



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE MECATRÓNICA

**ANÁLISIS Y MODELADO MATEMÁTICO DE LOS PARÁMETROS QUE
INTERVIENEN EN UN COLECTOR SOLAR EN ESPIRAL Y
PROPUESTA DE CONTROL**

Trabajo de titulación previo a la obtención
del título de Ingeniero en Mecatrónica

AUTORES: CÉSAR SANTIAGO RIERA PELÁEZ
ADRIÁN MAURICIO SANCHO DOMINGUEZ
TUTOR: ING. JULIO CÉSAR LOJA QUEZADA Ph.D.

Cuenca – Ecuador

2026

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, César Santiago Riera Peláez con documento de identificación N° 0105722722 y Adrián Mauricio Sancho Dominguez con documento de identificación N° 0106568017; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 18 de febrero del 2026

Atentamente,



César Santiago Riera Peláez
0105722722



Adrián Mauricio Sancho Dominguez
0106568017

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, César Santiago Riera Peláez con documento de identificación N° 0105722722 y Adrián Mauricio Sancho Dominguez con documento de identificación N° 0106568017, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores de la Propuesta Tecnológica: “Análisis y modelado matemático de los parámetros que intervienen en un colector solar en espiral y propuesta de control”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 18 de febrero del 2026

Atentamente,



César Santiago Riera Peláez
0105722722



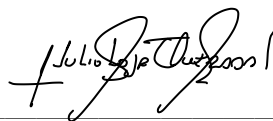
Adrián Mauricio Sancho Dominguez
0106568017

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Julio César Loja Quezada con documento de identificación N° 0102595527, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ANÁLISIS Y MODELADO MATEMÁTICO DE LOS PARÁMETROS QUE INTERVIENEN EN UN COLECTOR SOLAR EN ESPIRAL Y PROPUESTA DE CONTROL, realizado por César Santiago Riera Peláez con documento de identificación N° 0105722722 y Adrián Mauricio Sancho Dominguez con documento de identificación N° 0106568017, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Propuesta Tecnológica que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 18 de febrero del 2026

Atentamente,



Ing. Julio César Loja Quezada PhD
0102595527

Dedicatoria

Estudiante 1

Dedico este trabajo, en primer lugar, a nuestro creador Jehová Dios, el me ha dado la fuerza, mi luz y mi refugio en todo momento. Sin Su ayuda, nada de esto habría sido posible. En los días difíciles, cuando el cansancio físico por trabajar y estudiar al mismo tiempo parecía insostenible, Su apoyo me sostuvo y me dio la claridad necesaria para seguir adelante.

Dedico también este logro a mi familia, que con amor y paciencia me acompañó en el camino; y a todas las personas que, sin saberlo, me motivaron con una palabra de ánimo o un gesto de apoyo. Este trabajo representa más que un título: es el testimonio de que con fe, esfuerzo y perseverancia, incluso en medio de las limitaciones económicas, se puede alcanzar lo que uno se propone.

Estudiante 2

Dedico este trabajo de titulación primero a Dios, por concederme la vida, la fortaleza y la sabiduría necesarias para culminar esta etapa. A mi madre, por su amor incondicional, por apoyarme en mis estudios y asumir con muchos de los gastos que hicieron posible alcanzar esta meta; a mis amigos, por su motivación y apoyo sincero en cada etapa del proceso; y a mis docentes, por su paciencia y compromiso al guiarme en este proceso de vida universitaria. A todos ustedes, gracias por ser parte esencial de este logro

Agradecimientos

Estudiante 1

Agradezco profundamente al Dios Todopoderoso Jehová, el ha sido mi mayor escudo a lo largo de esta meta académica. Su guía me ha sostenido cuando las fuerzas me faltaban, y Su consuelo me levantó cuando las circunstancias económicas se tornaron difíciles. Gracias a Él, pude combinar mis responsabilidades laborales con mis estudios sin perder el enfoque ni la esperanza.

Agradezco también a mi familia, por su apoyo incondicional y por creer en mí aun cuando el panorama era incierto. A mis amigos y compañeros de carrera, por compartir este trayecto académico y ofrecerme siempre una mano amiga. A mis docentes y en especial al tutor del presente trabajo, por su paciencia, dedicación y enseñanzas valiosas que contribuyeron enormemente a mi formación..

Estudiante 2

Quiero agradecer en primer lugar, a Dios por darme la salud, fuerza y perseverancia necesarias para culminar esta etapa académica. A mi madre, por su incansable apoyo emocional y económico, por creer en mí incluso en los momentos más difíciles y por ser el pilar fundamental en mi vida. A mi pareja, por su comprensión, amor y constante motivación durante este proceso. A mis amigos, por estar presentes con palabras de aliento, compañía y ayuda desinteresada. A mis docentes, por su entrega, paciencia y dedicación al compartir su conocimiento, y por contribuir de manera significativa a mi formación profesional. Finalmente, extendiendo mi gratitud a la Universidad por darme los medios y el entorno académico necesarios para desarrollar este trabajo de titulación.

Este documento fue realizado enteramente en L^AT_EX

Índice

Certificado de responsabilidad y autoría del trabajo de titulación	I
Certificado de cesión de derechos de autor del trabajo de titulación a la Universidad Politécnica Salesiana	II
Certificado de dirección del trabajo de titulación	III
Dedicatoria	IV
Agradecimientos	V
Resumen	XI
Abstract	XII
1. Introducción	1
2. Problema	1
2.1. Descripción del problema	1
2.2. Antecedentes	2
2.3. Importancia y alcances	3
2.4. Delimitación	4
2.4.1. Espacial o geográfica	4
2.4.2. Temporal	5
2.4.3. Sectorial o institucional	5
3. Objetivos	5
3.1. Objetivo general	5
3.2. Objetivos Específicos	6
4. Marco Teórico	6
4.1. Energías Renovables	6
4.1.1. Energías Renovables en Ecuador	7
4.2. Energía Solar	8
4.2.1. Importancia de la Energía Solar	8
4.2.2. Fundamentos de la Energía Solar Térmica	8

4.3. Colectores solares de radiación	9
5. Marco metodológico	10
5.1. Metodología de la Investigación	10
5.2. Metodología del proceso	11
5.2.1. Linealización alrededor del punto de operación	26
5.2.2. Función de transferencia del sistema	27
5.2.3. Validación del modelo lineal	27
5.3. Diseño del control ON–OFF con histéresis	28
5.3.1. Definición de la banda de histéresis	29
5.3.2. Ley de conmutación	29
5.3.3. Comportamiento de la señal de caudal	29
5.3.4. Respuesta térmica del sistema controlado	30
6. Resultados	31
6.1. G1: Irradiancia solar diaria y ajuste senoidal	32
6.2. G2: Temperatura superficial del tubo	33
6.3. G3: Temperatura de salida del agua	34
6.4. G4: Potencia térmica útil transferida al fluido	35
6.5. G5: Eficiencia térmica del colector	36
6.6. G6: Influencia del caudal y número de vueltas (mes de baja irradiancia) . . .	36
6.7. G7: Influencia del caudal y número de vueltas (mes de alta irradiancia) . . .	37
6.8. Resultados del control ON–OFF con histéresis	38
7. Cronograma y actividades	39
8. Presupuesto	41
8.1. Talento humano	41
8.2. Recursos materiales	41
9. Recomendaciones	43
Referencias	47
ANEXOS	48

Lista de Tablas

- 1. Irradiancia solar mensual promedio en Cuenca, Ecuador, derivada del ajuste senoidal de datos NASA POWER (2024). 16
- 2. Parámetros generales mantenidos constantes en las simulaciones. 32
- 3. *Cronograma de actividades*. 40
- 4. Recurso de talento humano 41
- 5. Recurso de talento humano 42

Lista de Figuras

1.	Ubicación de la ciudad de Cuenca	5
2.	Participación de los países en energía renovable	7
3.	Irradiación solar global	9
4.	Metodología del proceso	12
5.	G0: Irradiancia solar diaria del año 2024 obtenida de NASA POWER y ajuste senoidal anual aplicado.	15
6.	Esquema geométrico del colector solar tipo espiral con las dimensiones principales consideradas en el modelo.	17
7.	Esquema del balance de energía del colector solar tipo espiral con cubierta de vidrio.	21
8.	Validación del modelo lineal	28
9.	Señal de caudal bajo control ON-OFF	30
10.	Respuesta térmica bajo control ON-OFF	31
11.	G1: Irradiancia solar diaria 2024 y ajuste senoidal.	33
12.	G2: Temperatura superficial del tubo – PEAD vs aluminio.	34
13.	G3: Temperatura de salida del agua – PEAD vs aluminio.	35
14.	G4: Potencia térmica útil – PEAD vs aluminio.	35
15.	G5: Eficiencia térmica mensual.	36
16.	G6: Mes de baja irradiancia – T_{salida} vs caudal y número de vueltas.	37
17.	G7: Mes de alta irradiancia – T_{salida} vs caudal y número de vueltas.	37
18.	Regulación térmica bajo control ON-OFF	39

Resumen

Este trabajo examina la escasa puesta en marcha de sistemas solares térmicos en Cuenca, Ecuador, a pesar de que tienen un potencial elevado de irradiación. Se plantea el diseño y modelado matemático de un colector solar de tipo espiral para calentar agua para uso en casa, añadiendo una estrategia de control con el fin de mejorar su rendimiento. Se construyeron dos modelos: uno dinámico no lineal que fue linealizado para determinar su función de transferencia y configurar el sistema de control, y otro estacionario de diseño fundamentado en la transferencia de calor y el balance energético. Según las simulaciones en MATLAB, con datos de irradiancia reales (NASA POWER, 2024), se obtiene una eficiencia media térmica del 67.7% y temperaturas por encima de los 28 °C durante la mayor parte del año; estas pueden llegar a ser más de 35 °C dependiendo de la disposición geométrica. La validación demostró que los modelos lineales y no lineales coincidieron en gran medida. El control ON-OFF con banda de histéresis permitió que la temperatura media del agua en el colector se mantuviera entre 26 y 36 °C, lo que corroboró la posibilidad técnica del sistema como opción económica para usos domésticos.

Palabras clave: Colector solar espiral, modelado térmico, modelo dinámico, control ON-OFF, histéresis térmica, eficiencia energética.

Abstract

This work examines the limited implementation of solar thermal systems in Cuenca, Ecuador, despite its high solar irradiation potential. The design and mathematical modeling of a spiral-type solar collector for domestic water heating are proposed, incorporating a control strategy to improve its thermal performance.

Two models were developed: a nonlinear dynamic model, later linearized to obtain its transfer function and support control design, and a steady-state design model based on heat transfer mechanisms and energy balance. MATLAB simulations using real solar irradiance data (NASA POWER, 2024) show an average thermal efficiency of 67.7%, with water temperatures above 28 °C during most of the year and exceeding 35 °C depending on the geometric configuration. Validation results demonstrated strong agreement between the linear and nonlinear models.

The ON–OFF control with hysteresis band successfully maintained the average water temperature inside the collector within the 26–36 °C range, confirming the technical feasibility of the proposed system as a cost-effective solution for domestic applications.

Keywords: Spiral solar collector, thermal modeling, dynamic model, ON–OFF control, hysteresis band, thermal efficiency.

1. Introducción

El uso de la energía solar térmica se ha consolidado como una alternativa viable y sostenible para reducir la dependencia de fuentes fósiles en aplicaciones residenciales. Esta fuente renovable aprovecha la radiación solar para generar calor útil, siendo especialmente efectiva en regiones con alta disponibilidad solar, como la ciudad de Cuenca, Ecuador.

En este contexto, el presente estudio aborda el diseño, modelado y análisis térmico de un colector solar con geometría espiral, con el objetivo de evaluar su rendimiento bajo condiciones reales y proponer una estrategia de control que optimice su funcionamiento. Este tipo de configuración busca mejorar la captación de energía solar manteniendo una estructura compacta, económica y adaptable a espacios reducidos.

El análisis se fundamenta en un modelo matemático que considera los procesos físicos de intercambio térmico mediante conducción, convección y radiación, e incluye datos reales relacionados con la irradiación solar mensual. A partir de este modelo se simulan diferentes escenarios, variando el número de vueltas del espiral y el caudal del fluido, con el fin de analizar su efecto sobre la temperatura de salida y la eficiencia térmica.

Como parte complementaria, se propone un sistema de control ON-OFF con banda de histéresis, diseñado para regular el caudal de agua según la temperatura objetivo. Esta lógica permite mantener la temperatura del agua dentro de un rango confortable, reduciendo pérdidas energéticas y mejorando la estabilidad del sistema. El control es implementado en MATLAB mediante simulación numérica y lógica condicional.

2. Problema

2.1. Descripción del problema

En los últimos años, Ecuador ha mostrado un gran interés por adoptar energías renovables como parte de su búsqueda hacia modelos energéticos más sostenibles. Sin embargo, a pesar de que posee una alta radiación solar en casi todo el año —en particular en ciudades como Cuenca— el aprovechamiento de esta fuente natural de energía sigue siendo limitado, en particular para aplicaciones térmicas como el calentamiento de agua. (Aparicio, 2020a; CONELEC, 2008)

En la actualidad, la gran mayoría de viviendas en Cuenca recurren a duchas eléctricas o calefones, sistemas que, en sí, son accesibles y de fácil instalación, generan un consumo

energético alto. Este consumo representa una carga significativa en la economía familiar y contribuye a la utilización de combustibles fósiles, lo cual va en contra de los esfuerzos globales por reducir la huella de carbono. (Pesántez, 2012; Santos Alvite y Carrión, 2022a)

Pese al contexto favorable en términos de radiación solar, persiste una distancia significativa entre el potencial energético solar disponible y su aplicación práctica en soluciones térmicas domésticas. Este desajuste responde a múltiples factores, como la falta de políticas de incentivo, desconocimiento técnico, percepción de alto costo inicial y escasa difusión de tecnologías adecuadas para entornos rurales. (Barragán Llanos, 2020; Serrano, Alvarez, y Luna, 2019) Además, la falta de regulación del caudal en los sistemas solares térmicos puede reducir significativamente su eficiencia, ya que un caudal excesivo disminuye el tiempo de contacto con la superficie caliente, y un caudal muy bajo puede provocar sobrecalentamiento y pérdida de transferencia de calor efectiva. Por lo tanto, hacer un sistema con un controlador básico permite mantener un flujo estable y dentro de rangos operativos óptimos para mejorar la captación térmica del colector solar. (J. A. Duffie y Beckman, 2013a)

2.2. Antecedentes

En las últimas décadas, el uso de fuentes renovables ha adquirido un papel estratégico en la transición energética global, debido a la necesidad urgente de reducir la dependencia de combustibles fósiles y mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero Hernández, Easter, y Murphy-Mariscal (2014). Entre estas fuentes, la energía solar térmica destaca por su disponibilidad, bajo impacto ambiental y viabilidad técnica, especialmente en zonas con alta radiación solar.

En Ecuador, se han implementado políticas públicas para fomentar el aprovechamiento de energías limpias. Entre ellas, el Proceso Público de Selección (PPS) del Bloque de Energías Renovables No Convencionales (ERNC I) ha impulsado tecnologías como la fotovoltaica, eólica, de biomasa e hidroeléctrica de Comunicación del Ministerio de Energía y Minas (2023). No obstante, el uso residencial de electricidad sigue siendo elevado, representando más del 35% del consumo nacional en 2022 de Energía y Minas del Ecuador (2023). Este fenómeno está relacionado con el uso de duchas eléctricas y calefones a gas en los hogares, lo que genera altos costos energéticos para las familias.

Diversos programas internacionales han demostrado la eficacia de los sistemas solares térmicos para reducir el consumo doméstico de energía. Por ejemplo, en México, políticas como Hipoteca Verde han permitido instalar equipos solares en viviendas sociales, logrando importantes ahorros en electricidad CONAVI (2019). En Brasil, iniciativas como “Minha Casa

Minha Vida” han integrado colectores solares térmicos en miles de viviendas, favoreciendo la eficiencia energética Silva, Souza, y Lima (2017).

Ecuador presenta condiciones geográficas favorables para el aprovechamiento de la energía solar, con niveles promedio de irradiación diaria entre 4 y 6kWh/m², y valores que en Cuenca pueden alcanzar los 4.56kWh/m², según estudios recientes Serrano y cols. (2019); ?. Estas características evidencian el potencial del país para aplicar tecnologías térmicas en contextos urbanos y rurales.

En este escenario, surge la necesidad de explorar colectores solares no convencionales que integren materiales de bajo costo y alta durabilidad, como el polietileno de alta densidad (HDPE). Estos sistemas han demostrado buena resistencia a la corrosión, propiedades aislantes y facilidad de instalación, lo que los hace adecuados para aplicaciones domésticas de baja presión y temperatura Osorio, Flores, y Torres (2017b). Además, investigaciones recientes destacan la eficiencia de estos materiales en climas tropicales y la posibilidad de reducir el consumo energético y las emisiones Camino (2020).

Sin embargo, también se han identificado desafíos, como las pérdidas térmicas por radiación y convección, la acumulación de polvo sobre el colector o la degradación del material ante exposición prolongada al sol sin protección adecuada Cengel (2011a); Kumar, Singh, y Singh (2018). Estos factores deben considerarse cuidadosamente para garantizar la sostenibilidad del sistema a largo plazo.

2.3. Importancia y alcances

El presente trabajo adquiere relevancia en el contexto energético y ambiental de la ciudad de Cuenca, donde una parte considerable de los hogares aún utiliza sistemas convencionales como duchas eléctricas y calefones a gas licuado de petróleo (GLP) para el calentamiento de agua Santos Alvite y Carrión (2022b). Esta situación plantea la necesidad de alternativas sostenibles que permitan reducir el consumo de energía eléctrica y la dependencia de combustibles fósiles.

En este marco, el desarrollo y análisis de un colector solar térmico de geometría espiral, fabricado con materiales de bajo costo como el polietileno de alta densidad (HDPE), se presenta como una opción viable para aplicaciones residenciales de baja temperatura. Este tipo de sistemas destaca por su bajo impacto ambiental, accesibilidad y adaptabilidad a condiciones locales Osorio y cols. (2017b).

Diversos casos internacionales han demostrado que la implementación de tecnologías solares térmicas puede generar importantes beneficios en términos de ahorro energético. Por ejemplo, en países como México y Brasil, la incorporación de sistemas solares en viviendas

y procesos industriales ha permitido reducir el consumo eléctrico y las emisiones de CO₂, contribuyendo a mitigar el impacto ambiental asociado a fuentes energéticas convencionales Geographic (2022).

Este proyecto, además de aportar al diseño y modelado térmico de sistemas solares, contribuye a la generación de conocimiento técnico aplicado en entornos rurales. El modelo propuesto, fundamentado en los mecanismos físicos de intercambio térmico: conducción, convección y emisión radiante, permite simular el comportamiento térmico del sistema bajo distintas configuraciones y caudales, lo que facilita su adaptación a condiciones reales.

Asimismo, los resultados obtenidos pueden servir como base para futuros desarrollos tecnológicos a pequeña escala, y alinearse con políticas públicas que fomentan el uso de energías limpias y la diversificación de la matriz energética nacional Barragán Llanos (2020).

El alcance de esta investigación incluye el análisis del recurso solar disponible, la evaluación térmica del sistema propuesto, y la propuesta de una estrategia de control ON-OFF para regular el caudal en función de la temperatura deseada. Estos elementos contribuirán a establecer criterios técnicos y económicos que favorezcan la implementación de tecnologías solares más eficientes y sostenibles en el contexto ecuatoriano.

2.4. Delimitación

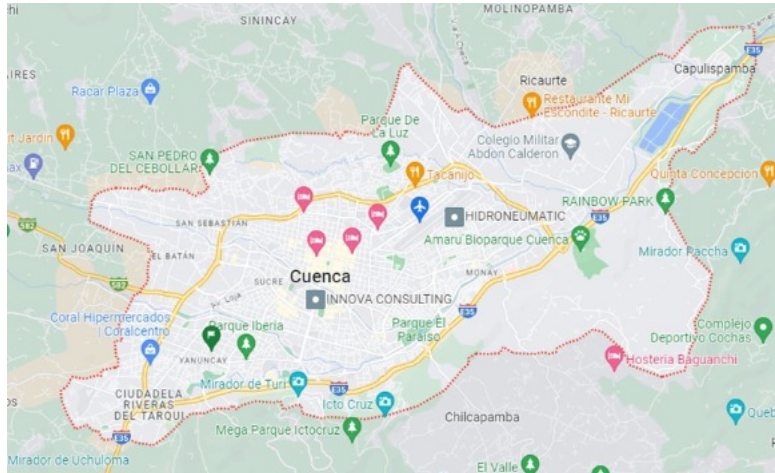
El problema de estudio se delimitará en las siguientes dimensiones:

2.4.1. Espacial o geográfica

Este estudio se desarrollará en consideración de la energía solar incidente en la ciudad de Cuenca, provincia del Azuay, Ecuador. Como se puede observar en la Figura 1

Figura 1

Ubicación de la ciudad de Cuenca.



Nota: Delimitación geográfica del lugar en consideración de la energía solar incidente

2.4.2. Temporal

El análisis y desarrollo del proyecto se llevará a cabo durante el periodo académico P67, comprendido dentro del calendario académico 2025 - 2026, con una duración estimada de 240 horas. Este periodo incluye las fases de investigación bibliográfica, modelado matemático, análisis térmico y redacción del informe final.

2.4.3. Sectorial o institucional

La ciudad de Cuenca será beneficiaria en el estudio del sistema no convencional de calentamiento de agua.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

- Modelar matemáticamente y analizar los parámetros térmicos involucrados en un colector solar de geometría espiral, proponiendo un sistema de control que optimice la transferencia de calor y mejore la eficiencia del sistema.

3.2. Objetivos Específicos

- Desarrollar un modelo matemático que permita analizar el comportamiento térmico de un colector solar de geometría espiral, considerando los principales parámetros del sistema, y utilizar dicho modelo para evaluar su eficiencia térmica bajo diversas condiciones de operación.
- Aplicar el modelo matemático del colector solar de geometría espiral en un entorno de simulación (Matlab), con el fin de analizar su comportamiento térmico bajo distintas configuraciones de parámetros y condiciones de operación.
- Diseñar un sistema de control básico para regular el comportamiento térmico del volumen del agua dentro del colector solar de geometría espiral, basada en los resultados de la simulación.

4. Marco Teórico

4.1. Energías Renovables

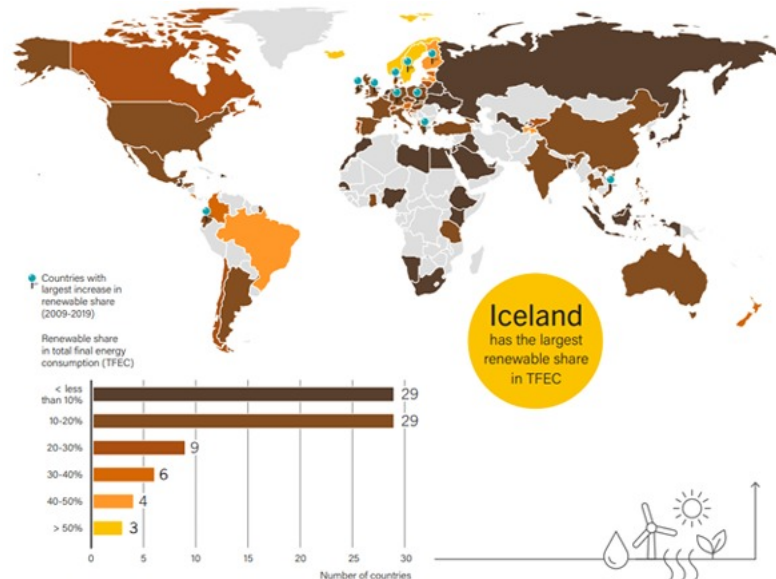
Las fuentes de energía renovable han adquirido un papel estratégico en el escenario energético global, al ofrecer una alternativa limpia y sostenible frente a las tecnologías convencionales basadas en la combustión de recursos fósiles. En respuesta a esta necesidad, diversos países han adoptado políticas orientadas a fomentar el uso de tecnologías limpias, especialmente en el ámbito eléctrico. En este proceso, América Latina ha destacado como una región particularmente activa, con avances notables en generación hidroeléctrica, fotovoltaica y eólica Robles y Rodríguez (2018).

De acuerdo con el informe REN21 Zervos (2022), tras los efectos de la pandemia de COVID-19 y las tensiones geopolíticas ocurridas en Europa del Este, se observó un incremento cercano al 4% en la demanda mundial de energía. Este aumento fue cubierto mayoritariamente mediante fuentes fósiles, lo que reactivó el debate sobre la urgencia de acelerar la transición hacia modelos energéticos sostenibles. Esto ha reavivado el debate sobre la urgencia de transformar los sistemas energéticos actuales, promoviendo una matriz energética más limpia, resiliente y descentralizada.

Como se puede observar en la Figura 2, algunos países, incluidos varios en América Latina, han incrementado considerablemente su participación en energía renovable dentro de su matriz energética.

Figura 2

Participación de los países en energía renovable.



Nota: Ecuador se encuentra dentro de los países con mayor participación de energía renovable, sin embargo, representa un porcentaje mínimo a nivel mundial. (Zervos, 2022).

4.1.1. Energías Renovables en Ecuador

En el ámbito nacional, Ecuador enfrenta el desafío de reducir su fuerte dependencia de los hidrocarburos para la generación de electricidad, situación especialmente crítica en las zonas rurales y no interconectadas del país. Esta problemática compromete los esfuerzos hacia la sostenibilidad energética y dificulta el cumplimiento de metas ambientales establecidas por organismos internacionales como el BID y la CEPAL Banco Interamericano de Desarrollo (BID) (2019); Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) (2018).

Diversos estudios han evidenciado la necesidad urgente de diversificar la matriz energética mediante el desarrollo de fuentes limpias, como la energía solar térmica y la biomasa, a través de políticas de planificación técnica y apoyo institucional Barragán Llanos (2020). Estas tecnologías no solo permiten reducir las emisiones contaminantes, sino que también mejoran la eficiencia energética y promueven un desarrollo industrial más sostenible.

Aunque el país dispone de condiciones geográficas favorables para el aprovechamiento de recursos renovables, como su ubicación cercana al ecuador, la implementación de estas solucio-

nes sigue siendo limitada. Esto se debe a factores como la falta de incentivos gubernamentales, desconocimiento técnico, y escasa difusión de proyectos exitosos GIZ Ecuador (2018). Sin embargo, en los últimos años ha crecido el interés por introducir tecnologías limpias en zonas rurales, reconociendo su potencial para dinamizar economías locales y mejorar la calidad de vida de las comunidades.

4.2. Energía Solar

En Ecuador, la energía solar destaca como una alternativa energética viable y accesible, gracias a las condiciones geográficas favorables que ofrece la región ecuatorial. Esta fuente puede aprovecharse mediante dos métodos principales: generación fotovoltaica y generación térmica. La primera convierte la radiación solar en electricidad mediante celdas solares, mientras que la segunda transforma la energía solar en calor, útil para aplicaciones como el calentamiento de agua, calefacción de espacios y procesos industriales (A. B. Meinel y Meinel, 1982).

4.2.1. Importancia de la Energía Solar

En Ecuador, el promedio de irradiación solar anual oscila entre 4 y 6 kWh/m²-día, lo que lo posiciona como un país con gran potencial para el desarrollo de tecnologías solares térmicas. Según A. B. Meinel y Meinel (1982) y Aparicio (2020b), la energía solar térmica puede alcanzar una eficiencia superior al 70%, superando ampliamente a la fotovoltaica, cuyo rendimiento ronda el 25%. Este tipo de energía puede ser implementado tanto en zonas urbanas como rurales, facilitando el acceso a servicios básicos y disminuyendo la dependencia de fuentes fósiles.

4.2.2. Fundamentos de la Energía Solar Térmica

El diseño y eficiencia de un sistema solar térmico dependen de múltiples factores, tales como la radiación solar disponible, la orientación del colector, el tipo de fluido caloportador, los materiales constructivos y las condiciones climáticas locales (Li y cols., 2016). Los sistemas se clasifican generalmente según el rango de temperatura requerido para su operación:

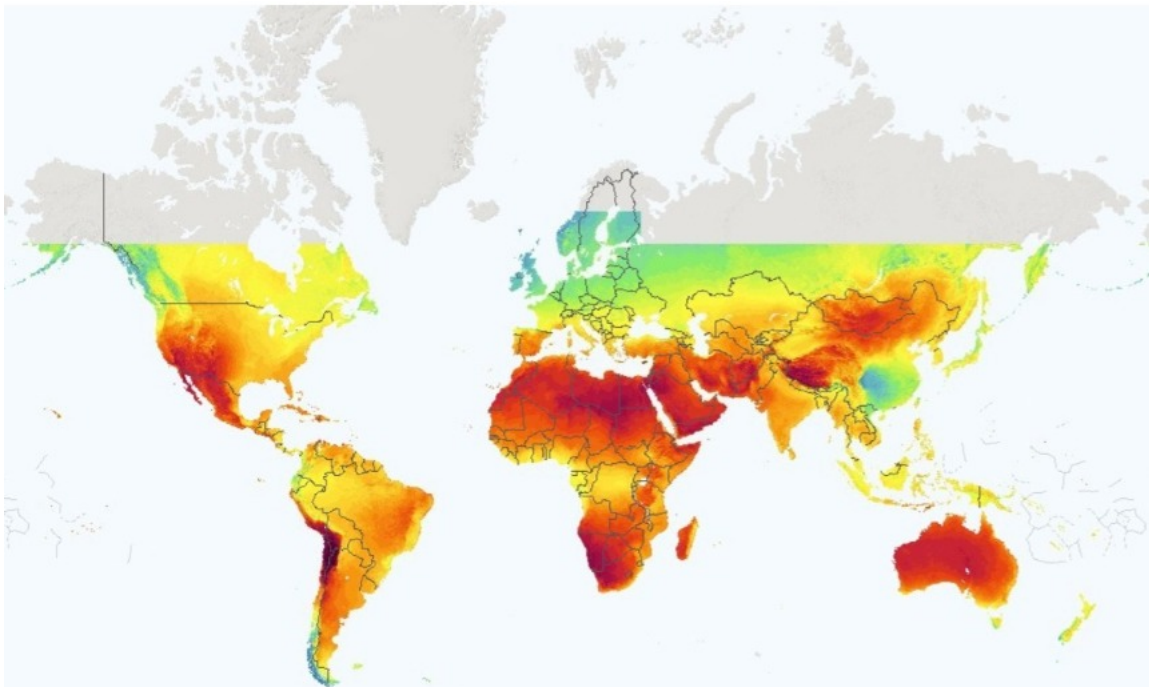
- Alta temperatura (>250 °C): aplicaciones industriales y generación eléctrica.
- Media temperatura (80–250 °C): calefacción y procesos industriales moderados.

- Baja temperatura (<80 °C): climatización de piscinas, agua sanitaria y calefacción doméstica.

Como se puede observar en la Figura 3, Ecuador presenta un nivel alto de irradiación solar global, lo que lo convierte en un entorno favorable para el uso de colectores solares térmicos.

Figura 3

Irradiación solar global.



Nota: Mapa de irradiación solar global, diciembre 2024. Fuente: (World Bank Group, 2019).

Las aplicaciones de la energía solar térmica incluyen el calentamiento de piscinas y sistemas sanitarios domésticos (García, 2017), así como la desalinización, calefacción ambiental y procesos agroindustriales (Cruz-Peragón, Palomar, Casanova, Dorado, y Manzano-Agugliaro, 2012).

4.3. Colectores solares de radiación

Los colectores solares térmicos que operan por radiación están diseñados para captar la energía solar incidente y transformarla en energía térmica. Esta energía se transfiere al agua

que está dentro del sistema, permitiendo su aprovechamiento para procesos de calentamiento.

A diferencia de los paneles fotovoltaicos, estos dispositivos no generan electricidad, sino que concentran su funcionalidad en capturar el calor solar. Gracias a su simplicidad y eficiencia, pueden alcanzar rendimientos térmicos superiores al 70% bajo condiciones óptimas de operación J. A. Duffie y Beckman (2013a).

Existen tres tipos principales de colectores solares por radiación: planos, de tubos evacuados y los de geometría no convencional (como espirales o parabólicos). Los colectores planos consisten en una caja aislada con una cubierta transparente y una superficie absorbente que transfiere calor al fluido. Son simples, económicos y adecuados para aplicaciones domésticas en regiones con alta irradiancia solar (A. Meinel y Meinel, 1982). Por otro lado, los tubos evacuados utilizan vacío para minimizar las pérdidas térmicas por la resistencia de convección y son más eficientes en climas fríos o nublados (Kalogirou, 2004b). Finalmente, los colectores de geometría no convencional —como los espirales construidos con termoplásticos— han ganado interés por su bajo costo, flexibilidad de instalación y facilidad de construcción, especialmente en zonas rurales (Osorio, Flores, y Torres, 2017a).

El rendimiento de los colectores por radiación depende de varios factores: la calidad del material absorbente, el ángulo de incidencia solar, la presencia de una cubierta transparente (vidrio o policarbonato), el caudal del fluido y las condiciones ambientales (irradiancia, temperatura y viento). Además, la eficiencia térmica puede calcularse mediante modelos como el de Hottel-Whillier, que considera las pérdidas ópticas, las resistencias térmicas y el calor útil transferido al fluido (Cengel, 2011b).

En aplicaciones rurales, estos colectores resultan especialmente atractivos debido a su bajo mantenimiento, independencia energética y la posibilidad de usar materiales locales para su fabricación. Su implementación contribuye a reducir el uso de combustibles fósiles y los costos energéticos asociados al calentamiento de agua en viviendas o instituciones.

En este trabajo se propone y analiza un colector solar de geometría espiral, construido con tubería de polietileno de alta densidad (HDPE) y cubierto por una lámina de vidrio, como una alternativa viable para el aprovechamiento de la radiación solar en la ciudad de Cuenca.

5. Marco metodológico

5.1. Metodología de la Investigación

La presente investigación adopta un enfoque cuantitativo, ya que se fundamenta en el uso de modelos matemáticos y simulaciones numéricas para representar el comportamiento

térmico de un colector solar de geometría espiral. El análisis se basa en datos climáticos secundarios obtenidos de fuentes confiables, así como en parámetros físicos definidos por la literatura especializada. A través de herramientas computacionales como MATLAB, se examina la influencia de variables operativas y geométricas —como el caudal, número de vueltas y propiedades del material— sobre el rendimiento térmico del sistema, en concordancia con los objetivos de la investigación.

El tipo de investigación es **aplicada**, dado que se orienta a resolver una problemática concreta relacionada con el acceso a tecnologías energéticas limpias y de bajo costo para sectores rurales. Además, presenta elementos de investigación **básica** al desarrollar y analizar un modelo físico-matemático que contribuye a la comprensión de los mecanismos de transferencia de calor en sistemas solares.

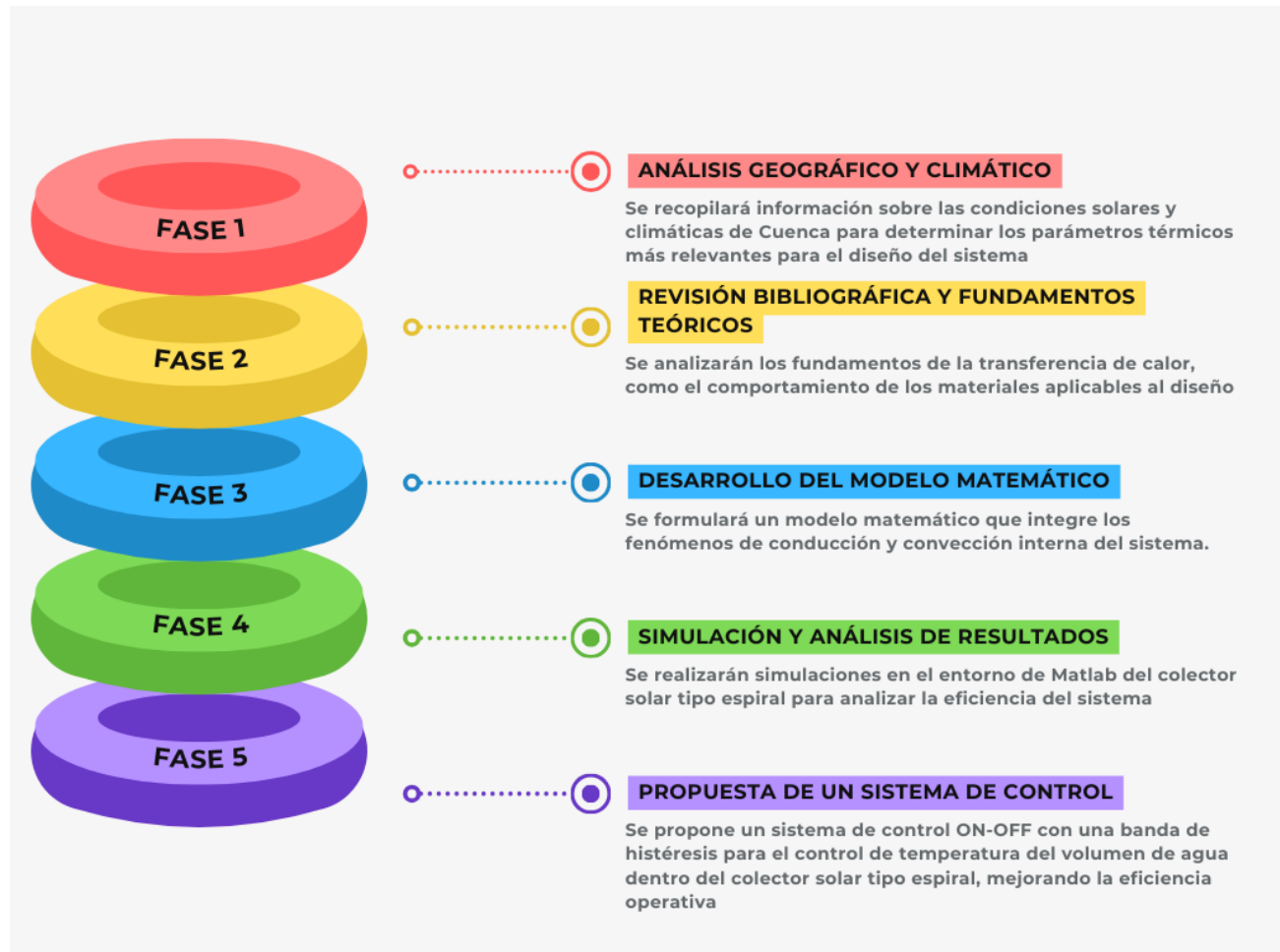
El alcance de la investigación es **descriptivo y exploratorio**. Es descriptivo porque se caracterizan detalladamente las propiedades térmicas, dimensiones del colector y condiciones ambientales del entorno; y es exploratorio porque se analiza el comportamiento de un diseño no convencional —el colector solar en espiral sin cubierta— en un contexto climático específico. Esta metodología permite establecer criterios técnicos para mejorar el diseño del sistema, optimizar su eficiencia y evaluar su viabilidad en zonas con limitaciones tecnológicas y económicas Cengel (2011a).

5.2. Metodología del proceso

El desarrollo del anteproyecto se estructurará en las siguientes fases:

Figura 4

Metodología del proceso.



Nota: Diagrama de proceso del proyecto en base a las cinco fases establecidas.

Fase 1: Recolección, procesamiento y ajuste matemático de los datos climáticos

El comportamiento térmico de un colector solar depende de manera directa de la disponibilidad real de la energía solar efectivamente disponible en el lugar donde se encuentra instalado. Por esta razón, cualquier modelado térmico que busque representar de manera fiable el comportamiento real del sistema debe partir de una caracterización adecuada del recurso

solar local, descartando el uso de valores generalizados que no representan las condiciones reales del funcionamiento.

En la ciudad de Cuenca, el régimen climático presenta características particulares determinadas por su ubicación geográfica y por la presencia de la cordillera andina. Estas condiciones provocan una elevada variabilidad diaria de la radiación solar, principalmente asociada a la nubosidad, las precipitaciones y cambios atmosféricos frecuentes. Bajo este contexto, resulta fundamental emplear el uso de información climática obtenida a partir del registro de datos reales que permita describir de forma representativa la disponibilidad de energía solar a lo largo del año.

Con el fin de sustentar el desarrollo del modelo térmico, en esta fase se obtienen y procesan datos de irradiancia solar correspondientes al año 2024, los cuales constituyen la base energética empleada en las etapas posteriores del análisis. Los datos fueron obtenidos en la plataforma **NASA POWER Data Access Viewer**, una base de datos satelital ampliamente utilizada y validada en estudios de ingeniería energética y sistemas solares.

Los registros climáticos se descargaron para las coordenadas geográficas de la ciudad de Cuenca (latitud -2.89° , longitud -79.00°) y abarcan un total de **366 valores diarios**, incluyendo el día adicional propio del año bisiesto. Para el análisis se seleccionó la variable **Irradiancia Global Horizontal (GHI)**, debido a que describe la cantidad total de energía solar incidente sobre una superficie horizontal, condición que coincide con la configuración física del colector solar tipo espiral analizado en este trabajo.

1.1 Necesidad del ajuste matemático

Los valores registrados diariamente de la irradiancia solar presentan fluctuaciones significativas asociadas a fenómenos atmosféricos de naturaleza no periódica, como la nubosidad y las precipitaciones. Si bien estos registros describen de manera precisa el comportamiento real del recurso solar, su uso directo dentro de un modelo térmico puede introducir oscilaciones numéricas que dificultan la estabilidad del cálculo y dificultan el análisis del comportamiento global del sistema.

Considerando que el objetivo de este estudio es evaluar el desempeño térmico del colector a escala mensual y anual, resulta conveniente representar la irradiancia mediante una función continua que capture la tendencia estacional del recurso solar, evitando que el modelo se vea influenciado de forma excesiva por variaciones diarias de carácter aleatorio. Este enfoque permite mantener coherencia física en el modelo y es comúnmente empleado en estudios de modelado energético y sistemas solares térmicos.

1.2 Tipo de ajuste aplicado

La variación de la irradiancia solar a lo largo del año presenta un comportamiento cíclico, determinado al movimiento aparente del Sol y a la estacionalidad climática. En zonas intertropicales como Cuenca, esta característica se manifiesta de forma clara en la variación anual de la radiación disponible, aun cuando existan perturbaciones diarias causadas por condiciones atmosféricas locales.

Con base en esta característica, se empleó un ajuste de tipo senoidal aplicado sobre la serie completa de datos diarios de irradiancia. Este tipo de ajuste permite describir de manera continua y suave la variación estacional del recurso solar, manteniendo coherencia con el comportamiento físico esperado del sistema. La expresión general utilizada para el ajuste es:

$$G(t) = a + b \sin\left(\frac{2\pi t}{365} + c\right),$$

donde $G(t)$ representa la irradiancia suavizada, t corresponde al día del año, a define el valor medio anual de irradiancia, b la amplitud de la variación estacional y c es el desfase temporal de la curva.

El ajuste se realizó mediante el método de mínimos cuadrados sobre el conjunto completo de 366 registros diarios. El resultado obtenido presentó un coeficiente de determinación aproximado de $R^2 = 0.90$, lo que indica que la función senoidal explica de forma adecuada la variabilidad anual de la irradiancia solar. Este nivel de ajuste se considera apropiado para su aplicación en modelos térmicos, teniendo en cuenta que una fracción de la variabilidad diaria responde a fenómenos atmosféricos no periódicos.

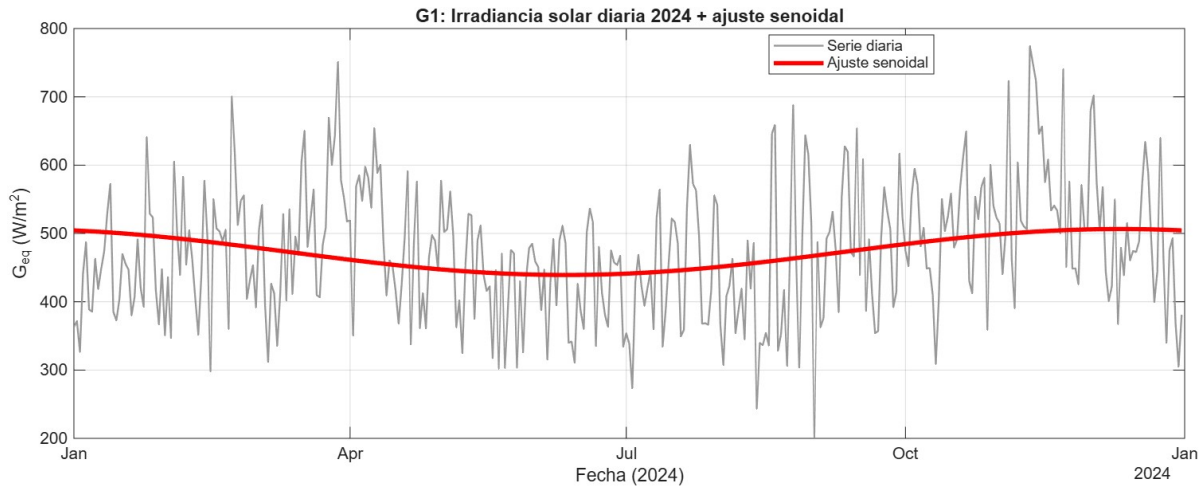


Figura 5

G0: Irradiancia solar diaria del año 2024 obtenida de NASA POWER y ajuste senoidal anual aplicado.

En la Figura 5 se observa que el ajuste reproduce adecuadamente la tendencia estacional de la irradiancia solar, con valores mínimos durante los primeros meses del año y máximos en el periodo comprendido entre agosto y octubre. La curva suavizada obtenida constituye la base energética utilizada para alimentar el modelo térmico del colector.

1.3 Obtención de irradiancia mensual a partir del ajuste

A partir de la función continua de irradiancia obtenida mediante el ajuste senoidal, se calcularon valores promedio mensuales con el fin de facilitar el análisis estacional del comportamiento térmico del colector. Estos valores permiten resumir la variación anual del recurso solar sin perder la coherencia con la función ajustada que describe la irradiancia diaria.

Es importante señalar que los valores mensuales presentados no constituyen la entrada primaria del modelo térmico. La simulación computacional emplea directamente la función de irradiancia ajustada, a partir de la cual se obtienen los promedios mensuales utilizados para evaluar el desempeño del sistema en cada época del año. De esta manera, se garantiza la trazabilidad entre los datos diarios originales, el ajuste matemático y las condiciones climáticas utilizadas en la simulación.

La Tabla 1 resume los valores mensuales de irradiancia solar promedio derivados del ajuste senoidal, los cuales se emplean como referencia climática en el análisis térmico.

Tabla 1

Irradiancia solar mensual promedio en Cuenca, Ecuador, derivada del ajuste senoidal de datos NASA POWER (2024).

Mes	Irradiancia GHI (W/m²)
Enero	437.8
Febrero	484.0
Marzo	500.5
Abril	488.8
Mayo	436.4
Junio	424.8
Julio	445.8
Agosto	432.0
Septiembre	476.9
Octubre	505.9
Noviembre	556.3
Diciembre	488.4

Las variaciones mensuales observadas concuerdan con el comportamiento climático característico de la región interandina, donde los periodos de mayor nubosidad reducen la radiación disponible, mientras que los meses más secos presentan condiciones más favorables para la captación solar.

El procesamiento de los datos climáticos realizado en esta fase permite establecer una base energética coherente para el desarrollo del modelo térmico. La irradiancia ajustada constituye el punto de partida para el análisis de la absorción de energía y de la transferencia de calor en el colector, aspectos que se abordan en las fases siguientes.

Fase 2: Definición de los parámetros físicos, geométricos y ópticos del sistema

Una vez caracterizado el recurso solar disponible en la ciudad de Cuenca, es necesario establecer de manera rigurosa los parámetros físicos, geométricos y ópticos que describen el colector solar tipo espiral y su entorno de operación. Esta fase constituye la base estructural del modelo térmico, ya que define las variables que gobiernan los procesos de absorción de

radiación, transferencia de calor hacia el fluido y pérdidas térmicas hacia el ambiente.

La correcta definición de estos parámetros permite que el modelo matemático represente de forma coherente el comportamiento físico real del sistema, evitando simplificaciones que puedan conducir a sobreestimaciones de la energía útil disponible.

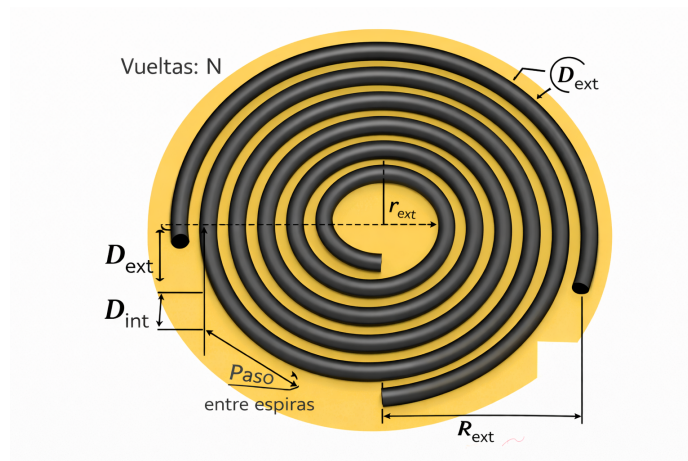
2.1 Parámetros geométricos del colector

El colector solar analizado presenta una configuración tipo espiral formada por un tubo de sección circular dispuesto sobre una superficie plana. Esta disposición geométrica permite concentrar una longitud considerable de conducto dentro de un área limitada, incrementando así la superficie disponible para la captación de radiación solar y el intercambio térmico con el fluido de trabajo.

En la Figura 6 se ilustra el esquema geométrico del sistema, donde se identifican las dimensiones principales consideradas en el modelo: radio interior del espiral (r_{in}), radio exterior (r_{ext}), diámetro exterior del tubo (D_{ext}), diámetro interior (D_{int}), número de vueltas (N) y paso entre espiras consecutivas (p). Estos parámetros definen completamente la geometría física del colector y permiten establecer las magnitudes derivadas que intervienen en el análisis térmico.

Figura 6

Esquema geométrico del colector solar tipo espiral con las dimensiones principales consideradas en el modelo.



Fuente: Elaboración propia.

A partir de estas dimensiones básicas se determinan las magnitudes geométricas que participan directamente en el balance energético del sistema.

La longitud total del tubo L se obtiene mediante la parametrización matemática de la espiral en función del número de vueltas y del rango radial comprendido entre r_{in} y r_{ext} . Esta longitud define el desarrollo real del conducto y condiciona tanto el área de captación como el tiempo de residencia del fluido.

La superficie externa del tubo, responsable de la absorción de radiación solar y de las pérdidas térmicas hacia el entorno, se expresa como:

$$A_{sup} = \pi D_{ext} L \quad (1)$$

De manera análoga, el área interna de intercambio térmico entre el fluido y la pared del tubo viene dada por:

$$A_{int} = \pi D_{int} L \quad (2)$$

Esta superficie es la que interviene en la determinación del coeficiente convectivo interno y en el cálculo del calor transferido al agua.

Por otra parte, el área geométrica de apertura del colector, es decir, el área proyectada total del espiral sobre el plano horizontal, se define como:

$$A_{ap} = \pi (r_{ext}^2 - r_{in}^2) \quad (3)$$

Sin embargo, el área de apertura no coincide necesariamente con el área efectiva de captación solar. Debido a la disposición helicoidal del tubo, pueden presentarse zonas de solape entre espiras y porciones del área proyectada que no interceptan completamente la radiación incidente. Para considerar este efecto geométrico se introduce el factor de cobertura ϕ_{cob} , definido como la relación entre el área proyectada real del tubo expuesta a la radiación y el área total de apertura.

De esta manera, el área efectiva de captación solar utilizada en el modelo energético queda expresada como:

$$A_{ef} = \phi_{cob} A_{ap} \quad (4)$$

Esta formulación garantiza coherencia entre la geometría física del colector y el cálculo de la potencia solar incidente absorbida por el sistema J. A. Duffie y Beckman (2013b).

Adicionalmente, la geometría espiral influye en el comportamiento hidrodinámico del

flujo interno. La curvatura del conducto induce efectos secundarios en el perfil de velocidad que modifican el número de Nusselt respecto al caso de un tubo recto equivalente. En consecuencia, la caracterización geométrica no solo define superficies de intercambio, sino que incide directamente en la evaluación del coeficiente convectivo interno empleado en el modelo térmico Incropera, DeWitt, Bergman, y Lavine (2011b).

2.2 Propiedades del material del tubo

El material del tubo absorbedor condiciona el mecanismo de conducción térmica desde la superficie externa expuesta a la radiación hasta el fluido interno. En el modelo se consideran explícitamente la conductividad térmica del material (k), la emisividad superficial (ε) y el espesor del tubo.

Estas propiedades determinan la resistencia térmica por conducción en la pared y afectan tanto la transferencia útil hacia el fluido como las pérdidas térmicas hacia el ambiente. Con el objetivo de analizar su influencia, el modelo permite evaluar distintos materiales manteniendo constante la geometría, lo que posibilita una comparación objetiva bajo las mismas condiciones climáticas y operativas.

2.3 Parámetros ópticos y energía absorbida

La energía solar absorbida por el tubo depende no solo de la irradiancia incidente G , sino también de las propiedades ópticas de las superficies involucradas. Considerando la presencia de una cubierta de vidrio, la potencia solar absorbida por el tubo se expresa como:

$$Q_{abs} = G A_{ef} \tau_v \alpha_t \eta_{opt} \quad (5)$$

donde τ_v es la transmitancia del vidrio, α_t la absorptividad del tubo y η_{opt} un factor global que incorpora pérdidas ópticas asociadas a ensuciamiento y reflexiones no ideales.

Esta formulación evita asumir una absorción perfecta y permite aproximar el comportamiento real del sistema, tal como se recomienda en el análisis energético de colectores solares térmicos Kalogirou (2014).

2.4 Condiciones ambientales y del fluido

Las pérdidas térmicas hacia el ambiente dependen de variables climáticas como la temperatura ambiente, la velocidad del viento y la presión atmosférica. Estas condiciones influyen

en los coeficientes de convección externa y en los intercambios radiativos con el entorno.

Por otra parte, el fluido de trabajo se caracteriza mediante propiedades termofísicas dependientes de la temperatura, tales como densidad, viscosidad, conductividad térmica y calor específico. Asimismo, se establecen como condiciones de operación la temperatura de entrada del agua y el caudal volumétrico, parámetros que determinan el régimen de flujo y la capacidad de transporte de energía térmica del sistema.

La definición integral de los parámetros geométricos, ópticos, físicos y ambientales permite cerrar el conjunto de variables necesarias para el desarrollo del modelo térmico presentado en la fase siguiente.

Fase 3: Modelado matemático del colector solar tipo espiral con cubierta de vidrio

En esta fase se desarrolla el modelo matemático que describe el comportamiento térmico de un colector solar tipo espiral provisto de una cubierta de vidrio tipo placa. El planteamiento se fundamenta en la Primera Ley de la Termodinámica y en los mecanismos clásicos de transferencia de calor por conducción, convección y radiación. El objetivo es cuantificar la energía solar absorbida por el sistema, las pérdidas térmicas hacia el ambiente y el calor útil transferido al agua, permitiendo finalmente estimar la temperatura de salida del fluido y la eficiencia térmica del colector.

El modelo se plantea bajo un régimen cuasiestacionario y se estructura de manera secuencial, iniciando con el balance energético global del colector, seguido por la definición de la potencia absorbida, las pérdidas térmicas y el calor útil entregado al fluido.

3.1 Balance energético global del colector

El comportamiento térmico del colector se rige por el principio de conservación de la energía. Bajo condiciones cuasiestacionarias, la potencia solar total absorbida por el sistema se reparte entre el calor útil transferido al agua y las pérdidas térmicas hacia el ambiente. Esta relación se expresa mediante el siguiente balance energético global:

$$\dot{Q}_{\text{abs}} = \dot{Q}_u + \dot{Q}_p \quad (6)$$

donde \dot{Q}_{abs} representa la potencia solar absorbida total por el sistema (tubo y vidrio), \dot{Q}_u es la potencia térmica útil transferida al agua y \dot{Q}_p corresponde a la potencia térmica

el vidrio, donde una fracción es transmitida y otra absorbida. Posteriormente, la fracción transmitida alcanza el tubo absorbedor.

La potencia absorbida por el tubo se expresa directamente como:

$$\dot{Q}_{\text{abs,t}} = G A_{ef} \tau_g \alpha_t \eta_{\text{opt}} \quad (8)$$

donde τ_g es la transmitancia del vidrio, α_t la absorptancia del tubo y η_{opt} un factor global que representa pérdidas ópticas adicionales.

De manera independiente, la potencia absorbida por el vidrio se modela como:

$$\dot{Q}_{\text{abs,g}} = G A_{ef} \alpha_g \quad (9)$$

siendo α_g la absorptancia del vidrio.

Finalmente, la potencia total absorbida por el sistema se obtiene como:

$$\dot{Q}_{\text{abs}} = \dot{Q}_{\text{abs,t}} + \dot{Q}_{\text{abs,g}} \quad (10)$$

Esta formulación permite diferenciar explícitamente la energía absorbida por cada elemento del sistema, manteniendo coherencia física con el proceso de interacción radiativa en colectores solares con cubierta transparente.

3.3 Modelado de las pérdidas térmicas hacia el ambiente

En un colector cubierto, las pérdidas térmicas hacia el ambiente se producen principalmente desde la superficie externa del vidrio, por convección con el aire ambiente y por radiación térmica hacia el cielo. Por esta razón, el vidrio se considera la frontera final de disipación energética del sistema.

La pérdida por convección externa se expresa mediante la ley de enfriamiento de Newton:

$$\dot{Q}_{\text{conv,ext}} = h_{\text{ext}} A_g (T_g - T_{\text{amb}}) \quad (11)$$

donde h_{ext} es el coeficiente convectivo externo, A_g es el área del vidrio, T_g la temperatura del vidrio y T_{amb} la temperatura ambiente. Para convección forzada por viento, el coeficiente h_{ext} puede aproximarse mediante correlaciones empíricas ampliamente aceptadas.

La pérdida radiativa del vidrio hacia el cielo se modela utilizando la ley de Stefan-Boltzmann:

$$\dot{Q}_{\text{rad,ext}} = \varepsilon_g \sigma A_g (T_g^4 - T_{\text{sky}}^4) \quad (12)$$

donde ε_g es la emisividad del vidrio, σ es la constante de Stefan–Boltzmann y T_{sky} representa la temperatura radiativa efectiva del cielo.

Las pérdidas térmicas totales al ambiente se obtienen como la suma de ambos mecanismos:

$$\dot{Q}_p = \dot{Q}_{\text{conv,ext}} + \dot{Q}_{\text{rad,ext}} \quad (13)$$

3.4 Calor útil transferido al agua

El calor útil corresponde a la energía transferida desde el tubo absorbedor hacia el agua que circula por el interior del conducto. Desde el punto de vista del fluido, el calor útil se define a partir de la Primera Ley de la Termodinámica como:

$$\dot{Q}_u = \dot{m} c_p (T_{\text{sal}} - T_{\text{ent}}) \quad (14)$$

donde \dot{m} es el flujo másico del agua, c_p su calor específico, T_{ent} la temperatura de entrada y T_{sal} la temperatura de salida.

Desde el punto de vista de la transferencia de calor, el mismo término puede expresarse mediante un modelo de resistencias térmicas entre el tubo y el agua. La resistencia por conducción a través de la pared del tubo se define como:

$$R_{\text{cond}} = \frac{\ln(D_{\text{ext}}/D_{\text{int}})}{2\pi k_t L} \quad (15)$$

mientras que la resistencia por convección interna es:

$$R_{\text{conv,int}} = \frac{1}{h_i A_{\text{int}}} \quad (16)$$

donde h_i es el coeficiente convectivo interno, calculado a partir del número de Nusselt, y A_{int} es el área interna del tubo.

La resistencia térmica total entre el tubo y el agua resulta:

$$R_{t \rightarrow w} = R_{\text{cond}} + R_{\text{conv,int}} \quad (17)$$

y permite expresar el calor útil como:

$$\dot{Q}_u = \frac{T_t - T_m}{R_{t \rightarrow w}} \quad (18)$$

donde T_t es la temperatura de la superficie del tubo y T_m es la temperatura media del agua en el colector.

3.5 Eficiencia térmica del colector

Finalmente, la eficiencia térmica del colector se define como la fracción de la potencia solar incidente que se convierte en calor útil transferido al agua:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{G A_{\text{eff}}} \quad (19)$$

Esta magnitud permite evaluar el desempeño térmico del colector bajo distintas condiciones geométricas, climáticas y operativas, y constituye uno de los principales indicadores de rendimiento en sistemas solares térmicos.

Fase 4: Simulación computacional del modelo térmico del colector solar

Una vez establecido el modelo matemático del colector solar tipo espiral con cubierta de vidrio, se procede a su resolución numérica mediante simulación computacional. El objetivo de esta fase es implementar las ecuaciones desarrolladas en la Fase 3 bajo condiciones climáticas representativas de la ciudad de Cuenca, obteniendo las variables térmicas de interés sin introducir nuevas formulaciones físicas.

4.1 Hipótesis y enfoque de simulación

La simulación se desarrolla bajo un enfoque cuasiestacionario mensual. Se asume que, para cada mes del año, las condiciones climáticas medias pueden considerarse constantes, lo que permite adoptar estado estacionario térmico en cada caso. Matemáticamente, esta hipótesis implica:

$$\frac{dT}{dt} = 0 \quad (20)$$

De esta manera, el balance energético global del colector se resuelve como un sistema algebraico no lineal acoplado, en el cual intervienen las temperaturas características del sistema (tubo, vidrio y fluido).

Fase 5: Propuesta de un sistema de control ON-OFF

5.1 Introducción al control térmico del colector solar espiral

El comportamiento térmico de un colector solar depende de manera directa de la variación horaria de la irradiancia, del caudal del fluido y de las pérdidas por convección y radiación hacia el ambiente. Debido a esta naturaleza altamente dinámica, la implementación de un sistema de control resulta esencial para garantizar que la temperatura del volumen del agua dentro del colector permanezca dentro de un rango adecuado para su uso doméstico. En sistemas solares de baja entalpía, donde la temperatura del fluido depende exclusivamente del aporte solar, los controladores ON-OFF con banda de histéresis se han consolidado como soluciones simples, económicas y suficientemente robustas frente a la variabilidad ambiental Barajas, Muñoz, y Reyes (2023); Kalogirou (2004a); Nirmal, Surya, y Jaya (2020).

En el caso particular del colector solar tipo espiral analizado en este estudio el control térmico debe, asegurar que la temperatura del agua se mantenga dentro de un intervalo seguro y confortable, definido entre 26 °C y 36 °C, valores coherentes con criterios fisiológicos y normativos para agua sanitaria Berglund y Gonzalez (1978); Group (2023); Services (2022).

Los controladores ON-OFF con histéresis son especialmente adecuados para este tipo de colectores debido a su baja demanda computacional, su estabilidad ante perturbaciones y su facilidad de implementación física mediante válvulas motorizadas o electroválvulas proporcionalmente accionadas. La histéresis cumple el rol de evitar conmutaciones rápidas del actuador, prolongando su vida útil y estabilizando la dinámica térmica del sistema Hoyos Velasco, Hoyos Velasco, y Candelo-Becerra (2021).

En este proyecto se propone un esquema de control ON-OFF modificado con dos niveles de caudal: *bajo caudal* para maximizar el tiempo de residencia del fluido cuando la temperatura está por debajo del rango deseado, y *alto caudal* cuando la temperatura alcanza o supera el límite superior del intervalo térmico. Este enfoque permite que el colector aproveche al máximo la radiación solar disponible durante el día, manteniendo la temperatura del fluido dentro de un rango útil sin requerir un mezclador externo o un sistema de almacenamiento térmico.

5.2 Modelo dinámico del colector solar y obtención de la función de transferencia

Para el diseño del sistema de control es necesario disponer de un modelo dinámico que represente adecuadamente el comportamiento térmico del colector solar tipo espiral. Dado que el proceso de transferencia de calor en este tipo de sistemas se rige por un balance energético de primer principio, el modelo puede formularse mediante una ecuación diferencial ordinaria no lineal, donde intervienen el aporte solar, las pérdidas térmicas y el transporte de energía asociado al flujo del fluido caloportador J. A. Duffie y Beckman (2013b); Kalogirou (2009).

Considerando un volumen de control equivalente que representa la masa de agua contenida en el colector, el balance energético se expresa como:

$$C_{eq} \frac{dT_w(t)}{dt} = Q_{abs}(t) - K_L(T_w(t) - T_{amb}(t)) - \dot{m}(t)c_p(T_w(t) - T_{in}(t)) \quad (21)$$

donde $T_w(t)$ es la temperatura media del agua en el colector, $T_{amb}(t)$ la temperatura ambiente, $T_{in}(t)$ la temperatura de entrada del fluido, $\dot{m}(t)$ el flujo másico, c_p el calor específico del agua, K_L el coeficiente global de pérdidas térmicas y C_{eq} la capacitancia térmica equivalente del sistema. El término $Q_{abs}(t)$ representa la potencia térmica absorbida por el colector, proporcional a la irradiancia solar incidente J. A. Duffie y Beckman (2013b).

La ecuación (21) evidencia el carácter no lineal del sistema, debido principalmente al producto entre el flujo másico y la diferencia de temperaturas del fluido, así como a la dependencia temporal de las perturbaciones ambientales. Este tipo de comportamiento es característico de los sistemas solares térmicos de baja entalpía Kalogirou (2009).

5.2.1. Linealización alrededor del punto de operación

Con el objetivo de analizar la dinámica del sistema y facilitar el diseño del controlador, la ecuación no lineal se linealiza alrededor de un punto de operación estacionario definido por $(T_{w0}, \dot{m}_0, T_{in0}, T_{amb0}, Q_{abs0})$. Para ello, se introducen variables de pequeña señal del tipo:

$$T_w(t) = T_{w0} + \theta(t), \quad \dot{m}(t) = \dot{m}_0 + \Delta\dot{m}(t) \quad (22)$$

Despreciando los productos de perturbaciones de segundo orden y asumiendo constantes las variables ambientales durante el intervalo de análisis, se obtiene la ecuación linealizada:

$$C_{eq} \frac{d\theta(t)}{dt} = -(K_L + \dot{m}_0 c_p)\theta(t) - c_p(T_{w0} - T_{in0})\Delta\dot{m}(t) \quad (23)$$

Esta expresión muestra que la dinámica térmica del colector puede aproximarse mediante un sistema lineal de primer orden, donde el flujo másico actúa como variable manipulada y la temperatura del agua como variable controlada, resultado consistente con modelos reportados en la literatura para colectores solares de agua Bejan (2013); Kalogirou (2009).

5.2.2. Función de transferencia del sistema

Aplicando transformada de Laplace a la ecuación (23), bajo condiciones iniciales nulas, se obtiene la función de transferencia entre la variación del flujo másico y la variación de la temperatura del agua:

$$\frac{\Theta(s)}{\Delta\dot{m}(s)} = \frac{-c_p(T_{w0} - T_{in0})}{C_{eq}s + (K_L + \dot{m}_0 c_p)} \quad (24)$$

La función de transferencia resultante corresponde a un sistema estable de primer orden, con una constante de tiempo directamente relacionada con la capacitancia térmica y las pérdidas globales del colector. El signo negativo indica que un incremento en el caudal produce una disminución de la temperatura del fluido, debido al aumento en el transporte de energía térmica hacia la salida del sistema.

5.2.3. Validación del modelo lineal

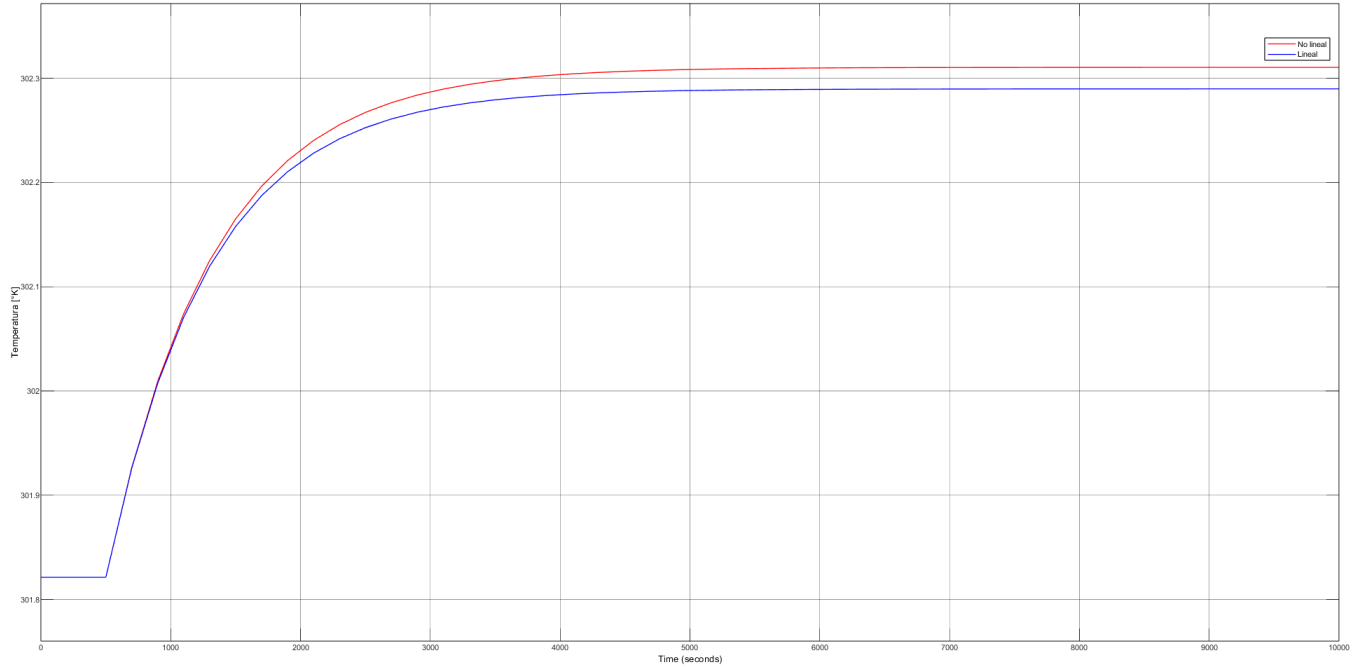
Para verificar la validez de la aproximación lineal obtenida, la respuesta del modelo lineal fue comparada con la del modelo no lineal original mediante simulaciones realizadas en *Simulink*. Ante perturbaciones moderadas del flujo másico alrededor del punto de operación, ambos modelos presentan respuestas muy similares, especialmente en el régimen transitorio cercano al equilibrio térmico.

Como se muestra en la Figura 8, la comparación directa entre la respuesta del modelo no lineal y la del modelo linealizado evidencia una alta coincidencia entre ambas dinámicas en el entorno de operación considerado. Esta similitud se mantiene tanto durante la fase transitoria como en el régimen estacionario, lo que indica que los efectos no lineales del sistema son poco dominantes dentro del rango de operación analizado.

Esta concordancia confirma que la función de transferencia obtenida representa de forma adecuada la dinámica dominante del colector solar tipo espiral en el entorno del punto de operación seleccionado, por lo que resulta apropiada para el análisis y diseño del sistema de control ON-OFF con histéresis desarrollado en las secciones siguientes Franklin, Powell, y Emami-Naeini (2015); Ogata (2010).

Figura 8

Validación del modelo lineal del colector solar tipo espiral.



Nota: Comparación entre la respuesta del modelo no lineal y el modelo linealizado del colector solar tipo espiral ante perturbaciones del flujo másico alrededor del punto de operación.

5.3. Diseño del control ON–OFF con histéresis

El objetivo del sistema de control es regular la temperatura promedio del agua que circula dentro del colector solar, denotada como $T_w(t)$. Es importante enfatizar que la variable controlada no corresponde a la temperatura instantánea de salida, sino a la temperatura media del volumen de agua contenido en el colector, la cual representa el estado térmico global del sistema según el modelo dinámico planteado en la Sección 5.2.

Dado que el comportamiento térmico del colector es lento, estable y dominado por una dinámica de primer orden, se adopta un esquema de control ON–OFF con banda de histéresis. Este tipo de controlador resulta adecuado para sistemas térmicos debido a su simplicidad de implementación, robustez frente a perturbaciones ambientales y bajo requerimiento computacional Åström y Murray (2010); Franklin y cols. (2015); Ogata (2010).

5.3.1. Definición de la banda de histéresis

Se establece una referencia térmica $T_{w,ref}$ y una banda de histéresis H alrededor de dicha referencia. A partir de esta definición se determinan los umbrales superior e inferior como:

$$T_H = T_{w,ref} + \frac{H}{2} \quad T_L = T_{w,ref} - \frac{H}{2} \quad (25)$$

donde T_H representa el límite superior permitido y T_L el límite inferior. La presencia de esta banda evita conmutaciones rápidas del actuador cuando la temperatura oscila alrededor del punto de operación, fenómeno conocido como *chattering* Åström y Murray (2010).

5.3.2. Ley de conmutación

La señal de control $u(t)$ gobierna el nivel de caudal aplicado al sistema. En la implementación realizada, el caudal conmuta entre dos niveles:

$$\dot{m}(t) = \begin{cases} \dot{m}_{max}, & T_w(t) \geq T_H \\ 0, & T_w(t) \leq T_L \\ \dot{m}(t^-), & T_L < T_w(t) < T_H \end{cases} \quad (26)$$

donde \dot{m}_{max} corresponde al caudal máximo permitido por la válvula y $\dot{m}(t^-)$ indica el estado previo del actuador, lo cual introduce memoria en el sistema.

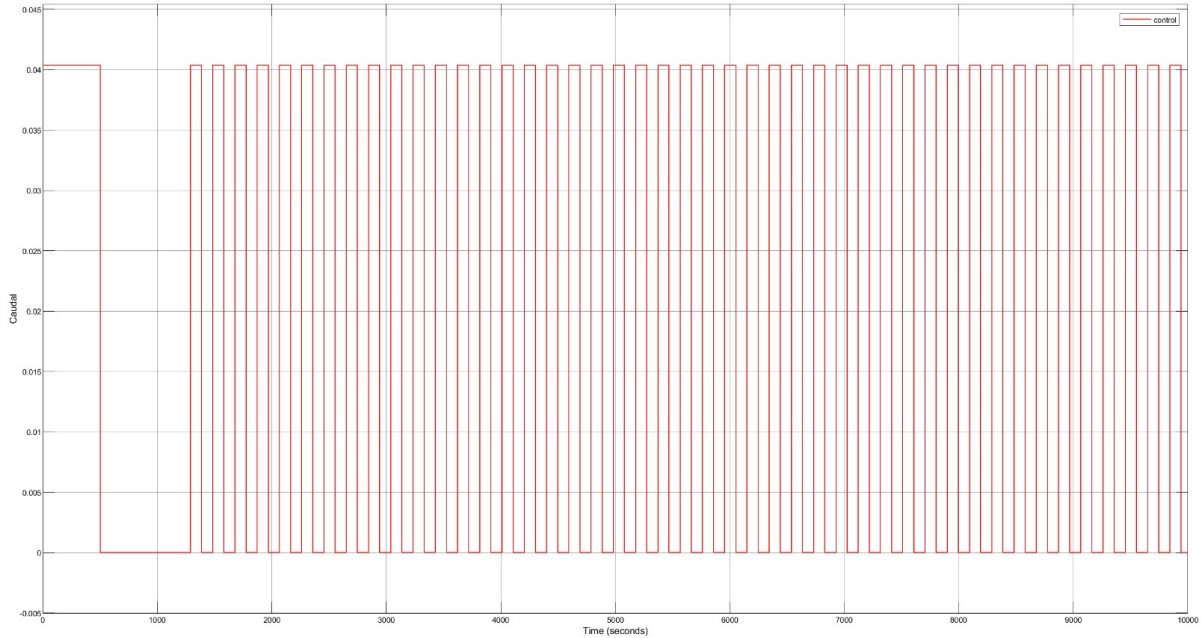
Físicamente, cuando la temperatura promedio del agua dentro del colector supera el límite superior T_H , el controlador activa el flujo máximo para extraer energía térmica y limitar el incremento de temperatura. Por el contrario, cuando T_w desciende por debajo del límite inferior T_L , el flujo se reduce, aumentando el tiempo de residencia del fluido dentro del colector y favoreciendo el calentamiento por absorción solar.

5.3.3. Comportamiento de la señal de caudal

La Figura 9 muestra la señal de caudal generada por el controlador. Se observa claramente la conmutación entre el nivel nulo y el nivel máximo \dot{m}_{max} , característica típica de los sistemas tipo *relay*. La frecuencia de conmutación está directamente relacionada con la dinámica térmica del colector y con el ancho de la banda de histéresis.

Figura 9

Señal de caudal generada por el controlador ON-OFF con histéresis.



Nota: Conmutación del caudal entre 0 y \dot{m}_{max} como resultado de la lógica de histéresis aplicada sobre la temperatura promedio $T_w(t)$.

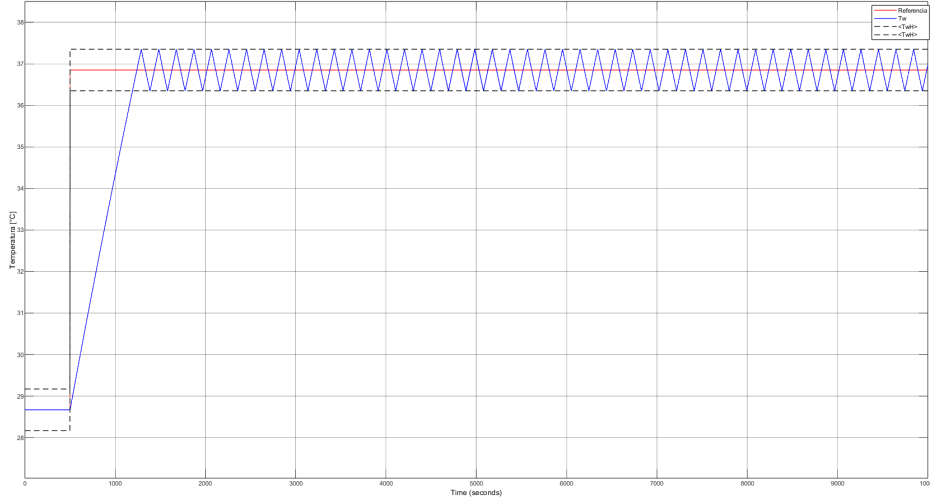
5.3.4. Respuesta térmica del sistema controlado

La Figura 10 presenta la evolución de la temperatura promedio del agua dentro del colector bajo la acción del controlador. Tras el régimen transitorio inicial, $T_w(t)$ oscila de manera acotada dentro de la banda definida por T_L y T_H .

Este comportamiento oscilatorio es inherente a los controladores ON-OFF con histéresis y representa un compromiso entre simplicidad estructural y estabilidad térmica. La amplitud de las oscilaciones depende del ancho de la banda y de la constante de tiempo térmica del colector Åström y Murray (2010); Franklin y cols. (2015).

Figura 10

Regulación de la temperatura promedio $T_w(t)$ dentro de la banda de histéresis.



Nota: Evolución temporal de $T_w(t)$ mostrando oscilaciones acotadas entre los límites superior T_H e inferior T_L .

6. Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de la simulación mensual del colector solar tipo espiral con cubierta de vidrio, desarrollada sobre la base del modelo matemático formulado en la Fase 3 e implementado computacionalmente en la Fase 4. Los datos climáticos utilizados corresponden a irradiancia solar, temperatura ambiente y velocidad del viento para la ciudad de Cuenca, obtenidos de la base NASA POWER (2024), reconocida por su consistencia y aplicabilidad en estudios energéticos Stackhouse y Westberg (2020).

Las simulaciones se realizaron considerando como caso base un caudal volumétrico constante de 165.4 L/h (equivalente a $4.59 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$) y un colector conformado por 36 vueltas del espiral. Estos parámetros se mantuvieron constantes en todos los análisis mensuales, excepto en los estudios paramétricos donde se evaluó explícitamente la influencia del caudal o del número de vueltas.

Condiciones generales de simulación

La Tabla 2 resume los parámetros que permanecieron constantes en los análisis presentados en las Figuras G2–G7.

Tabla 2

Parámetros generales mantenidos constantes en las simulaciones.

Parámetro	Valor	Unidad
Caudal volumétrico base	165.4	L/h
Número de vueltas	36	–
Diámetro exterior del tubo	0.020	m
Diámetro interior del tubo	0.016	m
Espesor del vidrio	0.003	m
Transmitancia del vidrio (τ_g)	0.95	–
Absortancia del tubo (α_t)	0.98	–
Factor óptico global (η_{opt})	0.99	–
Temperatura de entrada del agua	17.6	°C
Presión atmosférica	74600	Pa

6.1. G1: Irradiancia solar diaria y ajuste senoidal

La irradiancia solar diaria correspondiente al año 2024 presenta variaciones asociadas a la dinámica atmosférica propia de la región andina. Para representar la tendencia estacional dominante se aplicó un ajuste senoidal a los datos diarios.

La Figura 11 muestra que el ajuste reproduce adecuadamente el comportamiento anual de la radiación solar, identificándose máximos relativos durante los meses de mayor disponibilidad energética y mínimos en los periodos de menor insolación. Este comportamiento es coherente con patrones reportados para regiones ecuatoriales de altitud media J. Duffie y Beckman (2013).

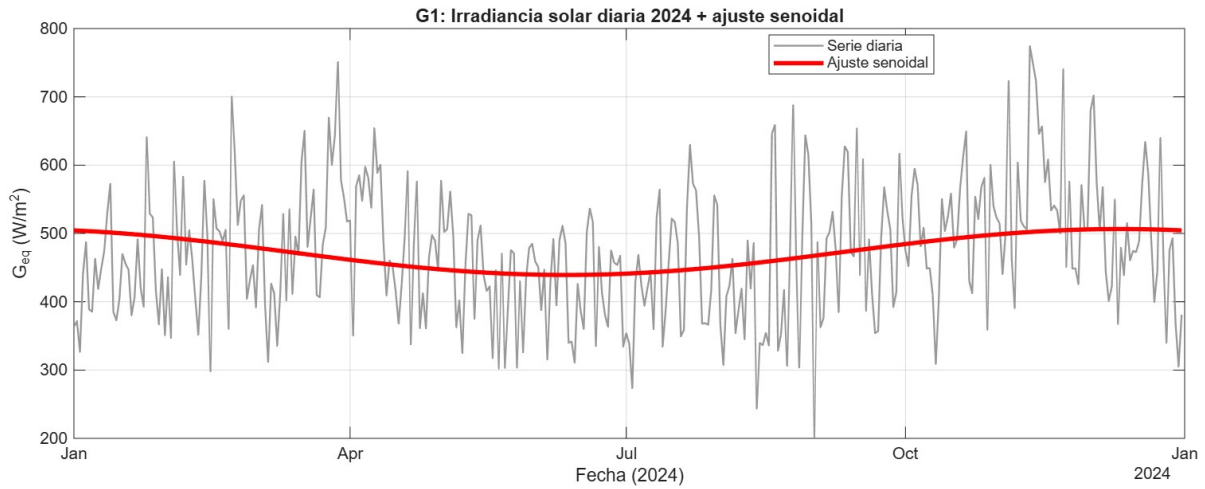


Figura 11

G1: Irradiancia solar diaria 2024 y ajuste senoidal.

6.2. G2: Temperatura superficial del tubo

La temperatura superficial del tubo se obtiene resolviendo el balance energético global planteado en la Fase 3, donde la potencia solar absorbida por el tubo se equilibra con las pérdidas térmicas hacia el vidrio y el ambiente, así como con el calor transferido al fluido.

Como se observa en la Figura 12, la temperatura del tubo permanece por encima de la temperatura ambiente durante todo el año, confirmando la absorción efectiva de radiación solar. El PEAD presenta valores ligeramente superiores al aluminio, debido a su menor conductividad térmica, que incrementa la resistencia a la conducción interna Incropera, DeWitt, Bergman, y Lavine (2011a).

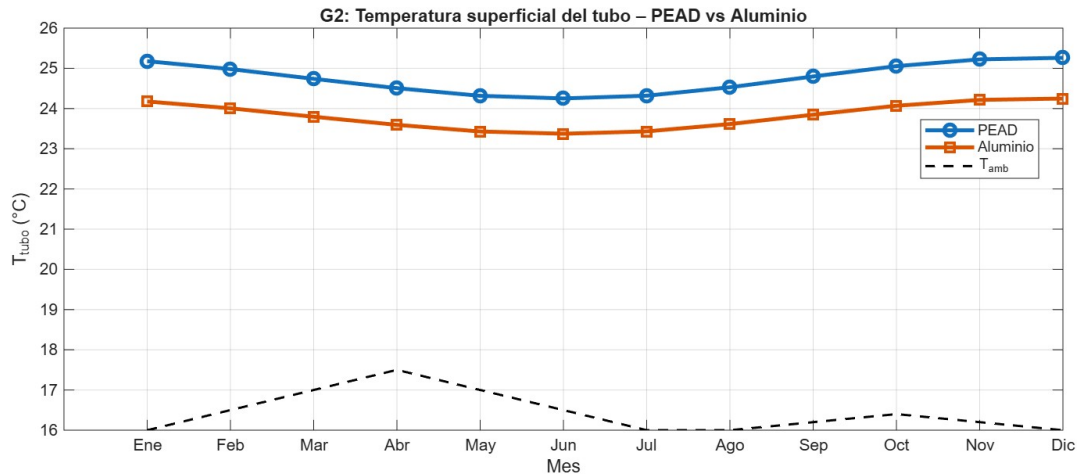


Figura 12

G2: Temperatura superficial del tubo – PEAD vs aluminio.

6.3. G3: Temperatura de salida del agua

La temperatura de salida resulta del acoplamiento entre la potencia útil transferida al fluido y el caudal de operación, de acuerdo con el balance energético del colector.

La Figura 13 muestra que la temperatura de salida se mantiene por encima de 28 °C durante la mayor parte del año, alcanzando valores cercanos a 30 °C en meses de mayor irradiancia. Las diferencias entre materiales son moderadas.

Esta variación limitada indica que el sistema se encuentra parcialmente condicionado por pérdidas térmicas externas dominantes, principalmente las asociadas a la convección y radiación desde el vidrio hacia el ambiente. En estas condiciones, la influencia de la conductividad del tubo se ve atenuada por el conjunto de resistencias térmicas externas Cengel y Ghajar (2011).

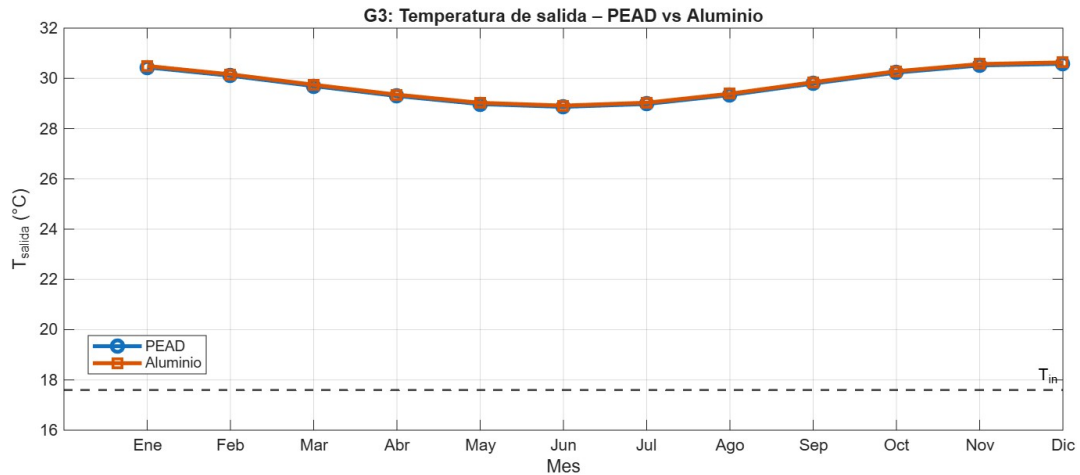


Figura 13

G3: Temperatura de salida del agua – PEAD vs aluminio.

6.4. G4: Potencia térmica útil transferida al fluido

La potencia térmica útil transferida al agua se calcula a partir del incremento energético del fluido según el balance desarrollado en la Fase 3.

En la Figura 14 se observa una dependencia estacional clara, con valores máximos en los meses de mayor irradiancia. Las diferencias entre materiales resultan relativamente pequeñas, lo que confirma que el recurso solar disponible y el caudal de operación constituyen los factores predominantes en el desempeño energético del sistema.

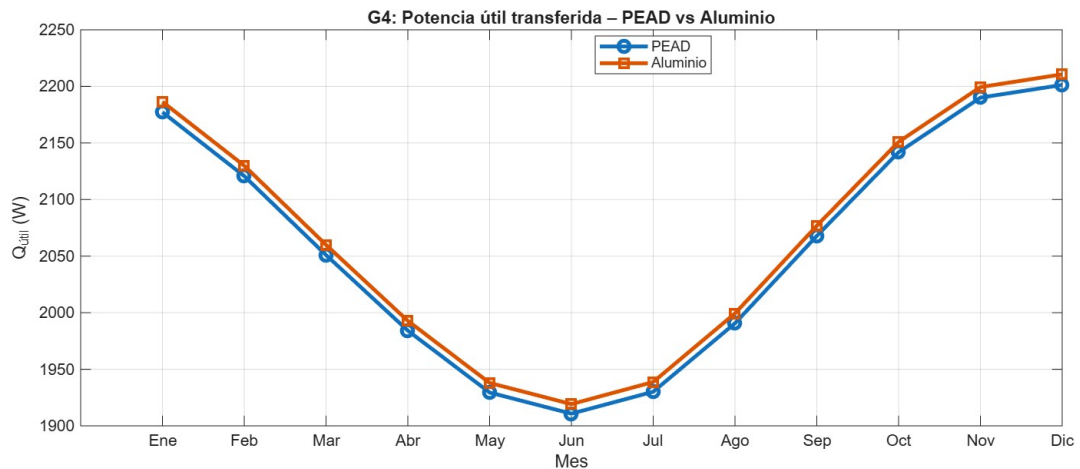


Figura 14

G4: Potencia térmica útil – PEAD vs aluminio.

6.5. G5: Eficiencia térmica del colector

La eficiencia térmica expresa la fracción de la energía solar incidente que es transformada en energía útil para el calentamiento del agua.

La Figura 15 muestra un comportamiento relativamente estable a lo largo del año. Este resultado es consistente con el modelo matemático planteado y con el comportamiento típico de colectores solares de baja temperatura con cubierta transparente J. Duffie y Beckman (2013).

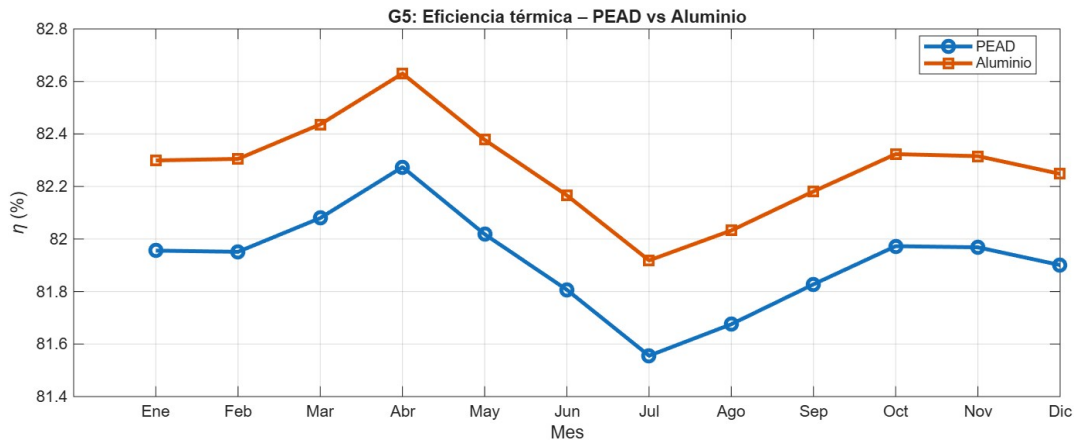


Figura 15

G5: Eficiencia térmica mensual.

6.6. G6: Influencia del caudal y número de vueltas (mes de baja irradiancia)

La Figura 16 muestra la variación de la temperatura del volumen de agua dentro del colector en función del caudal y del número de vueltas del espiral para un mes representativo de menor irradiancia.

Se observa que un incremento en el número de vueltas aumenta la temperatura del agua que está dentro del colector debido al mayor tiempo de residencia y superficie de intercambio térmico. En contraste, el aumento del caudal reduce la temperatura de salida al disminuir el tiempo de permanencia del fluido en el colector.

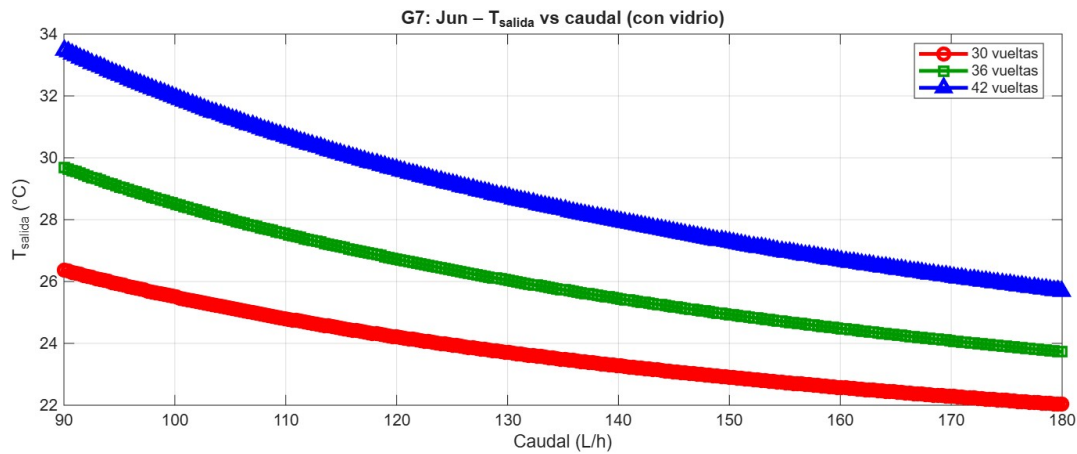


Figura 16

G6: Mes de baja irradiancia – T_{salida} vs caudal y número de vueltas.

6.7. G7: Influencia del caudal y número de vueltas (mes de alta irradiancia)

La Figura 17 presenta el mismo análisis para un mes de alta irradiancia.

Si bien los valores absolutos de temperatura son superiores respecto al mes de baja radiación, la tendencia funcional respecto al caudal y número de vueltas se mantiene. Esto confirma la coherencia física del modelo y evidencia que la irradiancia modifica el nivel energético disponible, pero no la dinámica térmica fundamental del sistema.

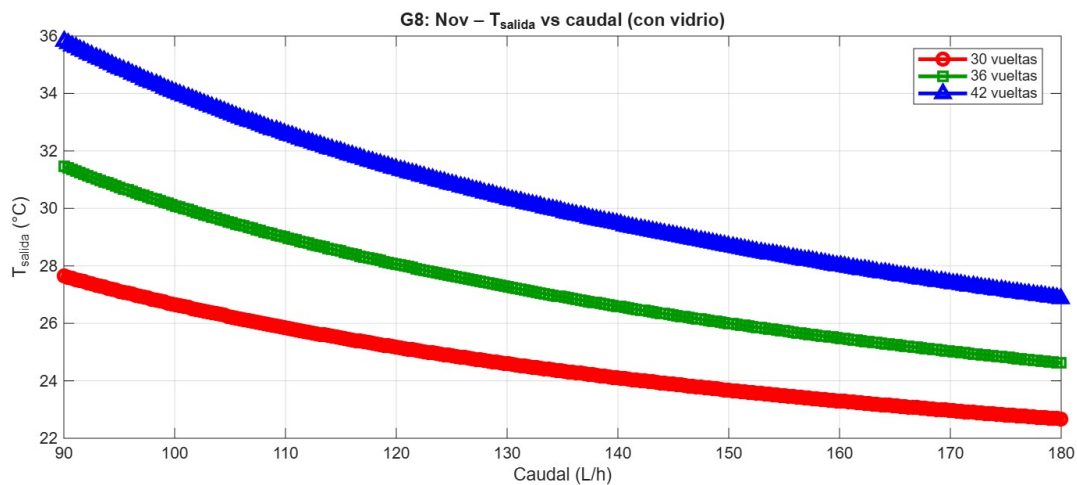


Figura 17

G7: Mes de alta irradiancia – T_{salida} vs caudal y número de vueltas.

6.8. Resultados del control ON–OFF con histéresis

Con el objetivo de regular la temperatura promedio del agua dentro del colector solar tipo espiral, se implementó un controlador ON–OFF con banda de histéresis actuando sobre el caudal del sistema. La variable controlada fue la temperatura media del volumen de agua contenido en el colector, denotada como $T_w(t)$.

La simulación mostró que, tras el régimen transitorio inicial, el sistema logra mantener $T_w(t)$ dentro de la banda de histéresis definida alrededor de la referencia térmica establecida. La temperatura presenta oscilaciones periódicas acotadas entre los límites superior T_H e inferior T_L , comportamiento característico de los sistemas tipo *relay* en procesos térmicos.

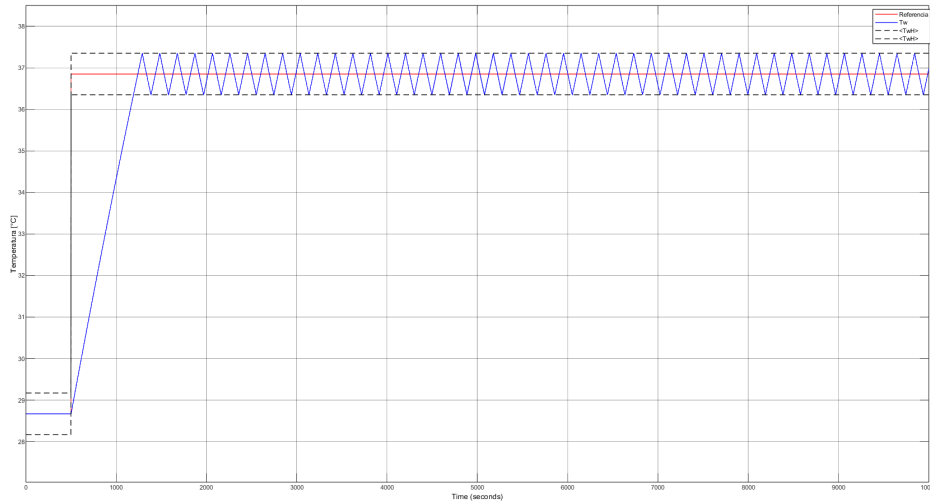
Se observó que:

- La temperatura promedio $T_w(t)$ permanece dentro del intervalo de seguridad establecido (26–36 °C).
- No se presentan sobreimpulsos térmicos significativos fuera de la banda.
- La frecuencia de conmutación del actuador es estable y coherente con la constante de tiempo térmica del colector.
- El sistema alcanza régimen permanente sin inestabilidades ni divergencias.

La señal de caudal generada por el controlador conmuta entre el nivel nulo y el nivel máximo permitido por la válvula, evidenciando un patrón periódico estable. Este comportamiento confirma que la estrategia ON–OFF con histéresis resulta suficiente para regular la dinámica térmica del colector sin requerir controladores de mayor complejidad.

Figura 18

Regulación de la temperatura promedio del agua dentro del colector solar.



Nota: Evolución de la temperatura promedio $T_w(t)$ mostrando oscilaciones acotadas dentro de la banda de histéresis establecida.

Síntesis de resultados

Los resultados obtenidos evidencian que la irradiancia solar constituye el factor dominante en la variabilidad estacional del colector. La geometría del espiral influye directamente en la temperatura de salida del agua, mientras que el material del tubo presenta un efecto secundario debido a la presencia de pérdidas térmicas externas asociadas al vidrio y al ambiente.

El comportamiento observado es consistente con la formulación matemática desarrollada y con los principios clásicos de transferencia de calor en sistemas solares térmicos.

El control ON-OFF con histéresis permitió mantener la temperatura promedio del agua dentro del colector solar tipo espiral (T_w) dentro del rango térmico establecido, evidenciando un comportamiento estable y coherente con la dinámica del sistema.

7. Cronograma y actividades

El trabajo de titulación contempla un tiempo de 240 horas en el caso de Ajuste y 400 horas para Rediseño tiempo en el cual se deberán realizar todas las actividades.

Tabla 3

Cronograma de actividades.

CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES																			
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	ACTIVIDADES	MES 1				MES 2				MES 3				MES 4				HORAS	
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4		
Desarrollar un modelo matemático que permita analizar el comportamiento térmico de un colector solar de geometría espiral, considerando los principales parámetros del sistema, y utilizar dicho modelo para evaluar su eficiencia térmica bajo diversas condiciones de operación.	Revisión bibliográfica sobre radiación solar, energía térmica y estudio de principios de transferencias de calor.	X	X	X															10
	Recopilación de datos geográficos de radiación local y estudio de los parámetros involucrados en el colector.		X	X	X														10
	Desarrollo del modelo matemático y ecuaciones diferenciales aplicadas.		X	X	X														12
Aplicar el modelo matemático del colector solar de geometría espiral en un entorno de simulación (Matlab), con el fin de analizar su comportamiento térmico bajo distintas configuraciones de parámetros y condiciones de operación.	Implementación de las ecuaciones en el entorno de Matlab.			X	X														15
	Definir distintas condiciones de operación del sistema				X	X	X	X											20
	Aplicar el modelo mediante simulaciones para evaluar la eficiencia térmica bajo diferentes escenarios definidos.								X	X	X	X							18
Diseñar un sistema de control básico para regular el comportamiento térmico interno del colector solar de geometría espiral, basada en los resultados de la simulación.	Diseñar el esquema de funcionamiento del sistema de control del colector solar.										X	X	X						16
	Proponer un sistema de control ON-OFF para la temperatura media del volumen de agua contenido en el colector.														X	X	X		14
	Analizar los resultados y proponer recomendaciones.															X	X	X	14
Redacción de documento		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	55
Total de horas empleadas																		240	

Nota: La tabla presenta las actividades para cumplir con los objetivos planteados. La tabla puede ajustarse de acuerdo a la cantidad de objetivos y actividades que se requieran.

8. Presupuesto

Este apartado incluirá la información sobre los gastos y recursos que se requieren realizar a fin de desarrollar el proyecto técnico (Resolución N° 233-13-2020-11-25).

8.1. Talento humano

La tabla 5 presenta un ejemplo del contenido.

Tabla 4

Recurso de talento humano.

Cargo	Nombre	Costo hora	horas al mes	Total de horas	Costo total
Tutor	Julio Loja	20\$	15	60	1200 \$
Autor 1	César Riera	8\$	60	240	1920 \$
Autor 2	Adrián Sancho	8\$	60	240	1920 \$

Nota: En la tabla se observa el costo de las 240 horas o 400 horas establecidas en el cronograma de trabajo y el costo de las horas de revisión por parte del docente revisor que se calendarizarán en la fase 2 de Integración Curricular o al inicio de TT2 respectivamente.

8.2. Recursos materiales

La tabla 5 presenta un ejemplo del contenido.

Tabla 5

Recurso de talento humano.

Denominación	Cantidad	Costo Unitario	Costo total
Software Matlab	1	1000	1000 \$

Nota: En la tabla se observa el costo a considerar de diferentes elementos para el desarrollo del trabajo de titulación, con referencia al uso del software Matlab Ministerio de Energía y Minería (2017) se coloca un aproximado del costo total de las licencias. De igual manera el costo por el uso de los laboratorios es un aproximado de acuerdo al número de horas proyectadas a utilizar.

Conclusiones

- El modelo matemático desarrollado permitió simular el comportamiento térmico de un colector solar de geometría espiral con base en un balance de energía que considera de forma explícita las pérdidas. Esta formulación general posibilita adaptar el modelo a diferentes materiales, geometrías y condiciones climáticas sin necesidad de modificar la estructura base del código.
- La simulación se basó en datos de irradiancia mensual proporcionados por la plataforma NASA POWER para la ciudad de Cuenca (2024), lo que permitió una evaluación realista y representativa del comportamiento anual del sistema bajo condiciones locales.
- Se observó que la eficiencia térmica promedio del sistema se mantuvo en torno al 67.7 por ciento durante el año, con mayor rendimiento en los meses de alta irradiancia. Sin embargo, la temperatura del volumen de agua dentro del colector mostró una dependencia directa tanto del caudal como del número de vueltas del colector.
- Las resistencias térmicas calculadas en el modelo mostraron que las pérdidas por radiación hacia el ambiente son dominantes en condiciones de alta temperatura superficial, mientras que las pérdidas por convección interna disminuyen con el aumento del caudal, lo que valida físicamente la estructura de transferencia térmica implementada.

- La implementación de un control ON-OFF para el caudal permite regular la temperatura media del volumen de agua que contiene el colector, lo que mejora la eficiencia operativa y protege al sistema frente a condiciones térmicas inadecuadas.
- En conjunto, el colector solar espiral propuesto representa una solución de bajo costo, construcción sencilla y alta adaptabilidad, ideal para aplicaciones domésticas y rurales donde el acceso a energía térmica sostenible es limitado.

9. Recomendaciones

- Incluir análisis horario más detallado, especialmente en días representativos, para comprender mejor los picos térmicos y ajustar el control dinámico del caudal.
- Incorporar sensores y automatización real con microcontroladores para validar en campo la lógica ON-OFF planteada en simulación.
- Realizar pruebas con distintos tipos de coberturas (vidrio templado, policarbonato) para evaluar su impacto en la eficiencia térmica y durabilidad.
- Considerar diferentes orientaciones e inclinaciones del colector en futuros diseños para maximizar la captación solar durante el año.
- Estudiar el efecto de la acumulación de sedimentos o suciedad sobre el vidrio y su repercusión en las pérdidas ópticas a largo plazo.
- Desarrollar un análisis económico del sistema considerando materiales, mantenimiento y retorno de inversión en comparación con sistemas convencionales.

Referencias

- Aparicio, M. P. (2020a). *Radiación solar y su aprovechamiento energético*. España: Marcombo.
- Aparicio, M. P. (2020b). *Radiación solar y su aprovechamiento energético*. España: Marcombo.
- Åström, K. J., y Murray, R. M. (2010). *Feedback systems: An introduction for scientists and engineers*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Banco Interamericano de Desarrollo (BID). (2019). *Transición energética en américa latina y el caribe: panorama y tendencias*. (Disponible en: <https://publications.iadb.org/es/transicion-energetica-en-america-latina-y-el-caribe>)
- Barajas, J., Muñoz, J., y Reyes, L. (2023). Implementación de control on-off con histéresis en colectores solares residenciales. *Revista de Energías Renovables y Automatización*, 5(1), 22–33.
- Barragán Llanos, R. A. (2020). *La generación de energía eléctrica para el desarrollo industrial en el ecuador a partir del uso de las energías renovables*. Descargado de <http://localhost:8080/xmlui/handle/123456789/4023> (Trabajo de grado)
- Bejan, A. (2013). *Convection heat transfer* (4th ed.). Hoboken, NJ: Wiley.
- Berglund, L., y Gonzalez, R. (1978). *Physiological responses of human subjects to long exposures of temperature and humidity* (Inf. Téc. n.º AD-A059 512). Natick, Massachusetts: US Army Research Institute of Environmental Medicine.
- Camino, A. (2020). Reducción del consumo energético con hdpe en colectores solares. *Revista Energía y Desarrollo*.
- Cengel, Y. A. (2011a). *Transferencia de calor y masa* (4.ª ed.). México: McGraw-Hill.
- Cengel, Y. A. (2011b). *Transferencia de calor y masa* (4a ed.). México: McGraw-Hill.
- Cengel, Y. A., y Ghajar, A. J. (2011). *Heat and mass transfer: Fundamentals and applications* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2018). *Perspectivas de la sostenibilidad energética en américa latina y el caribe*. (Disponible en: <https://www.cepal.org/es/publicaciones/43824-perspectivas-la-sostenibilidad-energetica-america-latina-caribe>)
- CONAVI. (2019). *Hipoteca verde: Programa de sustentabilidad energética en vivienda*. (Disponible en: <https://www.gob.mx/conavi>)
- CONELEC. (2008). *Atlas solar del ecuador*. Descargado de <https://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/cg00041.pdf>
- Cruz-Peragón, F., Palomar, J. M., Casanova, P. J., Dorado, M. P., y Manzano-Agugliaro, F. (2012). Characterization of solar flat plate collectors. *Renewable and Sustainable*

- Energy Reviews*, 16(3), 1709–1720.
- de Comunicación del Ministerio de Energía y Minas, D. (2023). *Informe de energías renovables no convencionales*. (Disponible en línea)
- de Energía y Minas del Ecuador, M. (2023). *Boletín estadístico energético*. (Acceso: www.energia.gob.ec)
- Duffie, J., y Beckman, W. (2013). *Solar engineering of thermal processes* (4.^a ed.). John Wiley & Sons.
- Duffie, J. A., y Beckman, W. A. (2013a). *Solar engineering of thermal processes* (4.^a ed.). Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.
- Duffie, J. A., y Beckman, W. A. (2013b). *Solar engineering of thermal processes* (4.^a ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Franklin, G. F., Powell, J. D., y Emami-Naeini, A. (2015). *Feedback control of dynamic systems* (7th ed.). Boston, MA: Pearson.
- García, O. (2017). *Aplicaciones térmicas de la energía solar en los sectores residencial, servicios e industrial*. Descargado de <http://www.fordecyt.ier.unam.mx/pdf/pdfTermoSolar.pdf>
- Geographic, N. (2022). *La energía solar y su potencial para ayudar a reducir el calentamiento global*. Descargado de <https://www.nationalgeographicla.com/medio-ambiente/2022/04/1a-energia-solar-y-su-potencial-para-ayudar-a-reducir-el-calentamiento-global>
- GIZ Ecuador. (2018). *Energía sostenible en zonas rurales: desafíos y oportunidades en ecuator*. (Disponible en: <https://www.giz.de/es/downloads/giz2018-energia-rural-ecuador.pdf>)
- Group, A. T. (2023). *What is the ideal temperature for domestic hot water?* Descargado de <https://www.ariston.com/en-sa/the-comfort-way/news/what-is-the-ideal-temperature-for-domestic-hot-water/> (Accessed: 2025-07-11)
- Hernández, A., Easter, M., y Murphy-Mariscal, M. (2014). Renewable energy and global sustainability. *Journal of Environmental Science*.
- Hoyos Velasco, C. I., Hoyos Velasco, F. E., y Candelo-Becerra, J. E. (2021). Nonlinear dynamics and performance analysis of a buck converter with hysteresis control. *Computation*, 9(10), 112. doi: 10.3390/computation9100112
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., y Lavine, A. S. (2011a). *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons.
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., y Lavine, A. S. (2011b). *Fundamentos de transferencia de calor* (7.^a ed.). México: Wiley.

- Kalogirou, S. A. (2004a). *Solar energy engineering: Processes and systems* (1.^a ed.). Academic Press.
- Kalogirou, S. A. (2004b). Solar thermal collectors and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(3), 231–295. doi: 10.1016/j.pecs.2004.02.001
- Kalogirou, S. A. (2009). *Solar energy engineering: Processes and systems* (1st ed.). Oxford, UK: Academic Press.
- Kalogirou, S. A. (2014). *Solar energy engineering: Processes and systems* (2nd ed.). Academic Press.
- Kumar, R., Singh, B. P., y Singh, S. (2018). Durability and stability of polyethylene pipes for solar water heating systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 176, 1–7. doi: 10.1016/j.solmat.2017.12.002
- Li, Q., Shirazi, A., Zheng, C., Rosengarten, G., Scott, J. A., y Taylor, R. A. (2016). Energy concentration limits in solar thermal heating applications. *Energy*, 96, 253–267.
- Meinel, A., y Meinel, M. (1982). *Aplicaciones de la energía solar*. Reverté.
- Meinel, A. B., y Meinel, M. P. (1982). *Aplicaciones de la energía solar*. Reverté.
- Ministerio de Energía y Minería. (2017). Usos y aplicaciones de las rocas y minerales industriales. <http://informacionminera.produccion.gob.ar/assets/datasets/abrasivos.pdf> Consultado:20/04/2021.
- Nirmal, K., Surya, M., y Jaya, K. (2020). Smart on/off control system for domestic solar water heaters. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, 9(2), 141–147.
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna* (5.^a ed.). México: Pearson Educación.
- Osorio, R. A., Flores, J. F. V., y Torres, J. V. (2017a). Análisis de las características de termoplásticos para el desarrollo de intercambiadores de calor de tubo y coraza. *Revista Multidisciplinaria de Avances de Investigación*, 3(2), 25–30.
- Osorio, R. A., Flores, Y., y Torres, A. (2017b). *Aplicaciones de materiales poliméricos en colectores solares*. Editorial Técnica Latinoamericana.
- Pesántez, J. (2012). Reducción de costos en el calentamiento de agua en ecuador, a través de la sustitución de calefones con uso de glp por sistemas de energía solar térmica. *Revista Científica Técnica Universitaria*, 1(1). doi: 10.26423/rctu.v1i1.2
- Robles, C., y Rodríguez, O. (2018). Un panorama de las energías renovables en el mundo, latinoamérica y colombia. *Revista Energía y Sociedad*, 39(34), 10.
- Santos Alvite, J., y Carrión, G. (2022a). Consumo eléctrico residencial en ecuador y su impacto económico. *Revista de Energía y Sociedad*.
- Santos Alvite, J., y Carrión, G. (2022b). Consumo eléctrico residencial en ecuador y su impacto económico. *Revista de Energía y Sociedad*.

- Serrano, X., Alvarez, D., y Luna, S. F. (2019). Influence of local climate on the tilt and orientation angles in fixed flat surfaces to maximize the capture of solar irradiation. En *Ieee international autumn meeting on power, electronics and computing (ropec)*. doi: 10.1109/ROPEC48299.2019.9057102
- Services, M. C. E. (2022). *Hot water supply requirements*. Descargado de <https://www.maricopa.gov/DocumentCenter/View/5888/Hot-Water-Supply-Requirements-PDF> (Accessed: 2025-07-11)
- Silva, R., Souza, P., y Lima, M. (2017). Avaliação do uso de aquecedores solares no programa minha casa minha vida. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, 6(2), 78–90.
- Stackhouse, P., y Westberg, D. (2020). *Nasa power project: Data methodology and applications* (Inf. Téc.). NASA Langley Research Center.
- World Bank Group. (2019). *Global solar atlas*. Descargado de <https://globalsolaratlas.info/>
- Zervos, A. (2022). *Renewables 2022 global status report*. Descargado de <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/>

ANEXOS

Anexo 1: Colocar en anexos la documentación que se considere necesarios.

Anexo 2: Colocar anexos que sean necesarios

Los anexos presentan evidencias que se consideran relevantes para la explicación del documento como los instrumentos de recopilación de la información.