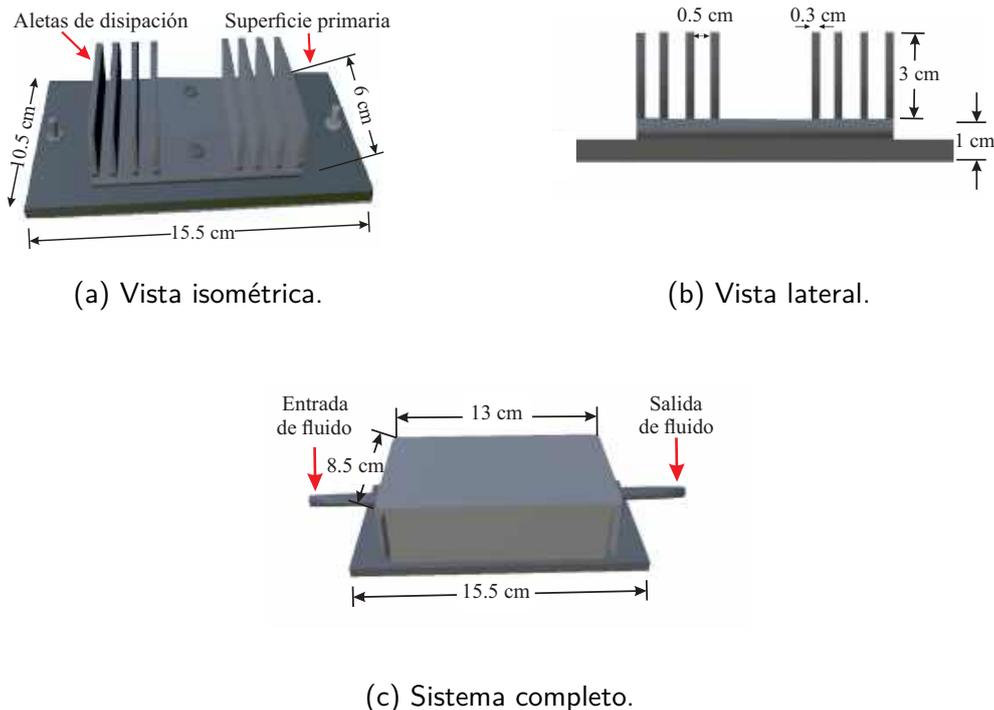


Figura 3.10: Diseño del sistema de enfriamiento.

Una vez completado el diseño del disipador de calor, se comenzó la construcción utilizando aluminio 6063-T5 como material principal. El aluminio fue una excelente opción debido a su conductividad térmica superior, su no toxicidad, peso ligero, resistencia a la corrosión y la humedad, alta dureza y maleabilidad lo que lo hace perfecto para su uso en exteriores. Su punto de fusión es de aproximadamente 600°C que también lo convierte en una opción ideal para trabajar a altas temperaturas sin sufrir alteraciones. Para evitar fugas de agua, los elementos del disipador de calor se soldaron entre sí, utilizando un electrodo de tungsteno y gas argón. El sistema de refrigeración se fijó al receptor mediante tornillos de aluminio, lo que hizo que fuera fácil de instalar y quitar. La Figura 3.11a muestra el disipador de calor utilizado, incluidas sus aletas de disipación y superficie primaria. El sistema completo, incluidos sus tubos de entrada/salida de fluido, se presenta en la Figura 3.11b.

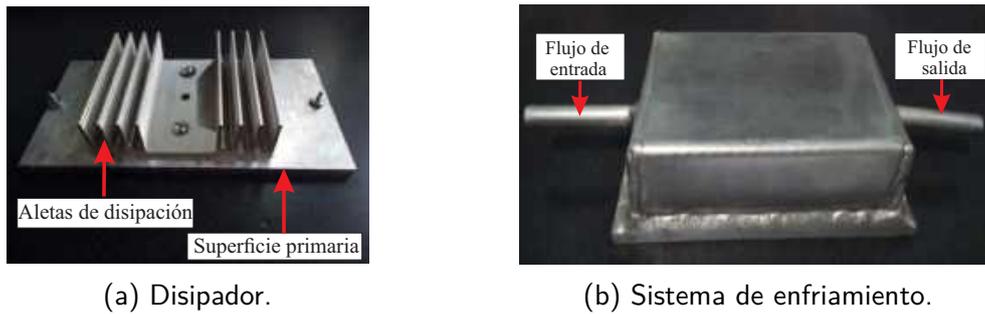


Figura 3.11: Construcción del sistema de enfriamiento.

3.5. Sistema de seguimiento solar

3.5.1. Estimación paramétrica del servo-mecanismo

Antes de implementar algoritmos de control en los servomotores del seguidor solar, es importante conocer su dinámica, esto implica obtener el modelo matemático que los represente adecuadamente. Mediante dicho modelo es posible determinar las ganancias del controlador empleando algún método de sintonización. Existe una gran variedad de algoritmos de identificación como el algoritmo gradiente, mínimos cuadrados, mínimos cuadrados con factor de olvido, entre otros [157]. Para obtener el modelo matemático de los motores del seguidor solar, se empleó un método de identificación paramétrica basado en el algoritmo de mínimos cuadrados. El modelo utilizado en este método está descrito en la ecuación 3.5,

$$\ddot{x} + a\dot{x} = bu, \tag{3.5}$$

donde los términos u , \dot{x} y \ddot{x} representan la posición, la velocidad y aceleración respectivamente mientras que a y b son los parámetros que se estimarán mediante el método. Dado que solo se cuenta con mediciones de la posición, se emplean filtros para estimar tanto la velocidad como la aceleración. La estructura de los filtros se define como indica la Ecuación 3.6,

$$F(s) = \frac{f_2}{s^2 + f_1s + f_2}; f_1, f_2 > 0 \tag{3.6}$$

Aplicando la transformada de Laplace a la Ecuación 3.5 se obtiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} (s^2 + as)x(s) &= bu(s) \\ F(s)(s^2 + as)x(s) &= F(s)bu(s) \\ (s^2 + as)F(s)x(s) &= bF(s)u(s) \end{aligned}$$

Se definen

$$x_f(s) = F(s)x(s)$$

$$u_f(s) = F(s)u(s)$$

Suponiendo condiciones iniciales cero en el filtro y de acuerdo a las expresiones anteriores se obtiene el modelo filtrado

$$(s^2 + as) x_f(s) = bu_f(s),$$

en donde las derivadas de la posición filtrada se presentan en las Ecuaciones 3.7, 3.8 y 3.9.

$$x \Rightarrow \frac{f_2 s}{s^2 + f_1 s + f_2} \Rightarrow \dot{x}_f \quad (3.7)$$

$$x \Rightarrow \frac{f_2 s^2}{s^2 + f_1 s + f_2} \Rightarrow \ddot{x}_f \quad (3.8)$$

$$u \Rightarrow \frac{f_2}{s^2 + f_1 s + f_2} \Rightarrow u_f \quad (3.9)$$

Por tanto, a partir de mediciones de la posición x es posible obtener los estimados de la velocidad \dot{x}_f y aceleración \ddot{x}_f . En función de las variables disponibles a partir de las mediciones y las Ecuaciones 3.10 y 3.11 es posible obtener la regresión lineal.

$$\ddot{x}_f = -a\dot{x}_f + bu_f \quad (3.10)$$

$$Z = \phi^\top \Theta \quad (3.11)$$

donde

$$Z = \ddot{x}_f, \quad \phi^\top = \begin{bmatrix} -\dot{x}_f & u_f \end{bmatrix}, \quad \Theta^\top = \begin{bmatrix} a & b \end{bmatrix}$$

Tomando mediciones en los tiempos t_1, \dots, t_n se forma la matriz A y el vector B construidos como se presenta a continuación:

$$A = \begin{bmatrix} \phi_i^\top(t_1) \\ \vdots \\ \phi_i^\top(t_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dot{x}_f(t_1) & u_f(t_1) \\ \vdots & \vdots \\ -\dot{x}_f(t_n) & u_f(t_n) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{n \times 2} \quad B = \begin{bmatrix} Z(t_1) \\ \vdots \\ Z(t_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddot{x}_f(t_1) \\ \vdots \\ \ddot{x}_f(t_n) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$$

La solución para determinar los valores estimados de a y b aplicando el método de mínimos cuadrados está dada por la Ecuación 3.12 en donde las matrices A y B contienen la información de la señal de error y del decodificador. Al sustituir estos parámetros a y b en la Ecuación 3.13, se obtiene el modelo matemático del sistema,

$$[a, b] = \text{inv}(A'A) A'B, \quad (3.12)$$

$$G(s) = \frac{b}{s(s+a)}. \quad (3.13)$$

Para realizar los experimentos y estimar los parámetros del modelo de una forma adecuada fue necesario estabilizar el servomecanismo mediante la implementación de un controlador proporcional derivativo. La programación se realizó en el entorno Matlab-Simulink® y el software QUARC de Quanser®. En la Figura 3.12 se muestra el esquema de conexiones empleado para obtener experimentalmente la identificación paramétrica. La lectura de datos del decodificador y el control de movimiento del servomecanismo se realizó mediante una tarjeta de adquisición de datos Quanser Q8 y, para activar los servomotores, se empleó un puente H modelo BTS7960.



Figura 3.12: Diagrama de conexión identificación paramétrica.

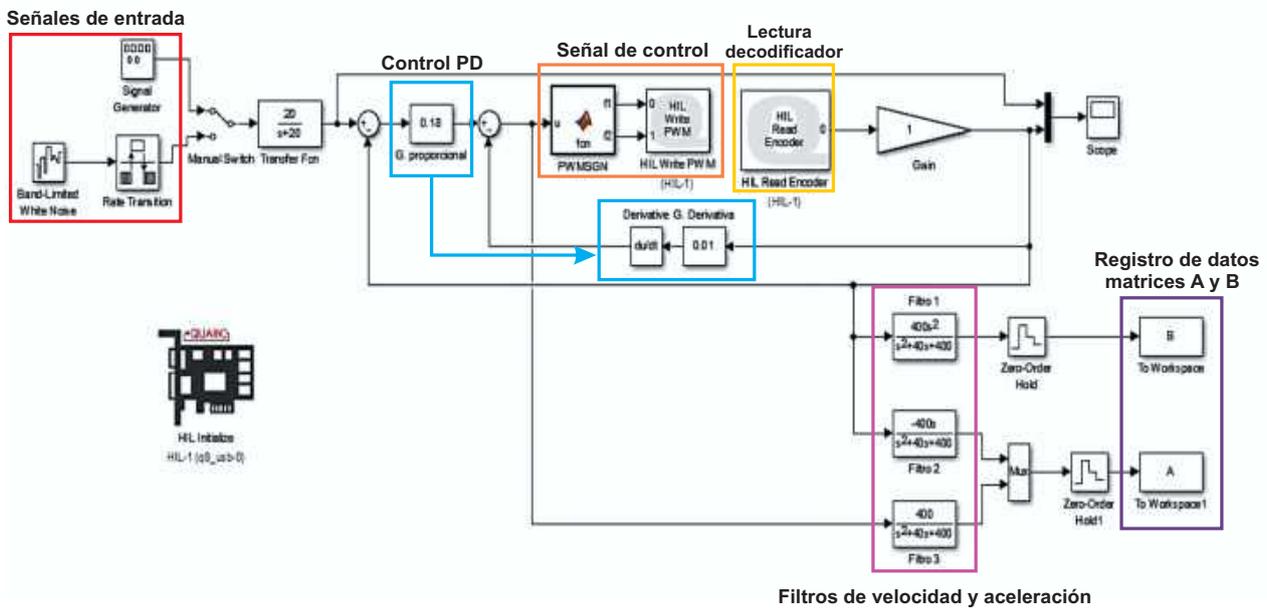


Figura 3.13: Diagrama de bloques en Simulink® para la estimación paramétrica del motor-reductor.

En la Figura 3.13 se muestra el diagrama de bloques realizado en Matlab-Simulink®. Para más detalle revisar la Sección 6. El primer paso fue realizar la sintonización del control PD mediante una entrada escalón unitaria. Las ganancias seleccionadas son $k_p=0.18$ y $k_d=0.01$ que corresponden a la ganancia proporcional y ganancia derivativa respectivamente. Como señal de entrada se utilizó una señal cuadrada de 200 pulsos por revolución de amplitud a una frecuencia de 0.1 Hz como se muestra en la Figura 3.14.

Posteriormente se cambió la entrada por una señal de ruido blanco (ver Figura 3.15) para comprobar que la señal del decodificador siguiera la referencia y verificar que el control estuviera bien sintonizado. Lo anterior se realizó mediante el bloque Band-Limited White Noise de Matlab-Simulink®. Así mismo, se empleó un filtro pasa bajas con una frecuencia de corte de 20 rad/s para procesar la señal de excitación de ruido blanco. El objetivo de introducir esta señal fue obtener una mayor cantidad de datos y por tanto, una mejor aproximación del modelo matemático.

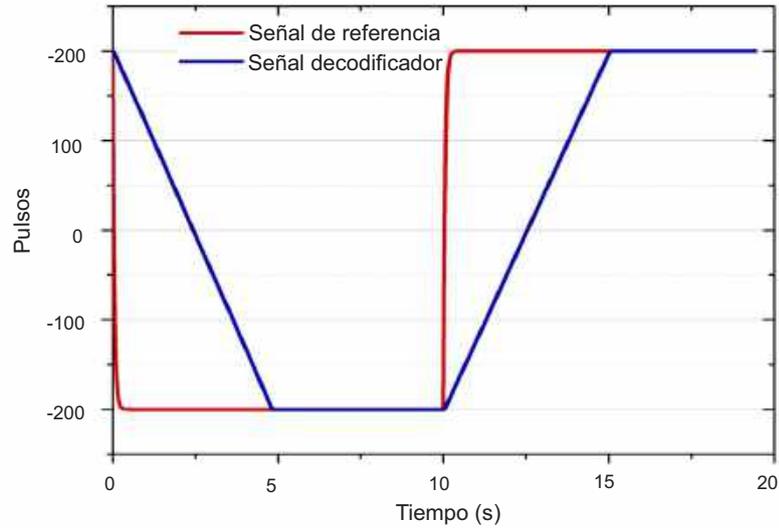


Figura 3.14: Sintonización del control PD.

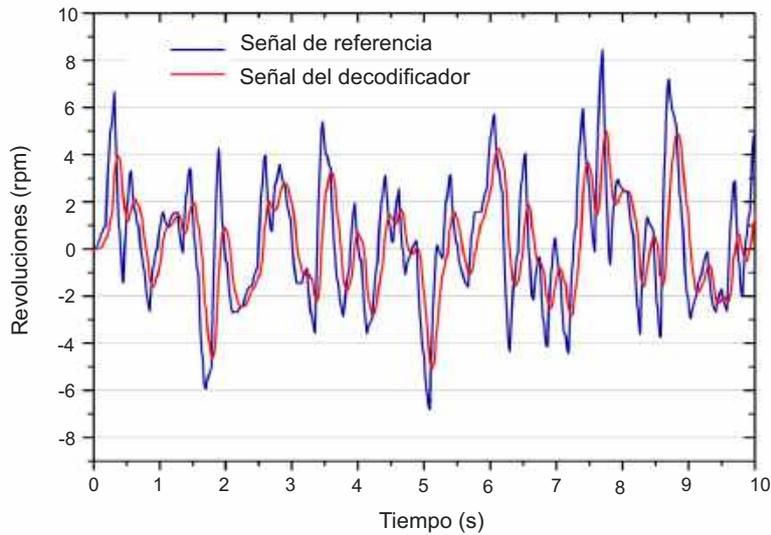


Figura 3.15: Señal de ruido blanco.

La información obtenida fue almacenada en las matrices A y B. En la matriz A fue registrada la señal de error del sistema de control y en la matriz B los datos obtenidos del decodificador. Debido a que solo se tienen mediciones de posición mediante el decodificador, se colocaron filtros digitales con el objetivo de obtener la velocidad y aceleración del motor en la realización de los experimentos. Una vez teniendo estos valores, se realizó el cálculo de los parámetros a y b .

El experimento se repitió 3 veces y se calculó el promedio de los valores obtenidos para cada una de las ganancias. Los resultados obtenidos para los motores acimutal y cenital se presentan en las Tablas 3.2 y 3.3.

Finalmente se sustituyeron los parámetros (a,b) en la Ecuación 3.12 para obtener la expresión de la Ecuación 3.14 que representa la función de transferencia de los motores del seguidor solar. Esta función matemática contiene toda la información del sistema y puede utilizarse para calcular

Tabla 3.2: Ganancias del modelo matemático (motor acimutal).

Ganancias	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Promedio
<i>a</i>	24.2	25.4	26.2	25.26
<i>b</i>	3427.8	3433.6	3448.9	3436.76

Tabla 3.3: Ganancias del modelo matemático (motor cenital).

Ganancias	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Promedio
<i>a</i>	23.2	25.7	26.8	25.23
<i>b</i>	3426.9	3442.4	3440.7	3436.66

los parámetros del controlador mediante alguna técnica de sintonización para después probar el controlador de forma experimental.

$$G(s) = \frac{3436.7}{s(s + 25.2)} \tag{3.14}$$

3.5.2. Diagrama general de control

En la Figura 3.16 se presenta el diagrama de control del sistema de seguimiento solar. Los principales dispositivos empleados para realizar el seguimiento solar son los siguientes: una tarjeta de adquisición de datos Quanser-Q8 como unidad de control, dos puentes H BTS7960 para activar los actuadores mediante señales de modulación de ancho de pulso (PWM) y el sensor solar MEMS ISS-A60 para cerrar el lazo de control.

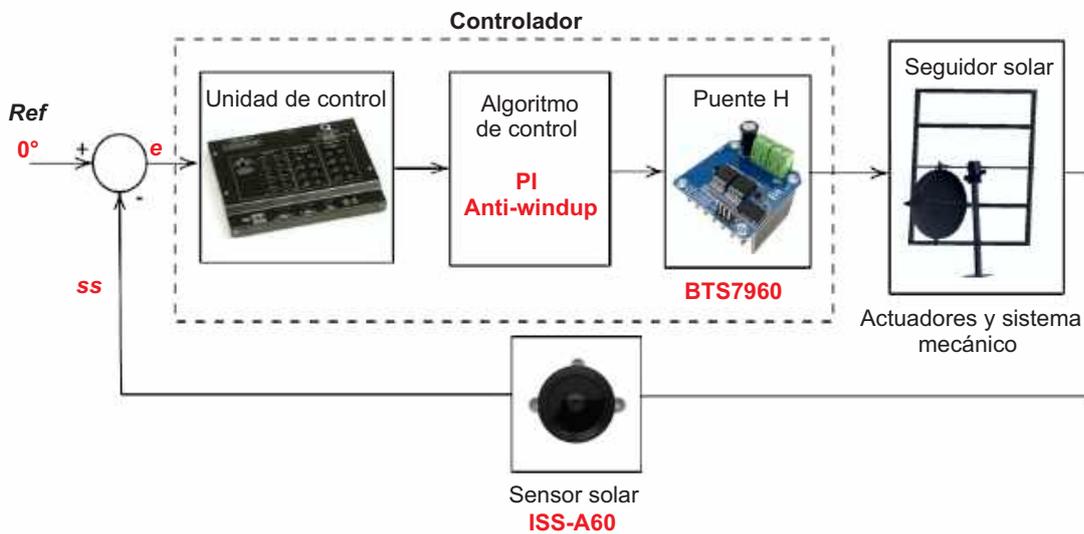
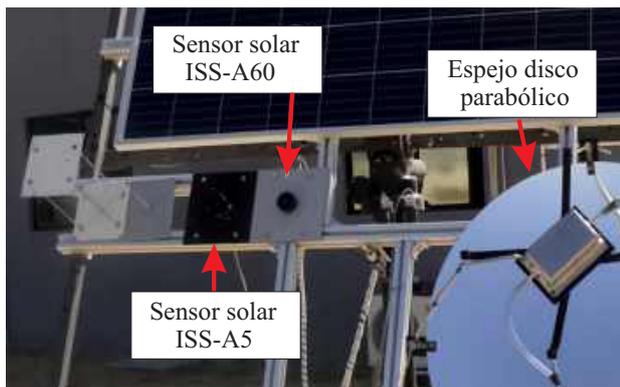


Figura 3.16: Diagrama de control del seguidor solar.

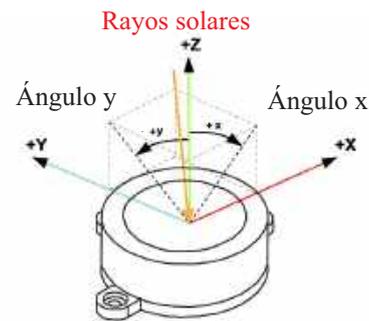
La tarjeta Quanser Q8 procesa la señal de error de control (*e*) que se calcula como la diferencia de la señal de referencia (*Ref*) menos la de retroalimentación del sensor solar (*ss*); posteriormente esta señal es empleada por un algoritmo de control PI que modifica la posición de los servomotores del seguidor solar hasta llegar a 0°.

3.5.3. Caracterización de la precisión de seguimiento solar

En un sistema PD-CPVT la radiación solar debe distribuirse de manera uniforme en la superficie de las celdas para lograr un máximo aprovechamiento y una alta eficiencia de conversión energética; para lograr esto, es necesario que el sistema cuente con un mecanismo de seguimiento solar de dos ejes el cual debe permanecer en todo momento perpendicular a los rayos del Sol. La precisión de seguimiento solar es fundamental para el funcionamiento eficiente del sistema. El sistema de seguimiento solar consta de un marco de acero de 4 m² con perfiles de aluminio en los cuales se realizó el ensamble del concentrador solar, receptor y sistema de enfriamiento. El marco es robusto, capaz de soportar las condiciones climatológicas comunes como cargas de viento variables sin que éste modifique su posición o sufra deformaciones mecánicas. En la estructura está montado un sensor comercial MEMS ISS-A60 con una precisión de seguimiento 0.01° y un campo de visión de 60°. El sensor fue utilizado con la finalidad de cerrar el lazo de control y realizar el ajuste en la posición de los servomotores del sistema. Del mismo modo, para medir el error total de seguimiento se utilizó un sensor solar analógico MEMS ISS-A5, ambos sensores se instalaron lo más cerca posible para que el plano solar incidente en ellos fuera el mismo y la comparación de los resultados del STE fueran congruentes (ver Figura 3.17a). En la Figura 3.17b se presenta la relación angular de los sensores. Los ejes x y y representan la posición del rayo solar incidente dentro del campo de visión de cada sensor y la precisión se acerca a 0° en la normal del eje Z. Los resultados del seguimiento solar en los días que se realizó la experimentación se presentan en la Sección 4.



(a) Sensores ISS-A60 y ISS-A5.



(b) Relación angular para medir STE.

Figura 3.17: Ilustración de la ubicación de los sensores solares y el error angular.

3.5.4. Implementación de algoritmos de control clásico en el seguidor solar

Los algoritmos de control moderno han sido poco utilizados en sistemas de seguimiento solar debido a varios factores. Por un lado, requieren hardware más potente con capacidades de procesamiento más avanzadas. Esto implica la necesidad de microcontroladores o procesadores más rápidos y con más capacidad de memoria. Por otro lado, son más complejos, requieren software especializado y sensores de mayor precisión lo que implica aumentar los costos totales del sistema. Si bien es cierto que estos controladores tienen ventajas como una mayor robustez ante perturbaciones, mayor precisión de seguimiento y estabilidad, requieren un mayor procesamiento de datos, y esto influye también en el consumo energético del sistema.

En contraste, los algoritmos de control clásico suelen ser más simples, con menos requisitos de hardware y procesamiento, además de que su implementación requiere menos desarrollo de software y son menos dependientes de sensores sofisticados. En este sentido, los algoritmos de control PI y PID son una alternativa accesible, de fácil implementación, de bajo costo y consumo eléctrico.

Los algoritmos de control clásico son conocidos por su estabilidad y consistencia en la respuesta del sistema. Además, al ser menos exigentes computacionalmente requieren menos ciclos de procesamiento y menos cambios frecuentes en las acciones de control, lo cual reduce el desgaste mecánico y eléctrico de los motores. Es importante mencionar que estos controladores al proporcionar una respuesta suave y estable ante perturbaciones evitando oscilaciones excesivas o sobrecargas repentinas se reduce la corriente y tensión dentro del servomotor, lo que a su vez puede disminuir el estrés térmico en los componentes internos como los devanados del motor que podrían acortar su vida útil.

Con el propósito de identificar el algoritmo de control adecuado para el sistema se realizó el seguimiento solar durante 9 días distribuidos en los meses de febrero y marzo de 2022 en un horario de 8:00am a 3:00pm. Se implementaron los algoritmos de control on-off, PI y PID realizando previamente la sintonización de los controladores PI y PID (ver Sección 3.5.5). La programación se realizó en Matlab-Simulink®, el diagrama de bloques se presenta en la Sección 6. Posteriormente se realizó un análisis detallado de cada controlador empleando criterios de desempeño. El análisis y resultados de la implementación de los algoritmos de control clásico se presentan en la Sección 4.5.

3.5.5. Sintonización de los controladores

Sintonizar un controlador significa ajustar sus parámetros para lograr el mejor rendimiento posible en un sistema de control. Esto implica modificar los ajustes del controlador para que el sistema responda de manera rápida, precisa y estable a las entradas o perturbaciones. El proceso de sintonización puede requerir varios ajustes y pruebas para optimizar completamente el sistema controlado. Antes de realizar la sintonización, es crucial entender el comportamiento del sistema que se está controlando. Esto incluye conocer su dinámica, las características de su respuesta y las posibles perturbaciones.

La sintonización por modelo de control interno (IMC, por sus siglas en inglés) es un método utilizado para diseñar y ajustar controladores PI y PID basados en un modelo matemático del proceso que se desea controlar. El principio fundamental del IMC es que si el modelo del proceso es exacto, el controlador diseñado usando este modelo debería proporcionar un rendimiento óptimo.

Esta estructura de control está conformada por un controlador $C_{IMC}(s)$ y un modelo matemático interno del proceso $G_m(s)$ conectado en paralelo con el proceso $P(s)$ (Figura 3.18). En el diagrama se considera que todas las perturbaciones que actúan sobre el proceso se reducen a una perturbación equivalente $d(s)$ en la salida del proceso. La señal de salida en lazo cerrado $y(s)$ de esta estructura de control se representa mediante la Ecuación 3.15,

$$y(s) = \frac{C_{IMC}(s)P(s)}{1 + C_{IMC}(s)(P(s) - G_m(s))}r(s) + \frac{1 - C_{IMC}(s)G_m(s)}{1 + C_{IMC}(s)(P(s) - G_m(s))}d(s). \quad (3.15)$$

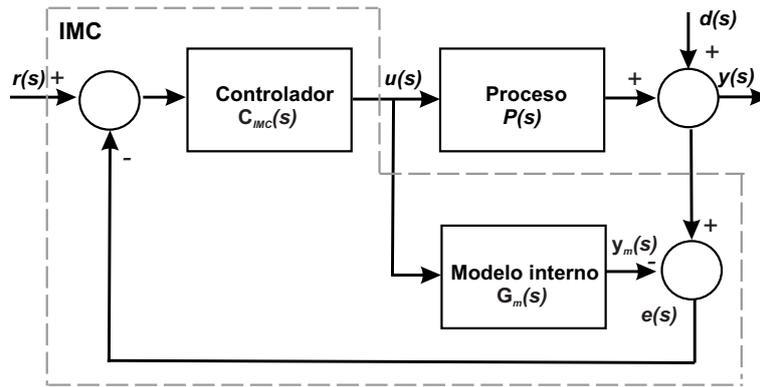


Figura 3.18: Sistema de control IMC [158].

La estructura del controlador IMC puede ser reducida a la estructura clásica de control con retroalimentación (ver Figura 3.19) si se define la función de transferencia del controlador equivalente $C(s)$ mediante la Ecuación 3.16,

$$C(s) = \frac{C_{IMC}(s)}{1 - C_{IMC}(s)G_m(s)}. \quad (3.16)$$

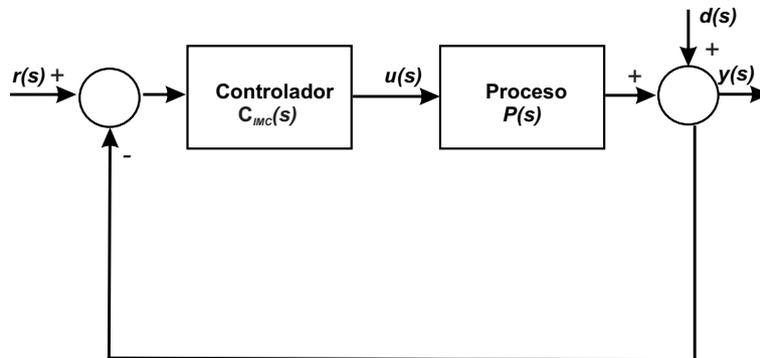


Figura 3.19: Estructura clásica de un sistema de control retroalimentado [158].

Si el modelo matemático es perfecto ($G_m(s)=P(s)$), la señal realimentada $e(s)$ es igual a la perturbación $d(s)$ para todas las acciones de control $u(s)$, en este caso es posible obtener un seguimiento de la señal de referencia $r(s)$. Sin embargo, si el modelo matemático interno no describe exactamente el comportamiento dinámico del proceso, entonces la señal retroalimentada $e(s)$ incluye los efectos del error de modelado y de la perturbación equivalente $d(s)$.

Considerando un sistema de primer orden con retardo, cuya función de transferencia en el dominio de Laplace se representa mediante la Ecuación 3.17,

$$G_{m(s)} = \frac{K e^{-\tau_o s}}{\tau s + 1} \quad (3.17)$$

en donde K es la ganancia del modelo, τ es la constante de tiempo y τ_o es el tiempo muerto. El controlador se define matemáticamente como el inverso de la parte invertible del modelo matemático del proceso, obteniéndose una función de transferencia impropia (Ecuación 3.18).

$$G_{C(s)} = G_{m(s)}^{-1} = \frac{\tau s + 1}{K} \quad (3.18)$$

El tiempo muerto es la parte más difícil de manejar, por lo que se suele separar de la parte sin retardo y se incluye en su lugar una función de filtrado para asegurar una función de transferencia propia, así como reducir la sensibilidad de los errores de modelado. El filtro se conecta en serie con el controlador y sus parámetros se ajustan para mejorar la robustez del sistema de control y para establecer una velocidad de respuesta determinada. La Ecuación representa el filtro empleado en este método,

El tiempo muerto es uno de los aspectos más complicados de manejar, por lo que se suele separar de la parte sin retardo y, en su lugar, se introduce una función de filtrado. Este filtro no solo garantiza una función de transferencia adecuada, sino que también reduce la sensibilidad frente a errores en el modelado. El filtro se conecta en serie con el controlador, y sus parámetros se ajustan para mejorar la robustez del sistema y establecer una velocidad de respuesta específica. La Ecuación 3.19 muestra el filtro utilizado en este método.

$$G_{f(s)} = \frac{K_f}{(\tau_f s + 1)^n}, \quad (3.19)$$

en donde k_f y τ_f representan la ganancia y la constante de tiempo del filtro respectivamente, mientras que n denota el grado del filtro, el cual depende de la precisión del modelo de la planta. Al incorporar el filtro, se obtiene una función de transferencia propia y se mitiga el impacto de los errores de modelado. Las reglas de ajuste del IMC han demostrado ser robustas y ofrecen un buen rendimiento cuando se emplean en el control de procesos comunes. Este método se puede utilizar para derivar diferentes relaciones de sintonización para controladores PI o PID en función de diversos modelos de funciones de transferencia. En este trabajo se tomó como base el modelo matemático obtenido en la Sección 3.5.1 para determinar los parámetros de sintonización. Para el controlador PI, se calcularon ganancias K_p y K_i de 0.8 y 0.1 respectivamente. En el caso del controlador PID las ganancias K_p , K_i y K_d fueron 0.8, 0.16 y 0.031 respectivamente. El diagrama de bloques de los controladores, realizado en Simulink®, se presenta en la Sección 6.

3.5.6. Índices de desempeño

Los índices de desempeño son utilizados para evaluar la respuesta del sistema frente a perturbaciones o cambios de parámetros. Al realizar un análisis de estos índices es posible determinar que controlador brinda un mejor rendimiento para el proceso que se está efectuando. Un sistema de control se considera óptimo si los parámetros se escogen de tal forma que minimicen estos índices. Para evaluar el desempeño de cada algoritmo de control se emplearon los criterios de desempeño IEC (integral del error cuadrático), IEC_t (integral del error cuadrático por tiempo), EAM (Error absoluto máximo) y VTC (variación total de control); Así mismo, se calculó el error de seguimiento absoluto promedio (STE_{prom}) y el promedio de la desviación media absoluta (DMA). Ecuaciones 3.20, 3.21, 3.22, 3.23, 3.24 y 3.25 respectivamente.

El criterio IEC indica la acumulación del error (e) durante el tiempo que dura el experimento. Entre mayor sea este valor indica una mayor cantidad de variaciones u oscilaciones durante el seguimiento solar.

$$IEC = \int_0^{\infty} |e^2| dt \quad (3.20)$$

El índice IEC_t se emplea para conocer la suma del error instantáneo entre dos instantes de tiempo t_1 y t_2 , donde e representa el error y k la ganancia.

$$IEC_t = \int_{t_1}^{t_2} |ke^2| dt \quad (3.21)$$

Del mismo modo EAM determina el valor del error absoluto máximo en un lapso de tiempo, $e[n]$ representa la señal del error filtrada.

$$EAM = \text{máx} |e[n]| \quad (3.22)$$

$$N_1 \leq n \leq N_2$$

El VTC determina la suavidad de la señal de control en un lapso de tiempo. Donde $u[n]$ representa la muestra n de la señal de control u ,

$$VTC = \sum_{N_1}^{N_2} |u[n] - u[n - 1]|. \quad (3.23)$$

El STE_{prom} determina la precisión del seguimiento solar promedio,

$$STE_{prom} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N |e|. \quad (3.24)$$

Finalmente, se calculó la desviación media absoluta (DMA), la cual fue calculada con el objetivo de obtener una visión más detallada sobre la dispersión de los datos en torno a la media. La desviación media absoluta ofrece una alternativa robusta, ya que se basa en la magnitud absoluta de las desviaciones respecto a la media, lo que la hace menos sensible a valores atípicos o extremos.

$$DMA = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N |e_i - \bar{x}| \quad \text{donde } \bar{x} = \frac{\sum_{i=0}^N e_i}{N}. \quad (3.25)$$

A partir de los resultados obtenidos en la experimentación, el control PI fue el que obtuvo el mejor desempeño. Los resultados del seguimiento solar y el análisis de los criterios de desempeño se presentan en la Sección 4.5.

3.5.7. Propuesta de algoritmo de control para el seguidor solar

Un algoritmo de control para un seguidor solar debe cumplir con ciertas características esenciales para maximizar la eficiencia en la captación de energía solar y asegurar un funcionamiento fiable. Las principales características que debe tener son las siguientes:

- Debe ser capaz de ajustar la posición del sistema con precisión para seguir la trayectoria del Sol durante el día.
- Debe realizar ajustes en tiempo real en respuesta a cambios en la posición del Sol.
- El sistema de seguimiento debe consumir poca energía asegurando que el ahorro energético obtenido por la orientación óptima supere el gasto energético del propio sistema de seguimiento.
- Debe ser capaz de operar de manera continua y confiable bajo diversas condiciones climáticas y ambientales.

- Debe ser relativamente sencillo de instalar y configurar.

Implementar un algoritmo de control clásico en un seguidor solar ofrece una solución equilibrada entre costo, simplicidad y eficiencia por lo que es una opción viable, de bajo costo y sin complejidades técnicas. El control PI fue el que obtuvo el mejor desempeño en la experimentación. Debido a esto y a su facilidad de implementación se decidió experimentar con este controlador en el seguidor solar en conjunto con el sistema PD-CPVT. Este controlador ha sido ampliamente utilizado debido a las ventajas que ofrece, sin embargo, existen factores adicionales que deben ser tomados en cuenta, un ejemplo de ello, es el efecto windup que afecta el desempeño del control. Éste se manifiesta mediante un error grande durante un tiempo prolongado al momento de arrancar el sistema o bien cuando hay un cambio de referencia o una perturbación; ocurre cuando la salida del controlador alcanza su valor máximo debido a las restricciones físicas del actuador. En estas circunstancias la acción integral continúa integrando el error lo que da lugar a un incremento significativo en la componente integral. Esto ocasiona que el sistema sobrepase la referencia y se produzcan sobretiros muy prolongados provocando la inestabilidad y un rendimiento deficiente del sistema de control y también a la larga consecuencias indeseables en los motores del seguidor solar. Las oscilaciones y los picos de corriente elevados cuando el motor intenta corregir la posición genera sobrecalentamiento y un esfuerzo mecánico innecesario en las partes móviles del sistema acelerando el desgaste de rodamientos y engranajes aumentando la probabilidad de fallos mecánicos. Las consecuencias del fenómeno windup pueden llevar a condiciones operativas que pueden causar daños o reducir la vida útil del sistema. Implementar técnicas adecuadas de control es esencial para prevenir estos problemas y asegurar un funcionamiento eficiente y duradero del sistema PD-CPVT.

En este trabajo se propone utilizar un control PI con esquema anti-windup que cancele la acción integral mediante la ley de control. Mediante esta estrategia será posible reducir los sobretiros a la entrada del actuador y evitará que se rebasen los límites de saturación logrando con esto un mejor desempeño y menos desgaste de los motores del seguidor solar.

3.5.8. Efecto windup

En la Figura 3.20 se muestra el diagrama del controlador PI construido en Matlab-Simulink® con las ganancias calculadas en la Sección 3.5.5. El experimento se realizó el día 23 de marzo del 2022 a las 10:30 am con un cielo totalmente despejado.

Para observar el fenómeno windup se realizó un experimento con una duración de 400 segundos, los resultados obtenidos se observan en la Figura 3.21. Se puso en marcha el seguidor solar alternando la señal de referencia de 0° a 10° y viceversa para simular las perturbaciones que pudieran ocurrir a lo largo del día durante el seguimiento solar. Al inicio de la prueba el sistema presentó un error de seguimiento solar aproximado de 0.8° que llegó a la referencia de 0° en 75 segundos. Después de esto el sistema permaneció estable hasta llegar a 175 segundos, tiempo en el cual se realizó un cambio en la señal de referencia a 10° . Entonces, se produjo un sobreimpulso que alcanzó los 17.5° disminuyendo lentamente hasta llegar a la estabilidad en un tiempo de 275 segundos. A los 300 segundos se cambió nuevamente la señal de referencia a 0° , esto produjo un sobreimpulso que llegó a -6° en un tiempo de 330 segundos. Luego disminuyó volviendo a la referencia de 0° con un ligero sobreimpulso que llegó a 1° para después disminuir y estabilizarse en 0° a los 375 segundos.

Actualmente existen diferentes técnicas para aplicar una estrategia anti-windup en el control PI. Estas técnicas pueden incluir la modificación de los términos de ganancia, la saturación de la señal de control o la introducción de componentes adicionales al controlador para evitar la acumulación excesiva de la acción integral. En este trabajo se emplea la técnica retro cálculo que consiste en recalcular la señal de control cuando se opera en los límites de saturación de los motores del seguidor solar.

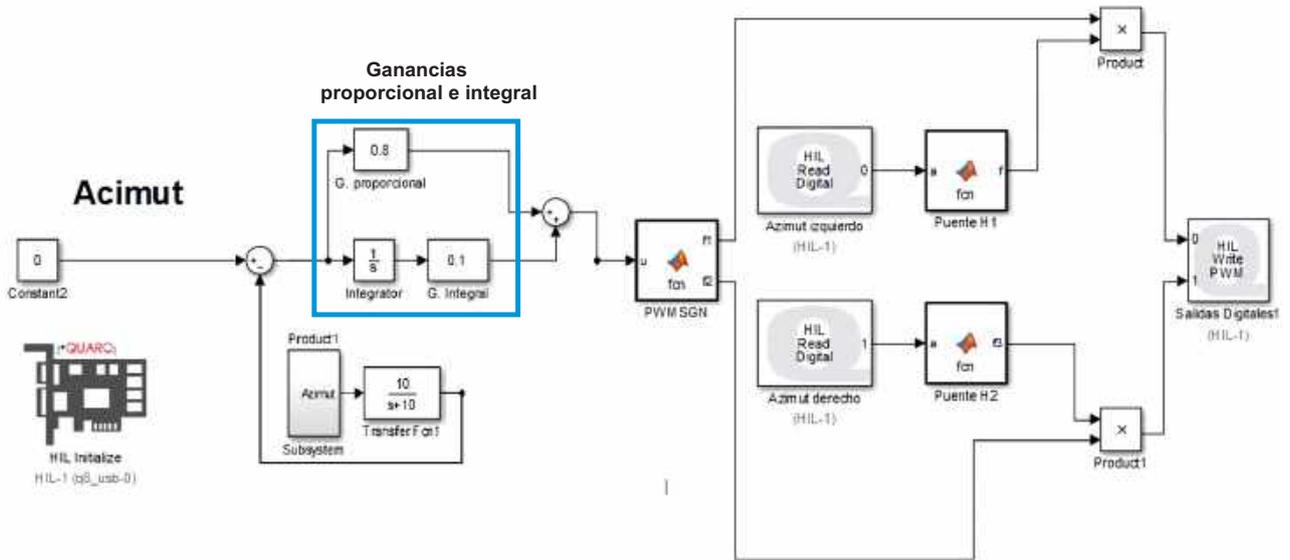


Figura 3.20: Diagrama del controlador PI.

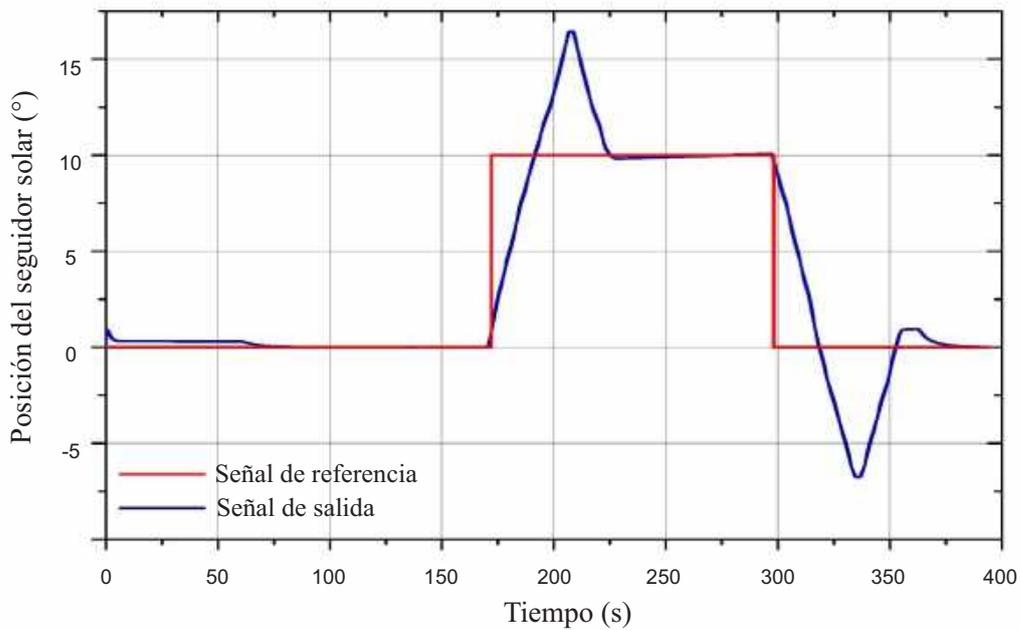


Figura 3.21: Efecto windup ante un cambio de referencia.

3.5.9. Estrategia anti-windup retro cálculo

La técnica anti-windup retro cálculo es una estrategia utilizada en controladores PI y PID para evitar la acumulación excesiva del término integral cuando el actuador está saturado. Esta técnica ajusta el término integral cuando se detecta que la salida del controlador está limitada por la saturación del actuador evitando así el windup. Cuando el actuador alcanza su límite de saturación la diferencia entre la salida calculada por el controlador y la salida real (limitada) se utiliza para ajustar el término integral. Esta corrección se retroalimenta al término integral, evitando que siga acumulando el error cuando el actuador ya no puede seguir órdenes del controlador.

La Figura 3.22 muestra el diagrama de bloques realizado en Matlab-Simulink® (para más detalle consultar la Sección 6). La técnica de retro cálculo está conformada por la diferencia de la salida de control u menos la salida del saturador s . El resultado obtenido se multiplica por una constante de tiempo T que se denomina tiempo de seguimiento y es sumada al error multiplicado por la ganancia integral ki . Cuando el actuador rebasa los límites máximo y mínimo de saturación, la acción anti-windup recalcula la acción integral. Si la salida de control permanece dentro de los límites de saturación, la acción anti-windup no tendrá efecto alguno en la acción integral. Una ventaja de este método es que los cambios en la integral no son abruptos cuando se presenta saturación, debido a que la retroalimentación permite hacer el seguimiento de la salida del actuador a través de la constante de tiempo. De esta manera, se evita el fenómeno windup y se garantiza una respuesta de control más efectiva.

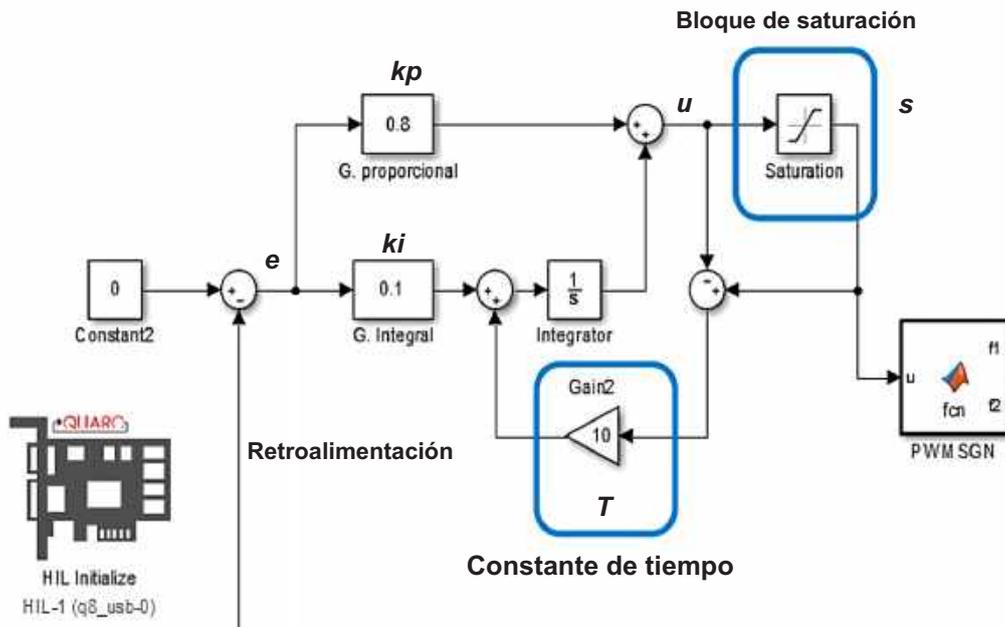


Figura 3.22: Diagrama de bloques anti wind-up

La estrategia anti-windup retro cálculo ofrece varias ventajas significativas en la gestión de sistemas de control con actuadores que pueden saturarse. A continuación se describen varias ventajas [159]:

- **Mejora la estabilidad del sistema:** La técnica retro cálculo ayuda a mantener la estabilidad del sistema al evitar la acumulación excesiva del término integral cuando el actuador está saturado. Esto es crucial para evitar oscilaciones y comportamientos inestables.
- **Reducción del tiempo de recuperación:** Al ajustar el término integral en función de la saturación del actuador, el sistema puede recuperarse más rápidamente de condiciones de saturación. Esto significa que el sistema vuelve a su funcionamiento normal de manera más eficiente.
- **Prevención de la sobresaturación:** Evita que el controlador siga aumentando el término integral cuando el actuador ya está en su límite. Esto protege al actuador de recibir órdenes de control que no puede ejecutar, reduciendo el riesgo de daños.
- **Mejora la respuesta transitoria:** Significa que el sistema puede responder más rápidamente a los cambios en las condiciones de operación sin comprometer la estabilidad.

- **Simplicidad en la implementación:** Esta estrategia es fácil de implementar ya que solo requiere un ajuste adicional al término integral basado en la diferencia entre la salida deseada y la real cuando el actuador está saturado.
- **Adaptabilidad:** Esta técnica se puede adaptar a diferentes tipos de sistemas de control y actuadores, lo que la hace versátil para una amplia gama de aplicaciones industriales y de automatización.
- **Protección del sistema y del actuador:** Al evitar esfuerzos innecesarios en el actuador, se prolonga la vida útil del equipo y se reduce el desgaste, lo que puede traducirse en menores costos de mantenimiento y reparación.

3.5.10. Implementación del anti-windup

Para implementar el anti-windup se configuraron los límites de saturación y la constante de tiempo en Matlab-Simulink®. La configuración del saturador implica establecer límites en la salida del controlador para prevenir que el error crezca descontroladamente cuando el actuador alcanza sus límites físicos o de operación. Estos límites evitan que el controlador intente exigir más de lo que el sistema puede proporcionar. Por otro lado, la constante de tiempo define la rapidez con que se ajusta el término integral. La constante de tiempo (T) debe ser lo suficientemente grande para evitar una corrección excesivamente rápida, lo que podría causar oscilaciones o inestabilidad, pero debe ser lo suficientemente pequeña para permitir que el sistema recupere rápidamente el control integral una vez que se resuelva la saturación. Para definir los valores adecuados de los límites de saturación y la constante de tiempo se realizaron varios experimentos.

Se llevaron a cabo pruebas de seguimiento solar con una duración de 400 segundos cada una, alternando la señal de referencia entre 0° y 10° . Durante los primeros 65 segundos, la señal de referencia se estableció en 10° . Posteriormente, entre los segundos 65 y 215, la referencia cambió a 0° . Entre los segundos 215 y 325, la referencia se ajustó nuevamente a 10° . Finalmente, de los 325 a los 400 segundos, la referencia se mantuvo en 0° . En las Figuras 3.23, 3.24, 3.25 y 3.26 se muestran las gráficas obtenidas en las pruebas de seguimiento solar en el eje acimutal.

Con el objetivo de comparar los resultados obtenidos antes y después de la implementación del anti-windup, se realizó un primer experimento sin emplear esta estrategia. En la Figura 3.23 se observa que, ante el cambio en la señal de referencia en el segundo intervalo de tiempo (de 65 a 215 s) se producen sobretiros muy prolongados lo que impide que el sistema alcance una completa estabilidad durante dicho intervalo. Esto debido a un tiempo de establecimiento más largo debido a la acumulación de la ganancia integral cuando el controlador se satura.

En el segundo experimento se configuraron los límites superior e inferior del bloque de saturación como 0.5° y -0.5° respectivamente considerando $T = 6$ s. En la Figura 3.24 se observan los resultados obtenidos para cada cambio en la señal de referencia. Durante los primeros 65 s, con una posición de 10° el sistema se mantuvo estable. En el segundo intervalo de tiempo, al cambiar la referencia a 0° , la respuesta del sistema fue lenta, tardando 140 segundos en alcanzar la estabilidad. En el tercer intervalo, al cambiar la referencia nuevamente a 10° , el sistema respondió lentamente presentando un ligero sobretiro y estabilizándose aproximadamente a los 305 segundos. Finalmente, en el último intervalo, con una referencia de 0° , el sistema no logró estabilizarse por completo a los 400 segundos, quedando con un error aproximado de 1.75° al final de la prueba.

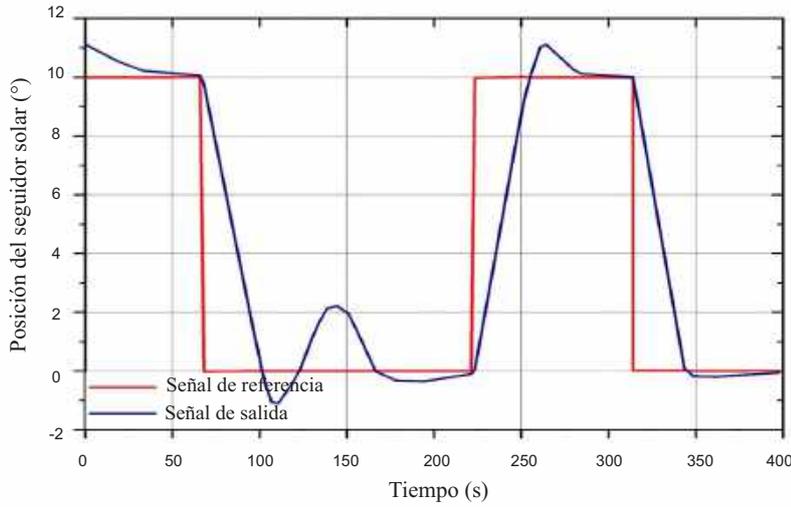


Figura 3.23: Experimento 1: Control PI sin anti-windup.

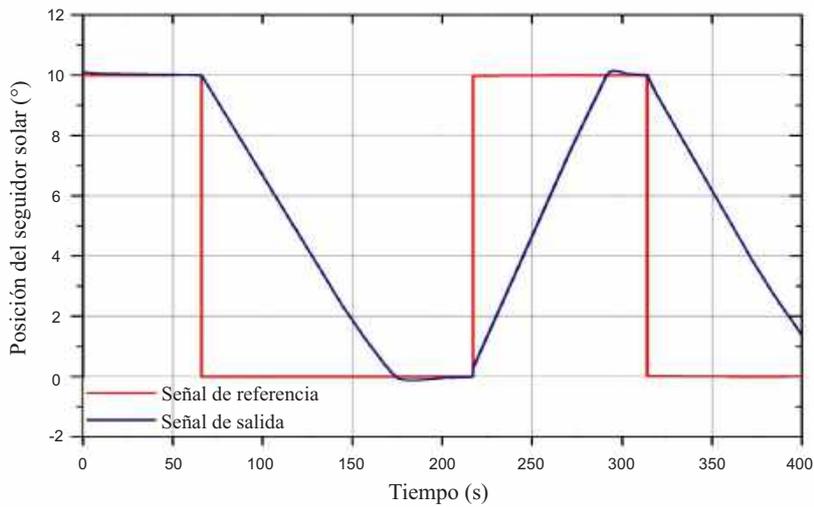


Figura 3.24: Experimento 2: PI con anti-windup con límites de saturación $[-0.5, 0.5]^\circ$ y $T=6s$.

Se llevaron a cabo múltiples pruebas para ambos ejes del seguidor solar utilizando valores similares de T y límites de saturación, las cuales arrojaron resultados consistentes. Se puede concluir que al utilizar límites de saturación pequeños en un sistema de control anti-windup pueden llevar a una respuesta lenta del sistema. Esto debido a que los límites de saturación restringen el rango de la acción de control, lo que limita la capacidad del sistema para corregir errores rápidamente. Del mismo modo, una constante de tiempo pequeña permite que la acción integral se ajuste rápidamente, lo que puede ser beneficioso para evitar una acumulación excesiva del error cuando el sistema está saturado. Sin embargo, una corrección demasiado rápida puede introducir oscilaciones en la respuesta del sistema.

Se realizó un tercer experimento en el que se establecieron los límites superior e inferior del bloque de saturación en 1.2° y -1.2° respectivamente con $T=20$ segundos. Los resultados de este experimento se muestran en la Figura 3.25. Al incrementar los límites de saturación, se observó una respuesta más rápida del sistema, sin embargo, este ajuste provocó sobretiros más pronunciados, lo que resultó en un mayor tiempo para alcanzar la estabilidad tras cada cambio en la señal de referencia. En este contexto, se llevaron a cabo pruebas aumentando tanto los límites de saturación

como la constante de tiempo, obteniendo resultados similares en ambos casos. El ajuste adecuado de los parámetros del anti-windup depende del comportamiento del sistema. Es importante realizar pruebas y ajustes para encontrar el equilibrio entre rapidez de respuesta y estabilidad del sistema.

De acuerdo a los resultados obtenidos en los experimentos anteriores, en el experimento cuatro se decidió reducir los límites de saturación y el valor de T . Los límites superior e inferior del bloque de saturación se configuraron en 1° y -1° respectivamente y la constante de tiempo T se estableció en 10 segundos. En la Figura 3.26 se observa que la respuesta del sistema es estable y libre de sobretiros para cambio de referencia dentro de los intervalos de tiempo especificados. En el primer intervalo (de 0 a 65 segundos), el sistema se mantiene estable. En el segundo intervalo de tiempo, al cambiar la señal de referencia a 0° , el sistema responde rápidamente y alcanza la estabilidad en aproximadamente 85 segundos. En el tercer intervalo, al ajustar la referencia a 10° , el sistema se estabiliza en cerca de 60 segundos, ambos tiempos menores que los observados en los experimentos previos. En conclusión, la adecuada elección y ajuste de los parámetros del anti-windup con retro cálculo son esenciales para garantizar un funcionamiento estable y eficiente del sistema.

Los resultados de los experimentos demuestran que al reducir los límites de saturación y ajustar la constante de tiempo, se mejora significativamente el comportamiento del sistema en términos de estabilidad y rapidez de respuesta. Elegir los límites de saturación adecuados (en este caso, 1° y -1°), se reduce la posibilidad de acumulaciones descontroladas, lo que ayuda a prevenir oscilaciones y mantener una respuesta estable. La constante de tiempo influye en la rapidez con la que el término integral se corrige durante la saturación. Ajustar T a un valor de 10 segundos ha demostrado ser efectivo para balancear la rapidez de respuesta con la estabilidad del sistema.

Para los cuatro experimentos mencionados anteriormente, y con los valores de saturación y T propuestos, se realizaron 10 pruebas de cada uno en los dos motores del seguidor solar. Los resultados se validaron según los criterios de desempeño IEC, EAM y VTC. Los resultados obtenidos se presentan en la Sección 4.6.

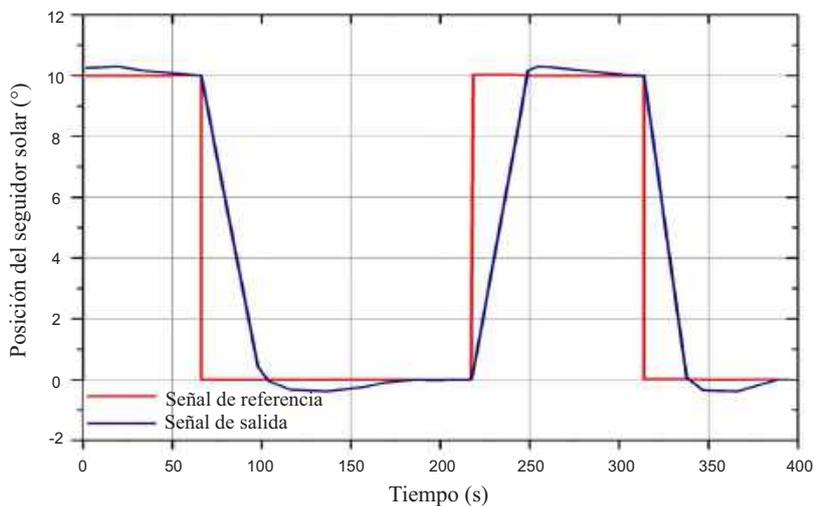


Figura 3.25: Experimento 3: PI con anti-windup con límites de saturación $[-1.2, 1.2]^\circ$ y $T=20s$.

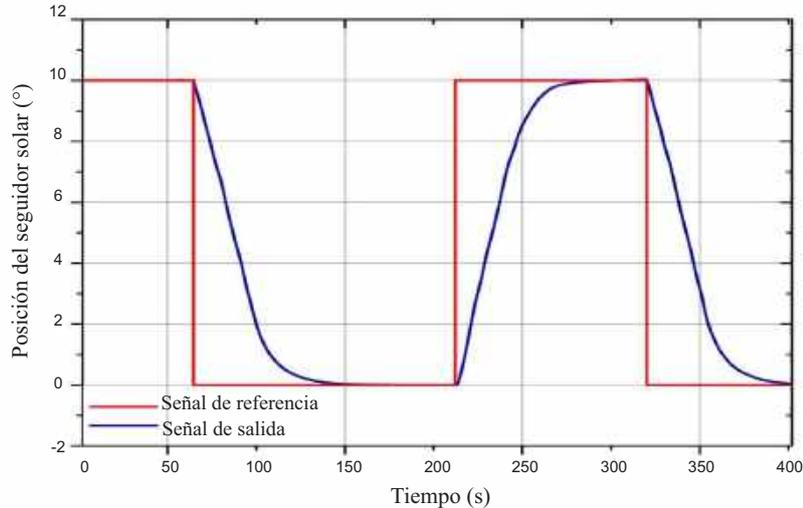


Figura 3.26: Experimento 4: PI con anti-windup con límites de saturación $[-1, 1]^\circ$ y $T=10s$.

3.5.11. Análisis del consumo eléctrico de los servomotores del seguidor solar empleando algoritmos de control clásico

Para que un sistema de energía solar sea eficiente, rentable y sostenible, es crucial que el consumo energético del seguidor solar no exceda la energía adicional que éste ayude a generar. Otro factor que es importante considerar es que estos dispositivos permanecen activos durante periodos de tiempo prolongados y requieren una alta precisión de seguimiento, lo que incrementa el consumo energético del sistema. El desafío en el diseño de sistemas de energía solar es lograr el equilibrio entre el consumo de energía para generar el movimiento y la precisión de seguimiento.

Una opción viable para reducir el consumo eléctrico de los actuadores de un seguidor solar es la implementación de algoritmos de control de bajo consumo eléctrico y con señales de control suaves que eviten el desgaste excesivo de los actuadores. Los algoritmos de control clásico PI y PID son una alternativa accesible, su implementación es sencilla y de bajo costo.

En este trabajo se realizó un análisis detallado del consumo energético de los motores del seguidor solar mediante la implementación de tres de los algoritmos de control más utilizados en seguidores solares: el control on-off, PI y PID. Al igual que en la Sección 3.5.4 se emplearon índices de desempeño para evaluar el rendimiento de cada controlador con la finalidad de definir el algoritmo de control adecuado para el seguidor solar que sea robusto y con señales de control suaves que minimicen el consumo energético del sistema PD-CPVT.

El seguimiento solar experimental se realizó durante 5 días en un horario de 8:00 a 2:00pm en condiciones de cielo despejado y velocidad del viento menor a 4 m/s. Se implementaron los tres algoritmos de control en el seguidor solar descritos anteriormente: on-off, PI y PID. Para realizar la medición del consumo eléctrico de los motores se utilizaron dos sensores de corriente ACS712 los cuales se conectaron en las salidas para motor de los puentes H BTS7960. En la Figura 3.27 se presentan los elementos empleados en la experimentación.

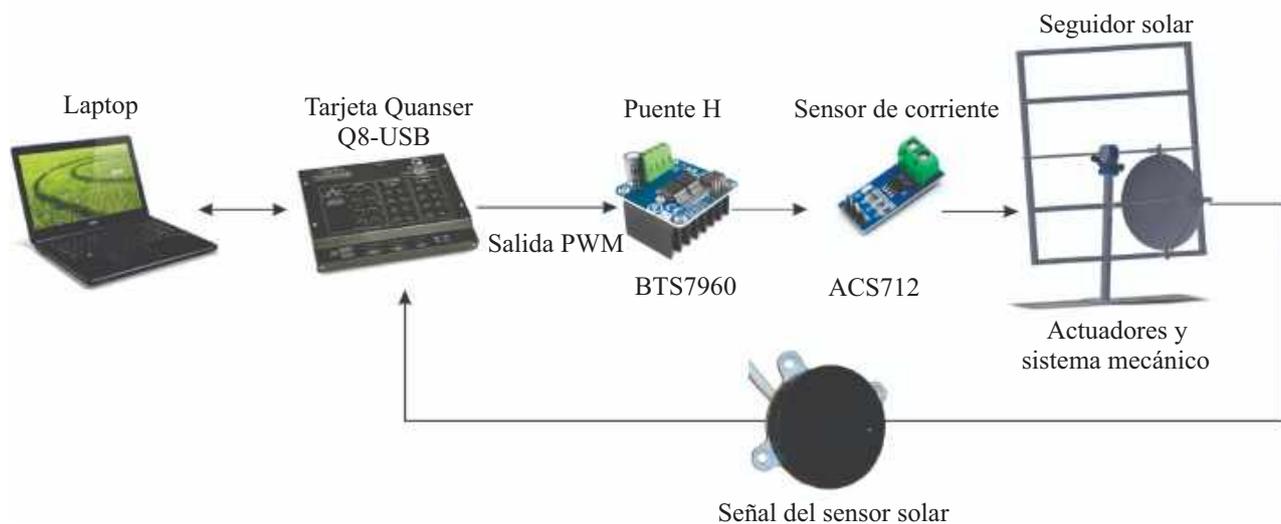


Figura 3.27: Elementos empleados para la medición del consumo energético de los motores del seguidor solar.

Cada día de prueba se experimentó con los tres controladores. El procedimiento se detalla a continuación:

- Para cada algoritmo de control se realizaron 10 pruebas de seguimiento solar con una duración de 10 minutos cada una en el eje acimutal y cenital.
- En cada experimento se agregó una perturbación con forma de pulso en los minutos 5 y 6 con una amplitud de -0.5° y 0.5° , respectivamente.
- Se obtuvieron índices de desempeño EAM, IECT y VTC en cada una de los experimentos realizados. Tomando en cuenta que en cada prueba las perturbaciones ocurren entre el minuto 5 y 6, se consideró $t_1=3$ min (180s) y $t_2=8$ min (480s), un tiempo total de 5 min por cada experimento. Para el análisis se tomó en cuenta un intervalo de tiempo cercano a donde se encuentran las perturbaciones, sin considerar el error en estado transitorio que es un lapso de tiempo muy corto en comparación con el tiempo que el sistema permanece en estado estacionario a lo largo del día.
- En cada prueba de 10 min se llevó a cabo el monitoreo del consumo de corriente y se midió la señal de error e . Finalmente, se obtuvo el promedio de los valores medidos en las 10 pruebas realizadas.
- Los datos obtenidos se guardaron en el espacio de trabajo de Matlab® para su posterior análisis.

Los resultados obtenidos de la experimentación se presentan en la Sección 4.4.

3.6. Evaluación del rendimiento eléctrico del PD-CPVT

Como se indicó anteriormente, la alta concentración solar en el receptor CPVT requiere el uso de un disipador de calor para mantener la temperatura de la celda por debajo del límite máximo soportado por la celda CPV, que normalmente ronda los 80°C . Diferentes factores pueden afectar la eficiencia eléctrica de la celda solar, como cambios en la irradiancia a lo largo del día, temperatura ambiente, velocidad del viento, polvo y humedad relativa [160]. De manera similar, la precisión del seguimiento [72], [92] y la efectividad del sistema de enfriamiento [161] también son factores

esenciales a considerar. Durante las pruebas realizadas se monitorizó la temperatura de las celdas y se estableció un límite máximo de 55°C ya que a partir de esta temperatura la potencia del receptor cae rápidamente. En esta Sección, se analizó el desempeño eléctrico del sistema PD-CPVT propuesto para determinar cómo los aumentos de temperatura afectan la eficiencia eléctrica instantánea del sistema. Este parámetro se determinó a partir de la ecuación 2.2 descrita en la Sección 2.4.1, donde A_c es el área efectiva de las celdas ($A_c=1.21\text{cm}^2$), la irradiancia instantánea G y el factor de concentración real ($C_r=390$ soles). Los resultados experimentales, tanto con como sin sistema de refrigeración, se presentan en la Sección 4.2 y 4.3.

3.6.1. Configuración experimental

El sistema PD-CPVT se instaló en el Centro de Investigaciones en Óptica A.C., en Aguascalientes, México, en la latitud N 21° 50' 39" y longitud W 102° 20' 38". Se utilizó un seguidor solar de dos ejes de alta precisión para garantizar que el sistema propuesto reciba la luz solar en un ángulo perpendicular durante todo el día (Figura 3.28). Este seguidor solar fue evaluado experimentalmente por Ángulo Calderón en [58] utilizando procedimientos de prueba adaptados de la norma IEC 62817 [162]. La evaluación dió como resultado una precisión promedio de 0.390° en días soleados y 0.536° en días nublados indicando que el seguidor solar es confiable y adecuado para su uso en sistemas CPVT. El concentrador solar, el receptor y el sistema de enfriamiento se montó dentro de un marco resistente que puede soportar condiciones climáticas típicas sin afectar la precisión de seguimiento solar, incluidas las cargas variables de viento.

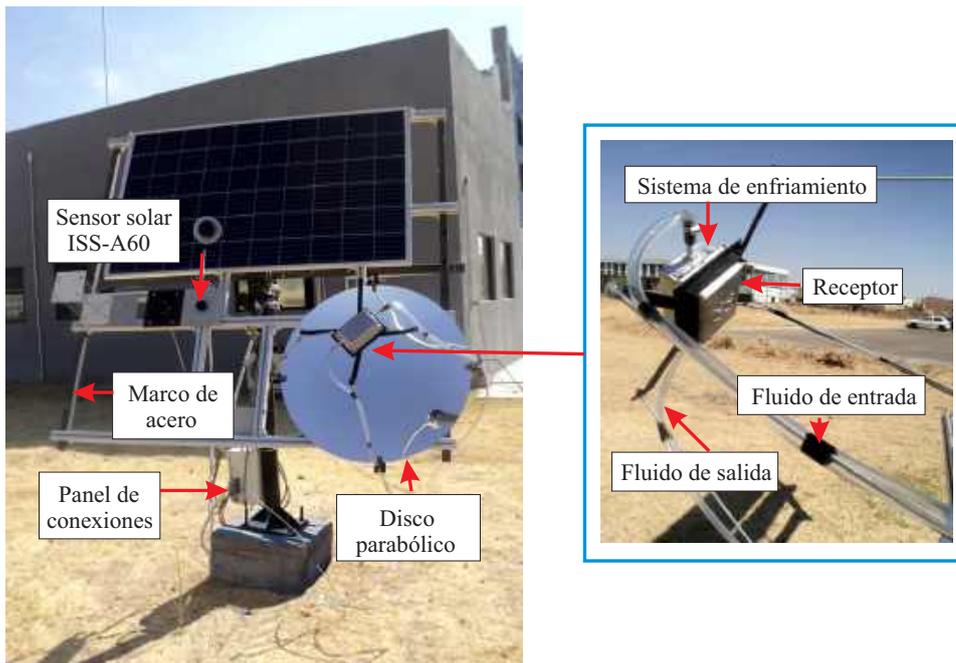


Figura 3.28: Sistema PD-CPVT montado en el seguidor solar.

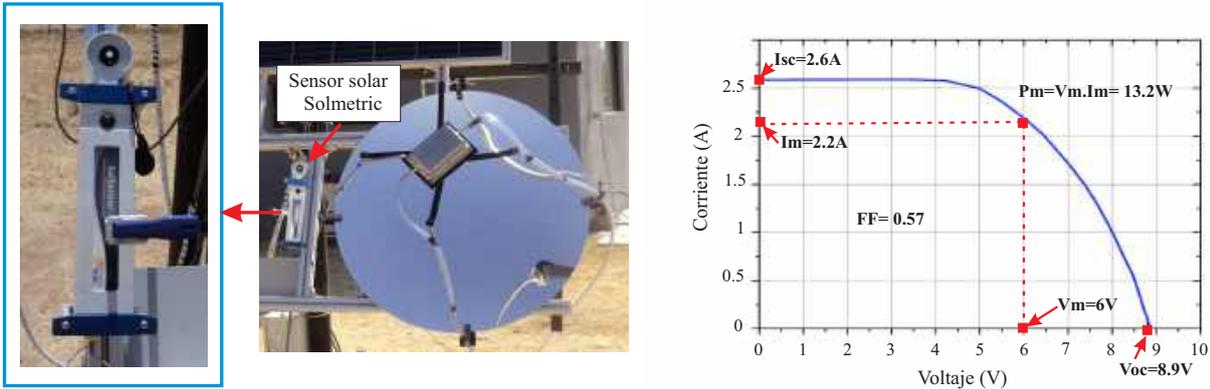
El sistema de enfriamiento fue montado en la parte posterior del receptor con mangueras flexibles que conectan los tubos de entrada/salida del fluido a la bomba de agua (ver Figura 3.28). Para realizar la caracterización eléctrica experimentalmente se empleó un kit analizador fotovoltaico PVA-1000C que incluye dos unidades centrales: un trazador de curvas I-V y un sensor de referencia fotovoltaico inalámbrico, que mide la irradiancia y el ángulo de incidencia de los rayos del Sol; además, el sensor tiene dos entradas de termopar externas para medir la temperatura de la superficie del módulo. La incertidumbre de los dispositivos de medición utilizados en la caracterización eléctrica se observan en la Tabla 3.4, por lo que la propagación del error en el cálculo de la eficiencia eléctrica del receptor es $\pm 3.7\%$.

Tabla 3.4: Error de propagación en el cálculo de la eficiencia eléctrica.

Dispositivo	Parámetro	Incertidumbre
IV trazador de curvas	Voltaje	$\pm 0.5\%$
IV trazador de curvas	Corriente	$\pm 0.5\%$
IV trazador de curvas	Irradiancia	$\pm 2\%$
Sensor Gardon	Flujo incidente	$\pm 3\%$
Propagación del error		$\pm 3.7\%$

El trazador de curvas I-V fue conectado a la matriz de celdas y el sensor de referencia fotovoltaico se colocó paralelo al disco parabólico dentro del marco del seguidor solar como se muestra en la Figura 3.29a. Uno de los termopares del sensor de referencia fue colocado entre la pared del sistema de enfriamiento y la parte posterior del arreglo de celdas. Los instrumentos de medición se conectaron de forma inalámbrica a una computadora portátil y se utilizó el software Solmetric para visualizar los resultados de las mediciones.

La Figura 3.29b muestra una curva I-V típica y los parámetros obtenidos con el analizador Solmetric con un cielo despejado. Cuando el voltaje es cero, la corriente está en su valor máximo, y mientras está en el voltaje máximo, la corriente es igual a cero. Estos valores se conocen comúnmente como I_{sc} y V_{oc} , respectivamente. la potencia máxima (P_m) proporcionada por la celda se calcula multiplicando la intensidad máxima (I_m) y el voltaje máximo (V_m). El factor de forma (FF) está relacionado con la eficiencia del módulo y está representado por el área rectangular bajo la curva en el punto de máxima potencia.



(a) Sensor solar Sometric.

(b) Curva I-V típica obtenida por el analizador fotovoltaico.

Figura 3.29: Analizador fotovoltaico Solmetric.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Resultados del análisis óptico

El análisis de simulación del índice de no uniformidad y el flujo de radiación promedio del receptor CPVT se muestra en la Figura 4.1. El análisis ilustra el comportamiento del receptor mientras se mueve antes y después del punto focal. Por un lado, el valor máximo del índice de no uniformidad fue 0.564 y se alcanzó a una distancia de $df = -0.4$ cm del punto focal. El valor mínimo del índice de no uniformidad fue de 0.188, el cual se obtuvo a una distancia de $df = 2.8$ cm. Esta distancia corresponde a una distancia de 62 cm desde la base del colector hasta el receptor. Es importante mencionar que un índice de no uniformidad más bajo indica una mejor distribución del flujo incidente promedio en la celda, lo que ayuda a prevenir el estrés térmico en la celda. Es importante tener en cuenta que el índice de no uniformidad tiene un rendimiento menor en el punto focal del colector que en la posición óptima ($df = 2.8$ cm). Por otro lado, las cuatro celdas alcanzaron un flujo de radiación promedio máximo de 4.6×10^5 W/m² (460 soles) a $df = 2.8$ cm, y un mínimo de 1.89×10^5 W/m² (189 soles) a $df = 4.8$. Si el receptor se coloca en el punto focal del colector ($df = 0$ cm), el flujo incidente medio no es el más alto. Por lo tanto, el receptor CPVT del sistema propuesto se fijó a 2.8 cm del punto focal del colector ya que a esa distancia se observó el menor índice de no uniformidad y el mayor flujo incidente promedio. Como resultado, la Figura 4.2 presenta el mapa de distribución de flujo en las superficies de las cuatro celdas, donde se puede ver que la mayoría de las celdas tienen un flujo incidente uniforme.

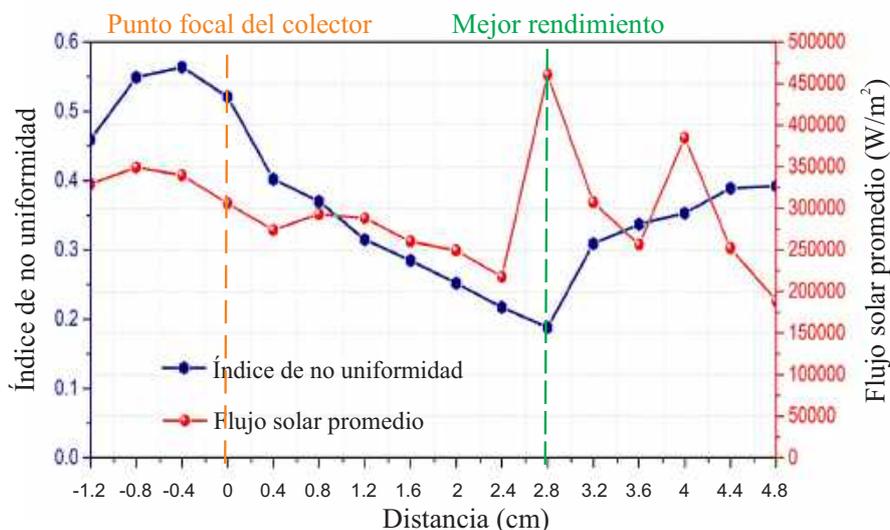


Figura 4.1: Comportamiento del índice de no uniformidad y del flujo incidente medio del receptor CPVT.

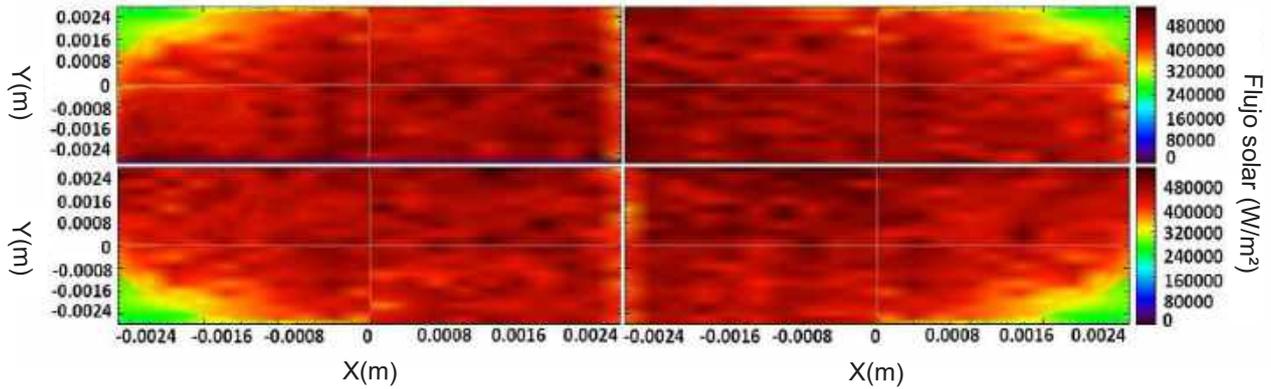
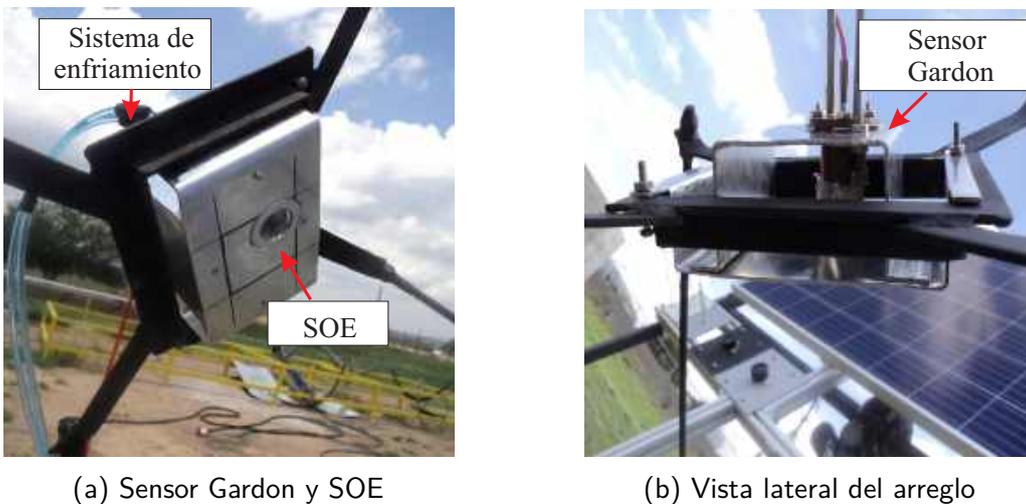


Figura 4.2: Mapa de distribución de flujo de las cuatro celdas solares.

4.1.1. Medición del flujo solar promedio de forma experimental

Para verificar el flujo incidente promedio obtenido de la simulación, se utilizó un sensor Gardon TG1000 y un datalogger CR300. El sensor Gardon se montó a la misma distancia del receptor que en las simulaciones ($df=2.8$ cm), reemplazando la posición de una de las celdas del receptor CPVT. Para el experimento se incluyó el SOE empleando agua como fluido refrigerante como se ilustra en la Figura 4.3a. En la Figura 4.3b se muestra la vista lateral del arreglo utilizado. El sensor proporciona una salida de voltaje que corresponde al flujo incidente, que luego se convierte en valores de concentración. Los resultados del experimento revelaron que el sensor Gardon tenía un flujo incidente promedio de $414,800 \text{ W/m}^2$ (414.8 soles) $\pm 12,500 \text{ W/m}^2$ durante una irradiancia instantánea aproximada de $1,000 \text{ W/m}^2$, valor que ocurre a menudo en lugares soleados como Aguascalientes, México. Vale la pena señalar que el valor obtenido en el experimento fue ligeramente inferior a la concentración predicha en la simulación, que fue de 460 soles. Sin embargo, si se multiplica la concentración geométrica por un factor de corrección de 0.9, que tiene en cuenta los errores de instalación y de seguimiento solar, ambos valores se vuelven similares [163]. De hecho, están dentro del rango de incertidumbre del sensor Gardon.



(a) Sensor Gardon y SOE

(b) Vista lateral del arreglo

Figura 4.3: Arreglo experimental sensor Gardon.

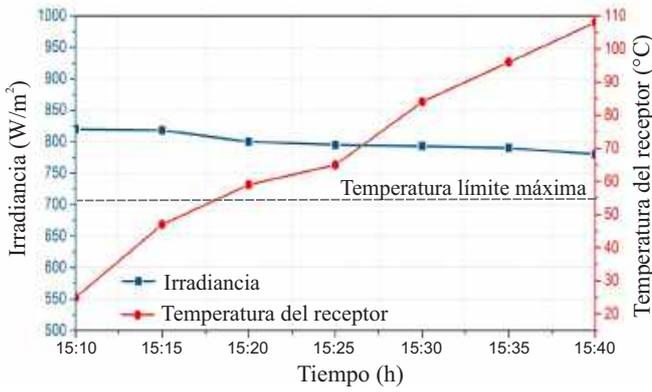
4.2. Caracterización eléctrica sin el sistema de enfriamiento activo

Como es bien sabido las celdas solares son sensibles a la temperatura. A temperaturas más altas, I_{sc} aumenta ligeramente; sin embargo V_{oc} disminuye significativamente [164]. En el caso de las celdas CPV, este fenómeno se maximiza debido a la concentración solar. Si no se utiliza un disipador de calor, incluso niveles de concentración más bajos pueden causar que la temperatura de la celda supere los 80°C, lo que reduciría significativamente su eficiencia de conversión. Además, la vida útil de la celda se ve afectada por el estrés térmico. En este sentido Renno y sus colaboradores [165] realizaron un estudio en una celda de triple unión con características similares a las utilizadas en este trabajo. Utilizaron un SOE tipo caleidoscopio como óptica secundaria y un lente de Fresnel como óptica primaria. La celda fue sometida a un proceso de envejecimiento acelerado de 500 horas de funcionamiento a una concentración de 310 soles sin sistema de refrigeración activo. Sin embargo, vale la pena señalar que la base de las celdas funciona como un pequeño disipador pasivo. Los resultados indicaron una reducción del 50 % de la eficiencia eléctrica de la celda en comparación con una celda no expuesta. La eficiencia eléctrica promedio de la celda degradada fue del 15.8 % y su temperatura se mantuvo entre 25°C y 75°C durante todo el día.

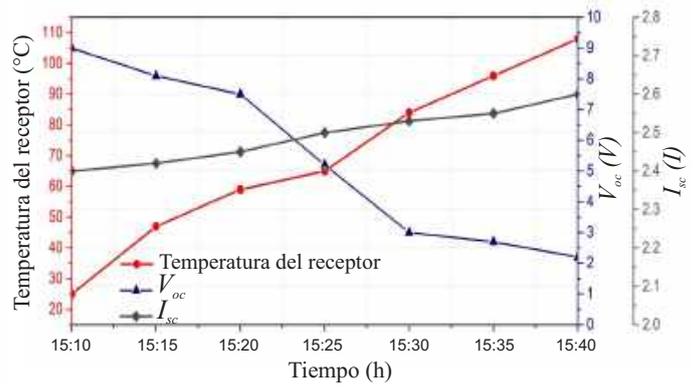
Se realizó una prueba experimental el día 2 de julio de 2023 de las 15:10 a 15:40 h para evaluar el desempeño eléctrico de las celdas CPV sin el disipador de calor activo. Se registraron mediciones de temperatura de las celdas, irradiancia, I_{sc} , V_{oc} y η_e cada 5 minutos. La Figura 4.4 resume los resultados experimentales. Al inicio (15:10 h), el receptor CPVT estaba a 25°C con una irradiancia aproximada de 820W/m² (ver Figura 4.4a). Después se observa rápidamente que aunque la irradiancia disminuye ligeramente, la temperatura del receptor aumenta significativamente. Después de solo 10 minutos del experimento, la temperatura de la celda ya había excedido el límite máximo de temperatura establecido en este trabajo, llegando a superar los 60°C. Después de 30 minutos, las celdas alcanzaron una temperatura de 108°C, incluso cuando la radiación bajó a 780W/m². Por tanto, con días de mayor radiación solar la temperatura de la celda aumentaría más rápidamente y a un nivel más alto. De manera similar, el comportamiento clásico de una celda fotovoltaica se observa en la Figura 4.4b, ya que como la temperatura del receptor aumenta, I_{sc} aumenta ligeramente y V_{oc} disminuye significativamente. Después de 30 minutos I_{sc} incrementa aproximadamente de 2.4A a 2.6A. Por el contrario, V_{oc} inicialmente fue de 9V y el final de 2.2V con una disminución de 75.5 %. Esto tiene dos consecuencias negativas: en primer lugar, la reducción de la potencia eléctrica generada por las celdas solares y, en segundo lugar, su daño estructural.

Así mismo, la Figura 4.4c demuestra una importante disminución en la generación de energía a lo largo del tiempo a medida que la temperatura aumenta de 25 °C a 108 °C, la potencia pasa de 13.12 W a 2.4 W, lo que supone una reducción del 81.70 %. Este mismo comportamiento ocurrió con la η_e , que disminuyó del 31.2 % al 8.31 % en sólo 30 minutos. Finalmente, la Figura 4.4d demuestra la relación entre potencia y eficiencia con respecto a la temperatura. El gráfico muestra que el nivel de potencia disminuye linealmente de 25°C a 59°C. Después de esa temperatura, la potencia cae a un ritmo más rápido. La eficiencia sigue un patrón similar al nivel de potencia, con una mayor temperatura, la eficiencia disminuye a la misma temperatura.

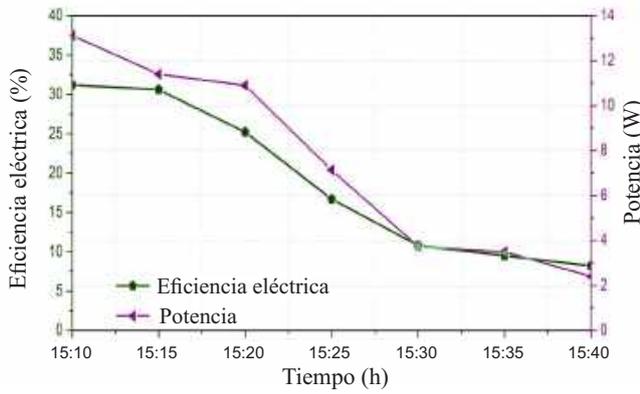
Después de realizar un análisis exhaustivo, se ha determinado que el límite máximo de temperatura del receptor permitido debe establecerse en 55 °C. Esto es necesario para garantizar el rendimiento óptimo de las celdas CPV durante todo el día. Como se anticipó, este análisis subraya la importancia crítica de una estrategia activa eficaz. sistema de refrigeración para el receptor CPV. Es importante señalar que la operación de prueba con el sistema de refrigeración desactivado se realizó después de completar todas las pruebas con el sistema activo. Esto se hizo para evitar cualquier daño potencial a las celdas que podrían alterar los resultados. Sin embargo, este análisis se presenta al principio para comprender mejor la importancia del sistema de refrigeración activo.



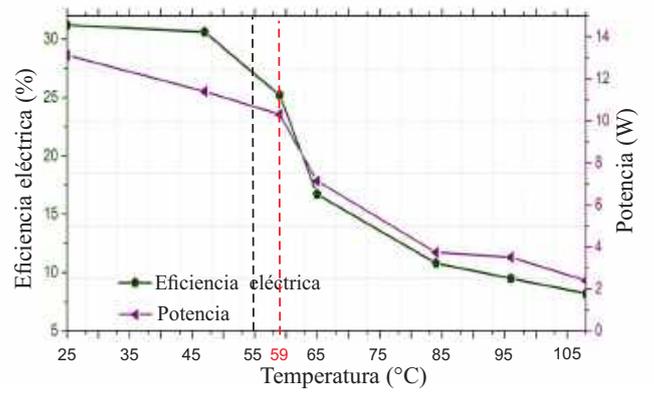
(a) Irradiancia y temperatura.



(b) Temperatura de las celdas, V_{oc} e I_{sc} .



(c) Eficiencia eléctrica y potencia instantáneas con respecto al tiempo.



(d) Eficiencia eléctrica y potencia instantáneas con respecto a la temperatura.

Figura 4.4: Resultados experimentales del rendimiento eléctrico del PD-CPVT propuesto de un típico día soleado sin el sistema de enfriamiento

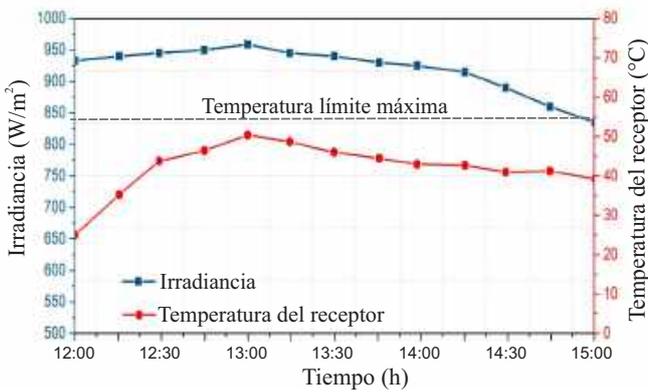
4.3. Caracterización eléctrica con el sistema de enfriamiento activo

Se caracterizó eléctricamente el receptor CPV con sistema de refrigeración activo. Una motobomba sumergible de 42 W se conectó a un tanque de agua de 20 litros, que luego se conectó al receptor mediante mangueras flexibles. El agua circuló a través del sistema con un caudal de 41.6 L/min. Debido a la necesidad de mantener las celdas fotovoltaicas a baja temperatura la bomba funciona a su máxima capacidad en lazo abierto. Vale la pena señalar que la capacidad de la bomba es superior al requisito mínimo para lograr una alta eficiencia eléctrica. Sin embargo, esta decisión puede tener un efecto adverso en la eficiencia térmica del sistema. En trabajos posteriores, se analizará el caudal óptimo para maximizar la eficiencia eléctrica y térmica del sistema. Las pruebas experimentales se realizaron en diferentes días de mayo, junio, julio de 2022 y julio de 2023. Cada día se fijó un período de prueba de 3 horas a partir de las 12:00 a 15:00 horas (hora local), durante las cuales se tomaron datos cada 15 minutos. Solo se seleccionaron días con cielos despejados y velocidades del viento inferiores a 4 m/s para minimizar la variación en las mediciones. Como en el caso anterior, se activó el sistema de seguimiento solar para mantener el sistema PD-CPVT orientado a los rayos solares durante la experimentación.

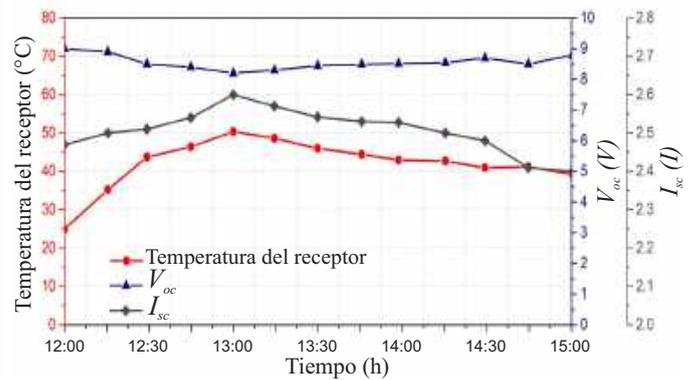
La Figura 4.9 muestra los parámetros eléctricos típicos obtenidos en condiciones de cielo despejado (25 de junio de 2023). Al inicio del experimento, el receptor CPV tenía una temperatura inicial igual al caso anterior de 25°C y una irradiancia inicial de 933W/m² como se muestra en la Figura 4.5a. A las 13:00 horas, la irradiancia y la temperatura del receptor alcanzaron sus valores máximos de 959W/m² y 50.3°C, respectivamente, tras aumentar gradualmente. Posteriormente, a medida que la irradiancia disminuye gradualmente, también lo hace la temperatura del receptor. La temperatura final de las celdas fue de 39.2°C con una irradiancia de 835W/m². Es importante señalar que durante el experimento nunca se superó el límite máximo de temperatura de 55°C, a pesar de que la radiación fue mayor que en el caso sin un sistema de refrigeración activo, lo que demuestra el excelente rendimiento del disipador de calor propuesto. De manera similar, de 12:00 a 13:00 horas, a medida que la temperatura aumentó de 25°C a 50.3°C, V_{oc} disminuyó de 9 a 8.2V mientras que I_{sc} aumentó de 2.47 a 2.6A (ver Figura 4.5b). Como en el caso anterior, el gráfico muestra el comportamiento típico de las celdas solares: a altas temperaturas I_{sc} decrece ligeramente mientras que V_{oc} disminuye significativamente. Es importante tener en cuenta que, a diferencia del experimento sin el sistema de refrigeración, el voltaje del sistema se mantuvo prácticamente estable durante todo el experimento. Así mismo, la Figura 4.5c muestra la potencia con respecto al tiempo. Los datos muestran que la temperatura del receptor se mantuvo por debajo de 55°C durante la experimentación, lo que aseguró que el sistema no baje del 26.5 %. Por el contrario, sin el sistema de refrigeración, la eficiencia cayó al 8.31 %. Se puede observar que durante el instante de mayor temperatura (13:00 horas), se obtuvieron las más bajas eficiencia y potencia. La energía generada se mantuvo en un rango de 11.2W y 13.2W. En última instancia, la Figura 4.5d muestra la potencia generada sobre la temperatura. La potencia máxima de 13.2W se registró a una temperatura ambiente de 25°C. Al aumentar la temperatura, la potencia de salida disminuye ligeramente, alcanzando 11.3W a 50.3°C. Sin embargo, sin el sistema de enfriamiento activo la potencia disminuyó a 2.4W en solo 30 minutos. De manera similar, los experimentos demostraron que el receptor tenía la mayor eficiencia cuando estaba a 25°C, con un valor de 32.7 %. Incluso cuando la temperatura aumentó a 50.3°C, la eficiencia solo disminuyó ligeramente hasta el 26.5 %. Este resultado confirma la importancia de mantener las celdas fotovoltaicas a baja temperaturas para asegurarse de que permanezcan dentro de su rango de trabajo y mantengan una alta eficiencia.

Durante un periodo de experimentación de 10 días con cielo despejado, la consistencia de la temperatura del receptor y los resultados de eficiencia fueron validados como se muestra en la Figura 4.6. Por un lado, el gráfico representado en la Figura 4.6a muestra los datos diarios recopilados

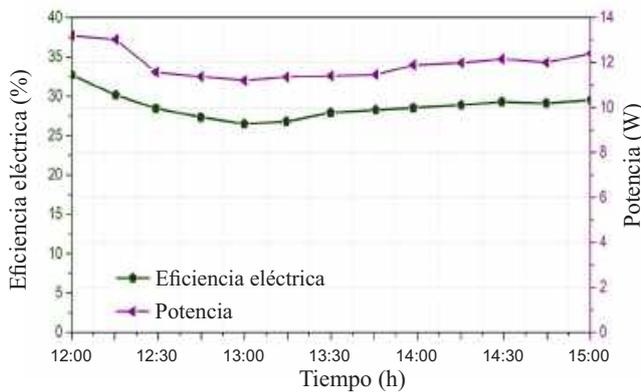
de la temperatura del receptor CPVT durante el periodo de prueba. Se puede observar que la temperatura máxima registrada en cada día de experimentación fue entre 48°C y 53.3°C, y esta temperatura máxima normalmente de llegaba alrededor de las 13:00 horas. Es importante enfatizar que el límite de temperatura objetivo de 55°C nunca fue superado en ningún día. Después de alcanzar la temperatura máxima, se produjo un descenso gradual de la temperatura, la cual se estabilizó en 38°C entre las 14:15 horas y las 15:00 horas. Después de realizar los experimentos, se determinó que el sistema de enfriamiento activo tiene un gran impacto en el rendimiento de las celdas fotovoltaicas. Específicamente, el sistema de enfriamiento disminuye la temperatura de las celdas efectivamente, lo que ayuda a estabilizarlas y prevenir su degradación. Por otra parte, la gráfica de la Figura 4.6b muestra los resultados de la eficiencia promedio del PD-CPVT propuesto. La eficiencia eléctrica instantánea promedio más alta, 31.7%, se registró el 07/09/22, mientras que la más baja, 28.1%, se obtuvo el 15/05/22. El promedio total de la eficiencia eléctrica en el periodo de prueba fue del 29.75%. La literatura informa que la eficiencia eléctrica de los sistemas CPVT varía entre 18-24% en los trabajos teóricos y 12-32.3% en los trabajos experimentales [14], [43]. Entre ellas, la tecnología de disco parabólico es la que ha logrado mayor eficiencia. Según los resultados obtenidos, el PD-CPVT desarrollado exhibió una eficiencia eléctrica notable en comparación con otros trabajos similares. En trabajos futuros, se comparará la eficiencia total del sistema, incluida la eficiencia eléctrica y térmica.



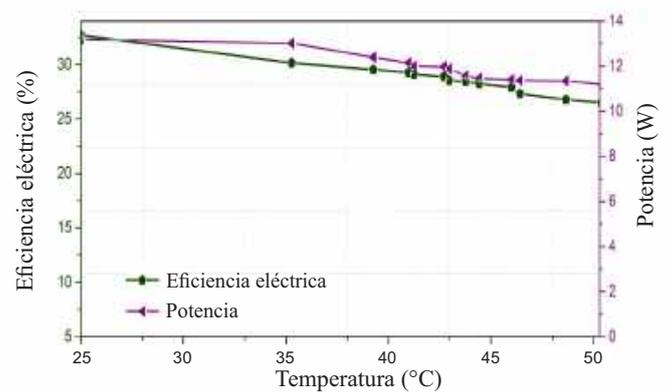
(a) Irradiancia y temperatura de las celdas.



(b) Temperatura de las celdas, V_{oc} e I_{sc} .

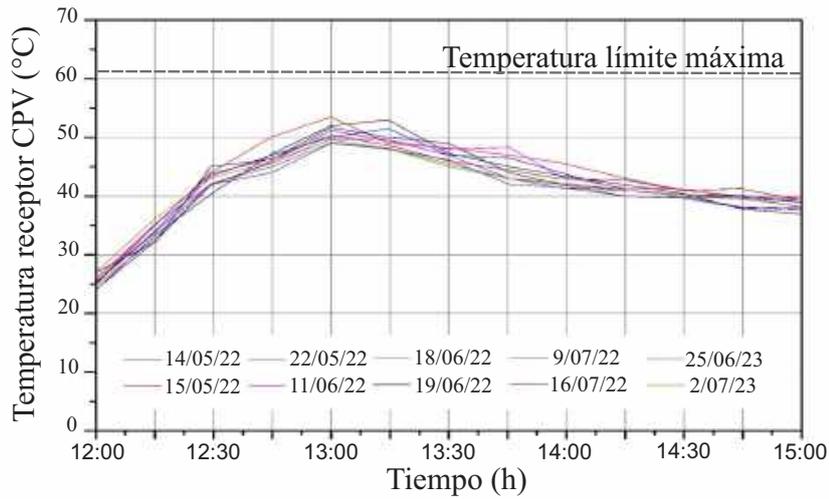


(c) Eficiencia eléctrica instantánea, potencia y tiempo.

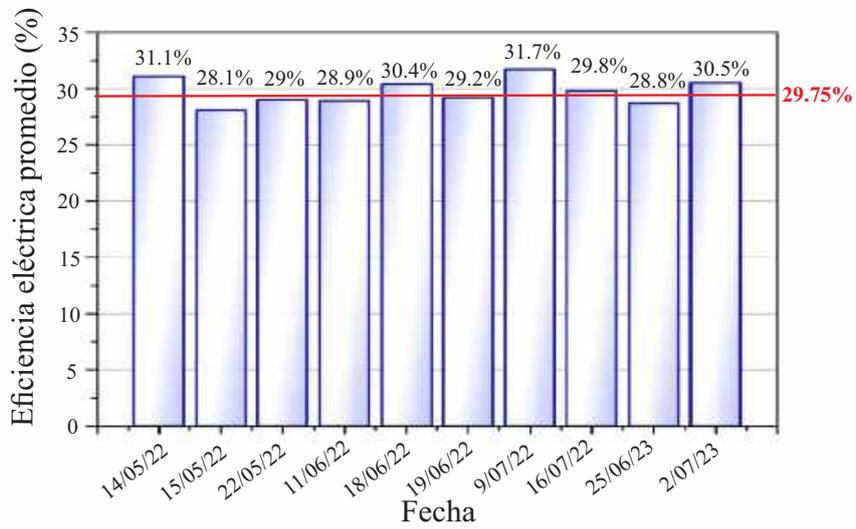


(d) Eficiencia eléctrica instantánea, potencia y temperatura.

Figura 4.5: Resultados experimentales de un típico día soleado con el sistema de enfriamiento activo (25/06/23).



(a) Temperatura diaria del receptor CPV en condiciones de cielo despejado.



(b) Eficiencia eléctrica instantánea diaria en condiciones de cielo despejado.

Figura 4.6: Resultados experimentales de diez días de experimentación.

4.4. Resultado del análisis del consumo eléctrico de los servomotores del seguidor solar empleando algoritmos de control clásico

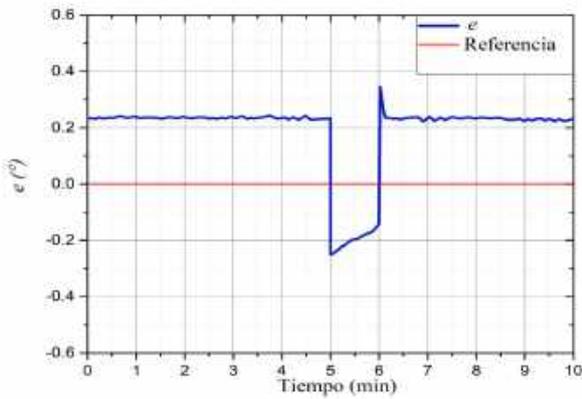
A continuación, se presenta el análisis de los resultados obtenidos en cada uno de los experimentos realizados. En la Figura 4.7a y 4.7b se muestran las gráficas del error de seguimiento absoluto del control on-off del eje acimutal y cenital, respectivamente. En éstas se puede observar que la señal no alcanza la referencia de 0° . El error de seguimiento absoluto en el eje acimutal y cenital es de 0.23° y 0.22° , respectivamente (ver Tablas 4.1 y 4.2). En el minuto 5 se introduce una primera perturbación con una amplitud de -0.5° . Se observa como el sistema responde brusco y posteriormente busca la referencia de 0° ; sin embargo, no alcanza a llegar a la referencia antes de que entre la segunda perturbación. En el minuto 6, se introduce una segunda perturbación con una amplitud de 0.5° y el sistema vuelve a buscar la referencia de 0° , sin embargo, la sobrepasa y se posiciona nuevamente en 0.23° en el eje acimutal y 0.22° en el eje cenital.

En la Figura 4.7c y 4.7d se muestra el error de seguimiento absoluto e del control PI del eje acimutal y cenital. Del mismo modo que en el caso anterior, en el minuto 5 se introduce la primera perturbación con una amplitud de -0.5° . Se observa como el sistema inmediatamente vuelve a buscar la referencia de 0° . En este caso, la señal alcanza a llegar a la referencia a un valor de 0.08° aproximadamente antes de que entre la segunda perturbación. En el minuto 6, se introduce la segunda perturbación con una amplitud de 0.5° y el sistema vuelve a buscar la referencia hasta que logra llegar al estado estacionario en un tiempo aproximado de 30 segundos, alcanzando un error de seguimiento de 0.001° tanto en el eje acimutal como en el cenital. En las gráficas de ambos ejes se observan pocas oscilaciones después de que pasan las dos perturbaciones.

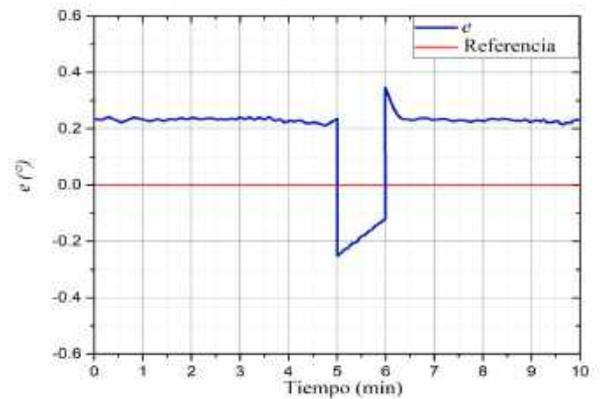
Por último, en la Figura 4.7e y 4.7f se muestra el error de seguimiento absoluto con el control PID. Después de la primera perturbación, el sistema tiende a buscar la referencia de 0° . Inicialmente, tanto para el eje acimutal como para el cenital, después de la primera perturbación el sistema presenta un error de seguimiento de 0.1° . El error disminuye en ambos ejes hasta que se presenta la segunda perturbación. Al pasar la segunda perturbación, el sistema tiende a oscilar un tiempo aproximado de 2.5 minutos antes de llegar a la estabilidad. Es importante destacar que en el control PID el sistema tarda más en llegar a la estabilidad después del minuto 6 que con el control PI. En general, cuando se emplea un controlador PID, la acción derivativa produce un amortiguamiento que reduce o elimina los sobretiros, sin embargo, esto no ocurre cuando el sensor solar presenta en la medición un elevado ruido de alta frecuencia debido a la radiación difusa; la acción derivativa amplifica el ruido produciéndose oscilaciones y disminuyendo el desempeño del sistema.

En las Tablas 4.1 y 4.2 se presentan los resultados obtenidos del consumo de corriente, error de seguimiento y los índices de desempeño de los motores del eje acimutal y cenital del seguidor solar para los tres controladores bajo estudio. Los valores de consumo eléctrico obtenidos representan el promedio de las 10 pruebas realizadas con una duración de 10 minutos cada una. El consumo energético del control on-off en el eje acimutal y cenital fue de 12.8 Wh y 13.6 Wh respectivamente, que es aproximadamente 51.56 % y 40 % mayor que en el control PI y PID respectivamente en ambos ejes; así mismo, el error de seguimiento absoluto en el eje acimutal y cenital fue de 0.23° y 0.22° , respectivamente, que es 90 % y 87.27 % mayor que en el control PI y PID respectivamente. Con el control on-off, al presentarse las perturbaciones, el sistema responde de forma drástica y esto se refleja en un mayor consumo de corriente en los motores, lo que con el tiempo afectará su funcionamiento. Es importante mencionar que aunque el control on-off es el más utilizado en sistemas de seguimiento solar [72], con respecto al consumo energético y precisión de seguimiento no es el más adecuado. Por otro lado, el control PI presentó un error de control absoluto e de 0.022° en ambos ejes y fue el que obtuvo un menor consumo de corriente. Esto también se refleja en los criterios de desempeño obtenidos para este controlador, ya que el EAM, IECT y VTC fueron

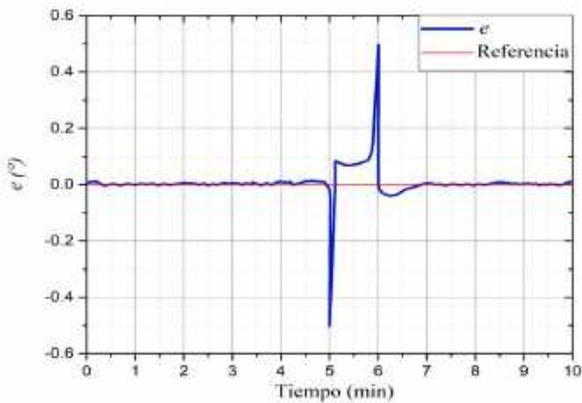
menores en ambos ejes que en el control on-off y el PID. Esto representa que el control PI es el que presentó menor número y amplitud de las oscilaciones y la señal de control es más suave que las correspondientes al control on-off y PID.



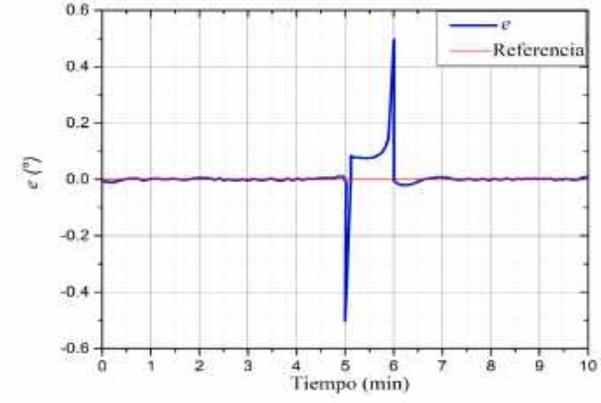
(a) Error de seguimiento eje acimutal (control on-off).



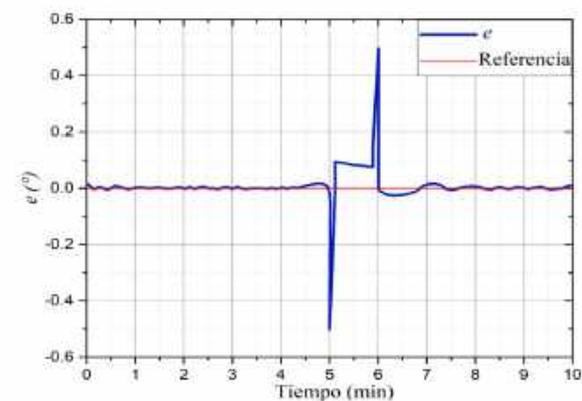
(b) Error de seguimiento eje cenital (control on-off).



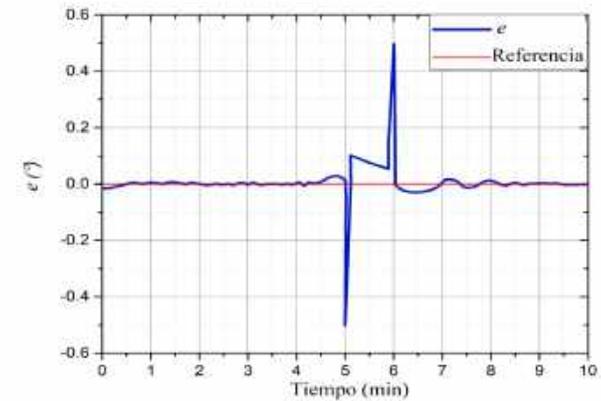
(c) Error de seguimiento eje acimutal (control PI).



(d) Error de seguimiento eje cenital (control PI).



(e) Error de seguimiento eje acimutal (control PID).



(f) Error de seguimiento eje cenital (control PID).

Figura 4.7: Resultados experimentales del error de seguimiento de los algoritmos de control on-off, PI y PID.

Es importante notar que entre el control PI y PID hubo poca variación en sus resultados. Sin embargo, obtuvo un mejor desempeño el control PI. Por otro lado, el control PID obtuvo un mejor

Tabla 4.1: Índices de desempeño, error de seguimiento y consumo energético eje acimutal.

Control	$e(^{\circ})$	Consumo (Wh)	EAM ($^{\circ}$)	IECT ($^{\circ}$)	VTC ($^{\circ}$)
on-off	0.23	12.8	11.75	2.34	1.38
PI	0.022	6	8.71	1.58	0.52
PID	0.028	7.2	9.69	2.61	0.76

Tabla 4.2: Índices de desempeño, error de seguimiento y consumo energético eje cenital.

Control	$e(^{\circ})$	Consumo (Wh)	EAM ($^{\circ}$)	IECT ($^{\circ}$)	VTC ($^{\circ}$)
on-off	0.22	13.6	13.27	2.55	1.41
PI	0.022	6.8	7.45	1.76	0.43
PID	0.028	8.4	8.76	2.84	0.72

desempeño y un menor consumo de corriente que el control on-off. Con respecto al análisis de los controladores, se comprobó que el control con menor rendimiento, mayor consumo energético y mayor error de seguimiento fue el on-off. En este sentido, el control PI obtuvo el mejor desempeño y el menor consumo energético, tanto para el eje acimutal, como el cenital, generando un error de seguimiento absoluto del lazo de control de 0.022° en ambos ejes; un 90 % menor que el conseguido con el control on-off, el control más empleado en seguidores solares. Asimismo, el consumo energético fue de 6Wh y 6.8Wh en el eje acimutal y cenital, respectivamente, lo que representa el 46.87 % y el 50 % del consumo obtenido por el control on-off. Finalmente, el control PID obtuvo un menor rendimiento que el control PI debido a que con este controlador los motores presentaron oscilaciones de mayor amplitud y el sistema tardó más en llegar al estado estacionario. Sin embargo, el control PID obtuvo un menor error de seguimiento y un mejor desempeño que el control on-off. Así mismo, el consumo energético del control PID en el eje acimutal y cenital fueron de 7.2Wh y 8.4Wh respectivamente que representa el 56.25 % y 61.76 % del consumo obtenido por el control on-off.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se puede decir que el algoritmo de control, la precisión de seguimiento y el consumo energético de los motores de un seguidor solar están relacionados. Si bien es cierto que en la literatura se menciona que un sistema de seguimiento solar de alta precisión tendrá un mayor consumo eléctrico, es posible lograr el equilibrio entre precisión de seguimiento y consumo energético mediante la implementación de algoritmos de control sencillos y de bajo costo.

4.5. Resultados pruebas de seguimiento solar implementando algoritmos de control clásico

En las Tablas 4.3 y 4.4 se presentan los resultados de 9 días de experimentación (ver Sección 3.5.4) de los criterios de desempeño obtenidos para los motores cenital y acimutal del sistema de seguimiento solar. A partir de los resultados se puede deducir que el algoritmo de control con el mejor desempeño en el seguidor solar fue el PI con un STE_{prom} de 0.25° para el eje acimutal y 0.38° para el eje cenital. En cuanto a los índices de desempeño para este controlador en ambos ejes, se obtuvieron un EAM de 0.54° y 0.52° , que representa el error máximo alcanzado durante los días de la experimentación, un IEC de 25.96° y 26.67° , que representa la acumulación del error durante el experimento y un VTC de 0.74° y 0.75° que representa la suavidad de la señal de control. Además, es importante destacar que el control PID mostró un desempeño ligeramente inferior en comparación con el control PI, con un STE_{prom} de 0.28° en el eje acimutal y 0.41° en el eje cenital. Por otro lado, los valores de EAM, IEC y VTC fueron de 0.61° , 28.70° y 0.82° para el eje acimutal, y 0.57° , 29.04° y 0.87° para el eje cenital, respectivamente. Esta diferencia se debe a que el término

derivativo del control PID puede amplificar el ruido presente en la señal de retroalimentación, lo que en sistemas de seguimiento solar con servomotores puede causar movimientos innecesarios y vibraciones. Se observa, además, que el DMA logró un buen desempeño en ambos controladores, alcanzando desviaciones de 0.135° y 0.140° en el eje acimutal, mientras que en el eje cenital los valores fueron de 0.141° y 0.144° para los controladores PI y PID, respectivamente. Esto permitió un seguimiento estable, con una dispersión mínima en relación con la media de los datos. El control PI al no tener término derivativo es menos sensible al ruido, lo que resulta en un funcionamiento más suave. En el caso del control on-off es el que obtuvo el peor desempeño de los tres controladores, con un STE_{prom} de 0.44° y 0.52° en los ejes acimutal y cenital respectivamente. El EAM fue de 0.80 en ambos ejes, el IEC también fue el mayor de los tres con 59.52° y 68.68° y el VTC de 1.51° y 1.55° en los ejes acimutal y cenital respectivamente. El DMA fue de 0.256° y 0.266° para el eje acimutal y cenital respectivamente, mostrando una mayor variabilidad de los datos que en el control PI y PID. El control on-off presentó un STE_{prom} un 43.18 % y un 26.92 % mayor que el control PI en los ejes acimutal y cenital, respectivamente. Además, este valor es un 36.36 % y un 21.15 % mayor que el control PID en los ejes acimutal y cenital, respectivamente.

Tabla 4.3: Datos de pruebas experimentales motor acimutal.

Algoritmo de control	Fecha (día/mes/año)	STE_{prom} ($^\circ$)	EAM ($^\circ$)	IEC ($^\circ$)	VTC ($^\circ$)	DMA ($^\circ$)
On-off	04/02/2022	0.41	0.75	58.49	1.45	0.243
	07/02/2022	0.47	0.89	60.87	1.48	0.278
	08/02/2022	0.43	0.77	59.20	1.60	0.249
	Promedio	0.44	0.80	59.52	1.51	0.256
PI	11/02/2022	0.23	0.48	23.24	0.75	0.124
	16/02/2022	0.24	0.56	26.54	0.68	0.132
	18/02/2022	0.27	0.59	28.10	0.79	0.151
	Promedio	0.25	0.54	25.96	0.74	0.135
PID	22/02/2022	0.28	0.59	28.40	0.79	0.137
	10/03/2022	0.30	0.61	29.73	0.82	0.149
	18/03/2022	0.25	0.63	27.98	0.85	0.135
	Promedio	0.28	0.61	28.70	0.82	0.140

El control on-off es frecuentemente utilizado en seguidores solares principalmente por su simplicidad y bajo costo, sin embargo no es preciso. Además, los movimientos abruptos que resultan del control on-off pueden causar mayor desgaste en los componentes mecánicos del seguidor solar, como los motores y los engranajes. Su inexactitud en el seguimiento del Sol significa que no siempre está en la posición óptima para captar la máxima cantidad de luz solar. Esto resulta en una reducción significativa de la eficiencia general del sistema, disminuyendo la cantidad de energía generada. Con esto se concluye que aunque el control on-off es el más utilizado, con respecto a la precisión de seguimiento solar y la suavidad del control no es el más adecuado.

4.6. Resultados implementación del anti-windup

En las Tablas 4.5 y 4.6 se presentan los resultados de los criterios de desempeño obtenidos de los cuatro experimentos descritos en la Sección 3.5.10, correspondientes a los motores acimutal y cenital respectivamente. Los valores obtenidos representan el promedio de 10 pruebas, cada una con una duración de 400 s, realizadas para cada uno de los 4 experimentos.

Tabla 4.4: Datos de pruebas experimentales motor cenital.

Algoritmo de control	Fecha (día/mes/año)	STE_{prom} (°)	EAM (°)	IEC (°)	VTC (°)	DMA (°)
On-off	04/02/2022	0.52	0.68	72.23	1.63	0.258
	07/02/2022	0.48	0.84	66.70	1.52	0.282
	08/02/2022	0.56	0.87	67.12	1.49	0.260
	Promedio	0.52	0.80	68.68	1.55	0.266
PI	11/02/2022	0.34	0.51	22.53	0.77	0.136
	16/02/2022	0.41	0.46	29.69	0.80	0.142
	18/02/2022	0.38	0.59	27.78	0.67	0.145
	Promedio	0.38	0.52	26.67	0.75	0.141
PID	22/02/2022	0.36	0.55	27.15	0.87	0.137
	10/03/2022	0.43	0.67	29.78	0.93	0.146
	18/03/2022	0.45	0.48	30.20	0.81	0.149
	Promedio	0.41	0.57	29.04	0.87	0.144

En términos generales, se puede afirmar que el control PI con anti-windup del experimento 4, con $T=10$ s y límites de saturación $[-1,1]$ grados, presentó un mejor desempeño en cuanto a EAM, IEC y VTC con valores de 0.25, 1.80 y 0.17 para el eje acimutal y 0.27, 1.98 y 0.19 para el eje cenital respectivamente. En los experimentos 1, 2 y 3, se observaron valores más altos en los criterios de desempeño EAM, IEC y VTC. Estos resultados coinciden con las gráficas obtenidas en la Sección 3.5.10, donde se muestra que el control PI sin anti-windup obtuvo el peor resultado.

Una constante de tiempo adecuada puede mejorar la respuesta dinámica del sistema, reduciendo el tiempo de establecimiento y la magnitud de los errores transitorios por lo cual IEC también será menor. Por otro lado, si los límites de saturación son adecuados evitan la acumulación excesiva de la acción integral reduciendo también el IEC. En un sistema de seguimiento solar en donde el control preciso es crucial significa que el sistema puede seguir la referencia más de cerca y con menor error acumulado a lo largo del tiempo.

Un menor EAM implica que el sistema es más robusto y capaz de mantener el desempeño deseado incluso cuando el sistema esté expuesto a perturbaciones o cambios en las condiciones de operación. Por otro lado, el VTC al ser menor, previene los cambios extremos en la señal de control que son típicas cuando el integrador se descontrola en presencia de saturación. La señal de control más suave reduce el desgaste de los actuadores, prolongando su vida útil y reduciendo costos de mantenimiento y reparación.

En resumen, tanto la constante de tiempo como los límites de saturación deben ser cuidadosamente ajustados para optimizar el desempeño del controlador PI. Un ajuste adecuado puede mejorar la precisión, minimizar errores máximos y reducir la variabilidad de en la señal de control.

Tabla 4.5: Índices de desempeño control PI con y sin anti-windup eje acimutal.

N°	Estrategia	Límites de saturación (°)	T (s)	EAM (°)	IEC (°)	VTC (°)
1	Sin anti-windup	-	-	6.73	5.70	1.72
2	Anti-windup 1	$[-0.5, 0.5]$	6	0.35	2.62	0.56
3	Anti-windup 2	$[-1.2, 1.2]$	20	0.56	3.75	0.74
4	Anti-windup 3	$[-1, 1]$	10	0.25	1.80	0.17

Tabla 4.6: Índices de desempeño control PI con y sin anti-windup eje cenital.

N°	Estrategia	Límites de saturación (°)	T (s)	EAM (°)	IEC (°)	VTC (°)
1	Sin anti-windup	-	-	6.91	5.86	1.80
2	Anti-windup 1	[-0.5, 0.5]	6	0.38	2.69	0.58
3	Anti-windup 2	[-1.2, 1.2]	20	0.62	4.05	0.77
4	Anti-windup 3	[-1, 1]	10	0.27	1.98	0.19

4.6.1. Análisis comparativo del control PI y PI con anti-windup (Pruebas de seguimiento solar)

Una vez establecidos los valores adecuados de T y los niveles de saturación, se llevaron a cabo pruebas de seguimiento solar los días 26, 27 y 28 de marzo del 2022, en un horario de 8:00 a.m a 3:00 p.m. Estas pruebas tuvieron como objetivo principal evaluar y comparar el desempeño de dos configuraciones de control: el control PI estándar (ver resultados de la Sección 4.5) y el control PI con anti-windup. Para realizar esta comparación, se emplearon los criterios de desempeño IEC, EAM y VTC. Los resultados de los criterios de desempeño obtenidos así como el STE_{prom} se presentan en la tablas 4.7 y 4.8. A partir de los criterios de desempeño, se pudo comprobar que la estrategia anti-windup optimiza significativamente el control PI. Esta mejora se refleja en la reducción del STE_{prom} y de los indicadores IEC, EAM y VTC, lo que indica una mayor precisión y estabilidad en el sistema de control. Mediante la estrategia anti-windup se logró un STE_{prom} de 0.22° y 0.34° en el eje acimutal y cenital respectivamente. También, es posible observar que el DMA para el eje acimutal y cenital fue de 0.125° y 0.137° logrando también un mejor resultado que con el control PI estándar.

En un sistema de seguimiento solar que emplea servomotores, la implementación de un anti-windup es esencial para optimizar su funcionamiento. Este mecanismo evita la acumulación de error en el controlador PI, lo que resulta en una reducción de movimientos innecesarios y vibraciones. Como resultado, no solo se mejora la eficiencia global del sistema, sino que también se prolonga significativamente la vida útil de los actuadores. Al minimizar el desgaste mecánico y el consumo energético, el sistema opera de manera más suave y confiable, garantizando un rendimiento óptimo y sostenible a largo plazo.

Tabla 4.7: Datos de pruebas experimentales control PI/ control PI anti-windup motor acimutal.

Algoritmo de control	Fecha (día/mes/año)	STE_{prom} (°)	EAM (°)	IEC (°)	VTC (°)	DMA (°)
PI	11/02/2022	0.23	0.48	23.24	0.75	0.124
	16/02/2022	0.24	0.56	26.54	0.68	0.132
	18/02/2022	0.27	0.59	28.10	0.79	0.151
	Promedio	0.25	0.54	25.96	0.74	0.135
PI anti-windup	26/03/2022	0.22	0.37	22.23	0.54	0.125
	27/03/2022	0.21	0.26	22.13	0.48	0.123
	28/03/2022	0.23	0.40	26.30	0.66	0.128
	Promedio	0.22	0.34	23.55	0.56	0.125

Tabla 4.8: Datos de pruebas experimentales control PI/ control PI anti-windup motor cenital.

Algoritmo de control	Fecha (día/mes/año)	STE _{prom} (°)	EAM (°)	IEC (°)	VTC (°)	DMA (°)
PI	11/02/2022	0.34	0.51	22.53	0.77	0.136
	16/02/2022	0.41	0.46	29.69	0.80	0.142
	18/02/2022	0.38	0.59	27.78	0.67	0.145
	Promedio	0.38	0.52	26.67	0.75	0.141
PI anti-windup	26/03/2022	0.32	0.42	22.22	0.63	0.137
	27/03/2022	0.37	0.45	26.76	0.58	0.139
	28/03/2022	0.33	0.44	23.40	0.61	0.135
	Promedio	0.34	0.43	24.12	0.61	0.137

4.7. Resultados de pruebas de seguimiento solar en el PD-CPVT

Una vez implementado el control PI con anti-windup en el seguidor solar, se realizaron pruebas de seguimiento en el sistema PD-CPVT completo. Las pruebas experimentales se realizaron en diferentes días de mayo, junio, julio de 2022 y julio de 2023. Cada día se fijó un período de prueba de 3 horas a partir de las 12:00 a 15:00 horas (hora local) (ver Sección 4.3).

En el experimento, se realizaron mediciones del error de seguimiento instantáneo absoluto (STE) cada 15 minutos, coincidiendo con las lecturas del trazador de curvas utilizadas para obtener la eficiencia eléctrica instantánea. Estas mediciones se efectuaron con un sensor MEMS-ISS-A5, como se mencionó en la Sección 3.5.3. En la Figura 4.8a y 4.8b se presentan los resultados de STE y eficiencia eléctrica en el eje acimutal y cenital del día 25 de junio del 2023. En este día de prueba se obtuvo un STE_{prom} absoluto en el eje acimutal y cenital de 0.25° y 0.37° respectivamente.

Es importante mencionar que los valores de STE son solo una muestra representativa del comportamiento del sistema. No obstante, a partir de estos valores, se puede inferir una idea de la estabilidad del sistema. En las figuras se observa que el sistema se mantuvo estable en ambos ejes a lo largo del experimento.

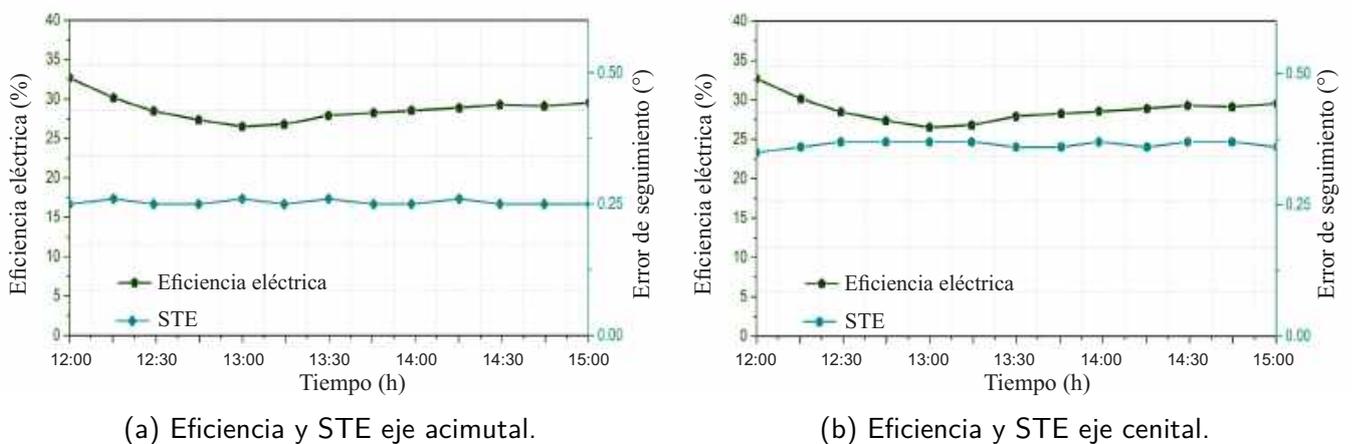


Figura 4.8: Resultados experimentales del error de seguimiento de un típico día soleado (25/06/23).

Se realizaron pruebas durante 10 días con cielo despejado a la par que se determinaba la eficiencia eléctrica del sistema (ver Sección 4.3). Se obtuvo el STE_{prom} de cada día de experimentación con

un tiempo de muestreo de 2 ms. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 4.9a y 4.9b. El STE_{prom} absoluto más alto se obtuvo el día 25 de junio del 2023 tanto para el eje acimutal como para el eje cenital con un valor de 0.25° y 0.37° respectivamente validando los resultados obtenidos del experimento anterior. Mientras que el STE_{prom} más bajo en ambos ejes se obtuvo el día 9 de julio del 2023 con 0.18° y 0.32° en el eje acimutal y cenital respectivamente. Según los datos recolectados, el STE_{prom} durante los diez días de experimentación fue de 0.23° en el eje acimutal y 0.34° en el eje cenital. De igual manera, el DMA alcanzó valores de 0.124° y 0.132° en los ejes acimutal y cenital, respectivamente. En cuanto a los índices de desempeño el error máximo alcanzado de todos los días de experimentación (EAM) fue de 0.44° en el motor acimutal y el IEC promedio fue de 19.94° y 23.10° en el eje acimutal y cenital respectivamente.

Es importante destacar que, durante los diez días de experimentación, la mayor eficiencia eléctrica instantánea se alcanzó el 9 de julio de 2022, con un 31.7%. Este día también se registró la mayor precisión de seguimiento, con 0.18° en el eje acimutal y 0.32° en el eje cenital.

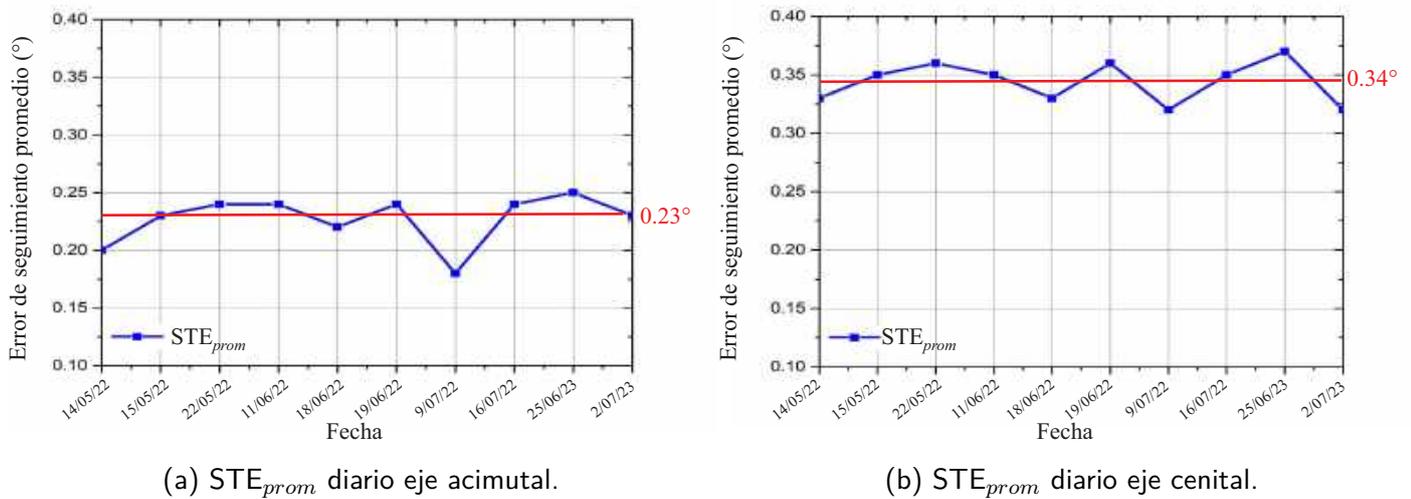


Figura 4.9: Resultados experimentales del STE_{prom} de diez días de experimentación.

En conclusión, los resultados obtenidos durante los diez días de experimentación revelan una relación clara entre el error de seguimiento solar y la eficiencia eléctrica del sistema. Esto sugiere que una mayor precisión en el seguimiento solar contribuye significativamente a optimizar la eficiencia eléctrica del sistema.

El análisis de los valores de STE, aunque representan solo una muestra del comportamiento del sistema, permite inferir la estabilidad del mismo. En este caso, las Figuras 4.8a y 4.8b indican que el sistema se mantuvo estable en ambos ejes a lo largo del experimento, reforzando la idea de que la estabilidad en el seguimiento solar es crucial para maximizar la eficiencia energética. Estos hallazgos subrayan la importancia de minimizar el error de seguimiento solar para mejorar el rendimiento de los sistemas CPVT. Un seguimiento preciso no solo maximiza la captura de energía solar sino que también asegura un funcionamiento estable y eficiente del sistema a lo largo del tiempo.

Este trabajo de tesis proporciona una base sólida para futuras investigaciones y desarrollos en el campo de la energía solar, destacando el valor de la precisión en el seguimiento solar como un factor clave para la optimización de la eficiencia eléctrica y/o térmica en sistemas CPVT.

Capítulo 5

Conclusiones

En este trabajo de tesis se presentó el diseño, simulación, construcción y caracterización eléctrica de un prototipo de concentrador solar térmico fotovoltaico de disco parabólico basado en un arreglo de cuatro celdas de concentración fotovoltaica. Esto incluye un sistema de enfriamiento activo en el receptor CPVT para mantener la temperatura estable de las celdas durante periodos de alta irradiación solar asegurando que la temperatura se mantenga por debajo de 55°C. El prototipo utiliza un espejo de disco parabólico para enfocar la radiación normal directa, que tiene una alta eficiencia óptica de alrededor del 97 %. Además, el sistema cuenta con un mecanismo de seguimiento solar en dos ejes, en el cual se ha implementado un algoritmo de control PI con anti-windup para optimizar su funcionamiento.

Con base en los resultados obtenidos se puede concluir lo siguiente:

1. Durante la fase de diseño, se confirmó que, a pesar del uso de un elemento óptico secundario, todavía hay cierto grado de falta de uniformidad de la luz en las superficies de las celdas solares. Esta falta de uniformidad y el promedio de la irradiancia incidente en las celdas solares depende en gran medida de la distancia del receptor al punto focal. En la distancia óptima obtenida de simulaciones ópticas, el índice de uniformidad fue 0.188 y el flujo incidente fue $414.800 \text{ W/m}^2 \pm 12,500 \text{ W/m}^2$. Este resultado indica que, aunque el sistema es funcional, es importante mejorar el diseño para reducir aún más las variaciones en la irradiancia y optimizar su rendimiento.
2. En condiciones de cielo despejado se obtuvo una concentración real promedio de 414.8 soles y una concentración teórica de 460 soles (sin considerar el factor de corrección por seguimiento solar, pérdidas espectrales y desajuste por pérdidas eléctricas).
3. En el prototipo sin sistema de refrigeración, la temperatura del receptor aumentó rápidamente. En sólo media hora se alcanzó una temperatura de 108°C. Este aumento de temperatura provocó una disminución de la eficiencia eléctrica instantánea, que descendió hasta el 8.31 %. Además, el estrés térmico provocado por esta alta temperatura puede provocar daños irreversibles a la celda o reducir su vida útil.
4. Durante 10 días de experimentación, el sistema propuesto con un sistema de enfriamiento mostró una eficiencia eléctrica promedio de 29.75 % manteniendo una temperatura media del receptor de 41.75°C. Esto confirma que el sistema de enfriamiento está funcionando correctamente.
5. El error de seguimiento promedio absoluto durante los 10 días de experimentación fue de 0.23° en el eje acimutal y 0.34° en el eje cenital, con una desviación media absoluta de 0.124° y 0.132° en cada eje, respectivamente. Las variaciones en la desviación media absoluta fueron mínimas, lo que indica un comportamiento estable del sistema de seguimiento solar en los días de experimentación.

6. La mayor eficiencia eléctrica instantánea fue de 31.7 % con un error de seguimiento promedio absoluto de 0.18° en el eje acimutal y 0.32° en el eje cenital, lo cual representa la mayor precisión de seguimiento solar registrada durante los 10 días de experimentación.

La viabilidad técnica del uso de tecnología de disco parabólico en sistemas híbridos se validó al lograr uno de las eficiencias eléctricas más altas reportadas en la literatura. Se encontraron importantes desafíos de diseño, construcción e instalación durante el desarrollo del proyecto del sistema de concentración térmica fotovoltaica. Sin embargo, el prototipo permitió experimentar con nuevas estrategias para aprovechar la tecnología de disco parabólico para generar electricidad con alta eficiencia y calor a temperaturas medias. Asimismo, fue evidente que el sistema podría escalarse fácilmente aumentando el tamaño del colector para integrar un conjunto de células fotovoltaicas de mayor concentración o lograr factores de concentración más altos.

Un aspecto crucial para alcanzar una eficiencia sobresaliente en el sistema PD-CPVT ha sido la precisión del seguimiento solar. El sistema, equipado con un algoritmo de control PI con anti-windup, logró una alta precisión de seguimiento, lo cual fue fundamental para maximizar la eficiencia eléctrica instantánea del sistema.

Estos resultados subrayan la importancia crítica de la precisión en el seguimiento solar para la eficiencia de los sistemas de concentración fotovoltaica, destacando el potencial de los concentradores solares térmicos fotovoltaicos de disco parabólico como una solución altamente eficiente y viable para la generación de energía eléctrica-térmica.

Capítulo 6

Recomendaciones

Como trabajo futuro se sugiere realizar estudios a largo plazo para evaluar la estabilidad y eficiencia del sistema en diferentes condiciones climáticas. Esto proporcionará una visión más completa del sistema a lo largo del año. Así mismo, realizar la caracterización térmica para determinar la eficiencia general del sistema y optimizar el sistema de refrigeración. Además, es crucial llevar a cabo un análisis de costos detallado para evaluar la viabilidad económica del sistema propuesto. Este análisis debe incluir el costo inicial de implementación, los costos operativos y de mantenimiento, así como los posibles ahorros energéticos derivados de la mayor eficiencia del sistema. Al comparar estos costos con los beneficios esperados, como la reducción en el consumo de energía y la mejora en el rendimiento térmico, será posible determinar si el sistema es económicamente sostenible a largo plazo. De esta forma, se podrá justificar la inversión inicial y ajustar el diseño del sistema para maximizar tanto la eficiencia técnica como su rentabilidad.

Bibliografía

- [1] F. Posso, «Energía y ambiente: pasado, presente y futuro. Parte dos: Sistema energético basado en energías alternativas,» Geoenseñanza, 2002.
- [2] C. De la Cruz Casaño, C. L. Aduato, J. M. Espinal, R. C. Ravichagua e I. R. Malpartida, «Seguidor solar adaptativo basado en un controlador lógico programable para paneles fotovoltaicos,» Apuntes de Ciencia & Sociedad, vol. 2, n.º 2, 2012.
- [3] A. E. Mejía, M. H. Londoño y J. C. Osorio, «Diseño e implementación de un seguidor solar para la optimización de un sistema fotovoltaico,» Scientia et Technica, vol. 1, n.º 44, págs. 245-250, 2010.
- [4] N. Machado Toranzo, A. Lussón Cervantes, L. L. Oro Carralero, J. Bonzon Henriquéz y O. Escalona Costa, «Seguidor Solar, optimizando el aprovechamiento de la energía solar,» Ingeniería Energética, vol. 36, n.º 2, págs. 190-199, 2015.
- [5] M. Mirdanies, «Astronomy algorithm simulation for two degrees of freedom of solar tracking mechanism using C language,» Energy Procedia, vol. 68, págs. 60-67, 2015.
- [6] C. De la Cruz, «Seguidor solar cronológico adaptivo para paneles fotovoltaicos,»
- [7] F. M. C. Irma Yolanda Sanchez Chávez, «Evaluación de seguimiento azimutal para la generación fotovoltaica en el centro de México, Aguascalientes: Tecnológico de Monterrey, División de Ingeniería y Arquitectura, Campus Aguascalientes,» 2016.
- [8] H. Zaghoul, M. Emam, M. Abdelrahman y M. Abd Rabbo, «Optimization and parametric analysis of a multi-junction high-concentrator PV cell combined with a straight fins heat sink,» Energy Conversion and Management, vol. 243, pág. 114 382, 2021.
- [9] O. Z. Sharaf y M. F. Orhan, «Concentrated photovoltaic thermal (CPVT) solar collector systems: Part I–Fundamentals, design considerations and current technologies,» Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 50, págs. 1500-1565, 2015.
- [10] A. Makki, S. Omer y H. Sabir, «Advancements in hybrid photovoltaic systems for enhanced solar cells performance,» Renewable and sustainable energy reviews, vol. 41, págs. 658-684, 2015.
- [11] N. T. Raj, S. Iniyar y R. Goic, «A review of renewable energy based cogeneration technologies,» Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 15, n.º 8, págs. 3640-3648, 2011.
- [12] X. Ju, C. Xu, Z. Liao y col., «A review of concentrated photovoltaic-thermal (CPVT) hybrid solar systems with waste heat recovery (WHR),» Science bulletin, vol. 62, n.º 20, págs. 1388-1426, 2017.
- [13] M. Herrando, C. N. Markides y K. Hellgardt, «A UK-based assessment of hybrid PV and solar-thermal systems for domestic heating and power: system performance,» Applied Energy, vol. 122, págs. 288-309, 2014.
- [14] A. Herez, H. El Hage, T. Lemenand, M. Ramadan y M. Khaled, «Review on photovoltaic/thermal hybrid solar collectors: Classifications, applications and new systems,» Solar Energy, vol. 207, págs. 1321-1347, 2020.

- [15] K. Papis-Frączek y K. Sornek, «A review on heat extraction devices for CPVT systems with active liquid cooling,» *Energies*, vol. 15, n.º 17, pág. 6123, 2022.
- [16] A. Royne, C. J. Dey y D. R. Mills, «Cooling of photovoltaic cells under concentrated illumination: a critical review,» *Solar energy materials and solar cells*, vol. 86, n.º 4, págs. 451-483, 2005.
- [17] Y. Amanlou, T. T. Hashjin, B. Ghobadian y e. G. Najafi, «Air cooling low concentrated photovoltaic/thermal (LCPV/T) solar collector to approach uniform temperature distribution on the PV plate,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 141, págs. 413-421, 2018.
- [18] B. Du, E. Hu y M. Kolhe, «Performance analysis of water cooled concentrated photovoltaic (CPV) system,» *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 16, n.º 9, págs. 6732-6736, 2012.
- [19] N. Aslfattahi, L. Samyilingam, A. Abdelrazik, A. Arifutzzaman y R. Saidur, «MXene based new class of silicone oil nanofluids for the performance improvement of concentrated photovoltaic thermal collector,» *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 211, pág. 110526, 2020.
- [20] W. An, J. Wu, T. Zhu y Q. Zhu, «Experimental investigation of a concentrating PV/T collector with Cu9S5 nanofluid spectral splitting filter,» *Applied energy*, vol. 184, págs. 197-206, 2016.
- [21] M. Gharzi, A. Arabhosseini, Z. Gholami y M. H. Rahmati, «Progressive cooling technologies of photovoltaic and concentrated photovoltaic modules: A review of fundamentals, thermal aspects, nanotechnology utilization and enhancing performance,» *Solar Energy*, vol. 211, págs. 117-146, 2020.
- [22] A. Jamar, Z. Majid, W. Azmi, M. Norhafana y A. Razak, «A review of water heating system for solar energy applications,» *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 76, págs. 178-187, 2016.
- [23] M. Izadi y M. E. H. Assad, «Use of nanofluids in solar energy systems,» en *Design and Performance optimization of renewable energy systems*, Elsevier, 2021, págs. 221-250.
- [24] L. A. Alshuhail, F. Shaik y L. S. Sundar, «Thermal efficiency enhancement of mono and hybrid nanofluids in solar thermal applications—A review,» *Alexandria Engineering Journal*, vol. 68, págs. 365-404, 2023.
- [25] Y. Tripanagnostopoulos, «New designs of building integrated solar energy systems,» *Energy Procedia*, vol. 57, págs. 2186-2194, 2014.
- [26] C. de Keizer, M. de Jong, T. Mendes y col., «Evaluating the thermal and electrical performance of several uncovered PVT collectors with a field test,» *Energy Procedia*, vol. 91, págs. 20-26, 2016.
- [27] A. H. Jaz, H. A. Hasan, K. Sopian, A. A. H. Kadhum, T. S. Gaaz y A. A. Al-Amiery, «Outdoor performance analysis of a photovoltaic thermal (PVT) collector with jet impingement and compound parabolic concentrator (CPC),» *Materials*, vol. 10, n.º 8, pág. 888, 2017.
- [28] M. Khalid, J. Wei, G. Zhang y col., «Optical performance of quasi-stationary, low-concentration, and low-profile compound parabolic concentrators,» *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 11, n.º 5, 2019.
- [29] I. Karathanassis, E. Papanicolaou, V. Belessiotis y G. Bergeles, «Design and experimental evaluation of a parabolic-trough concentrating photovoltaic/thermal (CPVT) system with high-efficiency cooling,» *Renewable energy*, vol. 101, págs. 467-483, 2017.

- [30] M. Li, G. Li, X. Ji, F. Yin y L. Xu, «The performance analysis of the trough concentrating solar photovoltaic/thermal system,» *Energy Conversion and Management*, vol. 52, n.º 6, págs. 2378-2383, 2011.
- [31] N. J. Liew, Z. J. Yu, Z. Holman y H.-J. Lee, «Parametric study about performances of a solar photovoltaic/thermal hybrid using a spectral beam splitting technique,» *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 14, n.º 1, 2022.
- [32] C. Kong, Z. Xu y Q. Yao, «Outdoor performance of a low-concentrated photovoltaic–thermal hybrid system with crystalline silicon solar cells,» *Applied energy*, vol. 112, págs. 618-625, 2013.
- [33] N. Xu, J. Ji, W. Sun, W. Huang, J. Li y Z. Jin, «Numerical simulation and experimental validation of a high concentration photovoltaic/thermal module based on point-focus Fresnel lens,» *Applied energy*, vol. 168, págs. 269-281, 2016.
- [34] Q. Chen, M. Burhan, F. H. Akhtar y col., «A decentralized water/electricity cogeneration system integrating concentrated photovoltaic/thermal collectors and vacuum multi-effect membrane distillation,» *Energy*, vol. 230, pág. 120 852, 2021.
- [35] J. M. Variava, J. K. Ratnadhariya, M. I. H. Siddiqui y K. K. Sadasivuni, «3D numerical model of a Concentrated photovoltaic thermal (CPV/T) system for thermal and electrical performance optimization,» *Case Studies in Thermal Engineering*, pág. 104 823, 2024.
- [36] J. Li, Z. Yang, Y. Wang y col., «A novel non-confocal two-stage dish concentrating photovoltaic/thermal hybrid system utilizing spectral beam splitting technology: Optical and thermal performance investigations,» *Renewable Energy*, vol. 206, págs. 609-622, 2023.
- [37] A. Buonomano, F. Calise, M. D. d'Accadia y L. Vanoli, «A novel solar trigeneration system based on concentrating photovoltaic/thermal collectors. Part 1: Design and simulation model,» *Energy*, vol. 61, págs. 59-71, 2013.
- [38] C. Renno y F. Petito, «Design and modeling of a concentrating photovoltaic thermal (CPV/T) system for a domestic application,» *Energy and buildings*, vol. 62, págs. 392-402, 2013.
- [39] H. Helmers y K. Kramer, «Multi-linear performance model for hybrid (C) PVT solar collectors,» *Solar Energy*, vol. 92, págs. 313-322, 2013.
- [40] O. Z. Sharaf y M. F. Orhan, «Comparative thermodynamic analysis of densely-packed concentrated photovoltaic thermal (CPVT) solar collectors in thermally in-series and in-parallel receiver configurations,» *Renewable energy*, vol. 126, págs. 296-321, 2018.
- [41] A. Kribus, D. Kaftori, G. Mittelman, A. Hirshfeld, Y. Flitsanov y A. Dayan, «A miniature concentrating photovoltaic and thermal system,» *Energy conversion and management*, vol. 47, n.º 20, págs. 3582-3590, 2006.
- [42] H. Chayet, O. Kost, R. Moran e I. Lozovsky, «Efficient, low cost dish concentrator for a CPV based cogeneration system,» en *AIP conference proceedings*, American Institute of Physics, vol. 1407, 2011, págs. 249-252.
- [43] S. Paredes, B. R. Burg, P. Ruch y col., «Receiver-module-integrated thermal management of high-concentration photovoltaic thermal systems,» en *2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, IEEE, 2015, págs. 1-6.
- [44] M. Schmitz, N. Wiik, G. Ambrosetti y col., «A 6-focus high-concentration photovoltaic-thermal dish system,» *Solar Energy*, vol. 155, págs. 445-463, 2017.
- [45] S. de Energía, «Recursos Renovables para la producción de electricidad en México,» 2014.
- [46] ANES, «Asociación nacional de energía solar,» 2021.

- [47] NREL, «Best Research Cell Efficiencies,» 2015.
- [48] A. solar system, Triple junction solar cells, <https://ppt-online.org/89899>, (Accesed 29 July 2024), 2024.
- [49] Soitec, «Four-junction solar cell developed using Soitec's expertise in semiconductor materials sets new efficiency record of 38.9% for CPV module,» 2015.
- [50] A. D. Ponce, «Modelado, diseño y control de un sistema de seguimiento solar para módulos fotovoltaicos de alta concentración,» 2017.
- [51] A. L. López y V. M. Andreev, Concentrator photovoltaics. Springer, 2007, vol. 130.
- [52] F. Téllez, E. Zarza y D. Martíene, Tecnología de concentración solar: La segunda oportunidad, 2009.
- [53] S. A. Kalogirou, Solar energy engineering: processes and systems. Academic Press, 2013.
- [54] Esenergía.es, Energía solar concentrada, <https://esenergia.es/tesis-energia-solar-fotovoltaica/>, (Accesed 29 July 2024), 2024.
- [55] G. Santamariéa y A. Castejón, Instalaciones solares fotovoltaicas. Editex, 2010.
- [56] J. P. Dunlop, Photovoltaic systems, 621.31244 D922p. Illinois, US: American Technical, 2010.
- [57] Solartron, How solar concentrator works, <https://www.solartronenergy.com/solar-concentrator/how-does-a-solar-concentrator-work/how-solar-concentrator-works-rev-2/>, (Accesed 29 July 2024), 2024.
- [58] M. Angulo-Calderón, I. Salgado-Tránsito, I. Trejo-Zúñiga, C. Paredes-Orta, S. Kesthkar y A. Díez-Ponce, «Development and Accuracy Assessment of a High-Precision Dual-Axis Pre-Commercial Solar Tracker for Concentrating Photovoltaic Modules,» Applied Sciences, vol. 12, n.º 5, pág. 2625, 2022.
- [59] A. I. Naji, K. A. Hafedh y K. I. Fadheel, «Increasing the solar cell efficiency using glass balls,» en Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing, vol. 1484, 2020, pág. 012007.
- [60] G. Prinsloo y R. Dobson, «Solar tracking,» Stellenbosch: SolarBoo7s. ISBN 978Y0Y620Y61576Y1, págs. 1-542, 2015.
- [61] H. Mousazadeh, A. Keyhani, A. Javadi, H. Mobli, K. Abrinia y A. Sharifi, «A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output,» Renewable and sustainable energy reviews, vol. 13, n.º 8, págs. 1800-1818, 2009.
- [62] I. Sefa, M. Demirtas e I. Çolak, «Application of one-axis sun tracking system,» Energy conversion and Management, vol. 50, n.º 11, págs. 2709-2718, 2009.
- [63] F. Rubio, M. Ortega, F. Gordillo y M. Lopez-Martinez, «Application of new control strategy for sun tracking,» Energy conversion and Management, vol. 48, n.º 7, págs. 2174-2184, 2007.
- [64] I. Luque-Heredia, G. Quéméré, R. Cervantes, O. Laurent, E. Chiappori y J. Y. Chong, «The sun tracker in concentrator photovoltaics,» en Next Generation of Photovoltaics: New Concepts, Springer, 2012, págs. 61-93.
- [65] F. Sallaberry, L. Valenzuela y L. G. Palacin, «On-site parabolic-trough collector testing in solar thermal power plants: Experimental validation of a new approach developed for the IEC 62862-3-2 standard,» Solar Energy, vol. 155, págs. 398-409, 2017. dirección: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.06.045>.
- [66] C.-Y. Lee, P.-C. Chou, C.-M. Chiang y C.-F. Lin, «Sun tracking systems: a review,» Sensors, vol. 9, n.º 5, págs. 3875-3890, 2009. dirección: <https://doi.org/10.1016/j.egypr.2020.02.004>.

- [67] E. F. Camacho y M. Berenguel, «Control of solar energy systems,» *IFAC proceedings volumes*, vol. 45, n.º 15, págs. 848-855, 2012. dirección: <https://doi.org/10.3182/20120710-4-SG-2026.00181>.
- [68] B. Perers, S. Furbo y J. Dragsted, «Thermal performance of concentrating tracking solar collectors,» *DTU R-292. Technical University of Denmark, DTU Byg*, 2013.
- [69] A. Awasthi, A. K. Shukla, M. M. SR y col., «Review on sun tracking technology in solar PV system,» *Energy Reports*, vol. 6, págs. 392-405, 2020.
- [70] R. Garrido y A. Díez, «Cascade closed-loop control of solar trackers applied to HCPV systems,» *Renewable Energy*, vol. 97, págs. 689-696, 2016.
- [71] H. Fathabadi, «Comparative study between two novel sensorless and sensor based dual-axis solar trackers,» *Solar Energy*, vol. 138, págs. 67-76, 2016.
- [72] R. F. Fuentes-Morales, A. Diaz-Ponce, M. I. Peña-Cruz y col., «Control algorithms applied to active solar tracking systems: A review,» *Solar Energy*, vol. 212, págs. 203-219, 2020.
- [73] I. Luque-Heredia, F. Gordillo y F. Rodriguez, «A PI based hybrid sun tracking algorithm for photovoltaic concentration,» *Proceedings of the IEEE 19th European Photovoltaic Energy Conversion*, págs. 7-14, 2004.
- [74] Y. M. Safan, S. Shaaban y M. I. A. El-Sebah, «Hybrid control of a solar tracking system using SUI-PID controller,» en *2017 Sensors Networks Smart and Emerging Technologies (SENSET)*, IEEE, 2017, págs. 1-4.
- [75] Z. Mi, J. Chen, N. Chen, Y. Bai, R. Fu y H. Liu, «Open-loop solar tracking strategy for high concentrating photovoltaic systems using variable tracking frequency,» *Energy Conversion and Management*, vol. 117, págs. 142-149, 2016.
- [76] J.-A. Fernandez-Prieto, M.-A. Gadeo-Martos, P. Perez-Higueras y col., «Knowledge-Based Sensors for Controlling A High-Concentration Photovoltaic Tracker,» *Sensors*, vol. 20, n.º 5, pág. 1315, 2020.
- [77] M. Burhan, S. J. Oh, K. J. E. Chua y K. C. Ng, «Double lens collimator solar feedback sensor and master slave configuration: Development of compact and low cost two axis solar tracking system for CPV applications,» *Solar Energy*, vol. 137, págs. 352-363, 2016.
- [78] W. Nsengiyumva, S. G. Chen, L. Hu y X. Chen, «Recent advancements and challenges in Solar Tracking Systems (STS): A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, págs. 250-279, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.085>.
- [79] J. Zhang, Z. Yin y P. Jin, «Error analysis and auto correction of hybrid solar tracking system using photo sensors and orientation algorithm,» *Energy*, vol. 182, págs. 585-593, 2019. dirección: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.032>.
- [80] P. Pérez-Higueras, J. P. Ferrer-Rodríguez, F. Almonacid y E. F. Fernández, «Efficiency and acceptance angle of High Concentrator Photovoltaic modules: Current status and indoor measurements,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 94, págs. 143-153, 2018.
- [81] P. Pérez-Higueras y E. F. Fernández, *High concentrator photovoltaics: fundamentals*. Springer, 2015.
- [82] C. Kost, J. N. Mayer, J. Thomsen y col., «Levelized cost of electricity renewable energy technologies,» *Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE*, vol. 144, 2013.
- [83] C. Domínguez, I. Antón y G. Sala, «Solar simulator for concentrator photovoltaic systems,» *Optics express*, vol. 16, n.º 19, págs. 14 894-14 901, 2008.

- [84] M. Victoria, C. Domínguez, I. Antón y G. Sala, «Comparative analysis of different secondary optical elements for aspheric primary lenses,» Optics Express, vol. 17, n.º 8, págs. 6487-6492, 2009.
- [85] M. Blanco-Muriel, D. C. Alarcón-Padilla, T. López-Moratalla y M. Lara-Coira, «Computing the solar vector,» Solar Energy, vol. 70, n.º 5, págs. 431-441, 2001.
- [86] I. Reda y A. Andreas, «Solar position algorithm for solar radiation applications,» Solar energy, vol. 76, n.º 5, págs. 577-589, 2004.
- [87] K.-K. Chong, C.-W. Wong, F.-L. Siaw y col., «Integration of an on-axis general sun-tracking formula in the algorithm of an open-loop sun-tracking system,» Sensors, vol. 9, n.º 10, págs. 7849-7865, 2009.
- [88] K.-K. Chong y C.-W. Wong, «General formula for on-Axis sun-tracking system,» Solar Collectors and Panels, Theory and Applications, págs. 274-276, 2010.
- [89] Y. Zhu, J. Liu y X. Yang, «Design and performance analysis of a solar tracking system with a novel single-axis tracking structure to maximize energy collection,» Applied Energy, vol. 264, pág. 114 647, 2020.
- [90] M. Debbache, A. Takilalte, O. Mahfoud y col., «Mathematical Model of an Azimuthal-Elevation Tracking System of Small Scale Heliostat,» International Science Press, 2016.
- [91] O. Pişirir y O. Bingöl, «Industrial pc based heliostat control for solar power towers,» Acta Phys. Pol. A, vol. 130, págs. 36-40, 2016.
- [92] F. Sallaberry, R. Pujol-Nadal, M. Larcher y M. H. Rittmann-Frank, «Direct tracking error characterization on a single-axis solar tracker,» Energy Conversion and Management, vol. 105, págs. 1281-1290, 2015. dirección: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.08.081>.
- [93] C. Sungur, «Multi-axes sun-tracking system with PLC control for photovoltaic panels in Turkey,» Renewable Energy, vol. 34, n.º 4, págs. 1119-1125, 2009.
- [94] J. Ruelas, F. Muñoz, B. Lucero y J. Palomares, «PV Tracking Design Methodology Based on an Orientation Efficiency Chart,» Applied Sciences, vol. 9, n.º 5, pág. 894, 2019.
- [95] S. Abdallah y S. Nijmeh, «Two axes sun tracking system with PLC control,» Energy conversion and management, vol. 45, n.º 11-12, págs. 1931-1939, 2004.
- [96] M. R. Rezoug y R. Chenni, «The optimal angles of a dual-axis tracking system by pre-programmed method using a microcontroller,» International journal of engineering sciences and Research technology, 2018.
- [97] C.-K. Yang, T.-C. Cheng, C.-H. Cheng, C.-C. Wang y C.-C. Lee, «Open-loop altitude-azimuth concentrated solar tracking system for solar-thermal applications,» Solar Energy, vol. 147, págs. 52-60, 2017.
- [98] S. Elagib y N. Osman, «Design and implementation of Dual Axis solar tracker based on solar maps,» en 2013 International Conference on Computing, Electrical and Electronic Engineering (ICCEEE), IEEE, 2013, págs. 697-699.
- [99] A. Rhif, «A position control review for a photovoltaic system: dual axis sun tracker,» IETE technical review, vol. 28, n.º 6, págs. 479-485, 2011.
- [100] —, «A sliding mode control for a sensorless tracker: application on a photovoltaic system,» preprint arXiv:1204.1290, 2012.

- [101] S. Keshtkar, «High-Order Sliding Mode Control for Solar Tracker Manipulator,» en *Multibody Mechatronic Systems: Proceedings of the MUSME, Brazil, October 24-28, 2017*, Springer, vol. 54, 2017, pág. 235.
- [102] P.-W. Li, P. Kane y M. Mokler, «Modeling of solar tracking for giant Fresnel lens solar stoves,» *Solar Energy*, vol. 96, págs. 263-273, 2013.
- [103] M. Sidek, N. Azis, W. Hasan, M. Ab Kadir, S. Shafie y M. Radzi, «Automated positioning dual-axis solar tracking system with precision elevation and azimuth angle control,» *Energy*, vol. 124, págs. 160-170, 2017.
- [104] M. Engin y D. Engin, «Optimization controller for mechatronic sun tracking system to improve performance,» *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 5, pág. 146 352, 2013.
- [105] F. Bedaouche, A. Gama, A. Hassam, R. Khelifi y M. Boubezoula, «Fuzzy PID Control of a DC Motor to Drive a Heliostat,» en *2017 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, IEEE, 2017, págs. 1-6.
- [106] C. Alexandru, «A novel open-loop tracking strategy for photovoltaic systems,» *The Scientific World Journal*, vol. 2013, 2013.
- [107] M. Alata, M. Al-Nimr e Y. Qaroush, «Developing a multipurpose sun tracking system using fuzzy control,» *Energy Conversion and Management*, vol. 46, n.º 7-8, págs. 1229-1245, 2005.
- [108] N. A. AL-Rousan, N. A. M. Isa y M. K. M. Desa, «Efficient Single and Dual Axis Solar Tracking System Controllers Based on Adaptive Neural Fuzzy Inference System,» *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 2020.
- [109] M. Ikhwan, C. Imron y col., «Model predictive control on dual axis solar tracker using Matlab/Simulink simulation,» en *2018 International Conference on Information and Communications Technology (ICOIACT)*, IEEE, 2018, págs. 784-788.
- [110] F. A. Khalil, M. Asif, S. Anwar, S. ul Haq y F. Illahi, «Solar tracking techniques and implementation in photovoltaic power plants: A review,» *Proceedings of the Pakistan Academy of Sciences. Physical and computational sciences* 54., vol. 3, págs. 231-241, 2017.
- [111] M. G. Satué, F. Castaño, M. G. Ortega y F. R. Rubio, «Auto-calibration method for high concentration sun trackers,» *Solar Energy*, vol. 198, págs. 311-323, 2020.
- [112] A. Cristobal, A. M. Vega y A. L. López, *Next generation of photovoltaics: new concepts*. Springer, 2012, vol. 165.
- [113] C. Morón, D. Ferrández, P. Saiz, G. Vega y J. Díez, «New prototype of photovoltaic solar tracker based on Arduino,» *Energies*, vol. 10, n.º 9, pág. 1298, 2017.
- [114] A. E. Hammoumi, S. Motahhir, A. E. Ghzizal, A. Chalh y A. Derouich, «A simple and low-cost active dual-axis solar tracker,» *Energy Science & Engineering*, vol. 6, n.º 5, págs. 607-620, 2018.
- [115] C. Jamroen, P. Komkum, S. Kohsri, W. Himananto, S. Panupintu y S. Unkat, «A low-cost dual-axis solar tracking system based on digital logic design: Design and implementation,» *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 37, pág. 100 618, 2020.
- [116] S. Motahhir, A. E. Hammoumi, A. E. Ghzizal y A. Derouich, «Open hardware/software test bench for solar tracker with virtual instrumentation,» *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 31, págs. 9-16, 2019.

- [117] M. M. Arturo y G. P. Alejandro, «High-precision solar tracking system,» en *Proceedings of the World Congress on Engineering*, vol. 2, 2010, págs. 844-846.
- [118] M. Abdollahpour, M. R. Golzarian, A. Rohani y H. A. Zarchi, «Development of a machine vision dual-axis solar tracking system,» *Solar Energy*, vol. 169, págs. 136-143, 2018.
- [119] A. Kribus, I. Vishnevetsky, A. Yogev y T. Rubinov, «Closed loop control of heliostats,» *Energy*, vol. 29, n.º 5-6, págs. 905-913, 2004.
- [120] G. Ozuna, C. Anaya, D. Figueroa y N. Pitalua, «Solar tracker of two degrees of freedom for photovoltaic solar cell using fuzzy logic,» en *Proceedings of the World Congress on Engineering*, vol. 2, 2011, págs. 6-8.
- [121] W. Batayneh, A. Owais y M. Nairoukh, «An intelligent fuzzy based tracking controller for a dual-axis solar PV system,» *Automation in Construction*, vol. 29, págs. 100-106, 2013.
- [122] M. A. Usta, Ö. Akyazi y İ. H. Altaş, «Design and performance of solar tracking system with fuzzy logic controller used different membership functions,» en *2011 7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, IEEE, 2011, págs. II-381.
- [123] L. Fernández-Ahumada, J. Ramíírez-Faz, R. López-Luque, M. Varo-Martínez, I. Moreno-García y F. C. de la Torre, «A novel backtracking approach for two-axis solar PV tracking plants,» *Renewable Energy*, vol. 145, págs. 1214-1221, 2020.
- [124] B. Hamed y M. S. El-Moghany, «Fuzzy controller design using FPGA for sun tracking in solar array system,» *Fuzzy controller design using FPGA for sun tracking in solar array system*, vol. 4, n.º 1, 2012.
- [125] E. El Shenawy, M. Kamal y M. Mohamad, «Artificial intelligent control of solar tracking system,» *Journal of Applied Sciences Research*, vol. 8, n.º 8, págs. 3971-3984, 2012.
- [126] Z. Yan y Z. Jiaying, «Application of fuzzy logic control approach in a microcontroller-based sun tracking system,» en *2010 WASE International Conference on Information Engineering*, IEEE, vol. 2, 2010, págs. 161-164.
- [127] J. A. Carballo, J. Bonilla, L. Roca y M. Berenguel, «New low-cost solar tracking system based on open source hardware for educational purposes,» *Solar Energy*, vol. 174, págs. 826-836, 2018.
- [128] M. M. Sabir y T. Ali, «Optimal PID controller design through swarm intelligence algorithms for sun tracking system,» *Applied Mathematics and Computation*, vol. 274, págs. 690-699, 2016.
- [129] B. Oladayo y A. Titus, «Development of solar tracking system using IMC-PID controller,» *American J. of Engineering Research*, vol. 5, n.º 5, págs. 135-142, 2016.
- [130] A. A. Aldair, A. A. Obed y A. F. Halihal, «Design and implementation of neuro-fuzzy controller using FPGA for sun tracking system,» *Iraqi Journal for Electrical And Electronic Engineering*, vol. 12, n.º 2, págs. 123-136, 2016.
- [131] A. Diáz, S. Keshtkar, J. A. Moreno y E. Hernandez, «Design and Control Strategy of a Low-Cost Parallel Robot for Precise Solar Tracking,» en *International Conference on Robotics in Alpe-Adria Danube Region*, Springer, 2018, págs. 342-350.
- [132] D. Mazumdar, D. Sinha, S. Panja y D. K. Dhak, «Design of LQR controller for solar tracking system,» en *2015 IEEE International Conference on Electrical, Computer and C.T. (ICECCT)*, IEEE, 2015, págs. 1-5.

- [133] D. Limon, I. Alvarado, T. Alamo, M. Ruiz y E. F. Camacho, «Robust control of the distributed solar collector field ACUREX using MPC for tracking,» IFAC Proceedings Volumes, vol. 41, n.º 2, págs. 958-963, 2008.
- [134] G. E. Mustafa, B. A. Sidahmed y M. O. Nawari, «The Improvement of LDR Based Solar Tracker's Action using Machine Learning,» en 2019 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON), IEEE, 2019, págs. 230-235.
- [135] H.-Y. Yeh y C.-D. Lee, «The logic-based supervisor control for sun-tracking system of 1 MW HCPV demo plant: Study case,» Applied Sciences, vol. 2, n.º 1, págs. 100-113, 2012.
- [136] Y. Yao, Y. Hu, S. Gao, G. Yang y J. Du, «A multipurpose dual-axis solar tracker with two tracking strategies,» Renewable Energy, vol. 72, págs. 88-98, 2014.
- [137] J. Song, Y. Yang, Y. Zhu y Z. Jin, «A high precision tracking system based on a hybrid strategy designed for concentrated sunlight transmission via fibers,» Renewable energy, vol. 57, págs. 12-19, 2013.
- [138] G. Liu, A. O. Baba y L. Zhu, «Hybrid controller for dual axes solar tracking system,» en 2017 36th Chinese Control Conference (CCC), IEEE, 2017, págs. 3203-3207.
- [139] R. A. Ferdous, M. A. Mohammed, S. Rahman, S. Salehin y M. A. Mannan, «Energy efficient hybrid dual axis solar tracking system,» Journal of Renewable Energy, vol. 2014, 2014.
- [140] S. Seme, B. Štumberger y M. Hadžiselimović, «A novel prediction algorithm for solar angles using second derivative of the energy for photovoltaic sun tracking purposes,» Solar Energy, vol. 137, págs. 201-211, 2016.
- [141] K. Mao, F. Liu e I. R. Ji, «Design of ARM-Based Solar Tracking System,» en 2018 37th Chinese Control Conference (CCC), IEEE, 2018, págs. 7394-7398.
- [142] B. K. Hammad, R. H. Fouad, S. D. Nijmeh, M. Mohsen, A. Tamimi y col., «Adaptive control of solar tracking system,» IET Science, Measurement & Technology, vol. 8, n.º 6, págs. 426-431, 2014.
- [143] K.-H. Kim y S.-B. Cho, «An efficient concentrative photovoltaic solar system with Bayesian selection of optimal solar tracking algorithms,» Applied Soft Computing, vol. 83, pág. 105618, 2019.
- [144] K. Azizi y A. Ghaffari, «Design and manufacturing of a high-precision sun tracking system based on image processing,» International Journal of Photoenergy, vol. 2013, 2013.
- [145] B. Alorda, R. Pujol-Nadal, G. Rodriguez-Navas, A. Moià-Pol y V. Martíñez-Moll, «Collaborative distributed sun-tracking control system for building integration with minimal plant area and maximum energy-conversion efficiency,» International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 70, págs. 52-60, 2015.
- [146] J. L. Luna Pineda, «Control de servomecanismos: Un enfoque de rechazo activo de perturbaciones,» 2021.
- [147] Emcore, «CTJ Photovoltaic cell - 5.5mm x 5.5mm triple-junction solar cell for terrestrial applications cell optimized for 1000x concentration,» 2012.
- [148] M. Victoria, S. Askins, R. Herrero, I. Antón y G. Sala, «Assessment of the optical efficiency of a primary lens to be used in a CPV system,» Solar Energy, vol. 134, págs. 406-415, 2016.
- [149] D. Rojas, Green Power Science, 2015.
- [150] V. Thakkar, A. Doshi y A. Rana, «Performance analysis methodology for parabolic dish solar concentrators for process heating using thermic fluid,» Journal of Mechanical and Civil Engineering, vol. 12, n.º 1, págs. 101-114, 2015.

- [151] M. Röger, C. Prahly y S. Ulmer, «Fast determination of heliostat shape and orientation by edge detection and photogrammetry,» en Proc. 14th CSP SolarPACES Symposium 2008, SolarPACES, 2008.
- [152] M. J. Blanco, J. M. Amieva y A. Mancillas, «The Tonatiuh Software Development Project: An open source approach to the simulation of solar concentrating systems,» en ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, vol. 42142, 2005, págs. 157-164.
- [153] S. El Himer, A. Ahaitouf, S. El-Yahyaoui, A. Mechaqrane y A. Ouagazzaden, «A comparative of four secondary optical elements for CPV systems,» en AIP Conference Proceedings, vol. 30003, 2012.
- [154] M. Shanmugam y L. S. Maganti, «Evaluation of Heat Flux Distribution Characteristics of a Concentrated Solar Dish Collector with different geometric indices,» en IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, IOP Publishing, vol. 1100, 2022, pág. 012001.
- [155] E. Venegas-Reyes, N. Ortega-Avila, M. I. Peña-Cruz, O. J. Garcíea-Ortiz y N. A. Rodríguez-Muñoz, «A linear hybrid concentrated photovoltaic solar collector: a methodology proposal of optical and thermal analysis,» Energies, vol. 14, n.º 23, pág. 8155, 2021.
- [156] S. Montesinos-González, C. Vázquez-Cid de León, J. E. Domínguez-Herrera y G. I. Palafox-Alvarado, «Technology management. Design and manufacture of a heatsink,» Dyna, vol. 90, n.º 226, págs. 9-16, 2023.
- [157] A. E. Rivera Ugalde, «Identificación paramétrica de un servomecanismo mediante un algoritmo de mínimos cuadrados modificados,» Tesis de maestría., Tesis (MC)–Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN . . . , 2020.
- [158] Y. Garcíea e I. Lobo, «Controlador PID integrado por la estructura de control de modelo interno (IMC) y lógica difusa,» Ciencia e Ingeniería, vol. 30, n.º 1, págs. 29-40, 2008.
- [159] J. E. Rodríguez-Castellanos y J. E. Cote-Ballesteros, «Estrategia anti-windup por recálculo y seguimiento en controladores PID difusos directos,» Revista Facultad de Ingeniería, vol. 28, n.º 53, págs. 119-139, 2019.
- [160] H. A. Kazem y M. T. Chaichan, «Effect of environmental variables on photovoltaic performance-based on experimental studies,» International Journal of Civil, Mechanical and Energy Science (IJCMES), vol. 2, n.º 4, págs. 1-8, 2016.
- [161] Z. Arifin, S. Suyitno, D. D. D. P. Tjahjana, W. E. Juwana, M. R. A. Putra y A. R. Prabowo, «The effect of heat sink properties on solar cell cooling systems,» Applied Sciences, vol. 10, n.º 21, pág. 7919, 2020.
- [162] «Photovoltaic Systems – Design qualification of solar trackers,» International Electrotechnical Commission, Standard, sep. de 2014.
- [163] R. Silva, M. Pérez y A. Fernández-García, «Modeling and co-simulation of a parabolic trough solar plant for industrial process heat,» Applied energy, vol. 106, págs. 287-300, 2013.
- [164] S. Bowden y C. Honsberg, «Photovoltaics Education Website,» Dostupné z: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/characterisation/introduction>, 2019.
- [165] C. Renno, G. Landi, F. Petito y H. Neitzert, «Influence of a degraded triple-junction solar cell on the CPV system performances,» Energy Conversion and Management, vol. 160, págs. 326-340, 2018.

Anexos

Anexo 1 - Publicaciones.



Solar Energy

Certificate of publication for the article titled:
"Control algorithms applied to active solar tracking systems: A review"

Authored by:
Rosa F. Fuentes Morales
Arturo Díaz Ponce

Published in:
Volume 212C, 2020, Pages 203-219

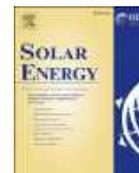
Serial number: PR-294486-C7D792F7C13E





Contents lists available at ScienceDirect

Solar Energy

journal homepage: www.elsevier.com/locate/solener

Control algorithms applied to active solar tracking systems: A review

Rosa F. Fuentes-Morales^a, Arturo Diaz-Ponce^{b,*}, Manuel I. Peña-Cruz^b, Pedro M. Rodrigo^{d,e},
Luis M. Valentín-Coronado^b, Fernando Martell-Chavez^c, Carlos A. Pineda-Arellano^b

^a PICYT - Centro de Investigaciones en Óptica, A.C. Unidad Aguascalientes, Prol. Constitución 607, Fracc. Reserva Loma Bonita, Aguascalientes, Aguascalientes 20200, Mexico

^b CONACYT - Centro de Investigaciones en Óptica, A.C. Unidad Aguascalientes, Prol. Constitución 607, Fracc. Reserva Loma Bonita, Aguascalientes, Aguascalientes 20200, Mexico

^c Centro de Investigaciones en Óptica, A.C. Unidad Aguascalientes, Prol. Constitución 607, Fracc. Reserva Loma Bonita, Aguascalientes, Aguascalientes 20200, Mexico

^d Centre for Advanced Studies in Energy and Environment (CEAEMA), University of Jaén, Jaén 23071, Spain

^e Universidad Panamericana, Facultad de Ingeniería, Josemaría Escrivá de Balaguer 101, Aguascalientes, Aguascalientes 20290, Mexico

ARTICLE INFO

Keywords:

Solar tracking
Control algorithm
Open-loop
Closed-loop
Hybrid-loop

ABSTRACT

It is well known that concentrating solar power and concentrating photovoltaic technologies require high accuracy and high precision solar tracking systems in order to achieve greater energy conversion efficiency. The required tracking precision depends primarily on the acceptance angle of the system, which is generally tenths of a degree. Control algorithms applied to active solar tracking systems command and manipulate the electrical signals to the actuators, usually electric motors, with the goal of achieving accurate and precise solar tracking. In addition, a solar tracking algorithms system must provide robustness against disturbances, and it should operate with minimum energy consumption.

In this work, a systematic review of the control algorithms implemented in active solar tracking systems is presented. These algorithms are classified according to three solar tracking control strategies: open-loop, closed-loop and combined open- and closed-loop schemes herein called hybrid-loop. Their working principles as well as the main advantages and disadvantages of each strategy are analyzed. It is concluded that the most widely used solar tracking control strategy is closed-loop, representing 54.39% of all the publications consulted. On-off, fuzzy logic, proportional-integral-derivative and proportional-integral are the control algorithms most applied in active solar tracking systems, representing 57.02%, 10.53%, 6.14% and 4.39%, respectively.

1. Introduction

Over the past few years, solar energy harvesting systems have presented great technological advances (Murdock et al., 2019). To take advantage of this solar resource, two technologies have mainly been exploited: photovoltaic (PV) and concentrating solar power (CSP) systems (Bosetti et al., 2012). PV systems are divided into two subgroups: conventional photovoltaic, which takes advantage of the directly received sunlight and converts it into electricity without the need for another optical element; and concentrating photovoltaic (CPV), which employs an optical element, typically a linear focus or point focus lens or mirror in order to concentrate sunlight on a small photovoltaic receiver (Khamooshi et al., 2014). Similarly, CSP technology uses optical elements to concentrate the sunlight on a small area, where a thermal receiver is placed. In addition to PV and CSP technologies, there are

hybrid plants that incorporate both solar technologies. One of the greatest considerations for deploying CPV and CSP systems is that these technologies require active solar tracking systems (ASTS).

ASTS can be classified, depending on its degrees of freedom, into one-axis, two-axis or multiple-axis systems (Nsengiyumva et al., 2018; Prinsloo and Dobson, 2015; Alexandru, 2013; Singh et al., 2018). These systems can significantly increase the amount of produced energy, especially in the early morning and late afternoon when the angular relationship of the direct solar irradiance with surface is smaller (Camacho and Berenguel, 2012). The energy conversion efficiency of PV systems can be increased by 12% to 25% with one-axis solar tracking (ST) and 30% to 45% with two-axis ST (Singh et al., 2018). Different aspects focused on the methods and designs of ASTS have already been analyzed in several works. In the work of Khalil et al. (2017), a review of ST techniques in PV power plants is presented, and its advantages and disadvantages are evaluated, including drive methods, control units,

* Corresponding author.

E-mail address: adiaz@cio.mx (A. Diaz-Ponce).

<https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.10.071>

Received 15 July 2020; Received in revised form 22 October 2020; Accepted 24 October 2020

0038-092X/© 2020 International Solar Energy Society. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

Análisis comparativo del consumo de energía de servomecanismos de seguidores solares de dos ejes aplicando el control on-off, PI y PID

Rosa F. Fuentes-Morales^{1a}, Arturo Díaz-Ponce^{2b}, Fernando Martell-Chávez^{3a}, Manuel I. Peña-Cruz^{4b}

^aCentro de Investigaciones en Óptica A.C. Aguascalientes, México

^bCONACYT- Centro de Investigaciones en Óptica A.C. Aguascalientes, México

Email: ¹fabyfm@cio.mx, ²adiaz@cio.mx, ³fmartell@cio.mx, ⁴mipecc@cio.mx

Abstract: En este trabajo se presenta un análisis comparativo del desempeño del control de posicionamiento y corriente de operación de los motores de un seguidor solar de dos ejes. Se emplean índices de desempeño para evaluar los tres controladores más utilizados en los sistemas de seguimiento solar reportados en la literatura: on-off, proporcional-integral y proporcional-integral-derivativo. Los resultados experimentales muestran que el algoritmo de control utilizado influye en la corriente de funcionamiento del motor y por tanto, en el consumo energético de los actuadores del sistema. El control proporcional-integral obtuvo el mejor rendimiento con un error de seguimiento solar absoluto de $\pm 0.022^\circ$ y un consumo de corriente en el eje azimutal y cenital de 6Wh y 6.8Wh respectivamente. En segundo lugar, el control proporcional-integral-derivativo con un error de seguimiento absoluto de $\pm 0.028^\circ$ y un consumo de corriente en el eje azimutal y cenital de 7.2Wh y 8.4Wh respectivamente. Finalmente, el control on-off obtuvo un error de seguimiento solar absoluto de $\pm 0.22^\circ$ y un consumo de corriente en el eje azimutal y cenital de 12.8Wh y 13.6Wh respectivamente.

Palabras clave—Algoritmos de control; seguimiento solar; consumo de energía

I. INTRODUCCIÓN

Un seguidor solar es un sistema mecatrónico autónomo que sigue el movimiento aparente del sol durante el día; cuenta con una estructura de soporte que debe permanecer perpendicular a los rayos del sol con la finalidad de incrementar la energía recibida en la carga útil. Los seguidores solares generalmente se emplean en sistemas de concentración solar y sistemas de concentración fotovoltaica, en los cuales es imprescindible captar la máxima cantidad de radiación solar directa a lo largo del día para mantener una eficiencia óptima [1]. De acuerdo a su rango de movimiento, los seguidores solares se pueden clasificar en seguidores de uno y dos ejes [2]. En los seguidores de un eje, la rotación de la superficie de captación puede ser horizontal, vertical u oblicua. Estos dispositivos no pueden realizar un seguimiento completo del sol debido a que solo pueden seguir el azimut o el cenit pero no ambos. Por otro lado, los seguidores solares de dos ejes siguen la trayectoria del sol cambiando el ángulo azimut y el ángulo cenit. Estos sistemas, a diferencia de los seguidores solares de un eje, pueden seguir el sol durante todo el año, por lo que permiten que la carga útil sea más eficiente [3].

Los seguidores solares constan de varios componentes esenciales como: subsistemas de transmisión mecánica, motores eléctricos, sensores de posición, unidades de control y sensores solares [4]. Estos dispositivos permanecen activos durante periodos de tiempo prolongados y requieren una alta precisión de seguimiento, lo que incrementa el consumo energético del sistema [5]. Es importante tener en cuenta que el consumo de energía del seguidor solar no debe ser mayor al 3% de la energía generada por la carga útil [6]. El desafío en el diseño de seguidores solares es el equilibrio entre el consumo de energía para generar el movimiento y la precisión de seguimiento [2].

En la literatura se han propuesto diferentes metodologías para minimizar el consumo energético en sistemas de seguimiento solar. Por ejemplo, Rambhawan y Oree [7] emplearon una interesante estrategia para minimizar la energía consumida por el mecanismo de un seguidor solar de dos ejes. Se acoplaron cajas de cambios a los motores para disminuir la velocidad y lograr el par requerido; se empleó una combinación de engranajes y cojinetes para atenuar el efecto del viento y, finalmente se implementó un algoritmo de retorno nocturno para mover el sistema a su posición inicial por la noche. Los resultados mostraron una ganancia de energía del 43.6% en comparación con un panel fotovoltaico fijo y se logró un aumento del 1.6% en la producción de energía con respecto a un sistema de seguimiento de dos ejes convencional. Por otro lado, Helwa *et al.* [8] compararon el consumo energético y la precisión de seguimiento de un sistema fotovoltaico estacionario con diferentes sistemas de seguimiento solar: uno de eje inclinado con y sin concentración, y uno de eje vertical y dos ejes; la energía solar anual de los sistemas de seguimiento aumentó en 31%, 11%, 18% y 30%, respectivamente, con respecto al sistema fotovoltaico fijo. El consumo energético del sistema para el seguidor de un eje inclinado con concentración y sin concentración fue de 50Wh/día y 22Wh/día con errores de seguimiento de $\pm 0.56^\circ$ y $\pm 10^\circ$ respectivamente. Se concluyó que la potencia eléctrica consumida por el seguidor solar es directamente proporcional a la precisión de seguimiento.

Una de las formas más sencillas de disminuir el consumo energético y aumentar la precisión y exactitud de un sistema de seguimiento solar es optimizar el software de control [9]. Por ejemplo, Flores *et al.* [5] propusieron una estrategia de diseño

Design, development and electrical characterization of a parabolic dish photovoltaic thermal concentration system

Rosa F. Fuentes-Morales^a, Arturo Diaz-Ponce^{b,*}, Edgar D. Acosta-Pérez^c,
Fernando Martell-Chavez^d, Manuel I. Peña-Cruz^b and Pedro M. Rodrigo^e

^aPICYT - Centro de Investigaciones en Óptica, A.C., Unidad Aguascalientes, Prol. Constitución 607, Fracc. Reserva Loma Bonita, 20200, Aguascalientes, México.

^bCONAHCYT— Centro de Investigaciones en Óptica, A.C., Unidad Aguascalientes, Prol. Constitución 607, Fracc. Reserva Loma Bonita, 20200, Aguascalientes, México.

^dCentro de Investigaciones en Óptica, A.C., Unidad Aguascalientes, Prol. Constitución 607, Fracc. Reserva Loma Bonita, 20200, Aguascalientes, México.

^cInstituto Tecnológico de Aguascalientes, Av. Adolfo López Mateos Ote. 1801, Bona Gens, 20256, Aguascalientes, México.

^eUniversidad Panamericana. Facultad de Ingeniería. Jose María Escrivá de Balaguer 101, Villas Bonaterra, Aguascalientes, 20296, México.

ARTICLE INFO

Keywords:

CPVT, Solar tracking
Electrical efficiency
Multijunction solar cells
Parabolic dish collector

ABSTRACT

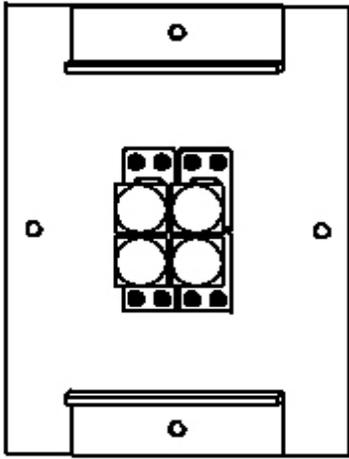
Hybrid solar concentrating systems are more efficient in generating electricity and heat from solar radiation than separate thermal and photovoltaic systems. However, their technical-economic viability has been limited due to their high cost and manufacturing complexity. This article presents a prototype photovoltaic thermal concentrator that uses a parabolic dish system. It covers the design, optical simulation, construction, and electrical characterization of the prototype. The prototype includes a parabolic dish collector and a receiver with four triple-junction photovoltaic cells along with secondary optic elements to ensure an even distribution of energy onto the cells. To keep the receiver temperature within its working range, an easy-to-build active cooling system with straight fins as channels to circulate water as a cooling fluid is proposed. Simulation results allowed accurate sizing of system elements and estimation of concentration levels. The experiments were conducted outdoors for ten days, spread over several months. Firstly, the hybrid prototype was used without a cooling system. The temperature of the receiver reached 108 °C in just half an hour, which exceeds the working limit temperature of the cell. Consequently, the instantaneous electrical efficiency dropped significantly to 8.31%. However, in the experiments where the cooling system was activated, the receiver's average temperature was 41.75 °C, confirming that the proposed heat exchanger functioned correctly, effectively preventing the receiver from exceeding the maximum permitted temperature of 55 °C. Under clear sky conditions, the system achieved an average real concentration of 414.8 suns, with an average electrical efficiency of 29.75%, which is one of the highest efficiencies reported for these kinds of hybrid systems. This study contributes significantly to the advancement in technological maturity of CPVT systems, reducing the gap between prototypes and commercial products.

1. Introduction

Solar energy is a widely used alternative energy source with great potential in various sectors. The industrial sector has adopted multiple concentrating solar power (CSP) technologies to harness solar heat, such as parabolic trough collectors (PTC), Fresnel lens systems, central receivers, and parabolic dish (PD) systems. On the other hand, Concentrating photovoltaic (CPV) technology has made significant advancements in generating electricity. This technology combines low-cost optical components with multi-junction solar cells to achieve greater efficiencies (Zaghloul et al., 2021). Hybrid models, also known as concentrated photovoltaic thermal (CPVT) systems, can produce both heat and electricity simultaneously, which increases the overall efficiency of solar energy conversion (Sharaf and Orhan, 2015). This also reduces the operating temperature of the photovoltaic cells, thereby extending their lifespan. As a result, CPVT systems have superior performance compared to separate CSP or CPV systems, as has been shown in several published reviews (Makki et al., 2015; Raj et al., 2011; Ju et al., 2017). These systems utilize the heat generated by photovoltaic cells for a variety of purposes, such as generating hot water for domestic use (Herrando et al., 2014),

 adiaz@cio.mx (A. Diaz-Ponce)
ORCID(s): 0000-0002-6395-902X (A. Diaz-Ponce)

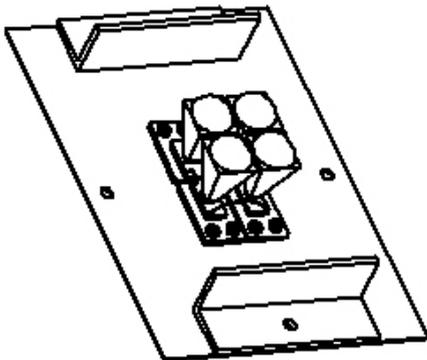
Anexo 2 - Ilustración del diseño del receptor.



Vista superior



Vista lateral



Vista isométrica



Vista lateral 1

Proyección de diferentes vistas del receptor diseñado

Anexo 3 - Conectores del seguidor solar.

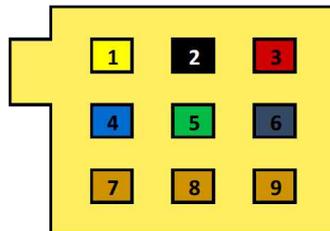


Conector Weidmuller 24P del Seguidor Solar. CIO				
Pin	Señal	Descripción	Color	Etiqueta
1	(+) Encoder (5VCD)	Encoder del Motor Cenital	Verde	EMC5
2	(-) Encoder		Amarillo	EMCN
3	Señal A encoder		Cian	EMCA
4	Señal B encoder		Gris	EMCB
5	Motor (+) (24VCD)	Motor Cenital	Rojo	MC24
6	Motor (-)		Negro	MCN
7	(+) Encoder (5VCD)	Encoder del Motor Acimutal	Verde	EMA5
8	(-) Encoder		Amarillo	EMAN
9	Señal A encoder		Cian	EMAA
10	Señal B encoder		Gris	EMAB
11	Motor (+) (24VCD)	Motor Acimutal	Rojo	MA24
12	Motor (-)		Negro	MAN
13	Voltaje fotodiodo 1	Sensor Solar	Amarillo	SSF1
14	Voltaje fotodiodo 2		Naranja	SSF2
15	Voltaje fotodiodo 3		Marrón	SSF3
16	Voltaje fotodiodo 4		Cian	SSF4
17	Neutro (VSS)		Negro	SSN
18	VCC (5/12VCD)		Rojo	SS5
19	Acimutal Izquierdo	Sensores de Fin de Carrera	Gris	FCAI
20	Acimutal Derecho		Negro	FCAD
21	Cenital Inferior		Cian	FCCI
22	Cenital Superior		Amarillo	FCCS
23	Común de Fines de Carrera (+VCD)		Gris	FCC
24	NC	NC		

Dr. Arturo Díaz Ponce

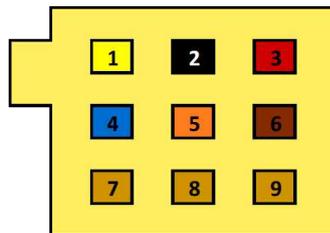
CONFIGURACIÓN CONECTORES HEMBRA SEGUIDOR SOLAR

Configuración motor Cenital y Acimutal



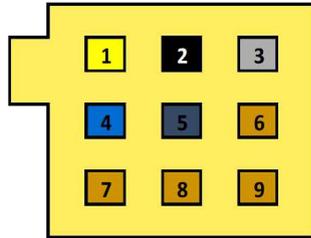
- 1** (-) Encoder
- 2** Motor (-)
- 3** Motor (+) (24VCD)
- 4** Señal A Encoder
- 5** (+) Encoder (5VCD)
- 6** Señal B Encoder
- 7** NC
- 8** NC
- 9** NC

Configuración Sensor Solar



- 1** Voltaje Fotodiodo 1
- 2** Neutro (VSS)
- 3** VCC (5/12VCD)
- 4** Voltaje Fotodiodo 4
- 5** Voltaje Fotodiodo 2
- 6** Voltaje Fotodiodo 3
- 7** NC
- 8** NC
- 9** NC

Configuración fines de carrera



- 1** Cenital superior
- 2** Acimutal Derecho
- 3** Acimutal izquierdo
- 4** Cenital inferior
- 5** Común de fines de carrera
- NC**

Anexo 4 - Programas en Simulink®.

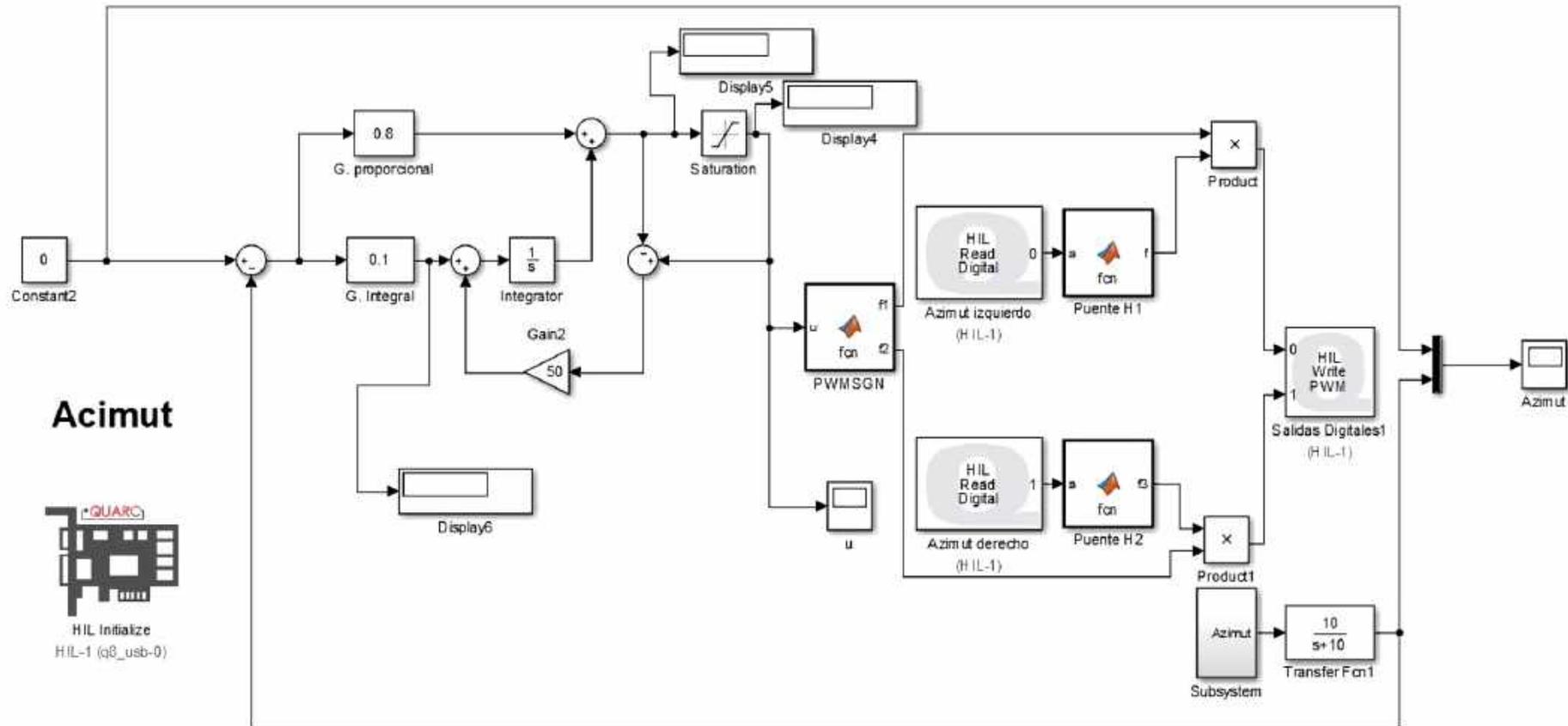


Diagrama en Simulink® control PI anti-windup eje acimutal.

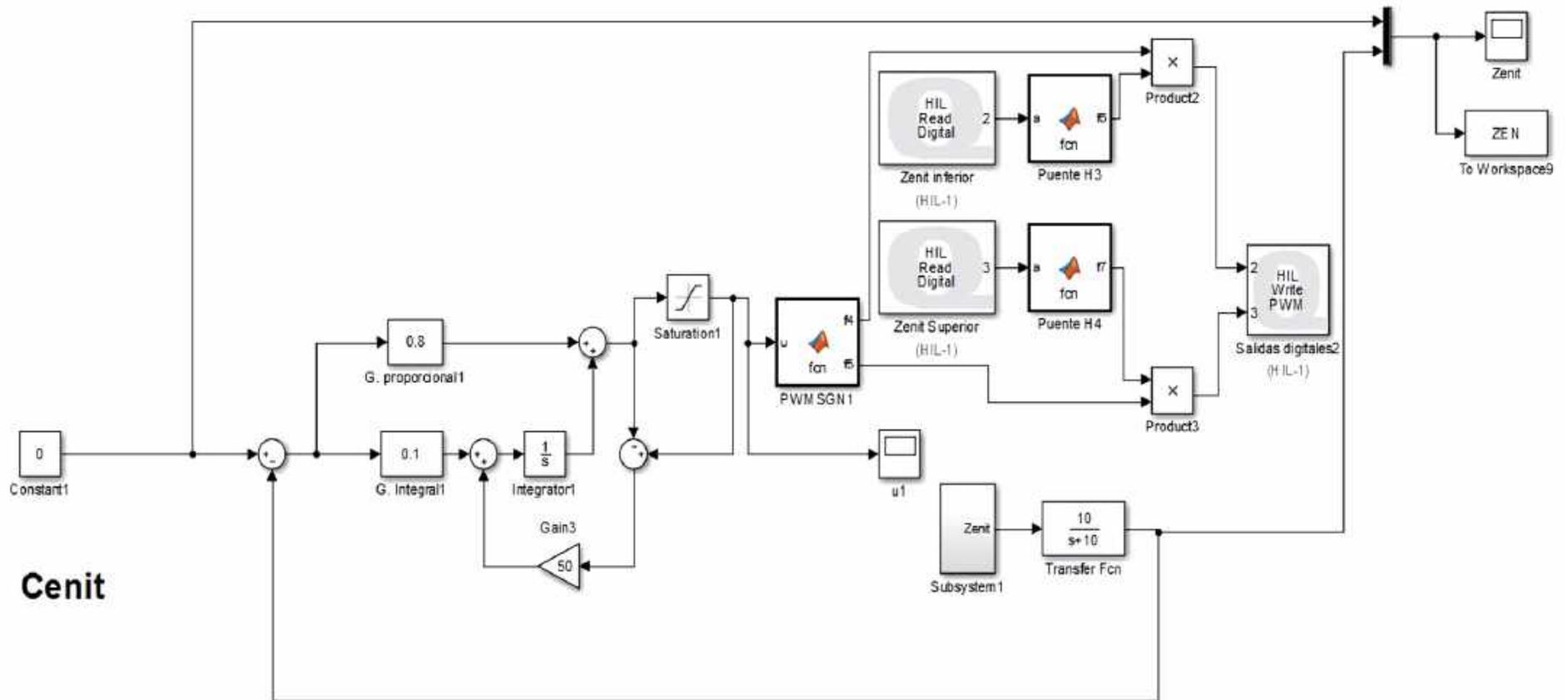


Diagrama en Simulink® control PI anti-windup eje cenital.

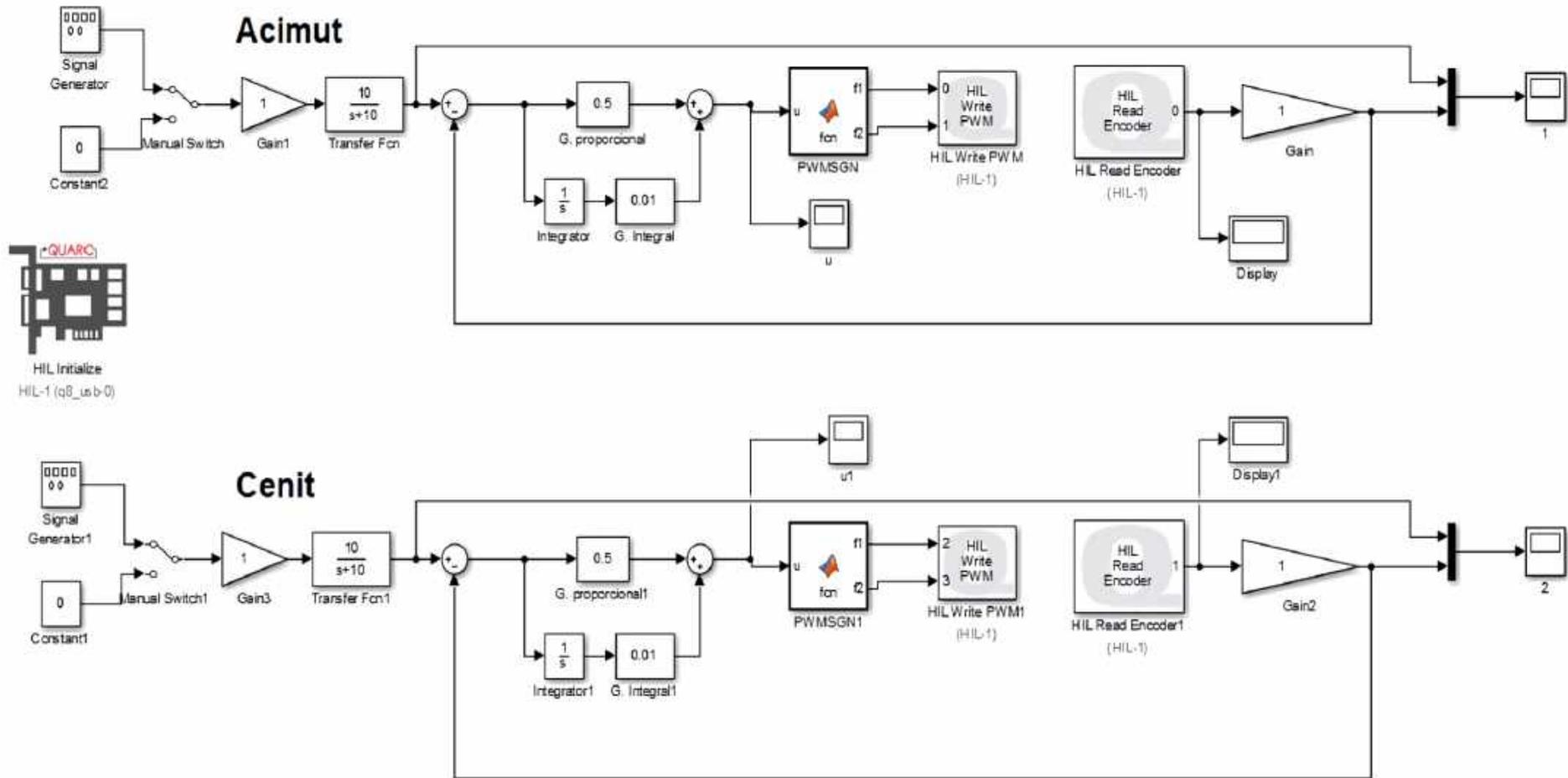


Diagrama en Simulink® control PI empleando decodificadores.

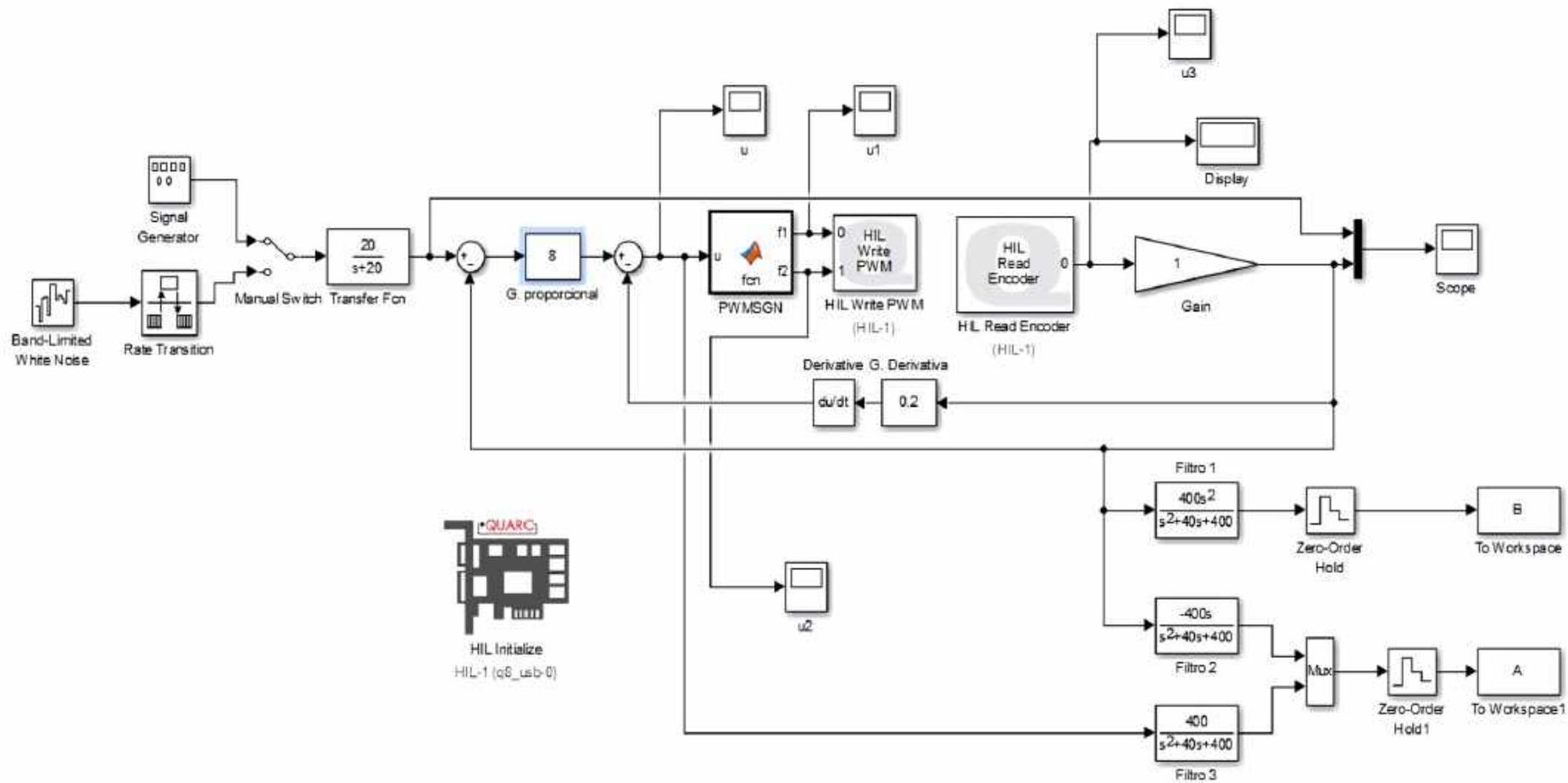


Diagrama en Simulink® estimación paramétrica.