

Diseño de un soporte para diferentes paneles fotovoltaicos con seguimiento solar pasivo, de dos grados de libertad, para el Área Metropolitana De Bucaramanga.

Cristian José Martínez González y Sneider Arbey Herazo Puentes

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Mecánico

Director

Julián Ernesto Jaramillo Ibarra

Doctor En Ingeniería Térmica

Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas  
Escuela de Ingeniería Mecánica  
Bucaramanga  
2026

### **Dedicatoria Cristian Martínez**

Con profunda gratitud y sincero afecto, dedico este logro académico a las seis personas más importantes e influyentes. Este título es el reflejo de su amor incondicional, su guía y su apoyo inquebrantable.

A mi señora madre, Rosalba González: A ti, madre querida, dedico este logro con el corazón. Mi vida académica y profesional son una extensión de tu esfuerzo. Gracias por la insistencia, la preocupación y el apoyo incondicional que me han permitido llegar hasta aquí. Tu tenacidad ha sido mi mayor motor.

A mi segunda madre, María Victoria González (Q.E.P.D.): Dedico este triunfo a tu memoria. Tu guía, amor y dedicación fueron fundamentales para forjar la persona que soy. Aunque la vida me haya arrebatado tu compañía física, agradezco eternamente tu presencia y cuidado, que desde el más allá me acompañas.

A mi Señor padre, Isaías Martínez: Te agradezco enormemente no solo por brindarme la oportunidad de estudiar, sino por darme la libertad de escoger mi camino. Gracias por ser el pilar que siempre extiende su mano para levantarme y estar ahí para mí.

A mis hermanos, Paula Lisseth Martínez y Anthony Josué Rodríguez: A ustedes, dedico el apoyo en los momentos más desafiantes. Sus palabras de aliento oportunas y un abrazo en los momentos que lo necesité.

A mi pareja, fiel amiga y compañera de vida, Zulith Valencia: Este logro es también tuyo. Te lo dedico por la entrega, amor y comprensión que me brindas a diario, el tiempo y paciencia. Espero y trato siempre poder correspondértelo, construyendo nuestro proyecto de vida. Gracias por enseñarme a nunca rendirme al perseguir un sueño.

Esto es por y para ustedes, de corazón, muchísimas gracias, los amo.

### **Agradecimientos Cristian Martínez**

A mis padres, Rosalba González, Isaías Martínez y María Victoria González. Son las columnas de lo que logre construir hoy en días como persona y en este comienzo en mi vida profesional.

A mi compañero de grado, Sneider Arbey Herazo Puentes, no solo tuve la dicha de tenerlo como compañero en este proyecto si no también, ser un gran amigo que la vida universitaria me pudo regalar en esta vida, es muy conmovedor como iniciamos esta carrera desde el 2018, siendo totalmente desconocidos y terminarla siendo grandes amigos y ahora colegas.

A nuestro director de tesis Julián Ernesto Jaramillo, cada consejo y aporte, fue y será un grano de aprendizaje necesario para no solo crecer como persona sino también crecer como profesional.

A cada una de las personas que la vida universitaria me permitió encontrarme y recibir su ayuda, mi pareja, mis hermanos, mis amigos y conocidos, como es conocida la escuela de ingeniería mecánica de la universidad industrial de Santander no es fácil, este logro se construyó con el apoyo y tiempo de: Mi novia Zulith, mi hermana Paula, mi hermano Anthony, Ing Juan Sebastián Quijano, mi nona Nubia, mis Tías Martha y Sandra, mi familia NH, Herazo, Kevin, Cejas y Julián Méndez, mis amigos, Ing Jorge Jaimes. Ing Edgar Rey, Ing Dayana Martínez, Ing Sebastián Viancha, Ing Camilo Peña, Ing Jorge Pinzón, Ing Juan Pablo Gualdrón, Ing Ángel Ortiz e Ing Sebastián Tapia, Gabriel Armando Mora y Benito Antonio Martínez a la familia de la selección de Rugby UIS y a la gran familia CUS, a las empresas ADIPACK y RYCTEL por darme el impulso para empezar mi carrera profesional.

### **Dedicatoria Sneider Herazo**

Quiero dedicar este logro a cada una de las personas que hicieron posible que pudiera llegar a este momento, a todas aquellas que de alguna manera influyeron o marcaron mi actuar en este proceso de crecimiento tanto educativo como personal.

A mis padres Adriana Rocio y Gerson Manuel, quienes me brindaron cada uno de los valores que me forjan hoy como persona y que lo harán en el proceso de esta nueva etapa, además de su apoyo incondicional.

A mis hermanas Melanie Isabella y Ayshane Manuela, son pilares en mi vida, las personas que hicieron que me levantara cada día buscando que tengan un ejemplo a seguir de su hermano mayor.

A mis abuelos Evila Falcon y Omar Puentes, quienes me mostraron que es darlo todo por alguien, me han demostrado siempre lo que es el amor incondicional.

A mis tíos Jhon Anderson y Iker Brayner, quienes siempre estuvieron ahí, aunque siempre fue difícil expresarlo con palabras con las acciones que tomaban día a día me demostraban el cariño y apoyo que me tienen

A mis amigos, de verdad muchas gracias a todos porque, aunque muy agradecido con mi familia, como siempre dicen tus amigos son esa familia que elegiste en vida y así no tengamos un vínculo de sangre llevo una parte de todos ustedes dentro de mí

Aunque me resulta imposible mencionar a todas las personas que tanto a nivel académico como personal hicieron parte de este lindo y gratificante proceso, quiero decirles que cada uno tiene una parte de mí ser y no dejare de dedicarles cada uno de los logros que obtenga en este camino llamado vida, los quiero mucho y graci

## Tabla de Contenido

Introducción .....	14
1 Objetivos .....	19
1.1 Objetivo General .....	19
1.2 Objetivos Específicos .....	19
2 Marco Teórico .....	21
2.1 Radiación Solar y Geometría Solar .....	21
2.2 Parámetros Ópticos en Colectores Cilindro-Parabólicos Compuestos (CPC) .....	22
2.3 Balance de Energía Unidimensional del Receptor con Cubierta Evacuada .....	23
2.4 Conversión Termo-Mecánica con PCM y Leva Cilíndrica .....	25
2.4.1 Modelo Macroscópico del PCM .....	25
2.4.2 Síntesis de la Ley de Leva .....	26
2.4.3 Modelo Fotovoltaico Horario y Balance de Pérdidas .....	26
3 Marco Conceptual .....	27
3.1 Dominio Geométrico y Óptico .....	29
3.2 Dominio Térmico y Energético .....	29
3.3 Dominio Mecánico y Cinemático .....	29
3.4 Dominio de Eléctrico y Viabilidad .....	30
4 Metodología .....	30
4.1 Supuestos, Hipótesis y Consideraciones para el Diseño del Seguidor Pasivo .....	31
4.2 Modelo Computacional y Simulación Dinámica .....	36
4.2.1 Nivel 1 — Código Principal: run_simulation_main.m .....	37
4.2.1.1 Archivo de Datos Meteorológicos .....	47
4.2.2 Nivel 2 — Motores de Cálculo por Paso de Tiempo .....	48
4.2.2.1 Geometría solar y descomposición radiativa .....	53

4.2.3	Nivel 3 — Solver Numérico Central y Sub-Modelos Físicos .....	55
4.2.4	Nivel 4 — Módulos de Diseño y Síntesis .....	58
4.2.5	Nivel 5 — Post-Proceso y Análisis .....	60
4.2.6	Nivel 6 — Utilidades y Soporte .....	60
4.3	Seguimiento Estacional (Eje de Elevación): Compensación de la Declinación.....	61
4.3.1	Programación Mensual de $\beta$ .....	62
4.3.2	Implementación Mecánica y Operación.....	62
4.3.3	Impacto energético esperado.....	63
4.4	Modelo CAD 3D del Seguidor Pasivo: Verificación Estructural.....	63
4.4.1	Cargas de Diseño y Combinación de Acciones .....	64
4.4.2	Condiciones de Borde y Modelación Estructural.....	64
4.4.3	Mallado y Control Numérico .....	65
4.4.4	Resultados CAE .....	65
4.5	Proceso de Manufactura y Fabricación .....	69
4.5.1	Estructura Documental y Trazabilidad Técnica .....	69
4.5.2	Planificación del Proceso de Fabricación.....	70
4.5.3	Ensamble Final y Control de Calidad .....	74
5	Resultados .....	75
5.1	Geometría CPC y Condiciones de Aceptación.....	75
5.2	Evolución Térmica y Potencia Almacenada .....	76
5.3	Eficiencia de Carga y Fracción Líquida.....	78
5.4	Comparativa de Temperaturas.....	79
5.5	Cinemática Termo-Mecánica: $\Delta V$ , $x$ y $\theta_{\text{mech}}$ .....	80
5.6	Error de Seguimiento Frente al Giro Ideal .....	82

5.7	Energía Neta Mensual .....	83
5.8	Análisis Financiero del Sistema Seguidor solar .....	84
5.8.1	Definición de Costos Incrementales (Costo Incremental de Compra e Instalación) .....	86
5.8.2	Evaluación Financiera (VPN, TIR y B/C) .....	87
5.8.3	Sensibilidad y Umbrales de equilibrio .....	88
5.9	Resumen Anual y Comparación Final .....	90
	Referencias Bibliografías .....	97

**Lista de Tablas**

Tabla 1. Resumen anual de generación y consumo energético en diferentes configuraciones fotovoltaicas.....	90
Tabla 2. Ecuaciones de los principales parámetros que definen la posición solar.....	100

### Lista de Figuras

Figura 1. Arquitectura mecánica y termo-óptica del seguidor solar pasivo de dos grados de libertad (2-DOF) propuesto.....	17
Figura 2. Ángulos fundamentales de la geometría solar.....	21
Figura 3. Circuito de transferencia de calor para concentrador parabólico de canal (CPC).....	24
Figura 4. Diagrama de flujo energético del sistema de seguimiento solar pasivo con PCM.....	28
Figura 5. Organigrama jerárquico de las funciones del código de simulación.....	37
Figura 6. Flujo de inicialización: Archivo Run_simulation_main parte 1.....	40
Figura 7. Flujo de inicialización: Archivo Run_simulation_main parte 2.....	41
Figura 8. Diagrama de flujo del bucle de simulación anual.....	43
Figura 9. Diagrama de flujo del proceso de re-síntesis isotónica opcional.....	45
Figura 10. Diagrama de flujo del proceso de calibración y tercera pasada anual.....	46
Figura 11. Variación de variables meteorológicas en Bucaramanga durante Mayo de 2023.....	48
Figura 12. Diagrama de flujo de motor de cálculo térmico (parte 1 de 2).....	51
Figura 13. Diagrama de flujo de motor de cálculo térmico (parte 2 de 2).....	52
Figura 14. Irradiancia solar directa normal y difusa horizontal, y ángulo cenital en mayo de 2023.....	54
Figura 15. Diagrama de flujo del solver térmico pcm_conductive_step.....	57
Figura 16. Análisis de esfuerzos nodales de Von-Mises en un ensamblaje estructural sometido a cargas.....	65
Figura 17. Distribución de desplazamientos resultantes en un ensamblaje estructural bajo carga.....	67

Figura 18. Distribución del factor de seguridad para un ensamblaje estructural bajo carga estática.....	68
Figura 19. Fichas de proceso de manufactura subconjunto SSP_1 Colector actuador.....	72
Figura 20. Geometría del concentrado parabólico compuesto (CPC) de tipo involuta.....	75
Figura 21. Evolución de la temperatura del PCM y la potencia térmica almacenada.....	77
Figura 22. Eficiencia de carga y evolución de la fracción líquida del PCM.....	78
Figura 23. Comparativa de temperatura del sistema (modo <i>static_wax</i> ).....	79
Figura 24. Cinemática termo-mecánica: Expansión térmica del PCM ( $\Delta V$ ) y ángulo del mecanismo ( $\theta_{mech}$ ).....	80
Figura 25. Cinemática termo-mecánica: Desplazamiento lineal del pistón ( $x$ ) y ángulo del mecanismo ( $\theta_{mech}$ ).....	81
Figura 26. Error de seguimiento frente al giro ideal (HSAT N-S).....	83
Figura 27. Energía FV neta mensual por configuración (enero – diciembre de 2023).....	83
Figura 28. Representación gráfica del diferencial de volumen con sistema de coordenadas cilíndricas.....	107

**Lista de Apéndices**

Apéndice A. Geometría solar y proyecciones.....	100
Apéndice B. Script principal para simulación anual de colector CPC + síntesis de leva.....	111
Apéndice C. PTC_Model_step.m .....	130
Apéndice D. PTC_Cooling_step.....	139
Apéndice E. PTC_Conductive_step.....	141
Apéndice F. Constantes y Clamps.....	144
Apéndice G. Pre-cálculos.....	147
Apéndice H. Trasposición de la irradiancia .....	149
Apéndice I. Construcción de la leva .....	151
Apéndice J. CPC involuta con gap.....	154
Apéndice K. Construcción malla FEM del PCM.....	157
Apéndice L. Calculate_pv_energy .....	158
Apéndice M. Plot_CPC .....	162
Apéndice N. Export_CPC_csv .....	163
Apéndice O. Validateconfiguration (cfg) .....	164
Apéndice P. CylinderConvection.....	168
Apéndice Q. Resumen de parámetros de configuración (cfg).....	169
Apéndice R. Planos de construcción.....	171
Apéndice S. Proceso de manufactura.....	201

## Resumen

**Título:** Diseño de un soporte para diferentes paneles fotovoltaicos con seguimiento solar pasivo de dos grados de libertad, para el Área Metropolitana de Bucaramanga.\*

**Autor:** Cristian José Martínez González, Sneider Arbey Herazo Puentes.\*\*

**Palabras Clave:** Energía Fotovoltaica, Seguimiento Solar Pasivo, PCM De Alta Expansión, Material de Cambio de Fase Termoexpandible, PCM - Phase Change Material, Tropico.

### Descripción:

Se diseñó y modeló un soporte fotovoltaico con seguimiento solar pasivo de dos grados de libertad, accionado por la expansión del PCM RT50 y acoplado a un mecanismo leva–seguidor dentro de una envolvente CPC. La cadena de cómputo en MATLAB integró cinemática solar, descomposición GHI→DNI/DHI, transposición anisotrópica al plano del captador, un balance termo-óptico horario con solver radial 1-D por capacidad calorífica aparente para el PCM y la síntesis de la ley de leva mediante regresión isotónica PAVA. Con un conjunto de datos horarios de Bucaramanga (8760 h; 2023; 6.99° N, -73.06°), el seguidor pasivo entregó 969.75 kWh; el caso ideal de dos ejes, 1026.5 kWh netos (penalización de 0.089 kWh); y el arreglo fijo, 919.54 kWh. Se obtuvo así un incremento de +5.5 % sobre el plano fijo y  $\approx 94.5$  % de la energía del ideal, con ganancias concentradas en  $\pm 35^\circ$  alrededor del mediodía solar. El flujo propuesto se presenta trazable y replicable a nivel regional.

---

\* Trabajo de grado.

\*\* Facultad de Ingeniería Físico mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Julián Ernesto Jaramillo Ibarra, Doctor en ingeniería térmica.

### Abstract

**Title:** Design of a support for different photovoltaic panels with passive solar tracking with two degrees of freedom, for the Bucaramanga Metropolitan Area \*

**Author:** Cristian José Martínez González; Sneider Arbey Herazo Puentes\*\*

**Key Words:** Photovoltaics; passive solar tracking; phase-change material; cam law; tropics.

**Description:**

A passive two-degree-of-freedom photovoltaic mount actuated by RT50 phase-change material and coupled to a cam-follower within a CPC envelope was designed and modeled. The MATLAB workflow chained solar geometry, GHI decomposition to DNI/DHI, anisotropic transposition to the collector plane, an hourly thermo-optical balance with a 1-D radial apparent heat-capacity solver for the PCM, and a cam-law synthesized via PAVA isotonic regression. Using an hourly dataset for Bucaramanga (8760 h; 2023; 6.99° N, -73.06°), the passive tracker yielded 969.75 kWh; the ideal two-axis case, 1026.5 kWh net (0.089 kWh consumption penalty); and the fixed array, 919.54 kWh. The passive configuration thus achieved a +5.5% gain over the fixed case and  $\approx 94.5\%$  of the ideal energy, with improvements concentrated within  $\pm 35^\circ$  around solar noon. The proposed pipeline is traceable and regionally replicable.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Physico-Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Advisor: Julián Ernesto Jaramillo Ibarra, Doctor at thermal engineering.

## Introducción

La necesidad de incrementar la captación anual de energía fotovoltaica en climas tropicales, sin añadir complejidad operativa ni consumo eléctrico, ha sido reconocida como un reto persistente para aplicaciones residenciales e institucionales del Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB). En este contexto, se plantea como problema central la ausencia de una arquitectura de seguimiento solar que, manteniendo dos grados de libertad (2-DOF), combine simplicidad constructiva, independencia energética del actuador y un rendimiento cercano al de un seguidor ideal. La cuestión se acentúa por la nubosidad intermitente propia del AMB y por las barreras de mantenimiento asociadas a sistemas activos motorizados, de modo que se requiere un enfoque termo-mecánico pasivo con trazabilidad de modelado y posibilidad de fabricación local.

La literatura sobre seguidores activos y soluciones pasivas de un eje ha sido prolífica; sin embargo, se evidencia una brecha aplicada: no se encuentra consolidada una cadena metodológica que acople, de manera reproducible, (i) la cinemática solar y la descomposición de la irradiancia global (GHI) en irradiación directa normal y horizontal (DNI/DHI respectivamente); (ii) la transposición anisotrópica al plano del captador; (iii) un balance termo-óptico del receptor con cambio de fase; y (iv) la síntesis de una ley de leva guiada por datos locales y su exportación a CAD. En consecuencia, se identifica como vacío específico la falta de un flujo de trabajo que, con datos horarios de un año (8760 h), permita enlazar fenómenos ópticos, térmicos y mecánicos hasta la obtención de orientación 2-DOF y energía neta con control explícito de pérdidas y restricciones geométricas.

Bajo esa brecha, se formula la pregunta de investigación en términos operativos: ¿en qué medida un seguidor solar pasivo termo-mecánico 2-DOF, accionado por la expansión de un PCM y sintetizado mediante una ley de leva basada en datos locales del AMB, puede reproducir una

fracción sustancial del beneficio energético de un seguidor ideal, superando de forma consistente a un arreglo fijo y sin consumo eléctrico del actuador? De esta pregunta se derivan objetivos coherentes: se establece como objetivo general el diseño y evaluación de un soporte FV con seguimiento pasivo 2-DOF para el AMB, y como objetivos específicos la definición de la envolvente geométrica y de masa, la integración del bloque óptico (CPC) y del actuador PCM-leva, la validación numérica del acoplamiento termo-mecánico, la comparación energética anual frente a casos fijo e ideal y la preparación de artefactos para manufactura (trayectoria de leva y especificaciones CAD).

La justificación se fundamenta en la posibilidad de elevar la energía anual neta respecto a un panel fijo sin penalizaciones de consumo, con un conjunto mecánico de baja complejidad y mantenimiento simplificado. Se proyecta, además, un beneficio regional: al basarse la síntesis en datos climáticos locales y al habilitarse la exportación de trayectorias hacia CAD, se favorece la transferencia a talleres de manufactura del entorno, manteniendo la replicabilidad del flujo y el ajuste del desempeño a latitudes tropicales con estacionalidad moderada.

En cuanto al método, se adopta una arquitectura computacional jerárquica implementada en MATLAB® que encadena módulos físicos y de diseño: se emplea la cinemática solar para ángulos de incidencia y giro ideal; se realiza la descomposición GHI→DNI/DHI (Erbs) y la transposición al plano del captador (modelo anisotrópico de Pérez); se formula un balance termo-óptico del receptor y un modelo radial 1-D por capacidad calorífica aparente para describir la fusión del PCM (RT50), de donde se obtiene la expansión volumétrica que acciona un pistón; se sintetiza la ley de leva por ajuste isotónico con histéresis y límites angulares, y se exporta la trayectoria `cam_path.csv` para integración CAD. Con la orientación resultante, se evalúan la

irradiancia en plano del módulo (POA), la temperatura de célula (NOCT) y la potencia DC con pérdidas de balance, integrando a escala anual para comparar los casos fijo, ideal y pasivo.

Como se ilustra en la Figura 1, el sistema propuesto se compone de una estructura mecánica con dos grados de libertad (acimut y elevación), que orienta el conjunto fotovoltaico sin recurrir a motores ni a alimentación eléctrica externa. El accionamiento se obtiene de manera pasiva mediante un actuador termo-mecánico: la expansión volumétrica del material de cambio de fase RT50 durante su fusión induce el avance de un pistón, y este desplazamiento lineal se convierte en rotación controlada a través de un mecanismo pistón–leva. La ley de leva se sintetiza directamente a partir de datos horarios locales del Área Metropolitana de Bucaramanga, de modo que la trayectoria de seguimiento queda embebida en la propia geometría de la leva y se transfiere al bastidor portamódulos con giros acotados en ambos ejes. Esta arquitectura prioriza un bastidor liviano, un sistema de anclaje simple y trayectorias exportables a CAD, lo que favorece la manufactura regional y la replicabilidad del flujo de diseño con información climática local.

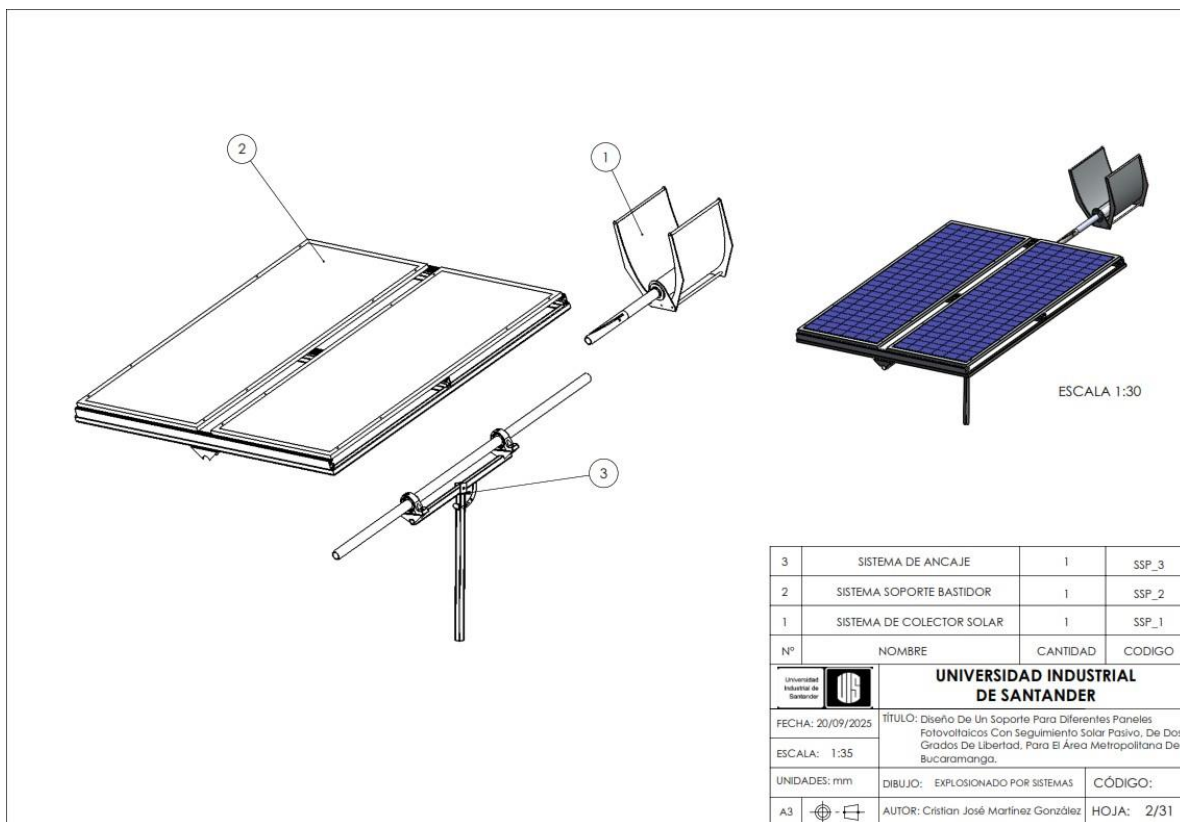
El alcance se delimita al AMB con datos horarios de un año calendario, a un soporte con dos grados de libertad dimensionado para alojar hasta dos módulos de 700 W y a un conjunto estructural sometido a límites de masa y volumen preestablecidos. Bajo esta configuración, las restricciones de diseño incluyen el uso obligatorio de un bloque óptico tipo CPC acoplado a un receptor encapsulado con PCM RT50 y la adopción de un mecanismo pistón–leva con radio base y ángulo de giro máximos definidos; la validación mecánica se concentra en la generación de especificaciones CAD y en la verificación CAE del conjunto, mientras que la validación energética se limita a la simulación comparativa frente a arreglos fijo e ideal.

En términos de resultados y contribuciones, se reporta que el seguidor pasivo alcanza una fracción elevada de la energía del seguidor ideal y mejora de manera significativa el rendimiento

frente a la configuración fija, con ganancias concentradas en el entorno del mediodía solar y sin consumo eléctrico del actuador. Se aporta, además, una contribución metodológica concreta: un flujo de trabajo reproducible que integra descomposición y transposición radiativa, balance termo-óptico con cambio de fase, conversión termo-mecánica a ley de leva y evaluación FV anual; todo ello se entrega con artefactos listos para fabricación (trayectoria de leva) y parámetros de diseño trazables para su adaptación regional.

**Figura 1**

Arquitectura mecánica y termo-óptica del seguidor solar pasivo de dos grados de libertad (2-DOF) propuesto.



*Nota.* Renderizado CAD del autor para la validación geométrica y de ensamblaje.

Finalmente, se formulan los objetivos; se compilan los fundamentos de radiación, CPC y cambio de fase relevantes para el dimensionamiento; se detalla la metodología por niveles (script principal, motores de cálculo, solver central y submodelos, módulos de síntesis y postproceso); se presenta el modelo CAD y su validación; se describen lineamientos de manufactura y un contraste financiero; y se exponen resultados comparativos a escala horaria, mensual y anual, seguidos de conclusiones, recomendaciones y apéndices técnicos que respaldan la reproducibilidad integral del trabajo.

## 1 Objetivos

### 1.1 Objetivo General

Diseñar un sistema de soporte para paneles fotovoltaicos que utilice un seguimiento solar pasivo en base a termo fluidos, de dos grados de libertad adaptado a las condiciones específicas del Área Metropolitana de Bucaramanga, para mejorar la absorción de energía solar.

### 1.2 Objetivos Específicos

Diseñar conceptualmente un soporte para diferentes paneles fotovoltaicos con un seguimiento solar pasivo de dos grados de libertad, este bajo los siguiente requerimientos y características de diseño:

- Capacidad máxima de carga: 2 paneles solares de 700 W.
- Peso máximo 90 Kg.
- Capacidad de soportar condiciones medioambientales al aire libre del área metropolitana de Bucaramanga.
- Dimensiones máximas del soporte de 500 x 500 x 200 cm.
- Cuerpo tipo tubular de aleaciones de acero o materiales compuestos.
- Un movimiento con 2 grados de libertad.

Establecer los procesos de manufactura y producción preliminares de los diferentes sistemas de soporte para paneles solares con seguimiento solar pasivo.

Desarrollar un estudio técnico-económico con la finalidad de evaluar la viabilidad de la manufactura y puesta en marcha de un soporte para paneles solares con seguimiento

solar pasivo comparándolo con soporte para paneles solares con seguimiento solar activo.

## 2 Marco Teórico.

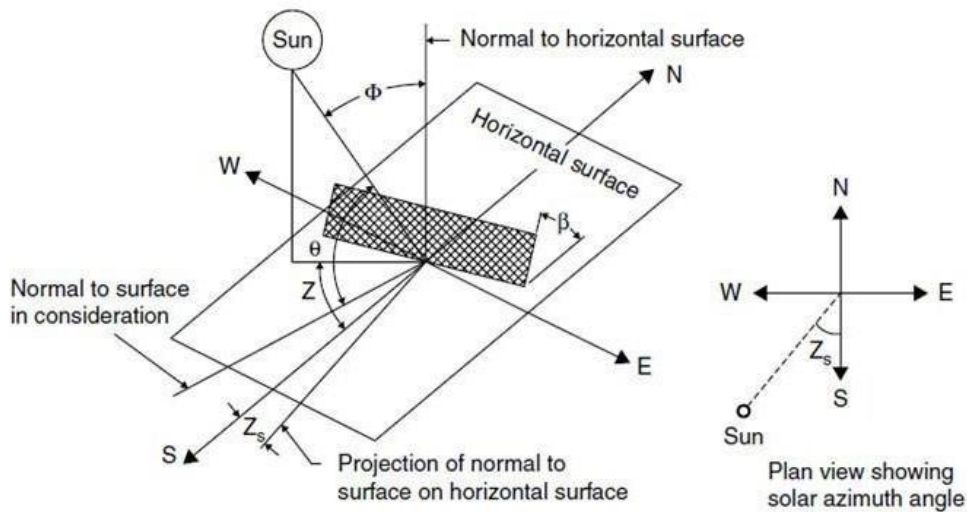
En este capítulo se presenta los fundamentos físicos y de modelado que soportan el diseño del seguidor solar pasivo biaxial desarrollado en este proyecto. Se abordan únicamente los conceptos estrictamente necesarios para entender el principio de funcionamiento y justificar las decisiones de ingeniería. El desarrollo matemático completo, las correlaciones específicas y las formulaciones numéricas se documentan en detalle en la sección de apéndices.

### 2.1 Radiación Solar y Geometría Solar

El sistema de seguimiento define, hora - hora, la posición aparente del sol y su proyección sobre la superficie receptora. La geometría solar define esta relación mediante un conjunto mínimo de variables: declinación solar  $\delta$ , ángulo horario  $\omega$ , ángulo cenital  $\theta_z$ , ángulo de incidencia  $\theta$ , latitud  $\phi$ , inclinación del plano  $\beta$  y azimuts del sol y del plano ( $\gamma_s, \gamma$ ). En la Figura 2 se representa gráficamente cada uno de los ángulos fundamentales de la geometría solar.

**Figura 2**

Ángulos Fundamentales de la Geometría Solar



*Nota.* El diagrama ilustra los ángulos clave para el aprovechamiento de la energía solar, incluyendo el ángulo de incidencia, el cenital y el azimut. De *Geometría solar* [Presentación de diapositivas], por (Jaramillo, 2011), SlidePlayer (<https://slideplayer.es/slide/3871936/>).

- $\delta$  (declinación): describe la variación estacional de la altura solar.
- $\omega$  (ángulo horario): mide el giro aparente Este–Oeste; cada hora solar equivale a  $15^\circ$ .
- $\theta_z$  (cenital): ángulo entre el rayo solar y la vertical local; complementa la elevación.
- $\theta$  (incidencia): ángulo entre el rayo directo y la normal al plano receptor; su minimización ( $\theta \approx 0^\circ$ ) maximiza la captación de DNI.

Con estos ángulos se proyecta la irradiancia sobre cualquier plano; la orientación biaxial busca justamente mantener  $\theta \approx 0^\circ$  a lo largo del día y del año, compensando el giro horario ( $\omega$ ) y la variación estacional ( $\delta$ ). Para evaluar la atmósfera, se parte de la irradiancia extraterrestre corregida por la distancia Tierra–Sol y se comparan sus proyecciones con la irradiancia global horizontal (GHI) medida. La razón  $k_t = GHI/G_o$  (índice de claridad) cuantifica la atenuación por absorción, dispersión y nubosidad. Con  $k_t$  se separan, cuando no se disponen de sensores dedicados, las fracciones difusa (DHI) y directa normal (DNI). Este conjunto  $\{\delta, \omega, \theta_z, \theta, k_t, \text{DNI}, \text{DHI}\}$  alimenta consistentemente los balances ópticos, térmicos y eléctricos del sistema.

## 2.2 Parámetros Ópticos en Colectores Cilindro-Parabólicos Compuestos (CPC)

Se utiliza el CPC como componente óptico que concentra la irradiancia directa normal (DNI) sobre el receptor tubular que contine cera parafínica (PCM); con ello se aporta la potencia térmica, que acciona el seguidor pasivo biaxial mediante expansión volumétrica. Dos parámetros gobiernan la geometría del CPC:

- **Ángulo de aceptación ( $\theta_A$ ):** semicono angular dentro del cual los rayos incidentes son aceptados y conducidos al receptor tras  $\leq 2$  reflexiones.

- **Concentración geométrica (Cg):** para CPC 2D ideal,  $C_g \approx 1/\sin \theta_A$ .

Un  $\theta_A$  amplio relaja la exigencia de seguimiento fino, pero reduce Cg y, en consecuencia, la temperatura pico del receptor. El diseño selecciona  $\theta_A$  balanceando tolerancia angular y nivel térmico requerido por el PCM.

La eficiencia óptica en operación se resume como:

$$\eta_o = (\%cl \cdot \rho_{base}) \cdot \tau_{cov} \cdot \alpha_{abs} \cdot \gamma_{ov} \cdot K(\theta), \quad (1)$$

donde **%cl** representa limpieza,  $\rho_{base}$  reflectividad del espejo limpio,  $\tau_{cov}$  transmitancia de la cubierta,  $\alpha_{abs}$  absorptancia del recubrimiento selectivo,  $\gamma_{ov}$  factor de interceptación global y  $K(\theta)$ , el modificador angular adicional. La multiplicatividad hace que pequeñas pérdidas (p.ej., polvo) penalicen significativamente la potencia absorbida.

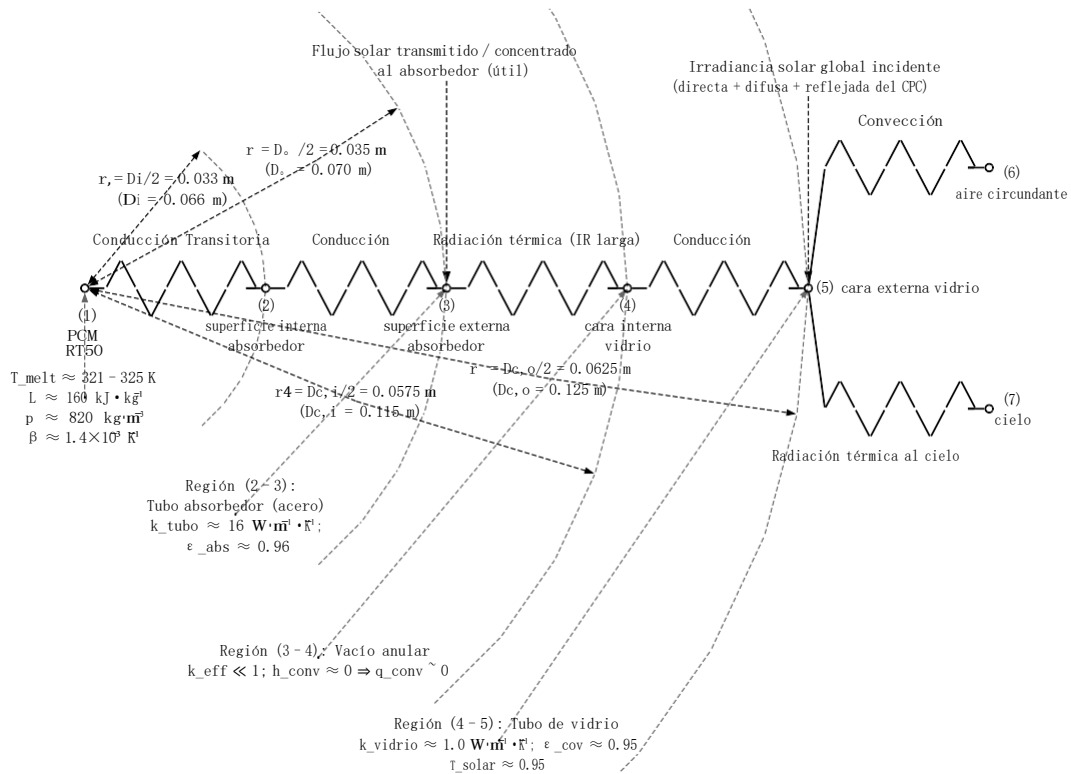
### 2.3 Balance de Energía Unidimensional del Receptor con Cubierta Evacuada

El receptor consiste en un tubo metálico absorbente con recubrimiento selectivo, alojado dentro de una cubierta de vidrio evacuada. El vacío anular suprime la convección en el espacio interno; la pérdida dominante allí es radiación IR entre superficies concéntricas. Hacia el exterior, el calor se disipa por convección al aire y por radiación al cielo efectivo. Se representa con una red de resistencias (ver Figura 3):

- Conducción transitoria **PCM** → **pared interna del absorbedor**.
- Conducción en la pared metálica del absorbedor.
- Radiación **absorbente** ↔ **vidrio interno** (vacío anular).
- Conducción en el vidrio (pequeña; se desprecia en el balance consolidado).
- Convección externa **vidrio–aire** dependiente del viento.
- Radiación **vidrio** ↔ **cielo** a temperatura radiativa inferior al ambiente.

**Figura 3**

Circuito de Transferencia de Calor para Concentrador Parabólico de Canal (CPC)



*Nota.* Circuito de transferencia de calor para un concentrador CPC: (1) PCM ; (2) superficie interna del absorbedor; (3) superficie externa del absorbedor; (4) cara interna de la cubierta de vidrio; (5) cara externa de la cubierta; (6) aire circundante; (7) cielo efectivo. Adaptado de "A Solar Parabolic Trough Concentrator (PTC) Model Using MATLAB SIMULINK", por (Bhambare, 2020a), *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 10(Special Issue), p. 416.

Al condensar la red se obtiene un coeficiente global de pérdidas  $U_L$  que relaciona potencia de pérdida con diferencia térmica característica:

$$P_{th,loss} = U_L A_{ref} (T_{fuente} - T_{amb}) \quad (2)$$

El  $U_L$  permite evaluar, para una  $G_T$  dada, cuánta potencia neta queda disponible para fundir el PCM. En este proyecto se referencia  $A_{\{ref\}}$  al área óptica de apertura del CPC para cerrar el balance con las variables solares.

El ajuste de  $\eta_o$  y  $U_L$  define el rango de temperaturas del receptor bajo escenarios de viento y limpieza realistas. Ese rango debe activar el PCM dentro de su intervalo de fusión y generar carrera suficiente para la ley de leva objetivo (§2.4). La validación dimensional (potencia óptica  $\rightarrow$  potencia térmica  $\rightarrow$  entalpía en PCM) asegura coherencia del dimensionamiento.

### 2.3 Conversión Termo-Mecánica con PCM y Leva Cilíndrica

El componente principal del seguidor pasivo es un actuador termo-mecánico sin consumo eléctrico. El PCM parafínico alojado en el receptor se calienta por el flujo solar concentrado; al entrar al rango de fusión genera un incremento de volumen producto de: (i) dilatación térmica y (ii) cambio de densidad sólido $\rightarrow$ líquido. El incremento volumétrico  $\Delta V(T)$  empuja un pistón de área efectiva  $A_p$  y produce un desplazamiento lineal

$$x = \frac{\Delta V}{A_p} \quad (3)$$

que una leva cilíndrica convierte en rotación controlada de los ejes de elevación y acimut.

#### 2.3.1 Modelo Macroscópico del PCM

Para diseño, el volumen se expresa como:

$$\Delta V(T) = V_0 \beta(T)(T - T_{ref}) + \gamma(T)V_0 \left( \frac{\rho_s}{\rho_l} - 1 \right) \quad (4)$$

donde  $V_0$  es el volumen a  $T_{ref}$ ,  $\beta(T)$  el coeficiente volumétrico (positivo en el rango operativo) y  $\gamma(T)$  la fracción líquida, modelada suavemente entre  $T_{m,low}$  y  $T_{m,high}$ . En parafinas,  $\rho_s > \rho_l$ , por lo que la fusión añade típicamente 10–15 % de expansión.

El modelo térmico radial (ver Apéndice A, página 106) determina el ritmo al que  $q''_{wall}$  (flujo de pared) eleva la temperatura y la fracción líquida en el espesor del PCM. La hipótesis de simetría axial y gradiente radial dominante resulta adecuada para tubos esbeltos y permite implementar un esquema estable de volúmenes finitos con capacidad calorífica aparente, que incorpora el calor latente sin localizar el frente de fusión de forma explícita.

### 2.3.2 Síntesis de la Ley de Leva

La leva cilíndrica es un tambor con ranura helicoidal por la que rueda un seguidor tipo rodillo (p. ej., KR16-PP). La curva de paso se parametriza en el cilindro de radio  $R$  como:

$$r(\phi) = (R \cos\phi, R \sin\phi, z(\phi)), \quad z(\phi) \equiv x(\phi) \quad (5)$$

El diseño fija  $x(\varphi)$  para que, al traducir  $\Delta V(T) \rightarrow x \rightarrow \varphi \rightarrow \theta$ , el sistema minimice el ángulo de incidencia  $\theta$  a lo largo del año. La carrera máxima se acota por los máximos térmicos razonables:

$$x_{max} = \frac{\Delta V_{th,max} + \Delta V_{lat,max}}{A_p} \quad (6)$$

y fija la longitud útil de la ranura en el eje Z. El mecanizado CNC de la ranura a partir de la nube de puntos  $\{X, Y, Z\}$  asegura repetibilidad y baja histéresis. En el diseño se controlan curvaturas y radios para evitar atascos del rodillo y se limita la pendiente  $dz/d\varphi$  para mantener esfuerzos de contacto dentro de tolerancias.

La compatibilidad termo-cinemática requiere que el  $\Delta V(T)$  alcanzable en días despejados (y el ritmo de calentamiento) cubra la ley de leva objetivo sin saturar el PCM ni la mecánica. Esta verificación, unida al análisis del  $U_L$ , cierra el dimensionamiento del actuador.

### 2.3.3 Modelo Fotovoltaico Horario y Balance de Pérdidas

Para justificar el seguidor frente a un arreglo fijo, se estima la producción FV horaria sobre el plano del arreglo orientado por el mecanismo. Se procede así:

1. **Irradiancia en plano ( $G_{POA}$ ).** Se calcula con la descomposición de la sección 2.1, usando **DNI, DHI** y el ángulo de incidencia  $\theta$  resultante de la orientación pasiva.

2. **Temperatura de célula ( $T_c$ ).** Se estima con el modelo **NOCT**:

$$T_c = T_{amb} + \frac{G_{POA}}{800} (T_{NOCT} - 20) \quad (7)$$

con  $T_{NOCT}$  propio del módulo.

3. **Potencia DC.** Se ajusta la potencia pico a condiciones reales:

$$P_{out} = P_{max,STC} \left( \frac{G_{POA}}{1000} \right) [1 + \gamma (T_c - 25)], \quad (8)$$

donde  $\gamma$  es el coeficiente térmico del módulo ( $-0,3\%$  a  $-0,45\% \text{ K}^{-1}$ ).

4. **Pérdidas de balance.** Se aplican factores multiplicativos  $(1 - L_i)$  para suciedad ( $L_s$ ), **mismatch** ( $L_{mm}$ ), cableado DC ( $L_{cab}$ ), eficiencia del inversor ( $\eta_{inv}$ , si procede) y degradación inicial ( $L_{deg}$ ). La potencia neta es:

$$P_{DC,net} = P_{out} \prod_i (1 - L_i) \quad (9)$$

5. **Energía.** La energía horaria es  $E_h = P_{DC,net} \Delta t$  con  $\Delta t = 1\text{h}$ ; la anual resulta de la suma de horas útiles.

Con el perfil horario se calcula la energía incremental del seguidor respecto de una estructura fija (misma localización, módulos y pérdidas). Esa diferencia alimenta el análisis financiero incremental (sección 5.8), en el que se valora el kWh adicional frente al costo incremental del mecanismo pasivo (compra, instalación y O&M).

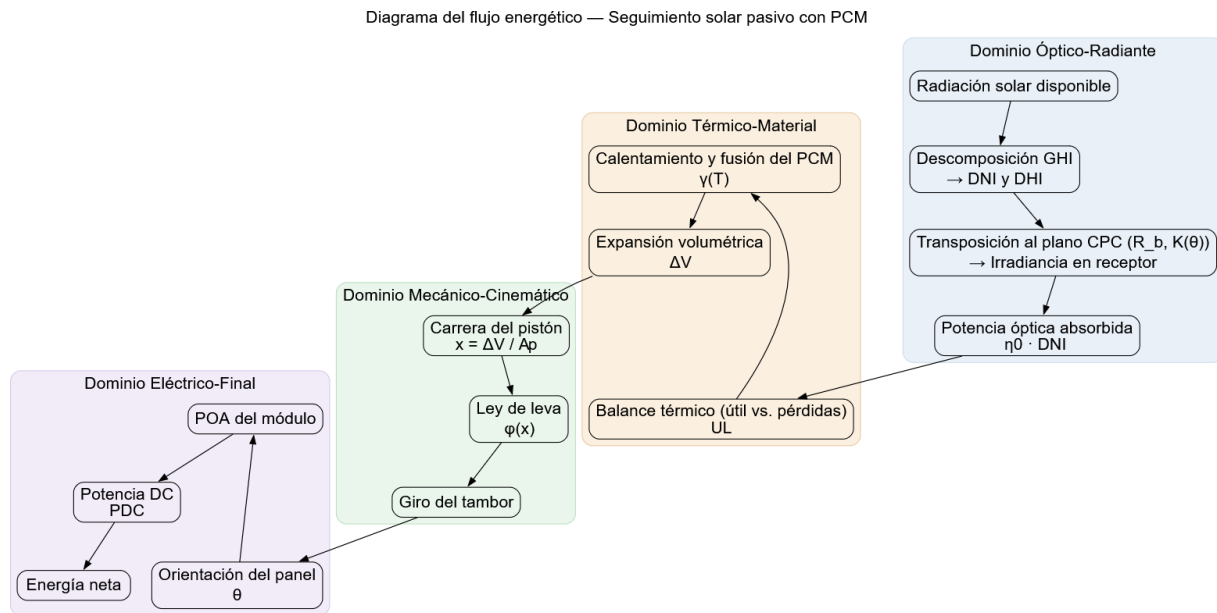
### 3 Marco Conceptual

La estructura conceptual de este proyecto se organiza en dominios interdependientes, los cuales describen cómo la radiación solar se transforma, a través de fenómenos ópticos, térmicos y

mecánicos, en orientación del generador FV y, finalmente, en energía eléctrica. Se delimitan las variables operativas y sus vínculos causales. El objetivo se centra en mostrar qué se mide, qué se calcula y cómo cada magnitud interviene en la cadena de conversión del sistema pasivo accionado por material de cambio de fase (PCM). Para orientar la lectura del capítulo, se presenta un diagrama que sintetiza la cadena de conversión del sistema (Figura 4).

**Figura 4**

Diagrama del Flujo Energético del Sistema de Seguimiento Solar Pasivo con PCM



*Nota.* Las flechas indican relaciones causales principales entre dominios; los recuadros de color agrupan etapas funcionales (óptico-radiante, térmico-material, mecánico-cinemático y eléctrico-final). En el dominio térmico-material se representa el acoplamiento entre pérdidas y expansión; en el tramo final, la orientación condiciona la POA y, por ende, la energía neta.

### 3.1 Dominio Geométrico y Óptico

La entrada energética se caracteriza por la posición solar y la irradiancia disponible. La latitud, la fecha y la hora determinan el ángulo horario y la declinación; a partir de ellos se calcula el ángulo de incidencia sobre el plano del concentrador. La irradiancia global horizontal (GHI) se descompone en directa normal (DNI) y difusa (DHI) y, mediante transposición, se proyecta al plano del concentrador cilindro-parabólico compuesto (CPC). La fracción de haz efectivamente utilizable queda modulada por la relación de inclinación  $R_b$  y por el modificador angular  $K(\theta)$ , de modo que la potencia absorbida sobre el receptor se expresa como la irradiancia incidente ponderada por la eficiencia óptica del conjunto. Con estas magnitudes se cierra la entrada geométrica y óptica requerida por el balance térmico.

### 3.2 Dominio Térmico y Energético

La radiación absorbida por el receptor se reparte entre ganancia útil y pérdidas. La eficiencia óptica  $\eta_o$  actúa como factor multiplicativo de la entrada y depende, operativamente, de reflectividad del espejo, transmisividad de la cubierta y absorptancia del recubrimiento. El PCM se modela con capacidad calorífica aparente para distribuir el calor latente en una ventana de temperatura finita; así, la fracción líquida  $\gamma(T)$  se evalúa sin rastrear frentes de fase. La expansión volumétrica total  $\Delta V$  resulta de la dilatación térmica más el salto de densidad sólido-líquido; en el nivel de actuador, la conversión termo-mecánica se resume en  $x = \Delta V/A_p$ , donde  $A_p$  es el área efectiva del pistón. La salida de este dominio es, por tanto, la carrera lineal disponible para accionar la leva.

### 3.3 Dominio Mecánico y Cinemático

La carrera del pistón se convierte en giro mediante una leva cilíndrica con ranura helicoidal. La ley de leva  $\phi(x)$  asigna a cada desplazamiento un ángulo del tambor y se diseña estrictamente

creciente para evitar retrocesos y autointersecciones. La pendiente máxima de  $\phi(x)$  se limita para controlar el ángulo de presión y las cargas laterales; con el radio base de la leva se fija el equilibrio entre el par disponible y el tamaño del tambor. Con estos criterios se garantiza una transmisión suave y monótona entre expansión volumétrica y orientación del panel.

### 3.4 Dominio de Eléctrico y Viabilidad

La orientación lograda se traduce en irradiancia en el plano del módulo (POA). Con POA y temperatura de célula se estima la potencia DC instantánea del generador; las pérdidas de balance (ensuciamiento, cableado, conversión) se aplican como ineficiencias o pérdidas. La potencia neta produce la energía diaria y anual. Sobre esta base se evalúa la viabilidad económica considerando inversión, operación y energía generada, sin extender teoría financiera.

Sobre el marco anterior se apoya la implementación computacional, se ingresa los datos meteorológicos hora a hora, se calcula la cinemática solar y la proyección al plano del CPC, se evalúan  $\eta_o$  y  $U_L$  para el balance térmico, se resuelve la fusión del PCM con capacidad aparente y, con  $\Delta V$ , se obtiene  $xy$  se aplica  $\phi(x)$  para estimar  $\theta(t)$ . La POA resultante alimenta el modelo FV y, por integración, la energía neta; estos resultados sirven como insumos del análisis económico.

## 4 Metodología.

Se presenta una metodología alineada con los dominios conceptuales del estudio para evaluar un CPC acoplado a un seguidor pasivo accionado por la expansión de un PCM (RT50) y convertido en giro Este–Oeste sobre un eje horizontal Norte–Sur (HSAT N–S) mediante un mecanismo pistón–leva. En el dominio geométrico–óptico, se procesan series horarias ( $T_a, GHI, V_w$ ) para calcular ángulos solares, descomponer  $GHI \rightarrow \{DNI, DHI\}$  y transponer al plano del CPC; la potencia incidente se modula con  $\eta_o(\theta)$ . En el dominio térmico–energético, la potencia

absorbida alimenta un balance pared-PCM con pérdidas consolidadas en  $U_L$ ; la fusión del PCM se resuelve con capacidad calorífica aparente para obtener  $\gamma(T)$  y la expansión total  $\Delta V(T)$  (térmica + latente). En el dominio mecánico-cinemático, la expansión se convierte en carrera  $x = \Delta V/A_p$  y se aplica una ley de leva  $\phi(x)$  estrictamente monótona y acotada por el límite angular del conjunto; la cinemática se robustece con histéresis, control de signo y anclaje a mediodía, además de una fase opcional de re-síntesis isotónica basada en datos ponderados por potencia útil. En el dominio eléctrico-económico, la orientación  $\theta$  determina la irradiancia en el plano del módulo (POA), la temperatura de célula (NOCT), la potencia  $P_{DC}$  con pérdidas BOS y la energía anual, comparando tres escenarios: plano fijo, seguidor ideal de dos ejes (con penalización por consumo) y seguidor pasivo mecánico.

#### 4.1 Supuestos, Hipótesis y Consideraciones para el Diseño del Seguidor Pasivo

Se listan de forma precisa y completa las hipótesis que condicionan el dimensionamiento y la operación del seguidor mecánico pasivo (pistón-PCM-leva) y su evaluación termo-óptica/FV.

##### A. Convenciones, datos y horizonte temporal

- Unidades y ángulos: todo en SI; temperaturas en K para cómputo;  $IAM$  recibe  $\theta$  en grados; especificar unidades para [rad]/[deg] cuando corresponda.
- Horizonte: simulación anual con 8760 pasos (resolución base 1 h, con  $dt = 1800$  s para sub-cálculos).
- Datos de entrada: archivo DATOS.xlsx sin encabezados con  $T_a$  [ $^{\circ}C$ ],  $GHI$  [ $\frac{W}{m^2}$ ],  $V_w$  [ $\frac{m}{s}$ ] por hora; tamaño esperado  $8760 \times 3$ .
- Sitio y orientación (caso base):  $lat = 6.99^{\circ}$ ,  $lon = -73.06^{\circ}$ , *meridiano estándar* =  $-75^{\circ}$ , inclinación  $\beta = 7^{\circ}$ , *azimut de superficie* =  $0^{\circ}$  (Sur), *albedo* = 0.2; modo de seguimiento a elegir: tracking (HSAT N-S) o stationary.

- Umbral de “sol útil”: se desactiva el acoplamiento térmico cuando la irradiancia en apertura es baja:  $minIrradiance_{Wm2} = 10 \rightarrow P_{abs} < A_p \cdot 10 W$  activa un paso de enfriamiento y congela el ángulo mecánico en su último valor (modo noche/baja irradiancia).

## B. Óptica y radiación

- Óptica efectiva del PTC/CPC (caso base):  $\rho = 0.88$  (reflectividad),  $\tau = 0.95$  (transmitancia),  $\alpha = 0.96$  (absortancia),  $\gamma = 0.95$  (pérdidas geométricas/sombras),  $clean = 0.90$  (limpieza/ensuciamiento lumped).
- IAM (incidence angle modifier): polinomio empírico en grados  $IAM(\theta) = 1 - 5.25 \times 10^{-4} \theta - 2.859 \times 10^{-5} \theta^2$
- Aplicado a la componente directa. La difusa/reflejada usa una *eficiencia óptica efectiva* = 0.95 de la directa.
- Descomposición y transposición:
  - GHI→DNI/DHI mediante Erbs con guardarraíles (noche/crepúsculo y cotas físicas).
  - Proyección a plano inclinado con modelo anisotrópico de Pérez para difusa y término reflejado.
- CPC: geometría por involuta con gap (aceptancia  $\theta_A = 30^\circ$ ,  $N = 400$ ), devuelve apertura efectiva  $W_a$  y exporta coordenadas para CAD.

## C. Geometría térmica y resistencias

- Receptor y cubierta (caso base):  $L = 0.5 m$ ;  $D_i = 0.066 m$ ,  $D_o = 0.070 m$ ;  $D_{ci} = 0.115 m$ ,  $D_{co} = 0.125 m$ . Propiedades:  $k_{tubo} = 16 [Wm^{-1}K^{-1}]$ ,  $k_{vidrio} = 1.0 [Wm^{-1}K^{-1}]$ ,  $\varepsilon_{abs} = 0.96$ ,  $\varepsilon_{cov} = 0.95$ .
- Modelo de pérdidas externas: coeficiente global  $U_o$  por radiación absorber-cubierta en serie

con (convección externa al cilindro + radiación a cielo). Se desprecia la conducción a través de la pared de vidrio por su pequeño espesor y alta conductividad relativa en este balance global.

- Convección externa:  $h_{out}$  de cilindro al viento con límite inferior dependiente del viento:  $h_{out} \geq 4 + 4 V_w [Wm^{-2}K^{-1}]$ .
- Convección interna:
  - Flujo forzado (agua): Dittus–Boelter ( $Re$ ,  $Pr$ ) para hin (Bhambare, 2020).
  - PCM estático: Churchill–Chu para convección natural interna (función de  $Ra$  y  $Pr$ ) con mínimos físicos: si  $T_{PCM} > T_{melt,high}(\text{líquido})$   $h_{in} \geq 12 [Wm^{-2}K^{-1}]$ ; si no,  $h_{in} \geq 5 [Wm^{-2}K^{-1}]$  (Churchill & Chu, 1975).

#### D. Modelo de PCM y expansión volumétrica (accionamiento)

- PCM: RT50 (rangos típicos cargados en código):  $T_{melt} \in [48, 52] [^{\circ}C]$ ;  $L_h = 160 [kJ \cdot kg^{-1}]$ ;  $\rho \approx 820 [kg m^{-3}]$ ; conductividad del PCM lineal  $k = 0.26 \rightarrow 0.20 [Wm^{-1}K^{-1}]$  entre sólido y líquido;  $c_{p,s} = 1790$ ,  $c_{p,l} = 2380 [J kg^{-1}K^{-1}]$ .
- Propiedades de convección:  $\beta = 1.4 \times 10^{-3} [K^{-1}]$ ,  $\nu = 5 \times 10^{-6} [m^2/s]$ ;  $\alpha(T) = k/(\rho c_{p,l})$ .
- Volumen de PCM: ocupa el cilindro interior del tubo:  $V_{PCM} = \frac{\pi D_i^2 L}{4}$
- Expansión y densidades:  $\beta_s = \beta_l = 1.4 \times 10^{-3} [K^{-1}]$ ;  $\rho_s = 880$ ,  $\rho_l = 760 [kg \cdot m^{-3}]$ ;  $T_{ref} = 293.15 [K]$ . La expansión total considera térmica (de 20 a 80 °C como referencia de dimensionamiento) + latente (cambio de densidad sólido→líquido).
- Solver PCM: esquema conductivo con capacidad aparente (latente incorporada vía  $c_p$  efectivo) que devuelve  $T_{mean}$ , fracción líquida,  $Q_u$  y un indicador de error energético.

- Accionamiento: el desplazamiento (stroke) del pistón se calcula como  $x = \Delta V / A_{pistón}$  con

$$A_{pistón} = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2, d = 0.05 [m].$$

#### E. Cinemática de seguimiento (pistón–leva)

- Leva cilíndrica: radio base  $R = 0.025 [m]$ . La ley  $\phi(x)$  es monótona y se sintetiza para el giro E–O con límite angular  $|\psi| \leq \psi_{máx}$  (caso base  $70^\circ$ ; recomendado  $60\text{--}82^\circ$ ).
- Construcción de  $\phi(x)$  (primera pasada):
  - Muestreo anual de  $\psi_{ideal}$  de HSAT N–S (signo: –Este / +Oeste), saturado por  $\psi_{máx}$ .
  - Ponderación energética con  $\sin(\alpha)^p$  ( $p \approx 2.3$ ) y sesgo de CDF ( $\gamma \approx 0.55$ ) para favorecer mediodía.
  - $x_{máx}$  geométrico por expansión térmica + latente:  $x_{máx} = (dV_{máx}) / A_{pistón}$ .
  - Ancla (0,0) y unicidad estricta en las LUTs  $\{lift_u, \phi_u\}$ .
- Signo e histéresis:
  - Si la leva es no firmada (clásica), el signo se impone con banda muerta en mediodía ( $\pm 2.5^\circ$ ) y memoria de signo.
  - Con re-síntesis isotónica bi-direccional,  $\phi(x)$  queda firmada y con histéresis en  $x$ : umbral de cambio  $\Delta x > 0.05 mm$  y banda  $0.20 mm$  (valores base), lo que evita chatter alrededor de  $x_0$ .
- Re-síntesis isotónica (opcional): a partir de datos con sol útil ( $DNI > 50 W/m^2$ ,  $\theta_z < 88^\circ$ ), se estima  $x_0$  en mediodía y se ajusta  $|\psi|(x)$  por PAVA en ramas carga (mañana) y descarga (tarde), con tope  $\psi_{cap} \approx 50^\circ$  y pesos  $\propto P_{abs}^{1.3}$ . Criterio: reducir RMSE del tracking, en especial en horas FV ( $DNI$  alto  $|\psi| \leq 35^\circ$ ).
- Re-calibración de stroke: con el p99.5 de  $|x|$  observado se recomienda  $x_{máx}^{recom} = 1.07 \sim$

$1.15 \times p_{99.5}$  y se reconstruye  $\phi(x)$ ; se ejecuta una segunda/tercera pasada anual para consolidar desempeño.

- Modo noche/baja irradiancia: se mantiene  $\theta_{mech}$  en el último valor válido; no hay reposicionamiento artificial al cero.

#### F. Fotovoltaico (para contraste energético)

- Módulo base: Jinko 72HL4-(V) 575 W;  $NOCT = 45\text{ }^\circ\text{C}$ ; coeficiente térmico de potencia  $\gamma = -0.003\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ; área  $2.58\text{ m}^2$ .
- Modelado FV:
  - Fijo: transposición completa;  $T_{cell}$  por NOCT; pérdidas BOS agregadas (ensuciamiento, cableado, desajuste, degradación).
  - Ideal 2-ejes:  $\theta_{inc} = 0^\circ$ ,  $\beta = 90^\circ - \theta_z$ ; consumo del seguidor 310 kWh/MW·año repartido uniformemente.
  - Mecánico pasivo: usa  $\psi_{mech}$  (pasivo) para incidencia; sin consumo propio.
- Meta FV:  $E_{neto,mec} \geq E_{fijo}$  en meses despejados; comparar anualmente los tres casos.

#### G. Controles de robustez y calidad numérica

- Afirmaciones/validaciones: existencia de funciones, tamaños de datos, rangos físicos (e.g., `validateConfiguration`).
- Clamps y valores mínimos:  $\theta$ ,  $\theta_z \leq 90^\circ$ ;  $P_{abs} \geq 0$ ;  $h_{in}$  y  $h_{out}$  con mínimos físicos; dominio de  $\phi(x)$  acotado a  $[lift_u(1), lift_u(end)]$ .
- Indicadores:  $energy_{error}$  (balance), % horas con `maxIter`, saturación angular (tiempo con  $|\psi| = \psi_{m\acute{a}x}$ , RMSE de tracking en horas FV como criterio de éxito de la re-síntesis).
- Exportación CAD: trayectoria 3D de la leva (`cam_path.csv`, 600 puntos, mm) para verificación geométrica.

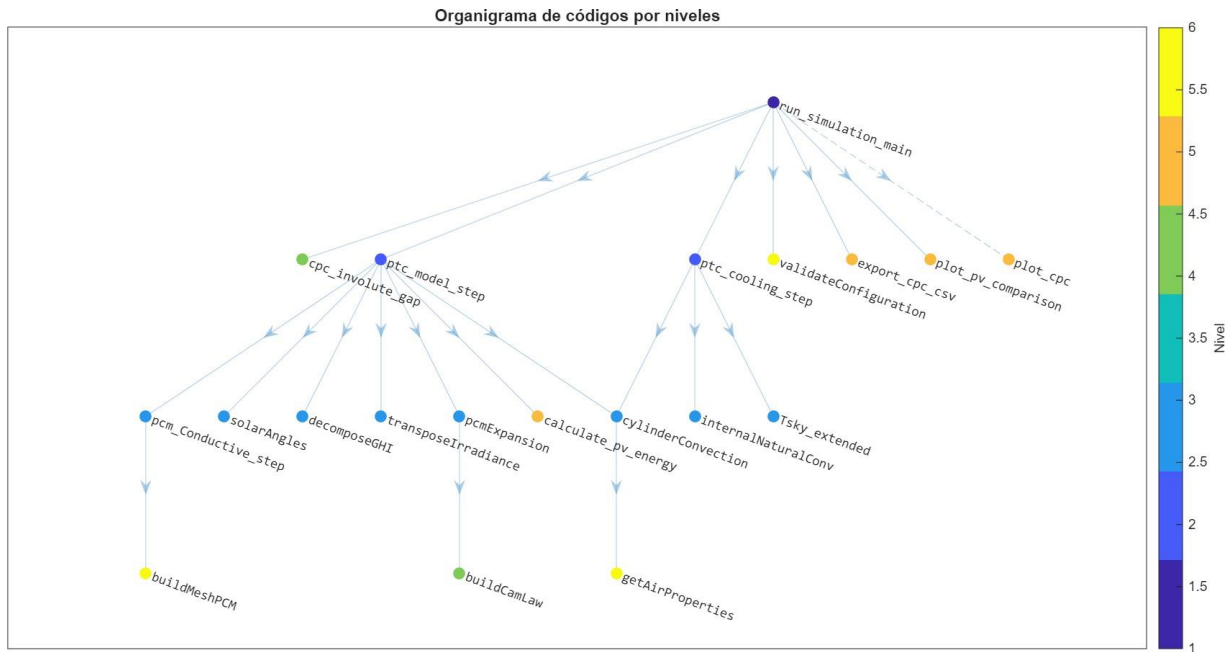
## 4.2 Modelo Computacional y Simulación Dinámica

El modelo computacional integral desarrollado en MATLAB® para simular el comportamiento termo-mecánico de un colector solar parabólico de canal (CPC) equipado con un mecanismo de seguimiento pasivo accionado por un material de cambio de fase (PCM). Está concebido bajo una arquitectura modular y jerárquica, permite analizar las interacciones complejas entre la óptica del colector, la transferencia de calor en el absorbedor, la termodinámica del PCM y la cinemática del sistema de seguimiento. La estructura del software, tal como se ilustra en la Figura 5, fue diseñada para garantizar el seguimiento de los cálculos, la reproducibilidad de los resultados y la flexibilidad para futuras exploraciones paramétricas. La simulación se ejecuta anualmente, utilizando datos climáticos horarios, lo que permite una evaluación robusta del rendimiento a largo plazo bajo condiciones operativas realistas.

El diseño del modelo sigue una aproximación de sistema acoplado, donde la solución de un fenómeno físico (e.g., irradiancia solar) proporciona la entrada para el siguiente (e.g., transferencia de calor al absorbedor), y el resultado final (e.g., temperatura del PCM) realimenta el control mecánico (e.g., ángulo de seguimiento). Esta integración secuencial es clave para capturar el comportamiento dinámico del seguidor pasivo. A continuación, se detalla la organización del código fuente, describiendo el propósito y las interconexiones de cada script y función, desde el orquestador principal hasta las rutinas de utilidad, lo cual sentará las bases para la comprensión profunda de los resultados obtenidos.

**Figura 5**

Organigrama Jerárquico de las Funciones del Código de Simulación



*Nota.* El organigrama muestra la estructura de llamadas y dependencias entre las diferentes funciones del software, comenzando desde la función principal `run_simulation_main`. Las flechas indican el flujo de ejecución y la escala de colores a la derecha representa el nivel jerárquico de cada módulo dentro del código.

#### 4.2.1 Nivel 1 — Código Principal: `run_simulation_main.m`

El archivo `run_simulation_main.m` (ver Apéndice B) actúa como núcleo del modelo dinámico anual: inicializa la simulación, valida el entorno de trabajo y orquesta el posproceso. El bloque de arranque ejecuta comprobaciones de integridad : verifica la existencia del archivo climático `DATOS.xlsx`, que contiene 8760 registros horarios de temperatura ambiente  $T_a$ , irradiancia global horizontal (GHI) y velocidad del viento  $V_w$ , y confirma la presencia de las funciones críticas del flujo de trabajo, entre ellas `validateConfiguration`, `cpc_involute_gap`, `buildCamLaw` y `calculate_pv_energy`. Este paso evita fallos silenciosos y garantiza

reproducibilidad antes de abrir el bucle anual. La Figura 6 (Inicialización y configuración, parte I) resume esta secuencia: desde el inicio de `run_simulation_main.m`, la lectura y validación de `DATOS.xlsx`, la construcción preliminar de `cfg.data` en unidades SI y la definición del modo de seguimiento y la geometría base del colector.

Tras la validación inicial, `run_simulation_main.m` construye la estructura de configuración `cfg`, que centraliza todos los parámetros físicos y numéricos con nombres estables y unidades del SI. En el bloque geométrico, el script define la longitud del absorbedor  $L$ , los diámetros interno y externo del tubo  $D_i$ ,  $D_o$ , los diámetros interno y externo de la cubierta de vidrio  $D_{c,i}$ ,  $D_{c,o}$ , y el ángulo de aceptación del CPC  $\theta_A$ . A continuación llama a `cpc_involute_gap` para calcular de forma programática la apertura efectiva  $W_{ay}$  registrar la geometría óptica derivada, lo que preserva trazabilidad entre síntesis óptica y simulación. El código asigna además propiedades radiativas y de material, como conductividad térmica del tubo y del vidrio ( $k_{\text{tube}}$ ,  $k_{\text{glass}}$ ), emisividad del absorbedor y de la cubierta, reflectancia  $\rho$ , transmitancia  $\tau$ , absorptancia  $\alpha$ , factor geométrico  $\gamma$  y un factor de limpieza. El sitio se parametriza con latitud, longitud, huso horario, inclinación  $\beta$ , albedo y azimut de la superficie. Finalmente, se fijan parámetros numéricos globales: paso temporal  $\Delta t$ , tolerancia de convergencia  $10^{-3}$ , límite de iteraciones (150), modelo de temperatura de cielo efectiva  $T_{\text{sky}}$  en función de  $T_{ay}$  un umbral mínimo de irradiancia directa (`minIrradiance_Wm2`) para descartar horas sin aporte solar útil. La Figura 7 (Inicialización y configuración, parte II) representa esta fase de declaración de parámetros geométricos, ópticos y numéricos dentro de `cfg`.

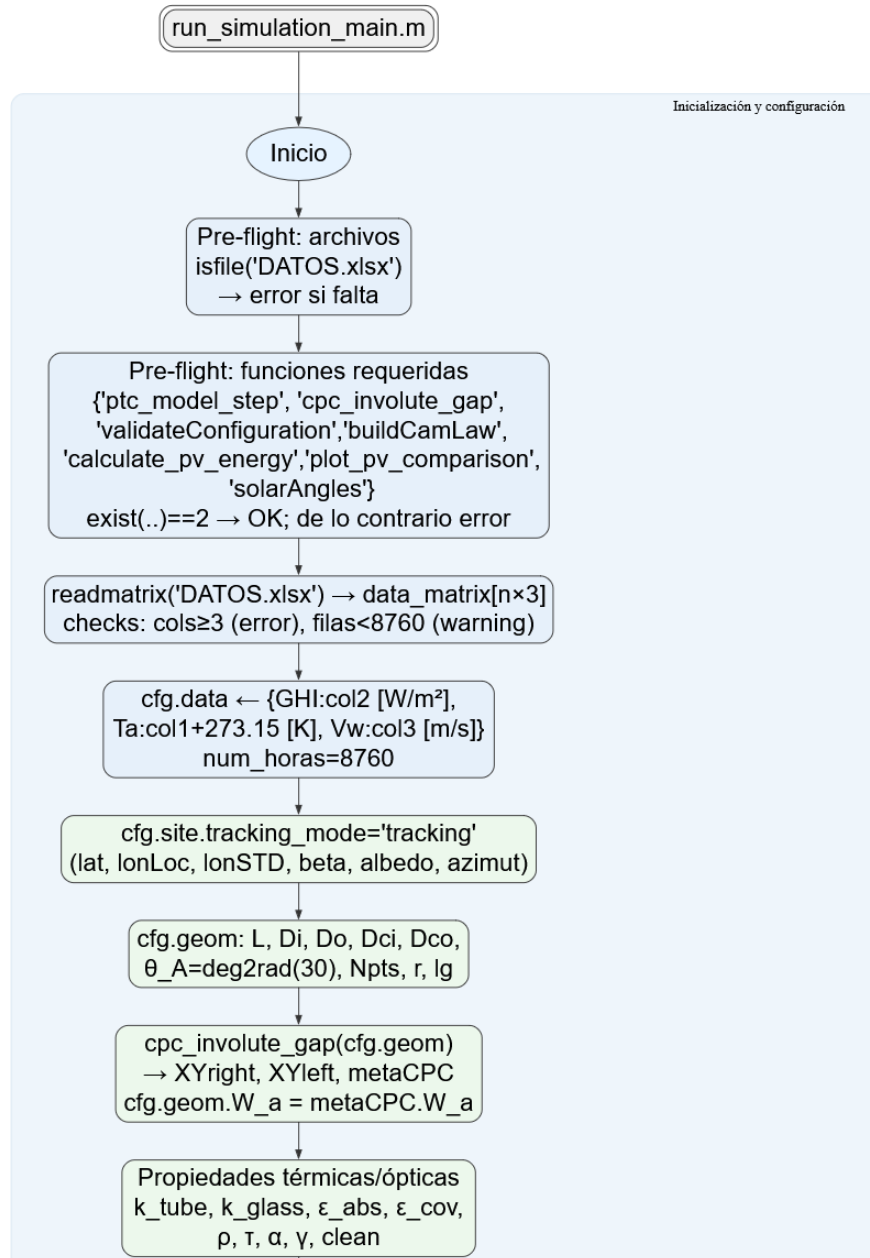
El script activa después el motor físico de simulación seleccionando el modo operativo. En el modo `static_wax`, el volumen interno del absorbedor se llena con el PCM RT50 y el modelo incorpora su ventana de fusión  $T_{\text{melt,low/high}}$ , calor latente  $L$ , densidad  $\rho$ , calores específicos en fase

sólida y líquida  $c_{p,s}$ ,  $c_{p,l}$ , coeficientes de expansión volumétrica  $\beta_s$ ,  $\beta_l$  y un umbral de número de Rayleigh para inducir convección interna. Estas variables alimentan el esquema de “capacidad calorífica aparente”, que resuelve la fusión y expansión del PCM de manera estable y con control de balance energético. En paralelo, el módulo mecánico define el radio efectivo de la leva y el área del pistón, necesarios para convertir la expansión volumétrica  $\Delta V(T)$  del PCM en carrera lineal  $x = \Delta V/A_p y$ , por lo tanto, en ángulo de apuntamiento del CPC. Finalmente, el script fija los parámetros del bloque fotovoltaico de referencia (por ejemplo, módulo Jinko® 575 W: potencia pico, NOCT, coeficiente térmico  $\gamma_T$  y área efectiva) para comparar la captación energética entre tres configuraciones: plano fijo, seguidor activo ideal y seguidor pasivo. Todas estas asignaciones aparecen en la parte final del diagrama de flujo mostrado en la Figura 7, donde también se observa la llamada a `validateConfiguration` y la síntesis de la ley de leva mediante `buildCamLaw`.

A continuación, se ejecuta el bucle anual, en cada hora  $k \in [1, 8760]$  delega el cálculo físico a `ptc_model_step.m`, que integra el bloque solar (ángulos y descomposición  $GHI \rightarrow DNI/DHI$ ; la transposición a plano inclinado, las pérdidas convectivas y radiativas, el solver térmico de PCM (ver Apéndice C). La tabla del Apéndice Q se muestran los coeficientes ópticos y funciones auxiliares consumidos por este módulo, como la corrección por ángulo de incidencia  $IAM(\theta)$  definida en `cfg.opt.IAMfun` ( $\theta^\circ$ )—cuya evaluación es en grados y procede de una calibración empírica—y la temperatura de cielo efectivo `cfg.num.Tsky_fun` basada en la formulación clásica de Berdahl–Martin. Allí mismo se documentan los parámetros del sitio (`cfg.site.*`) y los numéricos que gobiernan estabilidad y eficiencia (`cfg.num.dt`, tolerancias e iteraciones máximas), además del umbral de irradiancia mínima `cfg.opt.minIrradiance_Wm2` que define el corte “sin sol” (ver figura 8).

**Figura 6**

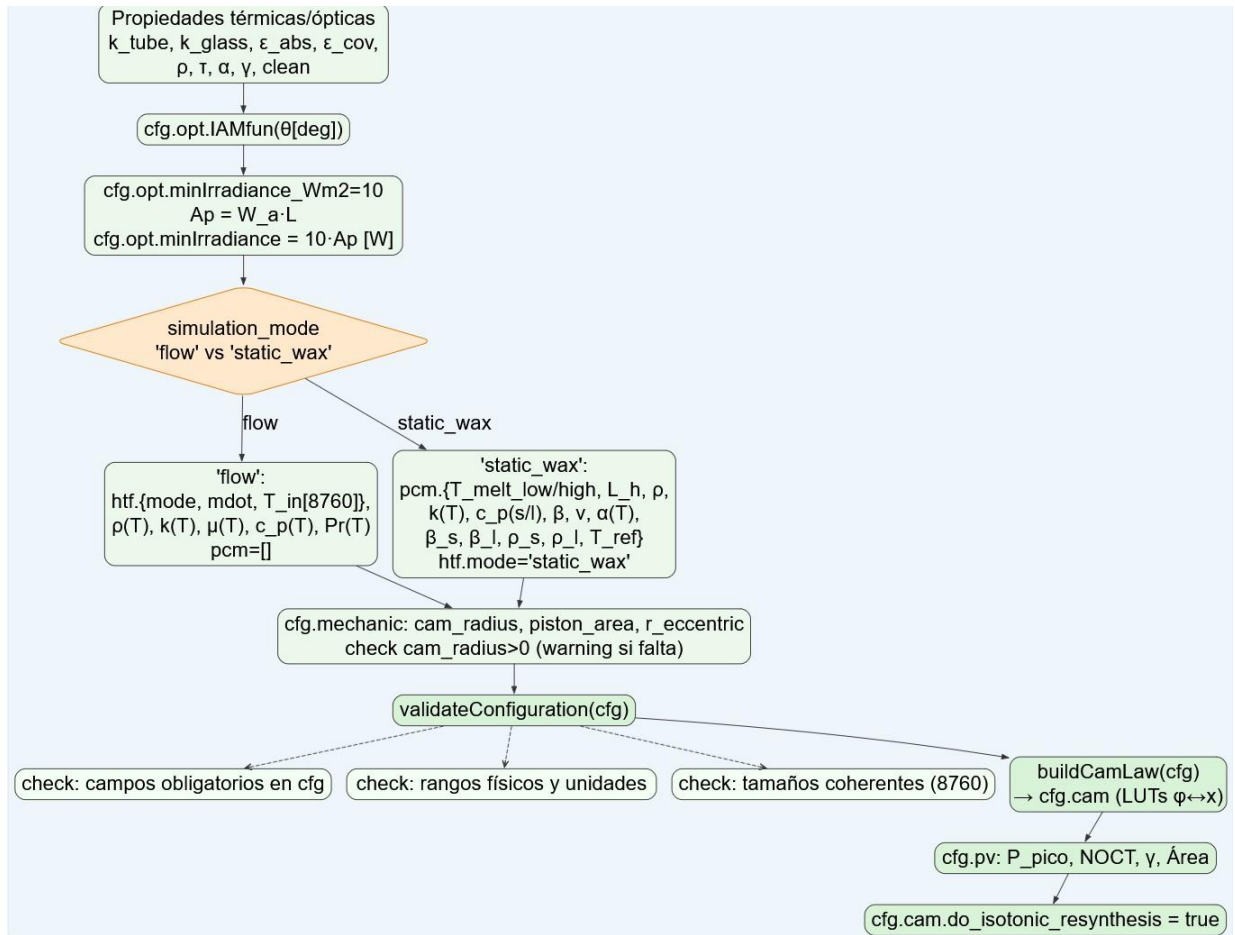
Flujo de Inicialización: Archivo run\_simulation\_main parte 1.



*Nota.* El diagrama de Flujo realiza verificaciones previas, lectura de datos, armado y validación de la estructura de variables (cfg), selección de modo y síntesis inicial de  $\varphi(x)$ .

**Figura 7**

Flujo de Inicialización: Archivo run\_simulation\_main parte 2



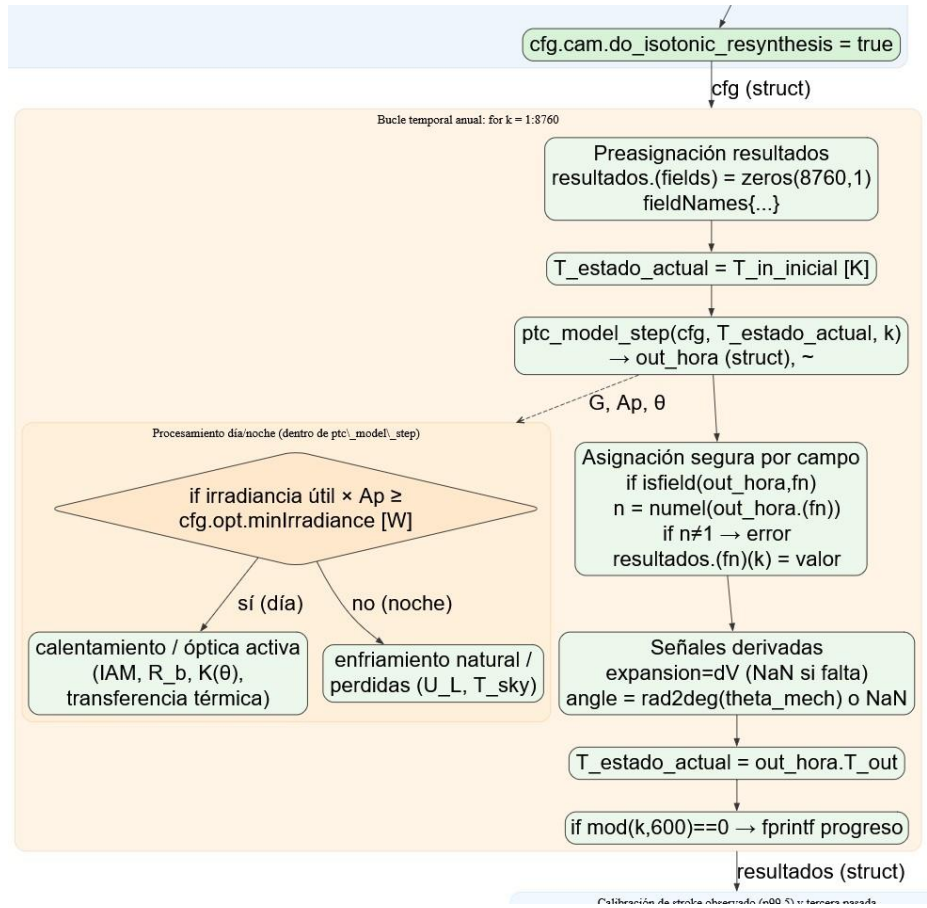
*Nota.* El diagrama de Flujo realiza verificaciones previas, lectura de datos, armado y validación de la estructura de variables (cfg), selección de modo y síntesis inicial de  $\varphi(x)$ .

Completada la primera pasada, el script activa—cuando se ha habilitado—una re-síntesis isotónica *data-driven* de la ley de leva. El procedimiento filtra horas con sol y separa las ramas

mañana/tarde mediante el signo de  $dx/dt$ , ancla la referencia en torno al mediodía y estima, usando regresión isotónica (el algoritmo PAVA, *Pool-Adjacent Violators Algorithm*) y asignando a cada muestra un peso proporcional a la potencia realmente absorbida por el colector, dos curvas monótonas  $|\phi| - |x - x_0|$  para carga y descarga. Con ellas construye una  $\phi(x)$  firmada con histéresis ( $\pm$  según rama y banda  $\Delta x$ ), acota  $|\phi| \leq \psi_{m\acute{a}x}$  y evalúa la mejora mediante un RMSE angular sobre subconjuntos de interés (por ejemplo,  $\pm 35^\circ$  alrededor del mediodía y percentiles altos de DNI). Si el diagnóstico es favorable, adopta la nueva leva y ejecuta una segunda pasada anual idéntica a la primera, ahora con la cinemática refinada (ver figura 9).

**Figura 8**

Diagrama de flujo del bucle de simulación anual



*Nota.* En este diagrama se representa la lógica de la simulación para un año completo (8760 horas), mostrando las etapas principales desde la inicialización de variables hasta el procesamiento por hora y el almacenamiento de resultados.

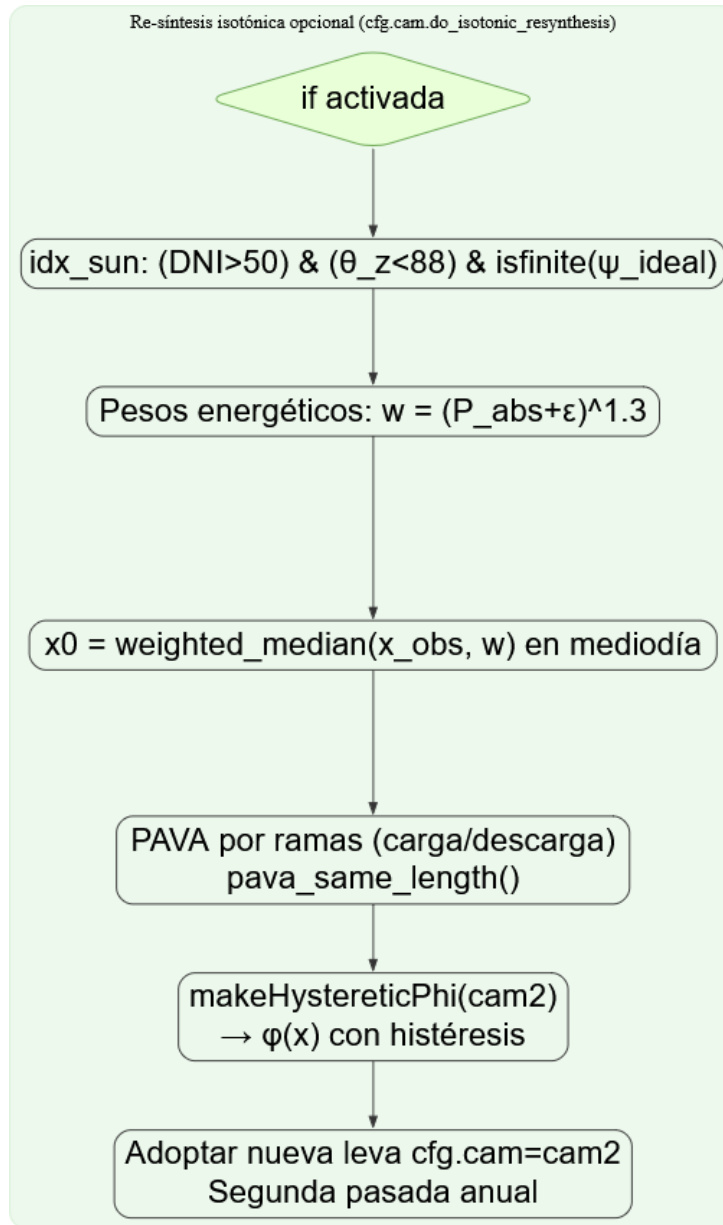
En un tercer movimiento, el código calibra el *stroke* máximo a partir del percentil  $p_{99.5}$  del desplazamiento observado  $x$  bajo sol útil, con un margen de seguridad ( $\approx 7 - 15\%$ ) para cubrir variabilidad interanual. Ese valor delimita  $x_{m\acute{a}x}$  en una reconstrucción final de *buildCamLaw.m*, tras la cual se corre una tercera pasada—opcional pero recomendada—para cerrar el lazo de diseño con la cinemática definitiva. Esta secuencia de tres pasadas es deliberadamente conservadora: la

primera fija una base físicamente consistente, la segunda adapta la cinemática a la realidad energética del sitio, y la tercera asegura que el dominio geométrico de la leva queda dimensionado por datos y no por supuestos (ver Figura 10).

El postproceso agrega y visualiza resultados en ventanas representativas, calcula métricas anuales y produce comparativas fotovoltaicas entre panel fijo, seguidor ideal y seguidor mecánico. Los parámetros fotovoltaicos empleados (*cfg.pv.P\_pico*, *cfg.pv.NOCT*, *cfg.pv.gamma*, *cfg.pv.Area*) se consignan igualmente en el Apéndice Q la replicación de las curvas y balances energéticos. Finalmente, exporta la trayectoria 3D de la leva en coordenadas cilíndricas (X,Y,Z) con resolución suficiente, escalada a milímetros y almacenada como *cam\_path.csv*, lista para su uso en CAD. Todo el flujo preserva la autocontenibilidad: un único punto de configuración (*cfg*), verificación sistemática de entradas, control explícito de unidades, y criterios numéricos.

**Figura 9**

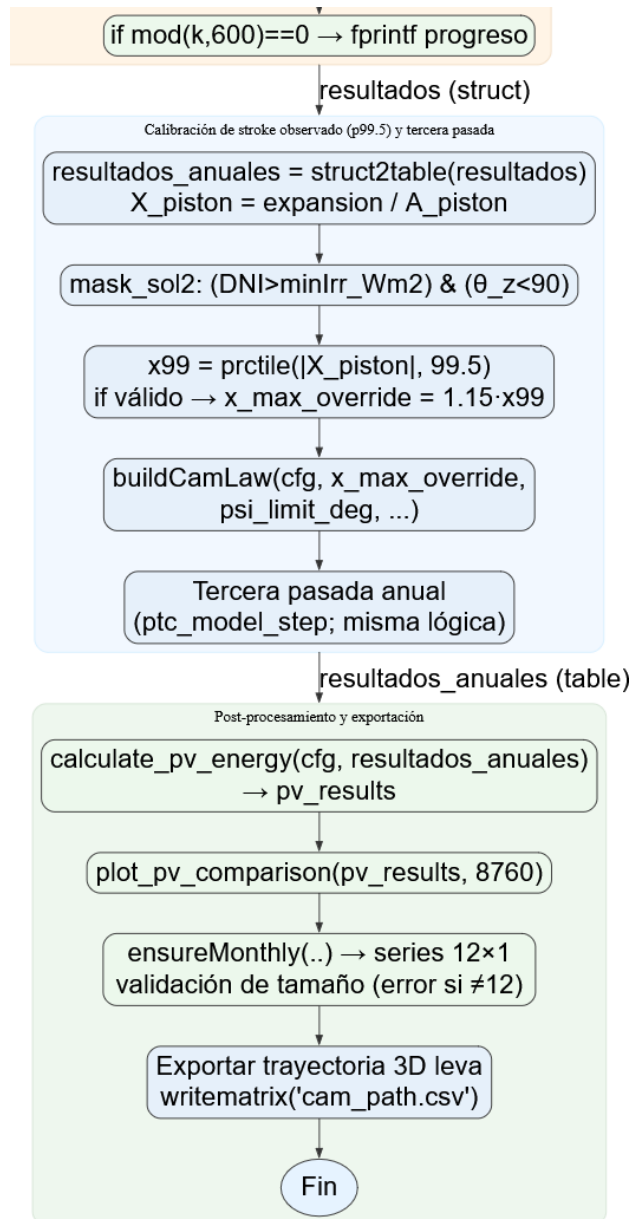
Diagrama de flujo del proceso de re-síntesis isotónica opcional



*Nota.* El diagrama detalla el algoritmo opcional para la re-síntesis isotónica, utilizado para generar una nueva leva de control (cam2). El proceso incluye la selección de datos bajo condiciones solares específicas, la ponderación energética, la aplicación del algoritmo PAVA (Pool Adjacent Violators Algorithm) y la introducción de histéresis.

**Figura 10**

Diagrama de flujo del proceso de calibración y tercera pasada anual



*Nota.* El diagrama muestra la fase final del modelado, donde se calibra el recorrido máximo del pistón usando el percentil 99.5 de los datos observados para definir una nueva ley de leva, seguida de una tercera simulación anual. Incluye además el post-procesamiento de resultados:

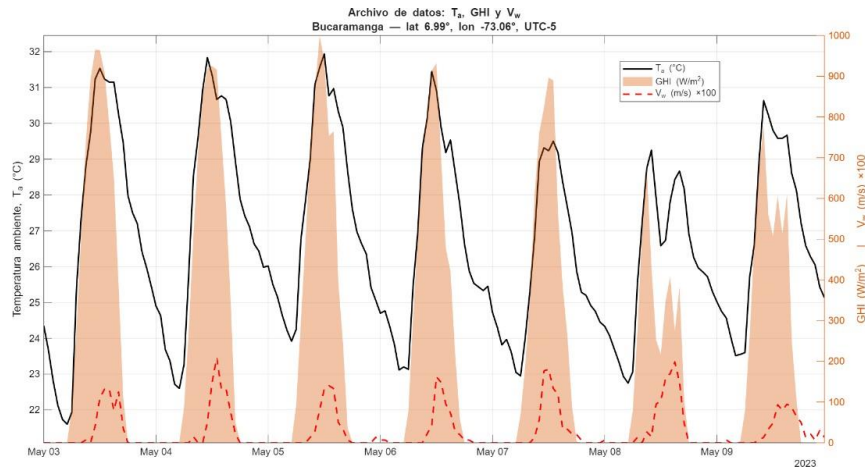
cálculo energético, generación de gráficos comparativos, validación de series temporales mensuales y exportación de la trayectoria 3D de la leva.

**4.2.1.1 Archivo de Datos Meteorológicos.** El punto de partida de la secuencia de cálculo es el archivo DATOS.xlsx, que reúne las series ambientales de Bucaramanga (lat 6.99°, lon -73.06°, UTC-5) empleadas como datos meteorológicos y condiciones de entrada del modelo. La adquisición se realizó con un piranómetro de clase secundaria según ISO 9060:2018. El sistema de registro, basado en *datalogger* industrial con sincronización GNSS, muestreó a 1 min y posteriormente agregó por promedios horarios para conformar un año civil de 8760 filas; esta resolución coincide con la que espera el lector de datos del script, mientras que el integrador térmico interno opera con  $\Delta t = 1800$  [s] por estabilidad numérica. El período de observación abarca todo 2023; en las figuras del capítulo se muestran semanas “representativas” —como la de mayo que acompaña este apartado— para discutir patrones sin perder continuidad anual.

La Figura 11 — una semana de mayo— ilustra el comportamiento diurno típico en clima tropical andino: pulsos de  $GHI$  con máximos cercanos a 900–950  $Wm^{-2}$ , picos de  $T_a$  en el rango 30–32 °C y valles 21–22 °C, junto con incrementos de  $V_w$  hacia el mediodía y primeras horas de la tarde.

**Figura 11**

Variación de Variables Meteorológicas en Bucaramanga Durante mayo de 2023



*Nota.* La Figura 11 muestra el comportamiento de la temperatura ambiente ( $T_a$  en  $^{\circ}\text{C}$ , línea continua negra), la irradiación horizontal global ( $GHI$  en  $\text{W}/\text{m}^2$ , área sombreada naranja) y la velocidad del viento ( $V_w$  en  $\text{m}/\text{s}$ , línea discontinua roja) para la ciudad de Bucaramanga, Colombia. Los datos corresponden al periodo del 3 al 9 de mayo de 2023. La temperatura se lee en el eje vertical izquierdo, mientras que la  $GHI$  y la velocidad del viento utilizan los ejes de la derecha. Para facilitar la visualización, los valores de la velocidad del viento se presentan multiplicados por un factor de 100. A partir de un archivo de datos meteorológicos locales.

#### 4.2.2 Nivel 2 — Motores de Cálculo por Paso de Tiempo

El segundo nivel del modelo implementa dos motores horarios complementarios. El archivo *ptc\_model\_step.m* (ver Apéndice C) resuelve el acoplamiento termo-óptico durante horas con irradiación útil; su contraparte *ptc\_cooling\_step.m* (ver Apéndice D) modela los periodos nocturnos o por debajo del umbral de irradiación definido en *cfg.opt.minIrradiance\_Wm2*. Ambos motores reciben como únicas entradas el estado previo y la configuración *cfg* validada en el nivel superior, y devuelven un conjunto coherente de variables: geometría solar, fracciones radiativas, potencia absorbida, coeficientes de transferencia de calor, balance energético, estado térmico del

PCM o del fluido de transferencia, y variables mecánicas asociadas al ángulo de apuntamiento. La

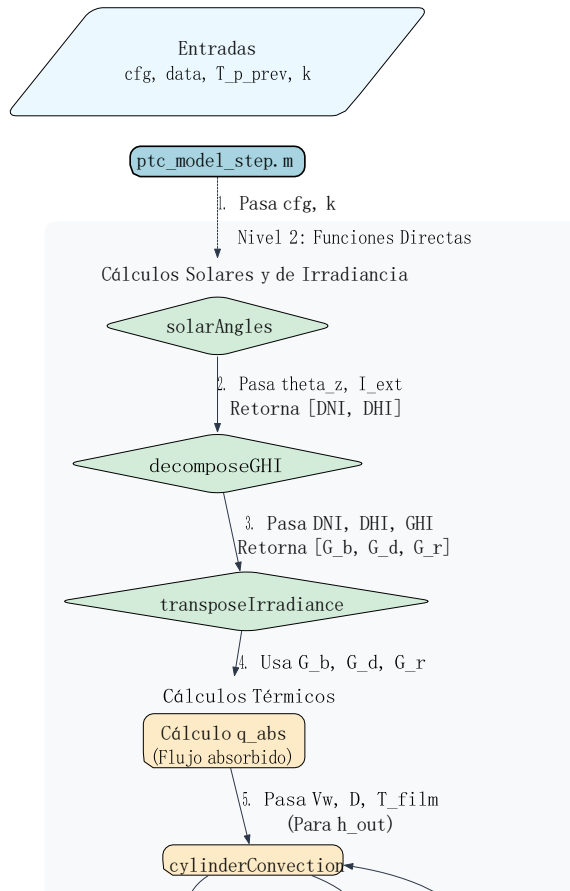
En cada hora  $k$ , *ptc\_model\_step.m* convierte la hora civil en posición solar mediante *solarAngles* (Apéndice F), usando latitud, longitud, huso horario, inclinación  $\beta$  y azimut de montaje. Se obtienen el ángulo cenital  $\theta_z$ , el ángulo de incidencia  $\theta$  sobre el plano del CPC, la irradiancia extraterrestre  $I_{\text{ext}}$  y el ángulo horario  $\omega$ ; si el sol está bajo el horizonte, el módulo fuerza  $\theta = \theta_z = 90^\circ$  y  $I_{\text{ext}} = 0$  para evitar falsos aportes. A continuación, *decomposeGHI* separa la irradiancia global horizontal (GHI) en componentes directa (DNI) y difusa (DHI); luego *transposeIrradiance* proyecta dichas componentes al plano inclinado del colector, incorporando albedo local. Con esas magnitudes se calcula la potencia absorbida  $P_{\text{abs}}$  aplicando la eficiencia óptica instantánea, que combina reflectancia, transmitancia, absortancia, factor geométrico y limpieza, junto con la corrección por ángulo de incidencia definida en *cfg.opt.IAMfun*. Si  $P_{\text{abs}}$  supera el umbral operativo, el bloque térmico resuelve el equilibrio en la pared del absorbedor iterando la temperatura de pared hasta cumplir la tolerancia numérica (*cfg.num.iterTol*, *cfg.num.maxIter*). En modo *static\_wax*, el coeficiente interno  $h_{\text{in}}$  se obtiene por convección natural interna en el PCM, limitada por número de Rayleigh, mientras que el coeficiente externo  $h_{\text{out}}$  proviene de *cylinderConvection* ajustada con la velocidad del viento y una temperatura de cielo efectiva dada por una correlación empírica  $T_{\text{sky}}$  ( $T_a$ ). La figura 12 muestra el diagrama de flujo de *ptc\_model\_step.m* (parte 1), donde se observa esta secuencia causal: cálculo de ángulos solares, descomposición de la irradiancia global en directa y difusa, proyección al plano del colector e inicio del balance térmico en la pared absorbente.

En cada hora  $k$ , *ptc\_model\_step.m* convierte la hora civil en posición solar mediante *solarAngles* (Apéndice F), usando latitud, longitud, huso horario, inclinación  $\beta$  y azimut de montaje. Se obtienen el ángulo cenital  $\theta_z$ , el ángulo de incidencia  $\theta$  sobre el plano del CPC, la

irradiancia extraterrestre  $I_{\text{ext}}$  y el ángulo horario  $\omega$ ; si el sol está bajo el horizonte, el módulo fuerza  $\theta = \theta_z = 90^\circ$  y  $I_{\text{ext}} = 0$  para evitar falsos aportes. A continuación, *decomposeGHI* separa la irradiancia global horizontal (GHI) en componentes directa (DNI) y difusa (DHI); luego *transposeIrradiance* proyecta dichas componentes al plano inclinado del colector, incorporando albedo local. Con esas magnitudes se calcula la potencia absorbida  $P_{\text{abs}}$  aplicando la eficiencia óptica instantánea, que combina reflectancia, transmitancia, absortancia, factor geométrico y limpieza, junto con la corrección por ángulo de incidencia definida en *cfg.opt.IAMfun*. Si  $P_{\text{abs}}$  supera el umbral operativo, el bloque térmico resuelve el equilibrio en la pared del absorbedor iterando la temperatura de pared hasta cumplir la tolerancia numérica (*cfg.num.iterTol*, *cfg.num.maxIter*). En modo *static\_wax*, el coeficiente interno  $h_{\text{in}}$  se obtiene por convección natural interna en el PCM, limitada por número de Rayleigh, mientras que el coeficiente externo  $h_{\text{out}}$  proviene de *cylinderConvection* ajustada con la velocidad del viento y una temperatura de cielo efectiva dada por una correlación empírica  $T_{\text{sky}}(T_a)$ . La Figura 13 (continuación del diagrama de flujo de *ptc\_model\_step.m*, parte 2) resume esta ruta: cálculo de pérdidas térmicas, flujo neto en la pared y avance hacia el modelo del PCM.

**Figura 12**

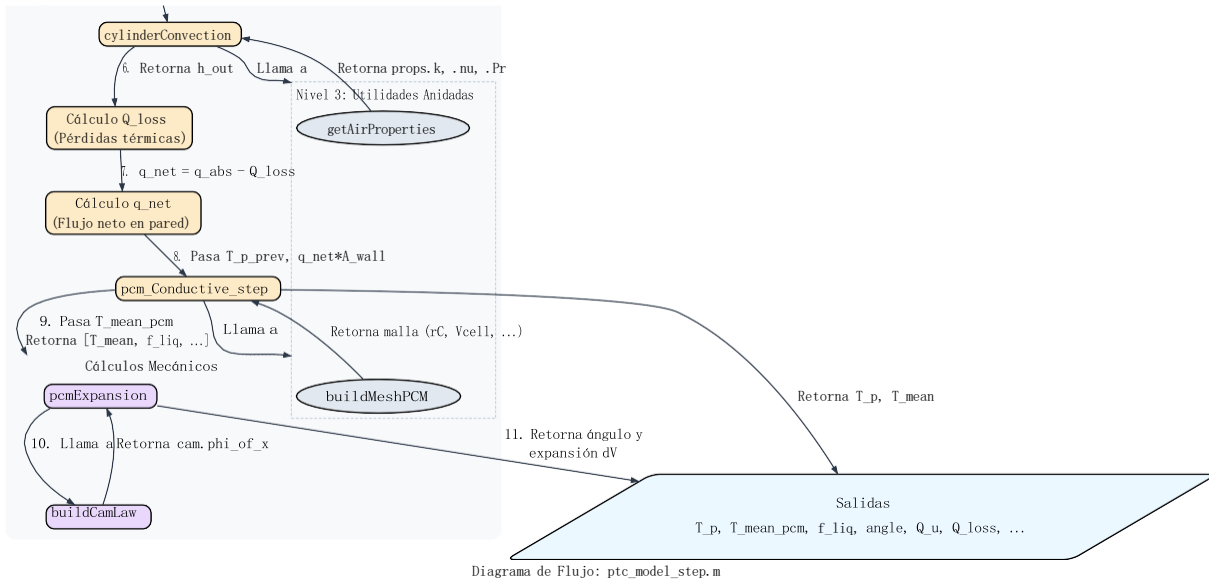
Diagrama de flujo de motor de cálculo térmico (Parte 1 de 2)



*Nota.* Esta figura desglosa la primera sección de la función principal ptc\_model\_step. Se detallan los cálculos solares y de irradiancia (Nivel 2) que procesan los ángulos solares y las componentes de la radiación, así como el inicio de los cálculos térmicos con la estimación del flujo absorbido..

**Figura 13**

Diagrama de flujo de motor de cálculo térmico (Parte 2 de 2)



*Nota.* Esta figura continúa el desglose de la función `ptc_model_step`. Se muestran los cálculos de pérdidas térmicas, el flujo neto en la pared, la simulación del material de cambio de fase (PCM), y los cálculos mecánicos para la expansión y la ley de leva. Finalmente, se consolidan las variables de salida del paso de simulación.

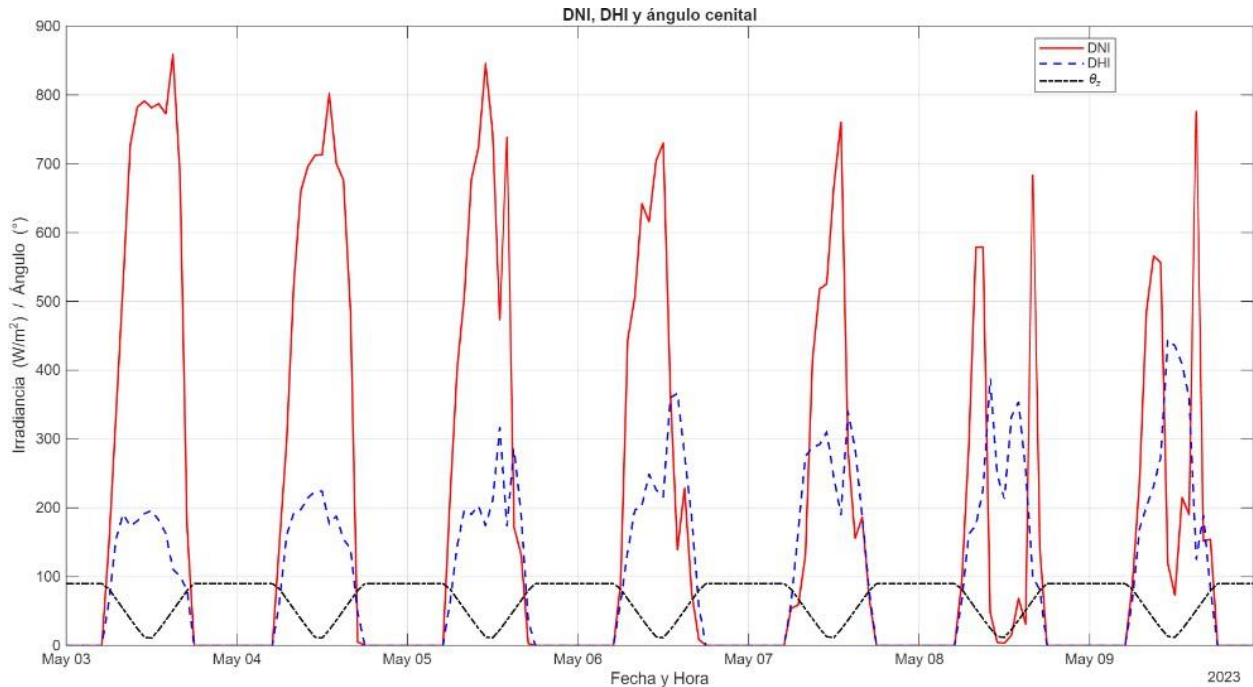
El flujo neto en la pared alimenta `pcm_Conductive_step`, que integra el estado transitorio del PCM RT50 y devuelve temperatura media, fracción líquida, energía transferida y verificación de conservación. Ese estado define la expansión volumétrica  $\Delta V(T)$ ; `pcmExpansion` convierte  $\Delta V$  en carrera lineal  $x = \Delta V/A_p$  del pistón, y `buildCamLaw` (ley de leva) traduce esa carrera en un ángulo mecánico  $\theta_{mech}$  con histéresis y banda muerta alrededor del mediodía para evitar inversión espuria de sentido. Estas salidas —temperaturas, fracción líquida, potencia útil, pérdidas y ángulo de apuntamiento— constituyen el paquete horario registrado por el nivel superior. Cuando la irradiancia cae por debajo del umbral, el control llama `ptc_cooling_step.m`. Ese motor nocturno calcula la descarga térmica del receptor con la misma geometría, estima  $h_{in}$  por convección natural

interna y  $h_{out}$  mediante *cylinderConvection* más radiación hacia el cielo (modelo extendido tipo Swinbank/Berdahl), y limita el flujo de enfriamiento a un máximo seguro  $q_{máx}$ . El ángulo mecánico se mantiene por memoria, lo que evita saltos cinemáticos durante la noche. La parte final de la figura 13 ilustra esta fase de disipación y actualización del estado para el siguiente paso horario.

**4.2.2.1 Geometría Solar y Descomposición Radiativa.** La cadena solar–radiativa es un subsistema determinista que genera entradas fundamentales para ambos motores. La función *solarAngles.m* calcula, a partir del día juliano y la hora local coherente con  $\lambda$  y  $\lambda_{STD}$ , la declinación, el ángulo horario y  $\theta_z$ ; con la inclinación  $\beta$  y el azimut del campo se obtiene el ángulo de incidencia  $\theta$  sobre el plano del colector y la consigna de giro  $\psi_{ideal}$  para el eje N–S. La consigna respeta la convención de signo del mecanismo y se acota posteriormente por *cfg.cam.psi\_limit\_deg*, lo que impone una protección al componente geométrico sobre la cinemática. La descomposición  $GHI \rightarrow (DNI, DHI)$  se basa en la consistencia con  $I_{ext}$  y con  $\cos\theta_z$  (ver Figura 14); con estos parámetros se realiza la transposición al plano inclinado, y el *IAM* se evalúa explícitamente en grados, conforme a la calibración empírica declarada en *cfg.opt.IAMfun*. Este módulo de simulación produce series horarias  $\{\theta(t), \theta_z(t), \psi_{ideal}(t), DNI(t), DHI(t)\}$  que, además de alimentar  $P_{abs}$ , resultan imprescindibles para los diagnósticos de *tracking* y la re–síntesis isotónica de la leva que se ejecuta en el Nivel 1.

**Figura 14**

Irradiancias Solar Directa Normal y Difusa Horizontal, y Ángulo Cenital en Mayo de 2023



*Nota.* La figura 14 representa la evolución diaria de tres variables solares clave: la Irradiancia Directa Normal (*DNI* en W/m<sup>2</sup>, línea continua roja), la Irradiancia Difusa Horizontal (*DHI* en W/m<sup>2</sup>, línea discontinua azul) y el ángulo cenital ( $\theta_z$  en grados, línea discontinua negra). Todos los valores se muestran en función de la fecha y hora, cubriendo el periodo del 3 al 9 de mayo de 2023. El eje vertical izquierdo indica los valores de irradiancia y ángulo en sus respectivas unidades. A partir de datos de radiación solar.

*solarAngles.m* calcula la cinemática solar esencial — $\theta$ ,  $\theta_z$ ,  $I_{ext}$  y  $\omega$ — y, para HSAT N–S, el giro ideal  $\psi_{ideal}$  (más  $\alpha$  y  $\gamma$  opcionales).

*DecomposeGHI.m* separa *GHI* en *DNI/DHI* con un esquema tipo Erbs/Pérez basado en  $k_t$ , incorpora banderas de calidad, trata noche/crepúsculo y limita resultados a rangos físicos.

*transposeIrradiance.m* proyecta la radiación al plano inclinado con el modelo anisotrópico de Pérez ( $F_1/F_0$ ), calculando masa de aire,  $\varepsilon$  y  $\delta$ , e integrando las componentes directa, difusa y reflejada con salvaguardas. En conjunto, estas rutinas entregan una forzante radiativa coherente y estable para estimar potencia absorbida y mando de seguimiento.

#### 4.2.3 Nivel 3 — Solver Numérico Central y Sub-Modelos Físicos

El núcleo térmico del modelo es la función *pcm\_Conductive\_step.m* (Apéndice D), que resuelve la conducción radial transitoria en el material de cambio de fase (PCM) dentro del tubo absorbedor mediante un esquema implícito totalmente acoplado. El dominio cilíndrico del PCM se discretiza en *N* anillos concéntricos desde el eje  $r = 0$  hasta la pared interna del tubo  $r = R = D_i/2$ . Esta malla radial se genera con *buildMeshPCM.m* (Apéndice J), que define nodos, caras, volúmenes de celda y distancias centro-centro, y que además garantiza que la suma de volúmenes discretos reproduce el volumen geométrico real. La Figura 17 (“Diagrama de Flujo del Solver Térmico: *pcm\_Conductive\_step.m*”) muestra este proceso inicial: el solver recibe como entradas la configuración física *cfg*, el estado térmico previo  $T_{p,prev}$ , el flujo de calor neto aplicado en la pared  $q''_{net,w}$  y el paso temporal  $\Delta t$ ; a continuación, verifica si la malla está en caché o, de lo contrario, invoca *buildMeshPCM* para generarla. Una vez fijada la malla, *pcm\_Conductive\_step.m* inicializa las matrices del sistema lineal (A y b) y recorre cada celda radial para calcular las propiedades termo-físicas locales dependientes de la temperatura —conductividad efectiva  $k(T)$  y capacidad calorífica aparente  $C_{app}(T)$ —. Esta  $C_{app}$  incorpora tanto el calor sensible  $(1 - \gamma) \rho c_{p,s} + \gamma \rho c_{p,l}$  como el calor latente  $\rho L d\gamma/dT$ , donde  $\gamma$  es la fracción líquida dentro de una banda de fusión  $[T_{m,low}, T_{m,high}]$  que actúa como zona mushy para suavizar la transición sólido-líquido y evitar discontinuidades numéricas. Con estas propiedades, el solver construye los coeficientes de diferencias finitas (aW, aE, aP) y ensambla progresivamente la matriz global A y el vector fuente

b, imponiendo simetría de flujo en el eje ( $\partial T / \partial r = 0$  en  $r = 0$ ) y un flujo de calor impuesto en la pared externa  $q''_{\text{het,wall}}$  coherente con el balance termo-óptico calculado en el nivel superior. El esquema temporal es totalmente implícito y se linealiza mediante iteraciones tipo Picard: en cada iteración se resuelve el sistema lineal  $A T_{\text{new}} = b$ , se actualiza  $\gamma$  en función de  $T_{\text{new}}$ , y se repite hasta cumplir la tolerancia de convergencia definida (norma infinita  $< 10^{-4}$ ) o hasta alcanzar el máximo de iteraciones permitido. La Figura 17 ilustra estas etapas (malla, ensamblaje, condiciones de frontera y resolución implícita) como una secuencia reproducible, lo que documenta la trazabilidad numérica del solver.

Tras la convergencia, *pcm\_Conductive\_step.m* devuelve magnitudes agregadas que se consumen directamente en el nivel superior del modelo: la distribución radial de temperatura  $T_p(r)$ ; la temperatura media volumétrica  $T_{\text{mean}}$ ; la fracción líquida media  $f_{\text{liq}}$ ; y el flujo útil asociado al intercambio térmico en la pared,  $Q_u = q''_{\text{het,wall}} A_{\text{wall}}$ . Adicionalmente, el solver calcula un indicador de cierre energético que compara, para el intervalo  $\Delta t$ , la energía que entra o sale a través de la pared ( $Q_u \Delta t$ ) con la variación de energía interna estimada mediante  $\sum C_{\text{app}} \Delta T V_{\text{cell}}$ . Este balance actúa como diagnóstico temprano: valores altos indican parámetros numéricos demasiado agresivos (por ejemplo,  $\Delta t$  excesiva) o configuraciones físicamente no consistentes. La misma Figura 15 muestra estas salidas en el bloque final (“Salidas:  $T_p$ ,  $T_{\text{mean}}$ ,  $f_{\text{liq}}$ ”), cerrando el ciclo del solver térmico antes de pasar el nuevo estado térmico del PCM al módulo mecánico (expansión volumétrica, pistón y leva) y al lazo de control del ángulo del seguidor pasivo.

**Figura 15**

Diagrama de flujo del solver térmico pcm\_Conductive\_step

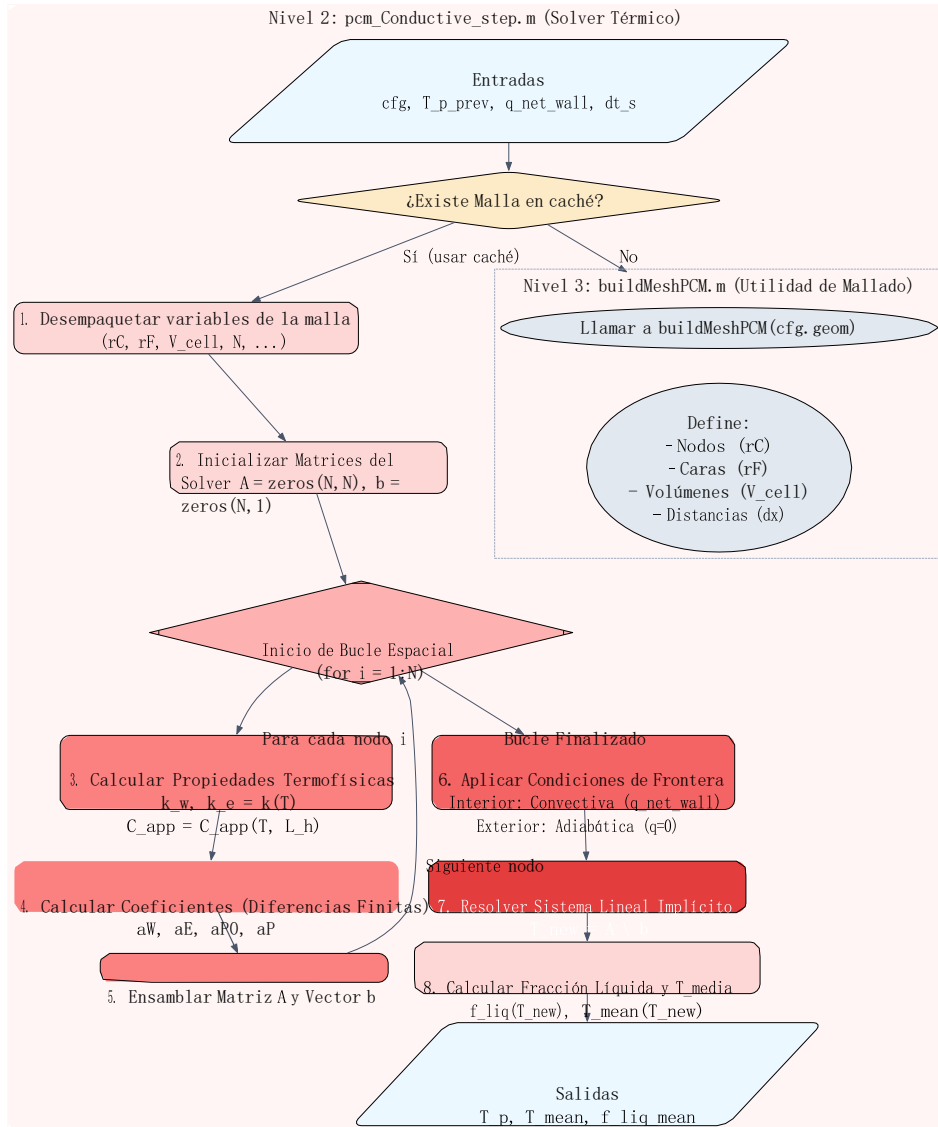


Diagrama de Flujo del Solver Térmico: pcm\_Conductive\_step.m

*Nota.* Este diagrama ilustra el proceso del solver térmico para el material de cambio de fase (PCM). La lógica incluye la verificación de una malla preexistente, la inicialización de matrices y un bucle espacial que ensambla y resuelve un sistema lineal implícito  $(A \setminus b)$  mediante un método de diferencias finitas para determinar el nuevo perfil de temperaturas y la fracción líquida.

La conversión termo-mecánica se realiza en *pcmExpansion.m*, que transforma  $T$  y el estado de fase en una expansión volumétrica  $\Delta V$ . El modelo combina dilatación térmica de cada fase,  $\beta_s$  y  $\beta_l$ , referidas a  $T_{ref}$ , con el salto volumétrico asociado al cambio de densidad entre sólido y líquido ( $\rho_s \rightarrow \rho_l$ ). El resultado se aplica sobre el volumen geométrico del PCM  $V_0$  y se propaga como desplazamiento lineal del pistón  $x = \Delta V/A_p$  que a su vez alimenta la ley de leva  $\phi(x)$  para generar el ángulo mecánico firmado cuando hay histéresis.

Desde el punto de vista metodológico, este nivel separa con nitidez tres responsabilidades: la evolución interna del PCM resuelta de forma estable y energéticamente consistente, el cierre aero-radiativo en el exterior con correlaciones bien establecidas, y la proyección volumétrica hacia el subsistema mecánico. La combinación permite que el bloque de segundo nivel (*ptc\_model\_step.m*) opere con forzantes radiativas ya depuradas y con coeficientes de transferencia física coherentes, manteniendo la autocontenibilidad del capítulo y la trazabilidad entre parámetros de *cfg* y resultados.

En términos de extensibilidad, el solver admite sin cambios refinamientos de malla radial —por ejemplo, concentración de celdas cerca de la pared para resolver capas térmicas delgadas— y estrategias de control adaptativo del paso  $\Delta t$  basadas en el indicador de error energético. También es directo incorporar validaciones tipo “caso patrón” frente al problema de Stefan unidimensional para verificar tasas de frente de fusión, así como un banco de pruebas que barra  $(N, \Delta t)$  para documentar orden de convergencia y costos computacionales.

#### 4.2.4 Nivel 4 — Módulos de Diseño y Síntesis

El módulo *buildCamLaw.m* formaliza la relación cinemática entre el stroke del pistón y el giro del eje,  $\phi(x)$ , como una ley monótona y suavizada que garantiza invertibilidad numérica y cumplimiento del límite angular  $|\psi| \leq \psi_{limit}$ . La síntesis parte de un muestreo anual de las

condiciones solares y pondera cada hora por una métrica energética proporcional a  $\sin(\alpha)^p$ , donde  $\alpha$  es la altura solar y  $p$  es un exponente configurable que concentra peso en horas de mayor aportación útil. Para evitar un sesgo sistemático hacia los extremos del día, se incorpora una deformación de la función de distribución acumulada alrededor del mediodía, controlada por un parámetro de forma que redistribuye la densidad de nodos sin perder monotonía. La implementación admite anuladores explícitos —por ejemplo  $x_{m\acute{a}x\_override}$  para fijar el stroke de diseño a partir de percentiles observados y  $\psi_{limit\_deg}$  para imponer un tope geométrico— y produce tablas de consulta directas  $\{lift_u, \phi_u\}$  junto con los interpoladores  $\phi(x)$  y  $x(\phi)$  en régimen continuo (pchip). Estas salidas son coherentes con la re-síntesis isotónica del Nivel 2: cuando el capítulo activa la versión firmada con histéresis, la base monótona de *buildCamLaw* se utiliza como envolvente física y dominio seguro.

La geometría óptica se genera con *cpc\_involute\_gap.m* (ver Apéndice J), que construye el perfil de CPC a partir de la aceptación  $\theta_A$ , el diámetro de la cubierta y la resolución de muestreo. La rutina devuelve las ramas izquierda y derecha del contorno en coordenadas (x, y) y, crucialmente, la apertura efectiva  $W_a$  derivada de la envolvente con separación geométrica explícita para el alojamiento del vidrio. Esta salida alimenta el área de apertura  $A_p = W_a L$  que usa el motor termo-óptico para la potencia absorbida. Además de un chequeo de no-autointersección y continuidad de tangentes en la zona de unión con el receptor, el módulo emite metadatos de control (ángulos de borde, longitud de arco) que permiten trazar el perfil y auditar su consistencia. Cuando se requiere integración con CAD, *plot\_cpc.m* (ver Apéndice M) y *export\_cpc\_csv.m* (ver Apéndice N) facilitan la inspección visual y la exportación de coordenadas con resolución ajustable, manteniendo la sincronía con los parámetros de *cfg* utilizados en la simulación.

#### 4.2.5 Nivel 5 — *Post-Proceso y Análisis*

El bloque fotovoltaico se articula en *calculate\_pv\_energy.m* (ver Apéndice L) y sus utilidades de visualización. A partir de las series radiativas y del ángulo de seguimiento —ideal y mecánico— se evalúa la irradiancia efectiva sobre el plano del módulo y, con los parámetros de catálogo ( $P_{pico}$ ,  $NOCT$ ,  $\gamma_T$ ,  $A$ ), se estima la potencia instantánea según un modelo estándar de temperatura de célula  $T_{cell} \approx T_a + (NOCT - 20)/800G$  y corrección lineal por temperatura  $P = P_{pico} (G/1000) [1 + \gamma_T(T_{cell} - 25)]$ . Se obtienen así tres escenarios internamente comparables: panel fijo, seguidor ideal con consumo propio y seguidor mecánico pasivo; el posproceso integra hora a hora para producir energías netas diarias, mensuales y anuales. La función *plot\_pv\_comparison.m* acompaña el análisis con gráficos de día representativo, barras mensuales y tablas resumen, incorporando validaciones de tamaño y agregación robusta (el auxiliar `ensureMonthly` garantiza vectores de 12 meses aun cuando la entrada esté en resolución diaria u horaria). De esta manera, la metodología no solo cuantifica el rendimiento del subsistema FV bajo cada esquema de seguimiento, sino que proporciona una lectura inmediata de la ganancia neta del mecanismo propuesto frente a una referencia inmóvil y frente al límite ideal.

El apoyo gráfico para la parte óptico-geométrica se completa con *plot\_cpc.m*, que visualiza el contorno sintetizado del CPC, la apertura  $W_a$  y los puntos característicos. Esta figura sirve como comprobación independiente de la coherencia entre la geometría de diseño y la que efectivamente emplea el solver durante la transposición y el cálculo de potencia absorbida.

#### 4.2.6 Nivel 6 — *Utilidades y Soporte*

La robustez del sistema descansa en un conjunto de utilidades de validación y datos físicos. *validateConfiguration.m* (Apéndice O) revisa la estructura `cfg` antes de cualquier corrida, verificando dominios físicos, presencia de campos obligatorios, unidades y coherencia geométrica

entre parámetros dependientes; de encontrar incongruencias, aborta con mensajes orientados a corrección, lo que evita fallos silenciosos y asegura reproducibilidad. La función *buildMeshPCM.m* implementa la construcción de la malla radial para el solver, retorna centros y caras, áreas en la interfaz y volúmenes de celda con verificación de conservación volumétrica frente al cilindro teórico, y establece así la base geométrica de la integración en el Nivel 3. Para la convección externa, *getAirProperties.m* proporciona propiedades de película del aire —viscosidad cinemática, número de Prandtl y conductividad— evaluadas a la temperatura media adecuada, permitiendo que *cylinderConvection.m* aplique con consistencia las correlaciones de transferencia de calor. Finalmente, *export\_cpc\_csv.m* ofrece un canal de salida simple y trazable para llevar la geometría del concentrador a herramientas externas, de forma análoga a la exportación de la leva *cam\_path.csv* descrita en el Nivel 1.

En conjunto, estos niveles cierran el ciclo metodología-implementación-verificación: la síntesis geométrica y cinemática se deriva de hipótesis transparentes y datos del sitio, el posproceso traduce resultados en métricas operativas comparables, y las utilidades salvaguardan la consistencia del experimento numérico. El lector puede así replicar, auditar y extender el sistema modificando únicamente los parámetros de *cfg* y regenerando, cuando sea oportuno, la leva y la geometría del CPC sin tocar el núcleo del solver.

#### **4.3 Seguimiento Estacional (Eje de Elevación): Compensación de la Declinación**

Se realiza el análisis de la orientación biaxial: el eje Este–Oeste (diario) y el eje Norte–Sur (estacional). En línea con el marco ya establecido, la meta operativa es mantener  $\theta \approx 0^\circ$  no solo a lo largo del día (giro horario,  $\omega$ ), sino también a lo largo del año (variación estacional,  $\delta$ ). Para maximizar la irradiancia directa sobre el plano del módulo se ajusta manualmente la inclinación

del panel ( $\beta$ ) de forma que, alrededor del mediodía, el ángulo de incidencia tienda a cero. Una regla de diseño práctica y trazable es:

$$\bar{\beta}^*(n) = \varphi - \delta(n) \quad (10)$$

donde  $\varphi$  es la latitud del sitio y  $n$  el día. La declinación diaria se obtiene con la ecuación de Cooper:

$$\delta(n) = 23.45^\circ \sin\left(\frac{360^\circ}{365}(284 + n)\right) \quad (11)$$

En Bucaramanga ( $\varphi \approx 7^\circ$  N) esta relación impone pequeños ajustes positivos (hacia el sur) en meses con  $\delta < 0$  y ajustes negativos (ligera inclinación al norte) cuando  $\delta > 0$ .

#### 4.3.1 Programación Mensual de $\beta$

Para operación simple y repetible se recomienda programar un ajuste mensual con el valor  $\bar{\beta}^*$  calculado en el día medio del mes. Los valores de referencia útil (redondeada a 1–2°) son: **Ene**  $\approx +28^\circ$ , **Feb**  $\approx +20^\circ$ , **Mar**  $\approx +9^\circ$ , **Abr**  $\approx -2^\circ$ , **May**  $\approx -12^\circ$ , **Jun**  $\approx -16^\circ$ , **Jul**  $\approx -14^\circ$ , **Ago**  $\approx -7^\circ$ , **Sep**  $\approx +5^\circ$ , **Oct**  $\approx +16^\circ$ , **Nov**  $\approx +26^\circ$ , **Dic**  $\approx +30^\circ$ .

Convención:  $\beta > 0$  = inclinación hacia el sur;  $\beta < 0$  = inclinación hacia el norte.

#### 4.3.2 Implementación Mecánica y Operación

El eje estacional se resuelve con un mecanismo rotatorio indexado, bisagra sectorial con corona de agujeros a paso de 2–5° y pasador de seguridad; o brida graduada con tornillo prisionero.

Procedimiento operativo:

1. Consultar tabla mensual  $\bar{\beta}^*$ .
2. **Desacoplar** el pasador y **girar** el bastidor hasta el ángulo marcado más próximo (tolerancia  $\pm 2-3^\circ$ ).
3. **Asegurar** el pasador/abrazadera y verificar rigidez.
4. Registrar fecha y  $\beta$  aplicado en la hoja de ruta de O&M.

Criterios de aceptación: error angular  $|\beta - \beta^*| \leq 3^\circ$ , ausencia de juego perceptible y repetibilidad del índice mecánico. Esta solución mantiene al mínimo la complejidad (sin actuadores) y garantiza trazabilidad metrológica del ajuste estacional.

#### **4.3.3 Impacto energético esperado**

En latitudes bajas ( $\approx 0-10^\circ$  N/S) el beneficio anual de pasar de fijo a ajuste mensual es moderado pero significativo, teniendo en cuenta el clima tropical de Bucaramanga se muestran incrementos de captación del orden de **3–6 %** frente a una configuración anual única, con reportes específicos cercanos a **4.5 %** para latitudes  $\sim 4-5^\circ$  N cuando se aplica una agenda de inclinaciones mensuales. En localidades como Bucaramanga se alcanza una ganancia mayor durante meses de declinación extrema (junio–julio y diciembre–enero) y marginal en torno a los equinoccios.

Con esta sección, el objetivo biaxial del sistema se resuelve por completo: el seguimiento diario se resuelve pasivamente por el actuador térmico, mientras que el seguimiento estacional se ejecuta manualmente mediante el ajuste indexado de  $\beta$  conforme al calendario  $\varphi - \delta$ , con un impacto energético cuantificable y operacionalmente simple.

#### **4.4 Modelo CAD 3D del Seguidor Pasivo: Verificación Estructural**

El conjunto mecánico del seguidor pasivo se modeló en SolidWorks como un ensamblaje paramétrico a escala real. El modelo incluyó el colector CPC con su cubierta de vidrio, el bastidor del plano fotovoltaico (FV), el eje HSAT norte–sur, la columna anclada al suelo y el actuador térmico que genera la rotación. Para su evaluación se organizaron tres subconjuntos: SSP\_1 (anclaje y columna), SSP\_2 (eje HSAT, bastidor FV y yugo de interfaz) y SSP\_3 (CPC, carcasa de leva y actuador termo–mecánico con seguidores SKF KR16-PP). Sobre este ensamblaje se corrió un estudio estático lineal en SolidWorks Simulation con el fin de validar resistencia, rigidez y estabilidad funcional bajo cargas de servicio.

#### 4.4.1 Cargas de Diseño y Combinación de Acciones

Las cargas se definieron según la acción de viento de la NSR-10 para la zona de instalación. Con  $V = 28$  m/s,  $\rho_{air} = 1,225$  kg/m<sup>3</sup> y  $C_p = 1,2$  kJ/(kg °K), la presión equivalente fue  $p \approx 5,76 \times 10^2$  N/m<sup>2</sup>, aplicada como presión uniforme sobre un área proyectada de  $\approx 5,76$  m<sup>2</sup>, lo que genera una fuerza global de  $\approx 3,32$  kN. Se evaluaron empujes, succiones y componente rasante, más una ráfaga con +25 %. El caso crítico correspondió a la orientación de giro máximo  $|\psi|$ , con la cara desfavorable al viento. Estas acciones se combinaron con el peso propio del bastidor, eje, columna, CPC y actuador para obtener la condición de servicio de validación.

#### 4.4.2 Condiciones de Borde y Modelación Estructural

Las placas base de la columna (SSP\_1) se modelaron como empotramientos, replicando la cimentación prevista. El eje HSAT (SSP\_2) se apoyó en chumaceras idealizadas como apoyos cilíndricos, permitiendo rotación salvo en verificaciones específicas de par. Los topes angulares  $\pm\psi_{máx}$  se representaron como apoyos elásticos activos sólo en el límite. El subconjunto SSP\_3 (leva, seguidor, actuador) se incluyó para capturar la transmisión de carga al bastidor y para verificar que la presión de contacto en el rodillo SKF KR16-PP se mantuviera por debajo de fatiga y sin enclavamientos. Los materiales asignados fueron: acero estructural en columna y bastidor, acero al carbono en la carcasa de leva y aluminio Alzak en el CPC.

#### Criterios de aceptación

Se adoptaron cuatro umbrales de desempeño:

1. Las tensiones de von Mises debían estar por debajo del 60 % del límite elástico en servicio (80 % en último).
2. La flecha máxima del plano FV debía ser menor o igual a  $L/200$ .

3. El factor de seguridad (FOS) debía ser  $\geq 1,5$  en servicio y  $\geq 2,0$  en los elementos primarios (columna y eje HSAT).
4. En la leva-seguidor se exigió presión de contacto admisible, histéresis mecánica  $\Delta x$  controlada y contacto continuo rodillo-surco.

Estos criterios definen la aptitud estructural y funcional para fabricación.

#### **4.4.3 Mallado y Control Numérico**

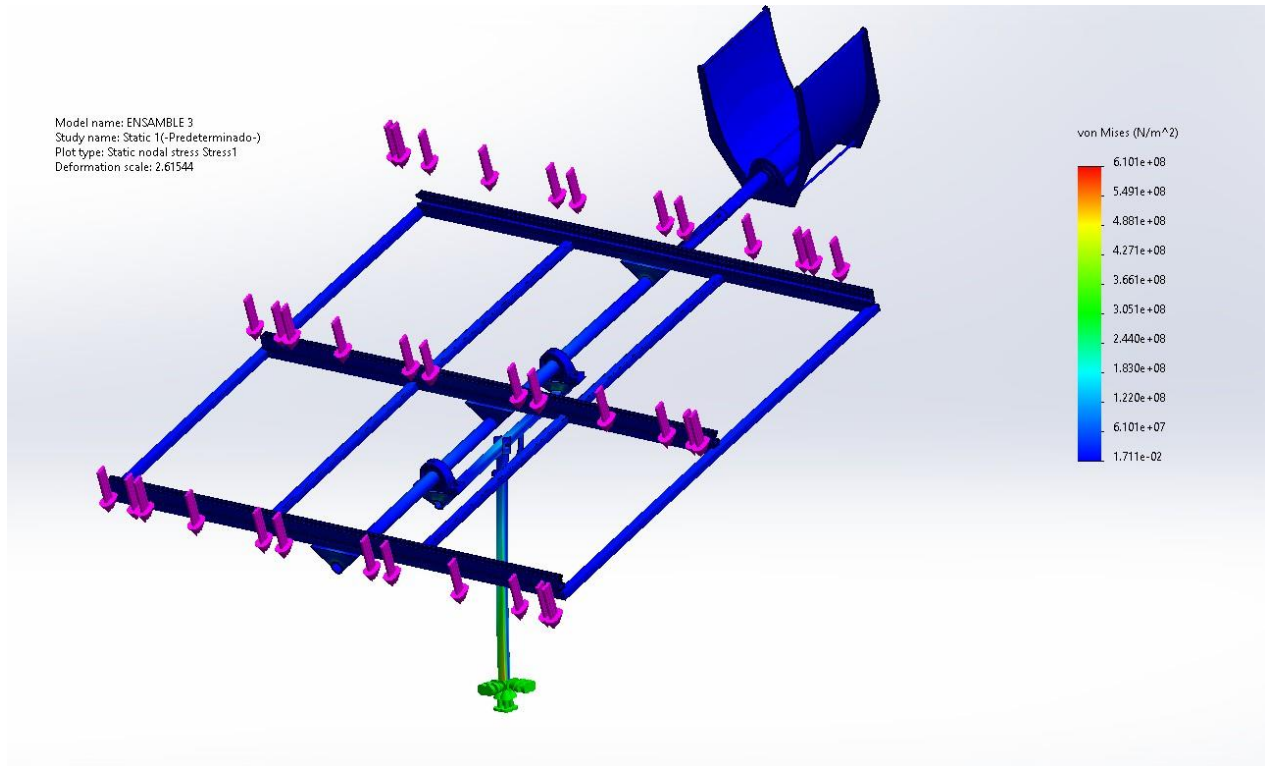
El análisis se realizó como simulación estática lineal con elementos tetraédricos de segundo orden. Se refinó la malla en zonas críticas (chumaceras, uniones atornilladas, orejetas, cordones de soldadura y surco de leva). Se repitió el posprocesado con mallas más finas hasta estabilizar tensiones y desplazamientos (<5 % de variación). Las deformadas mostradas en las figuras emplean un factor visual  $\approx 2,615$  sólo para efectos gráficos.

#### **4.4.4 Resultados CAE**

Los campos de tensiones de von Mises (Figura 20) muestran concentraciones localizadas en nudos del bastidor FV y en las interfaces del eje HSAT con sus soportes. Ninguna de estas concentraciones supera el límite elástico de los aceros empleados, y por tanto no se identifica plastificación en las condiciones de carga analizadas.

### **Figura 16**

Análisis de Esfuerzos Nodales de von Mises en un Ensamblaje Estructural Sometido a Cargas



*Nota.* La figura muestra una representación tridimensional de un análisis de elementos finitos (FEA) de esfuerzos nodales de von Mises, realizado sobre el "ENSAMBLE 3". El estudio corresponde a una simulación estática predeterminada ("Static 1G-Predeterminado") con una escala de deformación de 2.61544. Las flechas púrpuras indican la aplicación de cargas externas sobre la estructura, mientras que la barra de color a la derecha (en N/m<sup>2</sup>) representa el rango de esfuerzos de von Mises, desde valores bajos (azul) hasta altos (rojo). Este análisis es crucial para evaluar la integridad estructural y la distribución de tensiones bajo condiciones de carga específicas. A partir de un software CAD/CAE (SolidWorks).

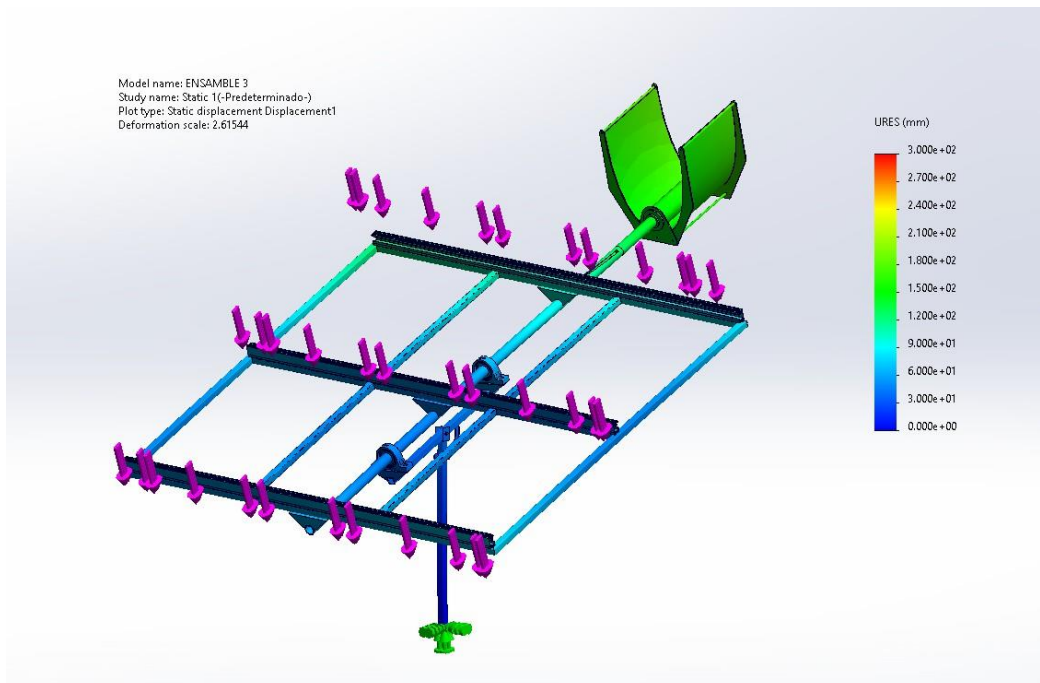
El mapa de desplazamientos resultantes (Figura 21) indica que la mayor deflexión se produce en el borde libre del bastidor FV, disminuyendo hacia el eje HSAT. Los valores máximos de desplazamiento son compatibles con la restricción flecha  $\leq L/200$ , lo cual confirma que la rigidez global del plano colector/bastidor es suficiente para mantener la geometría funcional bajo viento de diseño.

El cálculo del factor de seguridad (Figura 22) arroja un FOS mínimo global de 4,41. Ese valor se mantiene por encima de los umbrales exigidos ( $\geq 1,5$  en servicio y  $\geq 2,0$  en elementos principales), con distribución amplia de márgenes en la columna y en el propio eje HSAT. El bastidor FV muestra márgenes homogéneos y sin puntos aislados con FOS crítico.

Como consecuencia, el conjunto se considera sobredimensionado desde el punto de vista de resistencia estática, incluso bajo la combinación más severa de viento (cara desfavorable y ráfaga incrementada).

### Figura 17

Distribución de Desplazamientos Resultantes en un Ensamblaje Estructural Bajo Carga

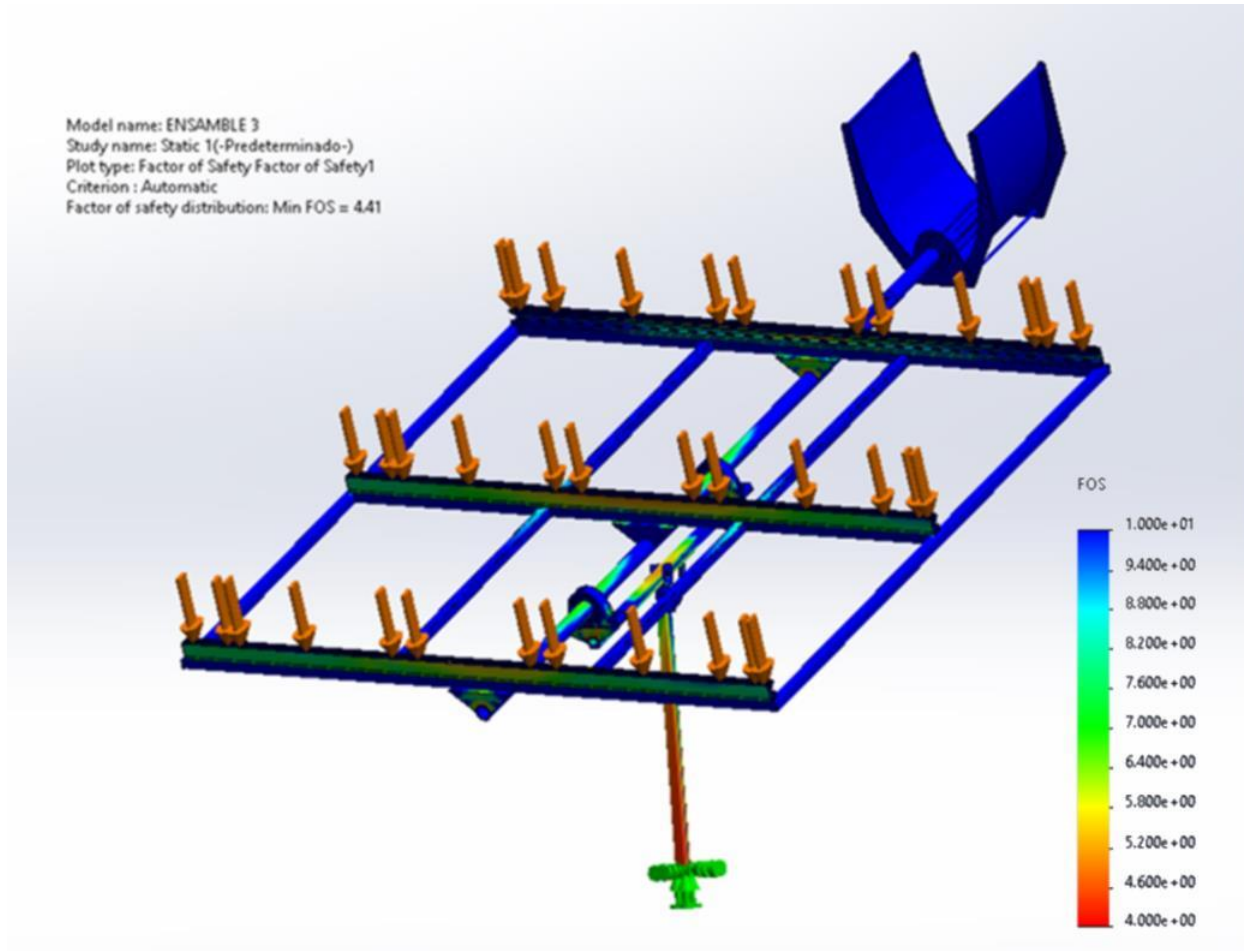


*Nota.* La figura muestra una representación tridimensional de un análisis de elementos finitos (FEA) de desplazamientos resultantes (URES), realizado sobre el "ENSAMBLE 3". El estudio corresponde a una simulación estática predeterminada ("Static 1G-Predeterminado") con una escala de deformación de 2.61544. Las flechas púrpuras indican la aplicación de cargas externas, mientras que la barra de color a la derecha (en mm) representa la magnitud de los

desplazamientos, desde valores nulos (azul oscuro) hasta desplazamientos máximos de 300 mm (rojo). Este análisis es fundamental para comprender cómo se deforma la estructura bajo las condiciones de carga aplicadas. A partir de un software CAD/CAE (SolidWorks).

**Figura 18**

Distribución del Factor de Seguridad para un Ensamblaje Estructural Bajo Carga Estática



*Nota.* La figura muestra una representación tridimensional del análisis del factor de seguridad (FOS) realizado sobre el "ENSAMBLE 3". El estudio corresponde a una simulación estática predeterminada ("Static 1G-Predeterminado"), utilizando un criterio automático, y el factor de seguridad mínimo global identificado es de 4.41. Las flechas naranjas indican la aplicación de

cargas sobre la estructura, mientras que la barra de color a la derecha representa la distribución del FOS, desde valores muy seguros (azul oscuro) hasta las áreas con menor margen de seguridad (rojo). Este análisis es esencial para verificar la resistencia de la estructura y asegurar su operación segura. A partir de un software CAD/CAE (SolidWorks).

El estudio estático lineal demuestra que el bastidor FV, el eje HSAT, la columna y la carcasa del actuador trabajan en régimen elástico bajo la presión equivalente de viento  $p \approx 5,76 \times 10^2 \text{ N/m}^2$ , más peso propio y ráfaga. Las deformaciones globales se mantienen dentro de  $L/200$ , y el FOS mínimo de 4,41 supera ampliamente los criterios internos. Con las tolerancias de mecanizado de la leva, los controles de montaje y las verificaciones en campo, el diseño se considera fabricable y apto para operación segura conforme a la NSR-10, sin requerir rediseños estructurales mayores.

#### ***4.5 Proceso de Manufactura y Fabricación***

La fabricación del seguidor solar pasivo de dos grados de libertad se planificó y documentó mediante una metodología sistemática de ingeniería de producción. Esta metodología se basó en formatos de procedimiento detallado estructurados como fichas técnicas codificadas, y en los planos de diseño mecánico que definen tanto la geometría de cada pieza como la forma prevista de su fabricación y ensamblaje.

##### ***4.4.5 Estructura Documental y Trazabilidad Técnica***

El sistema completo se descompuso en tres subconjuntos principales identificados como SSP\_1, SSP\_2 y SSP\_3. SSP\_1 corresponde al sistema de colector solar, que integra el pistón actuador térmico, el seguidor de leva KR16, la leva mecanizada con ranura de control, el CPC y la cubierta de vidrio, montados sobre láminas base y de acople; SSP\_2 corresponde al sistema de soporte y bastidor fotovoltaico, formado por marcos horizontales y verticales fabricados en tubería cuadrada de acero ASTM A36 de 40×40×3 mm con sus refuerzos y abrazaderas; SSP\_3

corresponde al sistema de anclaje y rotación, que incorpora el eje de giro hueco de 2", el eje rotativo de ½", el eje soporte FV, la columna y las placas de apoyo con chumaceras tipo SY60 WF.

Cada componente dentro de esos subconjuntos fue identificado con un código único y una descripción funcional (por ejemplo, "Lámina Acople Colector SSP\_1.1", "Marco Vertical SSP\_2.2.1", "Eje de Rotación SSP\_3.4"), junto con su material (acero ASTM A36, acero laminado en caliente tipo HR, latón, etc.), forma inicial (lámina, tubo cuadrado, eje macizo o eje hueco) y cantidad requerida. Esta codificación constituyó la lista de materiales (BOM) y permitió rastrear qué pieza pertenece a qué subconjunto y en qué etapa de fabricación interviene.

En paralelo, se estableció un catálogo interno de instrucciones de proceso. A cada tipo de operación se le asignó un código estandarizado (por ejemplo, corte láser, mecanizado en torno, doblado, soldadura TIG, taladrado pasante, ensamblaje). Dichos códigos se emplearon después en las fichas de proceso para describir cómo se transforma cada pieza desde materia prima hasta componente funcional dentro del conjunto. Esta estandarización aseguró consistencia técnica entre planificación de taller, control de tiempos y control de calidad.

#### ***4.4.6 Planificación del Proceso de Fabricación***

Con base en la estructura anterior, se elaboraron las fichas de PROCESO específicas para cada subconjunto (PROCESO SSP\_1, PROCESO SSP\_2 y PROCESO SSP\_3). Cada ficha registra, paso a paso, la secuencia requerida para producir una pieza o subensamble y, posteriormente, integrar dicho subensamble en el conjunto final.

Para cada operación se declararon explícitamente:

- **Entrada del paso:** materia prima o pieza previa ("Lámina HR e=6 mm", "Tubería cuadrada 40×40×3 mm", "Eje ½" ASTM A36").

- **Salida esperada:** componente fabricado o subconjunto ensamblado (“Lámina de acople colector”, “Marco vertical”, “Eje rotativo terminado”).
- **Tipo de actividad:** referencia directa al código de proceso normalizado (corte láser, mecanizado en torno convencional, doblado hidráulico, soldadura TIG, montaje).
- **Recursos:** equipo requerido (por ejemplo, máquina de corte láser para ranuras de la leva, torno para el collarín de latón y los ejes, mesa de soldadura TIG para uniones estructurales), mano de obra prevista y tiempo estimado.
- **Descripción operativa:** instrucción concreta para el operario (“Cortar según las medidas generales”, “Doblar la lámina principal FV según ángulos especificados”, “Soldar las placas de sujeción al tubo cuadrado manteniendo alineación y perpendicularidad”, “Taladrar agujeros pasantes en las posiciones indicadas en plano”).


Estas fichas, junto con los planos pieza a pieza, actúan como la ruta de fabricación. Por ejemplo:

- Para SSP\_1 (colector y actuador), se parte de lámina de acero HR de 6 mm que se corta por láser, se taladra con orificios pasantes y se mecaniza la leva seguidora, incluyendo el corte láser de la ranura guía del seguidor KR16-PP. También se fabrica el tubo conector y el acople mediante torneado en acero ASTM A36, y luego se ensambla el actuador térmico con el CPC y la cubierta de vidrio.
- En SSP\_2 (bastidor FV), se cortan, sueldan y refuerzan los marcos horizontales y verticales en tubería cuadrada ASTM A36, se sueldan las láminas soporte de chumacera y se integran las abrazaderas finales. Se especifica soldadura TIG con espesores de 3 mm y se verifican alineaciones y escuadras del bastidor.

- En SSP\_3 (anclaje y giro), se mecaniza el eje hueco de 2" y el eje rotativo de ½", se fabrica la viga soporte FV y la lámina guía con sus radios y ángulos definidos, y se preparan las placas de sujeción de chumacera para alojar rodamientos SY60 WF. El resultado es el subconjunto portante que transmite las cargas al suelo y define el eje de rotación del seguidor.
- La documentación de proceso también fija controles dimensionales intermedios: verificación de diámetros y concentricidad en los ejes mecanizados, inspección de la coaxialidad entre el eje de rotación y la viga soporte FV, comprobación de perpendicularidad entre marcos y refuerzos del bastidor, y confirmación de que todos los orificios indicados como pasantes en plano se ejecutaron en posición y diámetro.

### **Figura 19**

Fichas de Proceso de Manufactura subconjunto SSP\_1 Colector Actuador

		<b>PROYECTO SEGUIDOR SOLAR PASIVO 2-DOF</b>		<b>Ficha Componentes Soporte Fotovoltaico N° F01</b>	
				<b>FORMATO ÚNICO</b>	
<b>Nombre:</b> Soporte para diferentes paneles fotovoltaicos con seguimiento solar pasivo, de dos grados de libertad.				<b>Código:</b> SSP	
<b>Autores:</b> Cristian José Martínez González, Sneider Arbey Herazo Puentes					
<b>Descripción:</b> Componentes del soporte fotovoltaico con seguimiento solar.				<b>Hoja N° 01 de 02</b>	
Código	Sistema	Descripción	Cantidad	Fabricante	
SSP_1.1	Colector solar	LAMINA ACOUPLE COLECTOR	2	AUTOR	
SSP_1.2	Colector solar	CPC	1		
SSP_1.3	Colector solar	ACOPLE	1	AUTOR	
SSP_1.4	Colector solar	LAMINA BASE	2	AUTOR	
SSP_1.5	Colector solar	LEVA SEGUIDORA	1	AUTOR	
SSP_1.6	Colector solar	SEGUIDOR LEVA KR16	2		
SSP_1.7	Colector solar	TUBO CONECTOR	4	AUTOR	
SSP_1.8	Colector solar	CONECTOR TIPO FORK	1		
SSP_1.9	Colector solar	COBERTURA DE VIDRIO	1		
SSP_1.10	Colector solar	PISTÓN	1		
SSP_2.1	Soporte bastidor	LAMINA DE SUJECCIÓN	3	AUTOR	
SSP_2.1.1	Soporte bastidor	LAMINA DE SUJECCIÓN	5	AUTOR	
SSP_2.1.2	Soporte bastidor	LAMINA SUJECCIÓN CIRCULAR	6	AUTOR	
<b>Elaborado por:</b> - Cristian José Martínez G. <b>Cargo:</b> Autor de Proyecto - Sneider Arbey Herazo P. <b>Cargo:</b> Autor de Proyecto <b>Fecha:</b> 29/06/2025			<b>Aprobado por:</b> Julian Ernesto Jaramillo <b>Cargo:</b> Julián Ernesto Jaramillo Ibarra <b>Fecha:</b> 15/07/2025		

*Nota.* Ficha del proceso de manufactura del seguidor solar, con esta se lleva un paso a paso de la fabricación de cada uno de los componentes.

#### ***4.4.7 Ensamble Final y Control de Calidad***

Una vez fabricados los subconjuntos SSP\_1, SSP\_2 y SSP\_3, se procedió al ensamble secuencial definido en los formatos. Primero se montaron la columna y las placas de anclaje; luego se acopló el eje principal y el bastidor fotovoltaico; después se instaló el módulo del colector con su actuador termo-mecánico, el seguidor de leva y el CPC; finalmente se cerró con el ajuste de los topes angulares de giro y la verificación funcional del movimiento.

Durante el ensamble se exigieron las tolerancias funcionales críticas del sistema:

- continuidad de contacto entre el rodillo seguidor y la ranura de la leva a lo largo del arco útil;
- libertad de giro en los apoyos y rodamientos sin enclavamientos ni rozamientos anómalos;
- ausencia de holguras excesivas en uniones soldadas y en puntos de fijación estructural;
- estanqueidad y correcta posición de la cubierta de vidrio del colector.

De manera paralela, las fichas de procedimiento registraron los tiempos estimados por operación y por subconjunto, lo que permitió proyectar la duración total de fabricación por lote y asegurar trazabilidad: cada ítem puede asociarse a su material inicial, operaciones aplicadas, responsable de ejecución y verificación dimensional. Este esquema convierte los formatos técnicos y los planos mecánicos en el hilo conductor entre diseño, manufactura y montaje, y garantiza que el prototipo fabricado refleje fielmente las especificaciones geométricas y funcionales definidas en el diseño del seguidor solar pasivo.

Los planos detallados de fabricación se adjuntan en el Apéndice R, así también las fichas técnicas de manufactura en el Apéndice S para referencia completa.

## 5 Resultados.

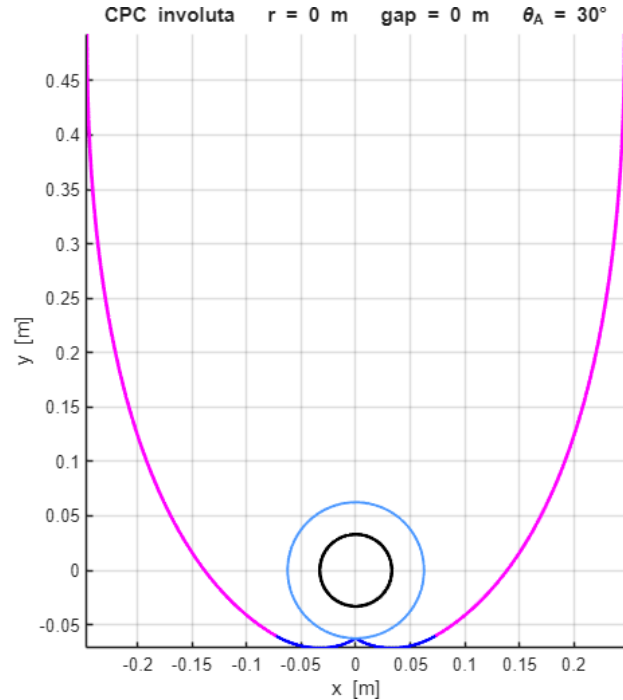
Este capítulo articula, de forma continua con la metodología del Capítulo 4, la evidencia numérica generada por el modelo de simulación. Las figuras que lo acompañan recogen una semana representativa y condensan la relación entre óptica, transferencia de calor, dinámica del PCM y cinemática del seguidor mecánico. El objetivo es doble: demostrar consistencia físico-numérica a la luz del modelo y extraer criterios operativos útiles para réplica y extensión.

### 5.1 Geometría CPC y Condiciones de Aceptación

La envolvente CPC sintetizada con *cpc\_involute\_gap* delimita el dominio angular de captación y fija la apertura efectiva  $W_a$  que usa el balance óptico. La Figura 20 del perfil involuta muestra la simetría, la continuidad de curvatura y el asiento geométrico del tubo absorbente y la cubierta. Con  $\theta_A = 30^\circ$  y el juego geométrico fijado en el Apéndice J, el contorno garantiza que, dentro del cono de aceptación, la componente directa incide con pérdidas primarias reducidas; fuera de él, el sistema opera en régimen penalizado por el factor  $IAM$  y el coseno de incidencia. Esta base geométrica explica la meseta de eficiencia óptica diurna que se observa más adelante.

#### Figura 20

Geometría del Concentrador Parabólico Compuesto (CPC) de Tipo Involuta



*Nota.* La Figura 20 presenta la geometría transversal de un Concentrador Parabólico Compuesto (CPC) de tipo involuta. Se muestra el perfil parabólico (magenta) diseñado para una aceptación angular  $\theta_A = 30^\circ$ , con un radio de tubo central  $r = 0$  m y un "gap" (separación) = 0 m, indicando un ajuste idealizado sin holguras. Dentro del CPC, se visualiza el tubo absorbente (círculo negro) rodeado por una cubierta de vidrio (círculo azul), ambos centrados en el origen de coordenadas (x, y en metros). Esta configuración es fundamental para el análisis óptico y térmico del sistema.

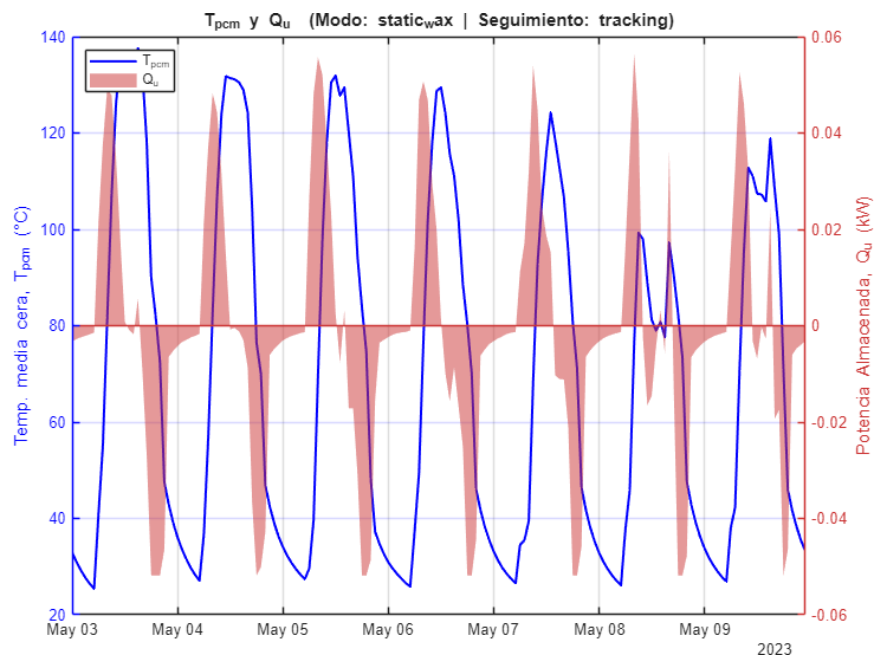
## 5.2 Evolución Térmica y Potencia Almacenada

En la serie " $T_{pcm}$  y  $Q_u$ " el trazado azul exhibe máximos diarios del orden de 120–135 °C y descensos nocturnos bruscos gobernados por convección natural interna y radiación al cielo efectivo. La envolvente rojiza de  $Q_u$  cambia de signo según el balance neto pared-PCM: positiva durante carga solar y negativa en descarga. La alternancia día/noche se preserva, lo que valida el

control de cortes por irradiancia mínima y la robustez del solver de conducción con capacidad aparente. El perfil en dientes de sierra de  $T_{pcm}$  es coherente con un PCM con ventana de fusión estrecha: al superar  $T_m$  el aumento de capacidad efectiva atenúa la pendiente; una vez colapsa el frente de fusión, la respuesta se acelera (Figura 21).

### Figura 21

Evolución de la Temperatura del PCM y la Potencia Térmica Almacenada



*Nota.* La Figura 21 muestra la evolución de la temperatura media del material de cambio de fase ( $T_{pcm}$  en °C, línea azul) y la potencia térmica neta almacenada en él ( $Q_u$  en kW, área roja).  $Q_u$  se reporta como potencia (W); su energía se obtiene integrándolo en el paso externo  $\Delta t = 1800$  s. El trazado azul exhibe máximos diarios de 120-135 °C y bruscos descensos nocturnos. El área rojiza de  $Q_u$  es positiva durante la carga solar (ganancia de calor) y negativa durante la descarga nocturna (pérdida de calor). El perfil en "dientes de sierra" de la temperatura es coherente con un PCM que atraviesa sus ciclos de fusión y solidificación. Los datos corresponden a una

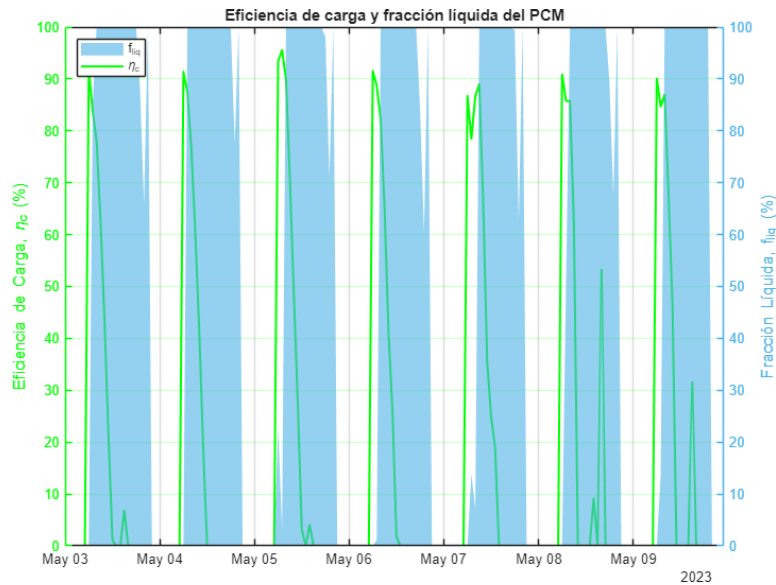
simulación en modo estático con seguimiento solar (*tracking*) para el periodo del 3 al 9 de mayo de 2023.

### 5.3 Eficiencia de Carga y Fracción Líquida

La figura de  $\eta_c$  y  $f_{liq}$  muestra picos de eficiencia cercanos a 90% coincidentes con fracciones líquidas altas en las horas centrales, y caídas abruptas cuando el sistema entra o sale de la meseta de fusión. La coincidencia temporal entre el crecimiento de  $f_{liq}$  y la elevación de  $\eta_c$  corrobora que el régimen útil está anclado en la disponibilidad de potencia directa y en la convección interna activada por  $\Delta T$  pared-PCM. El periodo húmedo del 8 de mayo introduce pequeñas interrupciones en  $f_{liq}$ , visibles como “mordidas” en los picos, que el modelo captura mediante la descomposición  $GHI \rightarrow DNI/DHI$  y la transposición al plano (ver Figura 22).

**Figura 22**

Eficiencia de Carga y Evolución de la Fracción Líquida del PCM



*Nota.* La Figura 22 ilustra la relación entre la eficiencia de carga ( $\eta_c$  en %, línea verde) y la fracción líquida del material de cambio de fase ( $f_{liq}$  en %, área azul). La eficiencia corresponde

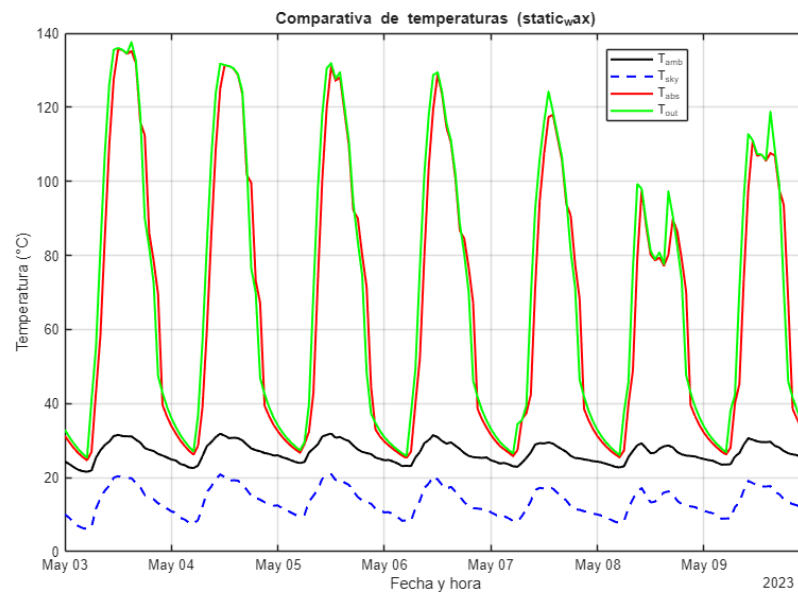
al eje vertical izquierdo, mientras que la fracción líquida se lee en el eje vertical derecho. Se observan los ciclos diarios de carga y descarga del PCM para el periodo del 3 al 9 de mayo de 2023.

### 5.4 Comparativa de Temperaturas

La comparativa de  $T_{amb}$ ,  $T_{sky}$ ,  $T_{abs}$  y  $T_{out}$  confirma la coherencia del cierre energético. La línea de cielo efectivo se mantiene por debajo del ambiente, incrementando la fuerza radiativa nocturna;  $T_{out}$  sigue de cerca  $T_{abs}$  en carga, con ligeras separaciones cuando aumenta el flujo al PCM. La ausencia de cruces no físicos y la alineación de máximos con los picos de DNI sostienen la validez del timestep externo  $\Delta t = 1800$  s y de las tolerancias del esquema implícito (ver Figura 23).

**Figura 23**

Comparativa de Temperaturas del Sistema (modo *static\_wax*)



*Nota.* La Figura 23 presenta las series horarias de cuatro temperaturas entre el 3 y el 9 de mayo de 2023 para Bucaramanga (UTC-5). Se grafican: temperatura ambiente  $T_{amb}$  (línea negra

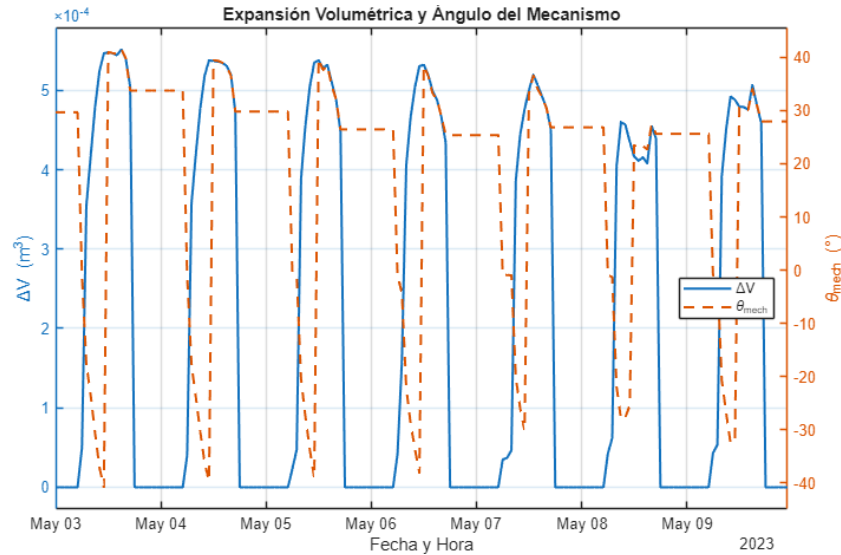
continua), temperatura de cielo efectivo  $T_{sky}$  (línea azul discontinua), temperatura de la pared del absorbedor  $T_{abs}$  (línea roja continua) y temperatura media del PCM  $T_{out}$  (línea verde continua). El eje vertical indica temperatura en °C y el eje horizontal, fecha y hora. Los datos provienen de la simulación termo-óptica con seguimiento HSAT N-S y paso externo  $\Delta t = 1800$  s. A partir de las salidas de *ptc\_model\_step.m* y *pcm\_Conductive\_step.m*.

### 5.5 Cinemática Termo-Mecánica: $\Delta V$ , $x$ y $\theta_{mech}$

Las Figura 24 y Figura 25 cinemáticas muestran, primero, la expansión volumétrica  $\Delta V$  y el ángulo del mecanismo, y luego el desplazamiento lineal  $x = \Delta V/A_p$  frente a  $\theta_{mech}$ . Los máximos de  $\Delta V$  rondan  $5 \times 10^{-4} m^3$ ; con  $A_p \approx 1.96 \times 10^{-3} m^2$  se obtienen strokes en el entorno de 250–270 mm, en línea con el diseño base. El  $\theta_{mech}$  signado respeta la histéresis de la leva: al cruzar el mediodía cambia de rama con banda muerta, evitando inversión espuria por ruido. Las mesetas cerca de  $\pm 30^\circ - 35^\circ$  reflejan el límite  $\psi_{m\acute{a}x}$  impuesto en la síntesis, condición que reaparece en el análisis de error.

#### Figura 24

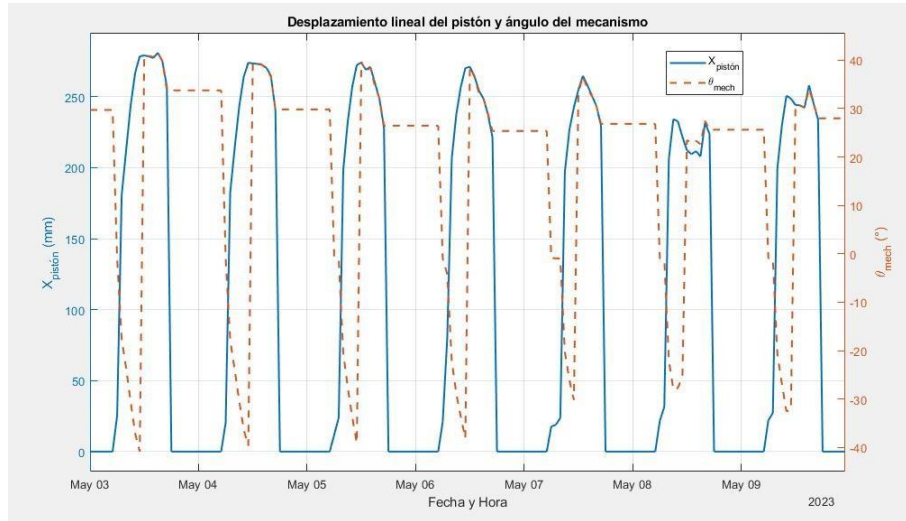
Cinemática Termo-Mecánica: Expansión Volumétrica del PCM ( $\Delta V$ ) y Ángulo del Mecanismo ( $\theta_{mech}$ ).



*Nota.* La figura presenta la evolución temporal entre el 3 y el 9 de mayo de 2023. El eje horizontal corresponde a fecha y hora. El eje vertical izquierdo muestra la expansión volumétrica del PCM,  $\Delta V$  ( $\text{m}^3$ ), trazada con línea continua azul; la escala está indicada en la esquina superior izquierda ( $\times 10^{-4}$ ). El eje vertical derecho muestra el ángulo del mecanismo,  $\theta_{mech}$  ( $^\circ$ ), representado con línea discontinua naranja y convención de signo Este–Oeste. Ambos registros tienen resolución horaria y provienen del acoplamiento termo-mecánico del modelo:  $\Delta V$  del solver del PCM y  $\theta_{mech}$  de la ley de leva aplicada al mismo intervalo de tiempo.

### Figura 25

Cinemática Termo-Mecánica: Desplazamiento Lineal del Pistón ( $x$ ) y Ángulo del Mecanismo ( $\theta_{mech}$ ).



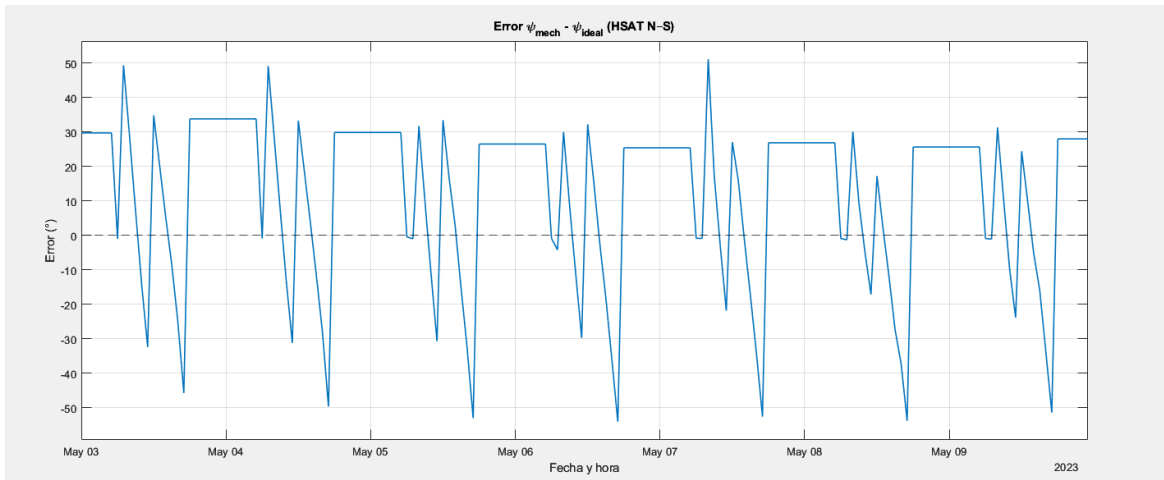
*Nota.* Se muestra la misma ventana temporal (3–9 de mayo de 2023). El eje horizontal es fecha y hora. El eje vertical izquierdo corresponde al desplazamiento lineal del pistón,  $x$  (mm), trazado con línea continua azul. Este desplazamiento se obtiene a partir de la relación  $x = \Delta V / A_p$ , con área efectiva del pistón  $A_p \approx 1.96 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ . El eje vertical derecho representa el ángulo del mecanismo,  $\theta_{mech}$  [°], con línea discontinua naranja y convención de signo Este–Oeste. Las series están muestreadas por hora y comparten la misma ley de leva empleada en la simulación.

## 5.6 Error de Seguimiento Frente al Giro Ideal

El error  $\psi_{mech} - \psi_{ideal}$  alterna con la periodicidad solar. Dentro de la ventana útil — aproximadamente  $\pm 35^\circ$  en torno al mediodía— el desajuste se mantiene contenido y con sesgo bajo, consecuencia directa de la re-síntesis isotónica que pondera por potencia absorbida. En los extremos de la jornada el error se satura por diseño cuando el ideal excede  $\psi_{max}$ ; este comportamiento no penaliza la métrica FV neta porque coincide con ángulos cercanos al borde de aceptación del CPC y con DNI reducido (ver Figura 26).

**Figura 26**

Error de seguimiento frente al giro ideal (HSAT N-S)



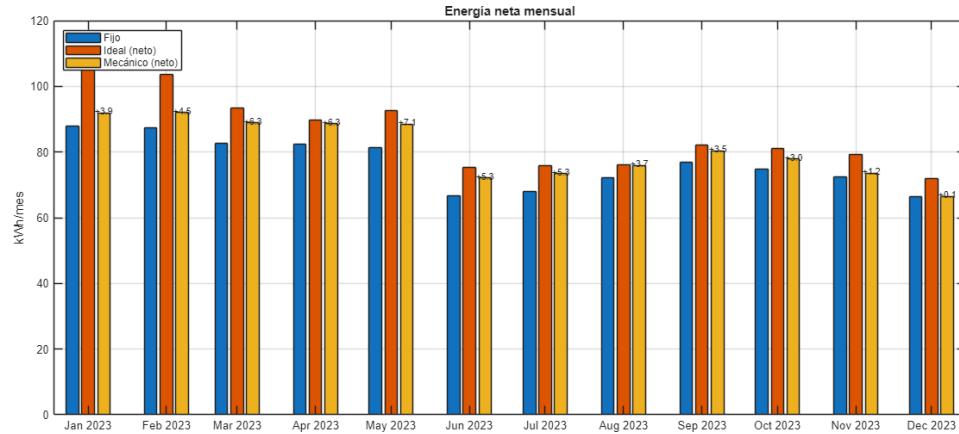
*Nota.* La Figura 26 muestra el error horario  $\psi_{\text{mech}} - \psi_{\text{ideal}}$  (línea azul, eje vertical en grados) entre el giro mecánico del seguidor y el giro ideal de un seguidor de un eje norte–sur. El eje horizontal corresponde a la fecha y hora (3–9 de mayo de 2023). La línea discontinua negra indica el cero de referencia. Valores positivos implican sobreseguimiento y negativos, subseguimiento.

**5.7 Energía Neta Mensual**

La Figura 27 presenta la energía neta mensual durante 2023. La estacionalidad en Bucaramanga —latitud  $\sim 7^\circ$ — es moderada: máximos en enero–febrero y septiembre–octubre ( $\approx 80\text{--}110 \text{ kWh mes}^{-1}$  según caso) y mínimos en junio–julio ( $\approx 70\text{--}80 \text{ kWh mes}^{-1}$ ). En todos los meses el seguidor mecánico se mantiene entre el panel fijo y el seguidor ideal, con brechas más visibles en meses despejados.

**Figura 27**

Energía FV Neta Mensual por Configuración (enero–diciembre de 2023)



*Nota.* Gráfico de barras agrupadas que reporta los totales mensuales de energía fotovoltaica neta (eje vertical en kWh/mes) para tres configuraciones: panel fijo (barras azules), seguidor ideal —neto, con su consumo propio ya descontado— (barras rojas) y seguidor mecánico pasivo —neto— (barras naranjas). El eje horizontal enumera los meses de 2023 con el formato “Mes AAAA”. La leyenda se ubica en la parte superior izquierda. Cada grupo de tres barras corresponde al agregado mensual de las series horarias simuladas para cada caso.

## 5.8 Análisis Financiero del Sistema Seguidor solar

El análisis financiero compara el seguidor solar pasivo propuesto frente a una configuración fotovoltaica fija equivalente. El objetivo consiste en determinar si la ganancia energética adicional del seguidor justifica el costo adicional de fabricación, instalación y mantenimiento del mecanismo pasivo.

La evaluación se planteó como análisis incremental: únicamente se consideraron los costos y beneficios atribuibles al sistema pasivo y no presentes en la alternativa fija. Bajo este enfoque, el sistema fijo se toma como referencia base (paneles, bastidor estructural fundamental, cimentación mínima), y el pasivo se interpreta como “la misma base + mecanismo de seguimiento térmico”. El resultado se expresa en términos de Valor Presente Neto (VPN), Tasa Interna de

Retorno (TIR), relación Beneficio–Costo (B/C) y umbrales mínimos de energía requerida para lograr equilibrio económico.

Se adoptaron los siguientes supuestos de proyecto:

- Horizonte de evaluación: 20 años de operación.
- Tasa de descuento real: 14 % anual.
- Costo de mantenimiento: 5 % anual del costo incremental de compra e instalación del seguidor pasivo. Este término incluye lubricación, ajustes mecánicos, reposición de componentes móviles y verificación del actuador térmico, además de limpieza de los paneles.
- Producción energética incremental: La simulación energética del sistema FV estimó una diferencia anual de energía entregada entre el sistema con seguimiento pasivo y el sistema fijo de  $\Delta\text{kWh} = 969,75 \text{ kWh/año} - 919,54 \text{ kWh/año} = 50,21 \text{ kWh/año}$ . Es decir, el seguidor pasivo aportaría ~50 kWh/año adicionales frente al arreglo fijo.
- Tarifa eléctrica de referencia: se utilizó la misma tarifa unitaria aplicada en el estudio energético previo del proyecto para valorar económicamente la energía FV. Un hogar promedio colombiano consume 1884 kwh/año, valor que no se supera por lo tanto se monetiza la generación de energía eléctrica al valor total del kwh del consumidor final. La tarifa se empleó únicamente para monetizar la energía incremental (no para recalcular todo el sistema FV). Con esa tarifa se obtiene un ingreso estimado de 874 COP/kWh.

Estos supuestos representan un escenario conservador: viento, suciedad, pequeños desalineamientos y tolerancias mecánicas pueden reducir la ganancia real de captación respecto al ideal geométrico del seguidor pasivo.

### 5.8.1 *Definición de Costos Incrementales (Costo Incremental de Compra e Instalación)*

Se asume que el sistema fijo comparte paneles y estructura base; por tanto, el costo incremental de compra e instalación del seguidor pasivo se aproxima a la suma de los ítems exclusivos del mecanismo:

- Actuador térmico: \$2.261.748 COP, actuador termo-mecánico responsable del giro; integra el pistón térmico.
- Rodamientos y seguidores: \$1.958.125 COP, apoyos, seguidores de leva tipo KR16-PP y mecanismos de guiado.
- Otros componentes mecánicos de seguimiento, accesorios y adaptadores: \$703.127 COP.

Luego, el costo incremental de compra e instalación estimado es de \$4.923.000 COP, Si se deseara un refinamiento adicional, podría calcularse el diferencial como: (costo total del sistema pasivo instalado) – (costo total del sistema fijo instalado). Ese refinamiento solo cambiaría el valor si parte de la estructura portante (perfiles, procesos de soldeo, mecanizados) fuese exclusiva del pasivo y no compartida con la alternativa fija. Para el presente análisis se adoptó la estimación de \$4.923.000 COP como costo incremental de capital.

Se asumió además que este capital inicial genera un costo de operación y mantenimiento incremental anual de:

$$\begin{aligned}
 O\&M_{incremental} &= 0,05 \times \text{costo incremental de compra e instalación} \\
 &= 0,05 \times \$4.923.000 \approx \$246.150/\text{año}
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

El beneficio anual bruto se calculó monetizando únicamente la energía adicional entregada por el seguidor pasivo:

$$\begin{aligned} \text{Beneficio anual} &= \Delta kWh \times \text{tarifa} \\ &\approx 50,21 \text{ kWh/año} \times 874 \text{ COP/kWh} \approx 43.884 \text{ COP/año.} \end{aligned} \quad (13)$$

Ese valor representa el ingreso “extra” atribuible al seguimiento pasivo frente al sistema fijo, bajo las mismas condiciones externas. El flujo neto anual adicional se obtiene restando el costo de operación y mantenimiento incremental:

$$\begin{aligned} \text{Flujo neto anual} &= \text{Beneficio anual}(B) - O\&M_{\text{incremental}} \\ &\approx -\$202.266 \text{ COP/año} \end{aligned} \quad (14)$$

Es decir, el mecanismo pasivo, en las condiciones actuales de ganancia energética y costos, no se paga a sí mismo ni siquiera en operación anual: mantenerlo cuesta más que la energía adicional que produce.

### 5.8.2 Evaluación Financiera (VPN, TIR y B/C)

Para proyectar económicamente el caso completo se trabajó a valor presente; se utilizó la tasa de descuento real del 14 % en un horizonte de 20 años; el factor presente de una anualidad con esa tasa es:

$$\sum_{t=1}^{20} (1 + 0,14)^{-t} \approx 6,623 \quad (15)$$

- Valor presente de los beneficios energéticos (PV Beneficios)

$$PV(\text{Beneficios}) \approx 43.884 \frac{\text{COP}}{\text{año}} \times 6,623 \approx 290.646 \text{ COP.} \quad (16)$$

- Valor presente del costo O&M incremental (PV O&M)

$$PV(O\&M) \approx 246.150 \frac{\text{COP}}{\text{año}} \times 6,623 \approx 1.630.284 \text{ COP.} \quad (17)$$

Valor presente neto (VPN), se calcula como:

$$\begin{aligned}
 VPN &= PV(\text{Beneficios}) \\
 &\quad - [\text{Costo incremental de capital} + PV(O\&M)] \\
 &\approx 290.646 \text{ COP} - [4.923.000 \text{ COP} + 1.630.284 \text{ COP}] \\
 &\approx 290.646 \text{ COP} - 6.553.284 \text{ COP} \\
 VPN &\approx -6.262.637 \text{ COP}.
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

El VPN resultó fuertemente negativo. Bajo estos supuestos, la inversión incremental en el seguidor pasivo no se recupera vía la energía adicional generada durante 20 años.

- Tasa Interna de Retorno (TIR): En este escenario, el flujo neto anual es negativo desde el primer año y nunca se vuelve positivo. Por tanto, no existe una TIR incremental económicamente válida (la curva de flujos no cruza cero).
- Relación Beneficio–Costo (B/C), Se define como:

$$\begin{aligned}
 B/C &= \frac{PV(B)}{\text{costo incremental de capital} + PV(O\&M)} \approx \frac{0,29}{6,55} \approx 0,044 \tag{19} \\
 &\ll 1: \text{ no viable).}
 \end{aligned}$$

Un valor B/C  $\ll 1$  confirma que, financieramente, el mecanismo pasivo no resulta justificable frente a la alternativa fija cuando se valora solo la energía adicional.

### 5.8.3 Sensibilidad y Umbrales de equilibrio

Se calcularon dos umbrales de referencia para interpretar qué tendría que mejorar (o cambiar en el entorno económico) para que el seguidor pasivo se vuelva atractivo.

- Equilibrio operativo anual (flujo neto  $\geq 0$ ), para que el beneficio anual cubra al menos el costo de O&M incremental:

$$\Delta kWh_{\text{requerido}} \geq \frac{O\&M_{\text{incremental}}}{\text{tarifa}} \approx \frac{246.150 \frac{COP}{\text{año}}}{874 \frac{COP}{kWh}} \approx 282 \text{ kWh/año} \tag{20}$$

Esto significa que el seguidor pasivo tendría que aportar ~282 kWh/año adicionales frente al sistema fijo (no ~50 kWh/año) solo para que, año a año, no genere pérdida operativa.

b) Equilibrio financiero a 20 años ( $VPN = 0$ ), para que el VPN sea nulo a 20 años con 14 % de descuento, el beneficio anual equivalente debería ser:

*Beneficio anual requerido*

$$\approx \frac{\text{costo incremental de capital} + PV(O\&M)}{6,623} \quad (21)$$

$$\approx \$989.454 \text{ COP/año}$$

Traducido a energía incremental:

$$\Delta kWh_{requerido} \approx \frac{989.454}{874} \approx 1.132 kWh - \text{año} \quad (22)$$

Este valor es más de un orden de magnitud superior a los ~50 kWh/año estimados para el seguidor pasivo real. Dicho de otro modo, el sistema pasivo tendría que multiplicar por ~20 su aporte energético incremental o, en su defecto, el costo incremental de capital y mantenimiento tendría que caer drásticamente.

Bajo los costos de fabricación y montaje actuales (actuador térmico, seguidores de leva, rodamientos, herrajes y estructura asociada al movimiento) y bajo las ganancias energéticas estimadas (~50 kWh/año adicionales frente al bastidor fijo), el seguidor solar pasivo no resulta económicamente rentable. El VPN es negativo ( $\approx -6,26$  millones COP), la relación B/C es muy inferior a 1 ( $\approx 0,044$ ) y no se obtiene TIR incremental.

Para que el mecanismo pasivo se vuelva financieramente atractivo en un horizonte de 20 años con una tasa de descuento del 14 %, deberían ocurrir al menos una de las siguientes condiciones:

- Aumento significativo del recurso aprovechado (más kWh/año adicionales): por ejemplo, un seguidor que entregue >1.100 kWh/año extra frente al fijo, lo cual implicaría una mejora radical en captación o en geometría óptica.
- Reducción fuerte del costo incremental de capital y de su mantenimiento anual: simplificación mecánica, integración de funciones en menos piezas, manufactura seriada o economías de escala.
- Tarifas eléctricas sustancialmente más altas en el sitio de operación, que aumenten el valor monetario de cada kWh generado.

En su estado actual, el seguidor pasivo puede justificarse por criterios de desempeño técnico (seguimiento solar sin consumo eléctrico de control, robustez mecánica, interés tecnológico, demostración de concepto) o por valor estratégico en investigación y desarrollo. Sin embargo, desde el punto de vista estrictamente financiero, y con los parámetros asumidos, el sistema pasivo no se sostiene frente a un bastidor FV fijo convencional.

**5.9 Resumen Anual y Comparación Final**

La Tabla 1 resume el balance anual de energía fotovoltaica. El seguidor ideal registra 1 026.5 kWh brutos y un consumo parasitario de 0.089 kWh para el giro (saldo neto 1 026.4 kWh), mientras que el mecánico no incurre en consumo eléctrico.

**Tabla 1**

Resumen anual de generación y consumo energético en diferentes configuraciones fotovoltaicas

<b>Configuración del sistema</b>	<b>Energía generada (kWh)</b>	<b>Energía consumida (kWh)</b>	<b>Energía neta (kWh)</b>
Panel Fijo	919.54	0.00	919.54
Seguidor Ideal	1026.50	0.09	1026.41

Seguidor Mecánico	969.75	0.00	969.75
-------------------	--------	------	--------

*Nota.* Los valores representan el desempeño energético anual de tres configuraciones diferentes de sistemas fotovoltaicos. La energía neta se calcula como la diferencia entre la energía generada y la energía consumida por el sistema. Los datos corresponden a simulaciones realizadas para condiciones de operación estándar.

Desde esta base, los incrementos relativos son claros y útiles para decisiones de diseño:

- **Ideal vs fijo:** +106.86 kWh,  $\approx$  **11.6 %** de mejora anual.
- **Mecánico vs fijo:** +50.21 kWh,  $\approx$  **5.5 %** de mejora anual.
- **Brecha mecánico–ideal:** 56.65 kWh; el mecánico entrega  $\approx$  **94.5 %** del ideal **sin consumo eléctrico** y con una arquitectura pasiva de muy baja complejidad operativa.

El patrón observado en las figuras concuerda con estas cifras: la mayor parte de la diferencia entre mecánico e ideal se concentra en horas de borde solar y en días muy despejados; alrededor del mediodía, donde el peso energético es mayor (*sin  $\alpha$* ), el mecanismo pasivo reproduce bien el giro requerido, lo que explica su buen desempeño anual.

### Conclusiones

- Este trabajo demostró que un seguidor solar pasivo, accionado por expansión térmica de un PCM y gobernado por una ley de leva sintetizada a partir de datos locales, puede acercarse de forma robusta al desempeño de un seguidor ideal sin consumo eléctrico ni control activo. Sobre el año de referencia para Bucaramanga, el sistema pasivo entregó 969.75 kWh, es decir, +5.5 % frente a un panel fijo (919.54 kWh) y  $\approx$  94.5 % del ideal (1026.5 kWh netos). Más que un número, este resultado condensa una cadena metodológica consistente: cinemática solar (*solarAngles*), descomposición y transposición

radiativa (*decomposeGHI* y Pérez), balance termo-óptico del receptor y conducción 1D con capacidad aparente en el PCM, acoplados a una cinemática mecánica con memoria mediante  $\phi(x)$ .

- La coherencia físico-numérica de la metodología quedó respaldada por tres evidencias. Primero, el cierre energético: las series de  $T_{amb}$ ,  $T_{sky}$ ,  $T_{abs}$  y  $T_{out}$  no presentan cruces no físicos y los máximos se alinean con los picos de DNI, validando el paso externo  $\Delta t = 1800$  s y el esquema implícito. Segundo, el bloque óptico muestra una meseta diurna de  $\eta_o$  cuando el ángulo de incidencia opera dentro del cono de aceptación del CPC, coherente con la geometría generada por *cpc\_involute\_gap*. Tercero, el error de seguimiento  $\psi_{mech} - \psi_{ideal}$  se mantiene acotado en la ventana útil ( $\pm 35^\circ$  alrededor del mediodía) y se satura en los bordes, donde el impacto energético es menor por *IAM* y coseno.
- La ganancia del seguimiento pasivo se explica por dónde y cuándo actúa. En días despejados, el mecanismo reproduce bien la envolvente del ideal en las horas de mayor peso energético; en días dominados por difusa, las tres estrategias (fijo, pasivo, ideal) convergen, como predice la transposición anisotrópica. Esta asimetría —ganar cuando el sol “vale más” y ceder cuando vale menos— explica que, con una arquitectura pasiva y sin consumo, se capture la fracción sustantiva del beneficio anual.
- El análisis  $\psi - x$  aporta guía de diseño concreta: la leva óptima no es “agresiva”, sino mesetada. Los datos recomiendan fijar  $\psi_{m\acute{a}x} \approx 50^\circ$ , introducir una meseta central (cuando  $\sin \alpha$  es máximo) y rampas simétricas, y mantener una histéresis suave que establezca el cruce por mediodía. Esta forma reduce el error en amanecer/atardecer, evita sobre-giro innecesario en los extremos (donde el CPC ya penaliza) y alinea la cinemática con la aceptación óptica. La re-síntesis isotónica (PAVA ponderada por potencia) fue clave para

derivar esta forma directamente de las series locales, cerrando el ciclo “datos → leva → desempeño”.

- Desde el punto de vista práctico, el sistema elimina consumo parasitario y reduce drásticamente la complejidad operativa: menos componentes activos, menos puntos de falla y menor dependencia de repuestos/energía auxiliar. En contextos tropicales con estacionalidad moderada, como Bucaramanga y ciudades de latitud similar. Además, la replicabilidad está asegurada: una única estructura de configuración (*cfg*), validaciones explícitas, tabla maestra de parámetros y exportación directa de geometrías (leva y CPC) permiten trasladar el flujo a otros sitios con solo cambiar datos y re-sintetizar.
- Las limitaciones son claras y orientan el trabajo futuro: no se incluyeron suciedad óptica estacional ni tolerancias/fricción mecánica; las propiedades del aire y del PCM se modelaron con correlaciones promedio; la validación es numérica (falta banco de pruebas). De aquí se desprenden las siguientes líneas: (i) prototipado y campaña de medición para cerrar el lazo con datos de campo (curvas  $\psi - x$ , histéresis real, pérdidas mecánicas, envejecimiento óptico); (ii) optimización multi-objetivo (energía anual vs. esfuerzo mecánico vs. manufacturabilidad de la leva); (iii) análisis de incertidumbre y sensibilidad (propiedades del PCM, albedo,  $\Delta t$ ); y (iv) evaluación tecnocostosa comparativa (pasivo vs. activo) en escenarios de red débil o aislada.
- En síntesis, el estudio cumple el objetivo y aporta un camino replicable: con un modelado riguroso y una ley de leva derivada de datos locales, un seguidor pasivo puede capturar la mayor parte del beneficio del seguimiento ideal sin electricidad ni control, justo cuando la energía disponible es más valiosa. Ese equilibrio —alto retorno con baja complejidad— es

el principal aporte científico-técnico y una base sólida para el paso natural: construir, medir y escalar.

- Bajo el enfoque incremental (solo costos adicionales del mecanismo pasivo frente al fijo) y con los parámetros indicados (20 años, 14 %, O&M 5 % del costo incremental de compra e instalación), el seguidor no resulta financieramente viable: VPN fuertemente negativo, TIR inexistente y  $B/C \ll 1$ . Para que el proyecto sea atractivo, el diferencial de generación debería crecer de  $\sim 50$  a  $>1.100$  kWh/año, o el costo incremental de compra e instalación y/o el O&M deberían reducirse de forma sustancial, o la tarifa debería ser significativamente mayor.

### Recomendaciones

A partir de la evidencia numérica y del alcance metodológico del estudio, se proponen las siguientes líneas de acción para consolidar y escalar la solución de seguimiento solar pasivo:

- Validación y calibración experimental. Construir un prototipo a escala real y ejecutar una campaña de medición ( $GHI/DNI/DHI$ ,  $T_a$ ,  $V_w$ ,  $T_{abs}$ ,  $T_{PCM}$ , par de giro y fricción) para cerrar el lazo con datos de campo. Esto permitirá estimar histéresis mecánica real, pérdidas por rozamiento y degradación óptica, hoy tratadas de forma agregada o asumidas en el modelo, y que el propio documento reconoce como limitaciones y trabajo futuro prioritario.
- Refinamiento de la ley de leva  $\phi(x)$ . Adoptar una meseta central y un tope angular moderado ( $\approx 50^\circ$ ) con rampas simétricas y banda de histéresis  $\Delta x$ , anclando  $x_0$  al percentil alto del stroke útil. Esta pauta —ya anticipada en el texto— reduce error en amanecer/atardecer, alinea la cinemática con la aceptación del CPC y estabiliza el mando

en horas energéticas.

- Extensión del modelo y cierre de brechas. Incluir (i) ensuciamiento óptico estacional y limpieza; (ii) tolerancias/holguras y fricción en el tren pistón–leva–eje; (iii) propiedades termofísicas no lineales del aire/PCM con bandas de incertidumbre; y (iv) validación con mallas 2D/axisimétricas para el PCM en regímenes críticos.
- Análisis de sensibilidad e incertidumbre. Realizar barridos sistemáticos (Monte Carlo/Latin Hypercube) sobre propiedades del PCM, albedo, parámetros del modelo de cielo,  $\Delta t$  y coeficientes convectivos, reportando bandas de confianza de los indicadores (energía neta FV, error de seguimiento).
- Optimización multiobjetivo. Plantear *max* energía anual sujeta a *min* esfuerzo del mecanismo y manufacturabilidad de la leva (radio de curvatura, continuidad  $C^1/C^2$ , materiales), con restricciones de aceptación óptica del CPC.
- Transferencia y replicabilidad geográfica. Aplicar el flujo de cálculo a otros sitios tropicales y sub-tropicales (distintos albedos, nubosidad y sazonalidad), aprovechando la capacidad de parametrización del sistema de códigos (tabla maestra de configuración cfg.).
- Ingeniería de producto y normatividad. Avanzar en diseño para fabricación y montaje (DFMA): selección de materiales resistentes a intemperie, sellos y baja fricción, anclajes para cargas de viento locales, y lineamientos de seguridad eléctrica/mecánica. Vincular estos entregables con los objetivos específicos del proyecto (capacidad de carga, dimensiones, proceso de manufactura preliminar) para acelerar transferencia tecnológica.
- Bloque FV y operación en red. Extender el análisis con pérdidas BOS (cables, inversor) y escenarios de red débil/aislada —sugeridos como evaluación tecnocosto futura— para traducir el resultado energético en métricas de proyecto (LCOE, payback).

- Para el análisis económico del proyecto se recomienda: (i) reducir sustancialmente el costo incremental de compra e instalación y su mantenimiento incremental, (ii) optimizar la ley de leva y la óptica para aumentar la captación en horas marginales, y (iii) actualizar el análisis con la tarifa efectiva del usuario y costos diferenciales precisos. Los criterios y definiciones de VPN, TIR y B/C siguen metodologías estándar de evaluación de proyectos.

En síntesis, el próximo ciclo debe combinar prototipo + medición + optimización sobre la base ya establecida por el modelo: un flujo reproducible, con verificación y trazabilidad, que compara fijo/ideal/mecánico y entrega indicadores anuales y mensuales listos para decisión.

**Referencias Bibliográficas**

- Al Mahdi, H., Leahy, P. G., Alghoul, M., & Morrison, A. P. (2024). A Review of Photovoltaic Module Failure and Degradation Mechanisms: Causes and Detection Techniques. In *Solar* (Vol. 4, Issue 1, pp. 43–82). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/solar4010003>
- Amalu, E. H., & Fabunmi, O. A. (2022). Thermal control of crystalline silicon photovoltaic (c-Si PV) module using Docosane phase change material (PCM) for improved performance. *Solar Energy*, 234, 203–221. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.02.001>
- Available Solar Radiation. (2013). In *Solar Engineering of Thermal Processes* (pp. 43–137). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118671603.ch2>
- Bhambare, P. (2020a). *A SOLAR PARABOLIC TROUGH CONCENTRATOR (PTC) MODEL USING MATLAB SIMULINK*.
- Bhambare, P. (2020b). *A SOLAR PARABOLIC TROUGH CONCENTRATOR (PTC) MODEL USING MATLAB SIMULINK*.
- Churchill, S. W., & Chu, H. H. S. (1975). Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a horizontal cylinder. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 18(9), 1049–1053. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(75\)90222-7](https://doi.org/10.1016/0017-9310(75)90222-7)
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). Solar Engineering of Thermal Processes. In *Solar Engineering of Thermal Processes: Fourth Edition*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118671603>

- Dutil, Y., Rousse, D. R., Salah, N. Ben, Lassue, S., & Zalewski, L. (2011). A review on phase-change materials: Mathematical modeling and simulations. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 15, Issue 1, pp. 112–130). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.06.011>
- Forristall, R. (2003). *Heat Transfer Analysis and Modeling of a Parabolic Trough Solar Receiver Implemented in Engineering Equation Solver*. <http://www.osti.gov/bridge>
- Gajic, M., Karwa, N., Mojiri, A., & Rosengarten, G. (2015). Modeling reflection loss from an evacuated tube inside a compound parabolic concentrator with a cylindrical receiver. *Optics Express*, 23(11), A493. <https://doi.org/10.1364/OE.23.00A493>
- INCROPERA, F. P., & Dewitt, D. P. (n.d.). *FUNDAMENTOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR*. Prentice Hall.
- INCROPERA, F. P., & DeWitt, D. P. (2002). *FUNDAMENTALS OF HEAT AND MASS TRANSFER* (5ed.). John Wiley.
- Jaramillo, O. (2011, November 29). *Tecnologías Solares de Mediana y Alta Temperatura - ppt descargar*. <https://slideplayer.es/slide/3871936/>
- Nazir, H., Batool, M., Bolivar Osorio, F. J., Isaza-Ruiz, M., Xu, X., Vignarooban, K., Phelan, P., Inamuddin, & Kannan, A. M. (2019). Recent developments in phase change materials for energy storage applications: A review. In *International Journal of Heat and Mass Transfer* (Vol. 129, pp. 491–523). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.126>
- Patankar, S. V. (1980). *Heat Conduction* (1st Edition, pp. 41–77). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482234213>
- Sistema de Coordenadas Cilíndricas - Diferencial de Volumen – GeoGebra*. (n.d.). Retrieved July 30, 2025, from <https://www.geogebra.org/m/XsrHbzmz>

- Tajik Jamalabad, M., Cortes, C., Pallarés, J., Gil, A., & Arauzo, I. (2024). *Comparison of Different Numerical Models for Solidification of Paraffin-Based PCMs and Evaluation of the Effect of Variable Mushy Zone Constant*. <https://doi.org/10.20944/preprints202411.0743.v1>
- Voller, V. R., & Prakash, C. (1987). A fixed grid numerical modelling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 30(8), 1709–1719. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(87\)90317-6](https://doi.org/10.1016/0017-9310(87)90317-6)
- Yungho, E. B., Nfah, E. M., & Ecladore, T. T. A. (2024). Determination of PV Module Potential Using Estimates of Hourly Irradiance and Temperature for Bambili. *International Journal of Photoenergy*, 2024. <https://doi.org/10.1155/2024/7987760>

**Apéndice A**

**A.1. Geometría solar y proyecciones**

**Radiación Extraterrestre y Geometría Solar**

La geometría solar describe la posición relativa del sol con respecto a un observador terrestre mediante un conjunto de ángulos bien definidos; los cuales constituyen la base para proyectar la irradiancia sobre cualquier superficie receptora. Su correcto manejo requiere distinguir entre la rotación diaria de la Tierra, la inclinación y la orientación particular de la superficie a estudiar.

En consecuencia, los cuatro ángulos principales  $\delta$ ,  $\omega$ ,  $\theta_z$  y  $\theta$  combinados con la latitud  $\varphi$ , la inclinación  $\beta$  y los azimuts  $\gamma_s$  y  $\gamma$  describen completamente la interacción geométrica sol-superficie ver la Tabla 2. El objetivo operacional del seguidor 2-DOF es mantener  $\theta \approx 0^\circ$ .

**Tabla 2**

*Ecuaciones de los Principales Parámetros que Definen la Posición Solar*

<b>Parámetro</b>	<b>Expresión</b>	<b>Significado físico</b>
Flujo extraterrestre	$I_{ext} = G_{sc} (1 + 0.033 \cos(\frac{360 n}{365}))$	Cantidad de energía solar que llega por unidad de área a la parte exterior de la atmósfera terrestre.
Declinación $\delta$	$\delta = 23.45^\circ + \sin \left[ \frac{360(284 + n)}{365} \right] [^\circ]$	Ángulo entre el plano ecuatorial terrestre y la línea que une el centro de la Tierra con el centro del Sol; varía estacionalmente y determina la altura máxima diaria del astro.
Ángulo horario $\omega$	$\omega = 15(HS - 12)[^\circ]$	Desplazamiento angular, en sentido horario, del Sol con respecto al meridiano local; cada hora solar equivale a $15^\circ$ .
Ángulo cenital $\theta_z$	$\cos \theta_z = \cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta [^\circ]$	Complemento del ángulo de elevación solar; mide la separación entre el rayo incidente y la vertical local.
Ángulo de incidencia $\theta$	$\cos \theta = \cos \theta_z \cos \beta + \sin \theta_z \sin \beta \cos(\gamma_s - \gamma)[^\circ]$	Ángulo entre el haz solar y la normal a la superficie receptora; su minimización ( $\theta \approx 0^\circ$ ) maximiza la captación directa.

*Nota.* Parámetros para la definición de la posición solar con su equivalente físico. La información ha sido compilada a partir de la revisión (Duffie & Beckman, 2013)

### **Radiación y Transposición a Planos Inclinados**

La irradiancia extraterrestre sobre el plano horizontal,  $I_o(G_o)[W m^{-2}]$ , se obtiene al proyectar la irradiancia normal al haz  $I_{ext} (G_{ext})$ , donde  $\theta_z$  representa el ángulo cenital:

$$G_o = G_{ext} \cos \theta_z \quad (23)$$

Con base en esta magnitud de referencia se define el índice de claridad horario, el cual permite caracterizar la transparencia atmosférica y separar la componente difusa cuando solo se dispone de la irradiación global horizontal GHI medida (Duffie & Beckman, 2013):

$$k_t = \frac{GHI}{G_o} \quad (24)$$

Para esa separación se emplea la correlación horaria de Erbs, que expresa la razón  $DHI/GHI = f(k_t)$  mediante tramos suaves: valores bajos de  $k_t$  describen cielos muy nublados (predominio difuso), rangos intermedios corresponden a condiciones mixtas y valores altos reflejan cielos despejados (predominio directo). Una vez estimada DHI, la irradiancia directa normal se calcula por geometría de proyección como  $DNI = (GHI - DHI)/\cos \theta_z$ , garantizando consistencia dimensional al trabajar siempre en unidades de potencia (Duffie & Beckman, 2013)..

### **Estimación de la Fracción Difusa**

En primer lugar, cuando el monitoreo de campo suministra únicamente la irradiancia global horizontal  $GHI$ , necesitamos separar sus componentes para alimentar los balances ópticos y térmicos del modelo. No obstante, medir por separado la irradiancia difusa  $DHI$  exige un piranómetro sombreado, dispositivo que raras veces acompaña a las estaciones convencionales; por tanto, empleamos correlaciones de fraccionamiento que relacionan el índice de claridad  $k_t$  con la razón difusa  $DHI/GHI$ .

Para superficies inclinadas se adopta una descomposición mínima y suficiente. La radiación total que incide sobre una superficie inclinada se descompone en tres contribuciones principales.

Esta descomposición se expresa generalmente como:

$$G_T = G_{b,T} + G_{d,T} + G_{r,T} \quad (25)$$

donde la componente de haz se obtiene directamente por proyección,

$$G_{b,T} = DNI \cos \theta \quad (26)$$

la componente reflejada se aproxima con albedo isotrópico del entorno,

$$G_{r,T} = \frac{GHI \rho_g (1 - \cos \beta)}{2} \quad (27)$$

y la componente difusa se evalúa con el modelo anisotrópico de Pérez por su buen desempeño en latitudes tropicales (“Available Solar Radiation,” 2013):

$$G_{d,T} = DHI \left[ (1 - F_1) \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + F_1 \frac{\max(0, \cos \theta)}{\max(\cos 85^\circ, \cos \theta_z)} + F_2 \sin \beta \right] \quad (28)$$

Los coeficientes  $F_1$  y  $F_2$  se obtienen de tablas en función de dos parámetros atmosféricos compactos: la claridad del cielo  $\varepsilon$  y el brillo  $\Delta$ , definidos a partir de DHI, DNI,  $\theta_z$  y  $G_{\text{ext}}$ . Con ello, la distribución angular de la difusa queda descrita sin introducir complejidad innecesaria y se preserva la sensibilidad a turbidez y nubosidad.

El conjunto  $\{k_t, DHI, DNI, \theta, \theta_z, \beta, \gamma, \rho_g\}$  resulta suficiente para alimentar balances ópticos y térmicos del modelo, evitando desarrollos teóricos redundantes y priorizando las expresiones directamente utilizables en dimensionamiento, simulación y validación experimental.

## A.2 Red Térmica Equivalente

Se presenta un modelo térmico 1-D, en coordenada radial, con el fin de cuantificar cómo la potencia absorbida en el tubo se reparte entre la transferencia útil hacia el medio interno y las

pérdidas al entorno. Se asume simetría axial, propiedades evaluadas a temperatura de película y un receptor formado por tubo metálico (absorbedor) alojado en una cubierta de vidrio evacuada; con ello se reproduce el circuito térmico equivalente.

Conducción Transitoria (1 ↔ 2). En el análisis numérico se adoptó un modelo radial unidimensional de conducción transitoria para la cera parafínica contenida en el receptor. El cambio de fase se incorporó mediante el método de capacidad calorífica aparente, con propiedades termo-dependientes y distribución continua de la entalpía de fusión en el intervalo  $[T_{m,low}, T_{m,high}]$ . Se explicará más a fondo este fenómeno en la sección 0.

En el exterior, el intercambio con el ambiente se representa mediante una red de resistencias dispuestas en serie y paralelo a lo largo de la ruta: superficie externa del absorbedor → cara interna del vidrio → cara externa del vidrio, desde donde parten dos ramas: convección hacia aire circundante y radiación hacia cielo efectivo. Las expresiones empleadas se resumen así:

Conducción en la Pared del Absorbedor (2 → 3). A través de la pared metálica; menor que las resistencias convectivas y radiativas externas, pero necesaria para estimar las temperaturas superficiales. La resistencia depende del espesor y de la conductividad del tubo metálico, incluidos en el término

$$R_{cond} = \frac{D_o \ln \left( \frac{D_o}{D_i} \right)}{2k_{tube}} \quad (29)$$

Radiación entre Cubierta - Absorbedor (3 ↔ 4) (Principal). Es la principal forma de pérdida en el espacio anular evacuado entre el absorbedor y la cubierta de vidrio. La tasa de transferencia de calor por radiación por unidad de longitud definida como,  $Q_{rad,abs-cov}^0$ , entre el absorbedor (a temperatura  $T_{abs}$ , diámetro exterior  $D_{abs,o}$ , emisividad  $\varepsilon_{abs}$ ) y la cubierta de vidrio (a temperatura  $T_{cov}$ , diámetro interior  $D_{cov,i}$ , emisividad  $\varepsilon_{cov}$ ) se puede expresar como:

$$Q_{0 \cdot rad,abs-cov} = \frac{\sigma \pi D_{abs,o} (T_{abs}^4 - T_{cov}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{abs}} + \frac{1 - \varepsilon_{cov}}{\varepsilon_{cov}} \left( \frac{D_{abs,o}}{D_{cov,i}} \right)} \quad (30)$$

Conducción en la Cubierta de Vidrio (4 → 5). Pese al bajo espesor, esta ruta existe, sin embargo, no se incluye en el balance global  $U_o$ , luego se desprecia su valor. Convección Externa Vidrio - Aire (5 ↔ 6). El coeficiente de transferencia de calor por convección ( $h_w$ ) depende fuertemente de la velocidad del viento ( $V_w$ ) y del diámetro exterior de la cubierta de vidrio ( $D_{cov,o}$ ). Una correlación común para  $h_w$  es de la forma  $h_w = a V_w^b D_{cov,o}^c$ , donde  $a$ ,  $b$ ,  $c$  son constantes empíricas. Para un cilindro largo en cruce de viento el coeficiente convectivo se evalúa con la correlación universal de (Churchill & Chu, 1975):

$$Nu = \frac{0.3 + 0.62 Re^{\frac{1}{3}} Pr^{\frac{1}{4}}}{\left[ 1 + \left( \frac{0.4}{Pr} \right)^{\frac{1}{4}} \right]^{\frac{1}{4}}} \left[ 1 + \left( \frac{Re}{2.82 \times 10^5} \right)^{\frac{5}{8}} \right]^{\frac{4}{5}}, \quad (31)$$

$$h_{out} = \frac{Nu k_{air}}{D_{co}}.$$

Por ejemplo, en campos solares donde la velocidad media del viento rara vez supera 8 [m s<sup>-1</sup>], (Forristall, 2003) propone la cota práctica

$$h \geq 4 + 4.0 V_w [W m^{-2} K^{-1}] \quad (32)$$

que es la base del límite inferior utilizado en esta tesis.

Radiación Cubierta - Cielo (5 ↔ 7). La cubierta de vidrio también irradia calor hacia el cielo (a una temperatura efectiva  $T_{cielo}$ ) y hacia el entorno circundante. La pérdida por radiación desde la cubierta al ambiente es:

$$Q_{loss,rad,cov-amb} = A_{cov,o} \sigma \varepsilon_{cov} (T_{cov}^4 - T_{sky}^4) \quad (33)$$

Representarlo como una resistencia en paralelo conduce a

$$h_{rad,ca} = \varepsilon_{cov} \sigma (T_{cov}^2 - T_{sky}^2) (T_{cov} + T_{sky}), \quad (34)$$

La temperatura del cielo  $T_{sky}$  suele ser inferior a  $T_{amb}$  y puede estimarse con correlaciones como (con temperaturas en Kelvin).

$$T_{cielo} = 0.0552 \cdot T_{amb}^{1.5} \quad (35)$$

### A.3 Coeficiente Global de Pérdidas de Calor ( $U_L$ )

El coeficiente global de pérdidas resume toda la energía que el receptor —formado por el tubo metálico absorbedor y su envolvente de vidrio evacuada— cede al ambiente por convección y radiación. Se define con respecto a un área de referencia  $A_{ref}$  y una diferencia de temperatura característica:

$$P_{th,loss} = U_L A_{ref} (T_{fuente} - T_{amb}) \quad (36)$$

La conductancia total por unidad de área en la superficie externa del vidrio resulta

$$U_o = \left[ \frac{1}{h_{rad,ac}} + R_{cond,abs} + R_{cond,glass} + \frac{1}{h_{out} + h_{rad,ca}} \right]^{-1} \quad (37)$$

Se desestima la resistencia conductiva de la pared metálica (delgada y altamente conductora), el circuito térmico mostrado en la Figura 3 se reduce a tres pasos en serie

$$U_o = \left[ \frac{1}{h_{rad,ac}} + \frac{1}{h_{out} + h_{rad,ca}} \right]^{-1} \quad (38)$$

Finalmente, el  $U_L$  se obtiene ajustando  $U_o$  al área de referencia elegida ( $A_{ref} = A_{ap}$  en este trabajo) sobre el área de referencia  $A_{ref}$ , el nuevo coeficiente global es

$$U_L = U_o \frac{A_{ext}}{A_{ref}} \quad (39)$$

Donde  $A_{ext} = \pi D_{cov,o} L$  es el área exterior del receptor. Así, el coeficiente  $U_L$  pasa a reflejar todas las vías de disipación térmica —radiación, convección y conducción— ofreciendo un marco teórico coherente con cualquier nivel de detalle que se requiera.

#### A.4 Conducción Radial y Fusión del PCM Alrededor del Absorbedor

El tubo metálico absorbedor actúa como núcleo calefactor y contenedor de un cilindro de cera parafina (Phase-Change Material, PCM). La expansión volumétrica asociada a la fusión de la cera es el “resorte” que acciona el mecanismo pasivo de doble eje. Modelar con precisión la magnitud y el ritmo de esa expansión exige describir tres fenómenos acoplados:

- la difusión de calor a través del PCM sólido/líquido,
- la absorción de calor latente durante la transición de fase, y
- la interacción termodinámica con el flujo impuesto en la pared interior  $q''_{wall}$ .

#### Fundamentos Termofísicos

Cuando el metal del tubo absorbedor alcanza temperaturas superiores al intervalo de fusión  $[T_{m,low}, T_{m,high}]$ , el flujo  $q''_{wall}$  se propaga radialmente y crea una zona “mushy” en la que coexisten sólido y líquido. A escala de ingeniería, por economía computacional, y por la esbeltez del tubo absorbedor, para este estudio, la variación axial del gradiente de temperatura es despreciable frente a la radial. Por ello puede modelarse la transferencia de calor con la ecuación de energía en coordenadas cilíndricas 1-D (INCROPERA & Dewitt, n.d.) (Patankar, 1980).

$$\rho C_{app}(T) \frac{\partial}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (k(T)r \frac{\partial T}{\partial r}), \quad (40)$$

Donde  $\rho [kg m^{-3}]$  es la densidad de la cera,  $k(T) [W m^{-1} K^{-1}]$  su conductividad térmica y  $C_{app}(T) [J m^{-3} K^{-1}]$  la capacidad calorífica aparente que incluye la entalpía de fusión  $L_h$  a través de (41) y  $r$  es la coordenada radial ( $0 \leq r \leq R$ ).

### Método de Capacidad Calorífica Aparente.

Calcular explícitamente la posición del frente de fusión (problema de Stefan) requiere remallados o mallas móviles. Una alternativa robusta es reemplazar la discontinuidad de entalpía por una propiedad efectiva que “reparte” el calor latente en un intervalo pequeño alrededor de  $T_m$ .

Así (Patankar, 1980; Tajik Jamalabad et al., 2024),

$$C_{app}(T) = (1 - \gamma)c_{p,s} + \gamma c_{p,l} + L_h \frac{d\gamma}{dT}, \quad (41)$$

Con fracción líquida (Tajik Jamalabad et al., 2024)

$$\gamma(T) = \begin{cases} 0, & T < T_{m,low} \\ \frac{T - T_{m,low}}{T_{m,high} - T_{m,low}}, & T_{m,low} \leq T \leq T_{m,high} \\ 1, & T > T_{m,high} \end{cases} \quad (42)$$

La derivada

$$\frac{d\gamma}{dT} = \frac{1}{T_{m,high} - T_{m,low}} \quad (43)$$

distribuye la entalpía de fusión  $L_h$  en el rango de cambio de fase, evitando así frentes abruptos (Patankar, 1980).

### Mallado Radial y Validación Geométrica

El sub-procedimiento que genera la malla que permite resolver la conducción radial y el proceso de fusión/solidificación del PCM dentro del tubo absorbedor. Su formulación se basa en la discretización conservativa del método de volúmenes finitos (FVM) en coordenadas cilíndricas, garantizando que el balance de energía se cumpla celda a celda y que el volumen total modelado coincida con la geometría real (ver Figura 28).

### Figura 28

Representación Gráfica del Diferencial de Volumen con Sistema de Coordenadas Cilíndricas



área de la cara

$$A_{f,i} = 2\pi r_{f,i} L \quad (46)$$

volumen

$$V_i = \pi(r_{f,i+1}^2 - r_{f,i}^2)L \quad (47)$$

### Esquema de Volumen Finito implícito

En cada paso  $\Delta t$  la integral de la (40) sobre  $V_i$  conduce a la forma discreta:

$$a_W T_{i-1}^{n+1} + a_P T_i^{n+1} + a_E T_{i+1}^{n+1} = b_i \quad (48)$$

con (Patankar, 1980).

$$a_P = \frac{(\rho C_{app,i} V_i)}{\Delta t} + a_W + a_E,$$

$$a_E = \frac{k_{f,i} A_{f,i}}{\delta} r_{c,i}, \quad a_W = a_E, \quad (49)$$

$$b_i = \frac{\rho C_{app,i} V_i}{\Delta t} T_i^n.$$

Las caras externas (índice  $N$ ) añaden el término de flujo impuesto  $b_N \leftarrow b_N + q''_{wall} A_{f,N+1}$ .

### Solución Numérica y Criterios de Calidad

Antes de resolver el balance térmico transitorio en el cilindro de cera se discretiza la ecuación de conducción en coordenadas radiales con un esquema implícito de volúmenes finitos. El paso temporal convierte el término  $\frac{\partial T}{\partial t}$  en una fuente y conduce a un sistema lineal tridiagonal

$$AT^{n+1} = b \quad (50)$$

donde los coeficientes de cada fila incluyen la capacidad calorífica aparente  $C_{app}$ , las conductancias radiales  $a_E$ ,  $a_W$  y el flujo entrante en la pared  $q''_{wall}$ . La estructura tridiagonal proviene de que cada celda únicamente intercambia calor con sus dos vecinas inmediatas.

**Solución Implícita de MATLAB.**

Para resolver el sistema se usa MATLAB®, la malla radial se monta como una matriz tridiagonal dispersa, pero la resolución se delega en la instrucción de MATLAB, con una instrucción sencilla como  $T_n = A \setminus S_u$ . El operador “\” (mldivide) detecta que  $A$  es *sparse* y llama internamente a un factorizador LU multifrontal (UMFPACK en las versiones actuales) para resolver el sistema  $A x = b$ .

## Apéndice B

### Script Principal para Simulación Anual de Colector CPC + Síntesis De Leva

```

% =====
% SCRIPT PRINCIPAL PARA SIMULACIÓN ANUAL DE COLECTOR PTC + SÍNTESIS DE LEVA
% =====
% Objetivo
% Ejecuta una simulación anual (8760 h) de un colector parabólico lineal
% con dos modos: flujo de HTF ('flow') o PCM estático ('static_wax').
% Además, sintetiza una ley de leva cilíndrica para un mecanismo pistón-palanca
% y opcionalmente realiza una re-síntesis isotónica data-driven.
%
% Entradas (archivos/recursos):
% - 'DATOS.xlsx' (sin encabezados): [Ta(°C), GHI(W/m^2), Vw(m/s)] por hora.
% - Funciones: ptc_model_step.m, cpc_involute_gap.m, validateConfiguration.m,
%             buildCamLaw.m, calculate_pv_energy.m, plot_pv_comparison.m
%
% Supuestos clave:
% - Unidades SI (°C→K cuando aplica). Ángulos: especificar [deg] o [rad].
% - IAM (cfg.opt.IAMfun) espera ÁNGULO EN [deg] (coeficientes empíricos).
% - Datos anuales con 8760 filas (si difiere, ver notas de robustez).
%
% Salidas:
% - Estructura 'resultados' (campo por hora).
% - Reportes FV y CSV con trayectoria 3D de la leva ('cam_path.csv' en mm).
%
% Uso canónico:
% 1) Coloque este script y las funciones dependientes en el path.
% 2) Asegure 'DATOS.xlsx' en el directorio actual.
% 3) Ejecute: run('run_simulation_main.m')
% =====

clear; clc; close all;
ts = @(C) char(datetime('now','Format','HH:mm:ss')); % devuelve 'HH:mm:ss' como char

fprintf(['%s] Pre-flight checks...\n',ts(C)];

% Archivos de datos
fileName = 'DATOS.xlsx';
if ~isfile(fileName)
    error('No se encontró el archivo de datos "%s". Ubíquelo en el directorio actual.',
fileName);
end

% Funciones críticas
mustExistFcn = {'ptc_model_step', 'cpc_involute_gap', 'validateConfiguration', ...
                'buildCamLaw', 'calculate_pv_energy', 'plot_pv_comparison', ...
                'solarAngles'};
for f = mustExistFcn
    if exist(f{1}, 'file') ~= 2
        error('Falta la función requerida: %s.m en el path.', f{1});
    end
end

```

```
end
end
```

### Carga de Datos (Ta, Ghi, Vw)

```
fprintf(['%s] Leyendo y procesando "%s"... \n', ts(), fileName);

% Índices de columnas del Excel (sin encabezados)
columna_temp_idx = 1;           % Índice de la columna de temperatura ambiente Ta [°C]
columna_ghi_idx = 2;           % Índice de la columna de irradiancia global horizontal (GHI
                                [W/m^2])
columna_viento_idx = 3;        % Índice de la columna de velocidad de viento Vw [m/s]

data_matrix = readmatrix(fileName);           % Lee la matriz de datos desde el archivo Excel
sin encabezados
if size(data_matrix,2) < 3
    error('%s" debe tener al menos 3 columnas: Ta(°C), GHI(W/m^2), Vw(m/s).', fileName);
end

cfg = struct();
cfg.data.GHI = data_matrix(:, columna_ghi_idx);           % GHI en W/m^2
cfg.data.Ta = data_matrix(:, columna_temp_idx) + 273.15; % Temperatura ambiente en K
(+273.15 para convertir de °C)
cfg.data.Vw = data_matrix(:, columna_viento_idx);        % Velocidad de viento en m/s

num_horas = 8760; % Mantengo año civil; si tus datos difieren, normaliza fuera.
if size(data_matrix,1) < num_horas
    warning('DATOS.xlsx tiene %d filas, menor a 8760. El bucle anual asume 8760.',
size(data_matrix,1));
end
disp('Datos cargados.');
```

### Configuración de Simulación (CFG)

```
simulation_mode = 'static_wax'; % Modo de operación: 'flow' para flujo forzado, 'static_wax'
para PCM
tracking_mode = 'tracking';     % Modo de seguimiento: Opciones: 'tracking' seguimiento solar o
'stationary'
cfg.site.tracking_mode = tracking_mode;

% 2.2 Geometría & óptica (CPC + tubo)
cfg.geom.L = 0.5;               % [m] longitud de tubo receptor
cfg.geom.Di = 0.066;           % [m] diámetro interno absorbente
cfg.geom.Do = 0.070;           % [m] diámetro externo absorbente
cfg.geom.Dci = 0.115;          % [m] diámetro interno cubierta vidrio
cfg.geom.Dco = 0.125;          % [m] diámetro externo cubierta vidrio
cfg.geom.thetaA = deg2rad(30); % [rad] ángulo de aceptación CPC
cfg.geom.Npts = 400;           % [-] resolución discretización CPC
```

```

cfg.geom.r      = cfg.geom.Di/2;
cfg.geom.lg     = cfg.geom.Dco/2 - cfg.geom.r;    % [m] espesor vidrio (geométrico simplificado)

% Geometría CPC: devuelve apertura efectiva y metadatos
[XYright, XYleft, metaCPC] = cpc_involute_gap(cfg.geom); % #ok<ASGLU>
cfg.geom.W_a    = metaCPC.W_a;                  % [m] ancho de apertura

% Propiedades térmicas básicas del conjunto tubo+vidrio
cfg.geom.k_tube = 16;          % [W/m·K]
cfg.geom.k_glass = 1.0;       % [W/m·K]
cfg.geom.eps_abs = 0.96;      % [-] emisividad absorbente
cfg.geom.eps_cov = 0.95;      % [-] emisividad cubierta

% Volumen de PCM (cilindro interior)
% Suponemos que el PCM ocupa el interior del tubo de diámetro Di y longitud L:
cfg.geom.V_pcm = (pi/4) * cfg.geom.Di^2 * cfg.geom.L; % [m^3]

% Coeficientes ópticos de la envolvente (conjunto de plásticos, limpiezas, recubrimientos)
cfg.opt.rho     = 0.88;        % reflectancia espejo
cfg.opt.tau     = 0.95;        % transmitancia cubierta
cfg.opt.alpha   = 0.96;        % absortancia tubo
cfg.opt.gamma   = 0.95;        % factor sombras/pérdidas geométricas
cfg.opt.cclean  = 0.90;        % limpieza efectiva

% IAMfun: función de corrección de ángulo de incidencia => devuelve factor
% [-] espera  $\theta$  en [deg]
cfg.opt.IAMfun = @(theta_deg) (1 - 5.25e-4*theta_deg - 2.859e-5*theta_deg.^2);

% Parámetros del sitio
cfg.site.lat    = 6.99;        % [grados]
cfg.site.lonLoc = -73.06;      % [grados]
cfg.site.lonSTD = -75;         % [grados]
cfg.site.beta   = 7;           % [grados] Ángulo de inclinación del colector respecto a la
horizontal
cfg.site.albedo = 0.2;         % [-] Reflectividad del suelo (0.2 es un valor típico)
cfg.site.surface_az = 0;       % [grados] Azimut de la superficie. 0=Sur, -90=Este, 90=Oeste.

% Parámetros numéricos para iteración de equilibrio térmico
cfg.num.iterTo1 = 1e-3;        % [-]
cfg.num.maxIter = 150;         % [-]
cfg.num.Tsky_fun = @(Tak)0.0552*Tak.^1.5; % [K]→[K] (cielo efectivo)

cfg.opt.minIrradiance_wm2 = 10; % [W/m^2] umbral de "sol"
cfg.opt.minIrradiance     = cfg.opt.minIrradiance_wm2 * ...% [W] (lo que usa ptc_model_step)
                           (metaCPC.W_a * cfg.geom.L); % Ap = W_a * L
cfg.num.dt = 1800;           % La discretización de tiempo es de 30 min

% 2.3: Parámetros del Fluido (HTF/PCM) dependientes del modo
cfg.pcm = struct();          % limpia/crea la estructura pcm
if strcmpi(simulation_mode, 'flow')
    % ---- Modo FLOW (agua) ----
    cfg.htf.mode = 'flow';
    cfg.htf.mdot = 0.5;      % [kg/s]
    T_in_inicial = 20 + 273.15; % [K]

```

```

cfg.htf.T_in = repmat(T_in_inicial, 8760, 1);

% Las funciones anónimas toman la temperatura en KELVIN (T_k), pero
% internamente usan Celsius (T_c = T_k - 273.15) si la fórmula lo requiere.

cfg.htf.rho = @(T_k) 1000.84 - 0.0780665*(T_k-273.15) - 0.00352912*(T_k-273.15).^2; %
Densidad (rho) [kg/m^3]
cfg.htf.k = @(T_k) 0.547097 + 0.00215463*(T_k-273.15) - 0.00000983526*(T_k-273.15).^2; %
Conductividad Térmica (k) [W/m·K]
cfg.htf.mu = @(T_k) 0.00177144 - 0.0000543981*(T_k-273.15) + 9.62705E-07*(T_k-273.15).^2 ...
- 8.88905E-09*(T_k-273.15).^3 + 3.22647E-11*(T_k-273.15).^4; %
Viscosidad Dinámica (mu) [Pa·s]
cfg.htf.cp = @(T_k) 4181.3 - 0.1*(T_k-273.15); %
Calor específico aproximado (lineal en T_c) [J/kg·K]
cfg.htf.Pr = @(T_k) ( cfg.htf.mu(T_k) .* cfg.htf.cp(T_k) ) ./ cfg.htf.k(T_k); %
Número de Prandtl
cfg.pcm = []; % vacío en modo FLOW
else
% ---- Modo STATIC_WAX (PCM) ----
disp("Configurando modo: 'static_wax' con propiedades de CERA.");

cfg.htf.mode = 'static_wax';
cfg.htf.mdot = 0; % sin flujo de HTF
T_in_inicial = 20 + 273.15; % [K]
cfg.htf.T_in = repmat(T_in_inicial, 8760, 1);

% --- Propiedades Térmicas de RT50 (Rubitherm®) - rangos típicos
cfg.pcm.T_melt_low = 48 + 273.15; % 48°C en [K]
cfg.pcm.T_melt_high = 52 + 273.15; % 52°C en [K]
cfg.pcm.L_h = 160e3; % 160 [kJ/kg] → [J/kg]
cfg.pcm.rho = 820; % [kg/m^3]
% Conductividad térmica k(T): sólido ≈0.26, líquido ≈0.20, lineal en fusión
cfg.pcm.k = @(T) ...
(T <= cfg.pcm.T_melt_low) .* 0.26 + ...
(T >= cfg.pcm.T_melt_high) .* 0.20 + ...
(T > cfg.pcm.T_melt_low & T < cfg.pcm.T_melt_high) .* ...
(0.26 - (0.26-0.20)*(T-cfg.pcm.T_melt_low)/(cfg.pcm.T_melt_high-cfg.pcm.T_melt_low));
% [W/m·K], constante
% Calor específico sólido y líquido (sensibles)
cfg.pcm.cp_s = 1790; % [J/kg·K] sólido (≈1.79 [kJ/kgK])
cfg.pcm.cp_l = 2380; % [J/kg·K] líquido (≈2.38 [kJ/kgK])
cfg.pcm.Ra_critical = 1e5; % [-] Número de Rayleigh crítico
% (El solver usa cp_s y cp_l + L·dy/dT para manejar latente)
% Propiedades para convección natural interna en el PCM
cfg.pcm.beta = @(T) 1.4e-3 * ones(size(T)); % coef. expansión [1/K]
constante
cfg.pcm.nu = @(T)5e-6 * ones(size(T)); % viscosidad cinemática
[m^2/s], constante
% Difusividad térmica α = k / (ρ·cp_eff). Aquí se usa cp_l como aproximación.
cfg.pcm.alpha = @(T)cfg.pcm.k(T) ./ (cfg.pcm.rho*cfg.pcm.cp_l); % [m^2/s]

% Expansión volumétrica (mecánica)
cfg.pcm.beta_s = 1.4e-3; % Coef. expansión volumétrica sólido [1/K]
cfg.pcm.beta_l = 1.4e-3; % Coef. expansión volumétrica líquido [1/K]

```

```

cfg.pcm.rho_s = 880;      % Densidad sólido a ~20°C [kg/m^3]
cfg.pcm.rho_l = 760;      % Densidad líquido a ~50-80°C [kg/m^3]
cfg.pcm.T_ref = 293.15;   % Temp. de referencia para expansión [K] (≈20 °C)
end

% Parámetros mecánicos del mecanismo piston-palanca (cam)
cfg.mechanic.cam_radius = 0.025; % [m] radio base leva
R = cfg.mechanic.cam_radius;      % robustez

if ~(isfield(cfg.mechanic,'cam_radius') && cfg.mechanic.cam_radius > 0)
    R = 0.025; warning('Usando cam_radius=25 mm (defecto). Defina cfg.mechanic.cam_radius.');
```

```

end
d_piston = 0.05;          % diámetro externo del pistón [m]
cfg.mechanic.piston_area = pi*(d_piston/2)^2; % [m^2]
cfg.mechanic.r_eccentric = 0.02; % distancia pivote-pistón en reposo [m]

% 2.5: Validación general de cfg
validateConfiguration(cfg); % Verifica exhaustivamente la estructura cfg

% 2.6 Síntesis inicial de leva (cam law)
disp('Sintetizando leva cilíndrica (cam law)...');
% Unificar límite angular para TODA la cadena
cfg.cam.psi_limit_deg = 70; % o el que sea físicamente realista (75-85)
cfg.cam = buildCamLaw(cfg); % Debe devolver LUTs monótonas phi↔x
disp('Leva creada.');
```

```

% 2.7 Panel FV (Jinko 72HL4-(V) 575W) – parámetros básicos
cfg.pv.P_pico = 575;      % [W] potencia pico (datasheet)
cfg.pv.NOCT = 45;        % [°C] NOCT
cfg.pv.gamma = -0.0030; % [1/°C] coef. temp. de Pmax (-0.30%/°C)
cfg.pv.Area = 2.58;      % [m^2] 2278 x 1134 mm

% Toggle: re-síntesis isotónica (default = ON para replicar tu flujo)
cfg.cam.do_isotonic_resynthesis = true;
```

### Bucle de Simulación Anual

```

fprintf('%s] Iniciando simulación anual (%s, %s)... \n', ...
        ts(), simulation_mode, tracking_mode);

% Campos a almacenar (si el solver no los entrega, se dejan en 0/NaN)
fieldNames = { ...
    'T_out', 'Q_u', 'eta_c', 'eta_o', 'U_L', 'T_abs_med', ...
    'dV', 'liquid_fraction', 'DNI', 'DHI', 'P_abs', 'theta', 'theta_z', ...
    'h_in', 'h_out', 'U_o', 'F_R', 'NTU', 'expansion', 'angle', ...
    'T_abs_end', 'DeltaT_end', 'energy_error', 'q_wall_flux_last', 'psi_ideal', ...
};

resultados = struct();
for i = 1:numel(fieldNames)
    resultados.(fieldNames{i}) = zeros(num_horas,1);
```

```

end

T_estado_actual = T_in_inicial; % [K] temperatura de arranque Línea anterior
tic;
iff = @(cond,a,b) cond.*a + (~cond).*b; % ternario numérico: devuelve 'a' si cond, si no 'b'
for k = 1:num_horas
    % ptc_model_step puede devolver (out_hora, state) – el estado no se usa aquí
    [out_hora, ~] = ptc_model_step(cfg, T_estado_actual, k);

    % Asignación segura campo a campo
    for i = 1:length(fieldNames)
        fn = fieldNames{i};
        if isfield(out_hora, fn)
            % Esta es la línea que faltaba. Define 'n'.
            n = numel(out_hora.(fn));
            % Este 'if' ahora puede usar 'n' sin errores.
            if n ~= 1
                error('El campo "%s" devuelve %d elementos en la hora %d. Se esperaba 1.', fn, n,
k);
            end
            resultados.(fn)(k) = out_hora.(fn);
        end
    end

    % Señales derivadas (NaN-seguras)
    if isfield(out_hora, 'dv')
        resultados.expansion(k) = out_hora.dv;
    else
        resultados.expansion(k) = NaN;
    end

    if isfield(out_hora, 'theta_mech') && isfinite(out_hora.theta_mech)
        resultados.angle(k) = rad2deg(out_hora.theta_mech);
    else
        resultados.angle(k) = NaN;
    end

    % Actualizar el estado para la siguiente hora
    T_estado_actual = out_hora.T_out;

    % Imprime un mensaje cada 600 horas (24*25) para ver por dónde va la simulación
    if mod(k, 24*25) == 0
        fprintf('Hora %d de %d completada...\n', k, num_horas);
    end
end

% Imprime un mensaje de tiempo total de la simulación
tiempo_total = toc;
fprintf('Simulación anual completada en %.2f segundos.\n', tiempo_total);

```

### Postproceso Básico (Tablas, Ventanas de Tiempo, Señales Derivadas)

```

resultados_anuales = struct2table(resultados);

% Desplazamiento lineal del pistón:  $x = \Delta V / A_{\text{piston}}$ 
resultados_anuales.X_piston = resultados_anuales.expansion / cfg.mechanic.piston_area;

% Ventana de una semana (día escrito por el usuario → 7 días)
% === Selección automática de una semana con horas útiles ===
N = height(resultados_anuales);           % normalmente 8760
dias_tot = ceil(N/24);

% "Sol útil": potencia absorbida razonable y sol sobre el horizonte
Pabs_max = max(resultados_anuales.P_abs, [], 'omitnan'); % robusto
mask_sol = (resultados_anuales.P_abs > 0.10*Pabs_max) & (resultados_anuales.theta_z < 88);

% Si no hay suficientes horas útiles, cae al día 122 como antes
if nnz(mask_sol) < 24
    dia_inicio_semana = 122;
else
    % escanea días y elige el inicio de 7 días con más horas útiles
    mejor_score = -Inf;
    dia_inicio_semana = 122; % fallback
    for d = 1 : max(1, dias_tot-6)
        h1 = (d-1)*24 + 1;
        h2 = min(h1 + 7*24 - 1, N);
        score = nnz(mask_sol(h1:h2));
        if score > mejor_score
            mejor_score = score;
            dia_inicio_semana = d;
        end
    end
end
dias_a_graficar = 7;
hora_inicio = (dia_inicio_semana-1)*24 + 1;
hora_fin = min(hora_inicio + dias_a_graficar*24 - 1, N);
rango_horas = hora_inicio:hora_fin;
rango_horas = rango_horas(rango_horas >= 1 & rango_horas <= N);
assert(~isempty(rango_horas), ...
    sprintf('La ventana seleccionada (%d..%d) no interseca [1,%d].', hora_inicio, hora_fin, N));

% Extractos (real(Se extrae de la tabla los vectores de interés))
T_out_semana = real(resultados_anuales.T_out(rango_horas) - 273.15);
Q_u_semana = real(resultados_anuales.Q_u(rango_horas)) / 1000;
eta_c_semana = real(resultados_anuales.eta_c(rango_horas)) * 100;
liquid_frac_semana = real(resultados_anuales.liquid_fraction(rango_horas)) * 100;
DNI_semana = real(resultados_anuales.DNI(rango_horas));
DHI_semana = real(resultados_anuales.DHI(rango_horas));
theta_semana = real(resultados_anuales.theta(rango_horas)); % ángulo cenital o
incidencia
Pabs_semana = real(resultados_anuales.P_abs(rango_horas)) / 1000; % [kW]
etaO_semana = real(resultados_anuales.eta_o(rango_horas)) * 100; % [%]
hIn_semana = real(resultados_anuales.h_in(rango_horas));
hOut_semana = real(resultados_anuales.h_out(rango_horas));
Uo_semana = real(resultados_anuales.U_o(rango_horas));

```

```

Twall_semana = real(resultados_anuales.T_abs_med (rango_horas) - 273.15); % [°C]
NTU_semana   = real(resultados_anuales.NTU      (rango_horas));
FR_semana    = real(resultados_anuales.F_R      (rango_horas)); %* 100; % [%]
theta_z_semana = real(resultados_anuales.theta_z (rango_horas));
X_piston_semana = real(resultados_anuales.X_piston (rango_horas));

fprintf('expansion: %d/%d finitos\n', nnz(isfinite(resultados.expansion)),
numel(resultados.expansion));
fprintf('angle:      %d/%d finitos\n', nnz(isfinite(resultados.angle)),
numel(resultados.angle));
fprintf('psi_ideal: %d/%d finitos\n', nnz(isfinite(resultados.psi_ideal)),
numel(resultados.psi_ideal));

```

### Parámetros de Dibujo y Comprobaciones Previas

```

LW = 1.5;      % grosor de línea estándar
LW2 = 1.2;     % grosor de línea secundario
eje_tiempo = datetime(2023,1,1) + hours(rango_horas - 1);
rngLims     = [eje_tiempo(1) eje_tiempo(end)];

% Opciones de guardado (opcional, no invasivo)
if ~isfield(cfg,'plot') || ~isstruct(cfg.plot), cfg.plot = struct(); end
if ~isfield(cfg.plot,'save_figs'),           cfg.plot.save_figs = false; end
if ~isfield(cfg.plot,'outdir'),             cfg.plot.outdir   = 'figs'; end
if ~isfield(cfg.plot,'show_diagnostics'),   cfg.plot.show_diagnostics = false; end
if cfg.plot.save_figs && ~exist(cfg.plot.outdir,'dir'), mkdir(cfg.plot.outdir); end

% Helper de guardado (no hace nada si save_figs=false)
savefig_if = @(h,name) (cfg.plot.save_figs && saveas(h, fullfile(cfg.plot.outdir,name),'png'));
% Comprobaciones ligeras (evitan errores silenciosos)
assert(numel(eje_tiempo) == numel(T_out_semana), 'T_out_semana y eje_tiempo difieren en longitud.');
```

```

assert(numel(eje_tiempo) == numel(Q_u_semana), 'Q_u_semana y eje_tiempo difieren en longitud.');
```

```

assert(all(isfinite(T_out_semana)) || all(isnan(T_out_semana)), 'T_out_semana contiene Inf.');
```

```

assert(all(isfinite(Q_u_semana)) || all(isnan(Q_u_semana)), 'Q_u_semana contiene Inf.');
```

### Diagnóstico y Saneamiento de Gráficas

```

dbg = @(name,v,unit) fprintf('%-14s finitos=%4d/%4d min=%g max=%g %s\n', ...
    [name ':'], nnz(isfinite(v)), numel(v), ...
    min(v,[],'omitnan'), max(v,[],'omitnan'), unit);

fprintf('\n[DBG] Ventana %s - %s\n', string(eje_tiempo(1)), string(eje_tiempo(end)));
dbg('T_out_semana', T_out_semana, '°C');
dbg('Q_u_semana', Q_u_semana, 'kW');
dbg('X_piston_mm', X_piston_semana*1000, 'mm');
dbg('angle_deg', resultados_anuales.angle(rango_horas), '°');
```

```

dbg('expansion', resultados_anuales.expansion(rango_horas), 'm^3');

% 2) Fallback si el ángulo llega vacío/NaN: reconstruir desde la leva
ANG_deg = resultados_anuales.angle(rango_horas); % [deg]
% Fallback: si no llegó \theta_mech, reconstruir desde la leva usando x
if ~any(isfinite(ANG_deg))
    A_piston = cfg.mechanic.piston_area;
    x_try = resultados_anuales.expansion(rango_horas)./A_piston; % [m]
    % Sanea NaN/Inf para no romper interp1:
    x_try(~isfinite(x_try)) = 0;
    x_try = max(x_try, 0);

    try
        ANG_deg = rad2deg(cfg.cam.phi_of_x(x_try));
        if ismember('psi_ideal', resultados_anuales.Properties.VariableNames)
            sgn = sign(resultados_anuales.psi_ideal(rango_horas)); sgn(sgn==0) = 1;
            ANG_deg = ANG_deg .* sgn; % restaura signo E=0
        end
        warning('Ángulo reconstruido desde la leva (fallback).');
    catch
        ANG_deg = NaN(size(x_try));
        warning('Fallback de ángulo falló: phi_of_x no disponible o dominio inválido.');
```

```

end
end

% 3) X del pistón ya en mm (para reuso)
A_piston = cfg.mechanic.piston_area;
X_mm = (resultados_anuales.expansion(rango_horas)/A_piston)*1000;

% 5) NO usaremos forceDatetime (puede enredarse con yyaxis)
clear forceDatetime

```

### Gráfica Principal: Temperatura PCM Vs Potencia Almacenada

```

f = figure('Name','Temp PCM vs Potencia Almacenada','Position',[100 100 800 600]);
yyaxis left
plot(eje_tiempo, T_out_semana, 'b-', 'Linewidth',LW)
ylabel('Temp. media cera, T_{pcm} (°C)')
ax = gca; ax.YColor = 'b';
yyaxis right
area(eje_tiempo, Q_u_semana, 'FaceColor',[.8 .2 .2], 'FaceAlpha',.5, 'EdgeColor', 'none')
ylabel('Potencia Almacenada, Q_{u} (kw)')
ax = gca; ax.YColor = [0.8 0.2 0.2];
xlim(rngLims); grid on; title(sprintf('T_{pcm} y Q_{u} (Modo: %s | Seguimiento: %s)',
simulation_mode, tracking_mode));
legend('T_{pcm}','Q_{u}','Location','northwest');
savefig_if(f,'45_Tpcm_vs_Qu.png');
```

### Eficiencia de Carga y Fracción Líquida (Modo PCM)

```
f = figure('Name','Eficiencia y Fracción Líquida','Position',[150 150 800 600]);
yyaxis left
plot(eje_tiempo, eta_c_semana, 'g-', 'Linewidth',Lw)
ylabel('Eficiencia de Carga, \eta_c (%)'); ylim([0 100])
ax = gca; ax.YColor = 'g';
if strcmpi(simulation_mode,'static_wax')
yyaxis right
area(eje_tiempo, liquid_frac_semana, 'FaceColor',[.3 .7
.9],'FaceAlpha',.6,'EdgeColor','none')
ylabel('Fracción Líquida, f_{liq} (%)'); ylim([0 100])
ax = gca; ax.YColor = [0.3 0.7 0.9];
legend('\eta_c', 'f_{liq}','Location','northwest');
else
legend('\eta_c (global)','Location','northwest');
end
xlim(rngLims); grid on; title('Eficiencia de carga y fracción líquida del PCM');
savefig_if(f,'46_Eficiencia_y_FraccionLiquida.png');
```

### Radiación Directa/Difusa y Ángulo Cenital

```
f = figure('Name','Radiación y Ángulo Cenital','Position',[200 200 800 600]);
plot(eje_tiempo, DNI_semana, 'r-', 'Linewidth',LW2); hold on
plot(eje_tiempo, DHI_semana, 'b--', 'Linewidth',LW2);
plot(eje_tiempo, theta_z_semana, 'k-.', 'Linewidth',LW2); hold off
legend('DNI','DHI','\theta_z','Location','best');
ylabel('Irradiancia (w/m^2) / Ángulo (°)');
xlabel('Fecha y Hora');
xlim(rngLims); grid on; title('DNI, DHI y ángulo cenital');
savefig_if(f,'47_DNI_DHI_thetaZ.png');
```

### Eficiencia Óptica Vs. Temperatura de Absorbedor

```
f = figure('Name','Eficiencia Óptica vs T_{abs}','Position',[250 250 800 600]);
yyaxis left
plot(eje_tiempo, eta0_semana, 'm-', 'Linewidth',LW2)
ylabel('\eta_o (%)'); ax = gca; ax.YColor = [1 0 1]*0.6; % magenta suavizado
yyaxis right
plot(eje_tiempo, Twall_semana, 'c-', 'Linewidth',LW2)
ylabel('T_{abs} (°C)'); ax = gca; ax.YColor = [0 1 1]*0.6; % cian suavizado
xlabel('Fecha y Hora'); xlim(rngLims); grid on;
legend('\eta_o', 'T_{abs}','Location','best');
title('Eficiencia Óptica y Temperatura del Absorbedor');
savefig_if(f,'48_EtaOptica_vs_Tabs.png');
```

### Coefficientes de Convección y Transmisión

```
f = figure('Name','h_{in}, h_{out}, U_o','Position',[300 300 800 600]);
plot(eje_tiempo, hIn_semana, 'g-', 'Linewidth', LW2); hold on
plot(eje_tiempo, hOut_semana, 'b-', 'Linewidth', LW2);
plot(eje_tiempo, Uo_semana, 'r--', 'Linewidth', LW2); hold off
legend('h_{in}','h_{out}','U_o','Location','best');
ylabel('Coeficientes (W/m^2.K)'); xlabel('Fecha y hora');
xlim(rngLims); grid on; title('Transferencia interna/externa y coeficiente global U_o');
savefig_if(f,'49_hin_hout_Uo.png');
```

### NTU y FR (solo modo FLOW)

```
if strcmpi(cfg.htf.mode,'flow')
    f = figure('Name','NTU y F_R','Position',[350 350 800 600]);
    plot(eje_tiempo, NTU_semana, 'k-', 'Linewidth', LW2); hold on
    plot(eje_tiempo, FR_semana, 'g--', 'Linewidth', LW2); hold off
    legend('NTU','F_R (-)','Location','best'); % F_R como fracción o %, según tu definición
    ylabel('NTU / F_R'); xlabel('Fecha y hora');
    xlim(rngLims); grid on; title('NTU y factor de recuperación (heat transfer unit)');
    savefig_if(f,'410_NTU_y_FR.png');
else
    fprintf('Nota: Se omite 4.10 (NTU y F_R) porque cfg.htf.mode = "%s".\n', cfg.htf.mode);
end
```

Nota: Se omite 4.10 (NTU y F\_R) porque `cfg.htf.mode = "static_wax"`.

### Comparativa de Temperaturas

```
Ta_sem = cfg.data.Ta(rango_horas) - 273.15;
Tsky_sem = cfg.num.Tsky_fun(cfg.data.Ta(rango_horas)) - 273.15;
Tabs_sem = resultados_anuales.T_abs_med(rango_horas) - 273.15;
Tfl_sem = resultados_anuales.T_out(rango_horas) - 273.15;

f = figure('Name','Comparativa de Temperaturas','Position',[200 200 900 600]);
plot(eje_tiempo, Ta_sem, '-k', 'Linewidth', LW); hold on
plot(eje_tiempo, Tsky_sem, '--b', 'Linewidth', LW);
plot(eje_tiempo, Tabs_sem, '-r', 'Linewidth', LW);
plot(eje_tiempo, Tfl_sem, '-g', 'Linewidth', LW);
hold off
legend('T_{amb}','T_{sky}','T_{abs}','T_{out}','Location','best');
xlabel('Fecha y hora'); ylabel('Temperatura (°C)');
xlim(rngLims); grid on; title(sprintf('Comparativa de temperaturas (%s)', simulation_mode));
savefig_if(f,'411_Comparativa_Temperaturas.png');

% -- Helper para asegurar eje X de tipo datetime incluso si no hay datos --
forceDatetime = @(ax) plot(ax, [eje_tiempo(1) eje_tiempo(end)], [0 0], ...
    'k', 'Visible','off', 'Handlevisibility','off');
```

### $\Delta V$ Vs Ángulo Mecánico (Simple y Robusto)

```
f = figure('Name','Expansión vs Ángulo Mecánico','Position',[200 200 800 500]);

yyaxis left
plot(eje_tiempo, resultados_anuales.expansion(rango_horas), '-', 'Linewidth', LW);
ylabel('\Delta v (m^3)'); ylim(padlims(resultados_anuales.expansion(rango_horas)));

yyaxis right
plot(eje_tiempo, ANG_deg, '--', 'Linewidth', LW);
ylabel('\theta_{mech} (^\circ)'); ylim(padlims(ANG_deg));

xlabel('Fecha y Hora');
title('Expansión Volumétrica y Ángulo del Mecanismo');
legend('\Delta v', '\theta_{mech}', 'Location', 'best');
xlim([eje_tiempo(1) eje_tiempo(end)]); grid on; xlim(rngLims);
savefig_if(f, '49_expansion_vs_angulo.png');
```

### Desplazamiento del Pistón Vs Ángulo Mecánico

```
f = figure('Name','Desplazamiento Pistón vs Ángulo Mecánico','Position',[200 200 800 500]);

yyaxis left
plot(eje_tiempo, X_mm, '-', 'Linewidth', LW);
ylabel('X_{pistón} (mm)'); ylim(padlims(X_mm));

yyaxis right
plot(eje_tiempo, ANG_deg, '--', 'Linewidth', LW);
ylabel('\theta_{mech} (^\circ)'); ylim(padlims(ANG_deg));

xlabel('Fecha y Hora');
title('Desplazamiento lineal del pistón y ángulo del mecanismo');
legend('X_{pistón}', '\theta_{mech}', 'Location', 'best');
xlim([eje_tiempo(1) eje_tiempo(end)]); grid on; xlim(rngLims);
savefig_if(f, '412_xpiston_vs_angulo.png');
```

### Diagnósticos Adicionales

```
if cfg.plot.show_diagnostics
    % \Delta T_{end} = T_{abs,end} - T_{pcm,end}
    if ismember('DeltaT_end', resultados_anuales.Properties.VariableNames)
        DeltaT_sem = resultados_anuales.DeltaT_end(rango_horas);
        f = figure('Name','\Delta T_{end}','Position',[120 120 800 400]);
        plot(eje_tiempo, DeltaT_sem, 'Linewidth', 1.4);
        yline(0, 'k--');
        xlabel('Fecha y hora'); ylabel('\Delta T_{end} (K)');
        title('\Delta T_{end} por hora'); grid on; xlim(rngLims);
        savefig_if(f, '413a_deltaT_end.png');
    end

    % T_{abs,end} vs T_{abs,med} (defino Tabs_sem local para evitar dependencia externa)
```

```

if ismember('T_abs_end', resultados_anuales.Properties.VariableNames) && ...
ismember('T_abs_med', resultados_anuales.Properties.VariableNames)
    Tabs_end_sem = resultados_anuales.T_abs_end(rango_horas) - 273.15;
    Tabs_sem      = resultados_anuales.T_abs_med(rango_horas) - 273.15;
    f = figure('Name','T_{abs,end} vs T_{abs,med}','Position',[140 140 800 400]);
    plot(eje_tiempo, Tabs_sem,'-r','Linewidth',1.2); hold on
    plot(eje_tiempo, Tabs_end_sem,'--m','Linewidth',1.2); hold off
    legend('T_{abs,med}','T_{abs,end}','Location','best');
    xlabel('Fecha y hora'); ylabel('Temperatura (°C)');
    title('Comparación T_{abs,med} vs T_{abs,end}'); grid on; xlim(rngLims);
    savefig_if(f,'413b_tabs_end_vs_med.png');
end

% energy_error y f_liq
if ismember('energy_error', resultados_anuales.Properties.VariableNames) && ...
ismember('liquid_fraction', resultados_anuales.Properties.VariableNames)
    err_sem = resultados_anuales.energy_error(rango_horas);
    fliq_sem = resultados_anuales.liquid_fraction(rango_horas);
    f = figure('Name','energy_error & f_liq','Position',[160 160 800 500]);
    yyaxis left
        semilogy(eje_tiempo, err_sem,'Linewidth',1.2);
        yline(1e-3,'r--','1e-3'); ylabel('energy_error (-)');
    yyaxis right
        plot(eje_tiempo, fliq_sem*100,'Linewidth',1.2); ylabel('f_{liq} (%)');
    xlabel('Fecha y hora'); legend('energy_error','f_{liq}','Location','northwest');
    title('Balance energético y fracción líquida'); grid on; xlim(rngLims);
    savefig_if(f,'413c_energy_error_fliq.png');
end

% Chequeo de sobre-descarga (criterio simple, nocturno)
if ismember('Q_u', resultados_anuales.Properties.VariableNames) && ...
ismember('P_abs', resultados_anuales.Properties.VariableNames) && ...
isfield(cfg,'geom') && all(isfield(cfg.geom,{'Di','L'}))
    A_in = pi*cfg.geom.Di*cfg.geom.L;           % [m^2] área interna estimada
    q_est = resultados_anuales.Q_u ./ A_in;     % [W/m^2] promedio horario
    mask_noche = resultados_anuales.P_abs < cfg.opt.minIrradiance;
    mask_over = mask_noche & (q_est < -300 | resultados_anuales.T_out<270); % umbrales
    simples
        if any(mask_over)
            fprintf('Atención: %d horas con posible sobre-descarga.\n', sum(mask_over));
        end
        f = figure('Name','q_{wall,est} nocturno','Position',[180 180 800 400]);
        plot(eje_tiempo, q_est(rango_horas),'Linewidth',1.2); hold on
        yline(-300,'r--','-300 W/m^2'); hold off
        xlabel('Fecha y hora'); ylabel('q_{wall,est} (W/m^2)');
        title('Flujo estimado pared (signo negativo = descarga)'); grid on; xlim(rngLims);
        savefig_if(f,'413d_qwall_nocturno.png');
    end
else
    fprintf('Nota: 4.13 (diagnósticos) permanece desactivada. Active con
cfg.plot.show_diagnostics=true.\n');
end

```

Nota: 4.13 (diagnósticos) permanece desactivada. Active con `cfg.plot.show_diagnostics=true`.

### Error Mecánico Respecto al Giro Ideal $E \leftrightarrow O$ (HSAT N-S)

```
psi_target = resultados_anuales.psi_ideal(rango_horas); % [deg]
psi_mech = resultados_anuales.angle (rango_horas); % [deg]
err = psi_mech - psi_target;

f = figure('Name','Error de tracking','Position',[250 250 800 400]);
plot(eje_tiempo, err, 'Linewidth', 1.2); hold on
yline(0,'k--'); ylabel('Error (°)'); xlabel('Fecha y hora');
title('Error \psi_{mech} - \psi_{ideal} (HSAT N-S)'); grid on;
xlim([eje_tiempo(1) eje_tiempo(end)]);
ylim(padlims(err));
savefig_if(f,'414_error_tracking.png');
```

### Fotovoltaico (energía y comparativas)

```
pv_results = calculate_pv_energy(cfg, resultados_anuales);

% Tabla resumen anual
tot_fijo_gen = sum(pv_results.E_gen_fijo_kwh);
tot_ideal_gen = sum(pv_results.E_gen_ideal_kwh);
tot_ideal_cons = sum(pv_results.E_consumo_tracker_kwh);
tot_ideal_net = sum(pv_results.E_net_ideal_kwh);
tot_mec_gen = sum(pv_results.E_gen_mecanico_kwh);
tot_mec_net = sum(pv_results.E_net_mecanico_kwh);

resumenFV = table( ...
    {'Panel Fijo'; 'Seguidor Ideal'; 'Seguidor Mecánico'}, ...
    [tot_fijo_gen; tot_ideal_gen; tot_mec_gen], ...
    [0; tot_ideal_cons; 0], ...
    [tot_fijo_gen; tot_ideal_net; tot_mec_net], ...
    'VariableNames', {'Caso', 'E_generada_kwh', 'E_consumida_kwh', 'E_neta_kwh'} ...
);
disp(' '); disp('===== RESUMEN ANUAL FV =====');
disp(resumenFV);

% Gráficas FV (día típico, diario en mes, mensual)
plot_pv_comparison(pv_results, num_horas);

% ----- Serie mensual FV (siempre 12x1) con validación de tamaño -----
meses = datetime(2023,1,1) + calmonths(0:11);
fijo = ensureMonthly(pv_results.E_gen_fijo_kwh); % 12x1
ideal = ensureMonthly(pv_results.E_net_ideal_kwh); % 12x1
mec = ensureMonthly(pv_results.E_net_mecanico_kwh); % 12x1

Y = [fijo(:), ideal(:), mec(:)]; % 12x3, filas = meses, columnas = series

if size(Y,1) ~= numel(meses)
```

```

error('Las series FV no son mensuales: filas(Y)=%d, meses=%d', size(Y,1), numel(meses));
end

f = figure('Name','FV - Energía neta mensual (con etiquetas)');
b = bar(meses, Y, 'grouped');
grid on; ylabel('kwh/mes');
legend('Fijo','Ideal (neto)','Mecánico (neto)','Location','northwest');
title('Energía neta mensual');

% Etiquetas sobre la serie "Mecánico (neto)" (si existe la 3ª barra)
if numel(b) >= 3
    gain_vs_fijo = mec(:) - fijo(:);
    xt = b(3).XEndPoints;
    yt = b(3).YEndPoints;
    text(xt, yt + 0.5, compose('%+.1f', gain_vs_fijo), ...
        'HorizontalAlignment','center','FontSize',8);
end
savefig_if(f,'5_fv_mensual.png');

```

### Exportación de la Trayectoria 3D de la Leva

```

disp('Generando trayectoria 3D de la leva para exportación...');
cam = cfg.cam;
R = cfg.mechanic.cam_radius; % radio base de la leva [m]
nPts = 600; % resolución para el path

% Dominio angular de la leva (rad) – garantizado monótono por buildCamLaw
phi_min = min(cam.phi_u);
phi_max = max(cam.phi_u);
% 1. Creamos el vector de ángulos de rotación sobre el que se dibujará la leva.
% Este vector va desde 0 hasta el ángulo máximo de seguimiento solar.
phi_vec = linspace(phi_min, phi_max, nPts); % [rad]

% Desplazamiento (lift) directamente desde la ley sintetizada
lift_vec = cam.x_of_phi(phi_vec); % [m]

% Coordenadas de la curva sobre el cilindro
X = R .* cos(phi_vec);
Y = R .* sin(phi_vec);
Z = lift_vec; % eje del cilindro (elevación/lift)

% Guardamos en mm para CAD (Solidworks trabaja cómodo así)
scale_mm = 1e3;
path_mm = [X; Y; Z]' * scale_mm; % [mm]
writematrix(path_mm, 'cam_path.csv'); % columnas: X Y Z
fprintf('Fichero "cam_path.csv" creado (%.0f pts)\n', nPts);

% Calibración de stroke observado (p99.5)
mask_sol = (resultados_anuales.DNI > cfg.opt.minIrradiance_wm2) & ...
    (resultados_anuales.theta_z < 90);
x_obs = abs(resultados_anuales.X_piston(mask_sol)); % [m]

```

```

x_obs = x_obs(isfinite(x_obs) & x_obs >= 0);           % limpia

if ~isempty(x_obs)
    x99 = prctile(x_obs, 99.5);
    if isfinite(x99) && x99 > 0
        x_max_recom = max(1.07 * x99, 1e-6);
        fprintf('stroke observado p99.5 = %.4f m → x_max recomendado = %.4f m\n', x99,
x_max_recom);

        psi_arg = 70;
        if isfield(cfg, 'cam') && isfield(cfg.cam, 'psi_limit_deg') &&
isfinite(cfg.cam.psi_limit_deg)
            psi_arg = cfg.cam.psi_limit_deg;
        end

        cfg.cam = buildCamLaw(cfg, ...
            'x_max_override', x_max_recom, ...
            'psi_limit_deg', psi_arg, ...
            'weight_pow',    1.5, ...
            'cdf_gamma',    0.7);

    else
        fprintf('Percentil X_piston inválido (x99=%.3g); no se recalibra la leva.\n', x99);
    end
else
    fprintf('sin muestras válidas de X_piston al final; no se recalibra la leva.\n');
end

% Diagnósticos rápidos de la LUT de leva
x = linspace(cfg.cam.lift_u(1), cfg.cam.lift_u(end), 200)';
phi = cfg.cam.phi_of_x(x);
dphi = diff(phi);
fprintf('phi_of_x: min(dphi)=%.3g rad\n', min(dphi));
r = (121*24+1):(122*24);           % ajusta si quieres
psi_mech = resultados.angle(r);
psi_id   = resultados.psi_ideal(r);
fprintf('corr(psi_mech, psi_ideal)=%.3f\n', corr(psi_mech, psi_id, 'rows', 'complete'));
fprintf('cam: psi_min=%.1f°, psi_max=%.1f° (de la LUT)\n', ...
    rad2deg(min(cfg.cam.phi_u)), rad2deg(max(cfg.cam.phi_u)));
fprintf('angulo mec: min=%.1f°, max=%.1f° (resultados.angle)\n', ...
    min(resultados.angle), max(resultados.angle));

% ===== HELPERS LOCALES (fin de script) =====
function m = ensureMonthly(v)
    if istable(v) || isa(v, 'timetable'), v = v{:, :}; end
    v = v(:);           % columna
    n = numel(v);
    switch n
        case 12
            m = v;
        case {365, 366} % diario
            t = (datetime(2023, 1, 1):days(1):datetime(2023, 12, 31)).';
            m = splitapply(@sum, v(1: numel(t)), month(t));
    end
end

```

```

case 8760          % horario
    t = (datetime(2023,1,1,0,0,0):hours(1):datetime(2023,12,31,23,0,0)).';
    m = splitapply(@sum, v, month(t));
otherwise
    error('ensureMonthly: longitud %d no soportada (esperaba 12, 365/366 o 8760).', n);
end
end
% ===== PAVA que devuelve yhat del MISMO tamaño =====
function yhat = pava_same_length(y, w)
    if nargin<2 || isempty(w), w = ones(size(y)); end
    y = y(:); w = w(:);
    blocks = num2cell( (1:numel(y))' , 2 ); % cada índice es un bloque
    vals = y; wgts = w;
    i = 1;
    while i < numel(vals)
        if vals(i) <= vals(i+1)
            i = i + 1;
        else
            % pool i e i+1
            new_w = wgts(i) + wgts(i+1);
            new_v = (wgts(i)*vals(i) + wgts(i+1)*vals(i+1)) / new_w;
            vals(i) = new_v; wgts(i) = new_w;
            blocks{i} = [blocks{i}; blocks{i+1}];
            vals(i+1) = []; wgts(i+1) = []; blocks(i+1) = [];
            % retrocede mientras viole isotonicidad
            while i>1 && vals(i-1) > vals(i)
                new_w = wgts(i-1) + wgts(i);
                new_v = (wgts(i-1)*vals(i-1) + wgts(i)*vals(i)) / new_w;
                vals(i-1) = new_v; wgts(i-1) = new_w;
                blocks{i-1} = [blocks{i-1}; blocks{i}];
                vals(i) = []; wgts(i) = []; blocks(i) = [];
                i = i - 1;
            end
        end
    end
    % expandir a longitud original
    yhat = zeros(size(y));
    for b = 1:numel(blocks)
        yhat(blocks{b}) = vals(b);
    end
end

function L = padlims(v)
    % Devuelve límites [ymin ymax] robustos para ejes Y
    v = v(:);
    v = v(isfinite(v));
    if isempty(v)
        L = [-1 1];
    return
end
vmin = min(v);
vmax = max(v);
if vmin == vmax
    % Serie plana: abre un poco la ventana

```

```

if vmin == 0
    L = [-1 1];
else
    d = max(1, 0.05*abs(vmin));
    L = [vmin - d, vmax + d];
end
else
    d = 0.05*(vmax - vmin);
    L = [vmin - d, vmax + d];
end
end

function m = weighted_median(x, w)
% Devuelve la mediana ponderada de x con pesos positivos w.
if nargin<2 || isempty(w), w = ones(size(x)); end
x = x(:); w = w(:);
good = isfinite(x) & isfinite(w) & (w>0);
x = x(good); w = w(good);
if isempty(x), m = NaN; return; end
[xs, idx] = sort(x);
ws = w(idx);
cw = cumsum(ws);
m = xs(find(cw >= 0.5*cw(end), 1, 'first'));
end

function fh = makeHystereticPhi(cam)
% Devuelve phi(x) con memoria e histéresis usando cam.phi_abs_chg/dis
function phi = phi_of_x_inner(x)
persistent last_state last_x
if isempty(last_state)
    last_state = 'chg'; % arranque -> "cargando"
    last_x = x;
end
dx = x - last_x;

% Máquina de estados con banda de histéresis
if strcmp(last_state, 'chg')
    if (x < cam.x0 - cam.hys.dx_hys) && (dx < -cam.hys.dx_thr)
        last_state = 'dis';
    end
else % 'dis'
    if (x > cam.x0 + cam.hys.dx_hys) && (dx > +cam.hys.dx_thr)
        last_state = 'chg';
    end
end

if strcmp(last_state, 'chg')
    phi_abs = cam.phi_abs_chg(x);
    sgn = cam.hys.sign_chg; % tip: cambia a +1/-1 si tu convención es opuesta
else
    phi_abs = cam.phi_abs_dis(x);
    sgn = cam.hys.sign_dis;
end

```

```
end
    phi    = sgn * phi_abs;
    last_x = x;
end
fh = @phi_of_x_inner;
end
```

Generando trayectoria 3D de la leva para exportación...

Fichero "cam\_path.csv" creado (600 pts)

stroke observado p99.5 = 0.2838 m → x\_max recomendado = 0.3036 m

phi\_of\_x: min(dphi)=2.12e-06 rad

corr(psi\_mech, psi\_ideal)=0.600

cam: psi\_min=0.0°, psi\_max=70.0° (de la LUT)

angulo mec: min=-44.8°, max=50.0° (resultados.angle)

## Apéndice C

### PTC\_Model\_Step.m

```
function [out, T_pcm_new] = ptc_model_step(cfg, T_pcm_in, k)

% ptc_model_step Modelo termo-óptico para UN SOLO PASO HORARIO con PCM.
% ENTRADAS:
%   cfg: Estructura de configuración global, con datos de sitio, geometría, propiedades HTF/PCM,
%   parámetros num.
%   T_pcm_in: Temperatura PROMEDIO del PCM al inicio del paso [K].
%   k: Índice horario (1...8760).
% SALIDAS:
%   out: Estructura con los resultados de la hora actual.
%   T_pcm_new: Nueva temperatura promedio del PCM para la siguiente hora.
% -----Lineas para mantener angulo mecánico fijo cuanod no hay
% Radiación solar -----
persistent theta_mech_last sgn_last
if isempty(theta_mech_last), theta_mech_last = 0; end
if isempty(sgn_last),      sgn_last      = 0; end
```

### Extracción de Datos y Configuración para la Hora 'k'

```
GHI_k = cfg.data.GHI(k);    % Irradiancia Horizontal global datos horarios [W/m^2] GHI (Global
Horizontal Irradiance)
Ta_k = cfg.data.Ta(k);     % Temperatura ambiente en [K]
Vw_k = cfg.data.Vw(k);     % Velocidad de viento [m/s]

% Manejo correcto por modo
if strcmpi(cfg.htf.mode, 'flow')
    % En modo flujo, la T de entrada de esta hora es el estado final de la hora anterior.
    Tfi_k = cfg.htf.T_in(k); % Temperatura de entrada del HTF si hay flujo [K]
    T_base = Tfi_k;         % Base para cálculos térmicos
    % Guardarraíl adicional
    if isnan(T_base)
        warning('T_base NaN en flujo! Hora %d - Usando último valor válido', k);
        T_base = cfg.htf.T_in(max(1,k-1)); % Valor anterior
    end
else % 'static_wax'

    % En modo PCM, nos aseguramos de que la temperatura base sea siempre un escalar.
    % Este bloque previene errores de dimensiones si T_pcm_in es un vector.
    if isvector(T_pcm_in)
        T_pcm_avg = mean(T_pcm_in); % Si es vector, promediar
    else
        T_pcm_avg = T_pcm_in;      % Si es escalar, usar directamente
    end
    T_base = T_pcm_avg;            % Base para cálculos térmicos
    % Tfi_k = NaN;                 % No aplica (para claridad)
```

```

% Guardarraíl crítico para PCM
valid_range = [270, 500]; % [K] = [-3°C a 127°C] - rango físico para PCM
if isnan(T_base) || T_base < valid_range(1) || T_base > valid_range(2)
    warning('T_base inválida en PCM: %.2f K (%.2f°C). Reset a 293 K', ...
        T_base, T_base - 273.15);
    T_base = 293.15;
end
end

sigma = 5.67e-8; % Constante de Stefan-Boltzmann [w/m^2K^4]
Ap = cfg.geom.W_a * cfg.geom.L; % Área de apertura del absorbedor [m^2]
Di = cfg.geom.Di; % Diámetro interior del tubo [m]
Do = cfg.geom.Do; % Diámetro exterior del tubo [m]
L = cfg.geom.L; % Longitud del tubo [m]

```

### Cálculo de Ángulos Solares y Fracciones DNI/DHI

```

hora_local = mod(k-1, 24) + 0.5; % Hora en día (ej. 0.5 = primera media hora)
cfg.site.day = floor((k-1)/24) + 1; % Día del año
% Pasamos el ángulo de inclinación 'beta' y el azimut 'surface_az' a la función
[theta, theta_z, I_ext, omega, psi_ideal_deg] = solarAngles(cfg.site, hora_local, cfg.site.beta,
    cfg.site.surface_az);
% Si el sol está bajo el horizonte o hay valores no finitos
if ~isfinite(theta_z) || ~isfinite(theta) || theta_z >= 90
    theta = 90; % sin incidencia directa
    theta_z = 90;
    I_ext = 0;
end

% Solo descomponer si hay sol y el sol está sobre el horizonte
if GHI_k > 0 && cosd(theta_z) > eps
    [DNI_k, DHI_k] = decomposeGHI(GHI_k, theta_z, I_ext);
else
    DNI_k = 0;
    DHI_k = 0;
    % Asegura consistencia cuando NO hay sol %%% <-- MOD-2
    theta = 90; theta_z = 90; I_ext = 0;
end

```

### Eficiencia Óptica y Potencia Absorbida

```

if I_ext == 0 %%% <-- MOD-3
    G_beam_t = 0; G_diff_t = 0; G_refl_t = 0;
else
    [G_beam_t, G_diff_t, G_refl_t] = transposeIrradiance( ...
        DNI_k, DHI_k, GHI_k, I_ext, theta, theta_z, ...
        cfg.site.beta, cfg.site.albedo );
end

```

```

% b) Eficiencia óptica para la componente directa (beam), que depende del ángulo 'theta'
if theta > 89.5                                %%% <-- MOD-4
    ktheta = 0;
else
    ktheta = cfg.opt.IAMfun(theta);    % Factor IAM corrige incidencia
end

eta_o_beam = cfg.opt.clean * cfg.opt.rho * cfg.opt.tau * cfg.opt.alpha * cfg.opt.gamma * ktheta;
% Eficiencia óptica total

% c) Eficiencia óptica para la componente difusa/reflejada (aproximación)
% Se usa un valor efectivo, ya que el IAM no aplica directamente. Un 95% del
% rendimiento óptico en condiciones normales es una aproximación estándar.
eta_o_diffuse = cfg.opt.clean * cfg.opt.rho * cfg.opt.tau * cfg.opt.alpha * cfg.opt.gamma * 0.95;

% d) Cálculo de la Potencia Absorbida Total
% Se suma la contribución de cada componente, aplicada sobre el área de apertura (Ap).
P_abs_beam = G_beam_t * eta_o_beam;
P_abs_diff_refl = (G_diff_t + G_refl_t) * eta_o_diffuse;

P_abs = (P_abs_beam + P_abs_diff_refl) * Ap;    % Potencia absorbida Directa y Potencia absorbida
difusa en superficie colectora

% ---- salvaguarda final -----
if ~isfinite(P_abs),    P_abs = 0;    end    %%% <-- MOD-5

```

### Inicialización de Salidas y Condición de Corte

```

%T_base = (strcmpi(cfg.htf.mode,'flow') * Tfi_k) + (strcmpi(cfg.htf.mode,'static_wax') *
T_pcm_in); % Base T. Objetivo: Calcular una temperatura base para operaciones térmicas
posteriores
out.T_out = T_base;    % Salida inicial = entrada
out.Q_u = 0;    % Calor transferido
out.eta_c = 0;    % Eficiencia de carga
out.eta_o = eta_o_beam;    % Eficiencia óptica (se guarda la de la radiación directa, que es la
más representativa)
out.U_L = 0;    % Coef. global U_L
out.liquid_fraction=0;    % Fracción líquida PCM
out.dv=0;    % Volumen expansivo
out.T_abs_med=T_base;    % T media absorbedor
T_pcm_new = T_pcm_in;    % Estado PCM inicial igual entrada

if P_abs < cfg.opt.minIrradiance    % Umbral mínimo de sol
    [out,T_pcm_new] = ptc_cooling_step(cfg,T_base,k);
    % Mantener estado mecánico; no "teletransportar" a 0:
    out.dv    = 0;    %  $\Delta V = 0 \text{ m}^3$ 
    out.theta_mech = theta_mech_last;    % ángulo en reposo (rad o °)
    out.psi_ideal = psi_ideal_deg;    % informativo para trazas/FV
    % Empaquetado mínimo coherente:
    out.theta    = 90; out.theta_z = 90; out.P_abs = 0; out.DNI = 0; out.DHI = 0;

```

```

return % salir si poca irradiancia
end

```

### Bucle de Equilibrio Térmico del Absorbedor (Iterativo)

```

T_abs_wall = T_base + 5; % Suposición inicial para la temperatura de la
pared
it = 0; % Iteración contador
error_T = inf;
h_in = 0; % Pre-inicializar h_in

while error_T > cfg.num.iterTol && it < cfg.num.maxIter
    it = it + 1; % Actualiza Contador e inicia nuevamente el
while

    % a) Calcular h_in (coeficiente interno) usando T_base como referencia
    if strcmpi(cfg.htf.mode, 'flow')
        % Cálculo h_in en flujo forzado usando la correlación de Dittus-Boelter
        Re_in = 4*cfg.htf.mdot/(pi*Di*cfg.htf.mu(T_base));
        Pr_in = cfg.htf.Pr(T_base);
        Nu_in = 0.023*Re_in^0.8*Pr_in^0.4; % correlación de Dittus-Boelter
        h_in = Nu_in*cfg.htf.k(T_base)/Di;

    else % 'static_wax'

        % Para el PCM, h_in depende de la convección natural, que a su vez
        % depende del gradiente de temperatura entre la pared y el PCM.
        % ---- convección natural en PCM fundido ----
        g = 9.81; % m s-2
        beta_pcm = cfg.pcm.beta(T_base); % 1/K
        nu_pcm = cfg.pcm.nu(T_base); % m2/s
        alpha_pcm = cfg.pcm.alpha(T_base); % m2/s
        DeltaT = max(T_abs_wall - T_base, 1e-3); % evita división 0
        Pr_pcm = nu_pcm/alpha_pcm;

        Ra = g* beta_pcm *DeltaT*Di^3 / (nu_pcm*alpha_pcm); % Rayleigh interno
        Nu = (0.60 + 0.387*Ra^(1/6) / (1+ (0.559/Pr_pcm)^(9/16) )^(8/27) )^2;
        h_in = Nu*cfg.pcm.k(T_base)/Di; % W m-2K

        %-- límites inferiores --
        if T_base > cfg.pcm.T_melt_high % PCM prácticamente líquido
            h_in = max(h_in, 12); %%<-- MOD-2: potencia convectiva mínima
        else
            h_in = max(h_in, 5);
        end

    end

    % b) calcular h_out (pérdidas externas) y U_o (coef. global de pérdidas)
    T_film = (T_abs_wall + Ta_k)/2; % Calcula la temperatura de
película en kelvin

```

```

h_out = cylinderConvection(vw_k, cfg.geom.Dco, T_film); % Llama a la función con T_film
h_out = max(h_out, 4 + 4*vw_k); % h_out = max(h_out, 8); %%% <-- MOD-1:
límite inferior 8wm-2K

T_cov_est = (T_abs_wall + Ta_k)/2; % T cubierta estimada
Tsky = cfg.num.Tsky_fun(Ta_k); % Temperatura cielo empírica
h_rad_ac = sigma*(T_abs_wall^2+T_cov_est^2)*(T_abs_wall+T_cov_est)/(1/cfg.geom.eps_abs+(1-
cfg.geom.eps_cov)/cfg.geom.eps_cov*(Do/Di)); % Radiación entre Absorbedor y Cubierta (interior
del tubo)
h_rad_ca = cfg.geom.eps_cov*sigma*(T_cov_est^2+Tsky^2)*(T_cov_est+Tsky); % Radiación entre
Cubierta y Atmosfera (cielo efectivo):
U_o = 1/(1/h_rad_ac + 1/(h_out + h_rad_ca)); % Coef. global sin tubo de vidrio, se
desprecia conducción por el tubo, espesor de pared pequeño y alta conductividad.

% c) Balance energético para encontrar la nueva T_abs_wall
A_in = pi*Di*L;
A_o = pi*Do*L;
num = P_abs + U_o*A_o*Ta_k + h_in*A_in*T_base;
den = U_o*A_o + h_in*A_in;
T_abs_wall_new = num/(den + 1e-6); % Balance de energía se calcula temperatura de la pared
del absorbedor ...
% En cada vuelta del while se actualiza la temperatura de
la ...
% pared del absorbedor. Esa nueva temperatura se calcula
con la fórmula LMTD
% y se vuelve a iterar hasta la convergencia.

% d) Comprobar convergencia y actualizar
error_T = abs(T_abs_wall_new - T_abs_wall); % Error en la iteración
T_abs_wall = T_abs_wall_new; % Actualiza la temperatura para el nuevo paso de
iteración

end

out.U_L = U_o * A_o / Ap; % Calcula el coeficiente global de transferencia de calor U_L
[W/(m²·K)]
% a partir de la conductancia total del absorbedor (U_o·A_o)
normalizada por el área de apertura Ap
out.T_abs_med = T_abs_wall; % Guarda la temperatura media de la pared del absorbedor tras
convergencia del balance térmico

```

### Cálculo de Resultados Finales para la Hora k

```

if strcmpi(cfg.htf.mode, 'flow')
% Calcula el factor de corrección F' que tiene en cuenta las resistencias térmicas interna y
de pared
F_prime=(1/U_o)/((1/U_o) + ((Do*log(Do/Di))/(2*cfg.geom.k_tube))+Do/(h_in*Di));
% Calcula el número de unidades de transmisión (NTU) según el método de transferencia de
calor por contraflujo
NTU=(out.U_L*Ap*F_prime)/(cfg.htf.mdot*cfg.htf.cp(T_base)+1e-6);
% Calcula el coeficiente de eficiencia de recuperación F_R basado en NTU

```

```

out.F_R=(cfg.htf.mdot*cfg.htf.cp(T_base)/(Ap*out.U_L+1e-6))*(1-exp(-NTU));
% Calcula la potencia útil transferida al HTF: Q_u = área × rendimiento térmico × diferencia
efectiva de temperatura
out.Q_u=Ap*out.F_R*(P_abs/Ap-out.U_L*(T_abs_wall-Ta_k));
% Actualiza la temperatura de salida del fluido tras la transferencia de calor
out.T_out = T_base+out.Q_u/(cfg.htf.mdot*cfg.htf.cp(T_base)+1e-6);

else % 'static_wax'
% De ese modo la salida out.NTU y out.F_R existen siempre aunque no se
% calulen en el modo static flow
out.NTU = 0;
out.F_R = 0;

% PARCHE B · Evitar solver cuando no hay flujo (delta_T ≤ 0)
% Se calcula el flujo de calor hacia el PCM y se llama al solver numérico

delta_T = T_abs_wall - T_base;
q_dot_wall = h_in * (pi*Di*L) * (delta_T);
q_wall_flux = q_dot_wall / (pi*Di*L); % Flujo [W/m^2]
% Guardar el flujo de pared usado en el solver
q_wall_flux_last = q_wall_flux;
assert(isfinite(q_wall_flux), 'q\_wall\_flux NaN');

if k <= 4 % --- solo los primeros pasos
fprintf('\n---- k=%d -----\n',k);
disp(struct( ...
    'h_in', h_in, ...
    'q_wall_flux', q_wall_flux, ...
    'T_base', T_base, ...
    'T_abs_wall', T_abs_wall, ...
    'delta_T', T_abs_wall - T_base ));
end

% En ptc_model_step, antes de llamar a pcm_Conductive_step:
fprintf('dt = %.2f s, q_wall_flux = %.2f W/m^2, T_pcm_base = %.2f K\n', ...
    cfg.num.dt, q_wall_flux, T_base);

[T_mean, f_liq_mean, Q_u, energy_error] = pcm_Conductive_step(cfg.pcm, cfg.geom, T_base,
q_wall_flux, cfg.num.dt);

fprintf(' -> Resultado: T_new = %.2f K, f_liq = %.2f, Q_u = %.2f W, error_energy = %.4f\n',
...
    T_mean, f_liq_mean, Q_u, energy_error);

out.Q_u = Q_u; % Potencia transferida
[W]
out.T_out = T_mean; % Temperatura promedio
final del PCM [K]
out.liquid_fraction = f_liq_mean; % Fracción de PCM en
estado líquido

% ---- Diagnóstico extra ----
out.energy_error = energy_error;
out.q_wall_flux_last = q_wall_flux_last;

```

```

out.T_abs_end      = T_abs_wall;           % pared al final del balance
out.DeltaT_end    = out.T_abs_end - out.T_out; % ΔT último subpaso (hora)
% out.dV = cfg.geom.V_pcm * cfg.pcm.beta(T_mean) * (T_mean - T_base);
% % Expansión volumétrica simplificada, la función pcmExpansion
% reemplaza está variable

% ----- tras obtener T_mean y f_liq_mean: -----

% --- 2.3.a: Parámetros para pcmExpansion ---
cfg.pcm.beta_s = 1.4e-3; % Coef. expansión volumétrica sólido [1/K]
cfg.pcm.beta_l = 1.4e-3; % Coef. expansión volumétrica líquido [1/K]
cfg.pcm.rho_s  = 880;   % Densidad sólido a ~20°C [kg/m^3]
cfg.pcm.rho_l  = 760;   % Densidad líquido a ~50-80°C [kg/m^3]
cfg.pcm.T_ref  = 293.15; % Temp. de referencia para expansión [K] (≈20 °C)

% ----- Expansión -----
V0 = cfg.geom.V_pcm;
dV = pcmExpansion(T_mean, cfg, V0);
out.dV = dV; % Expansión volumétrica

% --- Ángulo mecánico vía LEVA (LUT φ(x)) ---
% --- Ángulo mecánico vía LEVA (LUT φ(x)) ---
x_piston = dV / cfg.mechanic.piston_area;

% Clampeo robusto del dominio (ver bloque #1)
if isfield(cfg.cam, 'lift_u')
    x_min = cfg.cam.lift_u(1); x_max = cfg.cam.lift_u(end);
elseif isfield(cfg.cam, 'lift_u_chg') && isfield(cfg.cam, 'lift_u_dis')
    x_min = min([cfg.cam.lift_u_chg(1), cfg.cam.lift_u_dis(1)]);
    x_max = max([cfg.cam.lift_u_chg(end), cfg.cam.lift_u_dis(end)]);
else
    x_min = -inf; x_max = +inf;
end
x_piston = min(max(x_piston, x_min), x_max);

% ¿La leva devuelve φ con signo (bi-direccional + histéresis)?
is_signed_cam = isfield(cfg, 'cam') && isfield(cfg.cam, 'is_signed') && cfg.cam.is_signed;

if is_signed_cam
    % La leva ya decide rama y signo (mañana/tarde) con histéresis:
    out.theta_mech = cfg.cam.phi_of_x(x_piston); % [rad], con signo
else
    % Leva "clásica": φ(|x-x0|) ≥ 0 → resolvemos el signo aquí (tu lógica actual)
    phi_unsigned = cfg.cam.phi_of_x(x_piston); % [rad], 0..ψ_max

% --- Banda muerta para el signo + memoria de signo (debounce en mediodía) ---
psi_db = 2.5; % [deg]
if abs(psi_ideal_deg) <= psi_db
    if sgn_last ~= 0
        sgn = sgn_last;
    else
        sgn = sign(omega);
    end
end

```

```

        if sgn == 0, sgn = 1; end
    end
else
    sgn = sign(psi_ideal_deg);
end
out.theta_mech = sgn * phi_unsigned;           % [rad]
sgn_last = sgn;                               % memoria solo para leva no firmada
end

theta_mech_last = out.theta_mech;             % memoria del ángulo para "modo noche"

% Trazas
out.psi_ideal = psi_ideal_deg;
if mod(k,200)==0
    if is_signed_cam
        fprintf('[DBG] k=%d x=%.4f m θ_mech=%.2f° (signed)\n', ...
            k, x_piston, rad2deg(out.theta_mech));
    else
        fprintf('[DBG] k=%d x=%.4f m φ=%.2f° sgn=%+d θ_mech=%.2f°\n', ...
            k, x_piston, rad2deg(phi_unsigned), sgn, rad2deg(out.theta_mech));
    end
end

% ----- %

T_siguiete = out.T_out;    % valor calculado por el solver pcm_ApparentCapacity_Pro

% Parche antipropagación
if isnan(T_siguiete) || isinf(T_siguiete)
    warning('PTC:BadTemp','T_out indefinido en hora %d; se conserva la temperatura previa.',
k);
    T_siguiete = T_pcm_in;    % conserva la última temperatura válida
end

T_pcm_new = T_siguiete;    % <--- ya no puede ser NaN

end

```

## Eficiencia de Carga Final y Empaquetado de Salidas

```

if P_abs <= 1e-6
    out.eta_c = 0;
else
    out.eta_c = out.Q_u / (P_abs);    % eficiencia sin factor de corrección
end

% Limitar la eficiencia al rango físico [0,1]
out.eta_c = min( max(out.eta_c, 0), 1);
out.eta_o    = eta_o_beam;
out.DNI      = DNI_k;
out.DHI      = DHI_k;

```

```
out.theta      = theta;
out.theta_z    = theta_z;
out.P_abs      = P_abs;
out.h_in       = h_in;
out.h_out      = h_out;
out.U_o        = U_o;

% Se asegura de que los campos específicos de cada modo existan
% aunque no se calculen, para mantener la estructura de 'out' consistente.
if ~isfield(out,'F_R'), out.F_R=NaN; end
if ~isfield(out,'NTU'), out.NTU=NaN; end
if ~isfield(out,'liquid_fraction'), out.liquid_fraction=NaN; end
if ~isfield(out,'dV'), out.dV=NaN; end

end
```

## Apéndice D

### PTC\_Cooling\_Step

```

function [out,T_pcm_new] = ptc_cooling_step(cfg,T_pcm_in,k)
% Descarga nocturna del PTC con PCM - sin irradiación solar

% Entradas climáticas en el paso k
Ta      = cfg.data.Ta(k);      % Temperatura ambiente [K]
Vw      = cfg.data.Vw(k);      % velocidad del viento [m/s]

% Geometría del tubo
Di      = cfg.geom.Di;        % Diámetro interno [m]
Do      = cfg.geom.Do;        % Diámetro externo [m]
L       = cfg.geom.L;         % Longitud del tubo [m]
A_in    = pi * Di * L;        % Área interna
A_o     = pi * Do * L;        % Área externa

sigma   = 5.67e-8;            % Constante de Stefan-Boltzmann [W/m²K⁴]

% === 1) h_in por convección natural interna ===
% [~, h_in] = internalNaturalConv(cfg, T_pcm_in, Ta, Di);
% === 1) iteración pared interna / h_in *** MOD-5 ***
% === 2) h_out (convección forzada) + radiación externa ===
% T_film = (T_pcm_in + Ta) / 2;
% h_out = cylinderConvection(Vw, cfg.geom.Dco, T_film); % [W/m²K]
% h_out = max(h_out, 8);
T_wall = T_pcm_in - 2;        % suposición inicial
for n = 1:5
    [~, h_in] = internalNaturalConv(cfg, T_pcm_in, Ta, Di, T_wall);
% --- 2) h_out + radiación externa (solo depende de T_wall)
    T_film = (T_wall + Ta) / 2;
    h_out = cylinderConvection(Vw, cfg.geom.Dco, T_film);
    h_out = max(h_out, 4 + 4*Vw); %h_out = max(h_out, 8);

    T_sky = Tsky_extended(Ta); % Mejor modelo para T_sky % [K]
    h_rad = cfg.geom.eps_cov * sigma * ((T_wall^2 + T_sky^2)*(T_wall+T_sky)); % [W/m²K]

% === 3) Cálculo de la conductancia total ===
    U_o = 1 / (1/(h_out + h_rad) + 1/h_in); % [W/m²K] (pared delgada)

% === 4) Temperatura de la pared y flujo térmico neto hacia PCM ===
    T_wall_new = (h_in * A_in * T_pcm_in + U_o * A_o * Ta) / (h_in * A_in + U_o * A_o);
    T_wall = T_wall_new;
end

% === 4) Flujo neto hacia PCM, siempre negativo o cero ===
% calculo primero la magnitud de descarga positiva
q_max_cooling = 500; % W/m²
q_surf = h_in * (T_pcm_in - T_wall); % >0 si PCM está más caliente % [W/m²]
flujo negativo esperado

% luego lo convierto en flujo negativo para el solver

```

```

q_wall_flux = - min(max(q_surf, 0), q_max_cooling); % <= 0 W/m²

% === 6) Solver PCM: conduce y descarga ===
[T_mean, f_liq, Q_u, energy_error] = pcm_Conductive_step(cfg.pcm, cfg.geom, ...
    T_pcm_in, q_wall_flux, cfg.num.dt);

% === 6) Salidas del ciclo ===
out.T_out      = T_mean;          % Temperatura final PCM
out.Q_u        = Q_u;             % Energía evacuada [J]
out.eta_c      = 0;               % Eficiencia solar no aplica (descarga)
out.liquid_fraction = f_liq;      % Fracción líquida remanente
out.h_in       = h_in;           % Convección natural interna
out.h_out      = h_out;          % Convección forzada exterior
out.U_o        = U_o;            % Conductancia total
out.T_abs_med  = T_wall;         % Temperatura media de la pared
T_pcm_new      = T_mean;         % Estado actualizado del PCM
cfg.state.f_liq(k) = f_liq;
out.energy_error = energy_error;
out.q_wall_flux_last = q_wall_flux; % último usado
out.T_abs_end   = T_wall;         % pared final en descarga
out.DeltaT_end  = out.T_abs_end - out.T_out;
end

% === FUNCION PARA TEMPERATURA DEL CIELO EXTENDIDA ===
function T_sky = Tsky_extended(Ta)
% Modelo de Swinbank o Berdahl para cielo nocturno despejado
Ta_C = Ta - 273.15; % conversión a °C
e = 0.6108 * exp((17.27 * Ta_C)/(Ta_C + 237.3)); % Presión de vapor aprox. [kPa]
emisividad_cielo = 0.711 + 0.0056 * e + 0.000073 * e^2; % modelo empírico
T_sky = (emisividad_cielo ^ 0.25) * Ta;
end

```

## Apéndice E

### Pcm\_Conductive\_Step

```

function [T_mean, f_liq_mean, Q_u, energy_error] = ...
    pcm_Conductive_step(pcm, geom, T0, q_wall_flux, dt)
% Validación de temperatura
if T0 < 270 || T0 > 1000
    error('pcm_Conductive_step: Temp entrada no física: %.2f K', T0);
end

N = 500;
R = geom.Di / 2;
[rC, ~, vcell, Aface] = buildMeshPCM(R, N, geom.L); % rF: caras, rC: centros

T = T0 * ones(N, 1);
T_old = T;

maxIter = 100;
tol = 1e-4;

for it = 1:maxIter
    % 1. Preasignar variables
    gamma = zeros(N, 1);
    dgdT = zeros(N, 1);

    % 2. Identificar regiones de fase
    mushy = (T >= pcm.T_melt_low) & (T <= pcm.T_melt_high);

    % 3. Calcular dT_melt protegido
    dT_melt = max(pcm.T_melt_high - pcm.T_melt_low, 1e-3);

    % 4. Calcular fracción líquida y derivada
    gamma(T > pcm.T_melt_high) = 1;
    gamma(mushy) = (T(mushy) - pcm.T_melt_low) / dT_melt;
    dgdT(mushy) = 1 / dT_melt;

    % 5. Propiedades térmicas
    k = pcm.k(T);
    C_s = pcm.rho * pcm.cp_s;
    C_l = pcm.rho * pcm.cp_l;
    Lh = pcm.rho * pcm.L_h;
    C_app = max((1-gamma).*C_s + gamma.*C_l + Lh.*dgdT, 100); % Mínimo 100 J/m³K

    % 6. Conductividad en caras (promedio armónico)
    k_face = 2 * k(1:N-1) .* k(2:N) ./ (k(1:N-1) + k(2:N));

    % 7. Distancia entre centros (¡CORRECCIÓN CLAVE!)
    dr_centers = diff(rC); % Distancia entre centros adyacentes

    % 8. Coeficientes de conductancia

```

```

G_east = k_face .* Aface(2:N) ./ dr_centers; % Caras internas este (índices 2 a N)
G_west = G_east; % Por simetría radial, misma área para caras oeste

% 9. Construcción de coeficientes del sistema (signos correctos)
aE = [G_east; 0]; % siempre positivos
aw = [0; G_west]; % siempre positivos
aP = C_app.*Vcell/dt + aw + aE;

% 10. Celda 1 (centro): Condición de simetría
% aP(1) = C_app(1)*Vcell(1)/dt + G_east(1);
% aE(1) = -G_east(1); % Coeficiente para T2
aP(1) = C_app(1)*Vcell(1)/dt + aE(1); % aw(1)=0
aP(N) = C_app(N)*Vcell(N)/dt + aw(N); % aE(N)=0 ya

% 11. Celda N (borde exterior)
% aw(N) = -G_west(N-1); % T_{N-1}
% aP(N) = C_app(N)*Vcell(N)/dt + G_west(N-1);
aP(N) = C_app(N)*Vcell(N)/dt + aw(N); % aE(N)=0

% 12. Vector fuente
Su = C_app .* Vcell .* T_old / dt;
Su(N) = Su(N) + q_wall_flux * Aface(N+1); % Flujo entrante en borde

% 13. Construcción de matriz tridiagonal (¡CORRECCIÓN!)
% Preparar diagonales con longitud N

subdiag = [-aw(2:N); 0];
maindiag = aP;
superdiag = [0; -aE(1:N-1)];

% 14. Crear matriz dispersa
A = spdiags([subdiag, maindiag, superdiag], [-1, 0, 1], N, N);

% % Control adaptativo de dt
% if any(abs(T) > 1200) % ejemplo de criterio
% dt = dt/2;
% if dt < 300 % límite mínimo
% error('dt demasiado pequeño - solver inestable');
% end
% continue % reitera con paso menor
% end

% 15. Resolver sistema
Tn = A \ Su;

% Validación de temperatura física durante iteraciones
if any(Tn < 200) || any(Tn > 1200)
    error('Temperatura no física en iteración %d: min=%.2f K, max=%.2f K', ...
        it, min(Tn), max(Tn));
end

% 16. Verificar convergencia
if max(abs(Tn - T)) < tol
    T = Tn;
    break;

```

```
end
    T = Tn;
end

% 17. Cálculos finales
Q_u = q_wall_flux * Aface(N+1); % [J]
energy_error = abs(Q_u*dt - sum(C_app.*(T - T_old).*vcell)) / (abs(Q_u*dt) + 1e-12);
T_mean = sum(T .* vcell) / sum(vcell);

% T_max = pcm.T_melt_high + 50; % Máximo 50K sobre punto de fusión
% T_mean = min(T_mean, T_max);

f_liq_mean = sum(gamma .* vcell) / sum(vcell);
% 5. Garantizar fracción líquida válida
f_liq_mean = min(max(f_liq_mean, 0), 1);
end
```

## Apéndice F

```
function [theta, theta_z, I_ext, omega, psi_ideal_deg, alpha_deg, gamma_deg] = solarAngles(site,
LT, beta, surface_az)
```

```
%
% SALIDAS SIN NaN / Inf - robusta para todo el año y cualquier hora
% SALIDAS:
% theta      : ángulo de incidencia en el plano (°)
% theta_z    : ángulo cenital solar (°)
% I_ext      : irradiancia extraterrestre (W/m2)
% omega      : hour angle (°) [<0 mañana, >0 tarde]
% psi_ideal_deg : giro ideal HSAT N-S (°), +Oeste / -Este
% alpha_deg  : altura solar (°) (opcional)
% gamma_deg  : azimut solar desde SUR (°) (opcional, +Oeste/-Este)
%-----
```

## Constantes y Clamps

```
Gsc = 1367;           % [W m-2] constante solar
LT  = mod(LT,24);     % fuerza 0 ≤ LT < 24 (evita |Inf)
% day = max( 1, min(site.day, 366) ); % 1 ... 366
% --- PATCH S1: si site.day no existe, usar 1 por defecto (robustez) ---
if ~isfield(site,'day') || isempty(site.day)
    day = 1;
else
    day = max(1, min(site.day, 366)); % 1 ... 366
end

lat = max(-90, min( 90, site.lat )); % recorte de latitud
beta = max( 0, min( 90, beta      )); % 0 - 90 °
az   = mod(surface_az, 360);        % -> 0 - 360 °

if ~isfield(site,'tracking_mode'), site.tracking_mode = 'stationary'; end
trk = strcmpi(site.tracking_mode,'tracking');
```

## Ecuaciones Solares Básicas

```
B      = (day-1)*360/365;
EOT    = 229.2*(7.5e-5+0.001868*cosd(B)-0.032077*sind(B) ...
        -0.014615*cosd(2*B)-0.04089*sind(2*B));
tsol   = LT + (4*(site.lonSTD-site.lonLoc) + EOT)/60; % h solares
omega  = 15*(tsol - 12); % °

delta  = 23.45*sind(360*(284+day)/365); % declinación
phi    = lat;
```

## Irradiancia Extraterrestre

```
I_ext = Gsc*(1 + 0.033*cosd(B));           % jamás NaN (<0 solo por redondeo)
if I_ext < 0, I_ext = 0; end
```

### Ángulo Cenital

```
c_zen = cosd(phi).*cosd(delta).*cosd(omega) + sind(phi).*sind(delta);
c_zen = max(-1, min(1, c_zen));           % evita NaN numéricos
theta_z = acosd(c_zen);                   % 0 - 180 °
if theta_z > 90                           % sol bajo horizonte
    theta_z = 90;
end
```

### Ángulo De Incidencia

```
if trk                                     % *** seguimiento de 1 eje ***
    c_theta = sqrt( cosd(delta).^2 .* sind(omega).^2 + ...
                   (cosd(phi).*cosd(delta).*cosd(omega) + ...
                    sind(phi).*sind(delta)).^2 );
    % c_theta ∈ [0,1]; nunca NaN
    theta = acosd( min(max(c_theta,0),1) );

else                                       % *** superficie fija ***
    term1 = sind(delta).*(sind(phi).*cosd(beta) - ...
                          cosd(phi).*sind(beta).*cosd(az));
    term2 = cosd(delta).*cosd(omega).*(cosd(phi).*cosd(beta) + ...
                                         sind(phi).*sind(beta).*cosd(az));
    term3 = cosd(delta).*sind(beta).*sind(az).*sind(omega);

    c_theta = term1 + term2 + term3;
    c_theta = max(-1, min(1, c_theta));    % clamp
    theta = acosd(c_theta);

end

if theta > 90, theta = 90; end            % sol "por detrás"
```

### Salida Garantizada Finita

```
theta = real(theta);                     % descarta parte imaginaria residual
theta_z = real(theta_z);
I_ext = real(I_ext);
```

### Salidas Opcionales (HSAT N-S Ideal)

```
sin_alpha = sind(phi).*sind(delta) + cosd(phi).*cosd(delta).*cosd(omega);
alpha_deg = asind(sin_alpha);
y = sind(omega);
x = cosd(omega).*sind(phi) - tand(delta).*cosd(phi);
gamma_deg = atan2d(y, x); % -180..+180

if nargout >= 5
    if theta_z >= 90
        psi_ideal_deg = 0;
    else
        % HSAT N-S: tan(psi) = sin(gamma)/tan(alpha)
        den = tand(alpha_deg);
        if abs(den) < 1e-6
            psi_ideal_deg = sign(sind(gamma_deg))*90; % cerca del horizonte
        else
            psi_ideal_deg = atan2d( sind(gamma_deg), den );
        end
    end
    psi_ideal_deg = max(-90, min(90, psi_ideal_deg));
end

if nargout >= 6, alpha_deg = real(alpha_deg); end
if nargout >= 7, gamma_deg = real(gamma_deg); end
end
```

## Apéndice G

```
function [DNI, DHI, qc_flag] = decomposeGHI(GHI, theta_z, I_ext)

% decomposeGHI → devuelve DNI, DHI y un flag de calidad opcional.
% ▶ GHI      : Irradiancia global horizontal [Wm-2]
% ▶ theta_z  : Ángulo cenital solar         [°]
% ▶ I_ext    : Irradiancia extraterrestre  [Wm-2]
%
% qc_flag = 0 dato aceptado
%           2 posible nublado extremo (DHI>>DNI)
%           3 difusa sospechosamente alta
%           9 dato ausente o de noche
%
% Autor: <tu nombre> (2024-06)
```

## Pre-Cálculos

```
cosz = cosd(theta_z);
qc_flag = 0; % ← (1) valor por defecto
```

## Noche/Crepúsculo – descartar

```
if GHI <= 1e-3 || cosz <= 0.075 %  $\theta_z \geq 86^\circ$ 
    DNI = 0; DHI = 0; qc_flag = 9; % ← (1)
    return
end
```

## Modelo Pérez-Erbs

```
Io = I_ext * cosz;
kt = min(max(GHI / (Io + eps), 0), 1);

if kt <= 0.22
    df = 1 - 0.09*kt;
elseif kt <= 0.80
    df = 0.9511 - 0.1604*kt + 4.388*kt^2 ...
        - 16.638*kt^3 + 12.336*kt^4;
else
    df = 0.165;
end

DHI = GHI * df;
DNI = (GHI - DHI) / (cosz + eps);
```

### Cotas Físicas y Chequeos Finales

```
DNI = max(min(DNI, 1200), 0);
DHI = max(min(DHI, 550), 0);

% ← (2) bandera de calidad automática
if DNI < 10 && DHI > 300
    qc_flag = 2;           % nublado extremo
elseif DHI > 450
    qc_flag = 3;         % difusa sospechosa
end
end
```

## Apéndice H

```

function [G_beam_tilted, G_diffuse_tilted, G_reflected_tilted] = transposeIrradiance(DNI, DHI,
GHI, I_ext, theta, theta_z, beta, albedo)
% transposeIrradiance Calcula las componentes de la irradiancia sobre una superficie inclinada.
%
% Este modelo implementa el modelo anisotrópico de Perez et al. (1990) para
% obtener una estimación de alta precisión de la irradiancia difusa sobre
% una superficie inclinada.
%
% ENTRADAS:
% DNI:      Irradiancia Directa Normal [W/m^2]
% DHI:      Irradiancia Difusa Horizontal [W/m^2]
% GHI:      Irradiancia Global Horizontal [W/m^2]
% I_ext:    Irradiancia Extraterrestre sobre un plano horizontal [W/m^2]
% theta:    Ángulo de incidencia sobre la superficie inclinada [grados]
% theta_z:  Ángulo cenital [grados]
% beta:     Ángulo de inclinación de la superficie [grados]
% albedo:   Reflectividad del suelo (típicamente 0.2) [adimensional]
%
% SALIDAS:
% G_beam_tilted:    Componente directa sobre la superficie inclinada [W/m^2]
% G_diffuse_tilted: Componente difusa sobre la superficie inclinada [W/m^2]
% G_reflected_tilted: Componente reflejada sobre la superficie inclinada [W/m^2]

% --- Condición inicial: Si no hay sol, no hay irradiancia ---
if GHI <= 1e-6 || cosd(theta_z) <= 1e-6
    G_beam_tilted = 0;
    G_diffuse_tilted = 0;
    G_reflected_tilted = 0;
    return;
end

% --- 1. Cálculo de la componente directa y reflejada (son iguales para todos los modelos) ---
G_beam_tilted = DNI * cosd(theta);
G_reflected_tilted = GHI * albedo * (1 - cosd(beta))/2;

% --- 2. Implementación del Modelo Anisotrópico de PEREZ ---

% a) Cálculo de la masa de aire (Air Mass)
alpha_sol = 90 - theta_z; % Altitud solar en grados
if alpha_sol >= 10
    air_mass = 1 / sind(alpha_sol);
else
    air_mass = 1 / (sind(alpha_sol) + 0.15 * (alpha_sol + 3.885)^(-1.253));
end

% b) Cálculo de los parámetros del cielo de Perez: Epsilon y Delta
K_perez = 1.041; % Constante para ángulos en radianes
theta_z_rad = deg2rad(theta_z);

```

```

% Parámetro de claridad del cielo (epsilon)
% Se añade un pequeño valor a DHI para evitar la división por cero en cielos perfectamente
despejados
epsilon = ((DHI + DNI) / (DHI + 1e-6) + K_perez * theta_z_rad^3) / (1 + K_perez * theta_z_rad^3);

% Parámetro de brillo del cielo (delta)
delta_perez = air_mass * DHI / (I_ext + 1e-6);

% c) Selección de los coeficientes de brillo (f11, f12, ...) según la claridad del cielo
if epsilon < 1.065
    f = [-0.008, 0.588, -0.062, -0.060, 0.072, -0.022];
elseif epsilon < 1.230
    f = [0.130, 0.683, -0.151, -0.019, 0.066, -0.029];
elseif epsilon < 1.500
    f = [0.330, 0.487, -0.221, 0.055, -0.064, -0.026];
elseif epsilon < 1.950
    f = [0.568, 0.187, -0.295, 0.109, -0.152, -0.014];
elseif epsilon < 2.800
    f = [0.873, -0.392, -0.362, 0.226, -0.462, 0.001];
elseif epsilon < 4.500
    f = [1.132, -1.237, -0.412, 0.288, -0.823, 0.056];
elseif epsilon < 6.200
    f = [1.060, -1.600, -0.359, 0.264, -1.127, 0.131];
else % epsilon >= 6.200
    f = [0.678, -0.327, -0.250, 0.156, -1.377, 0.251];
end
f11=f(1); f12=f(2); f13=f(3); f21=f(4); f22=f(5); f23=f(6);

% d) Cálculo de los coeficientes de anisotropía F1 (circumsolar) y F2 (horizonte)
F1 = max(0, f11 + f12*delta_perez + f13*theta_z_rad);
F2 = f21 + f22*delta_perez + f23*theta_z_rad;

% e) Cálculo final de la irradiancia difusa sobre la superficie inclinada
a = max(0, cosd(theta));
b = max(cosd(85), cosd(theta_z)); % Límite para evitar inestabilidad cerca del horizonte

G_diffuse_tilted = DHI * ( (1-F1) * (1+cosd(beta))/2 + F1*(a/b) + F2*sind(beta) );

% Asegurarse de que no haya valores negativos
if G_beam_tilted < 0, G_beam_tilted = 0; end
if G_diffuse_tilted < 0, G_diffuse_tilted = 0; end
if G_reflected_tilted < 0, G_reflected_tilted = 0; end

end

```

## Apéndice I

```

function cam = buildCamLaw(cfg, varargin)
% buildCamLaw  $\phi(x)$  monótona para HSAT N-S con opciones de:
% - x_max_override: forzar stroke máximo de diseño (m)
% - psi_limit_deg : limitar  $|\psi|$  (°) para evitar saturación inútil cerca del horizonte
% - weight_pow : ponderación  $\sim \sin(\alpha)^\rho$  ( $\rho \approx 1-2$ ) para priorizar horas energéticas

% --- Parámetros opcionales ---
p = inputParser;
defPsi = 82;
if isfield(cfg,'cam') && isfield(cfg.cam,'psi_limit_deg')
    defPsi = cfg.cam.psi_limit_deg;
end
addParameter(p,'cdf_gamma',0.55); % NUEVO: sesga carrera hacia  $\psi$  pequeños
addParameter(p,'psi_limit_deg',defPsi);
addParameter(p,'weight_pow',2.3);
addParameter(p,'x_max_override',[]);
parse(p,varargin{:});

psi_limit = deg2rad(p.Results.psi_limit_deg);
wpow = p.Results.weight_pow;
x_max_override = p.Results.x_max_override;

% --- Muestreo anual de  $\psi_{ideal}$  y  $\alpha$  (cada dt) ---
dias = 1:365;
dt_h = cfg.num.dt/3600;
psi_v = []; % [rad], amplitud
w_v = []; % pesos  $\sim \sin(\alpha)^\rho$ 
% (Micro-mejora de claridad): usa la copia local 'site' en la llamada.
site = cfg.site;
site.tracking_mode = 'stationary'; % (no afecta  $\alpha, \gamma$ )

for d = dias
    site.day = d;
    for h = 0.5:dt_h:23.5
        [~, theta_z, ~, ~, psi_ideal_deg, alpha_deg] = solarAngles(site, h,
site.beta, site.surface_az);
        if theta_z < 90 && isfinite(psi_ideal_deg)
            % amplitud y límite
            psi_rad = min(abs(deg2rad(psi_ideal_deg)), psi_limit);
            psi_v(end+1,1) = psi_rad; %#ok<AGROW>
            % peso energético simple
            w_v(end+1,1) = max(sind(alpha_deg),0)^wpow; %#ok<AGROW>
        end
    end
end
if isempty(psi_v)
    error('buildCamLaw: no se obtuvieron muestras solares; verifica solarAngles().');
end

% --- Ordenar por  $\psi$  y construir CDF ponderada ---

```

```

[psi_sorted, idx] = sort(psi_v);
w_sorted = w_v(idx);

% Asegurar pesos estrictamente positivos (evita tramos planos en cw):
w_sorted = w_sorted + eps; % <-- CLAVE

cw = cumsum(w_sorted); % CDF ponderada estrictamente creciente
cw = (cw - cw(1)) / (cw(end) - cw(1) + eps); % 0..1
cw = cw.^p.Results.cdf_gamma; % <-- MÁS resolución alrededor del mediodía

% --- stroke máximo de diseño (con fallback robusto) ---
v0 = cfg.geom.v_pcm;
dv_th_max = v0 * cfg.pcm.beta_1 * ((80+273.15) - cfg.pcm.T_ref);
dv_lat_max = v0 * (cfg.pcm.rho_s/cfg.pcm.rho_l - 1);
dv_max = max(dv_th_max + dv_lat_max, 0);
x_geom = max(dv_max / cfg.mechanic.piston_area, 1e-9); % geométrico mínimo

if ~isempty(x_max_override) && isfinite(x_max_override) && x_max_override > 0
    x_max = x_max_override;
elseif ~isempty(x_max_override)
    warning('buildCamLaw: x_max_override inválido (%.3g). Se usa fallback
geométrico.', x_max_override);
    x_max = x_geom;
else
    x_max = x_geom;
end

% --- Asignación MONÓTONA  $\phi(x)$  con cuantiles ponderados ---
x_profile = x_max * cw; % [m], 0 → x_max (pero la 1ª muestra no
será 0 exacto)
[psi_u, iu] = unique(psi_sorted, 'stable'); %  $\psi$  creciente (0... $\psi_{lim}$ ) y sin duplicados
x_u = x_profile(iu); % stroke correspondiente

% === CORRECCIÓN C) Anclar la LUT en (x=0,  $\phi=0$ ) ===
% Al muestrear cada 30 min, casi nunca cae exactamente en mediodía ⇒  $\psi=0$  no aparece.
% Además, la CDF hace que  $x_u(1)>0$ . Prependemos (0,0) si hace falta.
if psi_u(1) > 0 || x_u(1) > 0
    psi_u = [0; psi_u(:)];
    x_u = [0; x_u(:)];
end
% (Opcional robusto): asegurar que el último punto llega a x_max exactamente
% if abs(x_u(end) - x_max) > 1e-12
%     x_u(end+1,1) = x_max;
%     psi_u(end+1,1) = psi_u(end); % mantener pendiente suave al final
% end
% (Forzar extremo) SIN añadir un punto nuevo (evita duplicados de  $\phi$ ):
x_u(end) = x_max;

% (Robustez) eliminar cualquier duplicado numérico residual en x y  $\phi$ 
[x_u, Iu] = unique(x_u, 'stable');
psi_u = psi_u(Iu);

```

```
% (opcional) verificación dura:
assert(all(diff(x_u) > 0) && all(diff(psi_u) >= 0), 'LUT  $\phi(x)$  no monótona.');
```

% LUT y funciones helper

```
cam.lift_u = x_u; % [m] creciente
cam.phi_u = psi_u; % [rad] 0.. $\psi_{limit}$ 
cam.psi_limit_deg = p.Results.psi_limit_deg;
```

% Sanidad: unicidad estricta (interp1 lo exige)

```
assert(numel(unique(cam.lift_u)) == numel(cam.lift_u), 'lift_u tiene duplicados.');
```

```
assert(numel(unique(cam.phi_u)) == numel(cam.phi_u), 'phi_u tiene duplicados.');
```

cam.phi\_of\_x = @(x) interp1( ...  
 cam.lift\_u, cam.phi\_u, ...  
 min(max(x, cam.lift\_u(1)), cam.lift\_u(end)), ...  
 'pchip');

cam.x\_of\_phi = @(phi) interp1( ...  
 cam.phi\_u, cam.lift\_u, ...  
 min(max(phi, cam.phi\_u(1)), cam.phi\_u(end)), ...  
 'pchip');

```
cam.psi_max_deg = rad2deg(max(cam.phi_u));
end
```

## Apéndice J

## CPC Involuta con Gap

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% CPC INVOLUTA CON GAP
% Entradas:
%   geom.r      [m]   radio tubo
%   geom.lg     [m]   gap reflector-tubo (vidrio)
%   geom.thetaA [rad] semiancho de aceptación
%   geom.Npts   puntos por tramo
%   geom.W_a    (opt) ancho de apertura objetivo para truncar
%
% Salidas:
%   XYright, XYleft : coordenadas (x,y) de cada pared
%   meta           : métricas (altura, W_a real, thetaM)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [XYright, XYleft, meta] = cpc_involute_gap(geom)

% ----- Parseo de entrada -----

r      = geom.r;
lg     = geom.lg;
thetaA = geom.thetaA;
N      = geom.Npts;

% -----bloque de chequeos-----

assert(thetaA < pi/2, 'thetaA debe ser < 90°');
assert(lg > 0, 'El gap debe ser positivo');
assert(r > 0, 'Radio positivo');

%----- 2. Ángulos característicos -----
thetaM = acos( r / (r + lg) );           % inicio de la involuta con gap
if r >= (r+lg)
    error('Gap no definido: lg debe ser > 0');
end

%----- 3. Tramo INVOLUTA (lado derecho) -----
thInv = linspace(thetaM, thetaA + pi/2, N);
pInv = (r + lg)*sin(thetaM) + r*(thInv - thetaM); % ec. 6.1

xInv = r*sin(thInv) - pInv.*cos(thInv);
yInv = -r*cos(thInv) - pInv.*sin(thInv);           % eje y positivo ↑

%----- 4. Tramo PROLONGACIÓN (lado derecho) -----
% Intervalo angular desde el final de la involuta (theta+pi/2) hasta 3pi/2-theta
thRef = linspace(thetaA + pi/2, 3*pi/2 - thetaA, N);
pRef = r * ( thetaA + pi/2 + thRef ...
            - 2*thetaM + 2*tan(thetaM) ...
            - cos(thRef - thetaA) ) ...
      ./ (1 + sin(thRef - thetaA) + eps);

```

```

% =====

% Coordenadas cartesianas de la prolongación
xRef = r*sin(thRef) - pRef .* cos(thRef);
yRef = -r*cos(thRef) - pRef .* sin(thRef); % eje y positivo ↑

% --- 5. Ensamble pared derecha ---
XYright = [ [xInv(:); xRef(:)] , [yInv(:); yRef(:)] ];

% --- 6. Pared izquierda por simetría ---
% XYleft = [-XYright(:,1), XYright(:,2)];

% --- 7. Métricas ---
meta.W_a = max(XYright(:,1)) - min(XYright(:,1));
meta.H = max(XYright(:,2));
meta.thetaM = thetaM;

%----- 5. GRÁFICA -----
figure; clf; hold on; axis equal; grid on

% Pared derecha
plot( xInv, yInv, 'b' , 'Linewidth', 2) % involuta
plot( xRef, yRef, 'm' , 'Linewidth', 2) % prolongación

% Pared izquierda (simetría)
plot(-xInv, yInv, 'b' , 'Linewidth', 2)
plot(-xRef, yRef, 'm' , 'Linewidth', 2)

% Tubo metálico
ang = linspace(0,2*pi,360);
plot( r*cos(ang), r*sin(ang), 'k', 'Linewidth', 2)

% Tubo de vidrio (radio r + lg)
rg = r + lg;
plot( rg*cos(ang), rg*sin(ang), 'color', [0.3 0.6 1], 'Linewidth', 1.5)

xlabel('x [m]'); ylabel('y [m]');
title(sprintf('CPC involuta r = %.0f m gap = %.0f m \\theta_A = %.0f°', ...
r, lg, rad2deg(thetaA)))
axis tight

```

### Exportación a CSV

```

xRight = [xInv(:) ; xRef(:)];
yRight = [yInv(:) ; yRef(:)];
XYright = [xRight , yRight];

% Pared izquierda = reflejo en eje x
XYleft = [-xRight , yRight];

% Archivo completo con salto entre lados (NaN,NaN)

```

```
%XYfull = [XYright; NaN NaN; XYleft];

T = table(xRight, yRight, 'variableNames', {'x','y'});
writetable(T, 'CPC_right.csv');

% Guarda con 6 decimales (suficiente para un CPC de dimensión ≈ 1 m)
writematrix(round(XYright,6), 'CPC_right.csv');
writematrix(round(XYleft ,6), 'CPC_left.csv' );
writematrix(round([XYright; NaN NaN; XYleft],6), 'CPC_full.csv');
% (fila NaN,NaN crea un salto de curva → algunos CAD lo aceptan como contorno abierto)

disp('► Archivos CSV exportados correctamente.')
end
```

## Apéndice K

```

function [r_centers, dr, v_cell, A_faces] = buildMeshPCM(R, N, L)
% buildMeshPCM Construye una malla radial 1D para un cilindro.
%
% ENTRADAS:
% R: Radio del cilindro [m]
% N: Número de celdas radiales
% L: Longitud del cilindro [m]
%
% SALIDAS:
% r_centers: vector (N×1) con la posición radial del centro de cada celda [m]
% dr:        vector (N×1) con el espesor radial de cada celda [m]
% v_cell:    vector (N×1) con el volumen de cada celda anular [m³]
% A_faces:   vector (N+1×1) con el área de cada cara cilíndrica [m²]

% 1. Definir las caras (límites) de las celdas, desde r=0 hasta r=R
r_faces = linspace(0, R, N+1)';

% 2. Calcular los centros de las celdas
r_centers = (r_faces(1:end-1) + r_faces(2:end)) / 2;

% 3. Calcular el espesor de cada celda
dr = diff(r_faces);

% 4. Calcular el área de cada cara cilíndrica
A_faces = 2 * pi * r_faces * L;

% 5. Calcular el volumen de cada celda anular (versión matemáticamente exacta)
v_cell = pi * (r_faces(2:end).^2 - r_faces(1:end-1).^2) * L;

% Validación de consistencia geométrica
total_volume = pi * R^2 * L;
sum_vcell = sum(v_cell);
vol_error = abs(total_volume - sum_vcell)/total_volume;

if vol_error > 0.01
    warning('Error de volumen: %.2f%. Total: %.4f m³, Suma celdas: %.4f m³', ...
        vol_error*100, total_volume, sum_vcell);
end

% Validación de áreas
if A_faces(1) > 1e-6
    warning('Área en r=0 no es cero: A0 = %.6f m²', A_faces(1));
end

end

```

## Apéndice L

### Calculate\_pv\_energy

```

function pv_results = calculate_pv_energy(cfg, resultados_tabla)
% calculate_pv_energy
% Calcula energía FV hora a hora en tres casos:
% 1) PANEL FIJO (beta y azimut de cfg.site)
% 2) SEGUIMIENTO IDEAL (2 ejes; incidencia 0°; cuenta consumo del seguidor)
% 3) SEGUIMIENTO MECÁNICO (usa el ángulo mecánico de resultados_tabla.angle)
%
% ENTRADAS:
%   cfg           : struct global (usa cfg.data.*, cfg.site.*, cfg.pv.*)
%   resultados_tabla : tabla construida con struct2table(resultados)
%
% SALIDA:
%   pv_results : struct con vectores horarios de energía generada/consumida (kwh)

% ----- Parámetros de referencia y pérdidas (marco teórico)
G_ref = 1000;           % [w/m2] STC
T_ref = 25;            % [°C]   STC (para la corrección térmica)
% Pérdidas BOS (usar valores medios; ajustarlos por mes/llovía)
f_soiling = 1 - 0.03;
f_mismatch = 1 - 0.01;
f_wiring   = 1 - 0.01;
f_degrad   = 1 - 0.02;
eta_BOS    = f_soiling * f_mismatch * f_wiring * f_degrad;

% ----- Consumo de seguidor (caso 2)
% 310 kWh/MW·año -> escalar por potencia instalada [MW] (por módulo)
consumo_anual_kwh = 310 * (cfg.pv.P_pico/1e6); % kWh/año para UN módulo
num_horas = numel(cfg.data.GHI);
consumo_hora_kwh = consumo_anual_kwh / num_horas; % lo repartimos uniforme

%-----Inicialización
E_fijo_kwh   = zeros(num_horas,1);
E_ideal_kwh  = zeros(num_horas,1);
E_mec_kwh    = zeros(num_horas,1);
E_cons_ideal_kwh = zeros(num_horas,1);

az_s        = cfg.site.surface_az;
beta_fijo   = cfg.site.beta;
albedo      = cfg.site.albedo;

% >>> PATCH D0: forzar rama estacionaria para cálculos de incidencia del plano
site_fixed = cfg.site;
site_fixed.tracking_mode = 'stationary';

% Ángulo mecánico (asumimos viene en grados en resultados_tabla.angle)
if ismember('angle', resultados_tabla.Properties.VariableNames)
    psi_mech = resultados_tabla.angle; % ya está en grados y con signo

```

```

else
    psi_mech = zeros(num_horas,1);
end
psi_mech(~isfinite(psi_mech)) = 0;
psi_mech = max(min(psi_mech, 90), -90);    % clamp correcto: [-90, 90] preserva el signo

for k = 1:num_horas
    TaC = cfg.data.Ta(k) - 273.15;    % [°C]
    GHI = max(cfg.data.GHI(k),0);

    % Sol y descomposición (theta_z e I_ext no dependen de la orientación)
    hora_local = mod(k-1,24)+0.5;
    cfg.site.day = floor((k-1)/24)+1;
    site_fixed.day = cfg.site.day;

    % Sol básico (θz, Iext, ω, y también α y γ para HSAT)
    [~, theta_z, I_ext, ~, ~, alpha_deg, gamma_deg] = solarAngles(cfg.site, hora_local,
beta_fijo, az_s);
    if GHI>cfg.opt.minIrradiance && cosd(theta_z)>0
        [DNI,DHI] = decomposeGHI(GHI, theta_z, I_ext);
    else
        DNI = 0; DHI = 0;
    end

    % -----
    % CASO 1: PLANO FIJO (usa tu función de transposición existente)
    % -----
    % >>> PATCH D1: usar rama estacionaria, independientemente del modo global

    [theta_inc_fijo, ~, ~] = solarAngles(site_fixed, hora_local, beta_fijo, az_s);
    [G_bf, G_df, G_rf] = transposeIrradiance(DNI, DHI, GHI, I_ext, ...
        theta_inc_fijo, theta_z, beta_fijo, albedo);
    G_poa_fijo = max(G_bf+G_df+G_rf,0);
    if G_poa_fijo>0
        % (71) NOCT
        Tcell = TaC + (cfg.pv.NOCT - 20)/800 * G_poa_fijo;
        % (72) Potencia DC con corrección térmica
        Pdc = cfg.pv.P_pico * (G_poa_fijo/G_ref) * (1 + cfg.pv.gamma*(Tcell - T_ref));
        % (73) Balance BOS
        Pnet = Pdc * eta_BOS;
        % (74) Energía horaria (Δt=1h)
        E_fijo_kwh(k) = Pnet/1000;
    end

    % -----
    % CASO 2: SEGUIMIENTO IDEAL (2 ejes)
    % β = 90° - θz (si la normal del panel apunta al sol)
    % -----
    % >>> PATCH D2: corregir β del plano para dos ejes ideales
    beta_id = 90 - theta_z;    % <- correcto para β medido desde la horizontal
    theta_inc = 0;    % normal alineada con el sol
    G_poa_id = pv_poa_simple(DNI, DHI, GHI, theta_z, theta_inc, beta_id, albedo);
    if G_poa_id>0
        Tcell = TaC + (cfg.pv.NOCT - 20)/800 * G_poa_id;
    end
end

```

```

Pdc = cfg.pv.P_pico * (G_poa_id/G_ref) * (1 + cfg.pv.gamma*(Tcell - T_ref));
Pnet = Pdc * eta_BOS;
E_ideal_kwh(k) = Pnet/1000;
E_cons_ideal_kwh(k) = consumo_hora_kwh; % costo energético del seguidor
end

% -----
% CASO 3: SEGUIMIENTO MECÁNICO (pasivo, sin consumo)
% Eje N-S: el plano gira E-0  $\Rightarrow \beta = \theta_{\text{mech}}$  (azimut del plano fijo = cfg.site.surface_az)
% -----
% Dar SIGNO al giro: mañana  $\psi < 0$ , tarde  $\psi > 0$ 
psi_k = psi_mech(k); % [°], 0 de noche por  $\theta_z \geq 90$ 

% Incidencia HSAT con  $\psi$  dado:
%  $\cos\theta = \sin\alpha \cos\psi + \cos\alpha \sin\psi \sin\gamma$ 
if (theta_z < 90) && (DNI>0)
    cos_theta = sind(alpha_deg)*cosd(psi_k) + ...
               cosd(alpha_deg)*sind(psi_k).*sind(gamma_deg);
    cos_theta = max(0, min(1, cos_theta));
    theta_inc_mec = acosd(cos_theta);
else
    theta_inc_mec = 90;
end
% >>> PATCH D3: incidencia real con el mismo solarAngles en modo estacionario
beta_mec = abs(psi_k); % tilt instantáneo del plano
G_poa_mec = pv_poa_simple(DNI, DHI, GHI, theta_z, theta_inc_mec, beta_mec, albedo);
if G_poa_mec>0
    Tcell = TaC + (cfg.pv.NOCT - 20)/800 * G_poa_mec;
    Pdc = cfg.pv.P_pico * (G_poa_mec/G_ref) * (1 + cfg.pv.gamma*(Tcell - T_ref));
    Pnet = Pdc * eta_BOS;
    E_mec_kwh(k) = Pnet/1000;
end
end

% Empaquetado
pv_results.E_gen_fijo_kwh = E_fijo_kwh;
pv_results.E_gen_ideal_kwh = E_ideal_kwh;
pv_results.E_gen_mecanico_kwh = E_mec_kwh;
pv_results.E_consumo_tracker_kwh = E_cons_ideal_kwh;
pv_results.E_net_ideal_kwh = E_ideal_kwh - E_cons_ideal_kwh; % neto
pv_results.E_net_mecanico_kwh = E_mec_kwh; % pasivo

end

% =====
% HELPER: POA sencillo (beam + cielo isotrópico + reflejada del suelo)
% =====
function G_poa = pv_poa_simple(DNI, DHI, GHI, theta_z, theta_inc, beta, albedo)
    mu_b = max(cosd(theta_inc),0);
    G_beam = (theta_z>=90) * 0 + (theta_z<90) * (DNI * mu_b);
    F_sky = (1+cosd(beta))/2;
    F_gnd = (1-cosd(beta))/2;
    G_diff = DHI * F_sky;

```

```
G_refl = GHI * albedo * F_gnd;  
G_poa = max(G_beam+G_diff+G_refl,0);  
end
```

**Apéndice M**

```
function plot_cpc(XYright, XYleft, geom)
figure('Name','Geometría CPC','Position',[100 100 600 500]); clf; hold on; grid on; axis equal
plot(XYright(:,1), XYright(:,2), 'b', 'Linewidth', 2);
plot(XYleft(:,1), XYleft(:,2), 'b', 'Linewidth', 2);

% Tubo y vidrio
ang = linspace(0,2*pi,360);
plot(geom.r*cos(ang), geom.r*sin(ang), 'k', 'Linewidth', 1.5);
plot((geom.r+geom.lg)*cos(ang), (geom.r+geom.lg)*sin(ang), 'color',[0.3 0.6 1], 'Linewidth', 1);

xlabel('x [m]'); ylabel('y [m]');
title(sprintf('CPC: w_a=%.3f m H=%.3f m \\theta_A=%.1f°', ...
    geom.w_a, max(XYright(:,2)), rad2deg(geom.thetaA)));
end
```

## Apéndice N

### Export\_cpc\_csv

```
function export_cpc_csv(XYright, XYleft, baseName)
% baseName: prefijo, p.ej. 'output/CPC'

XYfull = [XYright; NaN NaN; XYleft];

writematrix(round(XYright,6), [baseName '_right.csv']);
writematrix(round(XYleft ,6), [baseName '_left.csv' ]);
writematrix(round(XYfull ,6), [baseName '_full.csv' ]);

fprintf('► Curvas CPC exportadas en "%s_*.csv"\n', baseName);
end
```

## Apéndice O

### ValidateConfiguration(cfg)

```
function validateConfiguration(cfg)

% VALIDATECONFIGURATION Verifica exhaustivamente la estructura cfg
% Realiza validaciones de tipo, rango y consistencia física para todos los parámetros
```

#### 1. Validación de Estructuras Principales

```
assert(isfield(cfg, 'geom'), 'Estructura "geom" no definida. ');
assert(isfield(cfg, 'opt'), 'Estructura "opt" no definida. ');
assert(isfield(cfg, 'site'), 'Estructura "site" no definida. ');
assert(isfield(cfg, 'data'), 'Estructura "data" no definida. ');
assert(isfield(cfg, 'num'), 'Estructura "num" no definida. ');
assert(isfield(cfg, 'htf'), 'Estructura "htf" no definida. ');
```

Not enough input arguments.

```
Error in validateConfiguration (line 6)
assert(isfield(cfg, 'geom'), 'Estructura "geom" no definida. ');
    ^^^
```

#### Validación Geométrica

```
geom = cfg.geom;
validateattributes(geom.W_a, {'numeric'}, {'scalar', 'positive'}, '', 'geom.W_a');
validateattributes(geom.L, {'numeric'}, {'scalar', 'positive'}, '', 'geom.L');
validateattributes(geom.Di, {'numeric'}, {'scalar', 'positive'}, '', 'geom.Di');
validateattributes(geom.Do, {'numeric'}, {'scalar', 'positive'}, '', 'geom.Do');
validateattributes(geom.Dci, {'numeric'}, {'scalar', 'positive'}, '', 'geom.Dci');
validateattributes(geom.Dco, {'numeric'}, {'scalar', 'positive'}, '', 'geom.Dco');
validateattributes(geom.k_tube, {'numeric'}, {'scalar', 'positive'}, '', 'geom.k_tube');
validateattributes(geom.k_glass, {'numeric'}, {'scalar', 'positive'}, '', 'geom.k_glass');
validateattributes(geom.eps_abs, {'numeric'}, {'scalar', '>=', 0, '<=', 1}, '', 'geom.eps_abs');
validateattributes(geom.eps_cov, {'numeric'}, {'scalar', '>=', 0, '<=', 1}, '', 'geom.eps_cov');
validateattributes(geom.V_pcm, {'numeric'}, {'scalar', 'nonnegative'}, '', 'geom.V_pcm');

% Verificación de relaciones geométricas
assert(geom.Dco > geom.Dci && geom.Dci > geom.Do, 'La secuencia de diámetros debe ser Dco > Dci > Do');
```

#### Validación Óptica

```
opt = cfg.opt;
validateattributes(opt.rho, {'numeric'}, {'scalar', '>=', 0, '<=', 1}, '', 'opt.rho');
```

```

validateattributes(opt.tau, {'numeric'}, {'scalar', '>=', 0, '<=', 1}, '', 'opt.tau');
validateattributes(opt.alpha, {'numeric'}, {'scalar', '>=', 0, '<=', 1}, '', 'opt.alpha');
validateattributes(opt.gamma, {'numeric'}, {'scalar', '>=', 0, '<=', 1}, '', 'opt.gamma');
validateattributes(opt.clean, {'numeric'}, {'scalar', '>=', 0, '<=', 1}, '', 'opt.clean');
validateattributes(opt.minIrradiance, {'numeric'}, {'scalar', 'nonnegative'}, '',
'opt.minIrradiance');

% Validación de función IAM
assert(isa(opt.IAMfun, 'function_handle'), 'opt.IAMfun debe ser function handle.');
```

```

try
    test_theta = [0, 30, 60];
    iam_vals = arrayfun(opt.IAMfun, test_theta);
    assert(all(iam_vals >= 0) && all(iam_vals <= 1.2), 'IAM fuera de rango [0, 1.2]');
```

```

catch
    error('Error en opt.IAMfun: Debe aceptar escalares y devolver valores numéricos.');
```

```

end
```

### Validación de Sitio

```

site = cfg.site;
validateattributes(site.lat, {'numeric'}, {'scalar', '>=', -90, '<=', 90}, '', 'site.lat');
validateattributes(site.lonLoc, {'numeric'}, {'scalar', '>=', -180, '<=', 180}, '',
'site.lonLoc');
```

```

validateattributes(site.lonSTD, {'numeric'}, {'scalar', '>=', -180, '<=', 180}, '',
'site.lonSTD');
```

```

validateattributes(site.beta, {'numeric'}, {'scalar', '>=', 0, '<=', 90}, '', 'site.beta');
validateattributes(site.albedo, {'numeric'}, {'scalar', '>=', 0, '<=', 1}, '', 'site.albedo');
validateattributes(site.surface_az, {'numeric'}, {'scalar', '>=', -180, '<=', 180}, '',
'site.surface_az');
```

```

% Validación de modo de seguimiento
assert(isfield(site, 'tracking_mode'), 'site.tracking_mode no definido.');
```

```

assert(any(strcmpi(site.tracking_mode, {'tracking', 'stationary'})), ...
    'tracking_mode debe ser "tracking" o "stationary"');
```

### Validación Numérica

```

num = cfg.num;
validateattributes(num.iterTol, {'numeric'}, {'scalar', 'positive'}, '', 'num.iterTol');
validateattributes(num.maxIter, {'numeric'}, {'scalar', 'integer', 'positive'}, '',
'num.maxIter');
```

```

validateattributes(num.dt, {'numeric'}, {'scalar', 'positive'}, '', 'num.dt');
```

```

% Validación de función Tsky
assert(isa(num.Tsky_fun, 'function_handle'), 'num.Tsky_fun debe ser function handle.');
```

```

try
    test-Ta = [273, 293, 313];
    tsky_vals = num.Tsky_fun(test-Ta);
    assert(all(tsky_vals < test-Ta), 'Tsky debe ser menor que Ta');
```

```
catch
    error('Error en num.Tsky_fun: Debe aceptar vectores y devolver Tsky < Ta');
end
```

## Validación de Datos Meteorológicos

```
data = cfg.data;
assert(isfield(data, 'GHI'), 'data.GHI no definido. ');
assert(isfield(data, 'Ta'), 'data.Ta no definido. ');
assert(isfield(data, 'vw'), 'data.vw no definido. ');

validateattributes(data.GHI, {'numeric'}, {'vector', 'numel', 8760, 'nonnegative'}, '',
'data.GHI');
validateattributes(data.Ta, {'numeric'}, {'vector', 'numel', 8760, '>=', 200, '<=', 350}, '',
'data.Ta');
validateattributes(data.vw, {'numeric'}, {'vector', 'numel', 8760, 'nonnegative'}, '',
'data.vw');
```

## Validación Específica por Modo

```
htf = cfg.htf;
assert(isfield(htf, 'mode'), 'htf.mode no definido. ');
assert(any(strcmpi(htf.mode, {'flow', 'static_wax'})), ...
    'htf.mode debe ser "flow" o "static_wax"');

validateattributes(htf.mdot, {'numeric'}, {'scalar', 'nonnegative'}, '', 'htf.mdot');
validateattributes(htf.T_in, {'numeric'}, {'vector', 'numel', 8760, '>=', 200, '<=', 500}, '',
'htf.T_in');

if strcmpi(htf.mode, 'flow')
    % Validación para modo de flujo
    props = {'rho', 'k', 'mu', 'cp', 'Pr'};
    for i = 1:length(props)
        prop = props{i};
        assert(isfield(htf, prop) && isa(htf.(prop), 'function_handle'), ...
            ['htf.' prop ' debe ser function handle.']);

        % Prueba de función con rango de temperaturas
        try
            T_test = linspace(273, 373, 5);
            vals = htf.(prop)(T_test);
            assert(all(vals > 0), ['htf.' prop ' devuelve valores no positivos.']);
        catch
            error(['Error en htf.' prop ': Debe funcionar con vectores de temperatura.']);
        end
    end
else
    % Validación para modo PCM
    assert(isfield(cfg, 'pcm'), 'Estructura "pcm" no definida.');
```

```

pcm = cfg.pcm;

% Propiedades escalares
scalar_props = {'rho', 'L_h', 'cp_s', 'cp_l', 'T_melt_low', 'T_melt_high', 'Ra_critical'};
for i = 1:length(scalar_props)
    prop = scalar_props{i};
    assert(isfield(pcm, prop), ['pcm.' prop ' no definido.']);
    validateattributes(pcm.(prop), {'numeric'}, {'scalar', 'positive'}, '', ['pcm.' prop]);
end

% Validación de temperaturas de fusión
assert(pcm.T_melt_low < pcm.T_melt_high, ...
    'pcm.T_melt_low debe ser menor que pcm.T_melt_high');

% Propiedades function_handle
func_props = {'k', 'beta', 'nu', 'alpha'};
for i = 1:length(func_props)
    prop = func_props{i};
    assert(isfield(pcm, prop) && isa(pcm.(prop), 'function_handle'), ...
        ['pcm.' prop ' debe ser function handle.']);
end

% Prueba de función con rango de temperaturas
try
    T_test = linspace(pcm.T_melt_low-20, pcm.T_melt_high+20, 5);
    vals = pcm.(prop)(T_test);
    assert(all(vals > 0), ['pcm.' prop ' devuelve valores no positivos.']);
catch
    error(['Error en pcm.' prop ': Debe funcionar con vectores de temperatura.']);
end

% Validación especial para alpha
try
    T_test = pcm.T_melt_low;
    alpha_val = pcm.alpha(T_test);
    k_val = pcm.k(T_test);
    assert(abs(alpha_val - k_val/(pcm.rho*pcm.cp_s)) < 1e-6, ...
        'pcm.alpha inconsistente con k, rho y cp_s');
catch
    error('Inconsistencia en pcm.alpha: Debe ser k/(rho*cp)');
end

fprintf('Configuración validada exitosamente para modo: %s\n', htf.mode);
end

```

**Apéndice P**

## CylinderConvection

```
function h_out = cylinderConvection(vw, D, T_film)
% cylinderConvection calcula h_out usando propiedades del aire evaluadas a T_film.

% Llama a la función auxiliar para obtener las propiedades del aire
props = getAirProperties(T_film);

% Extrae las propiedades para mayor claridad en las ecuaciones
nu_aire = props.nu;
Pr_aire = props.Pr;
k_aire = props.k;

% Calcula el Número de Reynolds usando la viscosidad cinemática (nu)
Re=vw*D/nu_aire;

% Correlación de Churchill y Bernstein para el Número de Nusselt (Nu)
Nu =
0.3+((0.62*Re^0.5*Pr_aire^(1/3))/(1+(0.4/Pr_aire)^(2/3))^(1/4))*(1+(Re/282000)^(5/8))^(4/5);

% Calcula el coeficiente de transferencia de calor por convección
h_out = Nu*k_aire/D;
end
```

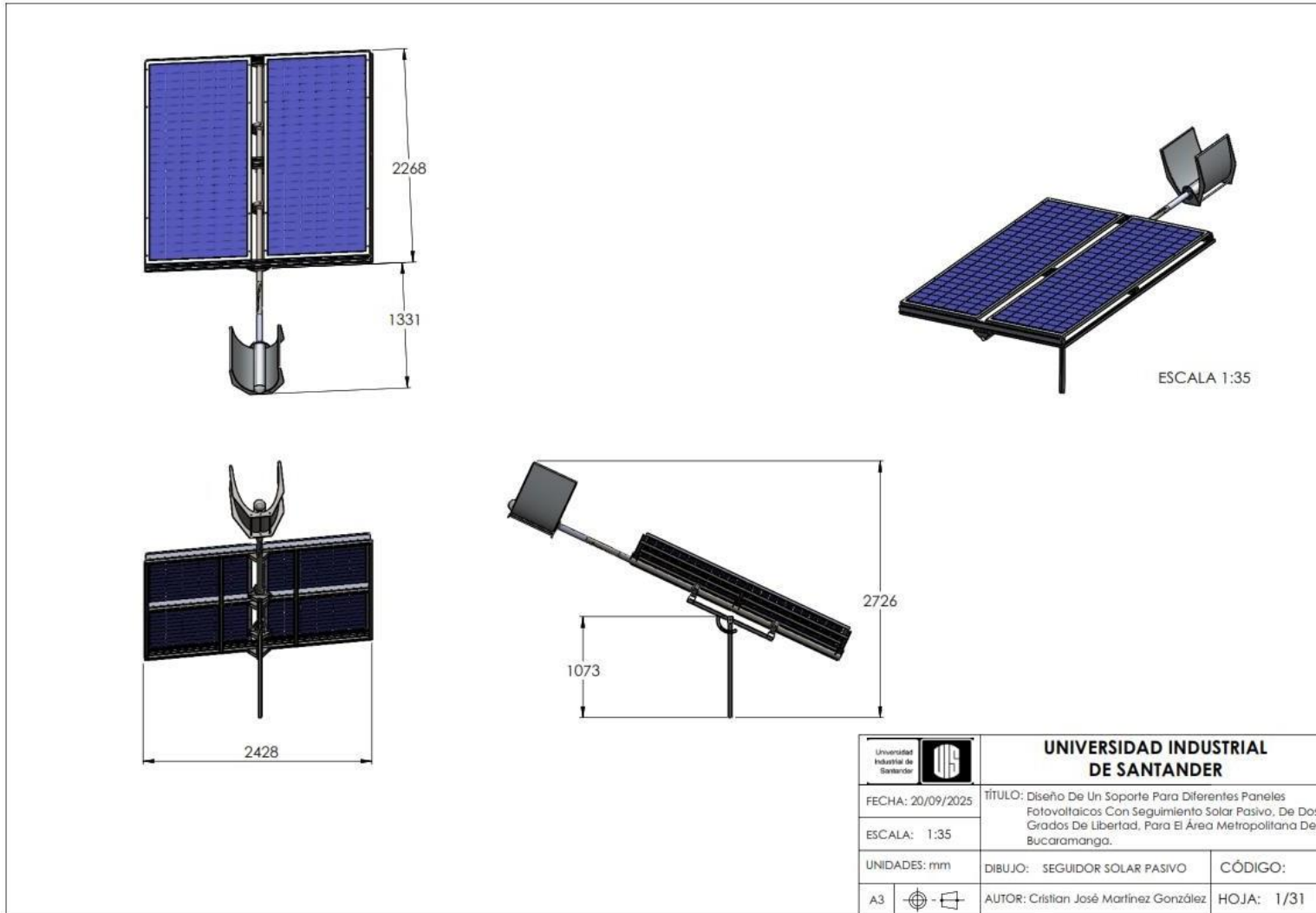
**Apéndice Q**

Resumen de Parámetros de Configuración (*cfg*)

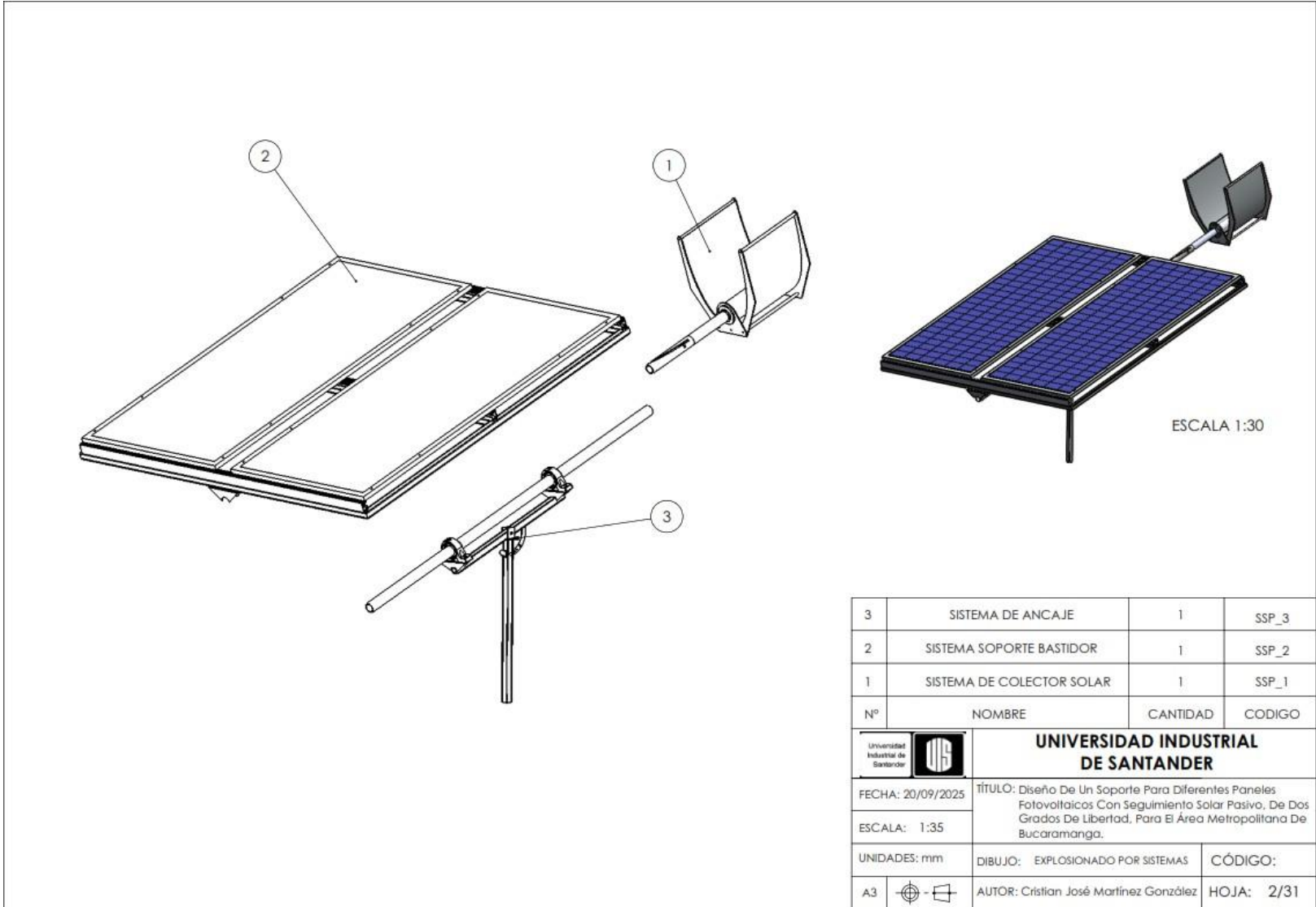
Grupo	Símbolo	Parámetro <i>cfg</i>	Unidad	Valor base	Fuente
<b>Geometría</b>	L	geom.L	m	0.50	Código
	$D_i$	geom.Di	m	0.066	Código
	$D_o$	geom.Do	m	0.070	Código
	$D_{c,i}$	geom.Dci	m	0.115	Código
	$D_{c,o}$	geom.Dco	m	0.125	Código
	$\theta_A$	geom.thetaA	rad	0.5236 (30°)	Código / CPC
	$W_a$	geom.W_a	m	(de <i>cpc_involute_gap</i> )	Síntesis CPC
	$k_{tube}$	geom.k_tube	$Wm^{-1}K^{-1}$	16	literatura
	$k_{glass}$	geom.k_glass	$Wm^{-1}K^{-1}$	1.0	literatura
<b>Óptica</b>	$\rho$	opt.rho	–	0.88	literatura
	$\tau$	opt.tau	–	0.95	literatura
	$\alpha$	opt.alpha	–	0.96	literatura
	$\gamma$	opt.gamma	–	0.95	Factor geométrico
	–	opt.clean	–	0.90	Mantenimiento
	IAM( $\theta$ )	opt.IAMfun( $\theta^\circ$ )	–	$1-5.25 \times 10^{-4}\theta-2.859 \times 10^{-5}\theta^2$	Calibración empírica
<b>Sitio</b>	$\phi$	site.lat	°	6.99	Dato de caso
	$\lambda$	site.lonLoc	°	-73.06	Dato de caso
	$\lambda_{STD}$	site.lonSTD	°	-75	Huso
	$\beta$	site.beta	°	7	Montaje
	albedo	site.albedo	–	0.2	Estándar
	azimut	site.surface_az	°	0 (Sur)	Montaje
<b>Numérico</b>	–	num.dt	s	1800	Estabilidad/eficiencia

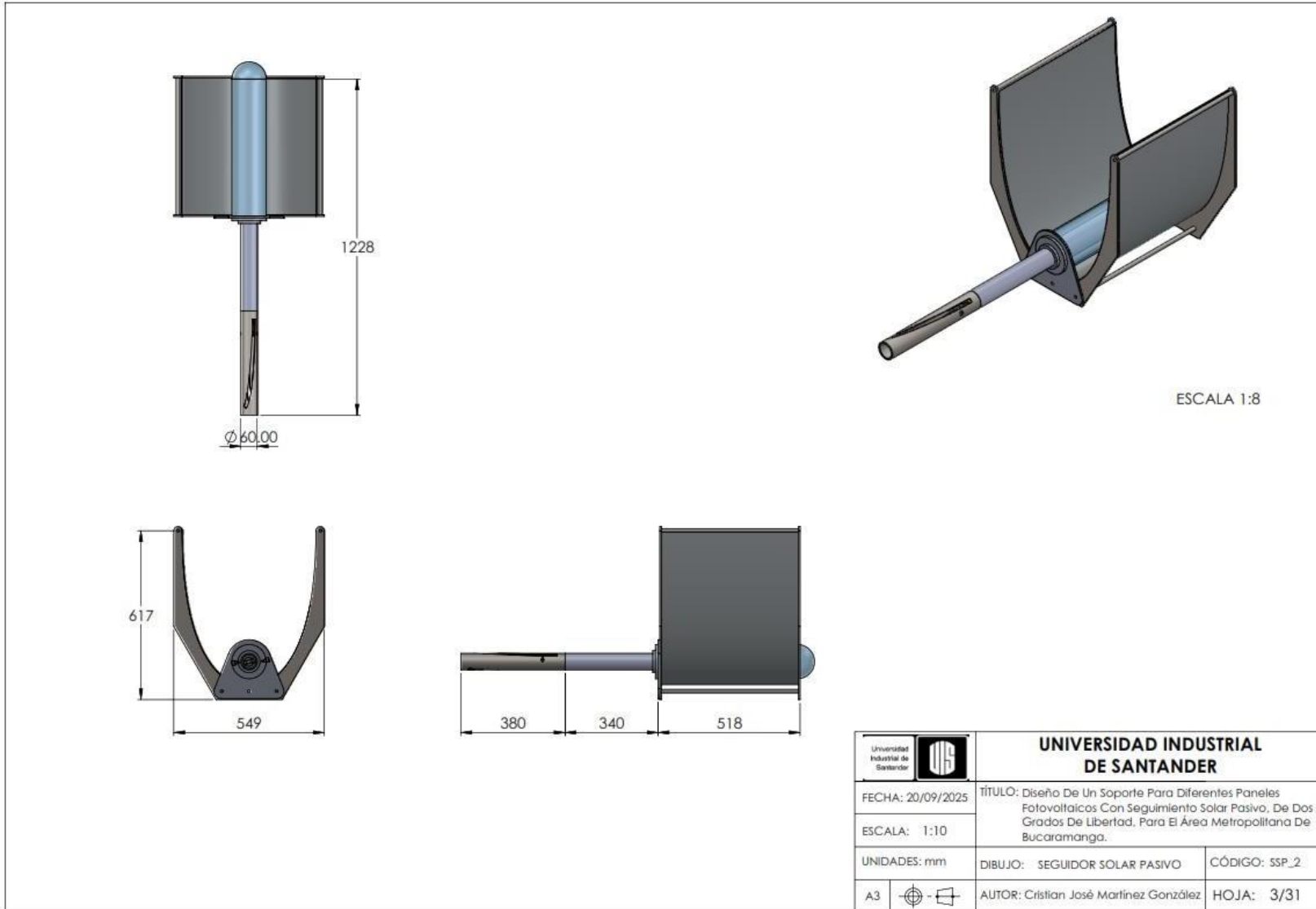
	–	num.iterTol	–	$1e^{-3}$	Convergencia
	–	num.maxIter	–	150	Límite
	$T_{sky}(T_a)$	num.Tsky_fun	K	$0.0552 Ta^{1.5}$	Berdahl–Martin (aprox.)
<b>Umbrales</b>	$G_{min}$	opt.minIrradiance _Wm2	$Wm^{-2}$	10	Corte “sin sol”
<b>PCM RT50</b>	$T_m$	pcm.T_melt_low/ high	K	[321.15 – 325.15]	Hoja de datos
	L	pcm.L_h	$Jkg^{-1}$	$160e^3$	Hoja de datos
	$\rho$	pcm.rho	$kg \cdot m^{-3}$	820	Hoja de datos
	$c_{p,s}$	pcm.cp_s	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	1790	Hoja de datos
	$c_{p,\ell}$	pcm.cp_l	$Jkg^{-1}K^{-1}$	2380	Hoja de datos
	$\beta_s, \beta_\ell$	pcm.beta_s/l	$K^{-1}$	$1.4e^{-3}$	Hoja de datos
	$Ra_{crit}$	pcm.Ra_critical	–	$1e^5$	Churchill–Chu
<b>Mecánico</b>	R	mechanic.cam_ra dius	m	0.025	Diseño
	$A_p$	mechanic.piston_ area	$m^2$	$\pi(0.025)^2 \approx 1.96e^{-3}$	Geometría pistón
<b>PV</b>	$P_{pico}$	pv.P_pico	W	575	Ficha Jinko
	NOCT	pv.NOCT	$^{\circ}C$	45	Ficha
	$\gamma_T$	pv.gamma	$1 \cdot ^{\circ}C^{-1}$	-0.0030	Ficha
	A	pv.Area	$m^2$	2.58	Ficha

Apéndice R



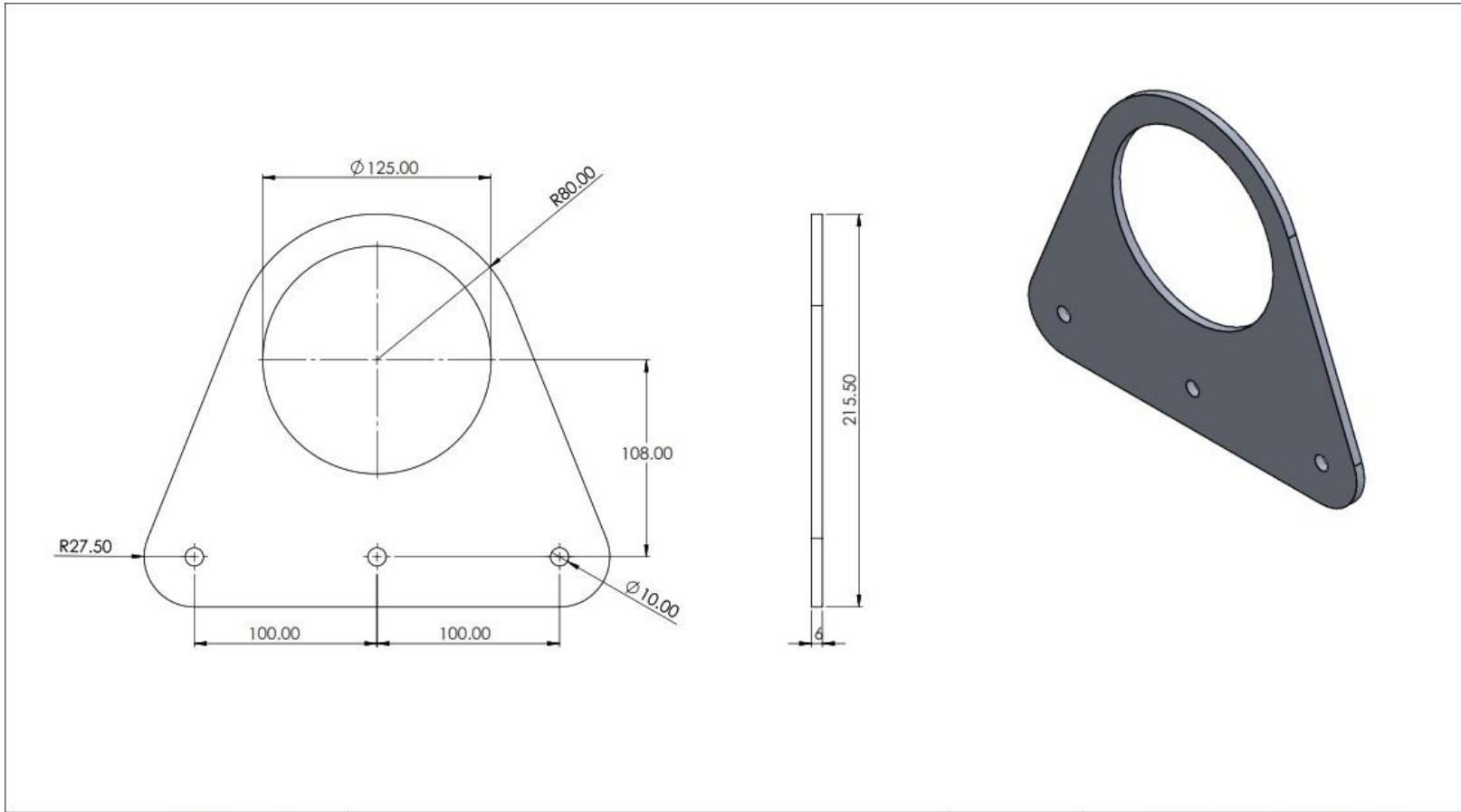
 <b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>	
FECHA: 20/09/2025	TÍTULO: Diseño De Un Soporte Para Diferentes Paneles Fotovoltaicos Con Seguimiento Solar Pasivo, De Dos Grados De Libertad, Para El Área Metropolitana De Bucaramanga.
ESCALA: 1:35	DIBUJO: SEGUIDOR SOLAR PASIVO
UNIDADES: mm	CÓDIGO:
A3 	AUTOR: Cristian José Martínez González
	HOJA: 1/31





10	PISTON THERMALTEC	1	SSP_1.10
9	COBERTURA DE VIDRIO	1	SSP_1.9
8	CONECTOR TIPO FORK	1	SSP_1.8
7	TUBO CONECTOR	4	SSP_1.7
6	SEGUIDOR DE LEVA KR16	1	SSP_1.6
5	LEVA SEGUIDORA	1	SSP_1.5
4	LAMINA BASE	2	SSP_1.4
3	ACOPLE	1	SSP_1.3
2	CPC	1	SSP_1.2
1	LAMINA ACOPLA COLECTOR	2	SSP_1.1
N	NOMBRE	CANTIDAD	CODIGO

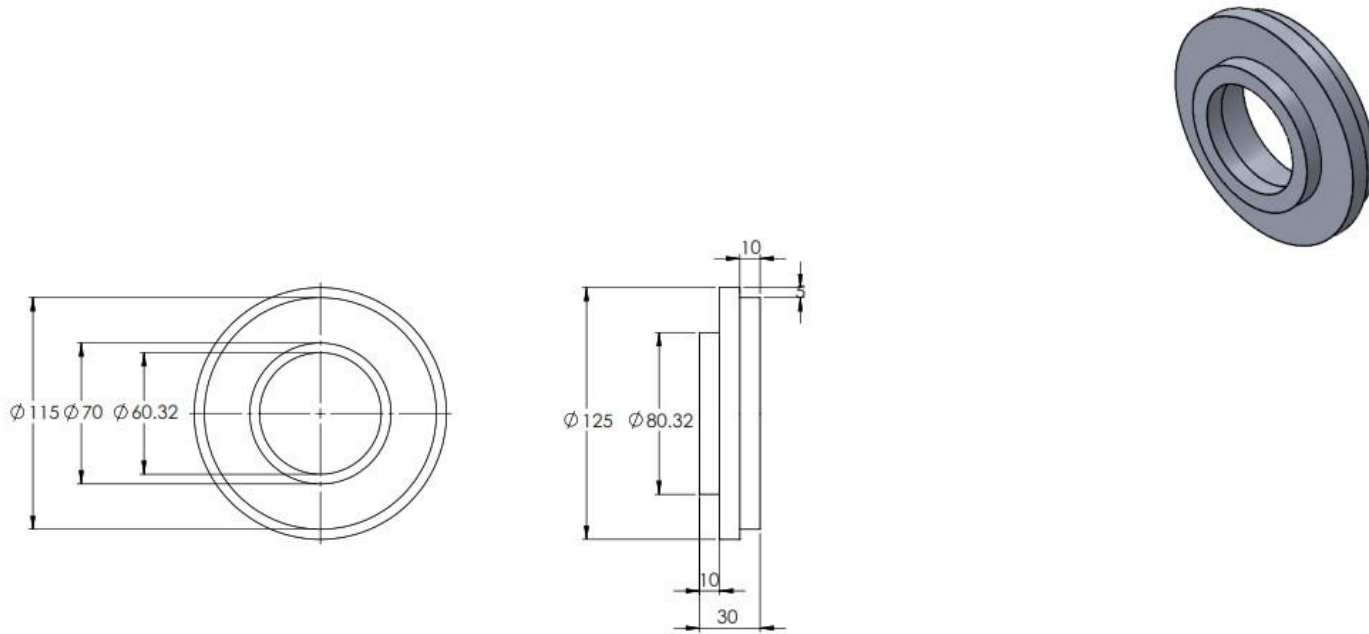
		<b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>	
FECHA: 20/09/2025	TÍTULO: Diseño De Un Soporte Para Diferentes Paneles Fotovoltaicos Con Seguimiento Solar Pasivo, De Dos Grados De Libertad, Para El Area Metropolitana De Bucaramanga.		
ESCALA: 1:35			
UNIDADES: mm	DIBUJO: SEGUIDOR SOLAR PASIVO	CÓDIGO:	
A3		AUTOR: Cristian José Martínez González	HOJA: 4/31



DESCRIPCION DEL PROCESO DE FABRICACION:

MATERIAL: Acero aleado hot roller HR  
 Lamina e= 6mm  
 Cortar segun las medidas generales.  
 \*Nota: Todos los agujeros con pasantes

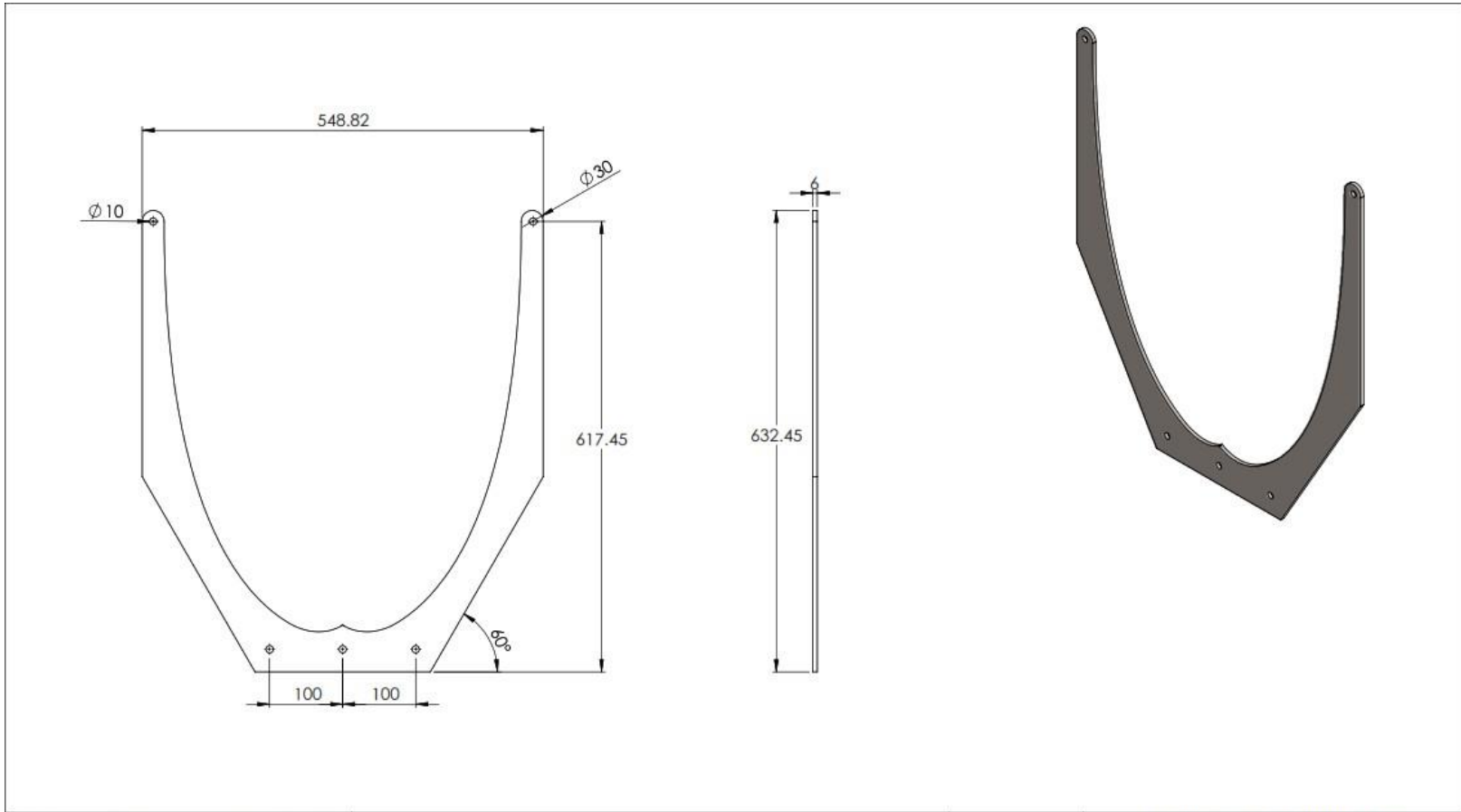
		<b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>	
FECHA: 20/09/2025	TÍTULO: Diseño De Un Soporte Para Diferentes Paneles Fotovoltaicos Con Seguimiento Solar Pasivo, De Dos Grados De Libertad, Para El Area Metropolitana De Bucaramanga.		
ESCALA: 1:2	DIBUJO: LAMINA DE ACOPLE COLECTOR		CÓDIGO: SSP_1.1
UNIDADES: mm	AUTOR: Cristian José Martínez González		HOJA: 5/31
A3			



DESCRIPCION DEL PROCESO DE FABRICACION:

MATERIAL: Acero ASTM A36  
 Eje  $\phi 5''$   
 Cortar y mecanizar segun las medidas generales.

		<b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>	
FECHA: 20/09/2025	TÍTULO: Diseño De Un Soporte Para Diferentes Paneles Fotovoltaicos Con Seguimiento Solar Pasivo, De Dos Grados De Libertad, Para El Area Metropolitana De Bucaramanga.		
ESCALA: 1:2	DIBUJO: ACOPLÉ		CÓDIGO: SSP_1.3
UNIDADES: mm	AUTOR: Cristian José Martínez González		HOJA: 7/31
A3			

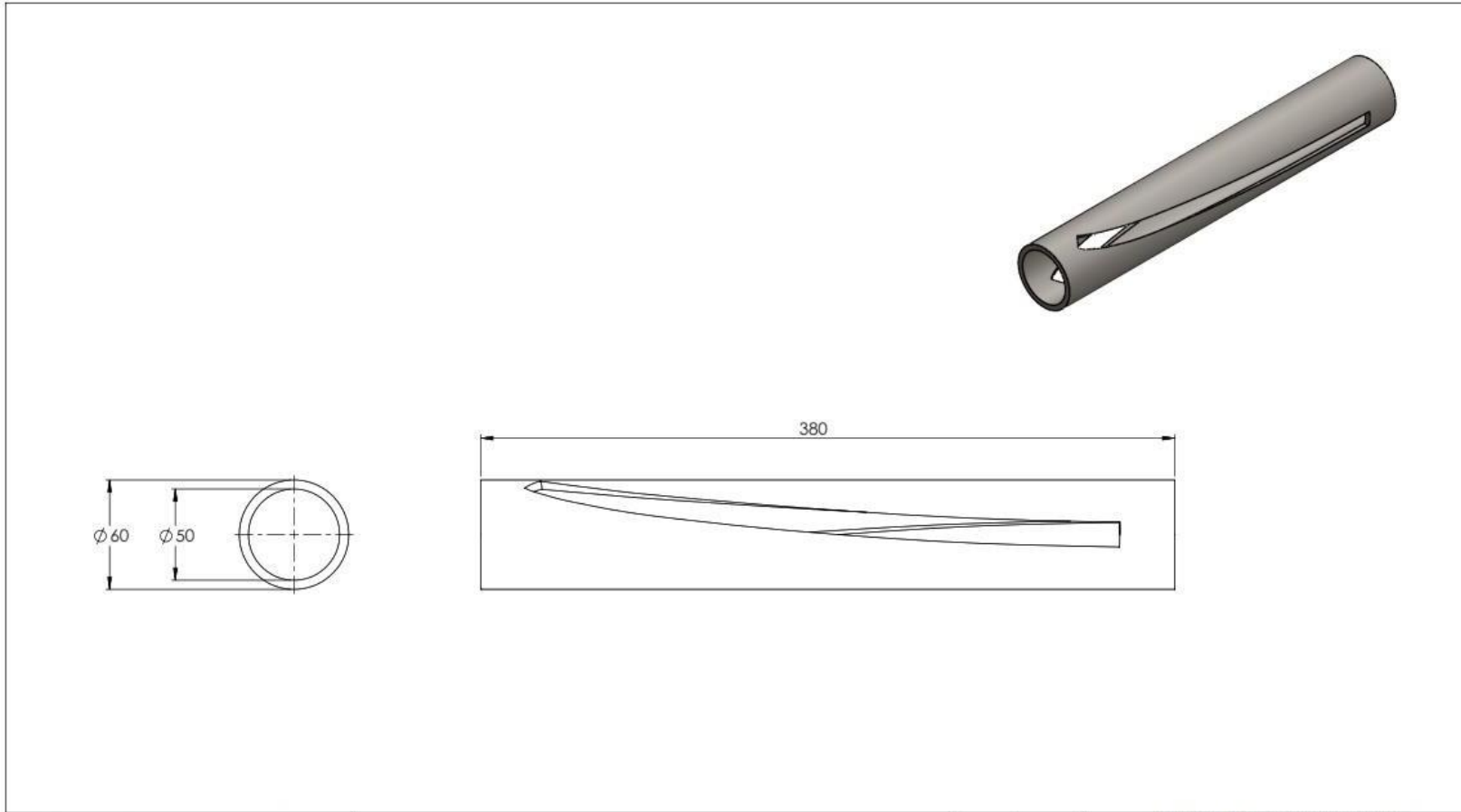


DESCRIPCION DEL PROCESO DE FABRICACION:

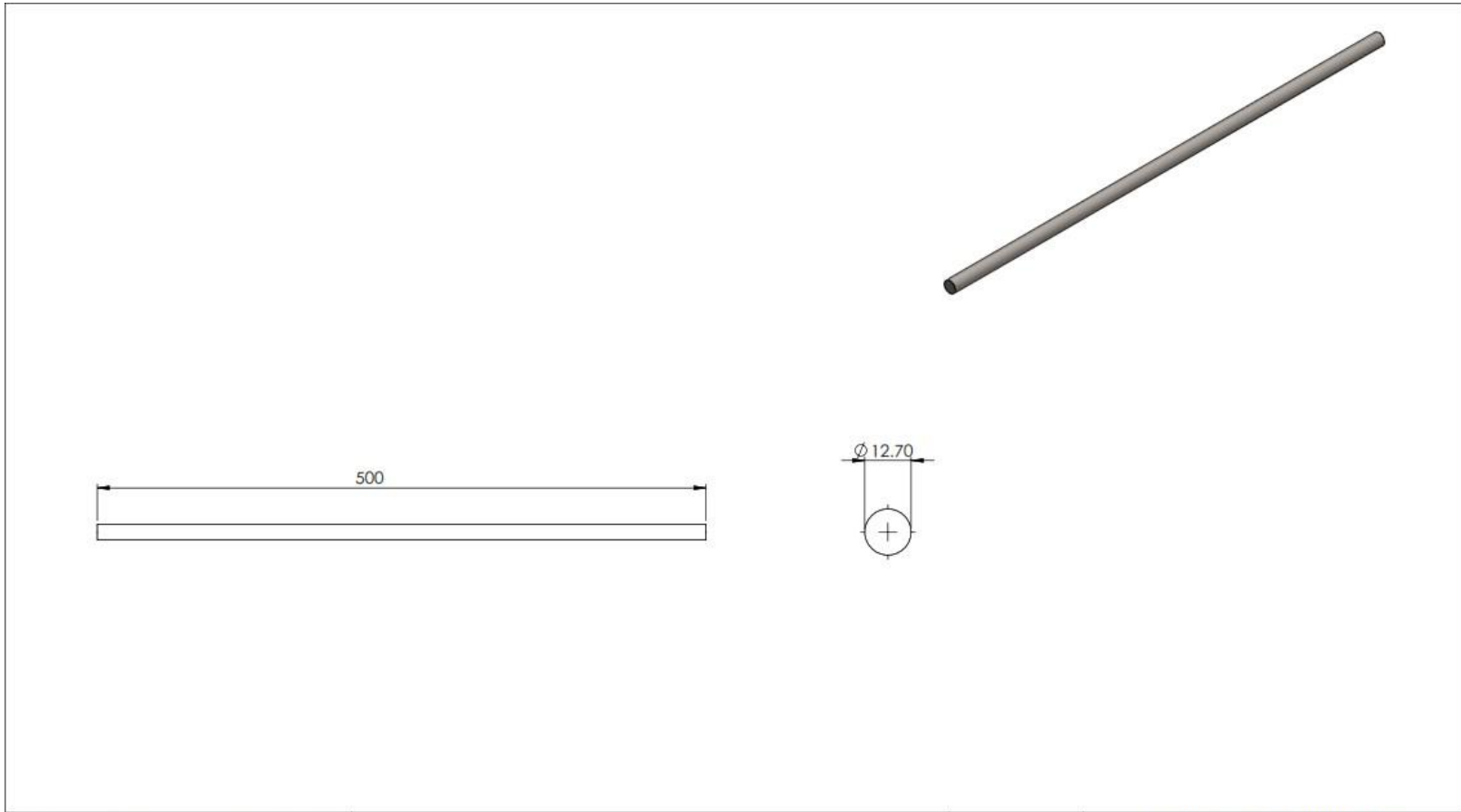
MATERIAL: Acero aleado hot roller HR  
 Lamina e= 6mm  
 Cortar segun las medidas generales.

\*Nota: Todos los agujeros con pasantes

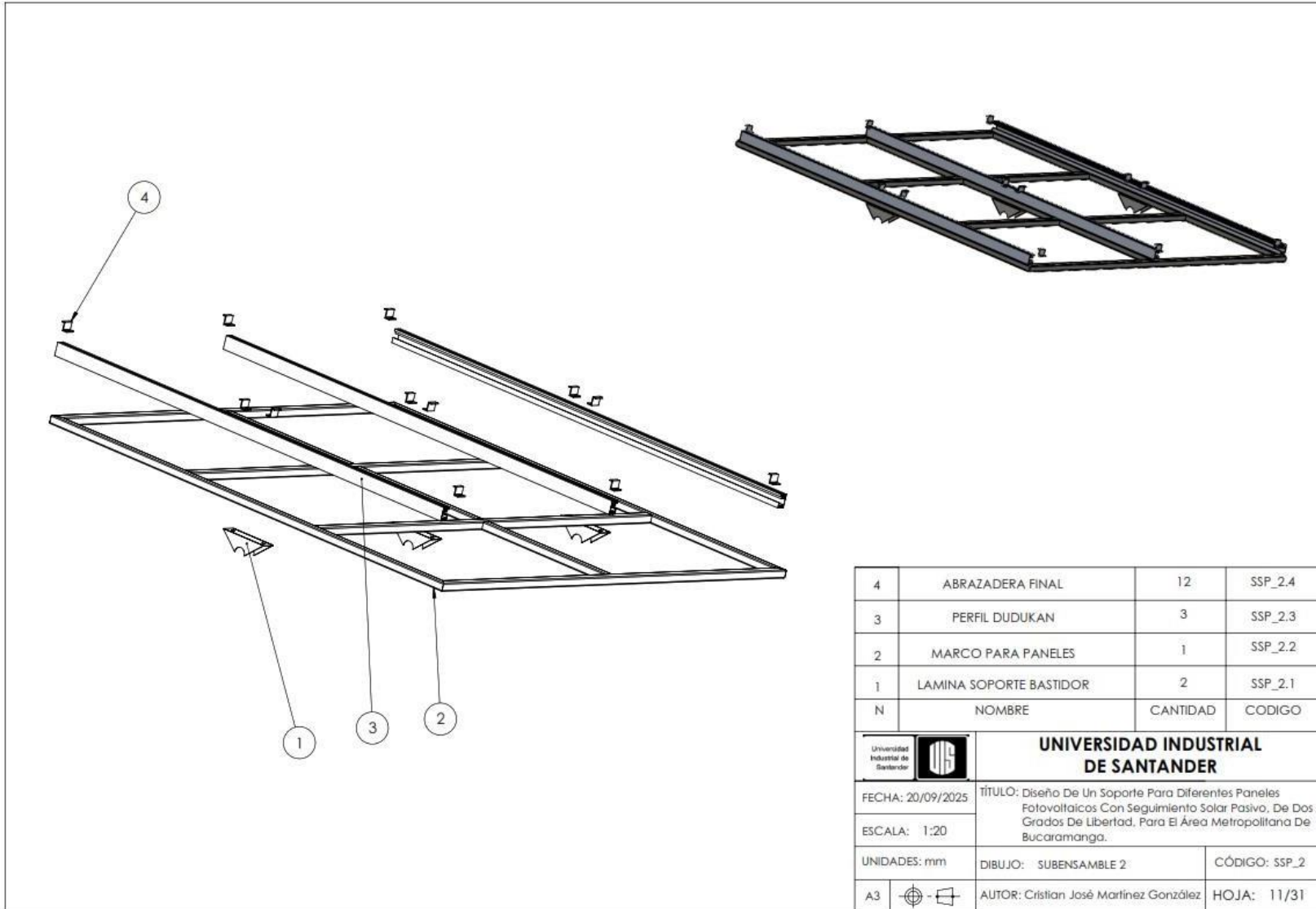
		<b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>	
FECHA: 20/09/2025	TÍTULO: Diseño De Un Soporte Para Diferentes Paneles Fotovoltaicos Con Seguimiento Solar Pasivo, De Dos Grados De Libertad, Para El Area Metropolitana De Bucaramanga.		
ESCALA: 1:5	DIBUJO: LAMINA BASE		CÓDIGO: SSP_1.4
UNIDADES: mm	AUTOR: Cristian José Martínez González		HOJA: 8/31
A3			



DESCRIPCION DEL PROCESO DE FABRICACION:			<b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>	
<p>MATERIAL: Acero ASTM A36 Eje <math>\varnothing 2"</math> Cortar y mecanizar segun las medidas generales.</p> <p>*Nota: Corte en laser de la ranura de la leva</p>			FECHA: 20/09/2025	TÍTULO: Diseño De Un Soporte Para Diferentes Paneles Fotovoltaicos Con Seguimiento Solar Pasivo, De Dos Grados De Libertad, Para El Area Metropolitana De Bucaramanga.
		ESCALA: 1:3	DIBUJO: LEVA SEGUIDORA	CÓDIGO: SSP_1.5
A3		AUTOR: Cristian José Martínez González	HOJA: 9/31	

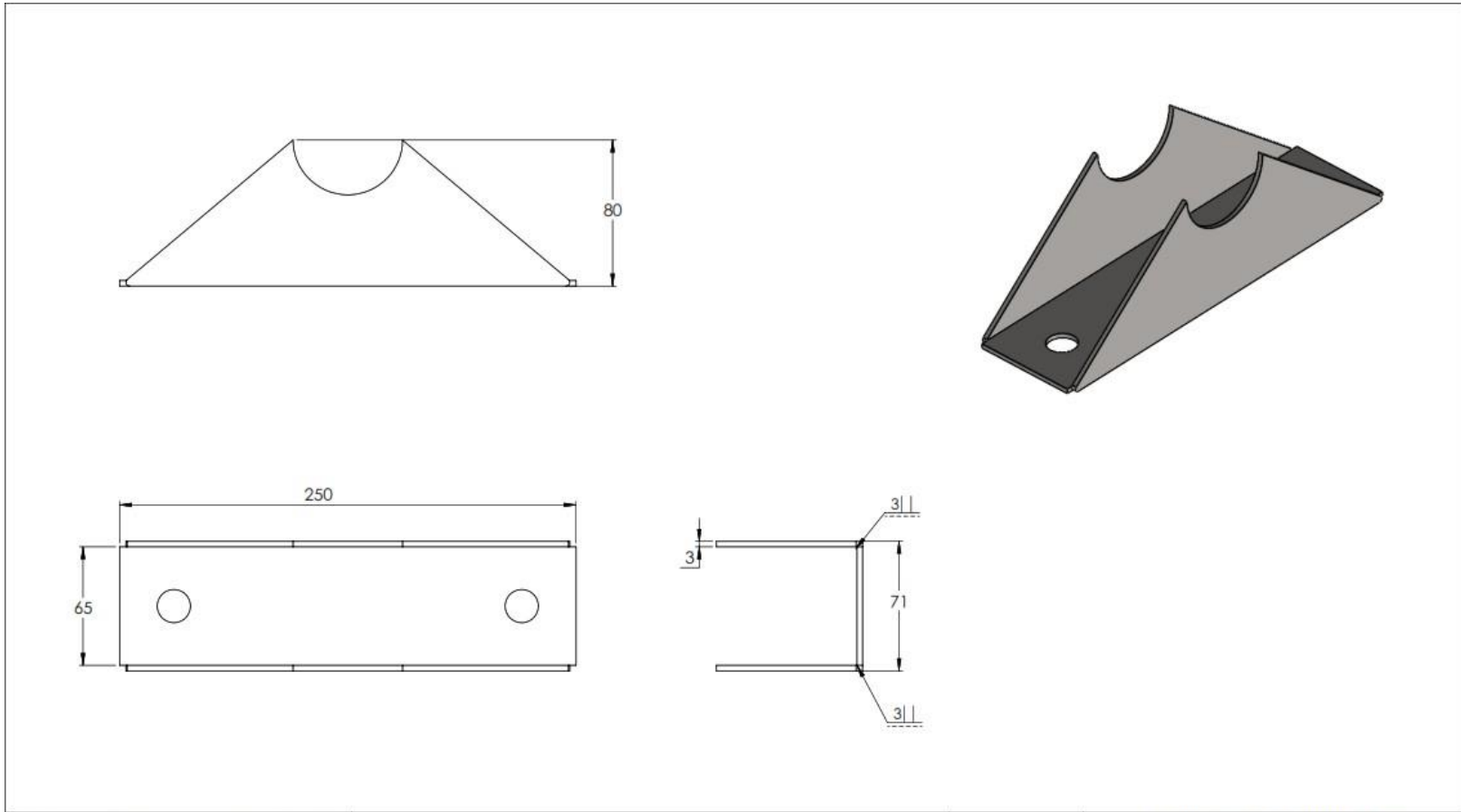


DESCRIPCION DEL PROCESO DE FABRICACION:			<b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>	
<p>MATERIAL: Acero ASTM A36 Eje <math>\varnothing</math> 1/2" Cortar y mecanizar segun las medidas generales.</p>			FECHA: 20/09/2025	TÍTULO: Diseño De Un Soporte Para Diferentes Paneles Fotovoltaicos Con Seguimiento Solar Pasivo, De Dos Grados De Libertad, Para El Area Metropolitana De Bucaramanga.
		ESCALA: 1:3	DIBUJO: TUBO CONECTOR	CÓDIGO: SSP_1.7
A3		AUTOR: Cristian José Martínez González	HOJA: 10/31	

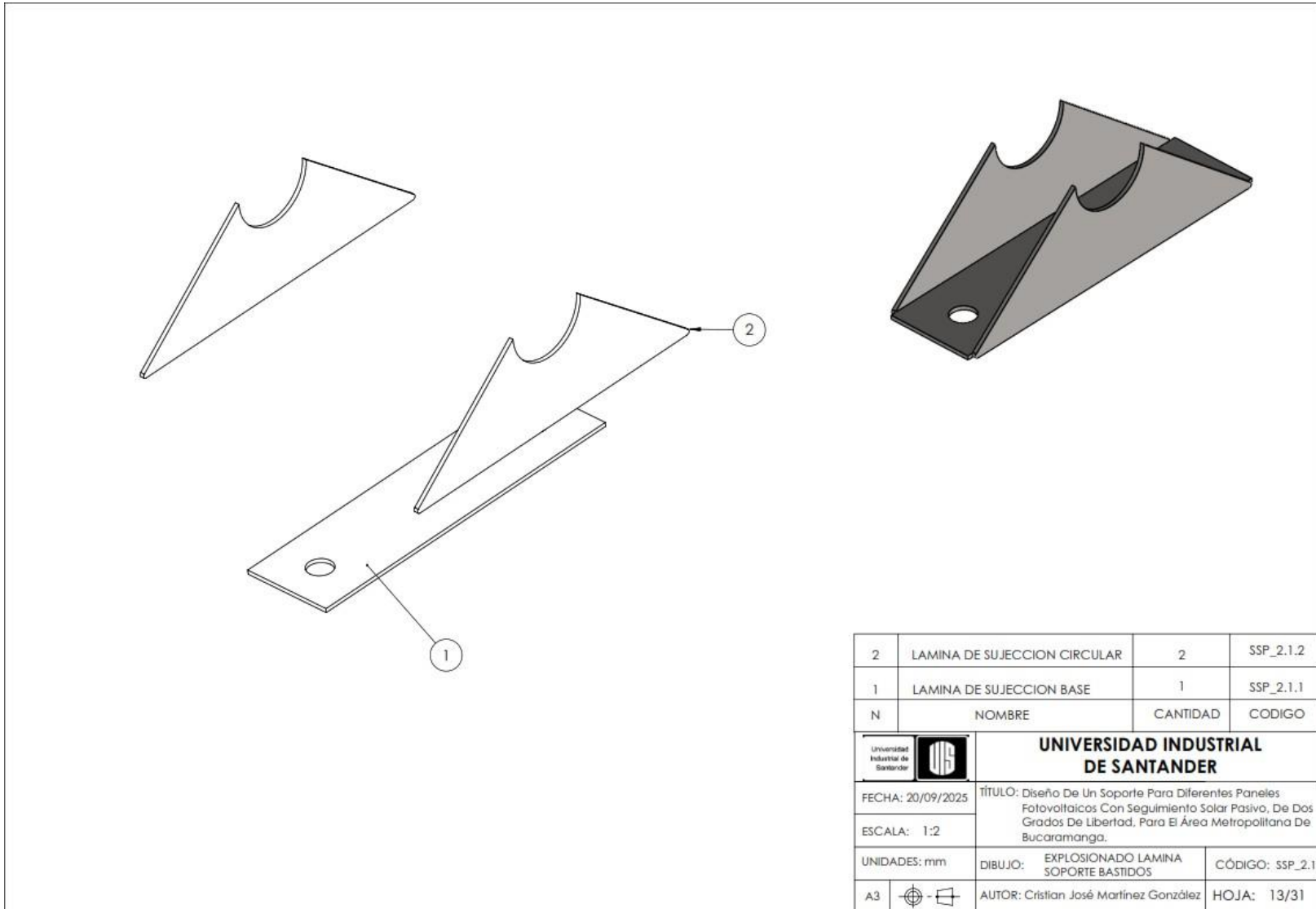


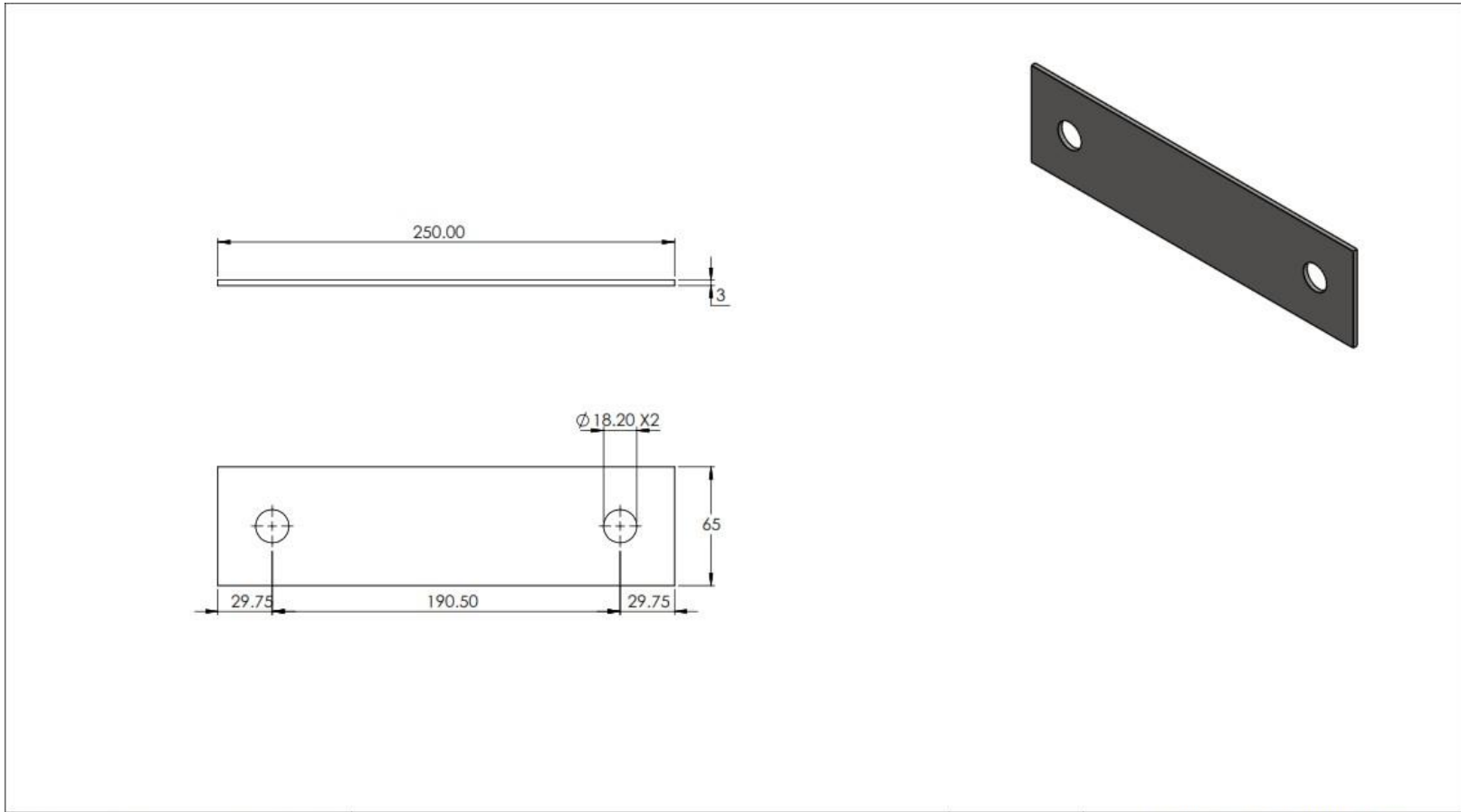
4	ABRAZADERA FINAL	12	SSP_2.4
3	PERFIL DUDUKAN	3	SSP_2.3
2	MARCO PARA PANELES	1	SSP_2.2
1	LAMINA SOPORTE BASTIDOR	2	SSP_2.1
N	NOMBRE	CANTIDAD	CODIGO

 <b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>	
FECHA: 20/09/2025	TÍTULO: Diseño De Un Soporte Para Diferentes Paneles Fotovoltaicos Con Seguimiento Solar Pasivo, De Dos Grados De Libertad, Para El Area Metropolitana De Bucaramanga.
ESCALA: 1:20	
UNIDADES: mm	DIBUJO: SUBENSAMBLE 2
A3	AUTOR: Cristian José Martínez González
	CÓDIGO: SSP_2
	HOJA: 11/31

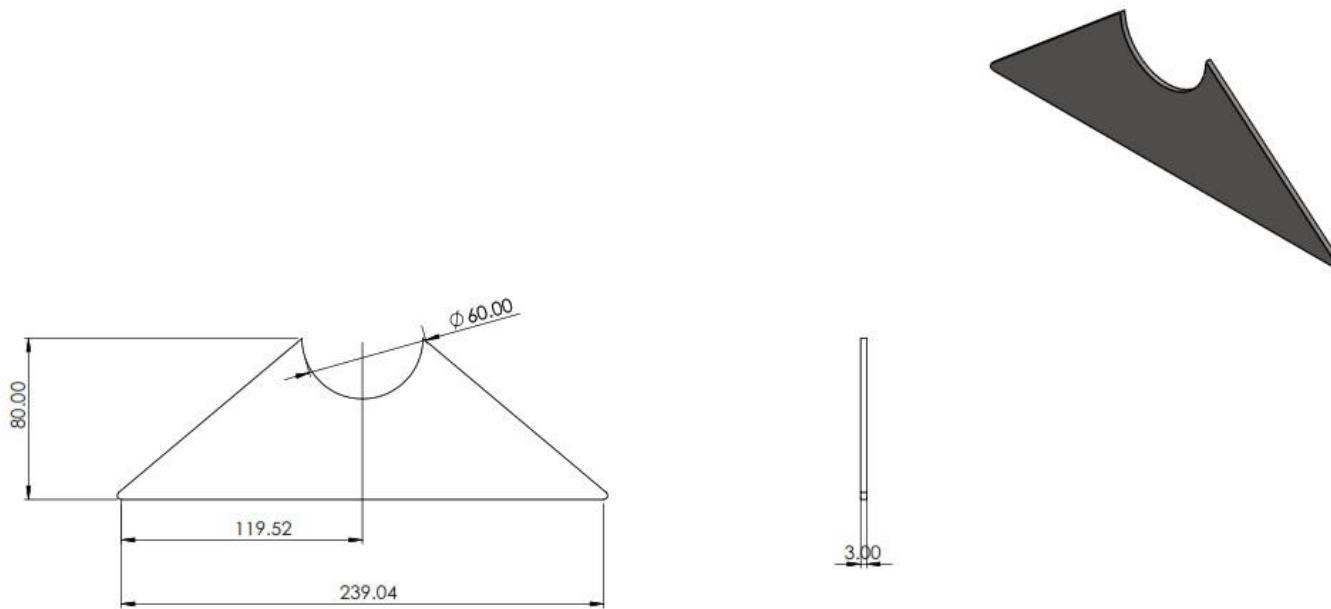


DESCRIPCION DEL PROCESO DE FABRICACION:			<b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>	
<p style="text-align: center;">PROCESO DE SOLDADURA TIG ESPESOR DE 3mm</p>			FECHA: 20/09/2025 ESCALA: 1:2	TÍTULO: Diseño De Un Soporte Para Diferentes Paneles Fotovoltaicos Con Seguimiento Solar Pasivo, De Dos Grados De Libertad, Para El Area Metropolitana De Bucaramanga.
		UNIDADES: mm	DIBUJO: LAMINA SOPORTE BASTIDOR	CÓDIGO: SSP_2.1
A3		AUTOR: Cristian José Martínez González		HOJA: 12/31





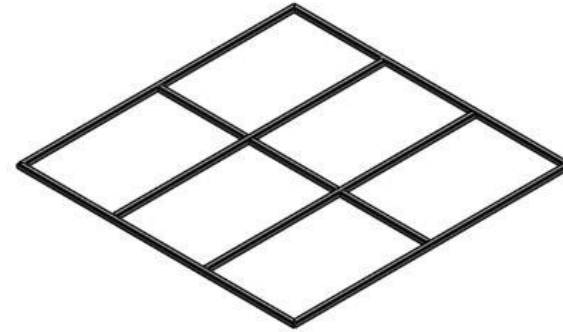
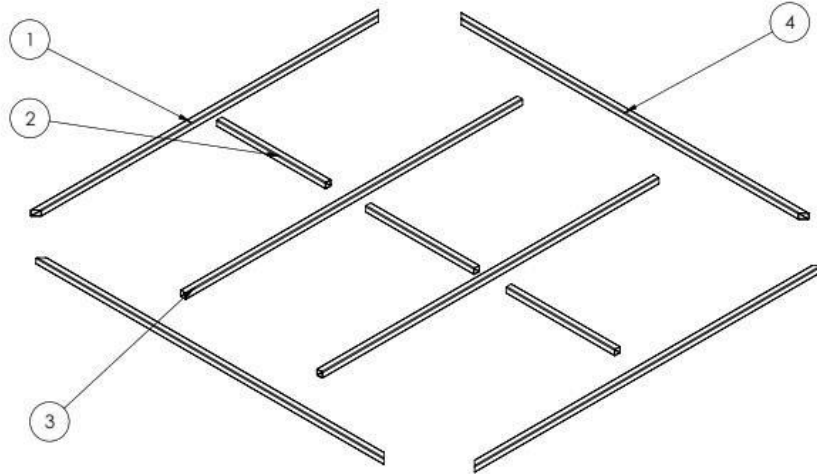
DESCRIPCION DEL PROCESO DE FABRICACION:		 <b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>
MATERIAL: Acero aleado hot roller HR Lamina e= 3mm Cortar segun las medidas generales.  *Nota: Todos los agujeros con pasantes		
FECHA:	20/09/2025	TÍTULO: Diseño De Un Soporte Para Diferentes Paneles Fotovoltaicos Con Seguimiento Solar Pasivo, De Dos Grados De Libertad, Para El Area Metropolitana De Bucaramanga.
ESCALA:	1:2	DIBUJO: LAMINA DE SUJECCION
UNIDADES:	mm	CÓDIGO: SSP_2.1.1
A3		AUTOR: Cristian José Martínez González
		HOJA: 14/31



DESCRIPCION DEL PROCESO DE FABRICACION:

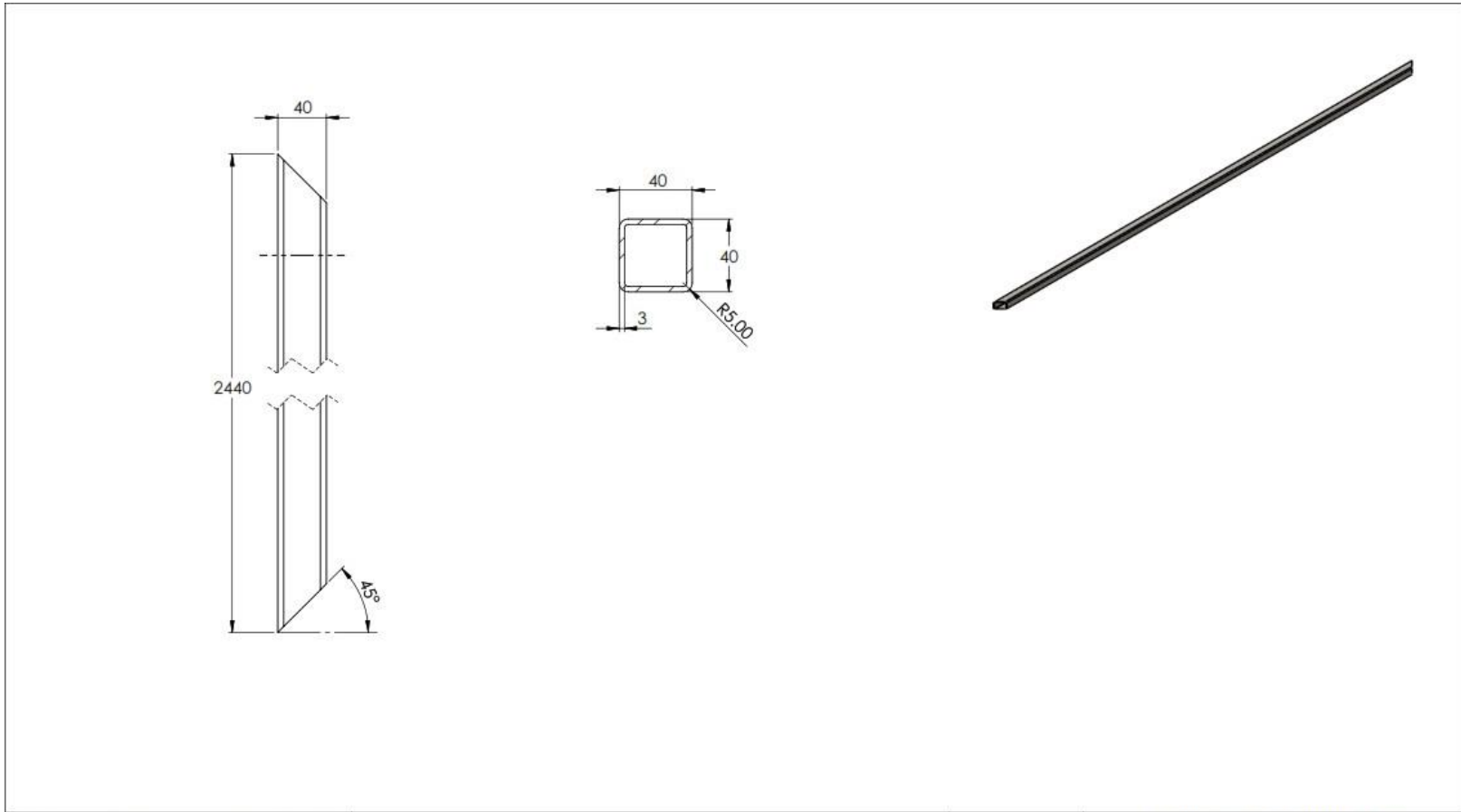
MATERIAL: Acero aleado hot roller HR  
 Lamina e= 3mm  
 Cortar segun las medidas generales.

		<b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>	
FECHA: 20/09/2025	TÍTULO: Diseño De Un Soporte Para Diferentes Paneles Fotovoltaicos Con Seguimiento Solar Pasivo, De Dos Grados De Libertad, Para El Area Metropolitana De Bucaramanga.		
ESCALA: 1:2	DIBUJO: LAMINA DE SUJECCION CIRCULAR		CÓDIGO: SSP_2.1.2
UNIDADES: mm	AUTOR: Cristian José Martínez González		HOJA: 15/31
A3			

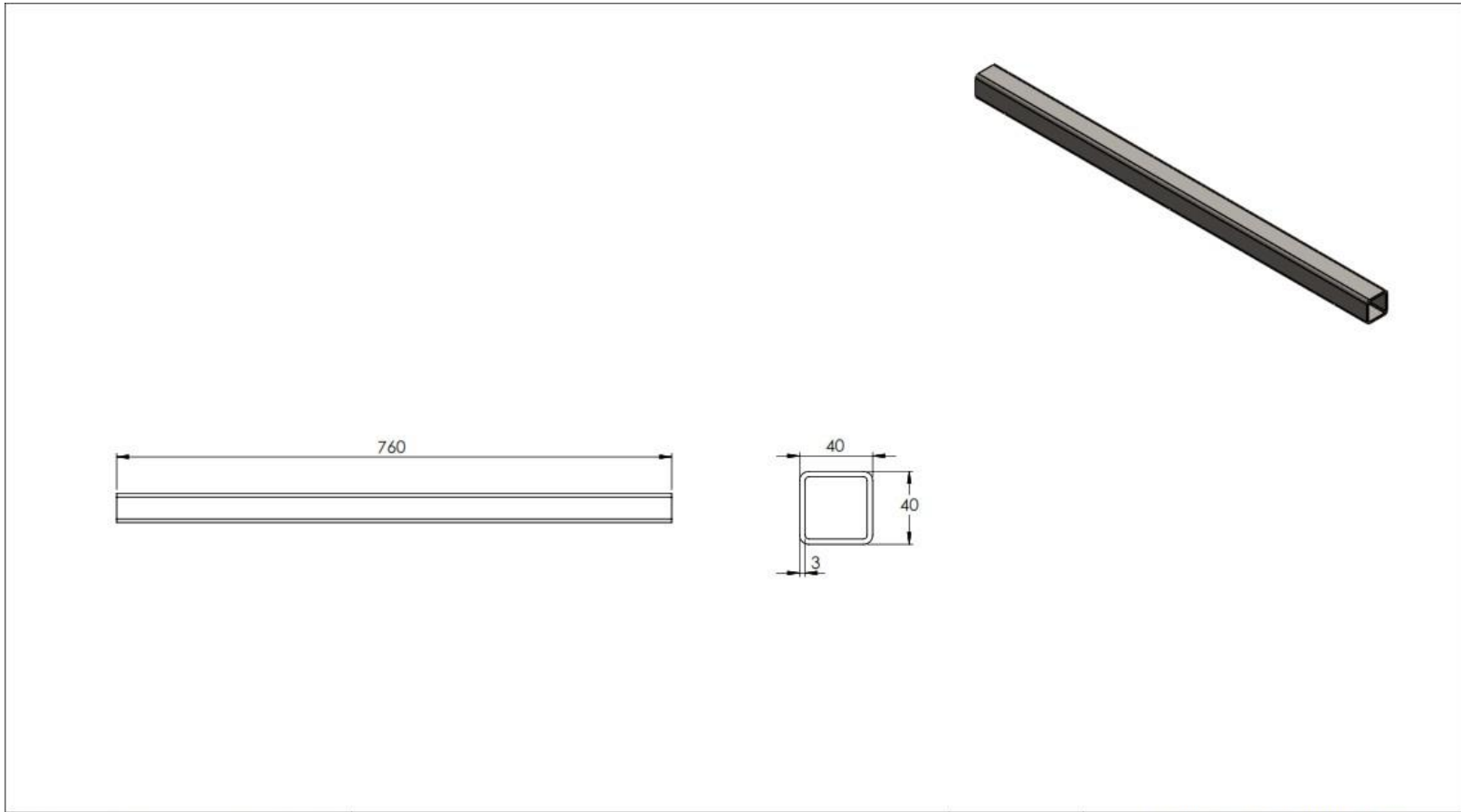


4	MARCO HORIZONTAL	2	SSP_2.2.4
3	REFUERZO HORIZONTAL	2	SSP_2.2.3
2	REFUERZO VERTICAL	3	SSP_2.2.2
1	MARCO VERTICAL	2	SSP_2.2.1
N	NOMBRE	CANTIDAD	CODIGO

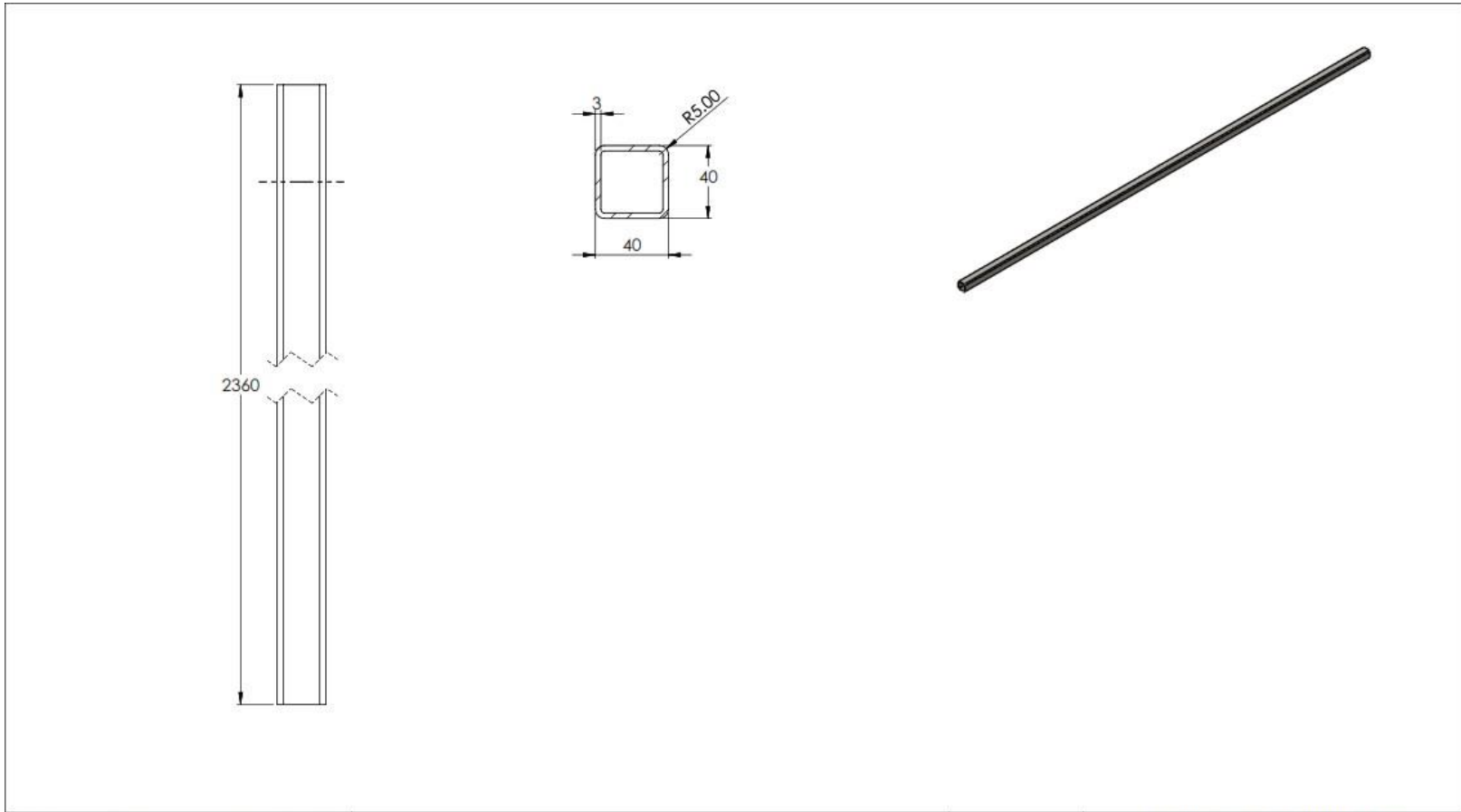
 <b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>	
FECHA: 20/09/2025	TÍTULO: Diseño De Un Soporte Para Diferentes Paneles Fotovoltaicos Con Seguimiento Solar Pasivo, De Dos Grados De Libertad, Para El Area Metropolitana De Bucaramanga.
ESCALA: 1:35	
UNIDADES: mm	DIBUJO: MARCO PARA PANELES CÓDIGO: SSP_2.2
A3 	AUTOR: Cristian José Martínez González HOJA: 16/31



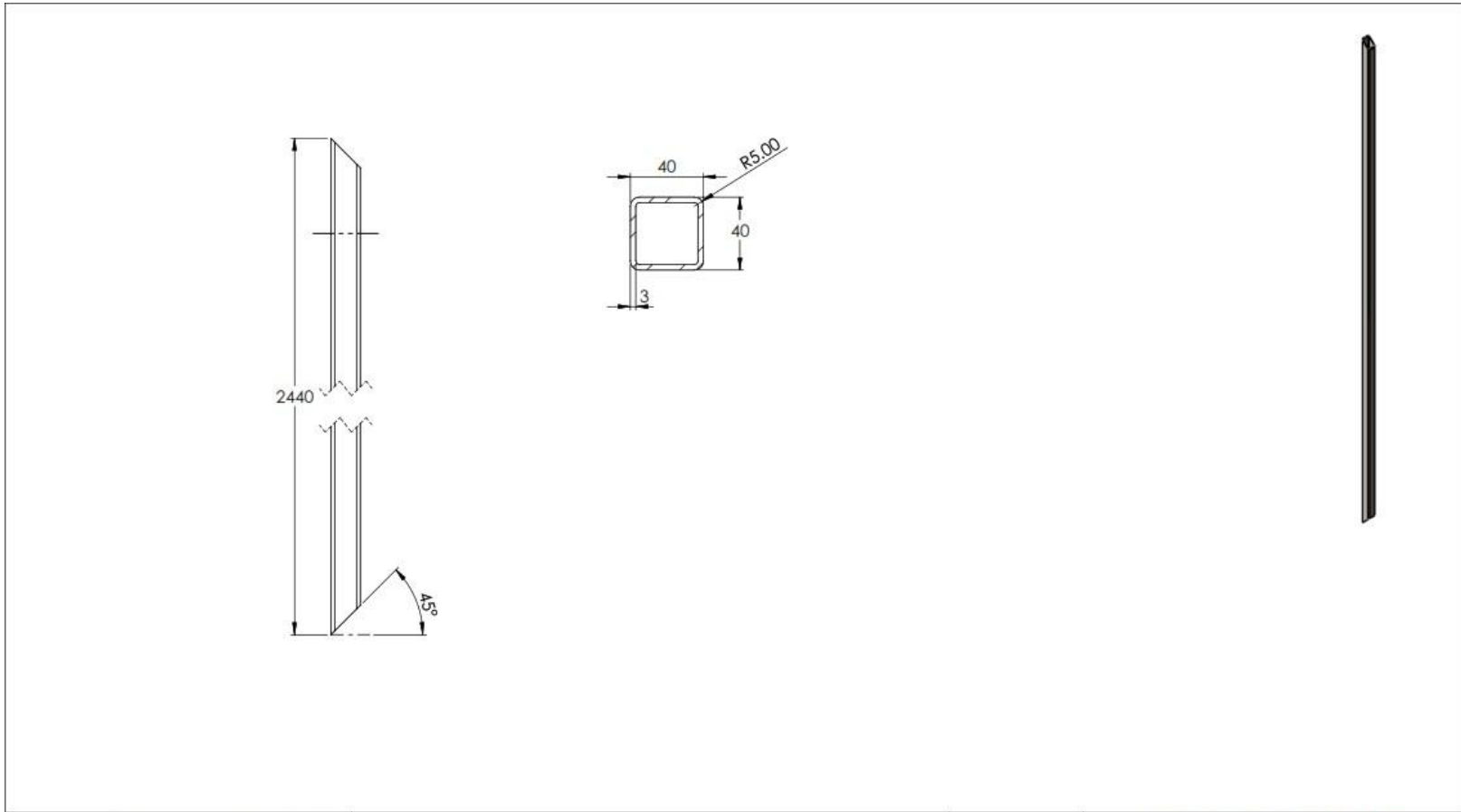
DESCRIPCION DEL PROCESO DE FABRICACION:		 <b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>
MATERIAL: Acero ASTM A36 Tubería cuadrada 40mm x 40mm espesor 3mm		
FECHA: 20/09/2025	TÍTULO: Diseño De Un Soporte Para Diferentes Paneles Fotovoltaicos Con Seguimiento Solar Pasivo, De Dos Grados De Libertad, Para El Area Metropolitana De Bucaramanga.	
ESCALA: 1:15	DIBUJO: MARCO VERTICAL	CÓDIGO: SSP_2.2.1
UNIDADES: mm	AUTOR: Cristian José Martínez González	HOJA: 17/31
A3		



DESCRIPCION DEL PROCESO DE FABRICACION:			<b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>	
<p>MATERIAL: Acero ASTM A36 Tubería cuadrada 40mm x 40mm espesor 3mm</p>			FECHA: 20/09/2025	TÍTULO: Diseño De Un Soporte Para Diferentes Paneles Fotovoltaicos Con Seguimiento Solar Pasivo, De Dos Grados De Libertad, Para El Area Metropolitana De Bucaramanga.
		ESCALA: 1:5	DIBUJO: REFUERZO VERTICAL	CÓDIGO: SSP_2.2.2
A3		AUTOR: Cristian José Martínez González	HOJA: 18/31	

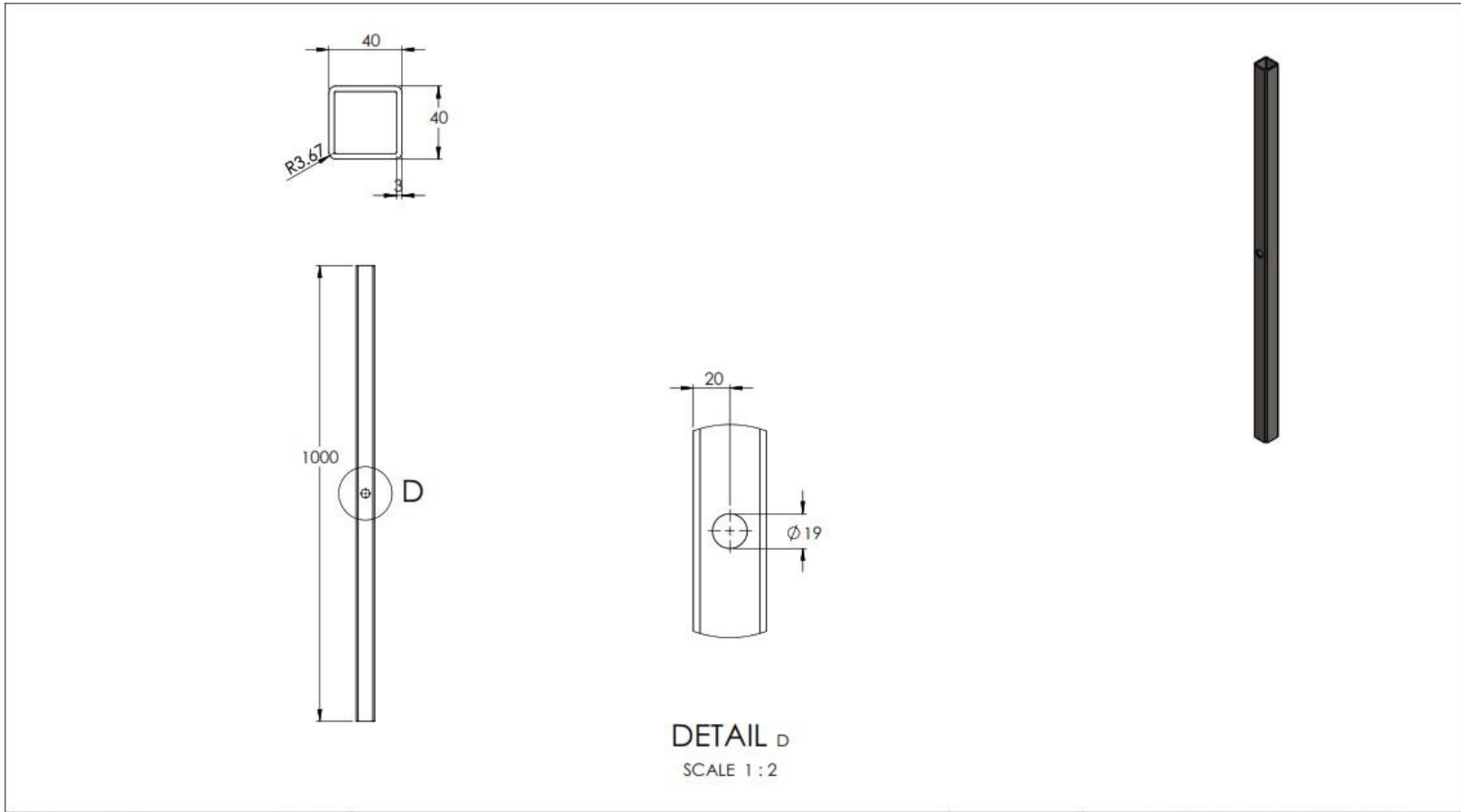


DESCRIPCION DEL PROCESO DE FABRICACION:			<b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>	
<b>MATERIAL:</b> Acero ASTM A36 Tuberia cuadrada 40mm x 40mm espesor 3mm		FECHA: 20/09/2025	TÍTULO: Diseño De Un Soporte Para Diferentes Paneles Fotovoltaicos Con Seguimiento Solar Pasivo, De Dos Grados De Libertad, Para El Area Metropolitana De Bucaramanga.	
		ESCALA: 1:15	DIBUJO: REFUERZO HORIZONTAL	CÓDIGO: SSP_2.2.3
		UNIDADES: mm	AUTOR: Cristian José Martínez González	HOJA: 19/31
		A3 		



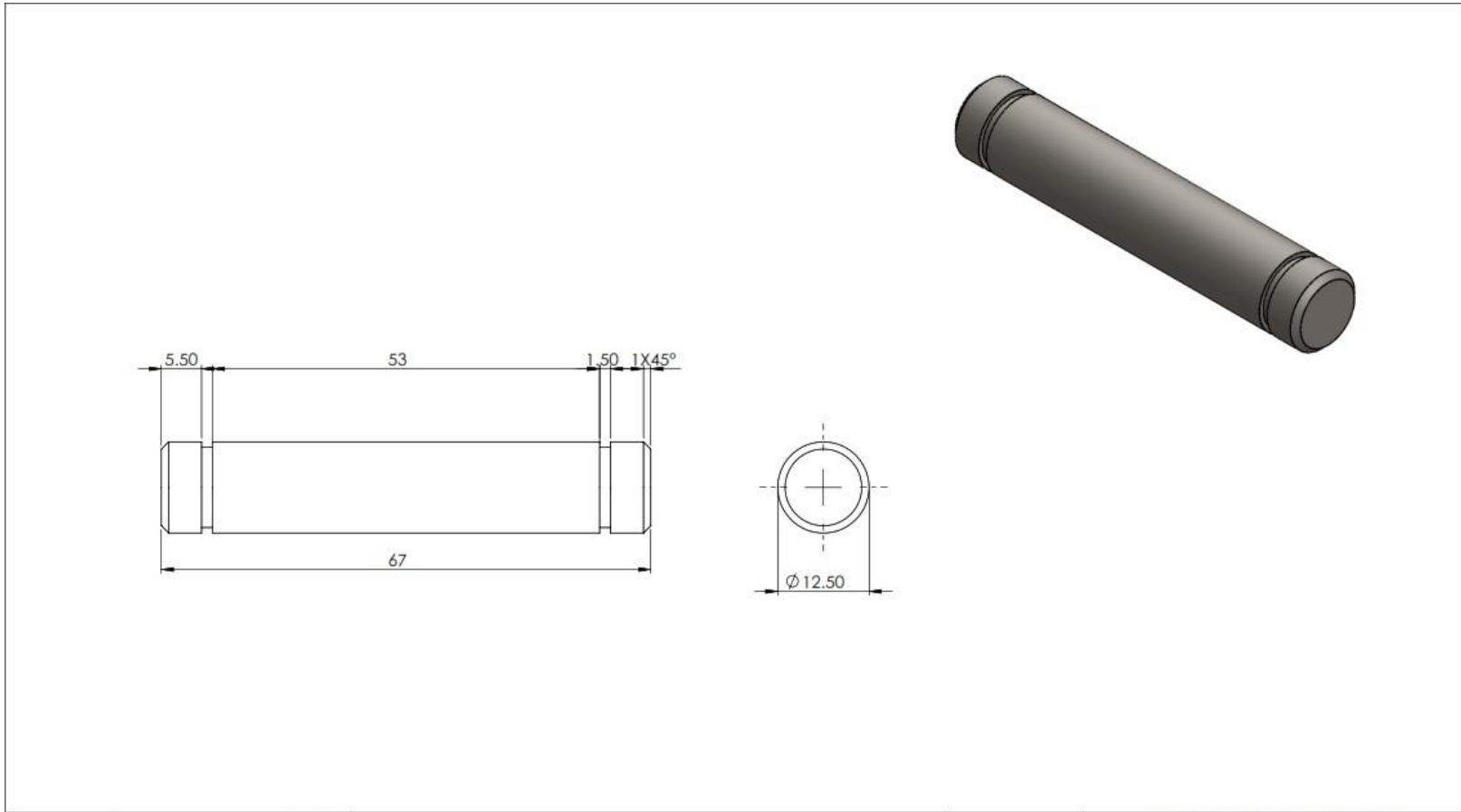
DESCRIPCION DEL PROCESO DE FABRICACION:		 <b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>
MATERIAL: Acero ASTM A36 Tubería cuadrada 40mm x 40mm espesor 3mm Cortar según las medidas generales		
FECHA: 20/09/2025	TÍTULO: Diseño De Un Soporte Para Diferentes Paneles Fotovoltaicos Con Seguimiento Solar Pasivo, De Dos Grados De Libertad, Para El Area Metropolitana De Bucaramanga.	
ESCALA: 1:15	DIBUJO: MARCO HORIZONTAL	CÓDIGO: SSP_2.2.4
UNIDADES: mm	AUTOR: Cristian José Martínez González	HOJA: 20/31
A3		



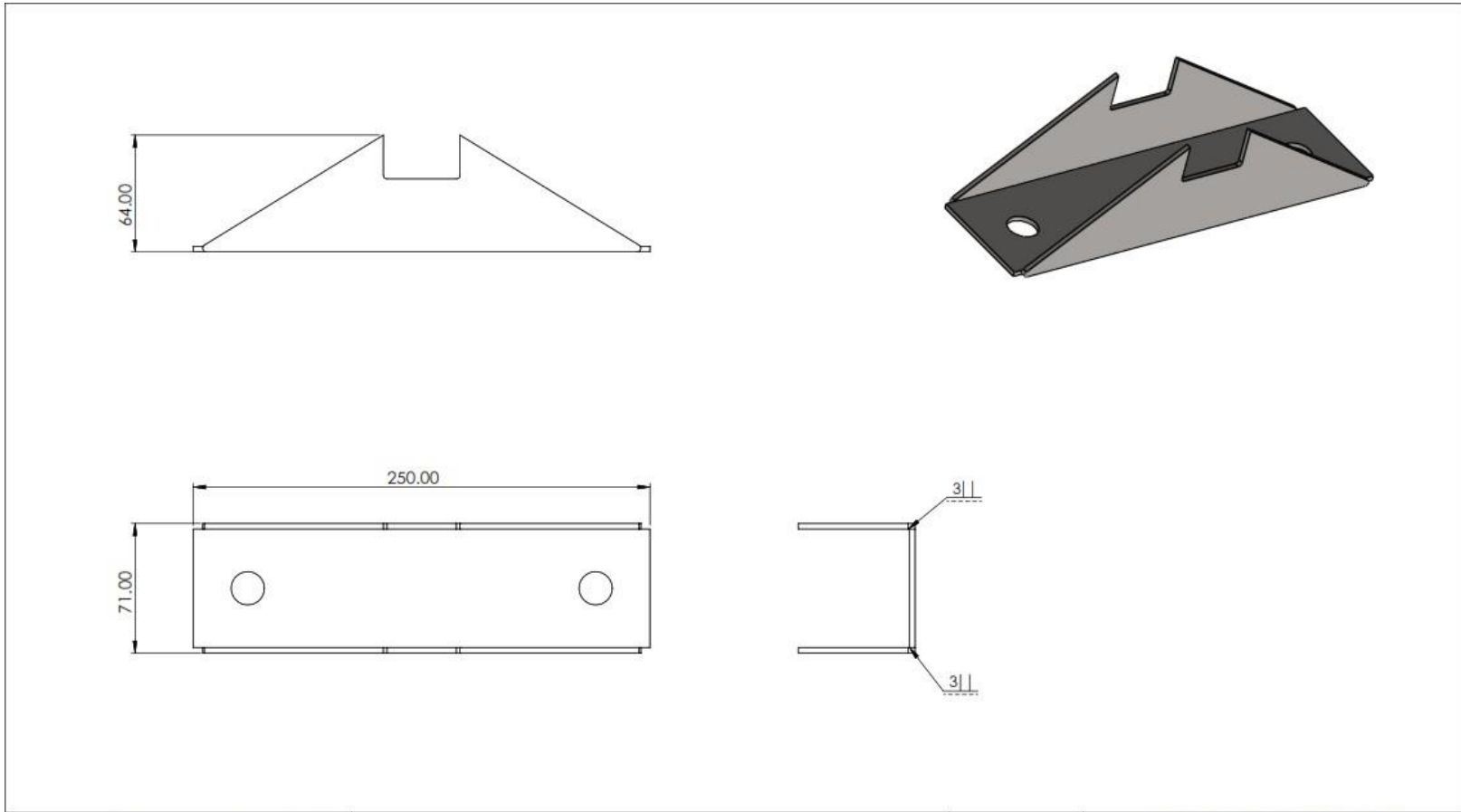


DETAIL D  
SCALE 1 : 2

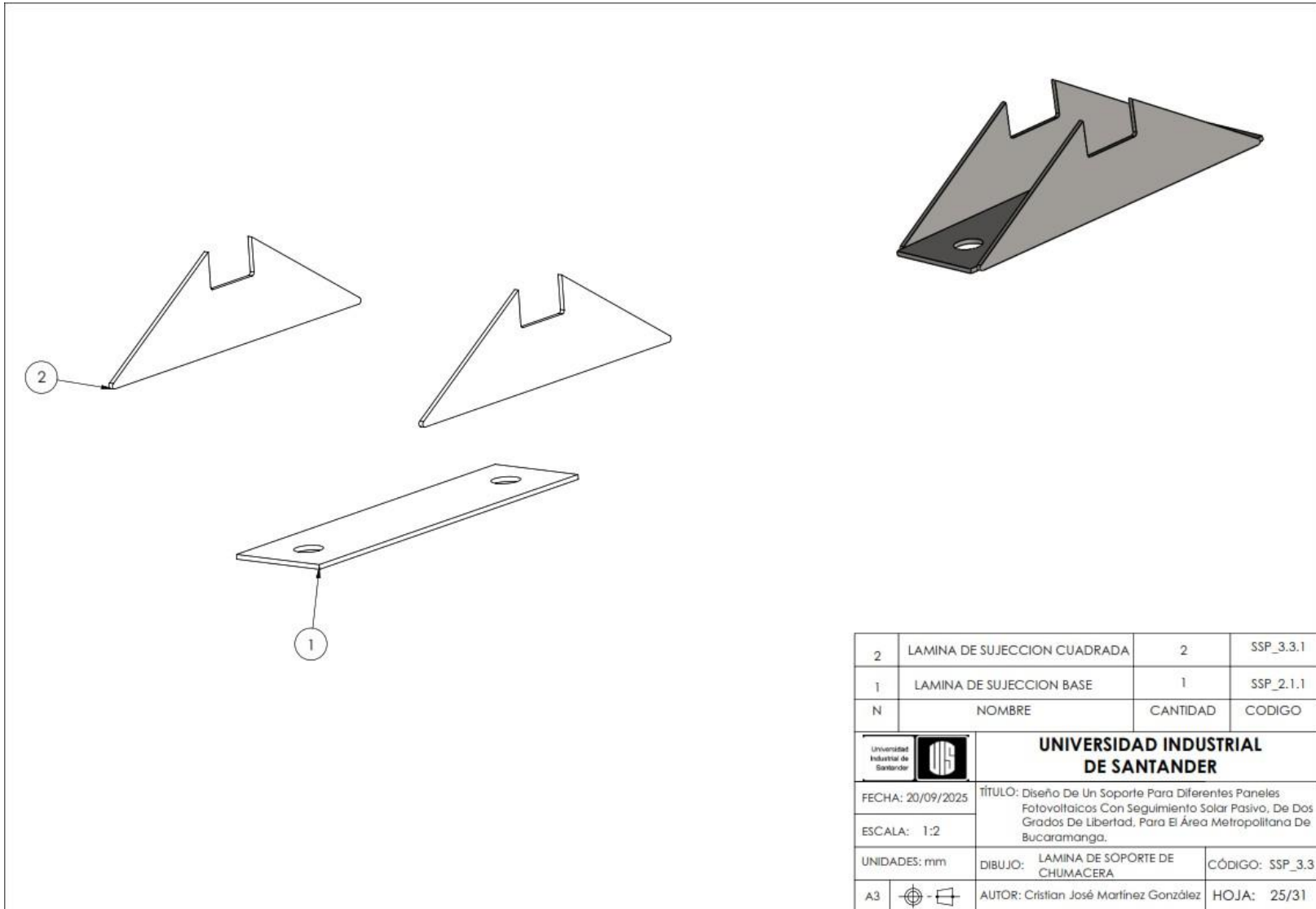
DESCRIPCION DEL PROCESO DE FABRICACION:		 <b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>
<p>MATERIAL: Acero ASTM A36 Tubería cuadrada 40mm x 40mm espesor 3mm Cortar según las medidas generales.</p> <p>*Nota: Todos los agujeros con pasantes</p>		
FECHA: 20/09/2025	TÍTULO: Diseño De Un Soporte Para Diferentes Paneles Fotovoltaicos Con Seguimiento Solar Pasivo, De Dos Grados De Libertad, Para El Area Metropolitana De Bucaramanga.	
ESCALA: 1:8	DIBUJO: EJE SOPORTE FV	CÓDIGO: SSP_3.1
UNIDADES: mm	AUTOR: Cristian José Martínez González	HOJA: 22/31
A3		

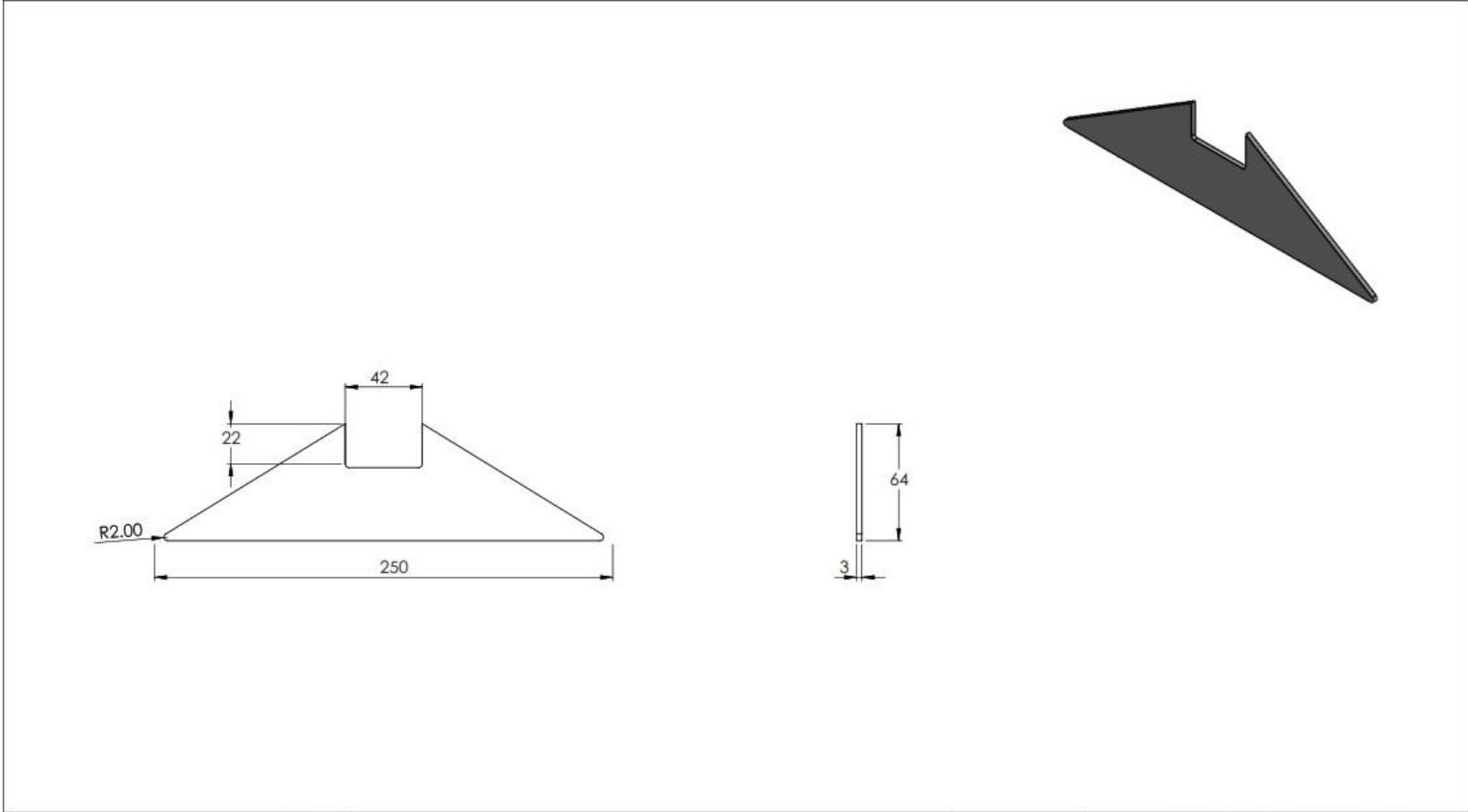


DESCRIPCION DEL PROCESO DE FABRICACION:		 <b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>
MATERIAL: Acero ASTM A36 Eje $\phi$ 1/2" Cortar y mecanizar segun las medidas generales.		
FECHA: 20/09/2025	TÍTULO: Diseño De Un Soporte Para Diferentes Paneles Fotovoltaicos Con Seguimiento Solar Pasivo, De Dos Grados De Libertad, Para El Area Metropolitana De Bucaramanga.	
ESCALA: 2:1	DIBUJO: EJE ROTATIVO	CÓDIGO: SSP_3.2
UNIDADES: mm	AUTOR: Cristian José Martínez González	HOJA: 23/31
A3		

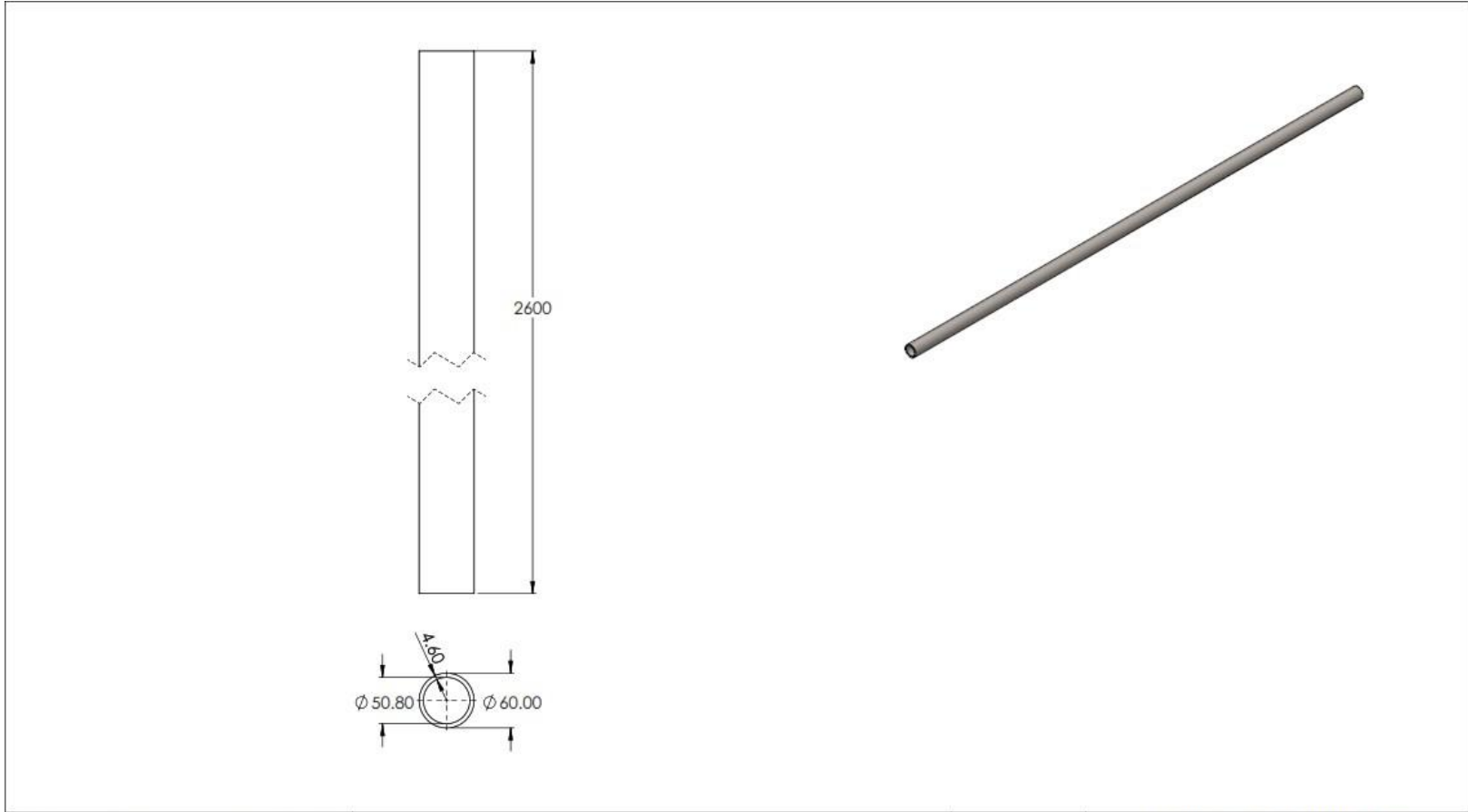


DESCRIPCION DEL PROCESO DE FABRICACION:			<b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>	
PROCESO DE SOLDADURA TIG ESPESOR DE 3mm		FECHA: 20/09/2025	TÍTULO: Diseño De Un Soporte Para Diferentes Paneles Fotovoltaicos Con Seguimiento Solar Pasivo, De Dos Grados De Libertad, Para El Area Metropolitana De Bucaramanga.	
		ESCALA: 1:2	DIBUJO: LAMINA SOPORTE CHUMACERA	CÓDIGO: SSP_3.3
		UNIDADES: mm	AUTOR: Cristian José Martínez González	HOJA: 24/31
		A3 		





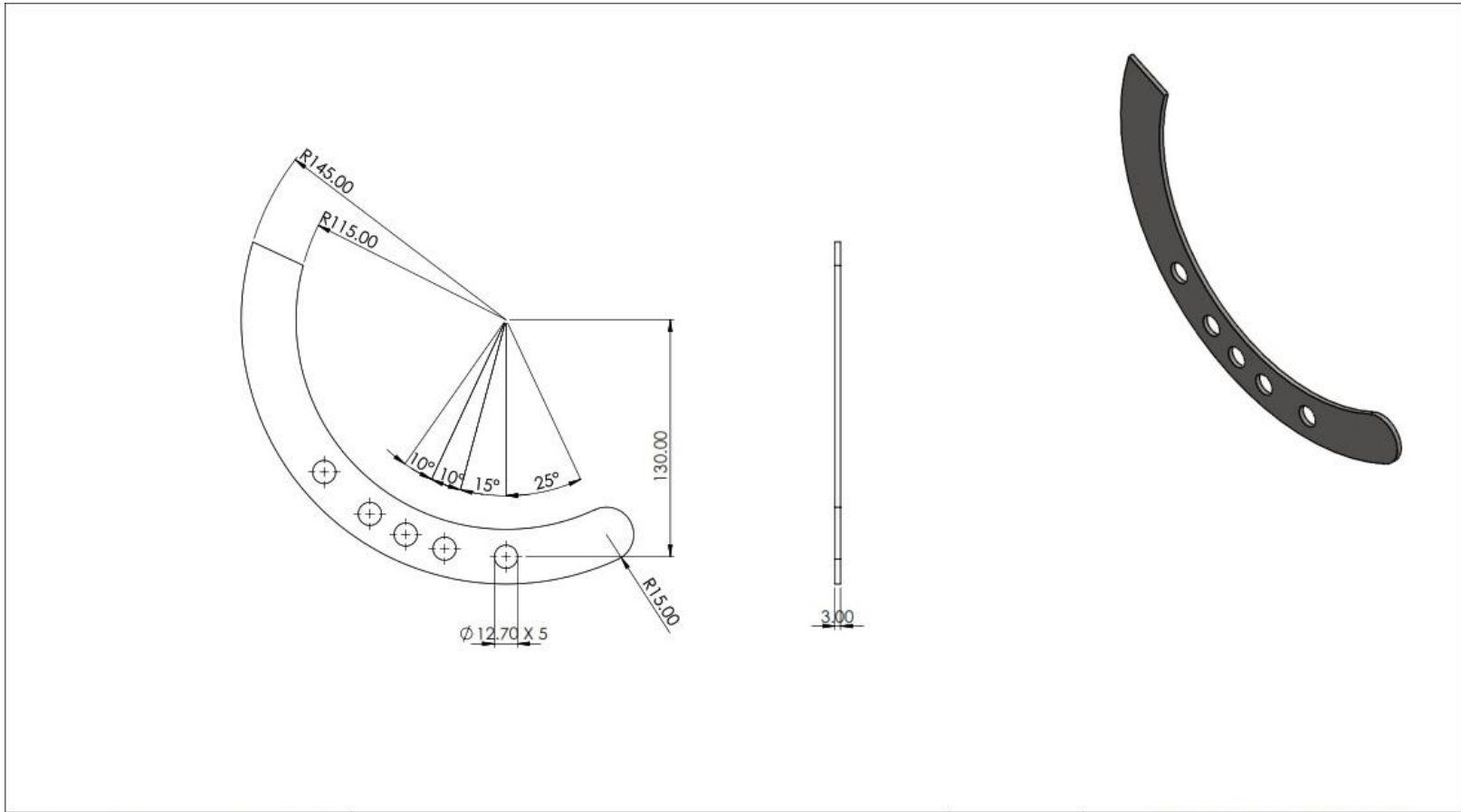
DESCRIPCION DEL PROCESO DE FABRICACION:		 <b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>
MATERIAL: Acero aleado hot roller HR Lamina e= 3mm Cortar segun las medidas generales.		
FECHA: 20/09/2025	TÍTULO: Diseño De Un Soporte Para Diferentes Paneles Fotovoltaicos Con Seguimiento Solar Pasivo, De Dos Grados De Libertad, Para El Area Metropolitana De Bucaramanga.	
ESCALA: 1:2	DIBUJO: LAMINA SUJECION CUADRADA	CÓDIGO: SSP_3.3.1
UNIDADES: mm	AUTOR: Cristian José Martínez González	HOJA: 26/31
A3		



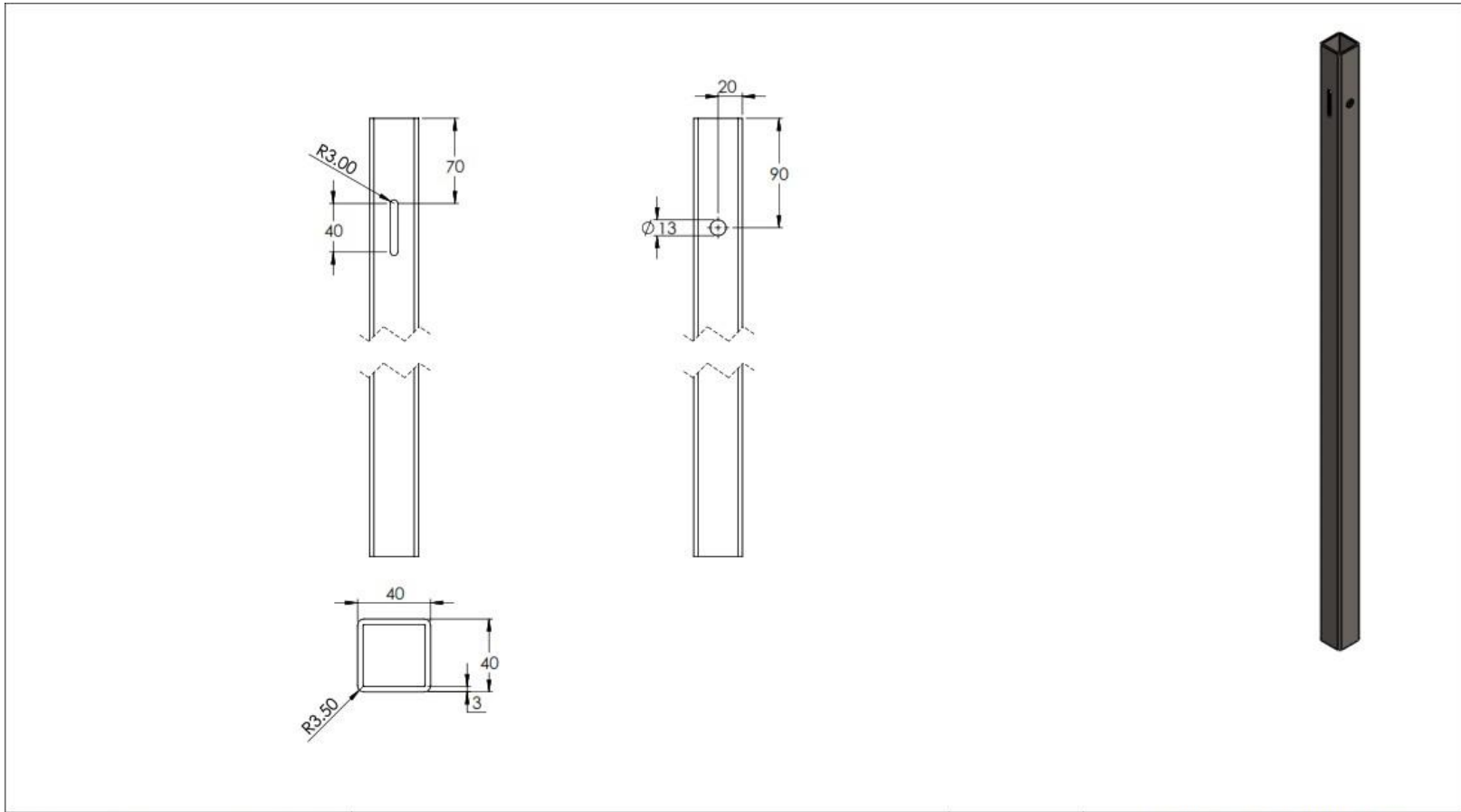
DESCRIPCION DEL PROCESO DE FABRICACION:

MATERIAL: Acero ASTM A36  
 Eje hueco de  $\varnothing 2"$   
 Cortar y mecanizar segun las medidas generales.

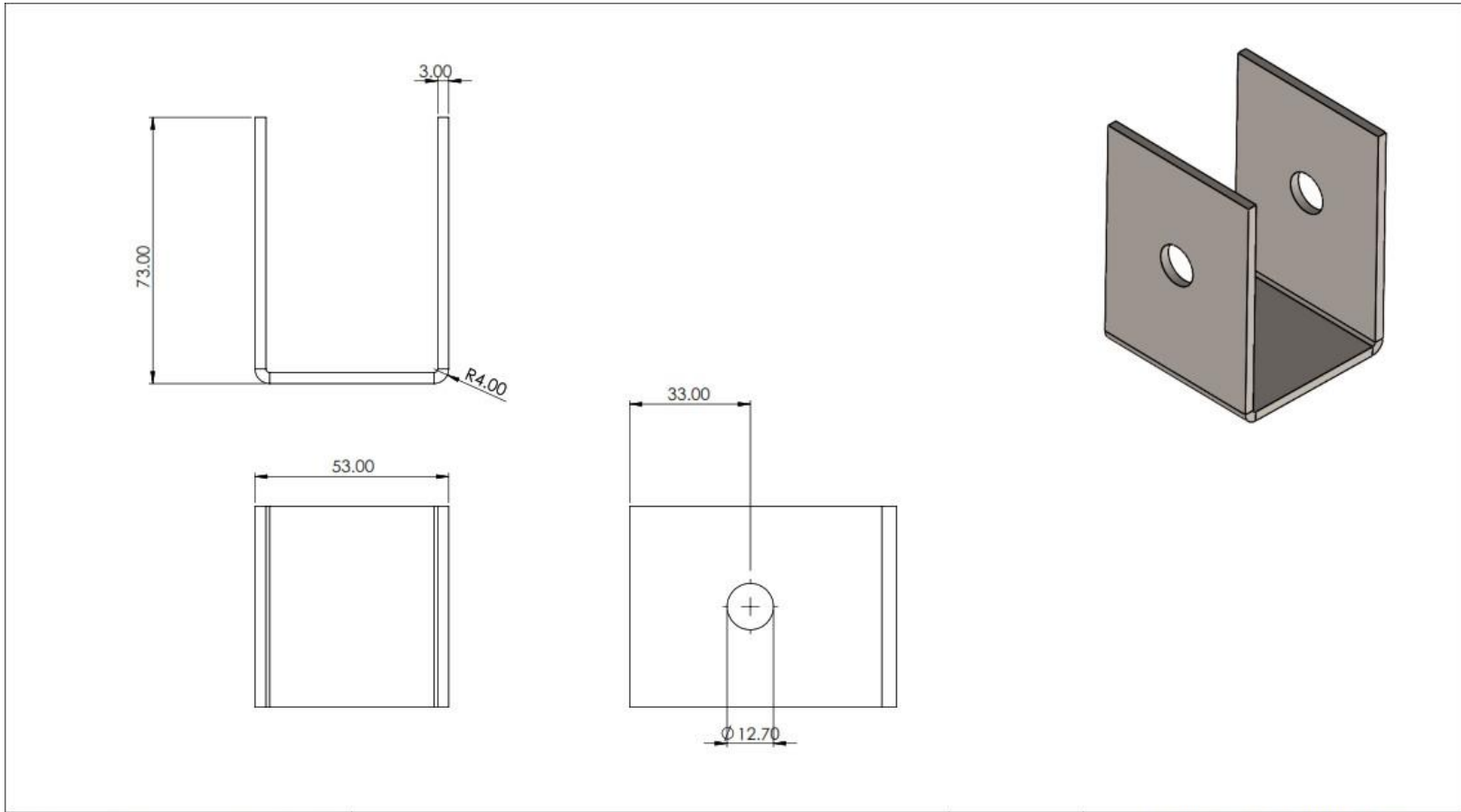
		<b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>	
FECHA: 20/09/2025	TÍTULO: Diseño De Un Soporte Para Diferentes Paneles Fotovoltaicos Con Seguimiento Solar Pasivo, De Dos Grados De Libertad, Para El Area Metropolitana De Bucaramanga.		
ESCALA: 1:15	DIBUJO: EJE DE ROTACION	CÓDIGO: SSP_3.4	
A3		AUTOR: Cristian José Martínez González	HOJA: 27/31



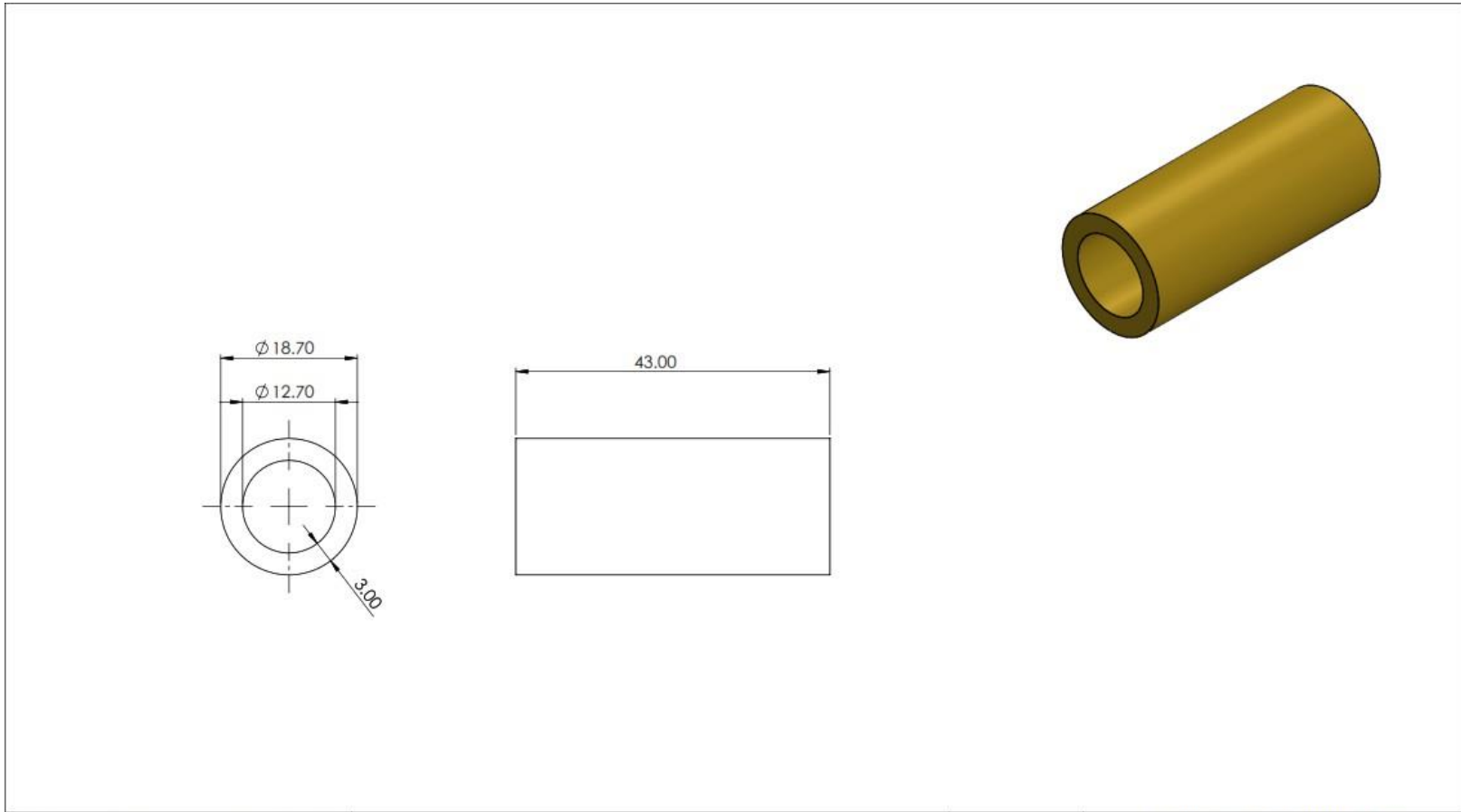
DESCRIPCION DEL PROCESO DE FABRICACION:		 <b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>
MATERIAL: Acero aleado hot roller HR Lamina e= 3mm Cortar segun las medidas generales.  *Nota: Todos los agujeros con pasantes		
FECHA: 20/09/2025	TÍTULO: Diseño De Un Soporte Para Diferentes Paneles Fotovoltaicos Con Seguimiento Solar Pasivo, De Dos Grados De Libertad, Para El Area Metropolitana De Bucaramanga.	
ESCALA: 1:2	DIBUJO: LAMINA GUIA	CÓDIGO: SSP_3.5
UNIDADES: mm	AUTOR: Cristian José Martínez González	HOJA: 28/31
A3		



DESCRIPCION DEL PROCESO DE FABRICACION:		 <b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>	
MATERIAL: Acero ASTM A36 Tubería cuadrada 40mm x 40mm espesor 3mm Cortar según las medidas generales  *Nota: todos los agujeros son pasantes		FECHA: 20/09/2025  ESCALA: 1:15	TÍTULO: Diseño De Un Soporte Para Diferentes Paneles Fotovoltaicos Con Seguimiento Solar Pasivo, De Dos Grados De Libertad, Para El Area Metropolitana De Bucaramanga.
UNIDADES: mm	DIBUJO: VIGA SOPORTE FV	CÓDIGO: SSP_3.7	
A3		AUTOR: Cristian José Martínez González	HOJA: 29/31





DESCRIPCION DEL PROCESO DE FABRICACION:		 <b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>
<p>MATERIAL: Acero aleado hot roller HR                  Lamina e= 3mm                  Cortar segun las medidas generales.                  Doblar la lamina segun las dimensiones especificadas</p> <p>*Nota: Todos los agujeros con pasantes</p>		
FECHA: 20/09/2025	TÍTULO: Diseño De Un Soporte Para Diferentes Paneles Fotovoltaicos Con Seguimiento Solar Pasivo, De Dos Grados De Libertad, Para El Area Metropolitana De Bucaramanga.	
ESCALA: 1:1	DIBUJO: LAMINA PRINCIPAL FV	CÓDIGO: SSP_3.8
UNIDADES: mm	AUTOR: Cristian José Martínez González	HOJA: 30/31
A3		





DESCRIPCION DEL PROCESO DE FABRICACION:		 <b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>
MATERIAL: Laton Eje $\phi 1/2"$ Cortar y mecanizar segun las medidas generales.		
FECHA: 20/09/2025	TÍTULO: Diseño De Un Soporte Para Diferentes Paneles Fotovoltaicos Con Seguimiento Solar Pasivo, De Dos Grados De Libertad, Para El Area Metropolitana De Bucaramanga.	
ESCALA: 2:1	DIBUJO: COLLARIN DE LATON	CÓDIGO: SSP_3.9
UNIDADES: mm	AUTOR: Cristian José Martínez González	HOJA: 31/31
A3		


## Apéndice S


		<b>PROYECTO SEGUIDOR SOLAR PASIVO 2-DOF</b>		<b>Ficha Componentes Soporte Fotovoltaico N° F01</b>	
				<b>FORMATO ÚNICO</b>	
<b>Nombre:</b> Soporte para diferentes paneles fotovoltaicos con seguimiento solar pasivo, de dos grados de libertad.				<b>Código:</b> SSP	
<b>Autores:</b> Cristian José Martínez González, Sneider Arbey Herazo Puentes					
<b>Descripción:</b> Componentes del soporte fotovoltaico con seguimiento solar.				<b>Hoja N° 01 de 02</b>	
Código	Sistema	Descripción	Cantidad	Fabricante	
SSP_1.1	Colector solar	LAMINA ACOUPLE COLECTOR	2	AUTOR	
SSP_1.2	Colector solar	CPC	1		
SSP_1.3	Colector solar	ACOPLE	1	AUTOR	
SSP_1.4	Colector solar	LAMINA BASE	2	AUTOR	
SSP_1.5	Colector solar	LEVA SEGUIDORA	1	AUTOR	
SSP_1.6	Colector solar	SEGUIDOR LEVA KR16	2		
SSP_1.7	Colector solar	TUBO CONECTOR	4	AUTOR	
SSP_1.8	Colector solar	CONECTOR TIPO FORK	1		
SSP_1.9	Colector solar	COBERTURA DE VIDRIO	1		
SSP_1.10	Colector solar	PISTÓN	1		
SSP_2.1	Soporte bastidor	LAMINA DE SUJECCIÓN	3	AUTOR	
SSP_2.1.1	Soporte bastidor	LAMINA DE SUJECCIÓN	5	AUTOR	
SSP_2.1.2	Soporte bastidor	LAMINA SUJECCIÓN CIRCULAR	6	AUTOR	
<b>Elaborado por:</b> - Cristian José Martínez G. <b>Cargo:</b> Autor de Proyecto - Sneider Arbey Herazo P. <b>Cargo:</b> Autor de Proyecto <b>Fecha:</b> 29/06/2025			<b>Aprobado por:</b> Julian Ernesto Jaramillo  <b>Cargo:</b> Julián Ernesto Jaramillo Ibarra <b>Fecha:</b> 15/07/2025		


		<b>PROYECTO SEGUIDOR SOLAR PASIVO 2-DOF</b>		<b>Ficha Componentes Soporte Fotovoltaico N° F01</b>	
				<b>FORMATO ÚNICO</b>	
<b>Nombre:</b> Soporte para diferentes paneles fotovoltaicos con seguimiento solar pasivo, de dos grados de libertad.				<b>Código:</b> SSPF	
<b>Autores:</b> Cristian José Martínez González, Sneider Arbey Herazo Puentes					
<b>Descripción:</b> Componentes del soporte fotovoltaico con seguimiento solar.				<b>Hoja N° 02 de 03</b>	
Código	Sistema	Descripción	Cantidad	Fabricante	
SSP_2.2	Soporte bastidor	MARCO PARA PANELES	1	AUTOR	
SSP_2.2.1	Soporte bastidor	MARCO VERTICAL	2	AUTOR	
SSP_2.2.2	Soporte bastidor	REFUERZO VERTICAL	3	AUTOR	
SSP_2.2.3	Soporte bastidor	REFUERZO HORIZONTAL	2	AUTOR	
SSP_2.2.4	Soporte bastidor	MARCO HORIZONTAL	2	AUTOR	
SSP_2.3	Soporte bastidor	PERFIL DUDUKAN	3		
SSP_2.4	Soporte bastidor	ABRAZADERA FINAL	12		
SSP_3.1	Anclaje	EJE SOPORTE FV	1	AUTOR	
SSP_3.2	Anclaje	EJE ROTATIVO	1	AUTOR	
SSP_3.3	Anclaje	LAMINA SOPORTE CHUMACERA	2	AUTOR	
SSP_3.4	Anclaje	EJE ROTACIÓN	1	AUTOR	
SSP_3.5	Anclaje	LAMINA GUÍA	1	AUTOR	
SSP_3.6	Anclaje	PASADOR	1		
<b>Elaborado por:</b> - Cristian José Martínez G. <b>Cargo:</b> Autor de Proyecto - Sneider Arbey Herazo P. <b>Cargo:</b> Autor de Proyecto <b>Fecha:</b> 29/06/2025			<b>Aprobado por:</b> Julian Ernesto Jaramillo  <b>Cargo:</b> Julián Ernesto Jaramillo Ibarra <b>Fecha:</b> 15/07/2025		


		<b>PROYECTO SEGUIDOR SOLAR PASIVO 2-DOF</b>		<b>Ficha Componentes Soporte Fotovoltaico N° F01</b>	
				<b>FORMATO ÚNICO</b>	
<b>Nombre:</b> Soporte para diferentes paneles fotovoltaicos con seguimiento solar pasivo, de dos grados de libertad.				<b>Código:</b> SSP	
<b>Autores:</b> Cristian José Martínez González, Sneider Arbey Herazo Puentes				<b>Hoja N° 03 de 03</b>	
<b>Descripción:</b> Componentes del soporte fotovoltaico con seguimiento solar.					
Código	Sistema	Descripción	Cantidad	Fabricante	
SSP_3.7	Anclaje	VIGA SOPORTE FV	1	AUTOR	
SSP_3.8	Anclaje	LAMINA PRINCIPAL FV	1	AUTOR	
SSP_3.9	Anclaje	COLLARIN LATÓN	1	AUTOR	
SSP_3.10	Anclaje	RETENEDOR EXTERNO	2		
SSP_3.11	Anclaje	RODAMIENTO SY60 WF	2		
<b>Elaborado por:</b> - Cristian José Martínez G. <b>Cargo:</b> Autor de Proyecto - Sneider Arbey Herazo P. <b>Cargo:</b> Autor de Proyecto <b>Fecha:</b> 29/06/2025			<b>Aprobado por:</b> Julian Ernesto Jaramillo  <b>Cargo:</b> Julián Ernesto Jaramillo Ibarra <b>Fecha:</b> 15/07/2025		


		<b>PROYECTO SEGUIDOR SOLAR PASIVO 2-DOF</b>		<b>Ficha Componentes Soporte Fotovoltaico N° F06</b>	
				<b>FORMATO ÚNICO</b>	
<b>Nombre:</b> Soporte para diferentes paneles fotovoltaicos con seguimiento solar pasivo, de dos grados de libertad.				<b>Código:</b> SSP_2	
<b>Autores:</b> Cristian José Martínez González, Sneider Arbey Herazo Puentes					
<b>Descripción:</b> Instrucciones para la manufactura para el colector solar del soporte.				<b>Hoja N° 01 de 01</b>	
Código	Piezas	Descripción	Cantidad	Tiempo (min)	
S_04_01	SSP_1 & SSP2	Soldadura entre los subensambles SSP_1 & SSP_2	1	25	
PL_04_02	SSP_1 & SSP2	Pulida rebaba soldadura	1	25	
PA_04_03	SSP_1 & SSP2	Pintura anticorrosiva removiuda por soldadura	1	5 (Horas)	
A_04_04	SSP_1 & SSP2 & SSP3	Amado de la unión entre subensambles	1	25	
<b>Elaborado por:</b> - Cristian José Martínez G. <b>Cargo:</b> Autor de Proyecto - Sneider Arbey Herazo P. <b>Cargo:</b> Autor de Proyecto <b>Fecha:</b> 29/06/2025			<b>Aprobado por:</b> Julian Ernesto Jaramillo  <b>Cargo:</b> Julián Ernesto Jaramillo Ibarra <b>Fecha:</b> 15/07/2025		


		<b>PROYECTO SEGUIDOR SOLAR PASIVO 2-DOF</b>		<b>Ficha Componentes Soporte Fotovoltaico N° F05</b>	
				<b>FORMATO ÚNICO</b>	
<b>Nombre:</b> Soporte para diferentes paneles fotovoltaicos con seguimiento solar pasivo, de dos grados de libertad.				<b>Código:</b> SSP_3	
<b>Autores:</b> Cristian José Martínez González, Sneider Arbey Herazo Puentes					
<b>Descripción:</b> Instrucciones para la manufactura para el colector solar del soporte.				<b>Hoja N° 01 de 01</b>	
Código	Piezas	Descripción	Cantidad	Tiempo (min)	
F_03_001	SSP_3.1 & SSP_3.3.1 & SSP_2.1.1 & SSP_3.5 & SSP_3.7 & SSP_3.8	Manufactura basado en corte laser	10	15	
F_03_002	SSP_3.4	Manufactura basado en corte manual	1	25	
F_03_003	SSP_3.2 & SSP_3.9	Manufactura basada en mecanizado en torno convencional.	2	15	
F_03_004	SSP_3.8	Manufactura basada en dobladora hidraulica.	1	10	
S_03_001	SSP_3.3	Soldadura de subensambles	2	25	
E_03_001		Proceso de ensamble	1	5 (Horas)	
<b>Elaborado por:</b> - Cristian José Martínez G. <b>Cargo:</b> Autor de Proyecto - Sneider Arbey Herazo P. <b>Cargo:</b> Autor de Proyecto <b>Fecha:</b> 29/06/2025			<b>Aprobado por:</b> Julián Ernesto Jaramillo  <b>Cargo:</b> Julián Ernesto Jaramillo Ibarra <b>Fecha:</b> 15/07/2025		


		<b>PROYECTO SEGUIDOR SOLAR PASIVO 2-DOF</b>		<b>Ficha ejecución de procedimiento N° F05.1</b>	
				<b>FORMATO ÚNICO</b>	
<b>Nombre del Proceso:</b> Manufactura basada en corte laser.				<b>Código del Proceso:</b> F_03_001	
<b>Descripción:</b> Corte en humedo de los ejes para la fabricación del sistema de anclaje. Este proceso es compatible para las piezas: SSP_3.1 & SSP_3.3.1 & SSP_2.1.1 & SSP_3.5 & SSP_3.7 & SSP_3.8				<b>Hoja N° 01 de 01</b>	
				<b>Personal</b>	<b>Tiempo</b>
				1	15 (min)
<b>Tipo de Actividad:</b> A:___ C:___ CL: <input checked="" type="checkbox"/> D:___ E:___ L:___ M: <input checked="" type="checkbox"/> MT:___ PA:___ PL: <input checked="" type="checkbox"/> S:___ TC:___					
<b>Entradas del proceso:</b> Acero ASTM A36 tubería 40mmX40mm e=3mm Lamina Hot Rolled e=3mm			<b>Salidas del proceso:</b> Eje soporte FV, Lamina de sujeción base, Laminade sujeción cuadrada, Lamina guia, Viga soporte FV, & Lamina principal FV.		
<b>N° De paso</b>	<b>Código</b>	<b>Descripción</b>	<b>Equipos, herramientas, instrumentos y materiales</b>		
1	M	Montaje de lamiana a maquina de corte laser.	Carga manual		
2	CL	Proceso de corte laser	Corte laser		
3	PL	Pulida rebaba porceso de corte laser.	Pulidora manual		
<b>Elaborado por:</b> - Cristian José Martínez G. <b>Cargo:</b> Autor de Proyecto - Sneider Arbey Herazc P. <b>Cargo:</b> Autor de Proyecto <b>Fecha:</b> 29/06/2025			<b>Aprobado por:</b> Julian Ernesto Jaramillo  <b>Cargo:</b> Julián Ernesto Jaramillo Ibarra <b>Fecha:</b> 15/07/2025		


		<b>PROYECTO SEGUIDOR SOLAR PASIVO 2-DOF</b>		<b>Ficha ejecución de procedimiento N° F05.2</b>	
				<b>FORMATO ÚNICO</b>	
<b>Nombre del Proceso:</b> Manufactura basada en corte manual de tubería.				<b>Código del Proceso:</b> F_03_002	
<b>Descripción:</b> Corte en humedo de los ejes para la fabricación del sistema del colector solar. Este proceso es compatible para las piezas: SSP_3.4				<b>Hoja N° 01 de 01</b>	
				<b>Personal</b>	<b>Tiempo</b>
				1	25 (min)
<b>Tipo de Actividad:</b> A:___ C: <u>x</u> CL:___ D:___ E:___ L: <u>x</u> M: <u>x</u> MT: <u>x</u> PA:___ PL:___ S:___ TC:___					
<b>Entradas del proceso:</b>  Tubería redonda Ø2" e= 4.6mm acero ASTM A36			<b>Salidas del proceso:</b>  Eje de rotación		
N° De paso	Código	Descripción	Equipos, herramientas, instrumentos y materiales		
1	M	Montaje de la tubería en sierra cortadora de mesa.	Carga manual		
2	C	Corte requerido a la medida indicada por el plano.	Sierra cortadora de mesa		
3	M	Montaje de los diferentes ejes.	carga manual		
4	MT	Refrerado de ciertas pieza para garantizar los cortes rectos	SSP_3.4		
5	L	Limpieza de rebaba e imperfecciones por el torno.	Pulidora manual.		
<b>Elaborado por:</b> - Cristian José Martínez G. <b>Cargo:</b> Autor de Proyecto - Sneider Arbey Herazo P. <b>Cargo:</b> Autor de Proyecto <b>Fecha:</b> 29/06/2025			<b>Aprobado por:</b> Julian Ernesto Jaramillo  <b>Cargo:</b> Julián Ernesto Jaramillo Ibarra <b>Fecha:</b> 15/07/2025		


		<b>PROYECTO SEGUIDOR SOLAR PASIVO 2-DOF</b>		<b>Ficha ejecución de procedimiento N° F05.3</b>	
<b>FORMATO ÚNICO</b>					
<b>Nombre del Proceso:</b> Manufactura basada en mecanizado convencional.				<b>Código del Proceso:</b> F_03_003	
<b>Descripción:</b> Corte en humedo de los ejes para la fabricación del sistema del colector solar. Este proceso es compatible para las piezas: SSP_3.2 & SSP_3.9				<b>Hoja N° 01 de 01</b>	
				<b>Personal</b>	<b>Tiempo</b>
				1	15 (min)
<b>Tipo de Actividad:</b> A:___ C: <input checked="" type="checkbox"/> CL:___ D:___ E:___ L: <input checked="" type="checkbox"/> M: <input checked="" type="checkbox"/> MT: <input checked="" type="checkbox"/> PA:___ PL:___ S:___ TC:___					
<b>Entradas del proceso:</b>			<b>Salidas del proceso:</b>		
Eje ASTM A36 Ø1/2" Eje Laton Ø1/2"			Eje rotativo Collarin de laton.		
N° De paso	Código	Descripción	Equipos, herramientas, instrumentos y materiales		
1	M	Montaje de los diferenetes ejes puestos a cortar manualmente.	Carga manual		
2	C	Corte requerido a una medida mayor del plano , capaz de anclar el material a la copa del torno.	Sierra cortadora de mesa		
3	M	Montaje de los diferentes ejes.	carga manual		
4	MT	Mecanizado en torno de tres copas a las medidas dadas por el plano.	Torno tres copas		
5	L	Limpieza de rebaba e imperfecciones por el torno.	Puliddora manual.		
<b>Elaborado por:</b> - Cristian José Martínez G. <b>Cargo:</b> Autor de Proyecto - Sneider Arbey Herazc P. <b>Cargo:</b> Autor de Proyecto <b>Fecha:</b> 29/06/2025			<b>Aprobado por:</b> Julian Ernesto Jaramillo  <b>Cargo:</b> Julián Ernesto Jaramillo Ibarra <b>Fecha:</b> 15/07/2025		


	<b>PROYECTO SEGUIDOR SOLAR PASIVO 2-DOF</b>		<b>Ficha ejecución de procedimiento N° F05.4</b>	
			<b>FORMATO ÚNICO</b>	
<b>Nombre del Proceso:</b> Manufactura basada en dobladora hidraulica.			<b>Código del Proceso:</b> F_03_004	
<b>Descripción:</b> Ensamble sistema de colector solar.  Ensamble de piezas SSP_3.8			<b>Hoja N° 01 de 01</b>	
			<b>Personal</b>	<b>Tiempo</b>
			2	10 (min)
<b>Tipo de Actividad:</b> A:___C:___CL:___D: <input checked="" type="checkbox"/> E:___L:___M: <input checked="" type="checkbox"/> MT:___PA:___PL: <input checked="" type="checkbox"/> S:___TC:___				
<b>Entradas del proceso:</b>  Lamina porcesada en corte laser.			<b>Salidas del proceso:</b>  Lamina principal FV	
N° De paso	Código	Descripción	Equipos, herramientas, instrumentos y materiales	
1	PL	Pulido de las inperfecciones de las piezas ya previamente cortadas en el proceso F_003_001	Pulidora manual	
2	M	Montaje de las laminas el dobladora.	Carga manual	
3	D	Dobaldo de lamina a los angulos y medidas en planos.	SSP_3.8	
<b>Elaborado por:</b> - Cristian José Martínez G. <b>Cargo:</b> Autor de Proyecto - Sneider Arbey Herazo P. <b>Cargo:</b> Autor de Proyecto <b>Fecha:</b> 29/06/2025			<b>Aprobado por:</b> Julian Ernesto Jaramillo  <b>Cargo:</b> Julián Ernesto Jaramillo Ibarra <b>Fecha:</b> 15/07/2025	


	<b>PROYECTO SEGUIDOR SOLAR PASIVO 2-DOF</b>		<b>Ficha ejecución de procedimiento N° F05.5</b>	
			<b>FORMATO ÚNICO</b>	
<b>Nombre del Proceso:</b> Soldadura de subensambles			<b>Código del Proceso:</b> S_03_001	
<b>Descripción:</b> Ensamble sistema de soporte bastidor.  Ensamble de piezas SSP_3.3			<b>Hoja N° 01 de 01</b>	
			<b>Personal</b>	<b>Tiempo</b>
			1	25 (min)
<b>Tipo de Actividad:</b> A:___ C:___ CL:___ D:___ E: <u>x</u> L:___ M:___ MT:___ PA:___ PL: <u>x</u> S: <u>x</u> TC:___				
<b>Entradas del proceso:</b>  Lamina porcesada en corte laser.			<b>Salidas del proceso:</b>  Lamina soporte chumatera	
<b>N° De paso</b>	<b>Código</b>	<b>Descripción</b>	<b>Equipos, herramientas, instrumentos y materiales</b>	
1	M	Montaje de los elementos para porceder al siguiente paso.	SSP_3.3	
2	S	Soldadura entre los elementos sobrepuestos según las medidas del plano	Soldadura TIG	
3	PL	Pulida del ensamble para dar buena presentación.	Pulidora manual	
4				
5				
<b>Elaborado por:</b> - Cristian José Martínez G. <b>Cargo:</b> Autor de Proyecto - Sneider Arbey Herazo P. <b>Cargo:</b> Autor de Proyecto <b>Fecha:</b> 29/06/2025			<b>Aprobado por:</b> Julian Ernesto Jaramillo  <b>Cargo:</b> Julián Ernesto Jaramillo Ibarra <b>Fecha:</b> 15/07/2025	


		<b>PROYECTO SEGUIDOR SOLAR PASIVO 2-DOF</b>		<b>Ficha ejecución de procedimiento N° F04.4</b>	
				<b>FORMATO ÚNICO</b>	
<b>Nombre del Proceso:</b> Ensamble sistema soporte bastidor.				<b>Código del Proceso:</b> E_03_001	
<b>Descripción:</b> Ensamble sistema de soporte bastidor.  Ensamble de piezas SSP_3.1 & SSP_3.2 & SSP_3.3 & SSP_3.4 & SSP_3.5 & SSP_3.6 & SSP_3.7 & SSP_3.8 & SSP_3.9 &				<b>Hoja N° 01 de 01</b>	
				<b>Personal</b>	<b>Tiempo</b>
				2	5 horas
<b>Tipo de Actividad:</b> A:___ C:___ CL:___ D:___ E: <input checked="" type="checkbox"/> L:___ M:___ MT:___ PA: <input checked="" type="checkbox"/> PL: <input checked="" type="checkbox"/> S: <input checked="" type="checkbox"/> TC:___					
<b>Entradas del proceso:</b>  Piezas manufacturadas y compradas			<b>Salidas del proceso:</b>  Sistema soporte bastidor.		
N° De paso	Código	Descripción	Equipos, herramientas, instrumentos y materiales		
1	M	Montaje de los elementos para porceder al siguiente paso.	Carga manual		
2	PA	Pintura anticorrosiva a a las piezas manufacturadas	Pintura anticorrosiva		
3	E	Ensamble de los elementos comprados según su proveedor	SSP_3.6 & SSP_3.10 & SSP_3.11		
<b>Elaborado por:</b> - Cristian José Martínez G. <b>Cargo:</b> Autor de Proyecto - Sneider Arbey Herazo P. <b>Cargo:</b> Autor de Proyecto <b>Fecha:</b> 29/06/2025			<b>Aprobado por:</b> Julian Ernesto Jaramillo  <b>Cargo:</b> Julián Ernesto Jaramillo Ibarra <b>Fecha:</b> 15/07/2025		


	<b>PROYECTO SEGUIDOR SOLAR PASIVO 2-DOF</b>		<b>Ficha ejecución de procedimiento N° F04.4</b>	
			<b>FORMATO ÚNICO</b>	
<b>Nombre del Proceso:</b> Ensamble sistema soporte bastidor.			<b>Código del Proceso:</b> E_02_001	
<b>Descripción:</b> Ensamble sistema de soporte bastidor.  Ensamble de piezas SSP_2.1 & SSP_2.2 & SSP_2.3 & SSP_2.4			<b>Hoja N° 01 de 01</b>	
			<b>Personal</b>	<b>Tiempo</b>
			2	15 (min)
<b>Tipo de Actividad:</b> A:___C:___ CL:___D:___E: <u>x</u> L:___ M:___ MT:___ PA:___PL: <u>x</u> S: <u>x</u> TC:___				
<b>Entradas del proceso:</b>  Piezas manufacturadas y compradas			<b>Salidas del proceso:</b>  Sistema soporte bastidor.	
N° De paso	Código	Descripción	Equipos, herramientas, instrumentos y materiales	
1	M	Montaje de los elementos para porceder al siguiente paso.	Carga manual	
2	E	Ensamble de los elementos comprados según su proveedor	SSP_2.3 & SSP_2.4	
<b>Elaborado por:</b> - Cristian José Martínez G. <b>Cargo:</b> Autor de Proyecto - Sneider Arbey Herazc P. <b>Cargo:</b> Autor de Proyecto <b>Fecha:</b> 29/06/2025			<b>Aprobado por:</b> Julian Ernesto Jaramillo  <b>Cargo:</b> Julián Ernesto Jaramillo Ibarra <b>Fecha:</b> 15/07/2025	


		<b>PROYECTO SEGUIDOR SOLAR PASIVO 2-DOF</b>		<b>Ficha ejecución de procedimiento N° F04.3</b>	
		<b>FORMATO ÚNICO</b>			
<b>Nombre del Proceso:</b> Soldadura de subensambles				<b>Código del Proceso:</b> S_02_001	
<b>Descripción:</b> Ensamble sistema de soporte bastidor. Ensamble de piezas SSP_2.1 & SSP_2.2				<b>Hoja N° 01 de 01</b>	
				<b>Personal</b>	<b>Tiempo</b>
				2	5 Horas
<b>Tipo de Actividad:</b> A:___ C:___ CL:___ D:___ E: <u>x</u> L:___ M:___ MT:___ PA: <u>x</u> PL: <u>x</u> S: <u>x</u> TC:___					
<b>Entradas del proceso:</b> Piezas manufacturadas y compradas			<b>Salidas del proceso:</b> Sistema soporte bastidor.		
N° De paso	Código	Descripción	Equipos, herramientas, instrumentos y materiales		
1	M	Montaje de los elementos para porceder al siguiente paso.	SSP_2.1 & SSP_2.2		
2	S	Soldadura entre los elementos sobrepuestos según las medidas del plano	Soldadura TIG		
3	PL	Pulida del ensamble para dar buena presentación.	Pulidora manual		
4	PA	Aplicación pintura anticorrosiva en humedo	Pintura anticorrosiva		
5	E	Ensamble de los elementos restantes con sus anclajes respectivo según el proveedor	SSP_2.3 & SSP_2.4		
<b>Elaborado por:</b> - Cristian José Martínez G. <b>Cargo:</b> Autor de Proyecto - Sneider Arbey Herazo P. <b>Cargo:</b> Autor de Proyecto <b>Fecha:</b> 29/06/2025			<b>Aprobado por:</b> Julian Ernesto Jaramillo  <b>Cargo:</b> Julián Ernesto Jaramillo Ibarra <b>Fecha:</b> 15/07/2025		


		<b>PROYECTO SEGUIDOR SOLAR PASIVO 2-DOF</b>		<b>Ficha ejecución de procedimiento N° F04.2</b>	
		<b>FORMATO ÚNICO</b>			
<b>Nombre del Proceso:</b> Manufactura basada en corte manual de tubería.			<b>Código del Proceso:</b> F_02_002		
<b>Descripción:</b> Corte en humedo de los ejes para la fabricación del sistema de soporte bastidor. Este proceso es compatible para las piezas: SSP_2.2.1 & SSP_2.2.2 & SSP_2.2.3 & SSP_2.2.4			<b>Hoja N° 01 de 01</b>		
			<b>Personal</b>	<b>Tiempo</b>	
			1	25 (min)	
<b>Tipo de Actividad:</b> A:___ C: <input checked="" type="checkbox"/> CL:___ D:___ E:___ L: <input checked="" type="checkbox"/> M: <input checked="" type="checkbox"/> MT: <input checked="" type="checkbox"/> PA:___ PL:___ S:___ TC:___					
<b>Entradas del proceso:</b>  Acero ASTM A36 Tubo cuadrado 40 mm x 40 mm e= 3mm			<b>Salidas del proceso:</b>  Marco Vertical & Horizontal Refuerzo Vertical & Horizontal		
N° De paso	Código	Descripción	Equipos, herramientas, instrumentos y materiales		
1	M	Montaje de la tubería en sierra cortadora de mesa.	Carga manual		
2	C	Corte requerido a la medida indicada por el plano.	Sierra cortadora de mesa		
3	M	Montaje de los diferentes ejes.	carga manual		
4	MT	Refrentado de ciertas pieza para garantizar los cortes rectos	SSP_2.2.2 & SSP_2.2.3		
5	L	Limpieza de rebaba e imperfecciones por el torno.	Pulidora manual.		
<b>Elaborado por:</b> - Cristian José Martínez G. <b>Cargo:</b> Autor de Proyecto - Sneider Arbey Herazc P. <b>Cargo:</b> Autor de Proyecto <b>Fecha:</b> 29/06/2025			<b>Aprobado por:</b> Julian Ernesto Jaramillo  <b>Cargo:</b> Julián Ernesto Jaramillo Ibarra <b>Fecha:</b> 15/07/2025		


	<b>PROYECTO SEGUIDOR SOLAR PASIVO 2-DOF</b>		<b>Ficha ejecución de procedimiento N° F04.1</b>	
			<b>FORMATO ÚNICO</b>	
<b>Nombre del Proceso:</b> Manufactura basada en corte laser.			<b>Código del Proceso:</b> F_03_001	
<b>Descripción:</b> Corte en humedo de los ejes para la fabricación del sistema de soporte bastidor. Este proceso es compatible para las piezas: SSP_3.1 & SSP_3.			<b>Hoja N° 01 de 01</b>	
			<b>Personal</b>	<b>Tiempo</b>
			1	15 (min)
<b>Tipo de Actividad:</b> A:___ C:___ CL: <u>x</u> D:___ E:___ L:___ M: <u>x</u> MT:___ PA:___ PL: <u>x</u> S:___ TC:___				
<b>Entradas del proceso:</b>  Lamina Hot Rolled e=3mm			<b>Salidas del proceso:</b>  Lamina de sujección base & Lamina de sujección circular	
N° De paso	Código	Descripción	Equipos, herramientas, instrumentos y materiales	
1	M	Montaje de lamiana a maquina de corte laser.	Carga manual	
2	CL	Proceso de corte laser	Corte laser	
3	PL	Pulida rebaba porceso de corte laser.	Pulidora manual	


		<p align="center"><b>PROYECTO SEGUIDOR SOLAR PASIVO 2-DOF</b></p>		<p align="center"><b>Ficha Componentes Soporte Fotovoltaico N° F04</b></p>	
				<p align="center"><b>FORMATO ÚNICO</b></p>	
<p><b>Nombre:</b> Soporte para diferentes paneles fotovoltaicos con seguimiento solar pasivo, de dos grados de libertad.</p>				<p align="center"><b>Código:</b> SSP_2</p>	
<p><b>Autores:</b> Cristian José Martínez González, Sneider Arbey Herazo Puentes</p>					
<p><b>Descripción:</b> Instrucciones para la manufactura para el colector solar del soporte.</p>				<p align="center"><b>Hoja N° 01 de 01</b></p>	
Código	Piezas	Descripción	Cantidad	Tiempo (min)	
F_03_001	SSP_2.1.1 & SSP_2.1.2	Manufactura basado en corte laser	9	15	
F_02_002	SSP_2.2.1 & SSP_2.2.2 & SSP_2.2.3 & SSP_2.2.4	Manufactura basado en corte manual	9	25	
S_02_001	SSP_2.1 & SSP_2.2	Soldadura de subensambles	4	5 (Horas)	
E_02_001		Proceso de ensamble	1	15	
<p><b>Elaborado por:</b> - Cristian José Martínez G.  <b>Cargo:</b> Autor de Proyecto                  - Sneider Arbey Herazo P.  <b>Cargo:</b> Autor de Proyecto  <b>Fecha:</b> 29/06/2025</p>			<p><b>Aprobado por:</b> Julian Ernesto Jaramillo  <b>Cargo:</b> Julián Ernesto Jaramillo Ibarra  <b>Fecha:</b> 15/07/2025</p>		

		<b>PROYECTO SEGUIDOR SOLAR PASIVO 2-DOF</b>		<b>Ficha Componentes Soporte Fotovoltaico N° F03</b>	
				<b>FORMATO ÚNICO</b>	
<b>Nombre:</b> Soporte para diferentes paneles fotovoltaicos con seguimiento solar pasivo, de dos grados de libertad.				<b>Código:</b> SSP_1	
<b>Autores:</b> Cristian José Martínez González, Sneider Arbey Herazo Puentes					
<b>Descripción:</b> Instrucciones para la manufactura para el colector solar del soporte.				<b>Hoja N° 01 de 01</b>	
Código	Piezas	Descripción	Cantidad	Tiempo (min)	
F_01_001	SSP_1.1 & SSP_1.4 & SSP_1.5	Manufactura basado en corte laser	5	25	
F_01_002	SSP_1.3 & SSP_1.7	Manufactura basada en mecanizado en torno convencional.	5	15	
E_01_001		Proceso de ensamble	1	5 (Horas)	
<b>Elaborado por:</b> - Cristian José Martínez G. <b>Cargo:</b> Autor de Proyecto - Sneider Arbey Herazo P. <b>Cargo:</b> Autor de Proyecto <b>Fecha:</b> 29/06/2025			<b>Aprobado por:</b> Julian Ernesto Jaramillo  <b>Cargo:</b> Julián Ernesto Jaramillo Ibarra <b>Fecha:</b> 15/07/2025		

		<b>PROYECTO SEGUIDOR SOLAR PASIVO 2-DOF</b>		<b>Ficha ejecución de procedimiento N° F03.1</b>	
<b>FORMATO ÚNICO</b>					
<b>Nombre del Proceso:</b> Manufactura basada en corte laser.				<b>Código del Proceso:</b> F_01_001	
<b>Descripción:</b> Corte en humedo de los ejes para la fabricación del sistema del colector solar. Este proceso es compatible para las piezas: SSP_1.1 & SSP_1.4 & SSP_1.5				<b>Hoja N° 01 de 01</b>	
				<b>Personal</b>	<b>Tiempo</b>
				1	25 (min)
<b>Tipo de Actividad:</b> A:___ C:___ CL: <input checked="" type="checkbox"/> D:___ E:___ L:___ M: <input checked="" type="checkbox"/> MT:___ PA:___ PL: <input checked="" type="checkbox"/> S:___ TC:___					
<b>Entradas del proceso:</b>  Lamina Hot Rolled e=6mm			<b>Salidas del proceso:</b>  Lamina de acople colector		
N° De paso	Código	Descripción	Equipos, herramientas, instrumentos y materiales		
1	M	Montaje de lamiana a maquina de corte laser.	Carga manual		
2	CL	Proceso de corte laser	Corte laser		
3	PL	Pulida rebaba porceso de corte laser.	Pulidora manual		
<b>Elaborado por:</b> - Cristian José Martínez G. <b>Cargo:</b> Autor de Proyecto - Sneider Arbey Herazo P. <b>Cargo:</b> Autor de Proyecto <b>Fecha:</b> 29/06/2025			<b>Aprobado por:</b> Julian Ernesto Jaramillo  <b>Cargo:</b> Julián Ernesto Jaramillo Ibarra <b>Fecha:</b> 15/07/2025		

		<b>PROYECTO SEGUIDOR SOLAR PASIVO 2-DOF</b>		<b>Ficha ejecución de procedimiento N° F03.2</b>	
				<b>FORMATO ÚNICO</b>	
<b>Nombre del Proceso:</b> Manufactura basada en mecanizado convencional.				<b>Código del Proceso:</b> F_01_002	
<b>Descripción:</b> Corte en humedo de los ejes para la fabricación del sistema del colector solar. Este proceso es compatible para las piezas: SSP_1.3 & SSP_1.7				<b>Hoja N° 01 de 01</b>	
				<b>Personal</b>	<b>Tiempo</b>
				1	15 (min)
<b>Tipo de Actividad:</b> A:___ C: <input checked="" type="checkbox"/> CL:___ D:___ E:___ L: <input checked="" type="checkbox"/> M: <input checked="" type="checkbox"/> MT: <input checked="" type="checkbox"/> PA:___ PL:___ S:___ TC:___					
<b>Entradas del proceso:</b> Eje ASTM A36 Ø1/2", Ø2" & 5"			<b>Salidas del proceso:</b> Lamina de acople colector		
N° De paso	Código	Descripción	Equipos, herramientas, instrumentos y materiales		
1	M	Montaje de los diferentes ejes puestos a cortar manualmente.	Carga manual		
2	C	Corte requerido a una medida mayor del plano , capaz de anclar el material a la copa del torno.	Sierra cortadora de mesa		
3	M	Montaje de los diferentes ejes.	carga manual		
4	MT	Mecanizado en torno de tres copas a las medidas dadas por el plano.	Torno tres copas		
5	L	Limpieza de rebaba e imperfecciones por el torno.	Pulidora manual.		
<b>Elaborado por:</b> - Cristian José Martínez G. <b>Cargo:</b> Autor de Proyecto - Sneider Arbey Herazc P. <b>Cargo:</b> Autor de Proyecto <b>Fecha:</b> 29/06/2025			<b>Aprobado por:</b> Julian Ernesto Jaramillo  <b>Cargo:</b> Julián Ernesto Jaramillo Ibarra <b>Fecha:</b> 15/07/2025		

		<b>PROYECTO SEGUIDOR SOLAR PASIVO 2-DOF</b>		<b>Ficha ejecución de procedimiento N° F03.3</b>	
				<b>FORMATO ÚNICO</b>	
<b>Nombre del Proceso:</b> Ensamble de sistema colector solar.				<b>Código del Proceso:</b> E_01_001	
<b>Descripción:</b> Ensamble sistema de colector solar.				<b>Hoja N° 01 de 01</b>	
Ensamble de piezas SSP_1.1 & SSP_1.2 & SSP_1.3 & SSP_1.4 & SSP_1.5 & SSP_1.6 & SSP_1.7 & SSP_1.8 & SSP_1.9 & SSP_1.10				<b>Personal</b>	<b>Tiempo</b>
				2	5 Horas
<b>Tipo de Actividad:</b> A:___C:___CL:___D:___E: <input checked="" type="checkbox"/> L:___M:___MT:___PA: <input checked="" type="checkbox"/> PL: <input checked="" type="checkbox"/> S: <input checked="" type="checkbox"/> TC:___					
<b>Entradas del proceso:</b>			<b>Salidas del proceso:</b>		
Piezas manufacturadas y compradas.			Lamina de acople colector		
N° De paso	Código	Descripción	Equipos, herramientas, instrumentos y materiales		
1	E	Ensamble de piezas que son soldadas entre ellas.	SSP_1.1 & SSP_1.3 & SSP_1.4 & SSP_1.7		
2	S	Soldadura de las piezas en el anterior moemto mostradas	Soldadura TIG		
3	PL	Pulida de la rebebe generada por la soldadura y generar buena presentación.	Pulidora Manual		
4	PA	Aplicación de anticorrosivo a todos las partes manufacturadas.	Pintura anticorrosiva		
5	E	Ersamble de piezas faltantes al sistema entero.	SSP_1.2 & SSP_1.5 & SSP_1.6 & SSP_1.8 & SSP_1.9 & SSP_1.10		
<b>Elaborado por:</b> - Cristian José Martínez G. <b>Cargo:</b> Autor de Proyecto - Sneider Arbey Herazc P. <b>Cargo:</b> Autor de Proyecto <b>Fecha:</b> 29/06/2025			<b>Aprobado por:</b> Julian Ernesto Jaramillo  <b>Cargo:</b> Julián Ernesto Jaramillo Ibarra <b>Fecha:</b> 15/07/2025		

		<b>PROYECTO SEGUIDOR SOLAR PASIVO 2-DOF</b>		<b>Ficha Componentes Soporte Fotovoltaico N° F02</b>	
				<b>FORMATO ÚNICO</b>	
<b>Nombre:</b> Soporte para diferentes paneles fotovoltaicos con seguimiento solar pasivo, de dos grados de libertad.				<b>Código:</b> SSP	
<b>Autores:</b> Cristian José Martínez González, Sneider Arbey Herazo Puentes					
<b>Descripción:</b> Codificación de los procedimientos de manufactura.				<b>Hoja N° 01 de 01</b>	
Código	Proceso	Descripción	P	Tiempo (min)	
A	ARMADO	Proceso manufactura basado en el armado de subensambles.	1	10	
C	CORTE	Proceso de corte por medio de herramientas no computarizadas	1	10	
CL	CORTE LASER	Proceso de corte de lamina y tubería por medio de corte laser.	1	10	
D	DOBLADO	Proceso de doblado de lamina.	1	5	
E	ENSAMBLE	Proceso de ensamble entre tanto de parte como subensambles entre sí.	1	25	
L	LIMPIEZA	Proceso de limpieza tanto de rebaba imperffcciones y presentación	1	5	
M	MONTAJE	Proceso en el cual se prepara la materia primara en la maquina.	1	10	
MT	TORNO	Proceso de mecanizado en torno convensional 3 o 4 copas.	1	15	
PA	ANTICORROSIVO	Proceso de pintura de una capa de anticorrosivo.	1	6.5 (HORAS)	
PL	PULIDO	Proceso de pulido de rebaba y exceso de cordon de soldadura.	1	10	
S	SOLDADURA	Proceso de soldadura entre elementos metalicos.	1	50	
TC	CNC	Proceso de mecanizado de lamina y tubería por medio de maquina CNC.	1	25	
<b>Elaborado por:</b> - Cristian José Martínez G. <b>Cargo:</b> Autor de Proyecto - Sneider Arbey Herazo P. <b>Cargo:</b> Autor de Proyecto <b>Fecha:</b> 29/06/2025			<b>Aprobado por:</b> Julian Ernesto Jaramillo  <b>Cargo:</b> Julián Ernesto Jaramillo Ibarra <b>Fecha:</b> 15/07/2025		

