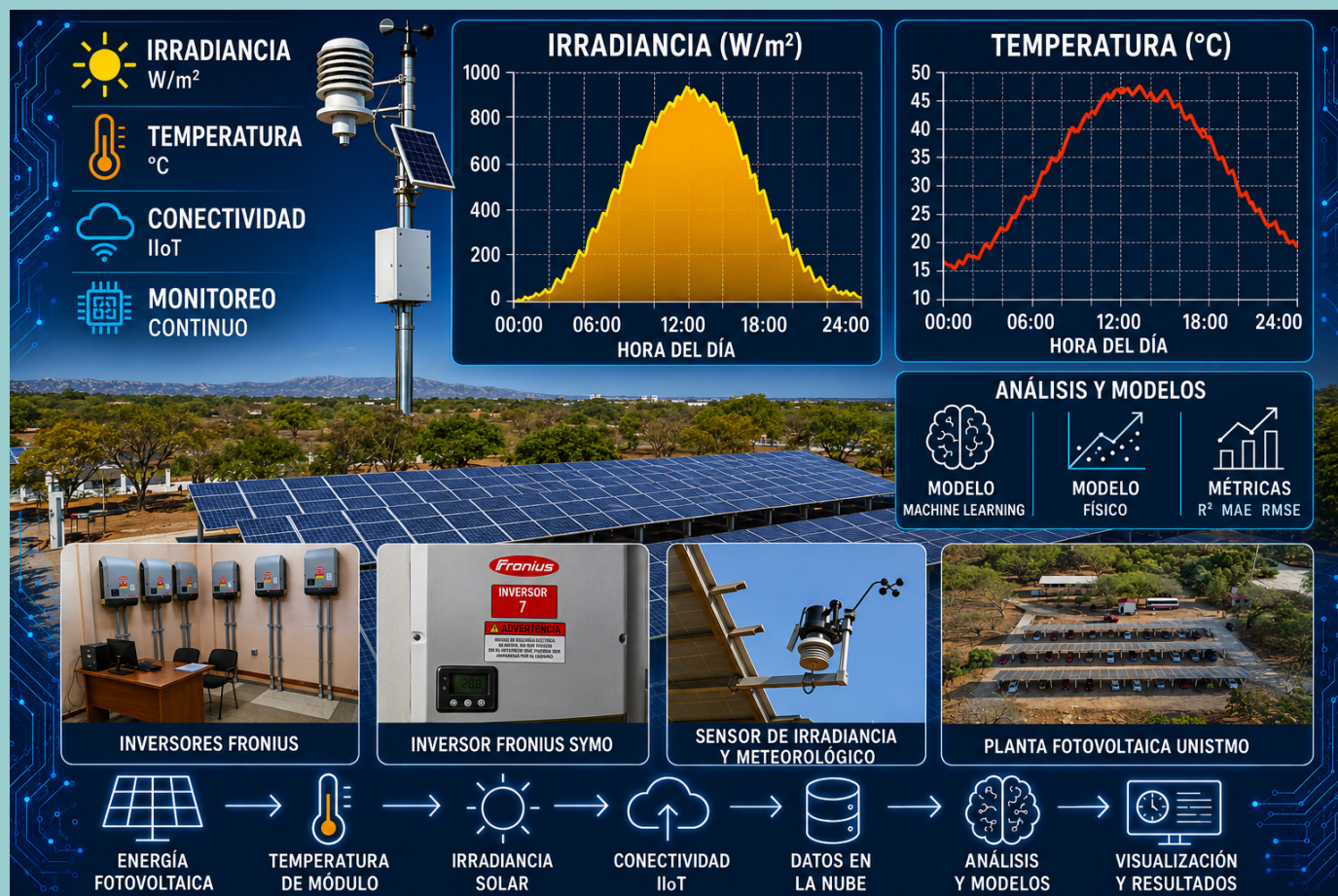




ALAN LÓPEZ VILLEGAS et al., pp 79-90

Perspectivas de los indicadores macroeconómicos en México — Seguridad alimentaria y nutricional con enfoque de género — Análisis del efecto del ruido en la geometría de perfiles parabólicos: conicidad, enfoque y trazo de rayos — Implementación de un Sistema de Prevención de Intrusos (IPS) utilizando una Raspberry Pi 3 para el Monitoreo de Red en micro y pequeñas empresas — Algoritmo de control difuso para un convertidor reductor implementado en un aerogenerador de baja potencia — Factores críticos que limitan la eficiencia en celdas solares de película delgada basadas en Sb₂(S,Se)₃ — Simulación mediante SCAPS del efecto de la irradiancia y la temperatura en el Vmpp de una celda solar de Silicio — Óxidos metálicos como capas transportadoras de carga en celdas solares de perovskita — Generación de una base de datos pública del movimiento aparente del Sol en el Istmo de Tehuantepec — Arquitectura IIoT Escalable para la Gestión Basada en Datos del Sistema FV de la UNISTMO — Análisis comparativo del desempeño de un convertidor buck bajo esquemas de control proporcional, integral y derivativo — Física en el gimnasio: modelo matemático del remo de tierra — Evaluación de perfiles aerodinámicos independientes en una sección de álabe para aerogenerador de baja potencia mediante proyección de franjas — Realidad virtual inmersiva como herramienta didáctica para la comprensión de prototipos dentro del sector eólico: el caso del aerogenerador Quetzal — La importancia de la geometría en sistemas de concentración solar





Representantes Institucionales

Rector

Dr. Edwin Román Hernández

Vice Rectora Académica

Dra. María Soledad Ramírez Flores

Vice Rector Administrativo

M. A. Oscar Cortés Olivares

REVISTA MULTIDISCIPLINARIA:

ENERGÍA, CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Equipo Editorial

Director

Dr. Víctor Iván Moreno Oliva
Universidad del Istmo

Comité Científico Externo

Dr. Xavier Mathew
Universidad Nacional Autónoma de México

Dra. Nini Rose Mathews
Universidad Nacional Autónoma de México

Dr. Maykel Courel Piedrahita
Universidad de Guadalajara

Dr. Silver Hamill Turren Cruz
Universitat Jaume I, España

Editores Asociados

Dra. Juquila Araceli González Nolasco
Universidad del Istmo

Dra. Liliana Hechavarría Difur
Universidad del Istmo

Dra. Gabriela Rivadeneyra Romero
Universidad del Istmo

Dr. Eduardo Campos Mercado
SECIHTI-Universidad del Istmo

Dr. Isaac Montoya De Los Santos
Universidad del Istmo

Dr. Daniel Pacheco Bautista
Universidad del Istmo

Dr. Jaime Torres Fragosó
Universidad del Istmo

Dr. Antonio Salazar Campos
Universidad del Istmo

Dr. Edwin Román Hernández
Universidad del Istmo

Dr. Edgar López Martínez
Universidad del Istmo

M. en S.A. Edú Ortega Ibarra
Universidad del Istmo

Dr. Gabriel Castillo Santiago
Universidad del Istmo

Diseño Editorial

Dr. Gabriel Castillo Santiago

Revista Multidisciplinaria: Energía, Ciencia y Tecnología, volumen 1, número 1, julio - diciembre de 2026, es una publicación semestral editada por la Universidad del Istmo, Campus Tehuantepec, Ciudad Universitaria s/n, Barrio Santa Cruz Tagolaba, 4a Sección, Santo Domingo Tehuantepec, C.P. 70760, Oaxaca. Tel. 9715224050 / Campus Ixtepec, Carretera Ixtepec-Chihuitán, Ciudad Ixtepec, C.P. 70110, Oaxaca. Tel. 9717127050 / Campus Juchitán, Carretera Transistmica Juchitán-La Ventosa, Km. 14, La Ventosa, C.P. 70102, Oaxaca. Tel. 9717127050. Página electrónica de la revista: https://www.unistmo.edu.mx/web/p_investigacion/revista.html, correo electrónico: contacto.revista@unistmo.edu.mx, editor responsable: Dr. Víctor Iván Moreno Oliva, certificado de Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2026-031915104800-102, ISSN: (en trámite) — ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor, responsable de la última actualización de este número: Dr. Víctor Iván Moreno Oliva, Universidad del Istmo, Campus Tehuantepec, Ciudad Universitaria s/n, Barrio Santa Cruz Tagolaba, 4a Sección, Santo Domingo Tehuantepec, C.P. 70760, Oaxaca, fecha de última modificación: 8 de julio de 2026, tamaño del archivo: 15967 KB.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación. Queda prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la Universidad del Istmo.

REVISTA MULTIDISCIPLINARIA:

ENERGÍA, CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Vol. 1

No. 1

Contenido

6 Perspectivas de los indicadores macroeconómicos en México
ANTONIO SALAZAR CAMPOS

12 Seguridad alimentaria y nutricional con enfoque de género
EDÚ ORTEGA IBARRA E ILSE HAIDE ORTEGA IBARRA

22 Análisis del efecto del ruido en la geometría de perfiles parabólicos: conicidad, enfoque y trazo de rayos
GRECIA CAJIGAS VELÁSQUEZ, VÍCTOR IVÁN MORENO OLIVA Y GABRIEL CASTILLO SANTIAGO

32 Implementación de un Sistema de Prevención de Intrusos (IPS) utilizando una Raspberry Pi 3 para el Monitoreo de Red en micro y pequeñas empresas
MARIANO LARA-CABRERA, CARLOS EDGARDO CRUZ-PÉREZ, OSCAR ALONSO DE LA ROSA AGUILAR, LUIS DAVID HUERTA HERNANDEZ Y FLORENTINO RUIZ-AQUINO

39 Algoritmo de control difuso para un convertidor reductor implementado en un aerogenerador de baja potencia
LUDWIN BETANZOS MARTÍNEZ, EDUARDO CAMPOS MERCADO Y ADÁN ACOSTA BANDA

48 Factores críticos que limitan la eficiencia en celdas solares de película delgada basadas en $\text{Sb}_2(\text{S,Se})_3$
BIAANI' GUADALUPE CRUZ MARIN, MAYKEL COUREL E ISAAC MONTOYA DE LOS SANTOS

55 Simulación mediante SCAPS del efecto de la irradiancia y la temperatura en el V_{mpp} de una celda solar de Silicio
ATZIRY CÁRDENAS JIJON, DANIEL PACHECO BAUTISTA, HUGO JORGE CORTINA MARRERO, LILIANA HECHAVARRÍA DIFUR Y ALAN LÓPEZ VILLEGAS

64 Óxidos metálicos como capas transportadoras de carga en celdas solares de perovskita
BERTHA INDIRA VELÁSQUEZ, CARLOS A. MEZA AVENDAÑO E ISAAC MONTOYA DE LOS SANTOS

73 Generación de una base de datos pública del movimiento aparente del Sol en el Istmo de Tehuantepec

MARÍA FERNANDA URBIETA MARTÍNEZ, GABRIEL CASTILLO SANTIAGO, VÍCTOR IVÁN MORENO OLIVA Y MARTÍN JIMÉNEZ RODRÍGUEZ

79 Arquitectura IIoT Escalable para la Gestión Basada en Datos del Sistema FV de la UNISTMO

ALAN LÓPEZ VILLEGAS, LILIANA HECHAVARRÍA DIFUR, HUGO JORGE CORTINA MARRERO, ADÁN ACOSTA BANDA Y GUADALUPE TOLEDO TOLEDO

91 Análisis comparativo del desempeño de un convertidor buck bajo esquemas de control proporcional, integral y derivativo

IVANNA BAÑOS MATUS, ADAN ACOSTA BANDA Y EDUARDO CAMPOS MERCADO

100 Física en el gimnasio: modelo matemático del remo de tierra

ÁLVARO CASTAÑEDA MENDOZA

107 Evaluación de perfiles aerodinámicos independientes en una sección de álabe para aerogenerador de baja potencia mediante proyección de franjas

JAIME PEÑA ANTONIO, VÍCTOR IVÁN MORENO OLIVA Y GABRIEL CASTILLO SANTIAGO

119 Realidad virtual inmersiva como herramienta didáctica para la comprensión de prototipos dentro del sector eólico: el caso del aerogenerador Quetzal

J. JESÚS ARELLANO PIMENTEL, JHOVANA ARAMIS ESCOBAR LÓPEZ Y GUADALUPE TOLEDO TOLEDO

126 La importancia de la geometría en sistemas de concentración solar

DIANA PAOLA SUAREZ REYES, EDUARDO TORRES MORENO Y VÍCTOR IVÁN MORENO OLIVA

REVISTA MULTIDISCIPLINARIA:

ENERGÍA, CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Carta Editorial

Estimados lectores y colaboradores,

Es un honor presentar el Volumen 1 de la Revista Multidisciplinaria: Energía, Ciencia y Tecnología, esta edición inaugural marca el inicio de nuestro compromiso con la difusión y divulgación del conocimiento, promoviendo la investigación y el análisis crítico como motores del desarrollo académico y social.

Como espacio fundacional, este proyecto busca consolidar un foro de diálogo interdisciplinario donde converjan las ciencias, la tecnología y las humanidades. En esta primera entrega, se incorporan artículos que abordan problemáticas contemporáneas vinculadas a la educación, la innovación y el desarrollo sostenible. Cabe destacar que cada contribución ha sido sometida a un riguroso proceso de evaluación por pares, garantizando la excelencia y pertinencia de los contenidos desde su origen.

Expresamos nuestro profundo agradecimiento a los investigadores, académicos, estudiantes y profesionales que han confiado en este órgano de difusión para plasmar sus manuscritos, así como al comité editorial y al cuerpo de revisores cuyo rigor y dedicación han hecho posible el nacimiento de esta publicación.

Finalmente, invitamos a la comunidad científica a participar activamente en las próximas convocatorias, impulsando el acceso abierto al conocimiento como herramienta de transformación. Con la certeza de que este volumen fundacional será de gran valor para sus lectores, agradecemos su confianza en el inicio de este trayecto editorial.

Atentamente

Dr. Víctor Iván Moreno Oliva

Director

Revista Multidisciplinaria: Energía, Ciencia Y Tecnología

Volumen 1, Número 1

contacto.revista@unistmo.edu.mx

Perspectivas de los indicadores macroeconómicos en México

ANTONIO SALAZAR CAMPOS¹¹ Ciencias Empresariales, Universidad del Istmo, Ixtpec, Oaxaca, Mexico.* Correspondencia: asalazar@unistmo.edu.mx

Recibido: 21/05/2026

Revisado: 10/06/2026

Aceptado: 12/06/2026

Publicado: 08/07/2026

RESUMEN: El presente artículo de divulgación analiza los principales indicadores macroeconómicos de México —producto interno bruto, inflación, tasa de interés, tipo de cambio, empleo, finanzas públicas y sector externo— con el fin de interpretar la coyuntura económica del país. A partir de datos oficiales recientes de fuentes como INEGI, Banxico, SHCP y la Secretaría de Economía, así como proyecciones de organismos internacionales (FMI, CEPAL), se describen las tendencias observadas en el período 2020-2025 y las perspectivas de corto plazo, subrayando los factores internos y externos que configuran el desempeño de la economía mexicana.

ABSTRACT: This outreach article analyzes the main macroeconomic indicators of Mexico—gross domestic product, inflation, interest rates, exchange rate, employment, public finances, and the external sector—to interpret the country's current economic situation. Based on recent official data from INEGI, Banxico, SHCP, and the Ministry of Economy, as well as projections from international organizations (IMF, ECLAC), the article describes the observed trends for the period 2020-2025 and the short-term perspectives, highlighting the internal and external factors shaping the performance of the Mexican economy.

Palabras clave: Indicadores macroeconómicos, Crecimiento, Inflación, Política monetaria, Perspectivas 2026

1. INTRODUCCIÓN

Cuando en las noticias se habla de “la economía”, suelen aparecer términos como inflación, crecimiento del PIB o tipo de cambio. Aunque en apariencia son conceptos distantes, estos indicadores macroeconómicos funcionan como el tablero de instrumentos de un automóvil: advierten sobre la velocidad a la que avanza el país, la temperatura del consumo, la presión sobre los precios y el estado del motor fiscal y externo. Interpretarlos no requiere una formación especializada, sino una disposición a conectar cifras con realidades cotidianas: el precio de la canasta básica, la tasa de un crédito hipotecario o la disponibilidad de empleo.

México inició la década de 2020 con el inicio de la pandemia, seguida de una recuperación vigorosa pero desigual, y luego enfrentó un entorno global marcado por tensiones geopolíticas, reacomodo de cadenas de suministro (*nearshoring*) y una política monetaria restrictiva en las principales economías. Para mediados de 2026, el país muestra un panorama de estabilidad relativa con desafíos estructurales

persistentes. El propósito de este artículo es describir, con un lenguaje claro y apoyado en información verificable, dónde se sitúan hoy los indicadores clave, qué trayectoria han seguido y hacia dónde apuntan las perspectivas de corto plazo. El presente artículo tiene un carácter descriptivo y de divulgación. El período de análisis abarca de 2020 a 2025, con proyecciones de corto plazo para 2026. La selección de indicadores se realizó con base en su relevancia para el diagnóstico macroeconómico estándar y su impacto directo en el bienestar de la población. Las fuentes utilizadas son exclusivamente oficiales y secundarias: INEGI (PIB, inflación, empleo), Banco de México (tasa de referencia, tipo de cambio, reservas internacionales), SHCP (finanzas públicas), Secretaría de Economía (IED) y organismos internacionales como el FMI y la CEPAL. No se realiza estimación econométrica ni construcción de modelos; el análisis es de naturaleza estadístico-descriptiva, orientado a facilitar la comprensión ciudadana de la coyuntura económica.

2. LOS PRINCIPALES INDICADORES Y SU RELEVANCIA PARA LA VIDA DIARIA

Existe información económica que debe de ser analizada de forma clara y breve, lo que permitirá leer de forma oportuna cada indicador.

La **Tabla 1** sintetiza los principales indicadores macroeconómicos utilizados para interpretar el desempeño general de la economía mexicana y su relación con la vida cotidiana de la población. Estos indicadores funcionan como un tablero de control que permite observar, de manera conjunta, la producción nacional, el comportamiento de los precios, el costo del dinero, la situación del empleo, la relación del país con el exterior, la posición fiscal del gobierno y la confianza de los inversionistas.

El Producto Interno Bruto (PIB) permite identificar si la economía está creciendo o contrayéndose, lo cual tiene implicaciones directas sobre la generación de empleo, el ingreso de los hogares y las oportunidades de inversión. La inflación, medida mediante el INPC, muestra la pérdida o conservación del poder adquisitivo, por lo que afecta directamente el consumo familiar, los salarios reales y las decisiones de ahorro. La tasa de interés de referencia, definida por el banco central, incide en el costo del crédito y en el rendimiento de los instrumentos financieros, por lo que influye tanto en las familias como en las empresas.

Asimismo, el tipo de cambio peso-dólar resulta clave para entender el precio de bienes importados, el valor de las remesas, la competitividad de las exportaciones y la estabilidad financiera. La tasa de desempleo ofrece una lectura del mercado laboral, aunque debe interpretarse junto con otros indicadores como la informalidad, la calidad del empleo y los niveles salariales. Por su parte, la balanza comercial permite conocer si el país vende al exterior más de lo que compra, aspecto fundamental en una economía altamente integrada con Estados Unidos y con las cadenas globales de valor.

Finalmente, el déficit público muestra el equilibrio o desequilibrio entre los ingresos y gastos del gobierno, por lo que se relaciona con la deuda pública, la estabilidad fiscal y la confianza de los mercados. La Inversión Extranjera Directa (IED) refleja la llegada de capital productivo al país y suele asociarse con nuevas plantas, generación de empleo formal, transferencia tecnológica y expectativas favorables sobre el futuro económico. En conjunto, estos indicadores permiten comprender que la macroeconomía no es un tema abstracto, sino una herramienta práctica para interpretar decisiones de consumo, inversión, empleo, política pública y bienestar social.

Tabla 1. Principales indicadores macroeconómicos y su significado

Indicador	Definición breve	¿Por qué es relevante para la población?
Producto Interno Bruto (PIB)	Valor total de los bienes y servicios finales producidos en un país durante un período.	Refleja la capacidad de generar empleo e ingreso; un PIB creciente suele asociarse con mayor bienestar material.
Inflación (INPC)	Aumento generalizado y sostenido de los precios de bienes y servicios, medido en México por el Índice Nacional de Precios al Consumidor.	Afecta el poder adquisitivo del salario, el costo del crédito y las decisiones de ahorro.
Tasa de interés de referencia	Tasa a la que el banco central presta a los bancos comerciales; es la herramienta principal para controlar la inflación.	Influye en el costo de hipotecas, tarjetas de crédito, préstamos personales y rendimiento de inversiones.
Tipo de cambio (MXN/USD)	Precio de una divisa expresado en moneda nacional; en México se suele citar la paridad peso-dólar.	Impacta el precio de insumos importados, las remesas recibidas y la competitividad de las exportaciones.
Tasa de desempleo	Porcentaje de la población económicamente activa que busca trabajo y no lo encuentra.	Termómetro directo del mercado laboral; un nivel bajo indica mayor facilidad para encontrar empleo.
Balanza comercial	Diferencia entre el valor de las exportaciones y las importaciones de mercancías.	Un déficit persistente puede presionar el tipo de cambio; un superávit sugiere alta competitividad externa.
Déficit público	Exceso de gasto del gobierno respecto a sus ingresos en un año.	Un déficit elevado puede generar mayor deuda pública y presiones sobre tasas de interés e

		inflación a futuro.
Inversión Extranjera Directa (IED)	Flujo de capitales foráneos destinados a crear o ampliar empresas productivas en el país.	Refleja confianza internacional y suele asociarse con empleo formal y transferencia tecnológica.

Fuente: Elaboración propia con base en Banco de México (2023, 2024), INEGI (2021, 2024), SHCP (2024), Secretaría de Economía (2024), FMI (2024) y CEPAL (2024)

Tabla 2. Crecimiento del PIB real de México (variación % anual, 2020-2025).

Año	PIB total	Agropecuario	Industrial	Servicios
2020	-8.1	2.0	-10.0	-7.7
2021	4.7	2.8	5.2	4.5
2022	3.9	2.8	3.3	4.1
2023	3.2	1.9	3.5	3.1
2024	1.4	0.4	-0.4	2.3
2025	0.8	4.0	-1.1	1.5

Fuente: elaboración propia con datos de INEGI (2021, 2024, 2025). Nota: para 2025, las actividades secundarias registraron -1.1%, cifra corregida de datos preliminares.

3. CRECIMIENTO ECONÓMICO: DEL REBOTE A LA MODERACIÓN

De acuerdo con el INEGI, en 2023 el PIB creció 3.2%, superando los pronósticos iniciales (INEGI, 2024). Para 2024, la estimación oficial se ubicó en torno al 1.4%, un ritmo más cercano al crecimiento potencial de la economía mexicana, que diversos estudios sitúan alrededor del 2% anual (Moreno-Brid, 2016; Moreno-Brid & Ros, 2010). La moderación refleja la combinación de una menor demanda externa, el efecto acumulado de las alzas en la tasa de interés y un menor impulso fiscal. En 2025, el PIB registró un crecimiento de apenas 0.8%, confirmando una pérdida de dinamismo sostenida respecto de los años posteriores a la pandemia.

Sin embargo, el consumo interno se mantuvo resiliente gracias al flujo de remesas, que en 2023 superó los 63 mil millones de dólares, y a la fortaleza del empleo formal. La inversión mostró un comportamiento heterogéneo: mientras la construcción residencial perdió dinamismo, la inversión en maquinaria y equipo ligada a la relocalización de fábricas registró incrementos, particularmente en el norte y el Bajío (CEPAL, 2024).

La Tabla 2 muestra el crecimiento real del Producto Interno Bruto de México entre 2020 y 2025, así como el desempeño de las actividades primarias, secundarias y terciarias. La serie permite identificar cuatro etapas recientes de la economía mexicana: la fuerte contracción de 2020 provocada por la pandemia; el rebote económico de 2021; la recuperación todavía sólida de 2022 y 2023; y una desaceleración clara en 2024 y 2025. En 2025, el comportamiento sectorial fue desigual: las actividades primarias (agropecuaria) crecieron 4.0% y las terciarias (servicios) avanzaron 1.5%, mientras que las actividades secundarias (industria) retrocedieron -1.1%, reflejando debilidad en la industria, particularmente en un contexto de menor impulso manufacturero y de construcción. La columna Industrial en la tabla reporta -1.1% para 2025, cifra corregida respecto a una versión preliminar anterior que indicaba erróneamente 4.0%.

4. INFLACIÓN Y POLÍTICA MONETARIA: EL LENTO REGRESO A LA META

La inflación fue la principal preocupación económica mundial durante 2021-2023. En México, el Índice Nacional de Precios al Consumidor alcanzó un pico interanual de 8.70% en septiembre de 2022, muy por encima del rango objetivo de Banxico de 3% $\pm$ 1 punto porcentual (Banxico, 2023). Como explican Cárcamo Solís y Arroyo López (2022), el episodio inflacionario tuvo un componente importado importante —alimentos y energéticos—, pero también respondió a presiones internas en servicios y a la indexación de algunos precios.

Entre junio de 2021 y mayo de 2023, la tasa de referencia subió de 4.0% a 11.25%, su mayor nivel desde que se adoptó el esquema de objetivos de inflación (Banxico, 2023). A partir de 2023, la inflación comenzó a ceder, cerrando ese año en 4.66%, y continuó su descenso en 2024 hasta alrededor de 4.21% (INEGI, 2024). La desinflación ha sido más notoria en el componente no subyacente; los precios de los servicios han mostrado mayor resistencia debido al dinamismo del consumo y los incrementos salariales.

Banxico inició un ciclo de recortes a la tasa de referencia en marzo de 2024, lo que se espera continúe de forma gradual hacia un nivel cercano a 8.5% hacia finales de ese año (Banxico, 2024). En perspectiva, el riesgo inflacionario para 2026 proviene principalmente de la volatilidad del tipo de cambio, los precios de energéticos y los posibles efectos de shocks externos, como tensiones geopolíticas o disrupciones en cadenas de suministro globales.

5. TIPO DE CAMBIO: UN PESO FUERTE EN MEDIO DE LA INCERTIDUMBRE

El tipo de cambio ha sido protagonista de una trayectoria poco usual. Entre 2022 y mediados de 2023, el peso mexicano se apreció hasta ubicarse por debajo de 17.00 pesos por dólar, impulsado por el diferencial de tasas de interés con Estados Unidos, los

flujos de remesas y el optimismo alrededor del nearshoring (FMI, 2024).

A partir del segundo semestre de 2023 y durante 2024, la paridad se ajustó a un rango de 17.50-18.50 pesos por dólar, en parte por la volatilidad externa y la especulación preelectoral. Sin embargo, las reservas internacionales se mantuvieron cercanas a los 210 mil millones de dólares, un blindaje financiero importante (Banxico, 2024). La estabilidad relativa del tipo de cambio ha contenido las presiones inflacionarias por el lado de los bienes importados, aunque para los exportadores una moneda demasiado apreciada puede restar competitividad. Desde una perspectiva distributiva, la apreciación del peso beneficia a los consumidores de bienes importados y a los receptores de remesas en términos reales, pero perjudica a las regiones exportadoras, generando efectos regionales asimétricos especialmente relevantes en estados fronterizos y zonas con alta densidad manufacturera orientada al exterior.

6. MERCADO LABORAL: PARADOJAS DE BAJA DESOCUPACIÓN Y ALTA INFORMALIDAD

El empleo es quizás el indicador que más directamente toca la vida de las personas. La tasa de desempleo abierta en México se ha situado por debajo del 3% desde 2022, una de las más bajas de América Latina y de la OCDE (INEGI, 2024). Sin embargo, este dato positivo debe matizarse con la elevada tasa de informalidad laboral, aunque ha cedido ligeramente, permanece alrededor del 55%, lo que significa que más de la mitad de los trabajadores carecen de seguridad social y prestaciones laborales (Esquivel, 2024).

La política de recuperación del salario mínimo —con aumentos acumulados superiores al 100% en términos reales entre 2018 y 2024— ha sido uno de los mayores experimentos de política salarial en décadas, sin que hasta ahora se hayan observado impactos inflacionarios de consideración (CONASAMI, 2023; Moreno-Brid, 2016). La creación de empleos formales registrados en el IMSS se ha desacelerado, lo cual es consistente con la etapa de menor crecimiento económico.

Desde una perspectiva regional, el mercado laboral presenta brechas pronunciadas: las entidades del norte y el Bajío, articuladas con las cadenas de valor del nearshoring, muestran mercados laborales más dinámicos, mientras que regiones como el sureste registran mayor incidencia de informalidad y menor participación en los flujos de IED. Para el corto plazo, el riesgo principal radica en que una desaceleración adicional del crecimiento económico presione al alza la informalidad y reduzca el ritmo de creación de empleo formal (CEPAL, 2024).

7. FINANZAS PÚBLICAS Y SECTOR EXTERNO

En materia fiscal, los años posteriores a la pandemia estuvieron marcados por la expansión del gasto social y las grandes obras de infraestructura del gobierno. Para 2024, el déficit público se estimó en torno a 4.3% del PIB, un nivel que, aunque elevado para estándares históricos mexicanos, es financiable en virtud de la baja deuda externa y el acceso a los mercados de capital (SHCP, 2024; Moreno-Brid & Ros, 2010). No obstante, la prudencia fiscal será clave en los próximos años para no poner en riesgo la estabilidad macroeconómica.

El sector externo mexicano mantiene una alta dependencia del mercado estadounidense, que recibe más del 80% de las exportaciones totales. La Inversión Extranjera Directa alcanzó en 2023 la cifra récord de 36 mil millones de dólares, buena parte destinada a nuevas plantas manufactureras en el marco del nearshoring (Secretaría de Economía, 2024). La CEPAL (2024) destaca que México es uno de los principales receptores de IED en América Latina, aunque advierte que para maximizar los beneficios es necesario fortalecer la proveeduría local y mejorar la infraestructura hídrica y energética.

El nearshoring representa una oportunidad histórica, pero su aprovechamiento enfrenta retos estructurales significativos: la concentración geográfica de la inversión en el norte y el Bajío agudiza las brechas regionales; la capacidad de generación de energía —especialmente renovable— emerge como un cuello de botella crítico; y la insuficiente integración de proveedores nacionales en las cadenas de valor limita el derrame tecnológico hacia las empresas locales. Sin una política industrial activa que mejore la infraestructura, la educación técnica y el estado de derecho, el impacto distributivo del nearshoring podría resultar acotado (Moreno-Brid, 2016; CEPAL, 2024).

8. PERSPECTIVAS Y RIESGOS MACROECONÓMICOS 2026

Para 2026, los principales organismos internacionales proyectan un crecimiento del PIB de México en un rango de 1.0% a 1.5%, condicionado por la evolución de la economía estadounidense, la dinámica del nearshoring y el espacio fiscal disponible (FMI, 2024; CEPAL, 2024). En el escenario base, la inflación continuará convergiendo hacia el rango objetivo de Banxico, con una tasa de referencia que podría ubicarse alrededor del 8.0%, y el tipo de cambio se mantendría en un rango de relativa estabilidad.

Sin embargo, los riesgos a la baja son considerables. En el plano externo, una recesión en Estados Unidos o una escalada de tensiones comerciales podría

golpear duramente las exportaciones mexicanas y los flujos de remesas. En el ámbito interno, la incertidumbre en torno a la política energética, las presiones sobre las finanzas de Pemex y CFE, y posibles revisiones al marco regulatorio de la inversión privada representan factores que podrían desincentivar la inversión. Las implicaciones distributivas también merecen atención: si el crecimiento se concentra en sectores y regiones ya privilegiadas, la desigualdad económica y las brechas regionales —particularmente entre el sur sureste y el norte del país— podrían agudizarse, limitando el alcance del bienestar social agregado.

9. CONCLUSIONES

Los indicadores macroeconómicos muestran a un México con estabilidad monetaria y financiera, crecimiento moderado y una ventana de oportunidad abierta por la relocalización de las cadenas de suministro. Sin embargo, la economía enfrenta desafíos estructurales profundos: un potencial de crecimiento limitado por la baja productividad, la informalidad, la violencia y las brechas regionales, por otro lado, el comportamiento reciente de los indicadores macroeconómicos muestra una economía mexicana estable, aunque con bajo dinamismo estructural. En materia de crecimiento, el PIB refleja una desaceleración después del rebote pospandemia, lo que confirma la necesidad de elevar la productividad y la inversión. En inflación, la trayectoria descendente indica avances hacia la meta del Banco de México, aunque persisten riesgos asociados al tipo de cambio, energéticos y choques externos. En política monetaria, el ciclo de tasas altas contribuyó a contener las presiones inflacionarias, pero también moderó el crédito y la inversión. En el tipo de cambio, la fortaleza relativa del peso ha favorecido la estabilidad de precios, aunque genera efectos diferenciados sobre exportadores y receptores de remesas. En el mercado laboral, la baja desocupación contrasta con la persistencia de la informalidad y las brechas regionales. En las finanzas públicas, el déficit y las presiones sobre empresas públicas exigen prudencia fiscal. Finalmente, el sector externo y la IED muestran una oportunidad asociada al nearshoring, pero su impacto dependerá de la capacidad del país para fortalecer infraestructura, energía, proveeduría local, seguridad y desarrollo regional. Como advierten [Moreno-Brid y Ros \(2010\)](#), sin reformas que impulsen la inversión pública y privada, la educación y la innovación, difícilmente se logrará un crecimiento incluyente y sostenido. La ciudadanía, al comprender estos indicadores, no solo descifra el entorno económico, sino que puede participar de manera más informada en el debate público y exigir políticas basadas en evidencia.

DECLARACIONES

El autor declara no tener conflictos de interés.

El autor declara que no utilizó Inteligencia Artificial tradicional y/o Generativa en la redacción de este artículo.

REFERENCIAS

- Banco de México. (2023). *Informe trimestral, julio-septiembre 2023*. <https://www.banxico.org.mx/publicaciones-y-prensa/informes-trimestrales/informes-trimestrales-precios.html>
- Banco de México. (2024). *Encuesta sobre las expectativas de los especialistas en economía del sector privado, marzo de 2024*. <https://www.banxico.org.mx/publicaciones-y-prensa/encuestas-sobre-las-expectativas-de-los-especialis/encuestas-expectativas-del-se.html>
- Cárcamo Solís, M. L., & Arroyo López, M. P. E. (2022). La evolución de la inflación en México. *Economía UNAM*, 19(57), 22–40. <https://repositorio.unam.mx/contenidos/evolucion-de-la-inflacion-en-mexico-4137569>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2024). *Estudio económico de América Latina y el Caribe 2024: México*. Naciones Unidas. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/80595-estudio-economico-america-latina-caribe-2024-trampa-crecimiento-cambio-climatico>
- Comisión Nacional de los Salarios Mínimos. (2023). *Resolución del Consejo de Representantes para la fijación de los salarios mínimos generales y profesionales 2024*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/conasami>
- Esquivel, G. (2024). Avances en el combate a la pobreza en México, 2018–2022. *Revista de Economía Mexicana. Anuario UNAM*, (9), 39–63. <https://www.economia.unam.mx/assets/pdfs/econmex/09/02GerardoEsquivel.pdf>
- Fondo Monetario Internacional. (2024). *Perspectivas de la economía mundial, abril de 2024*. <https://www.elibrary.imf.org/display/book/9798400257629/9798400257629.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2021). *Producto interno bruto, series anuales, base 2013*.

<https://www.inegi.org.mx/programas/pibact/2013/#Tabulados>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2024). *Índice nacional de precios al consumidor; marzo de 2024; Encuesta nacional de ocupación y empleo, primer trimestre de 2024*. <https://www.inegi.org.mx>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2025). *Producto interno bruto de México, datos anuales 2025*. <https://www.inegi.org.mx>

Moreno-Brid, J. C. (2016). Política macro e industrial para un cambio estructural y crecimiento: Gran pendiente de la economía mexicana. *Problemas del Desarrollo. Revista Latinoamericana de Economía*, 47(185), 59–80. <https://doi.org/10.1016/j.rpd.2015.10.013>

Moreno-Brid, J. C., & Ros, J. (2010). *Desarrollo y crecimiento en la economía mexicana: Una perspectiva histórica*. Fondo de Cultura Económica.

Secretaría de Economía. (2024). *Inversión extranjera directa en México, cifras preliminares 2023*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/se/acciones-y-programas/competitividad-y-normatividad-inversion-extranjera-directa>

Secretaría de Hacienda y Crédito Público. (2024). *Informes sobre la situación económica, las finanzas públicas y la deuda pública, primer trimestre 2024*. https://www.finanzaspublicas.hacienda.gob.mx/es/Finanzas_Publicas/Informes_al_Congreso_de_la_Union

Seguridad alimentaria y nutricional con enfoque de género

EDÚ ORTEGA IBARRA^{1,*} | ILSE HAIDE ORTEGA IBARRA¹

¹ Universidad del Istmo, Oaxaca, México

* Correspondencia: eduortegaibarra@unistmo.edu.mx

Recibido: 03/06/2026

Revisado: 17/06/2026

Aceptado: 25/06/2026

Publicado: 08/07/2026

RESUMEN: Este ensayo sostiene que la seguridad alimentaria y nutricional con enfoque de género no debe entenderse como una categoría complementaria o secundaria de la política alimentaria, sino como una condición analítica y normativa indispensable para interpretar las desigualdades que determinan quién produce, compra, prepara, consume y decide sobre los alimentos. A partir de evidencia reciente de organismos internacionales, instituciones oficiales mexicanas y literatura académica, se argumenta que la inseguridad alimentaria no es solo un problema de disponibilidad o ingreso, sino una expresión de relaciones desiguales de poder que atraviesan el hogar, el mercado laboral, los sistemas agroalimentarios, la protección social, los cuidados y la gobernanza pública. La tesis central es que una política alimentaria que ignore el género puede aumentar coberturas, pero difícilmente reducirá de manera sostenida las causas estructurales de la inseguridad alimentaria y nutricional. Conceptualmente, se adopta una perspectiva relacional y transformadora del género, articulada con la economía del cuidado y la interseccionalidad, para examinar cómo normas, instituciones y relaciones de poder distribuyen de manera desigual recursos, tiempo, agencia y resultados nutricionales.

ABSTRACT: This essay argues that food and nutrition security with a gender perspective should not be understood as a complementary or secondary category of food policy, but as an indispensable analytical and normative condition for interpreting the inequalities that determine who produces, buys, prepares, consumes, and decides about food. Based on recent evidence from international organizations, Mexican official institutions, and academic literature, it maintains that food insecurity is not only a problem of availability or income, but an expression of unequal power relations that traverse households, labor markets, agrifood systems, social protection, care work, and public governance. The central thesis is that food policy that ignores gender may expand coverage but will hardly reduce the structural causes of food and nutrition insecurity in a sustained way. Conceptually, the essay adopts a relational and transformative gender perspective, linked to the care economy and intersectionality, to examine how norms, institutions, and power relations unequally distribute resources, time, agency, and nutritional outcomes.

Palabras clave: seguridad alimentaria, género, nutrición, cuidados, políticas públicas, interseccionalidad

1. INTRODUCCIÓN

Hablar de seguridad alimentaria y nutricional con enfoque de género exige desplazar la mirada desde la simple pregunta por la disponibilidad de alimentos hacia una discusión más incómoda: quién tiene poder para acceder a ellos, quién sacrifica su alimentación cuando los recursos son insuficientes, quién sostiene la reproducción cotidiana de la vida mediante trabajo doméstico y de cuidados, y quién participa realmente en las decisiones públicas sobre los sistemas alimentarios. La seguridad alimentaria no se agota en

la existencia física de alimentos en mercados, programas o territorios; implica condiciones materiales, sociales, culturales y políticas que permiten a las personas alimentarse con suficiencia, calidad, estabilidad y dignidad. Desde esta perspectiva, el género no es una variable decorativa, sino un eje de desigualdad que organiza recursos, responsabilidades y oportunidades.

La evidencia global reciente permite sostener esta afirmación con claridad. En 2024, alrededor de 2.3 mil millones de personas experimentaron inseguridad alimentaria moderada o severa, y 2.6 mil millones no

podieron costear una dieta saludable (FAO, IFAD, UNICEF, et al., 2025). En el mismo año, la inseguridad alimentaria moderada o severa afectó más a las mujeres adultas que a los hombres, 26.1 % frente a 24.2 %, lo que significó una brecha de 1.9 puntos porcentuales (UN Women, 2025a). La diferencia puede parecer reducida si se observa como porcentaje agregado, pero representa millones de vidas atravesadas por restricciones alimentarias, precariedad económica y desigual distribución de recursos. Por ello, el enfoque de género permite advertir que las cifras globales esconden jerarquías dentro de los hogares, territorios y mercados laborales.

El problema resulta especialmente relevante para América Latina y el Caribe. En 2023, la inseguridad alimentaria moderada o severa fue de 30.3 % en mujeres adultas y 25.1 % en hombres adultos, una brecha regional de más de cinco puntos porcentuales (UN Women, 2024). Para 2024, los organismos regionales reportaron una disminución general de la inseguridad alimentaria en América Latina y el Caribe, pero también señalaron que la brecha de género persistía como un desafío significativo, con una prevalencia 5.3 puntos porcentuales mayor entre mujeres que entre hombres (FAO, IFAD, PAHO, et al., 2025; IFAD, 2026). Así, la mejora promedio no elimina la desigualdad: una región puede avanzar en indicadores generales y, al mismo tiempo, conservar brechas profundas cuando sus políticas no modifican las relaciones sociales que producen vulnerabilidad.

En México, el asunto adquiere una expresión concreta. De acuerdo con CONEVAL, en 2022 el 66.1 % de la población mexicana presentó seguridad alimentaria; el resto se distribuyó entre inseguridad alimentaria leve, moderada o severa. Además, la carencia por acceso a la alimentación nutritiva y de calidad fue de 18.2 % a nivel nacional, pero llegó a 35.9 % en hogares de jefatura femenina en situación de pobreza, frente a 31.7 % en hogares de jefatura masculina en pobreza (CONEVAL, 2024a, 2024b). Esta diferencia confirma que el género se articula con la pobreza y la organización del hogar. No basta con identificar hogares pobres; es necesario analizar cómo se distribuyen las cargas económicas, alimentarias y de cuidado dentro de ellos.

La postura de este ensayo es que la seguridad alimentaria y nutricional con enfoque de género debe asumirse como un principio de justicia alimentaria y de gobernanza pública. No se trata únicamente de incorporar mujeres como beneficiarias de programas, sino de reconocerlas como sujetas de derechos, productoras, cuidadoras, consumidoras, gestoras comunitarias y actoras políticas. Una política alimentaria sensible al género debe preguntarse por la autonomía económica, el acceso a recursos productivos, la carga de cuidados, la calidad de la dieta, la salud materno-infantil, la violencia estructural, la participación social y la producción de

datos desagregados. Sin estos elementos, las intervenciones pueden aliviar síntomas, pero no transformar las causas de la inseguridad alimentaria.

2. DELIMITACIÓN CONCEPTUAL DEL ENFOQUE DE GÉNERO, LOS CUIDADOS Y LA INTERSECCIONALIDAD

En este ensayo, el enfoque de género se entiende como una perspectiva analítica que examina cómo las diferencias socialmente construidas entre mujeres, hombres y otras identidades se convierten en jerarquías, normas y relaciones de poder. Scott (1986) propuso el género como elemento constitutivo de las relaciones sociales basadas en diferencias percibidas entre los sexos y como una forma primaria de significar el poder; posteriormente insistió en su utilidad crítica para interrogar cómo se producen y cambian las categorías de “mujeres” y “hombres” (Scott, 2010). En el plano institucional, la transversalización de género implica valorar las consecuencias diferenciadas de toda política o programa e integrar esas experiencias en su diseño, ejecución, seguimiento y evaluación (Consejo Económico y Social de las Naciones Unidas [ECOSOC], 1997).

Aplicado a la seguridad alimentaria y nutricional, este enfoque no consiste únicamente en desagregar datos por sexo ni en añadir a las mujeres como grupo beneficiario. Exige analizar quién posee y controla tierra, ingresos, crédito, tecnología e información; quién dispone de tiempo; quién decide dentro del hogar y de las organizaciones; quién asume los costos de cuidado; y quién obtiene los beneficios materiales y simbólicos del sistema alimentario. La literatura distingue entre intervenciones sensibles al género, que reconocen necesidades y efectos diferenciados, e intervenciones transformadoras, que buscan modificar normas, instituciones y asimetrías de poder que reproducen la desigualdad (Njuki et al., 2022; Pyburn et al., 2023; Quisumbing et al., 2023).

Los cuidados constituyen una dimensión sustantiva de esta perspectiva. Tronto (2013) los sitúa como una actividad social y política indispensable para sostener, continuar y reparar el mundo común, no como una disposición privada atribuible naturalmente a las mujeres. Fraser (2016) advierte que los sistemas económicos dependen del trabajo de reproducción social al mismo tiempo que lo desvalorizan y erosionan; en América Latina y el Caribe, la CEPAL (2022) ha propuesto avanzar hacia una sociedad del cuidado que reconozca su carácter colectivo y lo redistribuya entre Estado, mercado, comunidades, hogares, mujeres y hombres. En seguridad alimentaria, esta mirada permite comprender que cocinar, alimentar, acompañar, limpiar, acarrear agua o cuidar durante la enfermedad son condiciones materiales de la nutrición y no tareas domésticas externas a la política pública.

La interseccionalidad complementa esta delimitación. Crenshaw (1989) mostró que las desigualdades no operan como categorías aisladas ni como una simple suma de desventajas; se producen en la interacción de sistemas de poder. Collins y Bilge (2020) la conciben como una forma de investigación y praxis crítica orientada a explicar la complejidad social, mientras que Hankivsky et al. (2014) la traducen a preguntas de política sobre quién define el problema, qué grupos quedan invisibilizados y cómo se distribuyen privilegios y cargas. En los sistemas alimentarios, género, clase, pertenencia étnica, ruralidad, edad, discapacidad, condición migratoria y estructura del hogar pueden combinarse de manera específica; por ello, no existe una experiencia femenina homogénea (Tavener et al., 2022).

En consecuencia, la expresión “seguridad alimentaria y nutricional con enfoque de género” se utiliza aquí para designar un análisis relacional, interseccional y orientado a la transformación. Su unidad de análisis no son solo las mujeres, sino las relaciones e instituciones que distribuyen recursos, responsabilidades, agencia, riesgos y resultados alimentarios. Los cuidados y la interseccionalidad no son temas laterales, sino herramientas para evitar políticas universalistas que traten como iguales situaciones estructuralmente desiguales.

3. LA INSEGURIDAD ALIMENTARIA COMO DESIGUALDAD ESTRUCTURAL

La inseguridad alimentaria suele narrarse como escasez, pero su explicación más profunda se encuentra en la desigualdad. El hambre, la mala alimentación y la imposibilidad de acceder a dietas saludables no son fenómenos naturales; se producen en sistemas económicos, sociales y políticos que asignan de forma diferenciada ingresos, tiempo, derechos, información y poder. Por ello, cuando los organismos internacionales reportan que 2.6 mil millones de personas no pudieron costear una dieta saludable en 2024, el dato no debe interpretarse solo como insuficiencia de oferta, sino como señal de una crisis de acceso económico y de distribución del bienestar (FAO, IFAD, UNICEF, et al., 2025). La alimentación adecuada depende del precio de los alimentos, del ingreso disponible, de la estabilidad laboral, de la protección social y de la capacidad efectiva de decidir qué se compra, qué se cocina y quién come primero.

El enfoque de género permite mirar esas decisiones cotidianas como parte de una economía moral y material del hogar. En muchos contextos, las mujeres son responsables de administrar presupuestos alimentarios insuficientes, preparar alimentos, cuidar niñas, niños, personas mayores o enfermas, y sostener prácticas de alimentación familiar. Sin embargo, esa centralidad no siempre se acompaña de autonomía económica, propiedad de activos, ingreso propio o

participación en decisiones comunitarias. La paradoja es evidente: quienes sostienen buena parte de la alimentación cotidiana pueden ser quienes tienen menor poder para garantizar su propia seguridad alimentaria.

Esta lectura también obliga a distinguir entre acceso nominal y control efectivo. Kabeer (1999) conceptualiza el empoderamiento mediante la relación entre recursos, agencia y logros: disponer de un ingreso o participar en una actividad productiva no equivale automáticamente a poder decidir sobre sus usos ni a transformar las reglas que restringen las opciones. En el campo alimentario, por tanto, deben observarse simultáneamente la titularidad de activos, la capacidad de negociación, la toma de decisiones y los resultados de bienestar, evitando inferir empoderamiento únicamente a partir de la presencia de mujeres en programas o cadenas de valor.

La FAO ha señalado que las brechas de género en los sistemas agroalimentarios limitan tanto los derechos de las mujeres como la eficiencia y sostenibilidad de dichos sistemas. El informe *The Status of Women in Agrifood Systems* sostiene que las mujeres participan de manera amplia en los sistemas agroalimentarios, pero enfrentan restricciones persistentes en empleo, ingresos, acceso a activos, servicios, tecnología y liderazgo (FAO, 2023). Esta evidencia resulta central para un argumento de política pública: mejorar la seguridad alimentaria exige transformar las condiciones en las que las mujeres producen y reproducen la vida alimentaria, no solo entregar alimentos o transferencias temporales.

La desigualdad también se expresa en la forma en que las crisis afectan de manera diferenciada. La inflación alimentaria, los fenómenos climáticos, las emergencias sanitarias y los conflictos no golpean a una población abstracta; impactan con mayor fuerza a quienes ya tienen menos activos, menor protección y mayor carga de cuidados. SOFI 2025 subraya que la inflación elevada de los alimentos ha debilitado el poder adquisitivo y el acceso a dietas saludables, especialmente entre poblaciones de bajos ingresos (FAO, IFAD, UNICEF, et al., 2025). Si las mujeres tienen mayor probabilidad de encontrarse en empleos informales, recibir menores ingresos o dedicar más tiempo al trabajo no remunerado, entonces las crisis alimentarias se convierten también en crisis de género.

Este punto obliga a cuestionar las respuestas tradicionales. Una política que mide solo toneladas de alimentos distribuidos o número de despensas entregadas puede registrar avances administrativos sin cambiar el fondo del problema. El enfoque de género exige indicadores que revelen autonomía económica, control de recursos, tiempo destinado a cuidados, diversidad dietética, participación en decisiones y exposición a vulnerabilidades interseccionales. En otras palabras, la pregunta no es únicamente cuántas personas reciben apoyo, sino si

ese apoyo reduce desigualdades o las administra sin alterarlas.

4. MUJERES, SISTEMAS AGROALIMENTARIOS Y PODER DE DECISIÓN

Las mujeres no solo son consumidoras o beneficiarias de políticas alimentarias; son actoras centrales de los sistemas agroalimentarios. UN Women reportó que los sistemas agroalimentarios emplean al 36 % de las mujeres y al 38 % de los hombres a nivel mundial; en regiones como África subsahariana y Asia meridional, la participación femenina en agricultura alcanza 66 % y 71 %, respectivamente (UN Women, 2024). Aunque estas cifras se refieren al escenario global, permiten reconocer una regularidad relevante, la participación femenina en la producción y transformación de alimentos no garantiza por sí misma igualdad de condiciones. Trabajar en el sistema alimentario no significa necesariamente controlar ingresos, activos, tecnologías, créditos, tierra o decisiones.

La diferencia entre participación y poder es fundamental. Muchas políticas celebran el papel de las mujeres rurales, campesinas, indígenas o comunitarias, pero no siempre les otorgan condiciones reales para decidir. El Gender Snapshot 2024 señaló que más del 75 % de las políticas agrícolas reconocen el papel de las mujeres, pero solo 19 % incorporan la igualdad de género o los derechos de las mujeres como objetivos explícitos, y apenas 13 % promueven la participación de mujeres rurales en la formulación de políticas (UN Women, 2024). Esta brecha entre reconocimiento discursivo e incorporación sustantiva es uno de los nudos centrales de la gobernanza alimentaria contemporánea.

En términos argumentativos, reconocer a las mujeres sin modificar las reglas de acceso al poder es una forma limitada de inclusión. La política pública puede nombrar a las mujeres, fotografiarlas, convocarlas a talleres o incluirlas en diagnósticos, pero si no cambia su capacidad para acceder a tierra, financiamiento, mercados, asistencia técnica, protección social y órganos de decisión, la inclusión se vuelve simbólica. De ahí que el enfoque de género en seguridad alimentaria deba vincularse con derechos, presupuestos, reglas de operación, participación comunitaria y mecanismos de rendición de cuentas.

Las revisiones recientes corroboran que participación, beneficio y empoderamiento no son equivalentes. Una intervención puede alcanzar a mujeres y mejorar ingresos sin alterar quién controla esos ingresos, cómo se distribuye el trabajo o qué normas limitan su voz. Quisumbing et al. (2023) subrayan que la medición debe incorporar la agencia y combinar métodos cuantitativos y cualitativos, mientras que Njuki et al. (2022) identifican como prioridades el liderazgo, la toma de decisiones, el acceso a recursos y el cambio de normas. Por ello, el

éxito de una política alimentaria no debería medirse solo por cobertura femenina, sino por su capacidad para ampliar opciones estratégicas y redistribuir poder.

Cerrar brechas de género tiene, además, implicaciones alimentarias y económicas medibles. FAO estimó que cerrar las brechas de género en productividad agrícola y salarios dentro de los sistemas agroalimentarios podría aumentar el producto interno bruto mundial en casi un billón de dólares y reducir la inseguridad alimentaria en 45 millones de personas (FAO, 2023). UN Women retomó esta estimación para enfatizar que invertir en igualdad de género dentro de los sistemas alimentarios no es un asunto marginal, sino una estrategia de desarrollo sostenible (UN Women, 2025b). La igualdad, por tanto, no debe defenderse únicamente por sus beneficios económicos, pero estos ayudan a demostrar que la desigualdad también es ineficiente y costosa.

La agenda de derechos sobre tierra y activos productivos refuerza esta idea. El Banco Mundial ha destacado que los derechos de las mujeres sobre vivienda, tierra y propiedad son activos centrales para la generación de riqueza, la reducción de pobreza y la autonomía económica (World Bank, 2026). Cuando las mujeres carecen de seguridad en la tenencia de la tierra o control sobre recursos productivos, su capacidad para producir alimentos, invertir, acceder a crédito o resistir crisis se reduce. La seguridad alimentaria con enfoque de género, entonces, no puede limitarse a nutrición clínica o asistencia alimentaria; debe dialogar con políticas agrarias, laborales, financieras, educativas, tecnológicas y de protección social.

5. CUIDADOS, TIEMPO Y ALIMENTACIÓN: LA DIMENSIÓN INVISIBLE

Una de las aportaciones más importantes del enfoque de género es mostrar que la alimentación depende de una infraestructura invisible, el tiempo de cuidado. Comprar, seleccionar, almacenar, preparar, servir y limpiar después de comer son actividades indispensables para transformar alimentos disponibles en alimentación efectiva. Sin embargo, estas tareas suelen recaer de manera desproporcionada en las mujeres y rara vez se reconocen como parte de la seguridad alimentaria. El hogar no es solo una unidad de consumo, sino un espacio donde se produce bienestar mediante trabajo no remunerado.

Los datos mexicanos son contundentes. INEGI e INMUJERES reportaron que, en 2022, 21.7 millones de mujeres y 6.7 millones de hombres de 15 años y más brindaron apoyo o cuidados a personas del hogar. Además, 28.8 % de las mujeres cuidadoras señaló que las responsabilidades de cuidado le impedían trabajar fuera del hogar, frente a 8.0 % de los hombres (INEGI

& INMUJERES, 2025). Estos datos son decisivos para comprender la seguridad alimentaria, cuando las mujeres tienen menos tiempo para empleo remunerado, educación, descanso o autocuidado, también disminuye su autonomía económica y su capacidad de sostener dietas saludables para ellas y sus familias.

Desde la ética política del cuidado, el problema no es únicamente cuánto tiempo dedican las mujeres, sino quién tiene la posibilidad de transferir cuidados y quién los recibe en condiciones dignas. Tronto (2013) señala que una democracia del cuidado exige distribuir responsabilidades y reconocer la voz de quienes cuidan y de quienes requieren cuidado. En la misma dirección, la CEPAL (2022) plantea que las políticas deben reconocer, reducir y redistribuir el trabajo no remunerado, además de garantizar servicios, infraestructura y protección social. Trasladado a la seguridad alimentaria, ello supone comedores, agua y energía accesibles, servicios de cuidado, licencias, horarios compatibles y tecnologías que reduzcan cargas, sin sustituir la autonomía de las mujeres por nuevas obligaciones comunitarias.

La carga de cuidados no solo reduce ingresos; también puede afectar la calidad de la alimentación. Una mujer con jornadas extensas de cuidado, empleo informal y trabajo doméstico puede tener menos tiempo para preparar alimentos saludables, asistir a servicios de salud, descansar o alimentarse adecuadamente. La seguridad alimentaria, entonces, no depende únicamente de que exista comida en casa, sino de las condiciones de tiempo, energía y salud de quienes hacen posible la alimentación cotidiana. Por ello, una política alimentaria que no incorpore sistemas de cuidados corre el riesgo de depender precisamente del trabajo invisible que debería aliviar. Este argumento resulta relevante para México porque la pobreza por ingresos también presenta una expresión de género. En 2022, 29.8 millones de mujeres y 26.3 millones de hombres se encontraban por debajo de la línea de pobreza por ingresos (INEGI & INMUJERES, 2025). Aunque las diferencias porcentuales pueden variar según indicador, el número absoluto de mujeres con limitaciones económicas es mayor, lo que tiene implicaciones directas sobre el acceso a alimentos nutritivos. La alimentación saludable requiere dinero, pero también tiempo, información, agua, energía, transporte, mercados accesibles y redes de cuidado.

El enfoque de género permite, por tanto, unir dos debates que a menudo se tratan por separado: alimentación y cuidados. La nutrición pública ha insistido con razón en la importancia de dietas saludables, lactancia, alimentación complementaria y prevención de enfermedades crónicas. Sin embargo, esas recomendaciones pueden convertirse en mandatos injustos si se dirigen a mujeres sin considerar sus condiciones reales de vida. Pedir

mejores prácticas alimentarias sin redistribuir cuidados, garantizar ingresos o asegurar acceso a servicios puede terminar culpabilizando a quienes sostienen la alimentación en contextos de precariedad. Una política justa debe acompañar las recomendaciones nutricionales con condiciones materiales para cumplirlas.

6. MÉXICO: POBREZA, JEFATURA FEMENINA E INTERSECCIONALIDAD ALIMENTARIA

La situación mexicana muestra que la inseguridad alimentaria con enfoque de género debe analizarse de manera interseccional. CONEVAL informó que, en 2022, la carencia por acceso a la alimentación nutritiva y de calidad fue de 18.2 % a nivel nacional; sin embargo, se elevó a 35.9 % en hogares de jefatura femenina en situación de pobreza (CONEVAL, 2024a). Esta evidencia no debe interpretarse como una desventaja inherente de los hogares encabezados por mujeres, sino como resultado de desigualdades laborales, salariales, patrimoniales, de cuidados y protección social que limitan sus recursos disponibles.

En términos metodológicos, un análisis interseccional no consiste en añadir mecánicamente variables a una tabla ni en crear una lista ilimitada de identidades. Implica identificar qué relaciones de poder son relevantes en un contexto concreto, comparar cómo producen barreras o privilegios y permitir que los grupos afectados participen en la definición del problema. El marco de análisis de políticas basado en interseccionalidad propone revisar supuestos, categorías, evidencias y efectos distributivos (Hankivsky et al., 2014); Tavenner et al. (2022) muestran que esta aproximación evita tratar a “las mujeres rurales” como un grupo uniforme y mejora la pertinencia de las intervenciones agrícolas.

La jefatura femenina puede ser una categoría ambigua si se usa de forma aislada. En algunos casos expresa autonomía; en otros, ausencia de corresponsabilidad económica, viudez, separación, migración masculina, maternidad en condiciones precarias o responsabilidades de cuidado no compartidas. Por ello, su valor analítico aumenta cuando se cruza con pobreza, número de integrantes del hogar, ruralidad, pertenencia indígena, edad, acceso a servicios y apoyos sociales. El dato de CONEVAL permite identificar una vulnerabilidad importante, pero la política pública debe evitar convertirlo en estigma. La cuestión no es que las mujeres administren peor los recursos, sino que muchas veces administran escasez bajo condiciones desiguales.

La evidencia de la ENSANUT Continua 2020-2024 refuerza esta lectura. Mundo-Rosas et al. (2025) analizaron 39,251 hogares mexicanos y encontraron que más de la mitad presentó algún grado de inseguridad alimentaria; además, la inseguridad alimentaria moderada y severa se asoció con

inseguridad hídrica, jefatura femenina, no recibir apoyos sociales y tener más de cinco integrantes en el hogar. El hallazgo es importante porque muestra que la alimentación no puede separarse del acceso al agua, la protección social y la estructura familiar. Una dieta saludable requiere alimentos, pero también agua segura, infraestructura, ingreso y redes institucionales.

La dimensión étnica también es imprescindible. CONEVAL reportó que la población indígena tuvo una carencia por acceso a la alimentación nutritiva y de calidad de 30.5 %, frente a 16.8 % en población no indígena (CONEVAL, 2024a). Si esta brecha se cruza con género, ruralidad y pobreza, se advierte que las mujeres indígenas pueden enfrentar formas acumuladas de desigualdad. La seguridad alimentaria con enfoque de género, por tanto, no puede limitarse a comparar mujeres y hombres en abstracto. Debe reconocer diferencias entre mujeres, urbanas y rurales, indígenas y no indígenas, jóvenes y adultas mayores, con o sin discapacidad, migrantes, trabajadoras remuneradas, cuidadoras, productoras o jefas de hogar.

Para México, esta precisión obliga a evitar que la jefatura femenina, la pertenencia indígena o la ruralidad funcionen como etiquetas autosuficientes. Dos hogares encabezados por mujeres pueden disponer de activos, redes, servicios, autonomía y cargas de cuidado radicalmente distintas. La política debe combinar datos cuantitativos desagregados con evidencia cualitativa y participación territorial, porque la misma transferencia o recomendación nutricional puede producir efectos diferentes según lengua, movilidad, disponibilidad de agua, discapacidad, violencia, edad o acceso a mercados.

La interseccionalidad no es un adorno conceptual; es una exigencia técnica para diseñar mejores políticas. Si los programas alimentarios operan con categorías demasiado generales, pueden dejar fuera a quienes enfrentan barreras múltiples. Por ejemplo, una transferencia monetaria puede mejorar el acceso económico, pero ser insuficiente si no hay mercados cercanos con alimentos frescos, si el agua es insegura, si los precios son elevados o si la persona responsable del cuidado no tiene tiempo para preparar alimentos. En cambio, una política sensible al género y al territorio puede combinar ingreso, disponibilidad local, educación alimentaria no culpabilizante, infraestructura hídrica, apoyo a cuidados, mercados comunitarios y participación de mujeres en decisiones.

7. NUTRICIÓN, CALIDAD DE LA DIETA Y JUSTICIA ALIMENTARIA

La seguridad alimentaria y nutricional no se reduce a evitar hambre. El componente nutricional obliga a preguntar si la alimentación es adecuada, diversa, culturalmente pertinente, inocua y suficiente para

sostener una vida saludable. SOFI 2025 reportó que solo 34 % de niñas y niños de 6 a 23 meses alcanzaron una diversidad dietética mínima, mientras que 65 % de mujeres de 15 a 49 años alcanzaron dicho estándar (FAO, IFAD, UNICEF, et al., 2025). La cifra muestra que la calidad de la dieta sigue siendo un desafío global, especialmente en etapas de alta vulnerabilidad biológica como la primera infancia y la edad reproductiva.

El enfoque de género ayuda a evitar una lectura reduccionista de estos indicadores. Cuando se habla de mujeres en edad reproductiva, con frecuencia se enfatiza su función materna, pero una perspectiva de derechos debe reconocerlas también como personas con necesidades nutricionales propias, no solo como medios para mejorar la salud infantil. La salud materno-infantil es fundamental, pero no debe justificar que la alimentación de las mujeres sea valorada únicamente por su impacto en otras personas. La justicia alimentaria exige garantizar el derecho de las mujeres a una alimentación adecuada por su propia dignidad.

En América Latina y el Caribe, el panorama nutricional combina avances y contradicciones. El panorama regional reportó que en 2024 la inseguridad alimentaria moderada o severa afectó al 25.2 % de la población, por debajo del promedio global, pero también señaló que 181.9 millones de personas no podían costear una dieta saludable y que 141 millones de personas adultas vivían con obesidad (IFAD, 2026). Esta coexistencia entre reducción de hambre, dietas costosas y obesidad revela que la región enfrenta una doble carga, no basta con tener calorías disponibles, se requiere transformar entornos alimentarios, precios, publicidad, acceso físico a alimentos frescos y protección frente a dietas poco saludables.

Para las mujeres, esta doble carga puede adquirir expresiones específicas. La precariedad económica puede llevar a elegir alimentos más baratos, densos en energía y pobres en nutrientes. La falta de tiempo por cuidados puede favorecer soluciones rápidas, ultraprocesadas o menos diversas. La presión social sobre el cuerpo femenino puede coexistir con hambre, anemia, obesidad o trastornos alimentarios invisibilizados. Por ello, la seguridad alimentaria y nutricional con enfoque de género debe integrar salud pública, derechos alimentarios, regulación de entornos alimentarios y corresponsabilidad social del cuidado.

Desde esta perspectiva, la calidad de la dieta no puede ser presentada como una responsabilidad individual aislada. Las decisiones alimentarias se toman dentro de estructuras de precio, ingreso, tiempo, disponibilidad, cultura, publicidad, transporte y poder. Una política pública que recomienda comer mejor sin modificar esas estructuras produce una pedagogía moralizante, informa, pero no necesariamente transforma. En cambio, una política

de justicia alimentaria debe crear condiciones para que las recomendaciones sean posibles, especialmente para mujeres pobres, rurales, indígenas o cuidadoras.

8. GOBERNANZA ALIMENTARIA CON ENFOQUE DE GÉNERO

La seguridad alimentaria con enfoque de género también es un problema de gobernanza. No basta con tener programas; es necesario preguntar quién define prioridades, qué datos se usan, cómo se asignan presupuestos, qué actores participan, qué mecanismos de evaluación existen y cómo se corrigen desigualdades. La gobernanza alimentaria sensible al género supone pasar de la visión asistencial a una visión de derechos, participación y corresponsabilidad institucional.

Operacionalizar el enfoque requiere que cada programa explice una teoría de cambio de género: qué desigualdad busca modificar, mediante qué mecanismo, con qué recursos y cómo evitará efectos adversos. Además de cobertura por sexo, el monitoreo debería incluir control de ingresos y activos, participación sustantiva, autonomía en decisiones alimentarias, tiempo de trabajo remunerado y no remunerado, acceso a servicios de cuidado, diversidad dietética individual y percepción de agencia. Los indicadores deben interpretarse de forma contextual; como advierte Kabeer (1999), un logro observable no prueba por sí mismo que se haya ampliado la capacidad de elección, y Quisumbing et al. (2023) recomiendan integrar evidencia cuantitativa y cualitativa para comprender los procesos de empoderamiento.

La producción de datos es un primer componente. Sin datos desagregados por sexo, edad, territorio, pertenencia indígena, jefatura del hogar, discapacidad, condición socioeconómica y ruralidad, las brechas quedan ocultas. La evidencia analizada en este ensayo muestra que los datos desagregados permiten identificar patrones que los promedios nacionales no revelan, mayor prevalencia femenina global de inseguridad alimentaria, brechas regionales en América Latina y el Caribe, mayor carencia en hogares de jefatura femenina en pobreza, mayor vulnerabilidad de población indígena y asociación entre inseguridad alimentaria, inseguridad hídrica y jefatura femenina (CONEVAL, 2024a; FAO, IFAD, UNICEF, et al., 2025; Mundo-Rosas et al., 2025; UN Women, 2024, 2025a). Medir mejor no resuelve por sí mismo, pero permite gobernar con más precisión y menos ceguera institucional.

El segundo componente es la participación. Si las mujeres aparecen como beneficiarias, pero no como diseñadoras, evaluadoras o tomadoras de decisiones, la política alimentaria seguirá reproduciendo jerarquías. El dato de UN Women sobre políticas agrícolas es revelador, muchas reconocen a las

mujeres, pocas integran igualdad de género como objetivo explícito y aún menos promueven participación de mujeres rurales en la formulación de políticas (UN Women, 2024). La gobernanza con enfoque de género requiere consejos, comités, observatorios, consultas y mecanismos comunitarios donde las mujeres tengan voz efectiva, no solo presencia formal.

El tercer componente es presupuestario. Una política pública expresa sus prioridades en el presupuesto. Incorporar enfoque de género implica financiar cuidado, infraestructura alimentaria, acceso a agua, capacitación, asistencia técnica, crédito, activos productivos, salud nutricional, monitoreo y evaluación. También implica evitar que los programas descansen gratuitamente en el trabajo de las mujeres. Si una intervención alimentaria exige asistencia a reuniones, preparación comunitaria, distribución de alimentos o vigilancia nutricional sin reconocer tiempos y costos, puede aumentar la carga femenina mientras presume participación social.

El cuarto componente es la articulación intersectorial. Alimentación, salud, agricultura, educación, agua, protección social, trabajo, igualdad de género y desarrollo territorial no pueden operar como compartimentos aislados. La evidencia mexicana muestra que la inseguridad alimentaria se vincula con inseguridad hídrica y falta de apoyos sociales (Mundo-Rosas et al., 2025). La evidencia global muestra que la inflación alimentaria afecta el acceso a dietas saludables (FAO, IFAD, UNICEF, et al., 2025). La evidencia de género muestra que los cuidados limitan la inserción laboral de las mujeres (INEGI & INMUJERES, 2025). La respuesta, por tanto, debe ser integral.

Desde una mirada de gobierno electrónico y políticas públicas, el enfoque de género también puede fortalecerse mediante observatorios, sistemas de información interoperables, tableros de indicadores, mapas territoriales y mecanismos de transparencia. Sin embargo, la digitalización no debe confundirse con transformación. Un observatorio alimentario con enfoque de género debe evitar reproducir sesgos, debe incorporar datos desagregados, indicadores de cuidados, participación comunitaria, accesibilidad, pertinencia cultural y mecanismos de retroalimentación. La tecnología puede mejorar la toma de decisiones solo si responde a preguntas de justicia y no únicamente a criterios administrativos.

9. DE LA ASISTENCIA ALIMENTARIA A LA JUSTICIA ALIMENTARIA DE GÉNERO

La tesis central de este ensayo puede formularse de manera directa; sin igualdad de género, la seguridad alimentaria será siempre incompleta. La asistencia alimentaria puede ser necesaria en contextos de emergencia o pobreza, pero no debe confundirse con justicia alimentaria. Entregar alimentos no transforma

por sí mismo la distribución desigual del tiempo, el ingreso, la tierra, los cuidados, la participación política o la autonomía económica. Por ello, el enfoque de género exige pasar de políticas que atienden carencias a políticas que modifican relaciones de poder.

Este tránsito requiere al menos cinco cambios. El primero es conceptual: reconocer que la inseguridad alimentaria no es solo falta de alimentos, sino una manifestación de desigualdad estructural. El segundo es estadístico: producir y usar datos desagregados que permitan identificar brechas ocultas. El tercero es institucional: integrar igualdad de género en objetivos, reglas de operación, presupuestos y evaluaciones. El cuarto es territorial: atender diferencias rurales, urbanas, indígenas, comunitarias y regionales. El quinto es ético: dejar de responsabilizar individualmente a las mujeres por la alimentación familiar y asumir la alimentación como responsabilidad pública, social y compartida.

En la práctica, una agenda transformadora debería combinar: a) derechos sobre tierra y activos; b) empleo e ingresos dignos; c) sistemas públicos de cuidado, agua y energía; d) servicios de salud y nutrición culturalmente pertinentes; y e) participación vinculante y datos interseccionales. Estas medidas deben diseñarse con mujeres diversas y con mecanismos para involucrar a los hombres, las comunidades, el mercado y el Estado en la redistribución de responsabilidades. La evidencia disponible indica que mejorar recursos sin fortalecer agencia, o aumentar participación sin modificar normas y cargas, puede generar beneficios parciales e incluso intensificar el trabajo femenino (Njuki et al., 2022; Pyburn et al., 2023; Quisumbing et al., 2023).

La evidencia revisada muestra que el género atraviesa todos los componentes de la seguridad alimentaria. Afecta la disponibilidad cuando las mujeres producen alimentos sin acceso equitativo a recursos. Afecta el acceso cuando tienen menores ingresos o mayor pobreza por tiempo. Afecta la utilización biológica cuando su salud, nutrición y condiciones de cuidado son precarias. Afecta la estabilidad cuando las crisis económicas, climáticas o sanitarias golpean con mayor fuerza a hogares con menos activos y mayor carga doméstica. Por ello, el enfoque de género no es un agregado, sino una forma más precisa de comprender el sistema alimentario.

La reflexión también obliga a revisar el lenguaje de la política pública. Muchas intervenciones hablan de mujeres como población vulnerable. Si bien la vulnerabilidad puede describir exposición a riesgos, también puede oscurecer capacidades, saberes y agencia. Las mujeres no son vulnerables por ser mujeres; son vulnerabilizadas por estructuras que limitan su autonomía, recargan sobre ellas los cuidados, restringen su acceso a activos y reducen su participación en decisiones. Una política alimentaria

transformadora debe reconocer esta diferencia para no convertir la desigualdad en atributo personal.

En este sentido, la seguridad alimentaria y nutricional con enfoque de género debe dialogar con la soberanía alimentaria, el derecho a la alimentación, la economía del cuidado, la salud pública, la gobernanza territorial y la justicia social. Su horizonte no es solo reducir porcentajes de inseguridad alimentaria, sino construir condiciones para que todas las personas puedan alimentarse con dignidad sin que ello dependa del sacrificio silencioso de las mujeres.

10. CONCLUSIONES

La seguridad alimentaria y nutricional con enfoque de género permite comprender que la alimentación es un campo de disputa por recursos, tiempo, reconocimiento y poder. Las cifras recientes muestran que las mujeres enfrentan mayor inseguridad alimentaria que los hombres a escala global y regional; que en México los hogares de jefatura femenina en pobreza presentan mayores carencias alimentarias; que la inseguridad alimentaria se asocia con inseguridad hídrica, ausencia de apoyos y composición del hogar; y que las mujeres sostienen una proporción desmedida del trabajo de cuidados que hace posible la alimentación cotidiana. Estos datos no son fragmentos aislados, sino piezas de un mismo argumento: la desigualdad de género organiza las condiciones materiales de la alimentación.

La principal implicación es que las políticas alimentarias deben dejar de tratar a las mujeres únicamente como beneficiarias o responsables domésticas de la nutrición familiar. Deben reconocerlas como sujetas de derechos, productoras, cuidadoras, trabajadoras, tomadoras de decisiones y actoras políticas. Ello implica acceso a recursos productivos, ingresos, protección social, agua, servicios de salud, educación alimentaria no culpabilizante, sistemas de cuidado y participación real en la gobernanza alimentaria. También exige datos desagregados, evaluaciones sensibles al género y presupuestos capaces de sostener la transformación institucional.

El enfoque de género no compite con la seguridad alimentaria; la vuelve más rigurosa. Permite ver lo que los promedios ocultan, cuestionar lo que la asistencia normaliza y politizar lo que suele presentarse como responsabilidad privada. En última instancia, una sociedad alimentariamente segura no es aquella que solo dispone de alimentos, sino aquella que garantiza que el acceso a una dieta saludable, suficiente y culturalmente pertinente no dependa de desigualdades, silencios ni sacrificios invisibles. La justicia alimentaria, si quiere ser plena, debe ser también justicia de género.

En términos conceptuales, se concluye que el enfoque de género debe evaluarse por su capacidad crítica y transformadora: hacer visibles las relaciones de

poder, reconocer la infraestructura social de los cuidados y explicar la heterogeneidad mediante la interseccionalidad. Esta precisión evita confundir género con mujeres, cuidado con vocación femenina e interseccionalidad con acumulación aritmética de vulnerabilidades.

AGRADECIMIENTOS

No aplica.

DECLARACIONES

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Los autores declaran el uso de herramientas de Inteligencia Artificial, Tradicional y/o Generativa en la elaboración de este manuscrito, conforme a los lineamientos éticos de la revista.

No se generaron ni analizaron bases de datos originales en la elaboración del ensayo; se utilizaron fuentes documentales y estadísticas de acceso público debidamente referenciadas.

REFERENCIAS

Collins, P. H., & Bilge, S. (2020). *Intersectionality* (2nd ed.). Polity Press.

Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2022). *La sociedad del cuidado: Horizonte para una recuperación sostenible con igualdad de género*. Naciones Unidas. <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/48363>

Consejo Económico y Social de las Naciones Unidas. (1997). *Mainstreaming the gender perspective into all policies and programmes in the United Nations system* (Agreed Conclusions 1997/2). Naciones Unidas. <https://www.un.org/womenwatch/osagi/pdf/ECOSOCAC1997.2.PDF>

Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social. (2024a). *Estudio diagnóstico del derecho a la alimentación nutritiva y de calidad 2024*. https://www.coneval.org.mx/EvaluacionDS/PP/CEIPP/Documents/Informes/DIAGNOSTICO_ALIMENTACION-2024.pdf

Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social. (2024b, 11 de octubre). *Estudio diagnóstico y evaluación integral de la política social vinculada al derecho a la alimentación 2023–2024* [Comunicado de prensa].

https://www.coneval.org.mx/SalaPrensa/Comunicadosprensa/Documents/2024/Comunicado_14_Evaluacion_integral_alimentacion.pdf

Crenshaw, K. (1989). Demarginalizing the intersection of race and sex: A Black feminist critique of antidiscrimination doctrine, feminist theory and antiracist politics. *University of Chicago Legal Forum*, 1989(1), 139–167. <https://chicagounbound.uchicago.edu/uclf/vol1989/iss1/8>

Food and Agriculture Organization of the United Nations, International Fund for Agricultural Development, Pan American Health Organization, United Nations Children's Fund, & World Food Programme. (2025). *Latin America and the Caribbean: Regional overview of food security and nutrition 2024: Building resilience to climate variability and extremes for food security and nutrition*. FAO. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cd3877en>

Food and Agriculture Organization of the United Nations, International Fund for Agricultural Development, United Nations Children's Fund, World Food Programme, & World Health Organization. (2025). *The state of food security and nutrition in the world 2025: Addressing high food price inflation for food security and nutrition*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cd6008en>

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2023). *The status of women in agrifood systems*. <https://doi.org/10.4060/cc5343en>

Fraser, N. (2016). Contradictions of capital and care. *New Left Review*, 100, 99–117. <https://newleftreview.org/issues/ii100/articles/nancy-fraser-contradictions-of-capital-and-care>

Hankivsky, O., Grace, D., Hunting, G., Giesbrecht, M., Fridkin, A., Rudrum, S., Ferlatte, O., & Clark, N. (2014). An intersectionality-based policy analysis framework: Critical reflections on a methodology for advancing equity. *International Journal for Equity in Health*, 13, 119. <https://doi.org/10.1186/s12939-014-0119-x>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía, & Instituto Nacional de las Mujeres. (2025).

- Mujeres y hombres en México 2024*. INEGI. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/889463921318.pdf
- International Fund for Agricultural Development. (2026, 27 de febrero). *UN report: Latin America and the Caribbean advances in eradicating hunger for the fourth consecutive year*. <https://www.ifad.org/en/w/news/un-report-latin-america-and-the-caribbean-advances-in-eradicating-hunger-for-the-fourth-consecutive-year>
- Kabeer, N. (1999). Resources, agency, achievements: Reflections on the measurement of women's empowerment. *Development and Change*, 30(3), 435–464. <https://doi.org/10.1111/1467-7660.00125>
- Mundo-Rosas, V., Dolores-Maldonado, G., González-Moreno, A., Torres-Valencia, M. de los Á., Vizuet-Vega, N. I., Morales-Ruán, C., & Shamah-Levy, T. (2025). Inseguridad alimentaria en hogares mexicanos y factores asociados, Ensanut Continua 2020-2024. *Salud Pública de México*, 67(6), 658–666. <https://doi.org/10.21149/16999>
- Njuki, J., Eissler, S., Malapit, H. J. L., Meinzen-Dick, R., Bryan, E., & Quisumbing, A. (2022). A review of evidence on gender equality, women's empowerment, and food systems. *Global Food Security*, 33, 100622. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2022.100622>
- Pyburn, R., Slavchevska, V., & Kruijssen, F. (2023). Gender dynamics in agrifood value chains: Advances in research and practice over the last decade. *Global Food Security*, 39, 100721. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2023.100721>
- Quisumbing, A. R., Cole, S., Elias, M., Faas, S., Galiè, A., Malapit, H., Meinzen-Dick, R., Myers, E., Seymour, G., & Twyman, J. (2023). Measuring women's empowerment in agriculture: Innovations and evidence. *Global Food Security*, 38, 100707. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2023.100707>
- Scott, J. W. (1986). Gender: A useful category of historical analysis. *The American Historical Review*, 91(5), 1053–1075. <https://doi.org/10.1086/ahr/91.5.1053>
- Scott, J. W. (2010). Gender: Still a useful category of analysis? *Diogenes*, 57(1), 7–14. <https://doi.org/10.1177/0392192110369316>
- Tavener, K., Crane, T. A., Bullock, R., & Galiè, A. (2022). Intersectionality in gender and agriculture: Toward an applied research design. *Gender, Technology and Development*, 26(3), 385–403. <https://doi.org/10.1080/09718524.2022.2140383>
- Tronto, J. C. (2013). *Caring democracy: Markets, equality, and justice*. New York University Press.
- UN Women. (2024). *Progress on the Sustainable Development Goals: The gender snapshot 2024*. <https://www.unwomen.org/sites/default/files/2024-09/progress-on-the-sustainable-development-goals-the-gender-snapshot-2024-en.pdf>
- UN Women. (2025a). *SDG 2: Zero hunger*. <https://www.unwomen.org/en/resources/gender-snapshot/sdg-2>
- UN Women. (2025b). *Sustainable finance taxonomies with gender equality considerations*. <https://knowledge.unwomen.org/sites/default/files/2025-07/sustainable-finance-taxonomies-with-gender-equality-considerations-en.pdf>
- World Bank. (2026, April 27). *Secure land rights unlock women's economic potential*. <https://www.worldbank.org/en/results/2026/04/27/secure-land-rights-womens-economic-potential>

Análisis del efecto del ruido en la geometría de perfiles parabólicos: conicidad, enfoque y trazo de rayos

GRECIA CAJIGAS VELÁSQUEZ^{1,*} | VÍCTOR IVÁN MORENO OLIVA¹ | GABRIEL CASTILLO SANTIAGO¹

¹ División de Estudios de Posgrado, Universidad del Istmo, Campus Tehuantepec, Oaxaca, México.

* Correspondencia: cajigasv_grecia@outlook.com

Recibido: 04/06/2026

Revisado: 17/06/2026

Aceptado: 19/06/2026

Publicado: 08/07/2026

RESUMEN: Considerando sistemas ópticos ideales o sistemas formadores de imagen, las superficies parabólicas permiten la concentración de la radiación en un punto focal perfectamente bien definido; sin embargo, en superficies reales como las aplicaciones en concentradores solares, las superficies presentan inevitables imperfecciones que pueden describirse como perturbaciones o ruido geométrico. En este trabajo se propone una metodología numérica que integra la discretización de superficies parabólicas, la incorporación de ruido geométrico aditivo, el ajuste a modelos cónicos mediante mínimos cuadrados no lineales y el trazado exacto de rayos para analizar el efecto de perturbaciones geométricas sobre parámetros de conicidad y métricas de desempeño óptico. La integración de estas herramientas dentro de un esquema unificado permite cuantificar simultáneamente la variación de los parámetros geométricos inducida por el ruido superficial, lo que vuelve posible analizar la degradación del comportamiento óptico del sistema, que resulta importante en el diseño y análisis de dispositivos ópticos, donde el control de errores superficiales puede ser clave para garantizar un desempeño adecuado.

ABSTRACT: Considering ideal optical systems and image-forming systems, parabolic surfaces allow radiation to be concentrated at a well-defined focal point. However, in real-world applications, such as solar concentrators and surfaces exhibit unavoidable imperfections that can be described as geometric perturbations or geometric noise. In this work, a numerical methodology is proposed that integrates the discretization of parabolic surfaces, the incorporation of additive geometric noise, nonlinear least-squares fitting to conic models, and exact ray tracing to analyze the effect of geometric perturbations on conic parameters and optical performance metrics. The integration of these tools within a unified framework makes it possible to simultaneously quantify variations in geometric parameters induced by surface noise, enabling the analysis of the resulting degradation in the optical performance of the system. This approach is relevant for the design and analysis of optical devices, where the control of surface errors can be crucial to ensuring adequate performance.

Palabras clave: Ruido aleatorio, Superficie cónica, Comportamiento óptico, Trazo de rayos, Metodología numérica

1. INTRODUCCIÓN

En el campo del diseño de sistemas ópticos por reflexión, las superficies con perfiles cónicos, en particular las parabólicas son muy importantes por una razón particular, su capacidad de concentrar los rayos que inciden paralelos a su eje en un mismo punto conocido como foco. Sin embargo, en la fabricación estas superficies difieren de su modelo ideal. Los procesos de fabricación a gran escala e incluso el desgaste resultante por estar expuestos a las condiciones ambientales producen pequeñas irregularidades o deformidades, estas irregularidades

a las que llamaremos ruido geométrico, modifican la trayectoria de los rayos reflejados y esto puede tener un impacto negativo notorio en la eficiencia de concentración o en la calidad de imagen.

En estos casos el método de trazado de rayos resulta una herramienta muy útil para evaluar la sensibilidad de los sistemas ópticos para este tipo de defectos, porque consiste en evaluar la relación directa entre los rayos reflejados en la superficie mediante cambios diferenciales en su posición y el vector direccional (Liao, 2009).

Algunas investigaciones enfocadas en el análisis del error por la trayectoria de los rayos para concentradores parabólicos son las de Lee (2014) y Liao (2009), en la primera se aplicó una matriz de transformación, las leyes de reflexión y refracción y consideró errores en la traslación y rotación para el rayo de luz, la segunda se enfocó en concentradores solares por lo que se tomó en cuenta los errores de pendiente, geométricos, ópticos y errores por el rayo reflejado a partir de la dispersión de la luz, ambos métodos proporcionan un medio para analizar el rendimiento de sistemas ópticos, el primero de manera matemática y el segundo de manera aplicada en un sistema.

Cuando se trata de concentradores solares hay otros factores que deben tomarse en cuenta, Fasquelle et al. (2024) realizaron un estudio para un modelo de reflector Scheffler, evaluaron la importancia del posicionamiento y el ajuste del reflector-receptor para obtener el máximo rendimiento con una modelación matemática que involucra la distancia focal, la inclinación del plano de apertura y el área de la superficie, ellos encontraron que facetas planas de 0.1×0.1 m producen imágenes focales más grandes que con parábolas continuas, resaltando que el diseño geométrico previo a la construcción de concentradores solares es una fase importante para asegurar la eficiencia.

Los estudios enfocados en la reconstrucción de superficies han implementado diversos métodos. El desarrollado por Thompson et al. (2016) consistió en un modelo matemático basado en optimización numérica y ajuste mediante mínimos cuadrados no lineales; Křen (2017) por su parte aplicó un algoritmo para caracterizar superficies, utilizando un ajuste por mínimos cuadrados lineales iterativos. Ambos estudios lograron reconstrucciones con errores mínimos; además, el segundo obtuvo resultados precisos incluso cuando la superficie presentaba rotaciones, desplazamientos y ruido en los datos.

Para analizar la geometría de las superficies es necesario pasar por un proceso de ajuste, en el que el modelo base puede ser el de una cónica general; sin embargo, dentro de las superficies cónicas existe una fuerte correlación entre los parámetros del radio de curvatura y la constante cónica, que fue demostrada en la investigación de Pérez-Escudero et al. (2010) al tomar una superficie ideal, introducir ruido gaussiano y repetir el ajuste para diferentes configuraciones, por lo que esta correlación es geométrica y no experimental.

A diferencia a los trabajos enfocados en el análisis del error angular de los rayos o en la reconstrucción geométrica de superficies, esta investigación propone una metodología numérica que integra la

discretización de superficies parabólicas, la incorporación de perturbaciones geométricas controladas, el ajuste a modelos cónicos y el trazo de rayos exacto. Esta integración permite analizar el efecto del ruido geométrico sobre parámetros geométricos de la superficie, como la constante de conicidad y el radio de curvatura, así como sobre indicadores de desempeño óptico asociados a la calidad de enfoque y concentración.

El objetivo de este trabajo es desarrollar e implementar una metodología numérica para evaluar la sensibilidad de perfiles parabólicos frente a perturbaciones geométricas aleatorias mediante técnicas de ajuste cónico y trazado de rayos.

En la Sección 2 se describen las ecuaciones que permiten realizar una modelación para el trazo exacto de rayos en un perfil parabólico, en la Sección 3 se presentan la metodología que se construye con las ecuaciones para realizar la discretización del perfil, la adición del modelo de ruido aleatorio aditivo y el método de ajuste a una superficie cónica por mínimos cuadrados, en la Sección 4 se presentan las gráficas de los resultados obtenidos y en la Sección 5 las conclusiones.

2. MARCO TEÓRICO

Cuando se habla de una superficie óptica esta no se limita únicamente a una forma esférica, puede ser también una superficie cónica de revolución. Un perfil cónico es el resultado de realizar cortes geométricos con un plano en la superficie formada por los dos conos, una superficie cónica con simetría rotacional se puede generar desde un perfil cónico que rota alrededor de un eje. Una forma de representar una superficie cónica con simetría de revolución (Malacara, 2015) se presenta en la Ec. (1):

$$f(y,z) = \frac{c S^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2 S^2}} \quad (1)$$

donde $S^2 = x^2 + y^2$, $c = \frac{1}{r}$, r es el radio de curvatura y k es la constante cónica ($k < -1$ hipérbola, $k = -1$ parábola, $k > -1$ elipse, $k = 0$ circunferencia).

En la Figura 1 se muestran los perfiles de varias superficies cónicas que tienen la misma curvatura, pero diferentes constantes de conicidad.

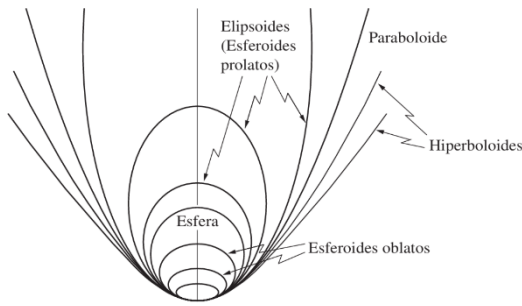


Figura 1. Superficies cónicas con la misma curvatura de vértice y diferentes constantes de conicidad. Fuente: Malacara (2015, p. 46)

Existen varios tipos de ruido (Woolf, 2022), los más utilizados son: El ruido estadístico, se refiere a la variabilidad aleatoria en un conjunto de datos que interfieren con la identificación de patrones o señales subyacentes, y pueden surgir de diferentes fuentes. El ruido gaussiano, no depende del tiempo, es aleatorio y no es sistémico. Ruido derivativo, se correlaciona con el tiempo, pero tiene un movimiento aleatorio. Y ruido de disparo, consiste en ráfagas esporádicas y cortas de ruido, y la amplitud entre ráfagas suelen ser similares.

El trazo exacto de rayos es una técnica basada en óptica geométrica, que permite analizar el comportamiento de la luz al interactuar con sistemas constituidos por superficies con propiedades de interés, como espejos o lentes (Pérez Enciso, 2015). Un rayo de luz es la representación de la dirección en la que la energía de una onda de luz se propaga (Malacara, 2015), y el principio del trazo de rayos consiste en asumir y representarlos como líneas rectas siguiendo la trayectoria que recorren al ir de un punto a otro. Este método permite simplificar el análisis del recorrido. Para aplicarlo es necesario definir dónde va a estar situada la fuente de luz y el medio que la rodea, se traza el rayo siguiendo la trayectoria marcada hasta interceptar con la superficie, donde se calcula el resultado aplicando leyes físicas de reflexión o refracción, el proceso se repite para n cantidad de rayos y se analiza el comportamiento.

Las ecuaciones utilizadas para el trazo de rayos en una superficie parabólica se presentan en las Ec. (2-4):

$$\vec{n} = \nabla f(x_0, y_0, z_0) = \left(-1, \frac{\partial f}{\partial y}, \frac{\partial f}{\partial x}\right) \quad (2)$$

$$\vec{r}_i = \{-1, 0, 0\} \quad (3)$$

$$\vec{r}_r = \vec{r}_i - 2(\vec{r}_i \cdot \vec{n})\vec{n} \quad (4)$$

donde $\vec{n}$ es el vector normal a la superficie parabólica, $\vec{r}_i$ corresponde al vector del rayo incidente que, para este caso en particular, se considera totalmente paralelo al eje X, sin ningún efecto sobre el ángulo de incidencia.

$\vec{r}_r$ corresponde a la expresión del rayo reflejado en su forma vectorial, que involucra el producto punto del rayo incidente y la normal $\vec{n}$ previamente normalizada para cada punto de contacto en la superficie.

3. METODOLOGÍA

La metodología desarrollada se estructuró en cuatro etapas principales. Inicialmente se generó una representación discreta de la superficie parabólica mediante una distribución uniforme de puntos. Posteriormente se incorporaron perturbaciones geométricas aleatorias de amplitud controlada para simular desviaciones respecto a la geometría ideal; las superficies resultantes fueron ajustadas a un modelo cónico mediante mínimos cuadrados no lineales con el fin de estimar sus parámetros geométricos característicos. Finalmente, se realizó el trazo exacto de rayos sobre las superficies obtenidas para analizar la influencia de las modificaciones inducidas en el comportamiento de enfoque y concentración.

3.1 DISCRETIZACIÓN DE SUPERFICIE

Para abordar el análisis del trazo exacto de rayos en tres dimensiones es necesaria la discretización de la superficie, que consiste en muestrear la superficie completa en una nube de puntos de contacto donde incidirán los rayos, estos serán distribuidos uniformemente en toda la superficie efectiva mediante la generación de circunferencias con valores radiales, lo que permite obtener un conjunto finito de coordenadas. Para definir la estructura geométrica del muestreo se comienza partiendo de la Ec. (1) de la superficie cónica, con $k = -1$ para una superficie ideal con perfil parabólico y eje de rotación el eje X con un valor propuesto para el radio de curvatura r , la ecuación se reduce a

$$f(y, z) = \frac{y^2 + z^2}{2r} \quad (5)$$

Posteriormente se aplica una división en función a un número máximo y mínimo de radios de muestreo, para cada radio el número de puntos de muestreo se ajusta de forma proporcional a la longitud de la circunferencia, esta parametrización polar de la superficie está dada por

$$P(r, \phi) = (f(y, z), y, z) \quad (6)$$

donde $y = R \cos \phi$, $z = R \sin \phi$, con $0 \leq R \leq R_{max}$ donde R es el radio discreto y ϕ es el ángulo polar que toma valores de 0 a 2π . Así es como se obtiene un conjunto de circunferencias uniformemente distribuidas. El resultado del proceso se muestra en la Figura 2.

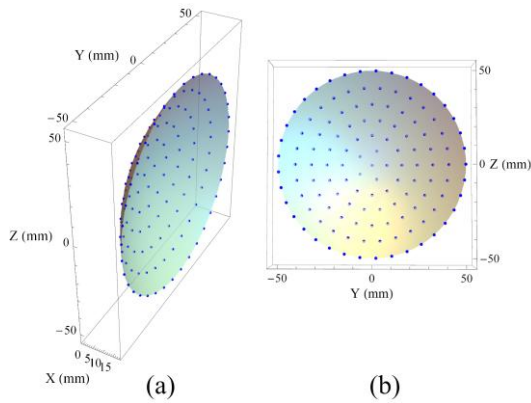


Figura 2. Discretización uniforme de la superficie. (a) Vista ortogonal. (b) Vista lateral.

3.2 IMPLEMENTACIÓN DE RUIDO ALEATORIO

En este trabajo se empleó como base el ruido uniforme aditivo, el modelo general se aplicó a las coordenadas de la nube de puntos $(f(y, z), y, z)$ adicionando ruido a lo largo del eje X, como

$$(f(y, z) + n_i, y, z), n_i \in [-A, A] \quad (7)$$

donde n_i corresponde a una variable que toma valores en el intervalo $[-A, A]$ de forma aleatoria, siendo A el máximo valor de amplitud del ruido (Banerjee et al., 2026).

Para el análisis en 3D se asumieron valores de A de $[-0.5, 0.5]$ mm, $[-1.5, 1.5]$ mm y $[-3.5, 3.5]$ mm, y para el análisis en 2D el intervalo de ruido se incrementó de 0.1 progresivamente entre 0 y 5 mm, que es un rango amplio para una simulación más realista, pero en el caso de este trabajo resulta conveniente puesto que el objetivo es analizar la variación en el foco, consecuencia directa del ruido geométrico. El ruido fue añadido al conjunto de datos correspondientes a la nube de los puntos de muestreo, posteriormente se realizó un ajuste a un modelo no lineal, que se explicará en la siguiente sección.

3.2 AJUSTE A UNA FUNCIÓN CÓNICA

El ajuste se realizó mediante el método de mínimos cuadrados no lineales, que consiste en definir el modelo no lineal, que en este caso se empleó la ecuación de una superficie cónica, Ec. (1) y se ajustó a la nube de datos de la superficie “con ruido”, aplicando el método de mínimos cuadrados para encontrar los valores de los parámetros que minimicen esta diferencia entre el modelo y los datos (Banerjee et al., 2026), estos parámetros estimados son la constante de conicidad k y el radio de curvatura r . Para realizar el ajuste a una superficie cónica, la Ec. (1) se reescribe como:

$$f(y, z) = \frac{y^2 + z^2}{r \left[1 + \sqrt{1 - (1 + k) \left(\frac{y^2 + z^2}{r^2} \right)} \right]} \quad (8)$$

4. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de la aplicación de la metodología propuesta anteriormente, este análisis de trayectoria de rayos y el comportamiento óptico permite evaluar el efecto de diferentes condiciones sobre la distribución de la energía reflejada.

4.1 TRAZO EN $\mathbb{R}^3$ SOBRE SUPERFICIE IDEAL

A continuación, se presenta el trazo de rayos en $\mathbb{R}^3$ para la superficie ideal generada a partir de la ecuación de la cónica. Por simplicidad visual los rayos incidentes fueron omitidos de las representaciones gráficas. Como se observa en la Figura 3, los rayos reflejados convergen en el punto focal, comportamiento que hace evidente la propiedad focal del perfil parabólico. El comportamiento es completamente ideal.

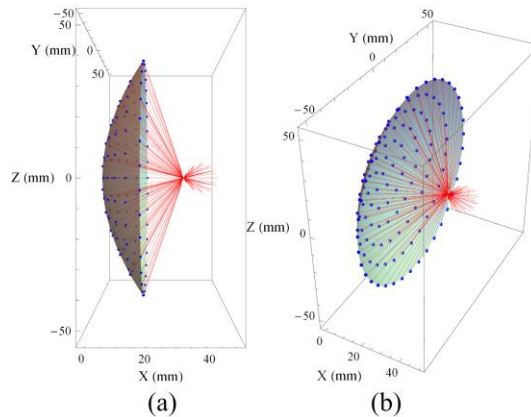


Figura 3. Trazo de rayos sobre una superficie parabólica ideal. (a) Vista frontal, (b) vista ortogonal.

4.2 TRAZO EN $\mathbb{R}^3$ SOBRE SUPERFICIE CON RUIDO ADITIVO

Se evaluaron tres niveles de ruido representativos de amplitudes A : (0.5, 1.5 y 3.5 mm) con la finalidad de observar y analizar el cambio en los rayos reflejados, comparándolos con el ideal. En la Figura 4 se muestra el trazo de rayos, añadiendo el factor de ruido de amplitud 0.5mm a la superficie reflectiva. Puede observarse que los rayos reflejados tienen un error poco notorio cualitativamente pero significativo en la concentración, existe, aunque es mínima una dispersión en la región de enfoque. Este comportamiento indica que pequeñas perturbaciones geométricas producen desviaciones locales, generando cambios acumulativos en la dirección de los rayos reflejados.

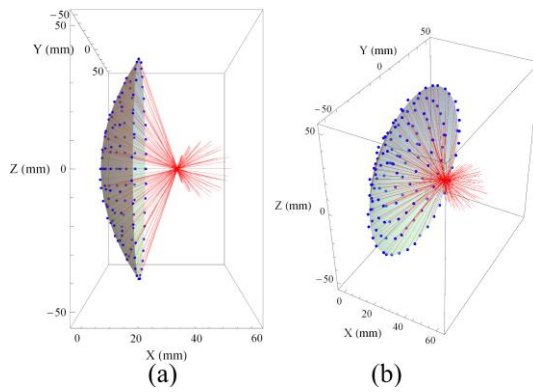


Figura 4. Trazo de rayos sobre una superficie parabólica con un ruido A de amplitud 0.5mm. (a) Vista frontal, (b) vista ortogonal.

En la **Figura 5** se aprecia el trazo de rayos para un nivel de ruido de amplitud 1.5 mm, la dispersión del foco es más notoria y esto trae como consecuencia una pérdida de precisión en la concentración importante. El incremento de la dispersión indica que el error geométrico comienza a modificar de manera significativa la distribución angular de los rayos reflejados, provocando una reducción en la densidad de la zona focal.

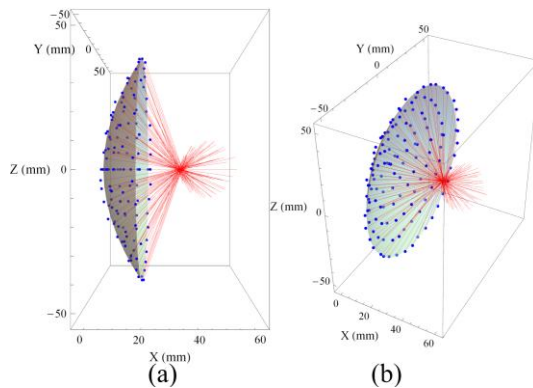


Figura 5. Trazo de rayos sobre una superficie parabólica con un ruido A de amplitud 1.5mm. (a) Vista frontal, (b) vista ortogonal.

La **Figura 6** muestra el trazo de rayos para un nivel de ruido geométrico de amplitud 3.5mm. La elevada dispersión indica que la geometría resultante se aleja significativamente de la condición parabólica ideal, y como consecuencia, la propiedad focal característica se degrada y los rayos reflejados dejan de converger.

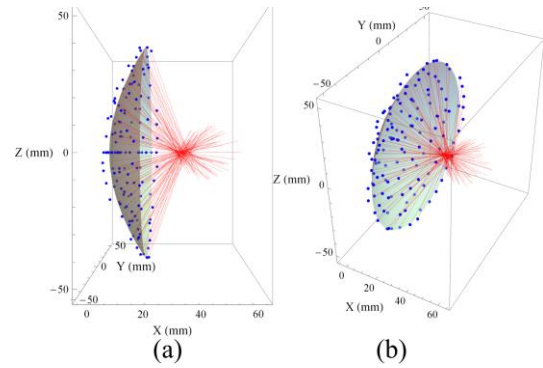


Figura 6. Trazo de rayos sobre una superficie parabólica con un ruido A de amplitud 3.5mm. (a) Vista frontal, (b) vista ortogonal.

4.3 ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE ENFOQUE

La calidad de enfoque se define como la capacidad del sistema para hacer converger los rayos con alta precisión, obteniendo una imagen nítida y reduciendo al mínimo los efectos de aberraciones y círculos de confusión. Para su evaluación se implementó un análisis que permite cuantificar esta propiedad mediante parámetros objetivos. Los resultados obtenidos de dicho análisis se presentan a continuación.

Intercepción de rayos con el absorbedor.

Este análisis se realizó en $\mathbb{R}^2$, para el caso de evaluar el perfil de un concentrador con geometría de canal parabólico. Se evaluó el porcentaje de error entre los parámetros de conicidad y radio de curvatura estimados con respecto a los valores ideales, y posteriormente se evaluó el nivel de concentración sobre un absorbedor, cuyo radio está dado por la relación de la **Ec. (9)** entre el diámetro del absorbedor Da como una fracción del diámetro del concentrador D , esta fracción q comúnmente va del 1 al 2% para óptica de calidad, 2 al 3% canal parabólico realista, y 3 al 5% perfiles medidos con errores. (Rabl, 1985):

$$Da = qD \quad (9)$$

La eficiencia η de concentración se calculó con la expresión presentada en la **Ec. 10**:

$$\eta = \frac{\#Rr_{int}}{\#Ri_{tot}} \quad (10)$$

Donde $\#Rr_{int}$ representa el número de rayos reflejados que interceptan el absorbedor mientras $\#Ri_{tot}$ corresponde al número total de rayos incidentes. El porcentaje de error en los parámetros estimados (p_{est}) respecto de los parámetros ideales (p_{real}) de k y r se calcularon con la **Ec. 11**:

$$error = \left| \frac{p_{est} - p_{real}}{p_{real}} \right| \times 100\% \quad (11)$$

En la **Figura 7** se muestra el trazo de rayos para el perfil de un concentrador ideal y un absorbedor dado por la **Ec. (9)** con una fracción $q = 0.05$. El comportamiento de la concentración es del 100%.

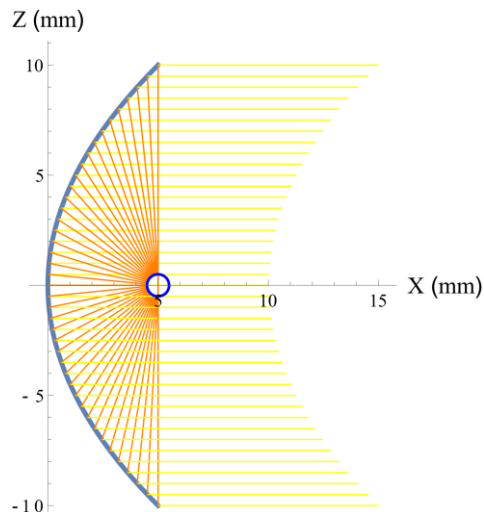


Figura 7. Trazo de rayos en un perfil parabólico ideal.

En la **Figura 8** se muestra el trazo de rayos para el perfil de un concentrador con un nivel de ruido de 0.5 mm. El valor de eficiencia alcanzado para este caso estuvo muy cerca del 100%, puesto que para este tipo de perfil errores pequeños no influyen de manera significativa en el nivel de concentración.

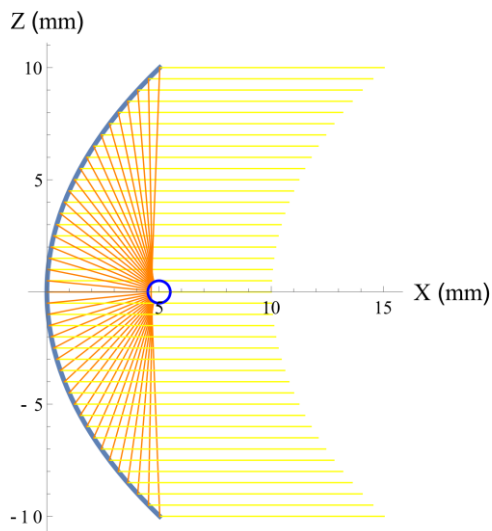


Figura 8. Trazo de rayos en un perfil parabólico con un nivel de ruido de amplitud A de 0.5mm, ajustado a una cónica para análisis de eficiencia de concentración.

De la misma forma, en la **Figura 9** se presenta el trazo de rayos para un perfil con un nivel de ruido de 1.5 mm, donde la eficiencia disminuye notoriamente alcanzando únicamente el 80%, este fenómeno es perceptible en el trazo, donde los rayos reflejados comienzan a verse influidos por el ruido.

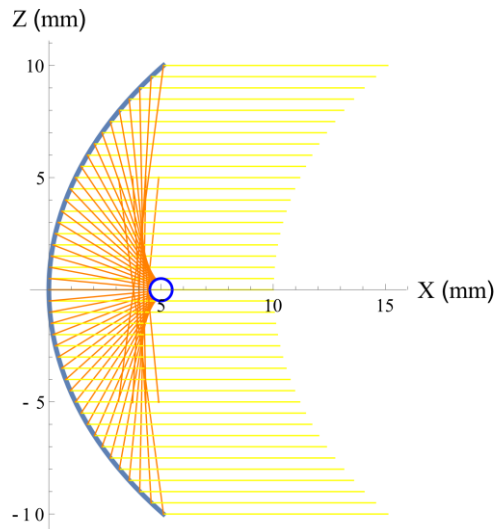


Figura 9. Trazo de rayos en un perfil parabólico con un nivel de ruido de amplitud A de 1.5 mm.

En la **Figura 10** el ruido está presente en un nivel de 3.5 mm, la eficiencia resultante fue del 70%, y el comportamiento de la parábola para enfocar los rayos reflejados comienza a acercarse más al de una circunferencia, en el trazo de rayos esto puede apreciarse a simple vista, la región de concentración confirma la formación del cardioide característico, además que se obtiene un valor de $k > -1$.

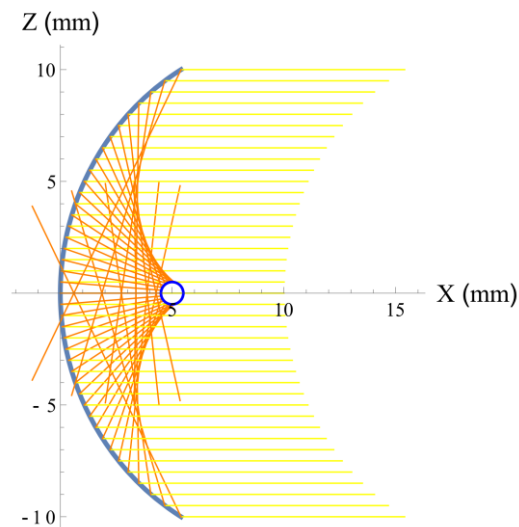


Figura 10. Trazo de rayos en un perfil parabólico con un nivel de ruido de amplitud A de 3.5mm.

La **Tabla 1** presenta los valores obtenidos de las estimaciones para los parámetros posterior al ajuste, así como también los porcentajes de error para cada caso, que aumentan notoriamente al inducir un mayor nivel de ruido. Además, se muestra que el parámetro de conicidad presenta una sensibilidad considerablemente mayor al ruido geométrico que en el radio de curvatura. Para una amplitud de ruido de 3.5 mm, el error asociado a la constante de conicidad

supera el 200%, mientras que el error del radio de curvatura permanece por debajo del 35%.

Tabla 1. Valores de los parámetros f y k , y porcentaje de error para los niveles de ruido usados.

Ruido (mm)	f	k	% error f	% error k
0.0	5.000	1.000	0.0000	2.22×10^{-14}
0.5	4.969	1.086	0.6131	8.6851
1.5	5.518	0.372	10.3681	62.7438
3.5	3.369	3.195	32.6104	219.5670

En la **Figura 11** se muestran las gráficas del porcentaje de error para los parámetros k y r . Para la **Figura 11 (a)** se puede observar que para niveles pequeños de ruido el porcentaje de error en r se mantiene relativamente pequeño y estable; sin embargo, al aumentar el ruido el comportamiento se vuelve irregular, de forma que los picos más altos rondan el 50% de error en la estimación. En la **Figura 11 (b)** se observa que, para niveles bajos de ruido el comportamiento es similar al de la **Figura 11 (a)**, con variaciones moderadas, pero al aumentar el ruido los cambios se vuelven abruptos y los picos más altos alcanzan hasta 400% de error en la estimación, esto confirma nuevamente que el parámetro k es más susceptible a estas perturbaciones geométricas, lo que lo convierte en un parámetro crítico a deformaciones o irregularidades en el perfil.

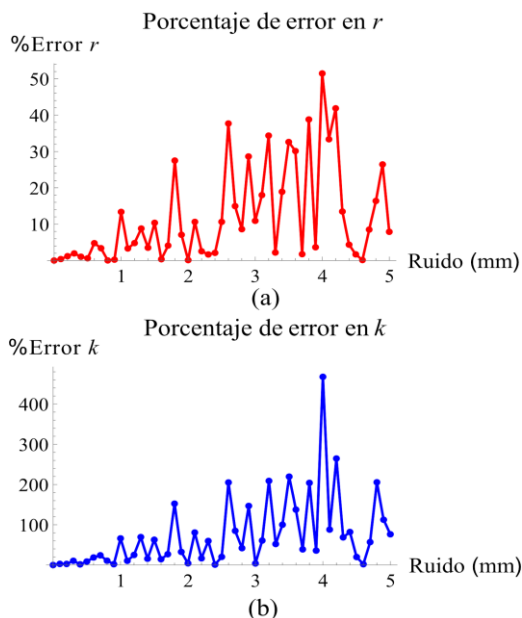


Figura 11. Gráficas del porcentaje de error en los parámetros respecto al nivel de ruido aditivo. (a) radio de curvatura r (b) parámetro de la constante de conicidad k .

También es posible apreciar una relación entre los parámetros del radio de curvatura y la constante de conicidad, como se menciona en el trabajo de **Pérez-Escudero et al. (2010)**, pues ambas gráficas mostradas en la **Figura 11** presentan comportamientos similares y aunque el rango de error no tenga una relación estrictamente lineal se observa una tendencia general al incremento de error con forme aumenta la amplitud del ruido, que deteriora de forma progresiva la confiabilidad de los parámetros obtenidos posterior al ajuste.

En la **Figura 12** se muestra la gráfica de la eficiencia de concentración del sistema, que disminuye progresivamente conforme aumenta la amplitud del ruido, lo que confirma a relación directa entre la degradación geométrica de la superficie y la pérdida de capacidad de concentración.

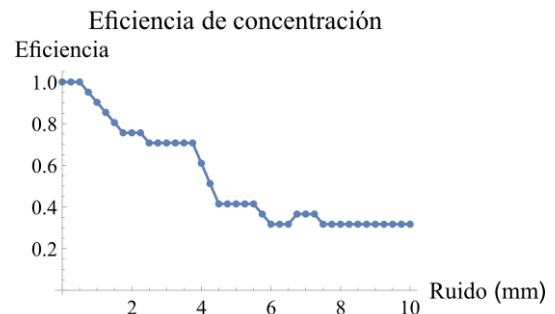


Figura 12. Gráfica de eficiencia de concentración respecto al ruido aditivo.

Intercepción de rayos con el plano focal (diagrama de manchas): El plano focal es el plano perpendicular al eje óptico donde es posible observar el punto donde los rayos de luz inciden y convergen. El sistema de ecuaciones para hallar la intersección de los rayos reflejados en el plano focal se puede escribir como:

$$P(f, y, z) = \left| \frac{x - x_0}{r_{rx}} = \frac{y - y_0}{r_{ry}} = \frac{z - z_0}{r_{rz}} \right| \quad x = f \quad (13)$$

Con la ecuación anterior se obtiene una distribución de puntos en el plano focal también llamada diagrama de manchas. Para medir cuantitativamente la calidad de enfoque del concentrador con niveles de ruido asociados, se propone estimar la dispersión de este patrón de puntos. Para calcular esta dispersión se calcula la distancia radial de cada punto con respecto al punto focal $(f, 0, 0)$, dado en la **Ec. (14)**:

$$d_i = \sqrt{y_i^2 + z_i^2} \quad (14)$$

Y luego la desviación estándar dada por la **Ec. (15)**, que permite medir la dispersión de los rayos interceptados en el plano focal

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_i^N (d_i - \bar{d})^2} \quad (15)$$

Donde N es el número total de los datos, d_i representa cada uno de los datos de forma individual y $\bar{d}$ es el promedio de los datos.

En la **Figura 13** se muestra el diagrama de manchas para la superficie ideal, es decir, en ausencia de ruido o imperfecciones. Se observa un comportamiento típico en el que los rayos se concentran en un mismo punto que es el foco, y la dispersión de los rayos es $\sigma = 0$ mm.

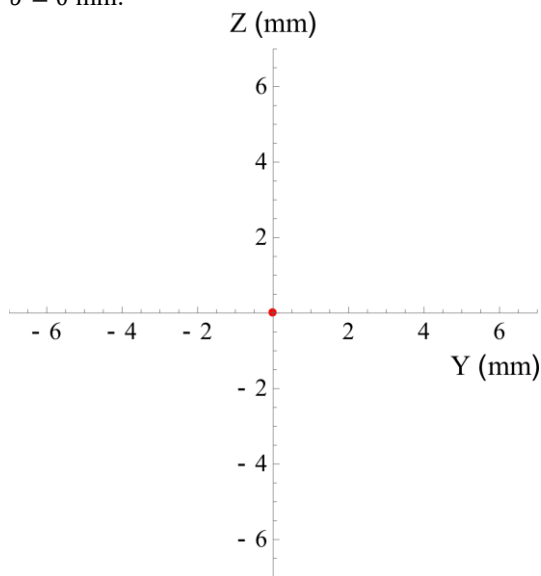


Figura 13. Diagrama de manchas en el plano focal para una superficie ideal.

La **Figura 14** corresponde a un nivel de ruido de 0.5 mm, aunque la dispersión ya comienza a notarse es posible apreciar como la mayoría de los puntos se concentran cerca del foco. La distribución de la mancha es relativamente compacta, eso indica que los rayos aún mantienen una cierta convergencia hacia el foco, y el dato numérico de la dispersión está cerca de los 0.4580 mm.

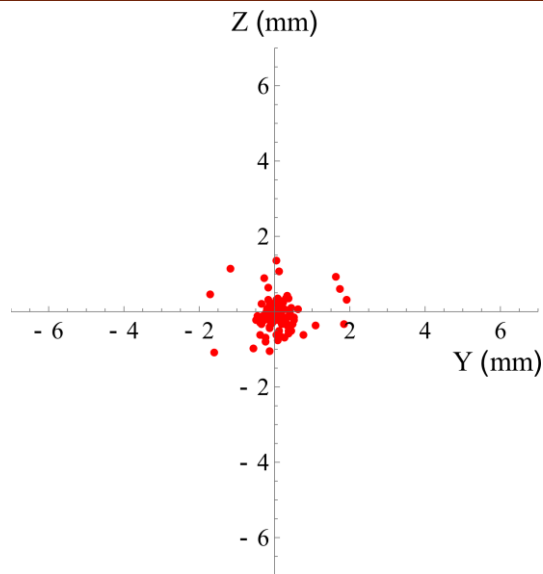


Figura 14. Diagrama de manchas para superficie con un nivel de ruido de 0.5 mm.

De igual forma la **Figura 15** muestra el diagrama de manchas para un nivel de ruido de 1.5 mm, los puntos aún conservan cierta concentración cerca del origen, sin embargo, la distribución comienza a abarcar un área más grande, la desviación resultante fue de 1.3426 mm.

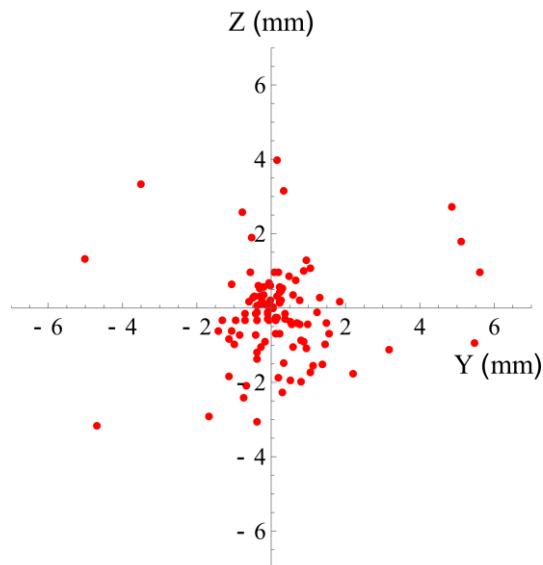


Figura 15. Diagrama de manchas para superficie con un nivel de ruido de 1.5 mm.

Por otro lado, la **Figura 16** con un nivel de ruido de 3.5 mm muestra una dispersión considerable. Los puntos aparecen más alejados del foco y con menos concentración cerca del origen, lo que ocasiona pérdida de enfoque y disminución de la precisión óptica. La dispersión de los rayos es 3.0788 mm.

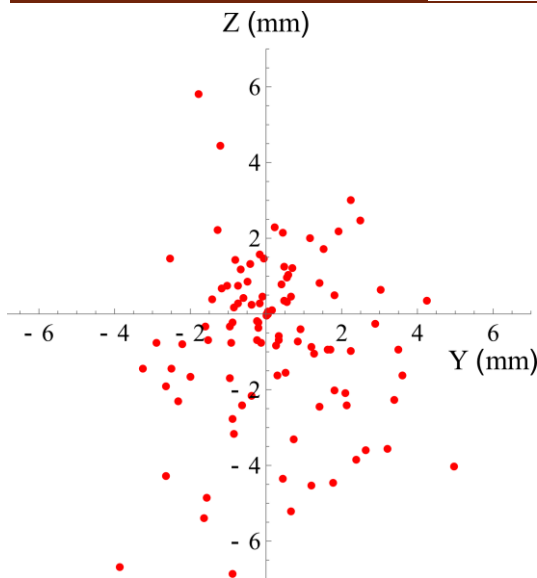


Figura 16. Diagrama de manchas para superficie con un nivel de ruido de 3.5 mm.

En general, la expansión progresiva de la mancha focal coincide con el incremento de la desviación estándar calculada para cada caso. Esto confirma que la métrica propuesta es consistente con la degradación observada en la calidad de enfoque.

5. CONCLUSIONES

La metodología propuesta permite relacionar de forma cuantitativa la amplitud del ruido geométrico con la variación de los parámetros de conicidad obtenidos mediante el ajuste, la eficiencia de concentración y la dispersión observada en el plano focal. Este esquema proporciona una herramienta que permite estudiar y evaluar la sensibilidad de superficies ópticas frente a errores geométricos controlados.

Aunque la formulación matemática que se presenta es general para superficies cónicas, en este trabajo se tomó como caso de estudio una superficie parabólica debido a su importancia como geometría ideal en aplicaciones de concentración solar. De esta manera, el carácter general de las ecuaciones empleadas permite extender la metodología a otras superficies cónicas de interés, con la posibilidad de realizar estudios futuros orientados a otras aplicaciones ópticas y energéticas que requieren geometrías distintas.

Los resultados obtenidos indicaron que: Para el trazo de rayos en la superficie ideal se confirmó el comportamiento teórico al converger todos los rayos en el punto focal definido. La adición de ruido geométrico en la superficie produce un aumento de la dispersión de los rayos reflejados, como consecuencia se obtiene una degradación progresiva de dicho enfoque.

Para niveles de ruido bajos (0.5 mm) el sistema mantiene una concentración relativamente buena, pero con ligeras desviaciones respecto al foco, y para niveles medio y altos (1.5, 3.5 mm) la dispersión se vuelve muy notoria, este aumento indica la pérdida de precisión óptica y calidad de enfoque.

El parámetro de conicidad k resultó ser más susceptible a la influencia del ruido que el radio de curvatura r , alcanzando porcentajes de error muy altos después del ajuste.

En el análisis de dispersión de manchas se observa que la desviación estándar de los puntos aumenta proporcionalmente al nivel de perturbaciones geométricas en la superficie.

Estos resultados obtenidos permiten resaltar la importancia que existe en el control de errores geométricos que ocurren en el diseño y fabricación de sistemas ópticos.

AGRADECIMIENTOS

La autora Grecia Cajigas Velásquez agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación por la beca con número 4069747.

DECLARACIONES

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Los autores declaran el uso de herramientas de Inteligencia Artificial, Tradicional y/o Generativa en la elaboración de este manuscrito, conforme a los lineamientos éticos de la revista.

La base de datos que sustenta los resultados presentados en este artículo no está disponible públicamente en este momento, pero puede obtenerse de los autores bajo una solicitud debidamente sustentada.

REFERENCIAS

- Banerjee, S., Wyłomańska, A., & Sundar, S. (2026). A self-supervised learning approach for denoising autoregressive models with additive noise: Finite and infinite variance cases. *Digital Signal Processing*, 180, 106200. <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2026.106200>
- Fasquelle, T., Kadoch, B., Guillet, G., & Barbosa, S. (2024). Realistic ray-tracing model of a Scheffler reflector based on experimental data. *Renewable Energy*, 231, 120856. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120856>
- Křen, P. (2017). Robust and precise algorithm for aspheric surfaces characterization by the

- conic section. *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications*, 13, 11. <https://doi.org/10.1186/s41476-017-0040-1>
- Lee, H. (2014). The geometric-optics relation between surface slope error and reflected ray error in solar concentrators. *Solar Energy*, 101, 299–307. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.12.035>
- Liao, T.-T. (2009). A skew ray tracing approach for the error analysis of optical elements with paraboloidal boundary surfaces. *Optik*, 120(17), 873–885. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2008.03.017>
- Malacara, D. (2015). *Óptica básica* (3.^a ed.). Fondo de Cultura Económica.
- Pérez Enciso, R. A. (2015). *Caracterización óptica y térmica del horno solar del IER* [Tesis doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio Institucional de la UNAM. <https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000724555>
- Pérez-Escudero, A., Dorronsoro, C., & Marcos, S. (2010). Correlation between radius and asphericity in surfaces fitted by conics. *Journal of the Optical Society of America A*, 27(7), 1541–1548. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.27.001541>
- Rabl, A. (1985). *Active solar collectors and their applications*. Oxford University Press.
- Thompson, S. J., Lang, R., Rees, P., & Roberts, G. W. (2016). Reconstruction of a conic-section surface from autocollimator-based deflectometric profilometry. *Applied Optics*, 55(10), 2827–2836. <https://doi.org/10.1364/AO.55.002827>
- Woolf, P. J. (2022, October 29). 2.5: *Modelado de ruido - Ruido blanco, rosa y marrón, pops y crackles*. LibreTexts Español. [https://espanol.libretexts.org/Bookshelves/Ingenieria/Ingenieria_Industrial_y_de_Sistemas/Libro%3A_Din%C3%A1mica_y_Control_de_Procesos_Qu%C3%ADmicos_\(Woolf\)/02%3A_Fundamentos_de_Modelado/2.05%3A_Modelado_de_Ruido_-_Ruido_Blanco%2C_Rosa_y_Marr%C3%B3n%2C_Pops_y_Crackles](https://espanol.libretexts.org/Bookshelves/Ingenieria/Ingenieria_Industrial_y_de_Sistemas/Libro%3A_Din%C3%A1mica_y_Control_de_Procesos_Qu%C3%ADmicos_(Woolf)/02%3A_Fundamentos_de_Modelado/2.05%3A_Modelado_de_Ruido_-_Ruido_Blanco%2C_Rosa_y_Marr%C3%B3n%2C_Pops_y_Crackles)

Implementación de un Sistema de Prevención de Intrusos (IPS) utilizando una Raspberry Pi 3 para el Monitoreo de Red en micro y pequeñas empresas

MARIANO LARA-CABRERA¹ | CARLOS EDGARDO CRUZ-PÉREZ^{1,*} | OSCAR ALONSO DE LA ROSA AGUILAR¹ | LUIS DAVID HUERTA HERNANDEZ¹ | FLORENTINO RUIZ-AQUINO¹

¹ Departamento de Ingeniería en Desarrollo de Software y Sistemas Inteligentes, Universidad del Istmo, Oaxaca, México.

* Correspondencia: carloscruz@unistmo.edu.mx

Recibido: 09/06/2026

Revisado: 25/06/2026

Aceptado: 02/07/2026

Publicado: 08/07/2026

RESUMEN: Este artículo presenta el diseño, implementación y evaluación de un sistema de prevención de intrusiones (IPS) de bajo costo utilizando una Raspberry Pi 3 y el software de código abierto Snort, orientado a microempresas y pequeñas empresas, segmento que constituye una parte relevante del tejido empresarial. Dadas las limitaciones presupuestarias y técnicas típicas de estas organizaciones, se evaluaron dos distribuciones Linux: Raspberry Pi OS y Arch Linux. A través de 30 simulaciones controladas por tipo de ataque (DoS, inyección SQL, fuerza bruta y explotación de servicios), los resultados indican que Raspberry Pi OS ofrece tiempos de respuesta promedio más rápidos (6.98 segundos frente a 8.42 segundos en DoS) y menor uso de CPU (26.28 % vs 31.05%), aunque con un consumo de RAM ligeramente superior. Se concluye que un IPS basado en Raspberry Pi 3 constituye una alternativa viable y de bajo costo frente a las soluciones comerciales para el perfil de micro y pequeñas empresas con requerimientos de red moderados.

ABSTRACT: This article presents the design, implementation, and evaluation of a low-cost Intrusion Prevention System (IPS) using a Raspberry Pi 3 and the open-source software Snort, aimed at micro and small enterprises, a segment that represents a significant share of the business landscape. Given the typical budgetary and technical limitations of such organizations, two Linux distributions were evaluated: Raspberry Pi OS and Arch Linux. Through 30 controlled simulations categorized by attack type (DoS, SQL injection, brute force, and service exploitation), the results indicate that Raspberry Pi OS offers faster average response times (6.98 seconds versus 8.42 seconds in DoS) and lower CPU usage (26.28% vs 31.05%), despite slightly higher RAM consumption. It is concluded that a Raspberry Pi 3-based IPS constitutes a viable, low-cost alternative to commercial solutions for the specific profile of micro and small enterprises with moderate network demands.

Palabras clave: Sistema de Prevención de Intrusos, Raspberry Pi, Snort, Seguridad de red, Monitoreo de bajo costo

1. INTRODUCCIÓN

Las pequeñas y medianas empresas constituyen la columna vertebral de la economía mexicana. Sin embargo, su creciente digitalización las expone a amenazas cibernéticas sin que cuenten con presupuestos robustos para seguridad (Chávez & García, 2023). Según el más reciente informe de ESET Latinoamérica (2025), México se mantiene entre los países latinoamericanos con mayor incidencia de malware en organizaciones, con sectores enteros afectados por campañas de ransomware y phishing (ESET Latinoamérica, 2025). Asimismo, el informe de IBM (2025) revela que el costo promedio global de una filtración de datos alcanzó los 4.44 millones de dólares, una disminución

del 9% respecto al año anterior, pero con un costo por registro de información personal identificable (PII) que asciende a 160 dólares a nivel mundial (IBM, 2025).

Los sistemas de prevención de intrusiones comerciales (por ejemplo, Cisco Firepower o Palo Alto Networks) superan los 5,000 dólares, sumado a costos de suscripción anual; incluso las licencias para pequeñas empresas de Cisco ASA con FirePOWER Services parten de suscripciones de 1 a 3 años con costos significativos. Frente a esta problemática, se propone implementar un IPS sobre una Raspberry Pi 3 (aproximadamente 35 USD) ejecutando Snort, un motor de detección y prevención de intrusiones de

código abierto cuya versión más reciente, Snort 3, es la nueva generación del sistema y admite procesamiento multihilo y configuraciones compartidas. Dado que el alcance de la solución está condicionado por las capacidades del hardware (CPU de 1.2 GHz, 1 GB de RAM y Ethernet de 100 Mbps), el estudio se enfoca en microempresas y pequeñas empresas con baja densidad de tráfico —con menos de 50 empleados y ancho de banda ≤ 100 Mbps. Se comparan dos distribuciones Linux: Raspberry Pi OS y Arch Linux.

La combinación de Snort con Raspberry Pi es una configuración conocida en la literatura (Al-Isa & Macia-Perez, 2022; Ibrahim & Tariq, 2023; Pérez & Sánchez, 2020). Sin embargo, el valor diferencial de este trabajo radica en dos aspectos: la evaluación comparativa de dos distribuciones Linux en este contexto, y el desarrollo de una herramienta de instalación automatizada para Arch Linux en Raspberry Pi, que simplifica el despliegue y reduce la barrera técnica, especialmente relevante para el contexto local.

Las preguntas de investigación son:

1. ¿Puede una Raspberry Pi 3 manejar tareas de IPS en tiempo real para una red típica de una micro o pequeña empresa?
2. ¿Qué distribución Linux ofrece mejor rendimiento en tiempo de respuesta, carga de CPU y uso de memoria RAM bajo condiciones de ataque?

2. MARCO TEÓRICO

2.1 SISTEMAS DE PREVENCIÓN DE INTRUSOS

Un IPS es un componente de seguridad de red que monitoriza el tráfico en busca de actividad maliciosa y toma acciones automatizadas (bloquear, descartar) para prevenir intrusiones. A diferencia de un IDS, que solo alerta, el IPS opera en la ruta de datos (inline). Snort, desarrollado por Martin Roesch en 1998 y actualmente mantenido por Cisco, es el IPS de código abierto más utilizado. La versión Snort 3 permite organizar las reglas de detección en grupos personalizados, incluyendo la posibilidad de agruparlas por severidad de vulnerabilidad según puntajes CVSS (Common Vulnerability Scoring System). Utiliza detección basada en firmas mediante reglas organizadas en archivos (*.rules), preprocesadores (como Frag3 para desfragmentación IP, HTTP Inspect para análisis de tráfico web) y un motor de detección que compara paquetes con los conjuntos de reglas (Smith & Doe, 2022; Snort, 2025). Las reglas de Snort son actualizadas por Cisco Talos dos veces por semana para quienes poseen suscripción, mientras que las reglas comunitarias

gratuitas (Emerging Threats) ofrecen actualizaciones diarias (Cisco, 2025).

2.2 RASPBERRY PI 3 COMO PLATAFORMA DE SEGURIDAD

La Raspberry Pi 3B, lanzada en 2016, incorpora un procesador Broadcom BCM2837 ARM Cortex A53 de cuatro núcleos a 1.2 GHz, 1 GB de RAM y un puerto Ethernet de 100 Mbps. Aunque existen generaciones posteriores (Raspberry Pi 5 con CPU de 2.4 GHz y hasta 8 GB de RAM), la Pi 3B sigue siendo una plataforma de bajo costo ampliamente disponible para soluciones embebidas de seguridad (Ahmad et al., 2021; Buczak & Guven, 2016; Elhag & Fernandes, 2022). Estudios recientes han comenzado a explorar el uso de aprendizaje automático ligero en dispositivos de recursos limitados para detección de intrusiones, incluso con enfoques de TinyML y modelos de deep learning que alcanzan precisiones del 97.3% en Raspberry Pi (Khraisat et al., 2024).

2.3 TAXONOMÍA DE ATAQUES

Se seleccionaron cuatro familias de ataque representativas de las amenazas a las PYMES, probadas en laboratorio, las cuales se pueden observar en la Tabla 1 (Gómez et al., 2021; Hassan & Qamar, 2020).

Tabla 1. Familias de ataques representativas evaluadas.

Tipo de Ataque	Descripción	Referencia CVE
DoS (SYN flood)	Agota recursos del servidor mediante conexiones TCP semiabiertas	CVE-2018-18442
Inyección SQL	Manipula consultas SQL de aplicaciones web para extraer datos	N/A
Fuerza bruta	Intentos repetidos de inicio de sesión contra FTP/SSH	N/A
Explotación de servicios	Ejecución remota de código en Samba	CVE-2007-2447; CVE-2004-2687

3. METODOLOGÍA

3.1 DISEÑO EXPERIMENTAL

Se adoptó una metodología iterando sobre comunicación, planificación, modelado, construcción y despliegue (Pressman & Maxim, 2020). El experimento se realizó en un entorno aislado (sandbox) con tres máquinas: Nodo IPS: Raspberry Pi 3 (1.2 GHz, 1 GB RAM, microSD de 8 GB) ejecutando Snort en modo inline. Máquina víctima: Máquina virtual con Metasploitable 2 (Ubuntu 8.04) exponiendo FTP (puerto 21), Samba (445), distccd (3632) y aplicación web vulnerable a inyección SQL. Máquina atacante: Kali Linux 2025.4.

Se probaron dos sistemas operativos en la Raspberry Pi: Raspberry Pi OS (basado en Debian Bookworm, versión mayo de 2025 con kernel Linux 6.6). Esta versión incorpora mejoras de seguridad como bloqueo de pantalla mejorado y configuración de firewall integrada (Raspberry Pi Foundation, 2025). Arch Linux ARM (abril 2025, compilación rolling release) (Kumar & Singh, 2022). Cada sistema fue instalado y configurado con Snort 3.x usando reglas idénticas (Emerging Threats y VRT).

Para la evaluación del rendimiento y la efectividad del Sistema de Prevención de Intrusos (IPS), se implementó un entorno de pruebas aislado. Este entorno fue diseñado para emular las condiciones típicas de una red de microempresa, pero en un ambiente controlado que permite la reproducibilidad de los experimentos y garantiza que el tráfico malicioso generado no afecte a redes productivas o externas.

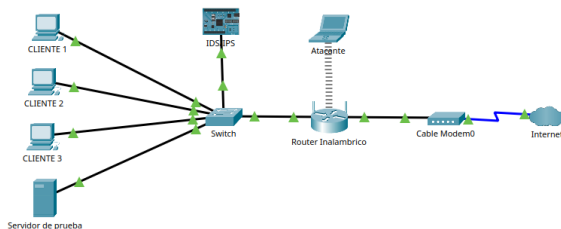


Figura 1. Topología del entorno de pruebas utilizada para la evaluación del IPS

3.2 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

Efectividad de detección: Para cada ataque se registró si Snort generó una alerta y bloqueó la conexión. Se contaron los aciertos y fallos sobre 30 repeticiones.

Tiempo de respuesta: Se utilizó Wireshark 4.2 para capturar paquetes en las interfaces atacante y víctima. El tiempo de respuesta se calculó como la diferencia entre la marca de tiempo del primer paquete de ataque y la marca de tiempo de la acción de bloqueo (paquete TCP RST o paquete descartado), promediado sobre 30 repeticiones por ataque.

Monitorización de recursos: Se emplearon htop (versión 3.3) y btop para registrar el uso de CPU y RAM cada segundo durante la ejecución del ataque. Los valores reportados son porcentajes medios durante la duración del ataque.

3.3 EJECUCIÓN DE LOS ATAQUES

Para cada tipo de ataque se realizaron 30 ensayos independientes en cada sistema operativo. Entre ensayos se reinició tanto la Raspberry Pi como la máquina víctima para limpiar cualquier estado residual.

Los ataques consistieron en:

- DoS (Denegación de Servicio): Módulo auxiliary/dos/tcp/synflood de Metasploit contra el puerto 21 (FTP) con 1000 paquetes por segundo durante 30 segundos.
- Inyección SQL: Extracción manual de credenciales mediante UNION SELECT sobre DVWA (Damn Vulnerable Web Application), registrando el tiempo de detección del patrón "union select" en la URI HTTP.
- Fuerza bruta: Hydra con archivos user.txt y pass.txt (50 entradas cada uno) contra FTP.
- Explotación de servicios: Exploits de Metasploit para el servicio samba.

3.4 CONSIDERACIONES ÉTICAS

Todas las pruebas se realizaron en un entorno de laboratorio cerrado sin conexión a redes productivas. No se utilizaron datos ni sistemas reales de PYMES. Las vulnerabilidades explotadas corresponden a CVE bien documentados y se emplearon únicamente para evaluación de rendimiento.

3.4 HERRAMIENTA DE INSTALACIÓN AUTOMATIZADA PARA ARCH LINUX

Para facilitar la adopción de la solución y minimizar los errores de configuración, especialmente en entornos con personal técnico limitado, se desarrolló una herramienta de instalación y configuración automatizada para Arch Linux en dispositivos Raspberry Pi, denominada PiArchLinuxInstall. La herramienta está disponible públicamente en el repositorio GitHub: <https://github.com/Puzzle-solve/PiArchLinuxInstall.git>.

La herramienta tiene como objetivo reducir el tiempo de despliegue de un sistema Arch Linux completamente funcional con Snort preconfigurado, evitando la intervención manual en tareas repetitivas y propensas a error, como el particionado de la tarjeta SD, la instalación del sistema base, la configuración de red, la instalación de dependencias y la compilación de Snort desde fuentes.

La herramienta consiste en un conjunto de scripts bash que automatizan los siguientes pasos:

1. Preparación de la tarjeta microSD (particionado y formateo con sistema de archivos adecuado).
2. Instalación de la imagen base de Arch Linux ARM para Raspberry Pi.

3. Configuración inicial del sistema (zona horaria, localización, nombre de host, usuario y contraseña).
4. Instalación de paquetes esenciales (compiladores, bibliotecas de red, herramientas de desarrollo).
5. Descarga, compilación e instalación de Snort 3 y sus dependencias (libdaq, libpcap, etc.).
6. Despliegue de un conjunto básico de reglas de detección (Emerging Threats) y configuración de Snort en modo inline.
7. Configuración del sistema para iniciar Snort automáticamente al arranque.

La herramienta reduce el tiempo de instalación de aproximadamente 2 horas (con intervención manual) a unos 30 minutos (completamente automatizado). Además, minimiza la probabilidad de errores de configuración, garantizando que todos los componentes queden correctamente integrados. Al ser de código abierto, permite a la comunidad revisar, modificar y mejorar el proceso, fomentando la colaboración y la adaptación a diferentes necesidades.

El uso de esta herramienta en el presente estudio garantiza que la instalación de Arch Linux sea reproducible y consistente entre ensayos, eliminando la variabilidad introducida por la configuración manual.

4. RESULTADOS

4.1 EFECTIVIDAD DE DETECCIÓN

La **Tabla 2** resume la tasa de detección sobre 30 ensayos

Tabla 2. Tasa de detección.

Tipo de Ataque	Distribución	Tasa de detección (%)
DoS (SYN flood)	Raspberry Pi OS	96.67
DoS (SYN flood)	Arch Linux	93.33
Inyección SQL	Raspberry Pi OS	96.67
Inyección SQL	Arch Linux	96.67
Fuerza bruta	Raspberry Pi OS	100
Fuerza bruta	Arch Linux	100
Explotación Samba	Raspberry Pi OS	96.67
Explotación Samba	Arch Linux	96.67

4.2 TIEMPO DE RESPUESTA

La **Tabla 3** resume los tiempos de respuesta promedio (en segundos) sobre 30 ensayos

Tabla 3. Tiempos de respuesta promedio (en segundos) sobre 30 ensayos por ataque.

Tipo de Ataque	Raspberry Pi OS (promedio $\pm$ DE)	Arch Linux (promedio $\pm$ DE)
DoS (SYN flood)	6.98 $\pm$ 0.15	8.42 $\pm$ 0.68
Inyección SQL	4.23 $\pm$ 0.09	4.83 $\pm$ 0.11
Fuerza bruta	4.86 $\pm$ 0.08	5.22 $\pm$ 0.14
Explotación Samba	3.76 $\pm$ 0.07	4.24 $\pm$ 0.12

Nota: Cada valor representa 30 repeticiones. Las desviaciones estándar bajas indican poca variabilidad, lo que confirma la estabilidad de las mediciones. Raspberry Pi OS supera consistentemente a Arch Linux, con la mayor ganancia en ataques DoS (1.44 segundos más rápido). Para las explotaciones de servicios, la diferencia es menor ($\sim$ 0.44 segundos) pero aun estadísticamente significativa.

4.3 USO DE CPU

La **Tabla 4** muestra el porcentaje de uso de CPU promedio durante los ataques.

Tabla 4. Porcentaje de uso de CPU promedio.

Tipo de Ataque	Raspberry Pi OS (% CPU)	Arch Linux (% CPU)
DoS (SYN flood)	26.28	31.05
Inyección SQL	17.09	19.11
Fuerza bruta	19.19	20.40
Explotación Samba	15.52	17.12

Raspberry Pi OS consume entre un 15% y un 18% menos de CPU en todos los ataques. Arch Linux muestra mayor variabilidad, probablemente debido a su configuración minimalista que carece de algunas optimizaciones de red presentes en Raspberry Pi OS.

4.4 USO DE RAM

La **Tabla 5** presenta el porcentaje de uso de RAM promedio.

Tabla 5. Porcentaje de uso de RAM promedio

Tipo de Ataque	Raspberry Pi OS (% RAM)	Arch Linux cc (% RAM)
DoS (SYN flood)	60.77	54.40
Inyección SQL	45.00	42.17
Fuerza bruta	43.00	41.73
Explotación Samba	43.13	41.97

De manera contraintuitiva, Raspberry Pi OS utiliza entre un 6% y un 8% más de RAM que Arch Linux. Esto se explica porque la base Debian Bookworm incluye más servicios en segundo plano por defecto (por ejemplo, gestor de red, servicios de impresión) que Arch Linux omite. Sin embargo, ningún sistema operativo superó el 70% de uso de RAM, dejando margen para volúmenes de tráfico típicos de micro y pequeñas empresas (estimados por debajo de 50 Mbps) (Lazo & Ruiz, 2024).

5. DISCUSIÓN

5.1 INTERPRETACIÓN DE LOS HALLAZGOS

Los resultados demuestran que una Raspberry Pi 3 puede funcionar como un IPS efectivo para PYMES, con tiempos de respuesta inferiores a 7 segundos para todos los ataques probados. La diferencia de rendimiento entre las dos distribuciones se debe a tres factores principales:

- Ajuste específico del kernel: Raspberry Pi OS incluye optimizaciones de la pila de red para el SoC BCM2837, mientras que Arch Linux utiliza un kernel ARMv7 genérico.
- Preprocesamiento configurado: Arch Linux requiere configuración manual de preprocesadores, lo que puede llevar a ajustes subóptimos si no se realiza por personal experimentado.
- Servicios en segundo plano: El mayor consumo de RAM de Raspberry Pi OS es compensado por su mejor uso de CPU y menor latencia.

Desde una perspectiva práctica, las PYMES con personal técnico limitado deberían preferir Raspberry Pi OS debido a su instalación más sencilla, su comunidad de soporte activa y su rendimiento inmediato superior. Arch Linux sigue siendo adecuado para usuarios avanzados que requieren control granular y están dispuestos a invertir tiempo en optimización.

5.2 COMPARACIÓN CON SOLUCIONES COMERCIALES Y TENDENCIAS EMERGENTES

Los equipos IPS comerciales comienzan en 2,000 dólares y requieren suscripciones anuales. Nuestro prototipo cuesta aproximadamente 60 dólares (Raspberry Pi 3 + fuente de alimentación + tarjeta microSD) sin cargos recurrentes. Si bien los sistemas comerciales ofrecen mayor rendimiento, nuestra solución es adecuada para microempresas y pequeñas empresas con menos de 50 empleados y ancho de banda menor o igual a 100 Mbps.

El ecosistema de ciberseguridad de bajo costo ha evolucionado significativamente. Herramientas como la plataforma Logging Made Easy (LME) de CISA, lanzada en 2025, ofrecen centralización de registros y detección de amenazas sin costo para pequeñas organizaciones. Asimismo, enfoques de Inteligencia Artificial nativos en el borde (AI-native IDS) están siendo adaptados para ejecutarse en Raspberry Pi, con sistemas que corren enteramente en la placa para detectar tráfico malicioso en tiempo real sin depender de la nube (Khraisat et al., 2024).

5.3 LIMITACIONES

Limitaciones de hardware: El puerto Ethernet 10/100 de la Raspberry Pi 3 y sus 1 GB de RAM restringen su uso en redes con tráfico intenso.

Rendimiento de un solo núcleo: Snort 3 soporta múltiples hilos, pero en la práctica la limitación de núcleos (4) y frecuencia (1.2 GHz) afecta, bajo cargas sostenidas.

Diversidad de ataques: No se probó el tráfico cifrado (HTTPS, túneles SSH) ni ataques de día cero sofisticados.

Generalizabilidad: El entorno de laboratorio puede no capturar todas las variables de una red PYME real (tráfico legítimo mezclado, latencias variables, múltiples usuarios concurrentes).

5.4 TRABAJOS FUTUROS

Con base en estos hallazgos y en el rápido avance del ecosistema de seguridad de bajo costo, se proponen tres líneas:

1. Escalado del rendimiento: Evaluar la misma configuración de IPS en Raspberry Pi 5 (2.4 GHz, hasta 8 GB RAM, Ethernet Gigabit). Los benchmarks indican que la Pi 5 es entre 2 y 3 veces más rápida que la Pi 4 en tareas de CPU.
2. Detección híbrida: Integrar técnicas de deep learning optimizadas para dispositivos de recursos limitados. Estudios recientes han logrado implementar modelos con solo 0.61 MB de tamaño y 158 mil parámetros en dispositivos embebidos, alcanzando alta precisión.
3. Gestión automatizada de reglas: Desarrollar un sistema que ajuste dinámicamente las reglas de Snort en función de las tasas

observadas de falsos positivos y patrones de tráfico, aprovechando la capacidad de grupos de reglas por severidad de Snort 3

6. CONCLUSIONES

Este estudio demuestra que una Raspberry Pi 3 ejecutando Snort constituye un IPS viable y de bajo costo para microempresas y pequeñas empresas con menos de 50 empleados y un ancho de banda ≤ 100 Mbps. En las pruebas controladas, Raspberry Pi OS superó a Arch Linux en tiempo de respuesta (hasta un 17% más rápido) y eficiencia de CPU (hasta un 18% menor utilización), aunque Arch Linux consumió menos RAM. Es importante destacar que este sistema no es adecuado para empresas medianas o para aquellas pequeñas con infraestructura de red más exigente (mayor tráfico, múltiples servicios concurrentes o necesidades de rendimiento superiores). Por lo tanto, la recomendación de adoptar esta solución debe circunscribirse estrictamente al perfil mencionado, evitando generalizaciones que pudieran inducir a error sobre su capacidad real. Las micro y pequeñas empresas con presupuestos y conocimientos técnicos limitados deberían adoptar Raspberry Pi OS por su facilidad de configuración y su rendimiento por defecto. Los trabajos futuros deberían explorar la Raspberry Pi 5 como plataforma y técnicas de detección híbrida con aprendizaje automático ligero para hacer frente a amenazas cifradas y de día cero, aprovechando las nuevas capacidades de hardware y el creciente ecosistema de herramientas gratuitas de ciberseguridad para pequeñas organizaciones.

DECLARACIONES

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Los autores declaran el uso de herramientas de Inteligencia Artificial, Tradicional y/o Generativa en la elaboración de este manuscrito, conforme a los lineamientos éticos de la revista.

La base de datos y los registros que sustentan los resultados presentados en este artículo no están disponibles públicamente en este momento, pero pueden obtenerse de los autores bajo una solicitud debidamente sustentada.

La herramienta PiArchLinuxInstall está disponible en <https://github.com/Puzzle-solve/PiArchLinuxInstall.git> bajo licencia de código abierto (MIT).

REFERENCIAS

Ahmad, Z., Khan, A. S., Wai Shiang, C., Abdullah, J., & Ahmad, F. (2021). Network intrusion detection system: A systematic study of machine learning and deep learning approaches. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 32(1),

Article e4150.
<https://doi.org/10.1002/ett.4150>

Al-Isa, K., & Macia-Perez, F. (2022). Low-cost intrusion detection system for small businesses using Raspberry Pi. *IEEE Access*, 10, 45210–45222.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.1234567>

Buczak, A. L., & Guven, E. (2016). A survey of data mining and machine learning methods for cyber security intrusion detection. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(2), 1153–1176.
<https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2494502>

Chávez, R., & García, M. (2023). Retos y perspectivas de la ciberseguridad en las PYMES latinoamericanas post-pandemia. *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação*, (E45), 112–125.

Cisco. (2025). *Snort 3 configuration guide for Cisco Secure Firewall Management Center, Version 7.2*. Cisco Press.

Elhag, S., & Fernandes, J. (2022). Lightweight edge-based intrusion detection systems: A review. *Computers & Security*, 115, Article 102601.

ESET Latinoamérica. (2025). *ESET Security Report 2025: El estado de la seguridad en las organizaciones*. ESET.

Gómez, L., Hernández, P., & López, J. (2021). Implementación de firewalls de código abierto en infraestructuras IoT: Un análisis de rendimiento. *Revista Iberoamericana de Tecnologías de la Información*, 9(18), 45–56.

Hassan, A. M., & Qamar, F. (2020). SYN Flood DDoS attack detection and mitigation in IoT networks using Snort. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 11(5), 450–457.

IBM. (2025). *Cost of a Data Breach Report 2025*. IBM.

Ibrahim, M., & Tariq, U. (2023). Edge computing security: Raspberry Pi as a network monitoring node. *Internet of Things*, 21, Article 100654.
<https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.100654>

Khraisat, A., Alazab, A., Singh, S., Jan, T., & Gomez, A. (2024). Survey on federated learning for

- intrusion detection system: Concept, architectures, aggregation strategies, challenges, and future directions. *ACM Computing Surveys*, 57(1), Article 7. <https://doi.org/10.1145/3687124>
- Kumar, R., & Singh, A. (2022). Comparative analysis of Linux operating systems for IoT devices: Resource utilization and network latency. *Journal of Systems Architecture*, 124, Article 102431.
- Lazo, E., & Ruiz, D. (2024). Ciberseguridad a bajo costo: Arquitecturas de prevención de intrusos para micro y pequeñas empresas. *Revista de Ingeniería y Tecnología*, 15(2), 89–104.
- Pérez, M., & Sánchez, R. (2020). Evaluación empírica de sistemas de detección de intrusos (IDS) en plataformas embebidas. *Computación y Sistemas*, 24(3), 1089–1102.
- Pressman, R. S., & Maxim, B. R. (2020). *Software engineering: A practitioner's approach* (9th ed.). McGraw-Hill Education.
- Raspberry Pi Foundation. (2025). *Raspberry Pi OS Bookworm release notes – May 2025 update*.
- Smith, J., & Doe, A. (2022). Open-source network security: Snort rules optimization for SME environments. *Cybersecurity*, 5(1), 12–28.
- Snort. (2025). *Snort 3 documentation: Rule grouping and management*. Cisco Talos. <https://www.snort.org/documents>

Algoritmo de control difuso para un convertidor reductor implementado en un aerogenerador de baja potencia

LUDWIN BETANZOS MARTÍNEZ^{1,*} | EDUARDO CAMPOS MERCADO² | ADÁN ACOSTA BANDA³

¹ División de Estudios de Posgrado, Universidad del Istmo, Campus Tehuantepec, Oaxaca, México.

² SECIHTI-Universidad del Istmo, Campus Tehuantepec, Oaxaca, México.

³ Ingeniería Industrial, Universidad del Istmo, Campus Tehuantepec, Oaxaca, México.

* Correspondencia: ludwinbetanzos@hotmail.com

Recibido: 11/06/2026

Revisado: 25/06/2026

Aceptado: 02/07/2026

Publicado: 08/07/2026

RESUMEN: Este artículo presenta el diseño e implementación de un algoritmo de control difuso para regular el voltaje de salida de un convertidor reductor utilizado en un aerogenerador de baja potencia bajo condiciones de velocidad de viento variable. Como primera etapa para la regulación del voltaje de salida del convertidor, se implementa un controlador PID clásico; sin embargo, no se alcanza el nivel de regulación deseado debido a picos de voltaje originados por la acumulación de la acción integral durante periodos de ausencia de voltaje de entrada. Para solucionar este problema, se propone un controlador PID difuso que ajusta las ganancias proporcional, integral y derivativa mediante lógica difusa. Los resultados experimentales demuestran que el controlador PID difuso evita los picos de voltaje, con lo cual se mejora el desempeño del sistema en lazo cerrado y previene los efectos adversos asociados con la acumulación de la acción integral.

ABSTRACT: This article presents the design and implementation of a fuzzy control algorithm to regulate the output voltage of a buck converter used in a low-power wind turbine operating under variable wind speed conditions. As a first stage in the output voltage regulation process, a conventional PID controller is implemented; however, the desired regulation level is not achieved due to voltage spikes caused by the accumulation of the integral action during periods of input voltage absence. To address this issue, a fuzzy PID controller is proposed to adjust the proportional, integral, and derivative gains using a fuzzy logic approach. Experimental results demonstrate that the proposed fuzzy PID controller prevents voltage spikes, thereby improving the closed-loop performance of the system and preventing the adverse effects associated with the accumulation of the integral action.

Palabras clave: Control difuso, Convertidor reductor, Ganancia, Lógica difusa, PID, Sintonización, Sistema.

1. INTRODUCCIÓN

Los aerogeneradores de baja potencia, surgen como una alternativa viable para la adquisición de sistemas de generación de energía renovable en las comunidades que carecen del servicio eléctrico, y a su vez, para los usuarios que cuenten con el servicio, tener la posibilidad de interconectar a la red eléctrica con el fin de disminuir el costo de su consumo eléctrico (Tummala et al., 2016). La adquisición de un aerogenerador va acompañada de un sistema electrónico potencia que ajuste la señal eléctrica a los parámetros de la red. En México, la Asociación de Normalización y Certificación, A. C. (2014), establece que el valor nominal actual utilizado por la Comisión Federal de Electricidad es 127 V a 60 Hz entre fase y neutro. Sin embargo, la variabilidad del

viento representa un reto importante para el sistema electrónico de potencia debido a que en la entrada del sistema el comportamiento del voltaje es variable (Diaz et al., 2025; Wood, 2011), como se muestra en la Figura 1, por tanto, para operar el sistema, es necesaria la implementación de un algoritmo de control para regular el voltaje producido, antes de alimentar otro dispositivo. Entre las técnicas de control más utilizadas en la electrónica de potencia, se destaca el controlador PID, debido a su relativa sencillez matemática, fácil sintonización de ganancias y rápida respuesta ante cambios del error (Jafari et al., 2024). No obstante, se ha documentado que el controlador PID no muestra un buen desempeño en sistemas no lineales, donde la dinámica del sistema es variable, tal como la variación del viento. Un problema común del control

PID en este tipo de sistemas, es el fenómeno conocido como windup, debido a la acumulación de acción de control integral que genera sobreimpulsos elevados y tiempos prolongados de recuperación al valor de referencia (Visioli, 2006). Además, las ganancias de cada acción de control son fijas, por lo que implica un ajuste de ganancias que no garantiza la correcta regulación del sistema (Campos-Mercado et al., 2021). Por tanto, para solucionar estos problemas, se propone implementar una técnica matemática conocida como lógica difusa (Fuzzy Logic) para convertir las ganancias fijas del controlador en ganancias variables que se ajusten a las dinámicas del sistema para mantener la regulación del voltaje al valor de referencia.

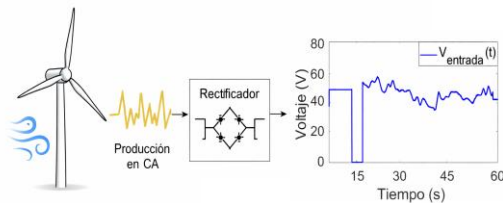


Figura 1. Generación de energía eléctrica mediante un aerogenerador de baja potencia.

2. CONVERTIDOR REDUCTOR

Entre los equipos de conversión más utilizados en aerogeneradores de baja potencia está el convertidor reductor, el cual es un dispositivo electrónico que recibe un voltaje de entrada y lo regula a un valor bajo a la salida, manteniéndolo cercano a un valor deseado V_d . Esto es fundamental para el aprovechamiento de las energías renovables, donde la generación no es uniforme debido a la variabilidad del viento (Teixeira et al., 2011).

En la Figura 2 se muestra el diagrama general del convertidor reductor, donde se observan sus componentes principales: una fuente de voltaje de entrada ($V_{in}(t)$), un interruptor que comúnmente es un transistor MOSFET (T_{MOSFET}), un diodo (d), un inductor (L), un capacitor (C) y una resistencia que representa la carga de consumo (R) (Salvatierra & Kazimierczuk, 2017).

El voltaje de salida del convertidor reductor se regula mediante la apertura y el cierre controlado del interruptor de potencia (T_{MOSFET}). Este proceso es realizado con una modulación por ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés, Pulse Width Modulation), para generar una señal cuadrada, en la cual se define el tiempo de apertura y cierre del interruptor (Kazimierczuk, 2015), como se muestra en el cuadro azul de la Figura 2.

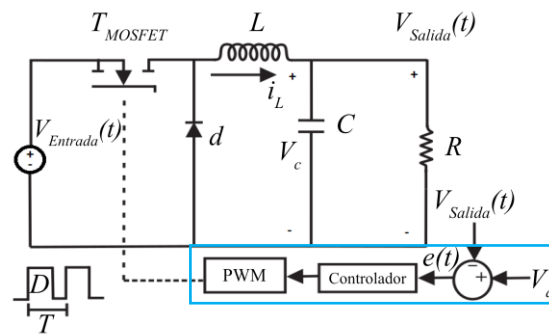


Figura 2. Diagrama del convertidor reductor

Para poder modificar el comportamiento de la señal PWM, se necesita implementar una técnica de control con la cual se calcule el ciclo de trabajo de la señal PWM. Entre los algoritmos de control más utilizados destaca el controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID), debido a su relativa simplicidad de implementación y a su buen desempeño práctico en una amplia variedad de aplicaciones de electrónica de potencia. En la siguiente sección se describe los detalles del controlador PID para su implementación en el convertidor reductor.

3. CONTROL PROPORCIONAL-INTEGRAL DERIVATIVO (PID)

Uno de los más utilizados en ingeniería es el controlador Proporcional Integral Derivativo, mejor conocido como PID y su ecuación se muestra a continuación:

$$D(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

La idea detrás del control PID es sencilla: el sistema compara en todo momento el valor que debería tener el voltaje (V_d) con el valor que realmente está entregando ($V_{Salida}(t)$). La diferencia entre ambos se denomina como error.

Si el voltaje deseado es V_d y el voltaje medido a la salida del convertidor es $V_{Salida}(t)$, entonces el error se calcula como: $e(t) = V_d - V_{Salida}(t)$.

Cuando el error es igual a cero, significa que el sistema ha alcanzado exactamente el voltaje deseado. Sin embargo, en la práctica, casi nunca se mantiene un valor perfectamente exacto. Siempre existen pequeñas variaciones debido a cambios en la carga, fluctuaciones en la fuente de alimentación o ruido en las mediciones. Por ejemplo, si se desea obtener 24 V, es normal que el sistema registre valores como 24.23 V, 23.97 V o 24.13 V. Estas pequeñas diferencias indican que el sistema está muy cerca del valor deseado, aunque no sea matemáticamente perfecto.

La función del controlador PID es reducir esas diferencias hasta alcanzar el estado estacionario, en

donde se mantiene el voltaje cercano al valor de referencia frente a cualquier perturbación. Para que la señal que produce este algoritmo de control pueda acondicionarse adecuadamente, cada acción se multiplica por un valor constante conocido como ganancia: la ganancia proporcional k_p , la integral k_i y la derivativa k_d . Estas ganancias son asignadas por el operador en un proceso conocido como sintonización. Los resultados se muestran en la **Figura 3**, en donde puede apreciarse el comportamiento del sistema ante una variación de voltaje. Estos resultados son el trabajo de sintonización realizado por un técnico especializado, encargado de elegir los valores de las ganancias, las cuales se muestran en la **Figura 3**.

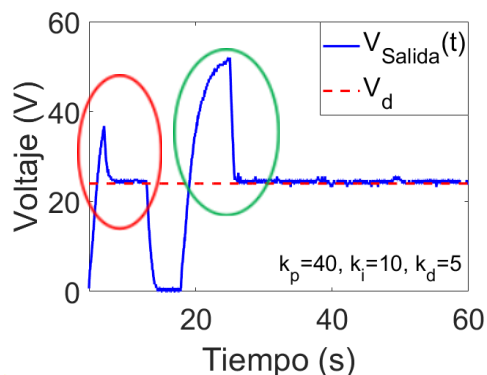


Figura 3. Primera sintonización del control PID clásico.

Lo relevante de este experimento son los dos picos que exceden el voltaje deseado de 24 V (V_d), señalados mediante los círculos rojo y verde en la **Figura 3**. Estos picos de voltaje representan un riesgo para el sistema electrónico de potencia, ya que pueden dañar los dispositivos que se alimentan con el voltaje generado por el convertidor reductor. Aunque para el caso que se muestra, el convertidor fue diseñado para soportar este voltaje. Sin embargo, se recomienda evitar, en la medida de lo posible, estos escenarios de trabajo.

Para tratar de resolver el problema, se llevó a cabo una segunda sintonización como se muestra en la **Figura 4**, en donde se modificaron los valores de las ganancias. Como resultado, se eliminó el primer pico de la **Figura 3** (círculo rojo), sin embargo, el segundo pico, señalado con el círculo verde en la misma figura, permaneció sin modificación alguna.

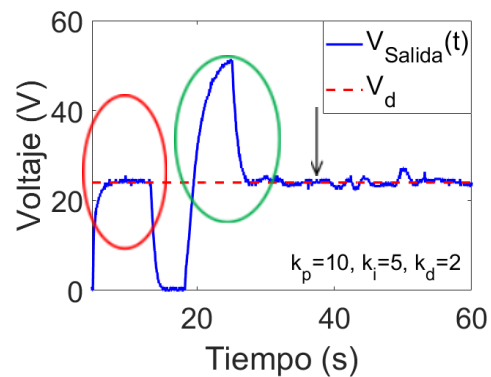


Figura 4. Segunda sintonización del control PID clásico.

Además, la regulación del voltaje, como señala la flecha en la **Figura 4**, muestra una mayor variación en comparación con la primera sintonización de la **Figura 3**. El problema identificado que provoca los picos en la respuesta del controlador se debe a la **acción de control integral**, la cual se explica a continuación.

3.1 ACCIÓN DE CONTROL INTEGRAL: PROBLEMA IDENTIFICADO

Cuando no hay voltaje a la entrada del convertidor, el error del sistema persiste y la acción integral del control se acumula para alcanzar el voltaje deseado. Esta acumulación se mantiene mientras dura la ausencia de voltaje. Cuando el suministro de voltaje regresa con valores por encima del voltaje deseado, la acción integral acumulada provoca un exceso en la respuesta, siendo esta la razón principal por la que el segundo pico persiste en ambos experimentos.

Por tanto, aunque la técnica de control PID clásico es sólida en su funcionamiento, es necesario hallar una alternativa capaz de solucionar el problema que se presenta en el convertidor reductor.

4. CONTROL INTELIGENTE

En la lógica tradicional, un sistema solo puede tomar dos valores: verdadero o falso, representados comúnmente como 1 y 0. Sin embargo, muchos procesos en sistemas dinámicos no se ajustan a estas condiciones extremas.

La lógica difusa permite trabajar con valores intermedios entre 0 y 1, asignando grados de pertenencia que permite delimitar el comportamiento del sistema en diferentes escenarios de operación. Un ejemplo común es la selección de la temperatura de enfriamiento del aire acondicionado para un espacio encerrado, si la temperatura inicial del cuarto es de 30°, la persona baja la temperatura a unos 20° para enfriar rápidamente el espacio, sin embargo, pasado un lapso de tiempo, la persona comienza a tener frío y procede elevar la temperatura hasta encontrar la temperatura de confort adecuada.

Un control inteligente basado en lógica difusa tiene por objetivo imitar el razonamiento humano para decidir cuándo y cómo actuar en el control del sistema, según el escenario de operación a responder. Ahora, para implementar dicha lógica difusa en el control PID, se debe determinar la estructura de reglas y operaciones matemáticas, cuya construcción se muestra en la siguiente sección.

4.1 DISEÑO DE LÓGICA DIFUSA

Para el diseño del controlador difuso, se contempla la siguiente estructura:

1. Una interfaz de difusificación, que convierte las entradas del controlador en información que el mecanismo de inferencia puede utilizar fácilmente para activar y aplicar reglas.
2. Una base de reglas (un conjunto de reglas Si-Entonces), que contiene una cuantificación lógica difusa de la descripción lingüística experta de cómo lograr un buen control.
3. Un mecanismo de inferencia (también llamado motor de inferencia o módulo de inferencia difusa), que emula la toma de decisiones experta en la interpretación y aplicación del conocimiento sobre cómo controlar mejor la planta.
4. Una interfaz de desfuzzificación, que convierte las conclusiones del mecanismo de inferencia, de este trabajo, en las ganancias difusas.

En la **Figura 5** se muestra el sistema difuso, las señales de entrada son el error (e) y su derivada ($\dot{e}$).

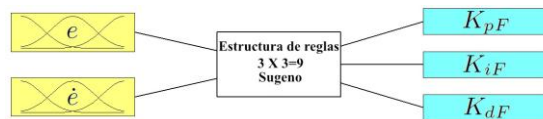


Figura 5. Sistema difuso.

Estas señales son procesadas por funciones de membresía gaussianas en el proceso de difusificación. La estructura de la base de reglas difusas es del tipo Takagi–Sugeno y de orden cero. El mecanismo de inferencia utiliza el producto del valor de membresía de cada señal de entrada. Finalmente, el proceso de desfuzzificación se lleva a cabo mediante el método del centro de gravedad, con el fin de obtener los valores de las ganancias difusas (Bai, 2006; Ponce, 2010; Saatchi, 2024).

La tarea de difusificación (convertir los valores del error y su derivada en valores difusos) se realiza mediante las funciones de membresía gaussianas, utilizando tres variables lingüísticas: [Negativo (N), Cero (C), y Positivo (P)] para el error (e) y su

derivada ($\dot{e}$), como se muestra en las **Figuras 6 y 7**. La representación general de las funciones de membresía gaussianas se muestra en la siguiente ecuación:

$$\mu_{Lv}(S_{in}, b, c) = \exp\left(-\frac{(S_{in} - b)^2}{2c^2}\right) \quad (2)$$

donde L_v representa la variable lingüística, S_{in} la señal de entrada (el error y su derivada), y las variables b y c son los parámetros de la función gaussiana. Entonces, en el proceso de difusificación para calcular las ganancias k_{pF} y k_{dF} , se utilizan las funciones de membresía mostradas en las **Figuras 6 y 7**, definidas por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} &\mu_N(e, -3, 1.019), \mu_C(e, 0, 1.019), \\ &\mu_P(e, 3, 1.019) \text{ para } e \in [-3, 3] \\ &\mu_N(\dot{e}, -6, 2.038), \mu_C(\dot{e}, 0, 2.038), \\ &\mu_P(\dot{e}, 6, 2.038) \text{ para } \dot{e} \in [-6, 6] \end{aligned} \quad (3)$$

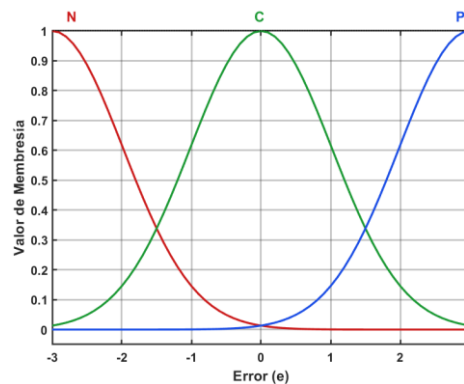


Figura 6. Funciones de membresía del error para las ganancias k_{pF} y k_{dF} .

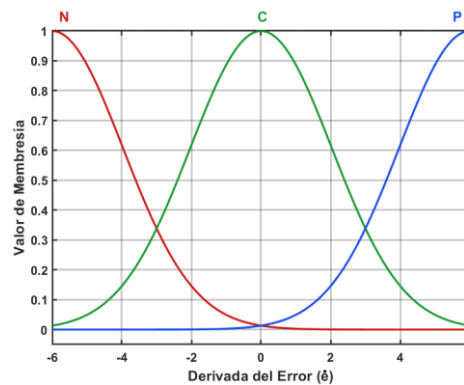


Figura 7. Funciones de membresía de la derivada del error para las ganancias k_{pF} y k_{dF} .

En el caso de la ganancia k_{if} se considera emplear 5 funciones de membresía en la señal de entrada del error (e), como se muestra en la **Figura 8**, y el mismo número de funciones de membresía para la derivada del error ($\dot{e}$), ver **Figura 9**. Durante el proceso de difusificación, se utilizan las funciones de membresía definidas por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}
&\mu_{N2}(e, -6.667, 1.062), \mu_{N1}(e, -4.167, 1.062), \\
&\mu_C(e, 0, 1.698) \\
&\mu_{P1}(e, 4.167, 1.062), \mu_{P2}(e, 6.667, 1.062) \\
&\text{para } e \in [-5, 5] \\
\\
&\mu_N(\dot{e}, -6, 2.038), \mu_C(\dot{e}, 0, 2.038), \\
&\mu_P(\dot{e}, 6, 2.038) \text{ para } \dot{e} \in [-6, 6]
\end{aligned} \quad (4)$$

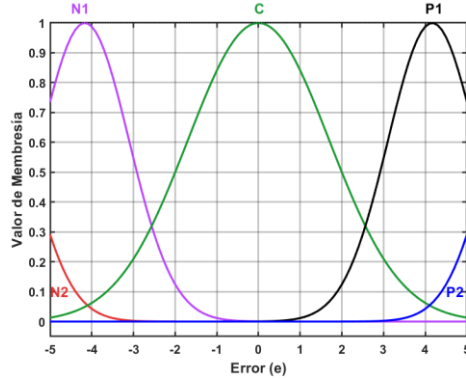


Figura 8. Funciones de membresía del error para la ganancia k_{iF} .

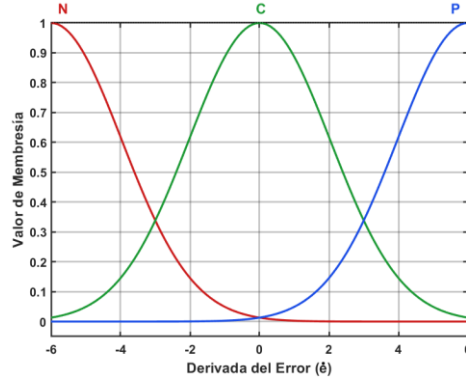


Figura 9. Funciones de membresía de la derivada del error para la ganancia k_{iF} .

Para la construcción de la base de reglas, es necesario conocer el número de reglas a emplear durante el cálculo de las ganancias difusas. El número de reglas se determina mediante el producto del número de funciones de membresía del error (e) por el número de funciones de membresía de la derivada del error ($\dot{e}$), en este caso, corresponde un arreglo de 3×3 , dando como resultado nueve reglas. Entonces, para la base de reglas de las ganancias k_{pF} y k_{dF} , nueve reglas del tipo Takagi–Sugeno son tomadas en cuenta con la siguiente estructura:

$$\begin{aligned}
R_j: &\text{Si } e \text{ es } A_j \text{ y } \dot{e} \text{ es } B_j \text{ entonces } K_{pFFj} = a_j; \\
&K_{iFFj} = b_j; K_{dFFj} = c_j \quad \forall j=1,2,3,\dots,9
\end{aligned} \quad (5)$$

donde j denota el número de regla; $A_j = \{N, C, P\}$ y $B_j = \{N, C, P\}$ son los conjuntos difusos de variables lingüísticas; y K_{pFFj} , K_{iFFj} , K_{dFFj} son los valores de salida lingüísticos asociados con cada regla. Los términos a_j , b_j , y $c_j \in [0,1]$ se eligen para especificar

cómo variar la ganancia difusa; en otras palabras, podemos considerar que estos términos son los parámetros de ajuste de las ganancias difusas. Luego, utilizando la estructura de reglas de la Ec. (5) y tomando en cuenta el comportamiento de las ganancias variables del controlador dado por la Ec. (3), se escribe la base de reglas en la Tabla 1.

Tabla 1. Base de reglas difusas para k_{pF} y k_{dF} .

R_j	e	$\dot{e}$	K_{pFFj}	K_{dFFj}
R ₁	N	N	$K_{pFF1}=0.5$	$K_{dFF1}=0.5$
R ₂	N	C	$K_{pFF2}=0.3$	$K_{dFF2}=0.3$
R ₃	N	P	$K_{pFF3}=0.5$	$K_{dFF3}=0.5$
R ₄	C	N	$K_{pFF4}=0.8$	$K_{dFF4}=0.8$
R ₅	C	C	$K_{pFF5}=1.0$	$K_{dFF5}=0.1$
R ₆	C	P	$K_{pFF6}=0.8$	$K_{dFF6}=0.8$
R ₇	P	N	$K_{pFF7}=0.5$	$K_{dFF7}=0.5$
R ₈	P	C	$K_{pFF8}=0.3$	$K_{dFF8}=0.3$
R ₉	P	P	$K_{pFF9}=0.1$	$K_{dFF9}=0.1$

Ahora, para la base de reglas de la ganancia k_{iF} se debe hallar el número de reglas considerando el número de funciones de membresía de la señal de error y su derivada. Por tanto, se tiene un arreglo de 5×3 , dando un total de 15 reglas a operar como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Base de reglas difusas para k_{iF} .

R_j	e	$\dot{e}$	K_{iFFj}
R ₁	N2	N	$K_{dFF1}=0.5$
R ₂	N2	C	$K_{dFF2}=0.5$
R ₃	N2	P	$K_{dFF3}=0.5$
R ₄	N1	N	$K_{dFF4}=0$
R ₅	N1	C	$K_{dFF5}=0$
R ₆	N1	P	$K_{dFF6}=0$
R ₇	C	N	$K_{dFF7}=0$
R ₈	C	C	$K_{dFF8}=0$
R ₉	C	P	$K_{dFF9}=0$
R ₁₀	P1	N	$K_{dFF10}=0$
R ₁₁	P1	C	$K_{dFF11}=0$
R ₁₂	P1	P	$K_{dFF12}=0$
R ₁₃	P2	N	$K_{dFF13}=0.5$
R ₁₄	P2	C	$K_{dFF14}=0.5$
R ₁₅	P2	P	$K_{dFF15}=0.5$

El conjunto de reglas y ganancias propuestos en las Tablas 1 y 2, se diseña de acuerdo al criterio del operador, en donde se plasma el conocimiento requerido para controlar el sistema.

Para operar las reglas, se requiere del mecanismo de inferencia representado por β_j , que opera utilizando el producto del valor de pertenencia, dado por las respectivas funciones de membresía gaussianas, para combinar las conjunciones en el antecedente de las reglas y en la representación de la implicación difusa, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\beta_j = \mu_{L_v}(e) * \mu_{L_v}(\dot{e}) \quad (6)$$

Por último, el proceso de desfuzzificación para calcular las ganancias difusas se obtiene mediante el método del centro de gravedad, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} k_{pF} &= \frac{\sum_{j=1}^9 \beta_j k_{pFFj}}{\sum_{j=1}^9 \beta_j}; k_{iF} = \frac{\sum_{j=1}^{15} \beta_j k_{iFFj}}{\sum_{j=1}^{15} \beta_j}; \\ k_{dF} &= \frac{\sum_{j=1}^9 \beta_j k_{dFFj}}{\sum_{j=1}^9 \beta_j} \end{aligned} \quad (7)$$

donde k_{pF} , k_{iF} , y k_{dF} son las ganancias variables utilizadas en el controlador PID difuso propuesto.

5. OPERACIÓN DEL CONTROLADOR PID DIFUSO

El control PID difuso, es una combinación del PID clásico y la lógica difusa. Este diseño tiene como objetivo implementar un controlador capaz de operar dentro de entornos variables, como la variación del viento para un aerogenerador. Aplicando los conocimientos de lógica difusa se tiene lo siguiente:

Primero se considera el comportamiento del error y su derivada; posteriormente, se realiza un proceso de operaciones matemáticas implementando los conceptos de lógica difusa, y, por último, se asignan valores a cada ganancia del controlador PID para ajustar su valor según las condiciones de operación. Con base en lo anterior, se muestran las superficies de cada una de las ganancias del controlador PID difuso, que corresponde a todos los posibles valores que puede adquirir cada ganancia, dependiendo del valor del error y su derivada; en la Figura 8 se muestra la ganancia proporcional difusa, en la Figura 9 la ganancia integral difusa y la Figura 10 corresponde a la ganancia derivativa difusa.

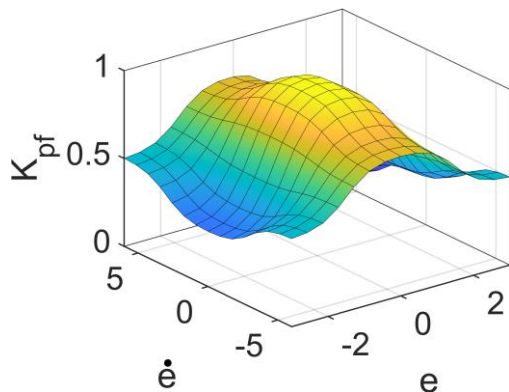


Figura 10. Superficie de la ganancia proporcional difusa.

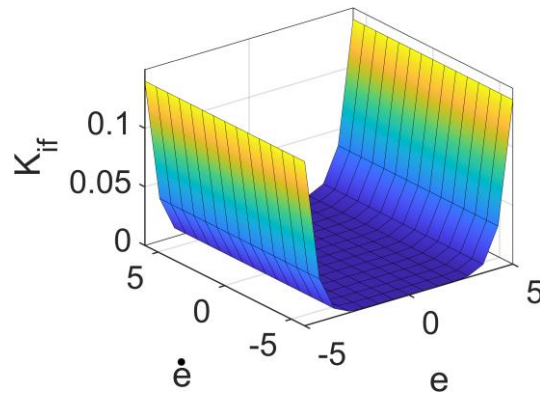


Figura 11. Superficie de la ganancia integral difusa.

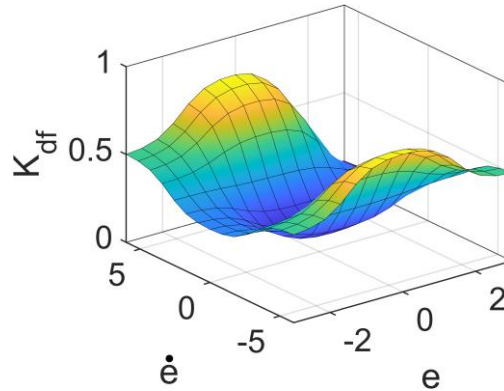


Figura 12. Superficie de la ganancia derivativa difusa.

En cada una de las figuras se pueden observar los ejes que componen las superficies de las ganancias, donde $e(t)$ corresponde al error, $\dot{e}(t)$ es la derivada del error y las etiquetas k_{pF} , k_{iF} y k_{dF} , corresponden al valor de cada ganancia difusa, con valores entre 0 y 1, que dependen del valor del error y su derivada. En resumen, para la ganancia proporcional difusa, a valores pequeños del error y su derivada (cerca de cero), necesitamos ganancias difusas grandes, como se muestra en la región amarilla de la Figura 8, para la integral: a valores pequeños del error y su derivada, su ganancia se vuelve 0, inhabilitando su acción de control, y para la derivativa: a valores pequeños del error y su derivada, se requieren ganancias difusas pequeñas.

Como ejemplo de ello, se considera que para $t = t_1$, se tiene que $e(t_1) = -2$ y $\dot{e}(t_1) = 0$. Entonces, las ganancias difusas son las siguientes:

Para la ganancia k_{pF} , se debe calcular el valor de membresía utilizando la función descrita en la Ec. (3), entonces:

$$\mu_N(e) = 0.6178, \quad \mu_C(e) = 0.1457, \quad \mu_P(e) = 0$$

$$\mu_N(\dot{e}) = 0.0131, \quad \mu_C(\dot{e}) = 1, \quad \mu_P(\dot{e}) = 0.0131$$

Ahora, utilizando las reglas propuestas, mostradas en la [Tabla 1](#), y el mecanismo de inferencias dado por la [Ec. \(6\)](#), se tiene lo siguiente.

$$R_1 \rightarrow \beta_1 = \mu_N(e) \cdot \mu_N(\dot{e}) = 0.0081$$

$$R_2 \rightarrow \beta_2 = \mu_N(e) \cdot \mu_C(\dot{e}) = 0.6178$$

$$R_3 \rightarrow \beta_3 = \mu_N(e) \cdot \mu_P(\dot{e}) = 0.0081$$

$$R_4 \rightarrow \beta_4 = \mu_C(e) \cdot \mu_N(\dot{e}) = 0.0019$$

$$R_5 \rightarrow \beta_5 = \mu_C(e) \cdot \mu_C(\dot{e}) = 0.1457$$

$$R_6 \rightarrow \beta_6 = \mu_C(e) \cdot \mu_P(\dot{e}) = 0.0019$$

$$R_7 \rightarrow \beta_7 = \mu_P(e) \cdot \mu_N(\dot{e}) = 0$$

$$R_8 \rightarrow \beta_8 = \mu_P(e) \cdot \mu_C(\dot{e}) = 0$$

$$R_9 \rightarrow \beta_9 = \mu_P(e) \cdot \mu_P(\dot{e}) = 0$$

Finalmente, con el proceso de desfuzzificación dado por la [Ec. \(7\)](#) para calcular la ganancia difusa, se obtiene:

$$k_{pF} = \frac{\sum_{j=1}^9 \beta_j k_{pFF_j}}{\sum_{j=1}^9 \beta_j} = \frac{0.3422}{0.7836} = 0.4367$$

Para la ganancia k_{iF} , se necesita calcular los valores de membresía utilizando las funciones descritas en la [Ec. \(4\)](#). Entonces:

$$\mu_{N2}(e) = 6.4041 \times 10^{-5}, \mu_{N1}(e) = 0.1247, \mu_C(e) = 0.4997,$$

$$\mu_{P1}(e) = 4.76 \times 10^{-8}, \mu_{P2}(e) = 3.4476 \times 10^{-15}$$

$$\mu_N(\dot{e}) = 0.0131, \mu_C(\dot{e}) = 1, \mu_P(\dot{e}) = 0.0131$$

Ahora, se emplean las reglas propuestas, presentadas en la [Tabla 2](#) y el mecanismo de inferencia dado por la [Ec. \(6\)](#).

$$R_1 \rightarrow \beta_1 = \mu_{N2}(e) \cdot \mu_N(\dot{e}) = 8.40 \times 10^{-7}$$

$$R_2 \rightarrow \beta_2 = \mu_{N2}(e) \cdot \mu_C(\dot{e}) = 6.40 \times 10^{-5}$$

$$R_3 \rightarrow \beta_3 = \mu_{N2}(e) \cdot \mu_P(\dot{e}) = 8.40 \times 10^{-7}$$

$$R_4 \rightarrow \beta_4 = \mu_{N1}(e) \cdot \mu_N(\dot{e}) = 0.0016$$

$$R_5 \rightarrow \beta_5 = \mu_{N1}(e) \cdot \mu_C(\dot{e}) = 0.1247$$

$$R_6 \rightarrow \beta_6 = \mu_{N1}(e) \cdot \mu_P(\dot{e}) = 0.0016$$

$$R_7 \rightarrow \beta_7 = \mu_C(e) \cdot \mu_N(\dot{e}) = 0.0066$$

$$R_8 \rightarrow \beta_8 = \mu_C(e) \cdot \mu_C(\dot{e}) = 0.4997$$

$$R_9 \rightarrow \beta_9 = \mu_C(e) \cdot \mu_P(\dot{e}) = 0.0066$$

$$R_{10} \rightarrow \beta_{10} = \mu_{P1}(e) \cdot \mu_P(\dot{e}) = 6.24 \times 10^{-10}$$

$$R_{11} \rightarrow \beta_{11} = \mu_{P1}(e) \cdot \mu_P(\dot{e}) = 4.76 \times 10^{-8}$$

$$R_{12} \rightarrow \beta_{12} = \mu_{P1}(e) \cdot \mu_P(\dot{e}) = 6.24 \times 10^{-10}$$

$$R_{13} \rightarrow \beta_{13} = \mu_{P2}(e) \cdot \mu_P(\dot{e}) = 4.52 \times 10^{-17}$$

$$R_{14} \rightarrow \beta_{14} = \mu_{P2}(e) \cdot \mu_P(\dot{e}) = 3.44 \times 10^{-15}$$

$$R_{15} \rightarrow \beta_{15} = \mu_{P2}(e) \cdot \mu_P(\dot{e}) = 4.52 \times 10^{-17}$$

Finalmente, se utiliza el proceso de desfuzzificación dado por la [Ec. \(7\)](#), para calcular la ganancia difusa, esto es:

$$k_{iF} = \frac{\sum_{j=1}^{15} \beta_j k_{iFF_j}}{\sum_{j=1}^{15} \beta_j} = \frac{3.2861 \times 10^{-5}}{0.6409} = 5.1273 \times 10^{-5}$$

Para la ganancia k_{dF} , se necesita calcular los valores de membresía utilizando las funciones descritas en la [Ec. \(3\)](#). Entonces:

$$\mu_N(e) = 1, \mu_C(e) = 0.0131, \mu_P(e) = 0$$

$$\mu_N(\dot{e}) = 0.0131, \mu_C(\dot{e}) = 1, \mu_P(\dot{e}) = 0.0131$$

Ahora utilizando las reglas propuestas, las cuales se muestran en la [Tabla 1](#) y el mecanismo de inferencia dado por la [Ec. \(6\)](#), se tiene lo siguiente:

$$R_1 \rightarrow \beta_1 = \mu_N(e) \cdot \mu_N(\dot{e}) = 0.0081$$

$$R_2 \rightarrow \beta_2 = \mu_N(e) \cdot \mu_C(\dot{e}) = 0.6178$$

$$R_3 \rightarrow \beta_3 = \mu_N(e) \cdot \mu_P(\dot{e}) = 0.0081$$

$$R_4 \rightarrow \beta_4 = \mu_C(e) \cdot \mu_N(\dot{e}) = 0.0019$$

$$R_5 \rightarrow \beta_5 = \mu_C(e) \cdot \mu_C(\dot{e}) = 0.1457$$

$$R_6 \rightarrow \beta_6 = \mu_C(e) \cdot \mu_P(\dot{e}) = 0.0019$$

$$R_7 \rightarrow \beta_7 = \mu_P(e) \cdot \mu_N(\dot{e}) = 0$$

$$R_8 \rightarrow \beta_8 = \mu_P(e) \cdot \mu_C(\dot{e}) = 0$$

$$R_9 \rightarrow \beta_9 = \mu_P(e) \cdot \mu_P(\dot{e}) = 0$$

Finalmente, utilizando el proceso de desfuzzificación, dado por la [Ec. \(7\)](#), para calcular la ganancia difusa, se obtiene:

$$k_{dF} = \frac{\sum_{j=1}^9 \beta_j k_{dFF_j}}{\sum_{j=1}^9 \beta_j} = \frac{0.211}{0.7836} = 0.2694$$

Tras completar el procedimiento de cálculo descrito previamente, se implementa las ganancias difusas k_{pf} ,

k_{if} y k_{df} , a la estructura del control PID clásico, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$D(t) = k_p(\cdot) e(t) + k_i(\cdot) \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d(\cdot) \frac{d e(t)}{dt} \quad (8)$$

donde $k_p(\cdot)$, $k_i(\cdot)$ y $k_d(\cdot)$, son las ganancias variables del controlador, funcionando mediante las ganancias difusas obtenidas y multiplicadas por los valores constantes k_1 , k_2 y k_3 , definidas por el operador.

$$\begin{aligned} k_p(\cdot) &= k_1 k_{pF}, & k_i(\cdot) &= k_2 k_{iF}, \\ k_d(\cdot) &= k_3 k_{dF}, & & \\ \text{para } k_{pF}, k_{iF}, k_{dF} &\in [0, 1] \end{aligned} \quad (9)$$

De esta manera, se generan las ganancias del controlador para poder operar en condiciones de variación de voltaje, haciendo que cada nuevo valor del error y su derivada generen nuevos valores para cada una de sus ganancias. Con este enfoque, se implementa el nuevo esquema de control en la plataforma experimental.

5.1 IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL PID DIFUSO

En la Figura 13 se muestra el comportamiento de la variación de voltaje a la entrada del convertidor reductor, el mismo que se empleó para los experimentos del controlador PID clásico. En este caso, se implementan las ganancias difusas a la acción proporcional, integral y derivativa del controlador, cargadas en la memoria del Arduino Due del convertidor de la Figura 14.

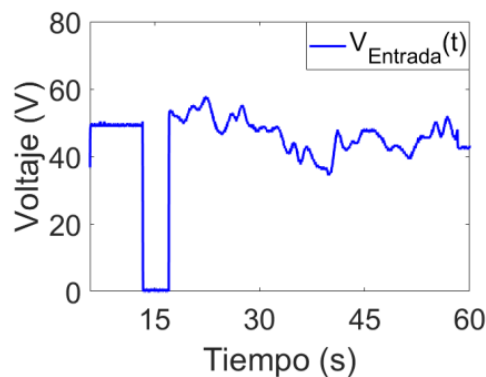


Figura 13. Variación de voltaje a la entrada del convertidor.

Como se puede observar en la Figura 15, el voltaje producido por el convertidor reductor, no presenta el problema del pico no controlado que se muestra en la Figura 3. Esto se debe principalmente a las regiones de las superficies del controlador, en donde se establece el comportamiento y el valor de cada ganancia.

El problema que causaba la acción de control integral al funcionamiento del convertidor reductor con el

control PID clásico se solucionó gracias a limitar su funcionamiento como se muestra en la Figura 11, en donde se aprecia como esta acción de control difusa simplemente deja de operar cuando los valores del error y su derivada prácticamente son cero.

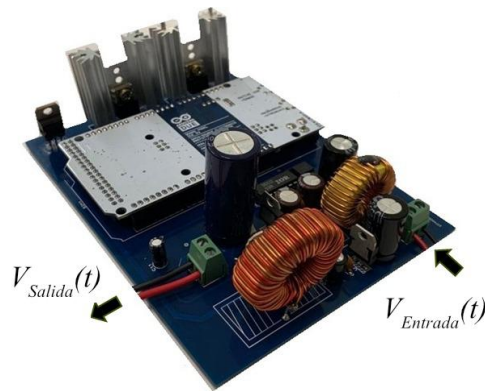


Figura 14. Convertidor reductor (Plataforma experimental).

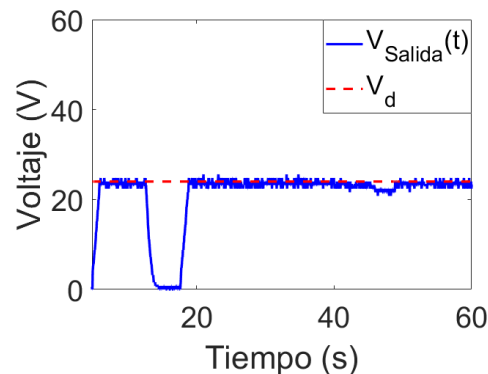


Figura 15. Acción de control PID difuso.

En otras palabras, la acción de control integral difusa solo se activará cuando exista voltaje de entrada que pueda ser reducido.

De esta forma, se soluciona el problema que provocaba el comportamiento de la acción integral en el controlador PID clásico. Cabe mencionar, que se ha logrado incorporar en una expresión matemática la experiencia adquirida con la observación para resolver un problema tecnológico.

6. CONCLUSIONES

La técnica de control PID clásico es ampliamente utilizada y ofrece un desempeño satisfactorio en diversas aplicaciones de electrónica de potencia; sin embargo, presenta limitaciones cuando opera bajo condiciones de variación significativa del voltaje de entrada en el convertidor reductor. Los resultados experimentales demostraron que el controlador PID difuso elimina el sobretiro observado con el PID clásico, mejorando la regulación del voltaje de salida. En particular, la acción integral se reduce o desactiva

cuando el error y su derivada se aproximan a cero, evitando la acumulación excesiva de la señal de control responsable del sobretiro. Asimismo, el conocimiento experto fue incorporado mediante reglas difusas que ajustan las ganancias del controlador, siendo esta la principal aportación de este trabajo, demostrando la funcionalidad del esquema de reglas diseñado para el escenario de variaciones de voltaje, permitiendo resolver un problema tecnológico específico en el convertidor reductor. Como resultado, se reduce el riesgo de daño en los componentes electrónicos y se mejora la capacidad de adaptación ante las variaciones del voltaje generado por el aerogenerador.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al equipo de diseño gráfico de la Universidad del Istmo por su valioso apoyo en proceso de producción. A la SECIHTI por el apoyo al proyecto 75 de Investigadores por México y a la Universidad del Istmo por las facilidades que ha dado para utilizar el equipo del laboratorio de Energías Renovables.

DECLARACIONES

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Los autores declaran el uso de herramientas de Inteligencia Artificial, Tradicional y/o Generativa en la elaboración conceptual de la Figura 1.

La base de datos que sustenta los resultados presentados en este artículo no está disponible públicamente en este momento, pero puede obtenerse de los autores bajo una solicitud debidamente sustentada.

REFERENCIAS

- Asociación de Normalización y Certificación, A. C. (2014). *Sistemas eléctricos—Tensiones eléctricas normalizadas (NMX-J-098-ANCE-2014)*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5396706&fecha=16/06/2015#gsc.tab=0
- Bai, Y., Zhuang, H., & Wang, D. (Eds.). (2006). *Advanced fuzzy logic technologies in industrial applications*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-84628-469-4>
- Campos-Mercado, E., Mendoza-Santos, E. F., Torres-Muñoz, J. A., Román-Hernández, E., Moreno-Oliva, V. I., Hernández-Escobedo, Q., & Perea-Moreno, A.-J. (2021). Nonlinear controller for the set-point regulation of a buck converter system. *Energies*, 14(18), 5760. <https://doi.org/10.3390/en14185760>

- Díaz, M., Rojas, A., & Rodríguez, J. (2025). Power electronics for energy transition and renewable energy conversion processes. *Processes*, 13(11), 3650. <https://doi.org/10.3390/pr13113650>
- Jafari, M., Gharehpetian, G. B., & Anvari-Moghaddam, A. (2024). On the role of virtual inertia units in modern power systems: A review of control strategies, applications and recent developments. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 159, 110067. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2024.110067>
- Kazimierczuk, M. K. (2015). *Pulse-width modulated DC–DC power converters* (2nd ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119009597>
- Ponce, P. (2010). *Inteligencia artificial con aplicaciones a la ingeniería*. Alfaomega Grupo Editor.
- Saatchi, R. (2024). Fuzzy logic concepts, developments and implementation. *Information*, 15(10), 656. <https://doi.org/10.3390/info15100656>
- Salvatierra, T., & Kazimierczuk, M. K. (2017). DC analysis and design of a PWM buck converter operated as a dynamic power supply. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 45, 681–706. <https://doi.org/10.1002/cta.2270>
- Teixeira, L., Zhang, Y., & Kang, Y. (2011). Stability analysis of power system in Cape Verde with wind power under wind gust and short circuit fault. In *2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)* (pp. 1072–1075). IEEE. <https://doi.org/10.1109/DRPT.2011.5994054>
- Tummala, A., Velamati, R. K., Sinha, D. K., Indrāja, V., & Krishna, V. H. (2016). A review on small scale wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 1351–1371. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.027>
- Visioli, A. (2006). *Practical PID control*. Springer. <https://doi.org/10.1007/1-84628-586-0>
- Wood, D. (2011). *Small wind turbines: Analysis, design, and application*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-84996-175-2>

Factores críticos que limitan la eficiencia en celdas solares de película delgada basadas en $\text{Sb}_2(\text{S,Se})_3$

BIAANI' GUADALUPE CRUZ MARIN^{1,*} | MAYKEL COUREL² | ISAAC MONTOYA DE LOS SANTOS¹

¹ División de Estudios de Posgrado, Universidad del Istmo, 70760, Santo Domingo Tehuantepec, Oaxaca, México.

² Centro Universitario de los Valles (CUValles), Universidad de Guadalajara, 46600 Ameca, Jalisco, México.

* Correspondencia: biaani_cruz@hotmail.com

Recibido: 12/06/2026

Revisado: 23/06/2026

Aceptado: 01/07/2026

Publicado: 08/07/2026

RESUMEN: El $\text{Sb}_2(\text{S,Se})_3$ es un semiconductor emergente de gran interés para el desarrollo de celdas solares de película delgada. Su relevancia se debe a que combina propiedades favorables para la conversión fotovoltaica, tales como un alto coeficiente de absorción óptica, estabilidad química, baja toxicidad relativa, composición basada en elementos más abundantes que los empleados en otras tecnologías comerciales y una brecha de energía ajustable mediante el control de la razón composicional $\text{Se}/(\text{Se}+\text{S})$. En este artículo se describen las principales propiedades estructurales y ópticas del $\text{Sb}_2(\text{S,Se})_3$. Asimismo, se analizan los factores críticos que limitan la eficiencia fotovoltaica de esta tecnología, destacando el papel de los defectos en volumen e interfaces del dispositivo. Finalmente, se presentan los avances más recientes y las estrategias de optimización reportadas, mostrando que $\text{Sb}_2(\text{S,Se})_3$ constituye una alternativa prometedora para el desarrollo de dispositivos fotovoltaicos de bajo costo.

ABSTRACT: $\text{Sb}_2(\text{S,Se})_3$ is an emerging semiconductor of great interest for the development of thin-film solar cells. Its significance stems from the fact that it combines properties favorable for photovoltaic conversion, such as a high optical absorption coefficient, chemical stability, relatively low toxicity, a composition based on elements more abundant than those used in other commercial technologies, and an adjustable bandgap achieved by controlling the $\text{Se}/(\text{Se}+\text{S})$ composition ratio. This article describes the main structural and optical properties of $\text{Sb}_2(\text{S,Se})_3$. It also analyzes the critical factors that limit the photovoltaic efficiency of this technology, highlighting the role of volume defects and device interfaces. Finally, the most recent advances and reported optimization strategies are presented, demonstrating that $\text{Sb}_2(\text{S,Se})_3$ is a promising alternative for the development of low-cost photovoltaic devices.

Palabras clave: $\text{Sb}_2(\text{S,Se})_3$; razón composicional; defectos en bulto; defectos interfaciales; cinética hidrotermal; Na_2S

1. INTRODUCCIÓN

Las celdas solares convierten directamente la energía de la radiación solar en electricidad mediante materiales semiconductores. En una celda solar, los fotones absorbidos generan pares electrón-hueco; después, el campo eléctrico interno y las capas de transporte deben separar esas cargas y conducir las hasta los contactos. La eficiencia de conversión de potencia (PCE, por sus siglas en inglés) depende de qué tan bien ocurren esos procesos y de cuántas pérdidas se evitan durante la absorción, separación, transporte y recolección de portadores.

Las tecnologías fotovoltaicas de película delgada surgieron como una alternativa para reducir el consumo de material semiconductor y permitir procesos de fabricación de menor costo, más ligeros

e incluso flexibles. Las tecnologías comerciales de CdTe y CIGS han mostrado eficiencias elevadas; sin embargo, enfrentan preocupaciones asociadas a la toxicidad, la disponibilidad de elementos o la complejidad de procesamiento. Por ello, una parte importante de la investigación actual busca materiales absorbentes basados en elementos más abundantes, con propiedades ópticas adecuadas y que puedan fabricarse a temperaturas moderadas (Green et al., 2019).

En este contexto, los calcogenuros de antimonio han recibido atención creciente. El $\text{Sb}_2(\text{S,Se})_3$ es particularmente atractivo porque combina características de dos compuestos binarios: Sb_2S_3 y Sb_2Se_3 . Al variar la proporción de azufre y selenio se modifican sus propiedades ópticas y electrónicas, de

modo que es posible ajustar la brecha de energía en un intervalo útil para absorber radiación solar. Además, se trata de un semiconductor de transición directa, con alto coeficiente de absorción y buena estabilidad frente a condiciones ambientales (Wang et al., 2018).

Aunque las eficiencias experimentales reportadas para celdas solares basadas en $\text{Sb}_2(\text{S,Se})_3$ se sitúan actualmente alrededor del 11 %, estudios de simulación indican que este material posee un potencial fotovoltaico considerablemente mayor. Xiong et al. (2024) demostraron que, mediante la optimización de parámetros como las resistencias internas, la alineación de bandas, la recombinación interfacial y el espesor del absorbedor, es posible superar el 20 % de eficiencia e incluso alcanzar valores simulados de hasta 26.77 % bajo condiciones ideales.

Para contextualizar el nivel de desarrollo de esta tecnología, la Tabla 1 compara la máxima eficiencia de conversión de potencia reportada para $\text{Sb}_2(\text{S,Se})_3$ con la de otras tecnologías fotovoltaicas ampliamente estudiadas.

Tabla 1. Comparación de las máximas eficiencias de conversión de potencia (PCE) reportadas para diferentes tecnologías fotovoltaicas de unión simple. Los valores de Si cristalino, GaAs, CIGS, CdTe y perovskitas fueron tomados de Green et al. (2025), mientras que el valor correspondiente a $\text{Sb}_2(\text{S,Se})_3$ se obtuvo de Qian et al. (2026)

Tecnología fotovoltaica	Máxima PCE reportada (%)
Si cristalino	27.8 ± 0.4
GaAs	29.1 ± 0.6
CIGS	23.35 ± 0.5
CdTe	21.0 ± 0.4
Perovskita	26.9 ± 0.8
$\text{Sb}_2(\text{S,Se})_3$	11.02

A pesar de este potencial, las celdas solares basadas en $\text{Sb}_2(\text{S,Se})_3$ aún presentan eficiencias inferiores a las esperadas. La revisión de Nicolás-Marín, González-Castillo, Vigil-Galán y Courel (Nicolás-Marín et al., 2022) muestra que las pérdidas más importantes están asociadas con defectos en el volumen del material y, de manera muy marcada, con defectos en las interfaces del dispositivo. El objetivo de este artículo es explicar esos factores en lenguaje accesible, incorporando tablas de propiedades y de configuraciones fotovoltaicas representativas.

2. PROPIEDADES DEL $\text{Sb}_2(\text{S,Se})_3$

2.1 ESTRUCTURA CRISTALINA Y ORIENTACIÓN DE CINTAS

El $\text{Sb}_2(\text{S,Se})_3$ presenta una estructura cristalina ortorrómbica y cuasi-unidimensional, formada por cadenas o cintas del tipo $(\text{Sb}_4\text{X}_6)_n$, donde X puede ser S o Se. Dentro de cada cinta predominan enlaces covalentes fuertes Sb-X, mientras que entre cintas

actúan fuerzas de van der Waals más débiles, como se muestra en la Figura 1. Esta diferencia en el tipo de enlace produce transporte anisotrópico, es decir, la movilidad de los portadores depende de la dirección cristalográfica.

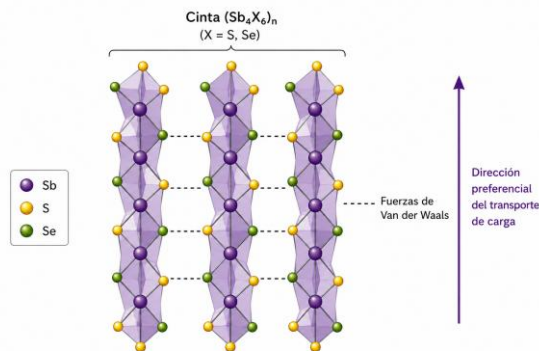


Figura 1. Esquema de las cintas cuasiunidimensionales $(\text{Sb}_4\text{X}_6)_n$ de la estructura cristalina de $\text{Sb}_2(\text{S,Se})_3$.

Para una celda solar, esta característica es crucial. Si las cintas se orientan de modo que faciliten el movimiento de electrones y huecos hacia los contactos, la recolección de carga mejora. Si, por el contrario, los portadores deben atravesar muchas fronteras entre cintas o granos, aumenta la probabilidad de recombinación. Por ello, la técnica de depósito, el sustrato y los tratamientos térmicos no solo determinan la morfología de la película, sino también la calidad eléctrica del dispositivo.

El artículo base indica que sustratos como $\text{SnO}_2:\text{F}$ (FTO) pueden favorecer una orientación más adecuada de las cintas, lo cual se asocia con mejores propiedades de transporte (Nicolás-Marín et al., 2022). También se ha reportado que métodos como el depósito hidrotermal, el transporte de vapor y la sublimación en el espacio cercano pueden modificar la orientación preferencial y la densidad de defectos de la película.

2.2 BRECHA DE ENERGÍA AJUSTABLE Y ABSORCIÓN ÓPTICA

Una de las propiedades más relevantes del $\text{Sb}_2(\text{S,Se})_3$ es que su brecha de energía puede ajustarse mediante la relación composicional $\text{Se}/(\text{Se}+\text{S})$. Al aumentar el contenido de Se, la brecha disminuye. En términos prácticos, esto permite desplazar el borde de absorción hacia longitudes de onda más largas y aprovechar una mayor fracción del espectro solar, siempre que la separación de cargas y las interfaces se mantengan optimizadas.

La Tabla 2 resume valores representativos compilados a partir de reportes experimentales. Aunque la tendencia general es descendente, los valores exactos pueden variar según la técnica de depósito, el tratamiento térmico, la calidad cristalina y la composición real de la película. Esta variabilidad explica por qué, para una misma razón composicional

aproximada, pueden observarse rangos de brecha ligeramente distintos.

Tabla 2. Valores representativos de la brecha de energía en función de la razón Se/(Se+S) para $\text{Sb}_2(\text{S,Se})_3$. Adaptado de la compilación reportada en (Nicolás-Marín et al., 2022) y de reportes recientes de bajo costo (Chen et al., 2023).

Se/(Se+S)	Eg reportada (eV)
0.00	1.69-1.87
0.08	1.63
0.17	1.50-1.57
0.25	1.55
0.30	1.49-1.52
0.41	1.48-1.53
0.48	1.45
0.59	1.42-1.45
0.66	1.25-1.36
0.75	1.26-1.35
0.80	1.28-1.30
0.92	1.19-1.23
1.00	1.10-1.30

2.3 PROCESAMIENTO, ESTABILIDAD Y VENTAJAS TECNOLÓGICAS

El alto coeficiente de absorción del $\text{Sb}_2(\text{S,Se})_3$, mayor que 10^5 cm^{-1} , permite que películas delgadas absorban una cantidad considerable de luz. Esta propiedad es una ventaja frente a materiales indirectos como el silicio cristalino, que requieren espesores mucho mayores. Además, las películas de calcogenuros de antimonio pueden procesarse a temperaturas relativamente bajas, usualmente del orden de 300 a 400 °C, lo que abre oportunidades para sustratos flexibles o procesos de menor consumo energético.

Otra ventaja es que el compuesto ternario puede cubrir una región de brecha de energía útil para dispositivos de unión simple y para dispositivos tándem. Por ejemplo, una brecha de banda de 1.3-1.4 eV suele ser favorable para absorber una amplia porción del espectro solar en celdas de unión. En cambio, composiciones más ricas en azufre, con brechas mayores, pueden resultar de interés en esquemas semitransparentes o en tándem, donde se requiere que parte de la radiación pase a una celda inferior.

No obstante, la estabilidad del material absorbedor no garantiza la estabilidad del dispositivo completo. Las capas de transporte y los contactos metálicos pueden introducir problemas de degradación, difusión o inestabilidad química. En particular, las celdas de mayor eficiencia han utilizado con frecuencia CdS como capa de transporte de electrones y Spiro-OMeTAD como capa de transporte de huecos (véase figura 2); ambas capas han permitido avances importantes, pero también han motivado la búsqueda de alternativas menos tóxicas, más económicas y más estables.

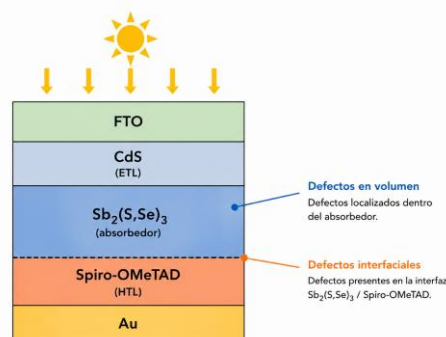


Figura 2. Arquitectura de una celda solar basada en $\text{Sb}_2(\text{S,Se})_3$ y ubicación de los principales defectos analizados en este trabajo.

3. FACTORES CRÍTICOS QUE LIMITAN LA EFICIENCIA

Aunque el $\text{Sb}_2(\text{S,Se})_3$ presenta propiedades ópticas favorables, el rendimiento de una celda solar depende de todo el dispositivo. La PCE se reduce cuando disminuye la corriente de cortocircuito (J_{sc}), el voltaje de circuito abierto (V_{oc}) o el factor de forma (FF). En esta tecnología, las pérdidas más frecuentes están asociadas con recombinación no radiativa, defectos profundos, barreras de transporte, resistencias internas y degradación de interfaces. Desde la publicación de la revisión base en 2022, las eficiencias reportadas han seguido mejorando. Se han comunicado dispositivos con eficiencias cercanas a 10.8% mediante pasivación in situ (Zhao et al., 2024), 10.95% como eficiencia campeona con una capa dieléctrica de Ta_2O_5 y 10.65% certificada (Gong et al., 2025), así como 11.02% de eficiencia de laboratorio con $10.7 \pm 0.37\%$ certificada mediante control de la cinética hidrotermal con sulfuro de sodio (Qian et al., 2026). Estos valores muestran que la tecnología avanza, pero también que los incrementos recientes provienen principalmente del control de defectos e interfaces.

3.1 DEFECTOS BULK (EN VOLUMEN)

Los defectos bulk son imperfecciones localizadas dentro del volumen del material absorbedor. Pueden ser vacancias, átomos intersticiales, sustituciones en sitios equivocados o defectos asociados a fronteras de grano. En los semiconductores fotovoltaicos, estos defectos son especialmente perjudiciales cuando introducen niveles de energía profundos dentro de la brecha de energía, porque actúan como centros de recombinación de Shockley-Read-Hall. En lenguaje sencillo, se comportan como puntos en los que un electrón y un hueco se encuentran y se anulan antes de llegar a los contactos.

En $\text{Sb}_2(\text{S,Se})_3$ se han identificado niveles de trampa alrededor de $E_v + 0.49\text{-}0.52 \text{ eV}$ y $E_v + 0.69\text{-}0.81 \text{ eV}$, asociados con defectos como vacancias de antimonio y antisitos SeSb o SSb (Nicolás-Marín et al., 2022; Lian et al., 2020). La revisión señala que estos niveles

pueden reducir la vida media de los portadores hasta valores que van de 0.1 ns a decenas de ns. Cuando la vida media es corta, la distancia que puede recorrer un portador antes de recombinarse también disminuye, por lo que la corriente generada por la luz se aprovecha de manera incompleta.

La densidad de defectos en el volumen también afecta la posición del nivel de Fermi y la concentración de portadores. Si el material presenta una elevada densidad de defectos profundos, el nivel de Fermi puede quedar “anclado”, lo cual limita el Voc. Esta pérdida de voltaje es una de las brechas más importantes entre las eficiencias experimentales y los límites teóricos. Por ello, las estrategias modernas buscan no solo absorber más luz, sino reducir las rutas de recombinación dentro del semiconductor.

El control de defectos bulk comienza durante el crecimiento de la película. La composición real de S y Se, la disponibilidad de antimonio, la temperatura, el tiempo de reacción, el pH de la solución y la velocidad de cristalización pueden favorecer o inhibir defectos. Por ejemplo, el uso de aditivos en el precursor hidrotermal se ha empleado para regular la liberación de especies químicas y obtener una distribución más uniforme de S y Se, con menor formación de defectos profundos (Qian et al., 2026; Wu et al., 2020).

También se han propuesto tratamientos posteriores, dopaje ligero y pasivación química. La pasivación consiste en neutralizar defectos para que dejen de actuar como trampas. En esta tecnología se ha buscado pasivar defectos asociados a vacancias de calcógeno o defectos antisito; de esta manera se mejora la fotoluminiscencia, se reducen las pérdidas no radiativas y aumenta la eficiencia. El punto clave es que una película con alta absorción solo será útil si los portadores generados pueden sobrevivir el tiempo suficiente para ser extraídos.

3.2 DEFECTOS INTERFACIALES

Los defectos interfaciales se localizan en la frontera entre dos capas del dispositivo. En una celda típica, el $\text{Sb}_2(\text{S,Se})_3$ se coloca entre una capa transportadora de electrones y una capa transportadora de huecos. La interfaz no es simplemente una línea geométrica: es una región donde se encuentran materiales con distinta estructura, composición, polaridad, energía de bandas y química superficial. Por ello, puede concentrar una alta densidad de estados electrónicos no deseados (Dong et al., 2021).

La interfaz $\text{CdS}/\text{Sb}_2(\text{S,Se})_3$ ha sido identificada como una de las principales fuentes de pérdida en muchas configuraciones (Nicolás-Marín et al., 2022; Ayala-Mató et al., 2021). El CdS ha funcionado bien como capa de transporte de electrones porque permite formar heterouniones eficientes, pero su estructura y sus parámetros de red no coinciden perfectamente con los del absorbedor. Ese desajuste puede generar

defectos, enlaces incompletos o regiones de recombinación. Además, al estar cerca de la zona de separación de carga, cualquier trampa interfacial tiene un efecto fuerte sobre Voc y FF.

Además de la densidad de defectos, importa la alineación energética. Si la banda de conducción de la capa transportadora de electrones (ETL, por sus siglas en inglés) queda demasiado baja o demasiado alta respecto al $\text{Sb}_2(\text{S,Se})_3$, puede formarse un alineamiento tipo Cliff (tipo acantilado) o una barrera tipo spike excesiva (tipo pico) como se muestra en la figura 3. Un cliff facilita la recombinación interfacial; un spike demasiado grande dificulta la extracción de electrones. El diseño de interfaces busca un alineamiento que permita extracción selectiva sin acumular portadores en la unión.

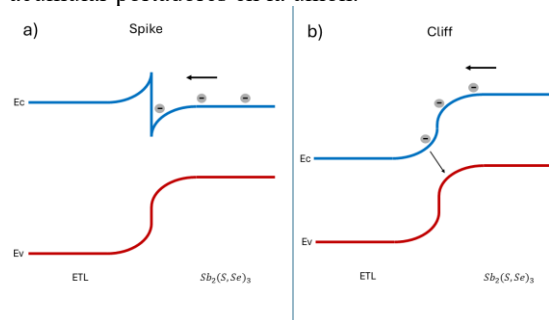


Figura 3. Representación esquemática de alineamientos energéticos tipo (a) spike y (b) cliff en la interfaz ETL/ $\text{Sb}_2(\text{S,Se})_3$.

Una ruta de mejora consiste en modificar la ETL. Se han explorado capas dobles como $\text{Zn}(\text{O,S})/\text{CdS}$, tratamientos con hidrazina sobre CdS, dopaje con In, capas ultradelgadas de SnO_2 o materiales dieléctricos para pasivación de campo. El objetivo común es reducir defectos, mejorar la humectación y ajustar la alineación de bandas. Por ejemplo, una capa de Ta_2O_5 entre CdS y $\text{Sb}_2(\text{S,Se})_3$ se reportó como estrategia de pasivación de campo, reduciendo la pérdida de Voc y elevando la PCE campeona a 10.95% (Gong et al., 2025).

Las interfaces con la capa transportadora de huecos (HTL, por sus siglas en inglés) y el contacto posterior también deben considerarse. Spiro-OMeTAD ha sido útil para alcanzar eficiencias altas, pero incorpora problemas de costo, estabilidad y sensibilidad a aditivos. Alternativas inorgánicas pueden mejorar estabilidad y reducir costos, aunque aún deben optimizarse para lograr buena extracción de huecos y baja recombinación. En síntesis, el avance de esta tecnología depende de pasar de una selección empírica de capas a un diseño racional de interfaces.

3.3 CONFIGURACIÓN DEL DISPOSITIVO, TRANSPORTE Y EFICIENCIA REPORTADA

La arquitectura del dispositivo determina cómo se separan y recolectan los portadores. En configuraciones tipo sustrato, una estructura

común es vidrio/FTO/CdS/Sb₂(S,Se)₃/HTL/Au. También se han usado estructuras n-i-p, donde una ETL y una HTL generan un campo eléctrico interno que ayuda a separar electrones y huecos. La elección de cada capa debe equilibrar transparencia, conductividad, estabilidad, alineación de bandas y compatibilidad química.

La **Tabla 3** resume configuraciones representativas y eficiencias reportadas. Los primeros dispositivos mostraban eficiencias alrededor de 5-7%, mientras que la optimización de orientación, pasivación y diseño de interfaces permitió superar el umbral de 10%. Los valores recientes cercanos a 11% indican una mejora sostenida, aunque todavía existe una diferencia significativa respecto a predicciones numéricas que sugieren eficiencias mayores si se reducen pérdidas resistivas, defectos interfaciales y recombinación bulk (**Xiong et al., 2024**).

Tabla 3. Configuraciones representativas de celdas solares basadas en Sb₂(S,Se)₃ y eficiencias reportadas. Se incluyen valores de la revisión base (**Nicolás-Marín et al., 2022**) y avances posteriores (**Li et al., 2022**; **Qian et al., 2026**).

Configuración / estrategia	PCE (%) / Tipo
2014 - FTO/TiO ₂ /m-TiO ₂ /Sb ₂ (Sx/Se _{1-x}) ₃ /P3HT/Au	6.6 Laboratorio (Choi et al., 2014)
2017 - Gradiente S-rico/Se-rico con HTM/Au	5.7 Certificada (Zhang et al., 2017)
2018 - FTO/ZnO/CdS/Sb ₂ (S,Se) ₃ /Au, doble buffer	5.71 Laboratorio (Ishaq et al., 2018)
2019 - FTO/CdS/Sb ₂ (S,Se) ₃ /Spiro-OMeTAD/Au	6.1 Laboratorio (Wang et al., 2019)
2020 - Propiedades eléctricas optimizadas, Spiro/Au	10.5 Laboratorio (Wang et al., 2020)
2021 - FTO/CdS/Sb ₂ (S,Se) ₃ /DTPTh Me-ThTPA/Au	9.7 Laboratorio (Jiang et al., 2021)
2021 - FTO/Zn(O,S)/CdS/Sb ₂ (S,Se) ₃ /Spiro-OMeTAD/Au	10.7 Laboratorio (Zhao et al., 2022)
2022 - CdS modificado con N ₂ H ₄ , Spiro/Au	10.30 Laboratorio (Li et al., 2022)
2023 - Depósito hidrotermal asistido por solvente (SHD)	10.75 Laboratorio (Chen et al., 2023)
2024 - Pasivación in situ con selenosulfato de sodio	10.81

	Laboratorio (Zhao et al., 2024)
2025 - CdS/Ta ₂ O ₅ /Sb ₂ (S,Se) ₃ , pasivación de campo	10.95/10.65 Laboratorio/certificada (Gong et al., 2025)
2026 - Control de cinética hidrotermal con Na ₂ S	11.02 / 10.7 ± 0.37 Laboratorio/certificada (Qian et al., 2026)

La orientación cristalina es un factor transversal a todas estas configuraciones. Una película con cintas orientadas favorablemente reduce obstáculos al transporte. Por ello, el depósito por transporte de vapor, la sublimación en espacio cercano y el crecimiento hidrotermal han sido estudiados no solo por su costo, sino por su capacidad para controlar textura, tamaño de grano y composición. Una película compacta, con baja porosidad y granos conectados, reduce los caminos de recombinación y mejora Jsc. El factor de llenado también refleja la calidad del transporte. Si existen resistencias internas elevadas, mala conductividad de las capas de transporte o barreras en las interfaces, la curva J-V se distorsiona y el FF disminuye. En algunos estudios numéricos se ha mostrado que optimizar primero las resistencias internas puede elevar significativamente el FF, mientras que la reducción de la recombinación interfacial impacta más directamente en Voc (**Xiong et al., 2024**).

La estabilidad debe evaluarse junto con la eficiencia. Un dispositivo que alcanza una alta PCE inicial puede perder rendimiento si la HTL, los aditivos o los contactos se degradan. Por ello, los trabajos recientes buscan materiales inorgánicos, tratamientos de pasivación y estructuras más robustas. La meta no es únicamente alcanzar un valor récord de laboratorio, sino obtener dispositivos reproducibles, escalables, menos tóxicos y estables en operación prolongada.

3.4 AVANCE RECIENTE: CONTROL DE LA CINÉTICA HIDROTHERMAL CON Na₂S

Un avance reciente publicado en Nature Energy mostró que parte de las pérdidas en celdas de Sb₂(S,Se)₃ no sólo se originan por defectos ya presentes en la película, sino por la forma en que el material se forma durante el depósito hidrotermal. En este trabajo, **Qian et al.** estudiaron la reacción entre el precursor de antimonio, el tiosulfato de sodio y la selenourea, y propusieron regular la cinética de crecimiento mediante sulfuro de sodio (Na₂S) en la solución precursora (**Qian et al., 2026**).

La novedad principal consiste en pasar de una estrategia de corrección posterior del dispositivo a una estrategia de control químico durante la síntesis.

El Na_2S amortigua el pH: mientras la condición control tiende a acidificarse cerca de pH 4.6, la condición con Na_2S estabiliza el medio alrededor de pH 6.2. Esto ralentiza la liberación de Se, reduce la formación rápida e irregular de Sb_2Se_3 y favorece una incorporación más uniforme de S y Se a lo largo del espesor del absorbedor (Qian et al., 2026).

El control de la reacción modifica la física del dispositivo. En la muestra control se observan gradientes composicionales, vacíos en la sección transversal y una inclinación desfavorable de la banda de valencia máxima (VBM), que funciona como barrera para el transporte de huecos. Con Na_2S , la distribución S/Se se vuelve más homogénea, el perfil de bandas se aplanan y disminuye la recombinación no radiativa asociada con defectos profundos. El estudio identifica trampas H1 y H2 asociadas con vacancias de azufre y defectos antisitio SbS, cuya contribución se reduce mediante la estrategia con Na_2S (Qian et al., 2026).

Los resultados fotovoltaicos son una buena forma de comunicar la importancia de este avance: la celda control presentó $V_{oc} = 660.94$ mV, $J_{sc} = 22.71$ mA cm^{-2} , FF = 66.09% y PCE = 9.92%; en cambio, la celda con Na_2S alcanzó $V_{oc} = 639.41$ mV, $J_{sc} = 24.96$ mA cm^{-2} , FF = 69.02% y PCE = 11.02%, con una eficiencia certificada de $10.7 \pm 0.37\%$. Aunque V_{oc} disminuyó ligeramente, el incremento de J_{sc} y FF indica una mejor colección de carga y menor recombinación (Qian et al., 2026).

Para el artículo de divulgación, este resultado es especialmente valioso porque conecta la química de síntesis, la estructura del material y el desempeño eléctrico en una misma explicación: controlar la reacción hidrotermal permite fabricar una película más uniforme, reducir centros de recombinación y acercar la tecnología $\text{Sb}_2(\text{S},\text{Se})_3$ a eficiencias de 11% en laboratorio.

4. CONCLUSIONES

El $\text{Sb}_2(\text{S},\text{Se})_3$ es un material prometedor para celdas solares de película delgada porque combina una brecha de energía ajustable, un alto coeficiente de absorción, estabilidad y la posibilidad de procesamiento a temperaturas moderadas. La razón Se/(Se+S) permite modificar E_g desde valores cercanos a 1.8 eV hasta alrededor de 1.1-1.3 eV, lo que abre oportunidades para celdas de unión simple, dispositivos semitransparentes y esquemas tándem.

El principal reto no es la absorción de luz, sino la conservación y extracción de las cargas generadas. Los defectos bulk introducen niveles profundos que aceleran recombinación no radiativa y reducen la vida media de los portadores. Los defectos interfaciales, especialmente en la unión $\text{CdS}/\text{Sb}_2(\text{S},\text{Se})_3$, limitan V_{oc} y FF por recombinación y desajuste energético. Por ello, la mejora de eficiencia requiere actuar

simultáneamente sobre la calidad del absorbente, la pasivación y la ingeniería de interfaces.

Los avances recientes muestran que estrategias como pasivación in situ, capas dieléctricas de Ta_2O_5 , control de cinética hidrotermal y ajuste de composición pueden llevar las eficiencias de laboratorio hacia 11%. Para que esta tecnología avance hacia aplicaciones comerciales, será necesario mantener esa mejora en dispositivos de mayor área, reducir la dependencia de CdS y Spiro-OMeTAD, y demostrar estabilidad operativa bajo condiciones ambientales y de iluminación prolongada.

DECLARACIONES

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

REFERENCIAS

- Ayala-Mató, F., Vigil-Galán, O., Nicolás-Marín, M. M., & Courel, M. (2021). Study of loss mechanisms on $\text{Sb}_2(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_3$ solar cell with n-i-p structure: Toward an efficiency promotion. *Applied Physics Letters*, 118, 073903. <https://doi.org/10.1063/5.0032867>
- Chen, X., Che, B., Zhao, Y., Wang, S., Li, H., Gong, J., Chen, G., Chen, T., Xiao, X., & Li, J. (2023). Solvent-assisted hydrothermal deposition approach for highly efficient $\text{Sb}_2(\text{S},\text{Se})_3$ thin-film solar cells. *Advanced Energy Materials*, 13, 2300391. <https://doi.org/10.1002/aenm.202300391>
- Choi, Y. C., Lee, Y. H., Im, S. H., Noh, J. H., Mandal, T. N., Yang, W. S., & Seok, S. I. (2014). Efficient inorganic-organic heterojunction solar cells employing $\text{Sb}_2(\text{S}_x/\text{Se}_{1-x})_3$ graded-composition sensitizers. *Advanced Energy Materials*, 4, 1301680. <https://doi.org/10.1002/aenm.201301680>
- Dong, J., Liu, Y., Wang, Z., & Zhang, Y. (2021). Boosting VOC of antimony chalcogenide solar cells: A review on interfaces and defects. *Nano Select*, 2, 1818–1848. <https://doi.org/10.1002/nano.202000288>
- Gong, A., Liu, C., Yang, J., Li, B., Yang, S., Yang, R., Wang, Y., Shen, K., Xue, Q., Li, Z., Wang, J., Zou, B., & Mai, Y. (2025). Field-effect passivation for minimized voltage loss in highly efficient antimony selenosulfide solar cells. *Nature Communications*, 16, 11082. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-67334-y>
- Green, M. A., Dunlop, E. D., Levi, D. H., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., & Ho-Baillie, A. W. Y. (2019). Solar cell efficiency tables

- (version 54). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 27, 565–575. <https://doi.org/10.1002/pip.3171>
- Green, M. A., Dunlop, E. D., Yoshita, M., Kopidakis, N., Bothe, K., Siefer, G., Hao, X., & Jiang, J. Y. (2025). Solar cell efficiency tables (version 66). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 33, 795–810. <https://doi.org/10.1002/pip.3919>
- Ishaq, M., Deng, H., Yuan, S., & Tang, J. (2018). Efficient double buffer layer $\text{Sb}_2(\text{Se}_x\text{S}_{1-x})_3$ thin film solar cell via single source evaporation. *Solar RRL*, 2, 1800144. <https://doi.org/10.1002/solr.201800144>
- Jiang, C., Zhou, J., Tang, R., Lian, W., Wang, X., Lei, X., Zeng, H., Zhu, C., Tang, W., & Chen, T. (2021). 9.7%-efficient $\text{Sb}_2(\text{S,Se})_3$ solar cells with a dithieno[3,2-b:2',3'-d]pyrrole-cored hole transporting material. *Energy & Environmental Science*, 14, 359–364. <https://doi.org/10.1039/D0EE02239J>
- Li, J., Zhao, Y., Li, C., Wang, S., Chen, X., Gong, J., Wang, X., & Xiao, X. (2022). Hydrazine hydrate-induced surface modification of CdS electron transport layer enables 10.30%-efficient $\text{Sb}_2(\text{S,Se})_3$ planar solar cells. *Advanced Science*, 9, 2202356. <https://doi.org/10.1002/advs.202202356>
- Lian, W., Tang, R., Ma, Y., Wu, C., Chen, C., Wang, X., Fang, F., Zhang, J., Wang, Z., Ju, H., Zhu, C., & Chen, T. (2020). Probing the trap states in n-i-p $\text{Sb}_2(\text{S,Se})_3$ solar cells by deep-level transient spectroscopy. *The Journal of Chemical Physics*, 153, 124703. <https://doi.org/10.1063/5.0020244>
- Nicolás-Marín, M. M., González-Castillo, J. R., Vigil-Galán, O., & Courel, M. (2022). The state of the art of $\text{Sb}_2(\text{S,Se})_3$ thin film solar cells: Current progress and future prospect. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 55, 303001. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac5f32>
- Qian, C., Sun, K., Huang, J., Yang, J., Cong, J., He, M., Li, Z., Feng, Z., Liu, X., Tang, R., Green, M., Chen, T., & Hao, X. (2026). Regulation of hydrothermal reaction kinetics with sodium sulfide for certified 10.7% efficiency $\text{Sb}_2(\text{S,Se})_3$ solar cells. *Nature Energy*, 11, 415–424. <https://doi.org/10.1038/s41560-025-01952-0>
- Wang, W., Wang, X., Chen, G., Yao, L., Huang, X., Chen, T., Zhu, C., Chen, S., Huang, Z., & Zhang, Y. (2019). Over 6% certified $\text{Sb}_2(\text{S,Se})_3$ solar cells fabricated via in situ hydrothermal growth and postselenization. *Advanced Electronic Materials*, 5, 1800683. <https://doi.org/10.1002/aelm.201800683>
- Wang, X., Tang, R., Wu, C., Zhu, C., & Chen, T. (2018). Development of antimony sulfide-selenide $\text{Sb}_2(\text{S,Se})_3$ -based solar cells. *Journal of Energy Chemistry*, 27, 713–721. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2017.09.031>
- Wang, X., Tang, R., Jiang, C., Lian, W., Ju, H., Jiang, G., Li, Z., Zhu, C., & Chen, T. (2020). Manipulating the electrical properties of $\text{Sb}_2(\text{S,Se})_3$ film for high-efficiency solar cell. *Advanced Energy Materials*, 10, 2002341. <https://doi.org/10.1002/aenm.202002341>
- Wu, C., Lian, W., Zhang, L., Ding, H., Jiang, C., Ma, Y., Han, W., Li, Y., Zhu, J., Chen, T., & Zhu, C. (2020). Water additive enhanced solution processing of alloy $\text{Sb}_2(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_3$ -based solar cells. *Solar RRL*, 4, 1900582. <https://doi.org/10.1002/solr.201900582>
- Xiong, X., Ding, C., Jiang, B., Zeng, G., & Li, B. (2024). An optimization path for $\text{Sb}_2(\text{S,Se})_3$ solar cells to achieve an efficiency exceeding 20%. *Nanomaterials*, 14, 1433. <https://doi.org/10.3390/nano14171433>
- Zhang, Y., Li, J., Jiang, G., Liu, W., Yang, S., Zhu, C., & Chen, T. (2017). Selenium-graded $\text{Sb}_2(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_3$ for planar heterojunction solar cell delivering a certified power conversion efficiency of 5.71%. *Solar RRL*, 1, 1700017. <https://doi.org/10.1002/solr.201700017>
- Zhao, Y., Wang, S., Jiang, C., Li, C., Xiao, P., Tang, R., Gong, J., Chen, G., Chen, T., Li, J., & Xiao, X. (2022). Regulating energy band alignment via alkaline metal fluoride assisted solution post-treatment enabling $\text{Sb}_2(\text{S,Se})_3$ solar cells with 10.7% efficiency. *Advanced Energy Materials*, 12, 2103015. <https://doi.org/10.1002/aenm.202103015>
- Zhao, Y., Xu, W., Wen, J., Wang, X., Chen, X., Che, B., Wang, H., Gong, J., Chen, T., Xiao, X., & Li, J. (2024). Innovative in situ passivation strategy for high-efficiency $\text{Sb}_2(\text{S,Se})_3$ solar cells. *Advanced Materials*, 36, 2410669. <https://doi.org/10.1002/adma.202410669>

Simulación mediante SCAPS del efecto de la irradiancia y la temperatura en el V_{mpp} de una celda solar de silicio

ATZIRY CÁRDENAS JIJON^{1,*} | DANIEL PACHECO BAUTISTA¹ | HUGO JORGE CORTINA MARRERO¹ | LILIANA HECHAVARRÍA DIFUR¹ | ALAN LÓPEZ VILLEGAS¹

¹ División de Estudios de Posgrado, Universidad del Istmo, Campus Tehuantepec, Oaxaca, México.

* Correspondencia: atziry_caji@hotmail.com

Recibido: 12/06/2026

Revisado: 25/06/2026

Aceptado: 02/07/2026

Publicado: 08/07/2026

RESUMEN: El voltaje en el punto de máxima potencia (V_{mpp}) constituye un parámetro fundamental para la operación eficiente de sistemas fotovoltaicos, debido a su papel en los algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT). En este trabajo se propone una metodología de análisis con tres escenarios de simulación numérica, contruidos a partir de mediciones experimentales de irradiancia y temperatura del módulo de silicio cristalino, con el objetivo de determinar qué variable controla el comportamiento temporal del V_{mpp} durante diferentes intervalos del día, bajo condiciones ambientales reales. Los resultados muestran que durante las primeras y últimas horas del día el comportamiento del V_{mpp} está regido principalmente por la irradiancia, mientras que en las horas centrales predominan los efectos térmicos asociados al calentamiento del módulo. Esto significa que diferentes escenarios simplificados reproducen adecuadamente, en diferentes intervalos del día, el comportamiento del V_{mpp} descrito por el escenario completo, proporcionando una descripción e interpretación física útil del comportamiento del punto de máxima potencia, bajo condiciones reales de operación.

ABSTRACT: The voltage at the maximum power point (V_{mpp}) is a fundamental parameter for the efficient operation of photovoltaic systems because of its role in maximum power point tracking (MPPT) algorithms. This work proposes an analysis methodology based on three numerical simulation scenarios, developed from experimental measurements of irradiancia and crystalline silicon module temperature, with the aim of determining which variable governs the temporal behavior of V_{mpp} during different periods of the day under real operating conditions. The results show that during the early morning and late afternoon, the behavior of V_{mpp} is primarily governed by irradiancia, whereas during the central hours of the day, thermal effects associated with module heating become dominant. These findings indicate that different simplified scenarios accurately reproduce the behavior of V_{mpp} obtained from the complete scenario over different periods of the day, providing a physical description and interpretation of the maximum power point behavior under real operating conditions.

Palabras clave: Celda solar de silicio, SCAPS, irradiancia, temperatura, voltaje del punto de máxima potencia

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el calentamiento global representa uno de los principales retos a nivel mundial (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2021), lo que ha impulsado la búsqueda de fuentes de energía más limpias y sostenibles. En este contexto, las energías renovables han adquirido un papel relevante, destacando la energía solar por su amplia disponibilidad y su bajo impacto ambiental, lo que ha

favorecido su creciente desarrollo y aplicación en los últimos años.

Este recurso es actualmente una de las opciones más viables para generar electricidad, principalmente porque proviene de una fuente limpia y renovable. Puede ser aprovechada de dos formas: térmica y fotovoltaica; esta última se basa en el uso de celdas solares para convertir directamente la radiación solar en energía eléctrica (Green, 1982; Allouhi et al., 2022).

Las celdas de silicio convierten la radiación solar en energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico, el cual ocurre cuando la radiación solar que incide sobre un material semiconductor es absorbida y en consecuencia se generan pares de electrones y huecos, cuyo transporte da lugar a una corriente eléctrica (Sze & Ng, 2007; Smets et al., 2015). Sin embargo, el rendimiento de conversión de la radiación solar en electricidad no es constante, ya que depende de factores ambientales tales como la irradiancia y la temperatura, las cuales afectan directamente al voltaje, la corriente y en consecuencia a la potencia que se puede obtener (Smets et al., 2015).

Las características eléctricas de salida de una celda solar pueden visualizarse en una curva, llamada curva densidad de corriente-voltaje (J-V), en la cual es posible determinar la calidad de la celda solar a través de sus parámetros fotovoltaicos (densidad de corriente de cortocircuito (J_{sc}), voltaje de circuito abierto (V_{oc}), densidad de corriente en el punto de máxima potencia (J_{mpp}), voltaje en el punto de máxima potencia (V_{mpp}) y potencia máxima (P_{mpp}).

En la Figura 1 se muestra la representación gráfica de una curva de densidad de corriente-voltaje (J-V), donde se identifica el punto de máxima potencia (MPP, por sus siglas en inglés) definido como el punto de operación donde el producto del voltaje por la corriente es máximo (Ngan & Tan, 2011; Gupta et al., 2024), es decir, corresponde a la condición en la cual la celda entrega la mayor potencia posible. Este punto no es fijo, sino que varía en función de las condiciones ambientales, por lo que es necesario implementar técnicas de seguimiento para asegurar el máximo aprovechamiento de la energía.

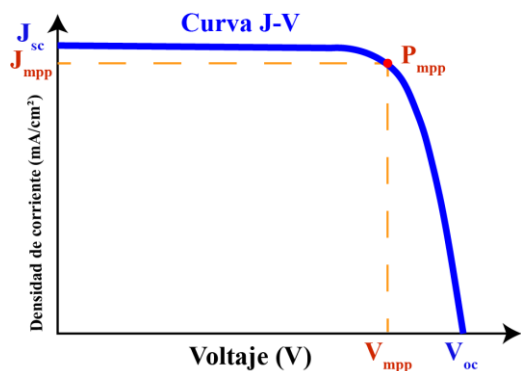


Figura 1. Curva característica J-V de una celda solar

En este contexto, diversos estudios han demostrado que la irradiancia afecta principalmente a la corriente generada por la celda, incrementándola conforme la radiación aumenta, mientras que la temperatura tiene un efecto más significativo sobre el voltaje, disminuyéndolo a medida que la temperatura aumenta (Markvart & Castañer, 2003; Smets et al., 2015). Estas variaciones impactan directamente en la

eficiencia del sistema fotovoltaico, ya que provocan desplazamientos en el punto de máxima potencia.

Considerando lo anterior, extraer la máxima potencia posible es un aspecto clave en la operación de sistemas fotovoltaicos, ya que pequeñas variaciones en el MPP pueden traducirse en pérdidas significativas de generación energética, por ello, comprender el comportamiento del voltaje en el punto de máxima potencia (V_{mpp}) bajo distintas condiciones ambientales resulta fundamental para optimizar el diseño y control de estos sistemas.

Un sistema fotovoltaico está compuesto principalmente por módulos solares (arreglo de celdas), un inversor que convierte la corriente directa en corriente alterna y una carga o red eléctrica donde la energía se consume o inyecta (Parida et al., 2011; Masters, 2013).

La influencia de la irradiancia y la temperatura sobre el comportamiento de una celda solar puede analizarse empleando herramientas de simulación, como el software SCAPS (Burgelman et al., 2000; University of Gent, s. f.), el cual permite modelar celdas solares y observar su eficiencia en función de parámetros ambientales y de las propiedades físicas del material semiconductor.

El presente trabajo aborda la simulación de una celda solar de silicio mediante el uso del software SCAPS, considerando su estructura básica y la variación de parámetros operativos como la irradiancia y la temperatura. A partir de estas simulaciones, se analiza el efecto de dichas variables sobre el voltaje en el punto de máxima potencia (V_{mpp}), un parámetro clave en el desempeño de los sistemas fotovoltaicos.

Debe señalarse que se han reportado trabajos en los que se analiza la influencia de la temperatura y la irradiancia sobre la curva J-V de celdas solares, mediante simulación numérica (Bazarbayev et al., 2022); sin embargo, estos estudios no suelen abordar la identificación y evaluación del papel dominante de cada variable (irradiancia, temperatura), durante diferentes intervalos de operación de un día real. En este trabajo se propone una metodología de análisis por escenarios, con tres escenarios de simulación contruidos a partir de mediciones experimentales de irradiancia y temperatura del módulo, con el objetivo de determinar qué variable controla el comportamiento temporal del voltaje del punto de máxima potencia durante diferentes intervalos del día, bajo condiciones reales de operación.

2. METODOLOGÍA

En el presente trabajo se realiza una simulación numérica de una celda solar de silicio, con el objetivo de analizar la influencia de la irradiancia y la temperatura en su desempeño, empleando datos

reales de operación. La **Figura 2** representa el flujo de la metodología propuesta, que comprende la adquisición de datos ambientales, la simulación numérica de la celda solar y la obtención del V_{mpp} .

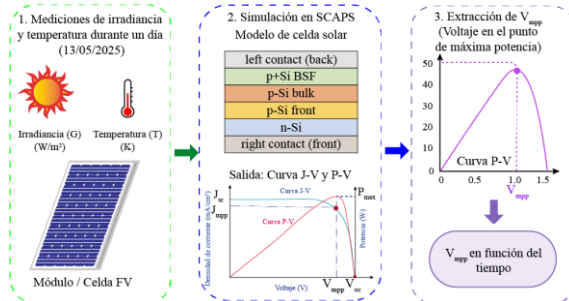


Figura 2. Diagrama de flujo de la metodología propuesta.

Para el desarrollo del estudio se utilizó el software SCAPS, una herramienta especializada en la simulación de dispositivos fotovoltaicos, que permite modelar el comportamiento eléctrico de celdas solares considerando parámetros físicos y condiciones de operación.

2.1 Modelo de la celda solar

Se utilizó un modelo predefinido de una celda solar de silicio en SCAPS (exampleSi.def). Este modelo representa la estructura básica de una celda tipo p-n, conformada por una capa de silicio tipo p y una capa de silicio tipo n, cuya interfaz forma la unión p-n, donde ocurre el efecto fotovoltaico responsable de la generación de corriente eléctrica. La **Figura 3** muestra el diagrama de bandas de energía y los principales procesos físicos que tienen lugar en la unión p-n.

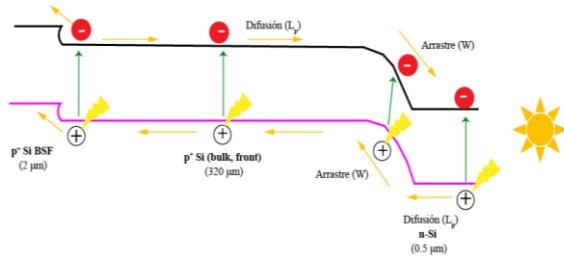


Figura 3. Diagrama de bandas y procesos de la celda *exampleSi.def*

El modelo *exampleSi.def* incorpora los parámetros físicos y eléctricos de cada una de las capas que conforman la celda solar. Entre ellos se incluyen el espesor de las capas, la brecha de energía, la afinidad electrónica, la permitividad relativa, la densidad efectiva de estados en las bandas de conducción y valencia, las movilidades de electrones y huecos, así como las concentraciones de dopaje. Además, se utilizó el material óxido de indio y estaño (ITO) como contacto frontal con una función de trabajo de 4.4670 eV y como contacto trasero el oro (Au) con una función de trabajo de 5.6190 eV. La **Tabla 1** resume

los principales parámetros utilizados en las simulaciones realizadas en este trabajo.

Tabla 1. Parámetros físicos y eléctricos del modelo de celda solar de silicio *exampleSi.def* empleado en las simulaciones mediante SCAPS.

Parámetro	p+ Si BSF	p-Si bulk	p-Si front	n-Si
t (nm)	2000	300000	20000	500
E _g (eV)	1.120	1.120	1.120	1.120
χ (eV)	4.500	4.500	4.500	4.500
ε _r	11.900	11.900	11.900	11.900
N _c (cm ⁻³)	2.8x10 ¹⁹	2.8x10 ¹⁹	2.8x10 ¹⁹	2.8x10 ¹⁹
N _v (cm ⁻³)	1.04x10 ¹⁹	1.04x10 ¹⁹	1.04x10 ¹⁹	1.04x10 ¹⁹
v _{thn} (cm/s)	1x10 ⁷	1x10 ⁷	1x10 ⁷	1x10 ⁷
v _{thp} (cm/s)	1x10 ⁷	1x10 ⁷	1x10 ⁷	1x10 ⁷
μ _n (cm ² /Vs)	1.5x10 ³	1.5x10 ³	1.5x10 ³	1.5x10 ³
μ _p (cm ² /Vs)	4.5x10 ³	4.5x10 ³	4.5x10 ³	4.5x10 ²
N _D (cm ⁻³)	0	0	0	1x10 ²⁰
N _A (cm ⁻³)	1x10 ¹⁹	1x10 ¹⁶	1x10 ¹⁶	0

La **Tabla 2** describe el significado de los parámetros físicos y eléctricos empleados en el modelo *exampleSi.def*, los cuales caracterizan las propiedades de cada una de las capas de la celda solar simulada.

Tabla 2. Descripción de los parámetros físicos y eléctricos empleados en el modelo de celda solar.

Símbolo	Descripción	Unidad
t	Espesor	nm
E _g	Brecha de energía	eV
χ	Afinidad electrónica	eV
ε _r	Permitividad relativa	-
N _c	Densidad efectiva de estados en la banda de conducción	cm ⁻³
N _v	Densidad efectiva de estados en la banda de valencia	cm ⁻³
v _{thn}	Velocidad térmica de electrones	cm/s
v _{thp}	Velocidad térmica de huecos	cm/s
μ _n	Movilidad de electrones	cm ² /Vs
μ _p	Movilidad de huecos	cm ² /Vs
N _D	Concentración de átomos donadores	cm ⁻³
N _A	Concentración de átomos aceptores	cm ⁻³

El silicio fue seleccionado debido a que es el material semiconductor más empleado en aplicaciones fotovoltaicas, gracias a su abundancia y estabilidad (Di Sabatino et al., 2024).

2.2 Modelo eléctrico. Influencia de la Temperatura y la Irradiancia

El efecto de la temperatura sobre el desempeño de una celda solar en condiciones reales de operación puede estimarse mediante los coeficientes de temperatura de los principales parámetros fotovoltaicos. Dichos

coeficientes son proporcionados por el fabricante en la ficha técnica del módulo fotovoltaico. A partir de los coeficientes de temperatura de la corriente de cortocircuito (I_{sc}), el voltaje de circuito abierto (V_{oc}), la potencia máxima (P_{mpp}) y la eficiencia (η), es posible determinar el comportamiento de estos parámetros ante variaciones de temperatura de la celda (Smets et al., 2015; Green, 1982), mediante las Ecuaciones (1-4).

$$I_{sc}(T_C, G_{ref}) = I_{sc,ref} + \alpha(T_C - T_{C,ref}) \quad (1)$$

$$V_{oc}(T_C, G_{ref}) = V_{oc,ref} + \beta(T_C - T_{C,ref}) \quad (2)$$

$$P_C(T_C, G_{ref}) = P_{C,ref}[1 - \delta(T_C - T_{C,ref})] \quad (3)$$

$$\eta(T_C, G_{ref}) = \frac{P_C(T_C, G_{ref})}{G_{ref}A_C} \quad (4)$$

donde T_C es la temperatura de la celda, $T_{C,ref}$ es la temperatura de referencia de la celda (25°C), G_{ref} es la irradiancia de referencia a 1000 W/m², α , β , δ representan los coeficientes de variación con la temperatura de la corriente, el voltaje y la potencia, respectivamente. Asimismo, $V_{oc,ref}$ corresponde al voltaje de circuito abierto de referencia, $I_{sc,ref}$ a la corriente de cortocircuito de referencia, P_C a la potencia de la celda, η a la eficiencia de conversión y A_C al área de la celda fotovoltaica.

Por otra parte, el efecto de la irradiancia sobre los parámetros fotovoltaicos puede determinarse considerando la relación directa existente entre la irradiancia incidente y la corriente de cortocircuito (Smets et al., 2015). Para ello, pueden emplearse las siguientes Ecuaciones (5-8).

$$I_{sc}(T_{C,ref}, G_C) = I_{sc,ref} \frac{G_C}{G_{ref}} \quad (5)$$

$$V_{oc}(T_{ref}, G_C) = V_{oc,ref} + \frac{nkT}{q} \ln \frac{G_C}{G_{ref}} \quad (6)$$

$$P_C(T_{C,ref}, G_C) = FF \times V_{oc}(T_{ref}, G_C) I_{sc}(T_{ref}, G_C) \quad (7)$$

$$\eta(T_{ref}, G_C) = \frac{P_C(T_{ref}, G_C)}{G_C A_C} \quad (8)$$

donde $nkT/q = VT$ corresponde al voltaje térmico y FF es el factor de forma, el cual puede determinarse a partir del voltaje de circuito abierto normalizado respecto al voltaje térmico. G_C es la irradiancia que llega a la superficie de la celda.

Finalmente, la estimación de los parámetros fotovoltaicos considerando simultáneamente los efectos de la temperatura y la irradiancia (Abella & Chenlo, 2006) puede realizarse mediante las siguientes Ecuaciones (9-12).

$$I_{sc}(T_C, G_C) = I_{sc,ref} \left[\frac{G_C}{G_{ref}} + \alpha(T_C - T_{C,ref}) \right] \quad (9)$$

$$V_{oc}(T_C, G_C) = V_{oc,ref} + V_T \ln \frac{I_{sc}}{I_{sc,ref}} \quad (10)$$

$$-\beta(T_C - T_{C,ref})$$

$$P_C(T_C, G_C) = P_{C,ref} \frac{G_C}{G_{ref}} [1 - \delta(T_C - T_{C,ref})] \quad (11)$$

$$\eta_C(T_C, G_C) = \frac{P_C(T_C, G_C)}{G_C A_C} \quad (12)$$

Estas ecuaciones permiten analizar el comportamiento eléctrico de una celda solar bajo condiciones reales de operación, considerando la influencia combinada de las variaciones de temperatura e irradiancia sobre el desempeño de la celda.

2.3 Obtención de datos

Los datos de entrada de irradiancia y temperatura utilizados en la simulación corresponden a condiciones reales de operación, y fueron medidos en la ubicación (16.2874° N, 95.2396° O), cuyas coordenadas corresponden a la Universidad del Istmo, campus Tehuantepec. La irradiancia solar fue obtenida mediante un sensor de radiación modelo V8.01 Solar Power Meter TEST-132, mientras que la temperatura fue registrada con un sensor Temperature Meter 11.1.1.0 TM-747D, instalado en el módulo fotovoltaico. Posteriormente, estos datos fueron empleados como condiciones de entrada en las simulaciones realizadas con SCAPS. Las mediciones se registraron en intervalos de 5 minutos.

Se seleccionó un día con condiciones de cielo despejado (13 de mayo de 2025), del cual se recopilaron un total de **155 valores medidos** de irradiancia y **155 valores medidos** de temperatura en un intervalo comprendido entre las 5:40 y las 18:20 horas.

2.4 Variables de estudio

Con el propósito de identificar la contribución relativa de la irradiancia y la temperatura en el comportamiento temporal del V_{mpp} , se desarrolló una metodología basada en tres escenarios:

- Variación de la irradiancia manteniendo la temperatura constante (300 K).
- Variación de la temperatura manteniendo la irradiancia constante (1000 W/m²).

- Variación simultánea de irradiancia y temperatura.

Se observa que los dos primeros escenarios son casos simplificados del tercero. Los resultados que se presentan en este trabajo confirman la utilidad metodológica de estos escenarios.

2.5 Procedimiento de simulación

A partir de los datos ambientales obtenidos, se realizaron simulaciones en SCAPS para cada condición de irradiancia, temperatura y combinación de irradiancia y temperatura, de acuerdo con los datos medidos experimentalmente.

Las simulaciones se ejecutaron bajo condiciones estándar de iluminación AM 1.5, modificando los valores de irradiancia y temperatura según los datos obtenidos.

Para cada caso de estudio se generaron curvas características de densidad de corriente-voltaje (J-V), las cuales permitieron analizar el comportamiento eléctrico de la celda solar.

Las curvas J-V se obtuvieron mediante un barrido de voltaje de 0.0 a 0.8 V, con un incremento de 0.02 V y 41 puntos de cálculo. Los parámetros físicos del modelo exampleSi.def, presentados en la [Tabla 1](#), se mantuvieron constantes durante todas las simulaciones; únicamente se modificaron las condiciones de irradiancia y/o temperatura de acuerdo con cada escenario de estudio.

A partir de dichas curvas se obtuvieron los principales parámetros fotovoltaicos: V_{oc} , J_{sc} , V_{mpp} , J_{mpp} y P_{mpp} .

El análisis se enfocó en el V_{mpp} , por su relevancia para el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT, por sus siglas en inglés) en sistemas fotovoltaicos.

Finalmente, los valores obtenidos de V_{mpp} , fueron analizados en función del tiempo y de las condiciones ambientales, permitiendo identificar la relación entre la irradiancia, la temperatura y el comportamiento del punto de máxima potencia en la celda solar de silicio.

3. RESULTADOS

En esta sección se presentan y analizan las gráficas de los parámetros ambientales y de los parámetros eléctricos de la celda obtenidos mediante las simulaciones en SCAPS.

3.1 PARÁMETROS AMBIENTALES

Las celdas solares son sensibles a cambios de irradiancia y temperatura, siendo que la irradiancia

afecta más a la corriente y la temperatura afecta más al voltaje.

En la [Figura 4](#) se observan las curvas J-V para diferentes niveles de irradiancia, manteniendo una temperatura constante de 300 K. Se observa que al incrementar la irradiancia aumenta de forma significativa la densidad de corriente, debido a la mayor cantidad de fotones incidentes en la celda. Por otro lado, el voltaje presenta un incremento moderado.

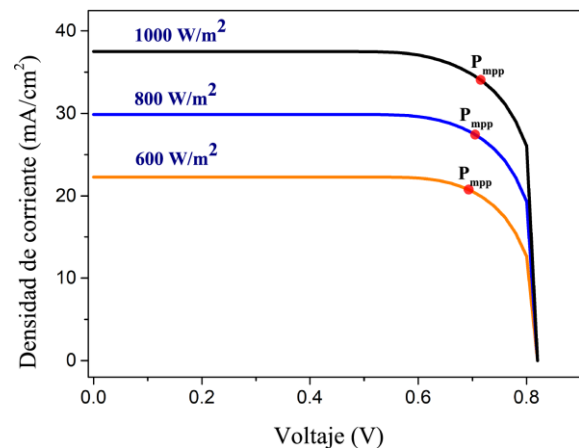


Figura 4. Curvas J-V en diferentes niveles de irradiancia

En la [Figura 5](#) se muestran las curvas J-V, considerando una irradiancia constante de 1000 W/m² y diferentes niveles de temperatura, se observa que el incremento en la temperatura provoca una disminución en el voltaje, lo cual se atribuye a un aumento de la corriente de saturación de la celda. Por otro lado, la densidad de corriente presenta variaciones mínimas.

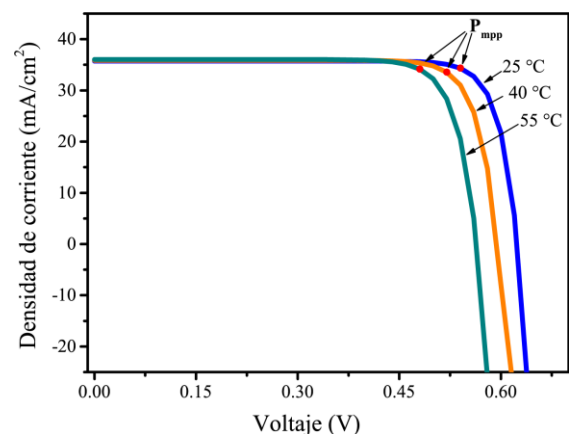


Figura 5. Curvas J-V en diferentes niveles de temperatura

3.1.1 COMPORTAMIENTO DE LA IRRADIANCIA

En la [Figura 6](#) se muestra el comportamiento de la irradiancia solar a lo largo del día; dicha curva presenta forma de campana y en ella se puede

observar que la irradiancia aumenta en las primeras horas de la mañana, alcanza sus mayores valores entre las 11:00 y las 13:20, y disminuye posteriormente.

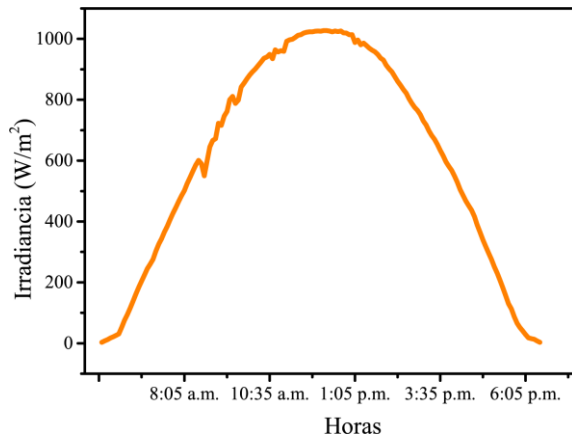


Figura 6. Irradiancia vs Tiempo

3.1.2 COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA

En la Figura 7 se presenta la variación de la temperatura (obtenida del módulo fotovoltaico) a lo largo del día; se observa un comportamiento progresivo desde valores cercanos a los 292K hasta un máximo aproximadamente de 335.1K, alcanzado alrededor del mediodía, y una disminución posterior.

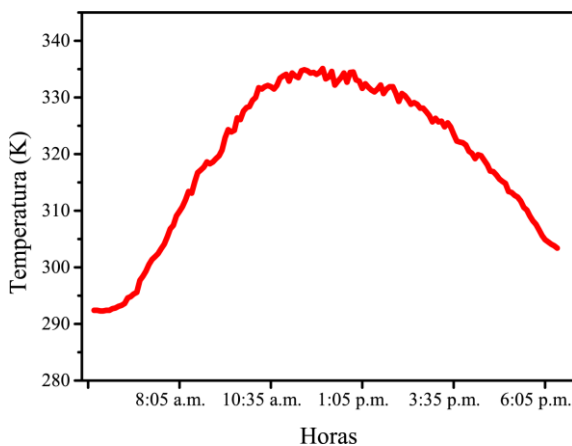


Figura 7. Temperatura vs Tiempo

3.2 PARÁMETROS ELÉCTRICOS

A partir de las curvas J-V obtenidas mediante SCAPS se determinó el comportamiento del V_{mpp} para cada uno de los escenarios analizados. La Tabla 3 resume los intervalos de irradiancia, temperatura y los valores de V_{mpp} obtenidos en cada caso de estudio.

Tabla 3. Intervalos de irradiancia, temperatura y V_{mpp} obtenidos en los tres escenarios de simulación.

Escenario	Irradiancia (W/m ²)	Temperatura (K)	V_{mpp} (V)
Irradiancia variable	3-1027	300 (constante)	0.4-0.54
Temperatura variable	1000 (constante)	292.3-335.1	0.46-0.56
Irradiancia y temperatura variables	3-1027	292.3-335.1	0.38-0.52

Con el propósito de cuantificar la influencia de la irradiancia y la temperatura sobre el comportamiento del V_{mpp} , se compararon los valores promedio obtenidos con los escenarios simplificados respecto al escenario que considera simultáneamente ambas variables. Para ello, se analizaron los intervalos horarios en los que predomina cada variable. La Tabla 4 presenta la diferencia porcentual promedio del V_{mpp} entre los escenarios simplificados y el escenario completo.

Tabla 4. Comparación cuantitativa del V_{mpp} entre los escenarios simplificados y el escenario completo.

Intervalo	Escenario	Diferencia promedios de V_{mpp} (%)
5:40 – 9:10 hrs	Irradiancia variable vs. irradiancia y temperatura variables	1.61%
9:00 – 15:40 hrs	Temperatura variable vs. irradiancia y temperatura variables	0.21%

Como se observa en la Tabla 4, durante las primeras horas del día, entre las 5:40 y las 9:10 hrs la diferencia promedio entre el escenario de irradiancia variable y el escenario completo fue de 1.61 %, lo que indica que la irradiancia describe adecuadamente el comportamiento del V_{mpp} en este intervalo. Por otra parte, entre las 9:00 y las 15:40 hrs, la diferencia promedio entre el escenario de temperatura variable y el escenario completo fue de únicamente 0.21 %, confirmando que durante las horas de mayor temperatura el comportamiento del V_{mpp} está gobernado principalmente por los efectos térmicos.

3.2.1 V_{mpp} EN FUNCIÓN DE LA IRRADIANCIA

En la Figura 8 se observa el comportamiento del V_{mpp} en el día, considerando únicamente variaciones en la irradiancia. Se observa que el V_{mpp} es mayor en el intervalo de horas donde la irradiancia es mayor, y opera en un rango de 0.40 V a 0.54 V, manteniéndose relativamente estable durante las horas de mayor irradiancia; con lo cual podemos observar que la irradiancia tiene un efecto moderado sobre el V_{mpp} .

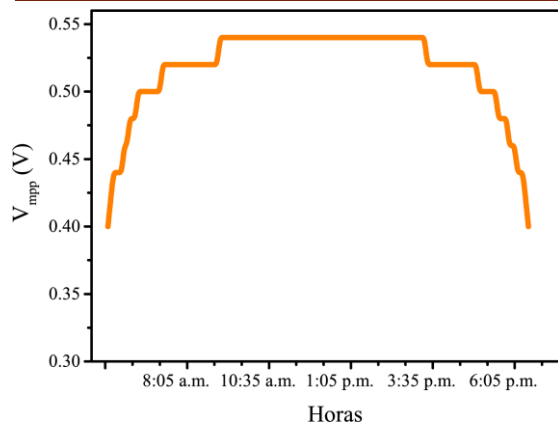


Figura 8. Influencia de la irradiancia en el V_{mpp} .

3.2.2 V_{mpp} EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA

En la Figura 9 se presenta el comportamiento del V_{mpp} en el día, considerando únicamente las variaciones en la temperatura de la celda. Se observa que el voltaje disminuye justo en el intervalo de horas donde la temperatura de la celda es mayor, y opera en un rango entre 0.46 V y 0.56 V.

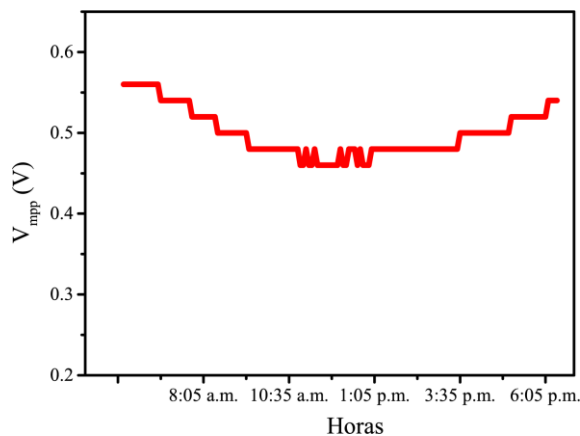


Figura 9. Influencia de la temperatura en el V_{mpp} .

3.2.3 V_{mpp} EN FUNCIÓN DE IRRADIANCIA Y TEMPERATURA

Finalmente, en la Figura 10 se muestra el comportamiento del V_{mpp} considerando simultáneamente el efecto de la irradiancia y de la temperatura (también se incluyen las gráficas de la Figura 8 y de la Figura 9, con fines comparativos).

Así, la Figura 10 presenta tres escenarios para describir el comportamiento del V_{mpp} : 1) irradiancia variable y temperatura del módulo constante (300 K), 2) temperatura del módulo variable e irradiancia constante (1000 W/m²), y 3) irradiancia y temperatura variables. El tercer escenario es el más representativo de las condiciones reales de operación, ya que tanto la irradiancia como la temperatura cambian a lo largo del día, como se muestra en las Figuras 6 y 7. Al

comparar las tres curvas, se observa que cada escenario simplificado (escenarios 1 y 2) reproduce adecuadamente el comportamiento del escenario completo (escenario 3) en diferentes intervalos del día. En particular, la Figura 10 muestra que el comportamiento del V_{mpp} está gobernado principalmente por la irradiancia (escenario 1) durante las primeras horas de la mañana y las últimas horas de la tarde, mientras que en las horas centrales del día predomina la influencia de la temperatura (escenario 2).

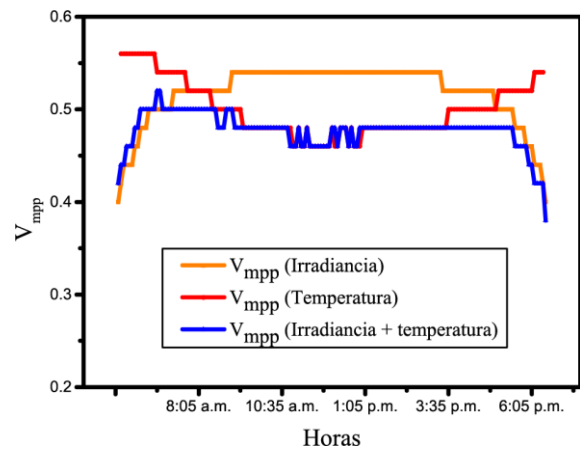


Figura 10. Comparación de V_{mpp} (con variación de la irradiancia), V_{mpp} (con variación de la temperatura) y V_{mpp} (con variación de radiación y temperatura).

Una posible explicación de lo observado es la siguiente: al amanecer y al atardecer la irradiancia es relativamente baja y cambia muy rápidamente, mientras que la temperatura de la celda es relativamente baja y cambia en menor grado que la irradiancia. En estas condiciones, el escenario 2 con una irradiancia constante de 1000 W/m² es mucho menos realista que el escenario 1, el cual considera las variaciones de irradiancia y asume una temperatura constante razonable (300 K). Por su parte, en las horas centrales del día la situación es muy diferente. En esas horas la irradiancia ya es elevada (800–1000 W/m²), y el número de fotones incidentes es muy grande. Sin embargo, una vez alcanzados valores altos de irradiancia, el incremento adicional de voltaje es pequeño, ya que el voltaje responde de forma logarítmica a la irradiancia ($V_{oc} \propto \ln(I_{ph})$) donde I_{ph} es la corriente fotogenerada. Mientras tanto, la temperatura del módulo sigue aumentando, y la temperatura sí afecta el voltaje casi linealmente (por el aumento de la corriente de saturación y cambios del semiconductor), por lo que la influencia de la temperatura (escenario 2) domina en las horas centrales de alta irradiancia y altas temperaturas.

Vemos así que la influencia relativa de la irradiancia y la temperatura (dados los escenarios establecidos) sobre el voltaje del punto de máxima potencia depende de la hora del día. Durante las horas de baja irradiancia predomina el efecto de la radiación incidente, mientras que durante las horas centrales del día predomina el efecto térmico asociado al calentamiento de la celda.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se analizó el comportamiento eléctrico de una celda solar de silicio mediante simulaciones realizadas en el software SCAPS, considerando variaciones de irradiancia y temperatura obtenidas bajo condiciones reales de operación.

Los resultados mostraron que al analizar de forma independiente el efecto de cada variable, el V_{mpp} se mantiene relativamente estable durante las horas de mayor irradiancia. En contraste, al considerar únicamente las variaciones de temperatura, el incremento de esta provoca una disminución progresiva del V_{mpp} .

El análisis combinado de irradiancia y temperatura permitió identificar que la influencia relativa de ambas variables depende de la hora del día. Durante las primeras horas de la mañana y las últimas horas de la tarde predomina el efecto de la irradiancia, mientras que durante las horas centrales del día el comportamiento del V_{mpp} está dominado principalmente por la temperatura. Esta tendencia se corroboró mediante la comparación de los escenarios simplificados con el escenario completo, obteniéndose una diferencia porcentual promedio de 1.61 % para el intervalo de 5:40 a 9:10 hrs (escenarios 1 y 3) y de únicamente 0.21 % para el intervalo de 9:00 a 15:40 hrs (escenarios 2 y 3), lo que confirma el predominio de la irradiancia y la temperatura, respectivamente, en dichos periodos.

Los resultados obtenidos evidencian que el calentamiento de la celda puede limitar el voltaje de operación incluso bajo condiciones de alta irradiancia, lo que resalta la importancia de considerar los efectos térmicos en el análisis, diseño y optimización de sistemas fotovoltaicos. La implementación de estrategias de gestión térmica, tales como sistemas de enfriamiento pasivo, enfriamiento activo o configuraciones híbridas fotovoltaico-térmicas (PVT), podría contribuir significativamente a mantener valores más elevados y estables de V_{mpp} , favoreciendo un mejor aprovechamiento de la energía solar en regiones cálidas como el Istmo de Tehuantepec.

La principal contribución de este trabajo consiste en proponer una metodología basada en tres escenarios

construidos a partir de mediciones experimentales reales de irradiancia y temperatura del módulo que permite, empleando simulaciones con SCAPS, identificar la variable dominante responsable del comportamiento temporal del V_{mpp} durante distintos intervalos de operación. Los resultados muestran que la variable dominante cambia durante el día, y que los escenarios simplificados reproducen adecuadamente el comportamiento del escenario completo en diferentes intervalos del día, proporcionando una descripción e interpretación física útil del comportamiento del punto de máxima potencia, bajo condiciones ambientales reales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad del Istmo por el apoyo brindado para el desarrollo de la presente investigación.

Los autores agradecen al SECIHTI (Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación) por el apoyo económico brindado para el desarrollo de la presente investigación.

Los autores agradecen al Prof. Dr. ir. Marc Burgelman por facilitar el uso del software SCAPS (*Solar Cell Capacitance Simulator*).

DECLARACIONES

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Los autores declaran el uso de herramientas de Inteligencia Artificial, Tradicional y/o Generativa en la elaboración de este manuscrito, conforme a los lineamientos éticos de la revista.

La base de datos que sustenta los resultados presentados en este artículo no está disponible públicamente en este momento, pero puede obtenerse de los autores bajo una solicitud debidamente justificada.

REFERENCIAS

- Abella, M. A., & Chenlo, F. (2006). Sistemas fotovoltaicos conectados a red: Estimación de la energía generada. *Era Solar*, (131).
- Allouhi, A., Rehman, S., Buker, M. S., & Said, Z. (2022). Up-to-date literature review on Solar PV systems: Technology progress, market status and R&D. *Journal of Cleaner Production*, 362, 132339.
- Bazarbayev, R. B., Yakubov, K. R., Kurbanov, D. Sh., Allaniyazov, A. I., Balakumar, S., Kamalov, A. B., Janabergenova, G., Wei, Q., Qian, H., Polvonnazirov, I. U., & Karazhanov, S. Zh. (2022). Performance of crystalline Si solar cells and module on temperature and

- illumination intensity. *Materials Today: Proceedings*, 64, 1661–1665.
- Burgelman, M., Nollet, P., & Degrave, S. (2000). Modelling polycrystalline semiconductor solar cells. *Thin Solid Films*, 361–362, 527–532.
- Di Sabatino, M., Hendawi, R., & Garcia, A. S. (2024). *Silicon solar cells: Trends, manufacturing challenges, and AI-driven pathways for enhanced performance and sustainability*. *Crystals*, 14(2), 167. <https://doi.org/10.3390/cryst14020167>
- Green, M. A. (1982). *Solar cells: Operating principles, technology and system applications*. Prentice-Hall.
- Gupta, N., Bhaskar, M. S., Kumar, S., Almakhlles, D. J., Panwar, T., Banyal, A., ... & Nadda, A. (2024). Review on classical and emerging maximum power point tracking algorithms for solar photovoltaic systems. *Journal of Renewable Energy and Environment*, 11(2), 18-29.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. Cambridge University Press.
- Markvart, T., & Castañer, L. (Eds.). (2003). *Practical handbook of photovoltaics: Fundamentals and applications* (2nd ed.). Elsevier.
- Masters, G. M. (2013). *Renewable and efficient electric power systems* (2nd ed.). Wiley.
- Ngan, M. S., & Tan, C. W. (2011). A study of maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems. En *2011 IEEE Applied Power Electronics Colloquium (IAPEC)* (pp. 22–27). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IAPEC.2011.5779861>
- Parida, B., Iniyar, S., & Goic, R. (2011). A review of solar photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1625–1636. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.032>
- Smets, A., Jäger, K., Isabella, O., Van Swaaij, R., & Zeman, M. (2015). *Solar energy: The physics and engineering of photovoltaic conversion technologies and systems*. UIT Cambridge.
- Sze, S. M., & Ng, K. K. (2007). *Physics of semiconductor devices* (3rd ed.). Wiley.
- University of Gent. (s. f.). SCAPS-1D user manual. <https://scaps.elis.ugent.be/>

Óxidos metálicos como capas transportadoras de carga en celdas solares de perovskita

BERTHA INDIRA VELÁZQUEZ^{1,*} | CARLOS A. MEZA AVENDAÑO² | ISAAC MONTOYA DE LOS SANTOS¹

¹ División de Estudios de Posgrado, Universidad del Istmo, Oaxaca, Mexico.

² Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Mexico

* Correspondencia: indiravemi@gmail.com

Recibido: 12/06/2026

Revisado: 19/06/2026

Aceptado: 26/06/2026

Publicado: 08/07/2026

RESUMEN: Las celdas solares de perovskita han alcanzado eficiencias sobresalientes en un periodo relativamente corto, posicionándose como una de las tecnologías fotovoltaicas emergentes con mayor potencial para la generación de energía limpia. Sin embargo, su desempeño, estabilidad y posible escalamiento tecnológico dependen no solo de la calidad de la capa absorbadora, sino también de las capas encargadas de extraer y transportar las cargas eléctricas generadas por la luz. En este artículo de divulgación se revisa el papel de los óxidos metálicos empleados como capas transportadoras de electrones (ETL) y de huecos (HTL), con énfasis en materiales como TiO_2 , ZnO , SnO_2 y NiO_x . Se describen sus principales propiedades ópticas y eléctricas, tales como la brecha de energía, transparencia, movilidad de carga, conductividad, alineación energética y estabilidad química, así como su influencia en la reducción de procesos de recombinación. Además, se presenta un estudio comparativo mediante simulaciones numéricas en SCAPS-1D de celdas con arquitectura $\text{FTO/ETL/CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3\text{/HTL/Au}$, considerando TiO_2 y ZnO como ETL, y NiO y Spiro-OMeTAD como HTL de referencia. Los resultados permiten discutir cómo la selección adecuada de las capas transportadoras puede mejorar la extracción de cargas, favorecer el transporte selectivo de electrones y huecos, y contribuir al aumento de la eficiencia fotovoltaica.

ABSTRACT: Perovskite solar cells have achieved outstanding efficiencies in a relatively short period, positioning them as one of the most promising emerging photovoltaic technologies for clean energy generation. However, their performance, stability, and potential technological scalability depend not only on the quality of the absorber layer, but also on the layers responsible for extracting and transporting the electrical charges generated by light. This outreach article reviews the role of metal oxides used as electron transport layers (ETLs) and hole transport layers (HTLs), with emphasis on materials such as TiO_2 , ZnO , SnO_2 , and NiO_x . Their main optical and electrical properties are described, including band gap, transparency, charge mobility, conductivity, energy-level alignment, and chemical stability, as well as their influence on reducing recombination processes. In addition, a comparative study using SCAPS-1D numerical simulations is presented for solar cells with the $\text{FTO/ETL/CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3\text{/HTL/Au}$ architecture, considering TiO_2 and ZnO as ETLs, and NiO and Spiro-OMeTAD as reference HTLs. The results make it possible to discuss how the appropriate selection of transport layers can improve charge extraction, promote the selective transport of electrons and holes, and contribute to increasing photovoltaic efficiency.

Palabras clave: Celdas solares de perovskita, óxidos metálicos, ETL, HTL, TiO_2 , ZnO , NiO , SCAPS-1D

1. INTRODUCCIÓN

La transición energética requiere tecnologías capaces de producir electricidad con bajas emisiones y de forma compatible con una demanda creciente. Dentro de este panorama, la energía solar fotovoltaica ocupa un lugar central porque transforma directamente la radiación solar en electricidad y puede integrarse

tanto en sistemas de gran escala como en aplicaciones distribuidas (Chen et al., 2022; Sayed et al., 2021). En la última década, las celdas solares de perovskita se han consolidado como una de las familias fotovoltaicas más prometedoras debido a su alto coeficiente de absorción, facilidad de procesamiento en solución, posibilidad de ajustar la brecha de energía y rápido incremento de eficiencia (Kojima et

al., 2009; National Renewable Energy Laboratory, 2026).

Aunque la perovskita es el material que absorbe la luz y genera pares electrón-hueco, el dispositivo completo funciona como una arquitectura multicapa. Cada capa cumple una tarea específica: el absorbedor produce las cargas; la capa transportadora de electrones (ETL, “Electron Transport Layer”) extrae electrones y bloquea huecos; la capa transportadora de huecos (HTL, “Hole Transport Layer”) extrae huecos y bloquea electrones; y los contactos metálicos recolectan la corriente. Por ello, la eficiencia no depende únicamente de la absorción de luz, sino también de la selectividad, la movilidad, la alineación de bandas y la estabilidad química de las capas de transporte. (Anaraki et al., 2016; Sharma & Mishra, 2025; Tan et al., 2017; Zhou et al., 2014).

Los óxidos metálicos son especialmente atractivos para esta función porque combinan transparencia óptica, estabilidad térmica y química, procesamiento a baja temperatura en muchos casos, y niveles de energía ajustables mediante dopaje o modificación superficial. En comparación con algunos transportadores orgánicos, pueden disminuir la degradación causada por humedad, oxígeno, calor o radiación ultravioleta, además de ofrecer mayor compatibilidad con procesos escalables. (Anaraki et al., 2016; Chiu et al., 2024; Islam et al., 2017; You et al., 2016).

En la Figura 1 se representa el esquema de generación, separación y transporte selectivo de electrones y huecos en una celda solar de perovskita.

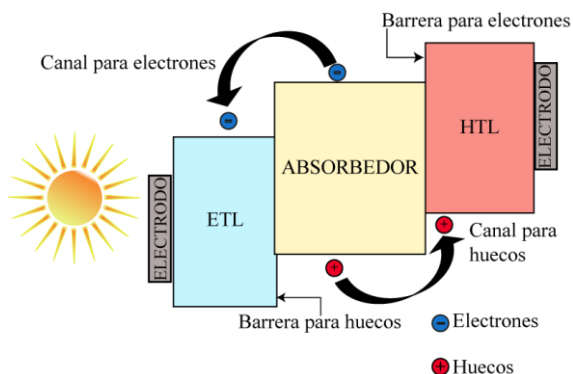


Figura 1. Generación, separación y transporte selectivo de electrones y huecos en una celda solar de perovskita.

El objetivo de este artículo es explicar, con un lenguaje accesible, qué son los óxidos metálicos y por qué se emplean como ETL y HTL en celdas solares de perovskita. Además, se presenta un análisis comparativo de configuraciones FTO/ETL/ $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ /HTL/Au simuladas con SCAPS-1D, manteniendo la estructura del dispositivo y los parámetros reportados en el manuscrito de referencia

1.1 ¿QUÉ SON LOS ÓXIDOS METÁLICOS?

Un óxido metálico es un compuesto formado por oxígeno y uno o más elementos metálicos. Dependiendo de su composición, estructura cristalina y concentración de defectos, puede comportarse como aislante, semiconductor o conductor transparente. En fotovoltaica interesan principalmente los óxidos metálicos semiconductores, ya que sus bandas de energía pueden favorecer el paso selectivo de electrones o huecos hacia los contactos eléctricos. (Anaraki et al., 2016; Chiu et al., 2024).

En una celda de perovskita, el óxido metálico no solo actúa como “camino” para las cargas; también define la calidad de la interfaz con el absorbedor. Una interfaz adecuada reduce estados trampa, evita la acumulación de carga y limita la recombinación no radiativa. Por ejemplo, el Dióxido de Titanio (TiO_2), el Óxido de Zinc (ZnO) y el Dióxido de Estaño (SnO_2) se emplean ampliamente como ETL porque sus bandas de conducción se alinean de manera favorable con muchas perovskitas de haluro de plomo. En cambio, el Óxido de Níquel (NiO_x), el Óxido Cuproso (Cu_2O), el Óxido Cúprico (CuO), el Trióxido de Molibdeno (MoO_3), el Trióxido de Wolframio (WO_3) y el Pentóxido de Vanadio (V_2O_5) se han estudiado como HTL o como capas interfaciales debido a su carácter tipo p, alta función de trabajo o capacidad para facilitar la extracción de huecos. (Anaraki et al., 2016; Chiu et al., 2024; Galatopoulos et al., 2017; Islam et al., 2017; You et al., 2016).

1.2. PROPIEDADES ÓPTICAS Y ELÉCTRICAS RELEVANTES

Para que una capa transportadora sea útil en una celda solar debe cumplir varias condiciones. Primero, debe ser suficientemente transparente en la región visible para que la luz alcance la perovskita. Segundo, debe presentar una movilidad y conductividad adecuadas para transportar cargas sin pérdidas resistivas importantes. Tercero, sus niveles de energía deben alinearse con la banda de conducción o de valencia del absorbedor, de modo que la extracción sea favorable y se minimicen barreras energéticas. Finalmente, su superficie debe formar una interfaz compacta, homogénea y con baja densidad de defectos. (Anaraki et al., 2016; Chiu et al., 2024; Tan et al., 2017; Zhou et al., 2014).

La estabilidad es otro requisito crucial el TiO_2 es químicamente robusto, pero puede presentar actividad fotocatalítica bajo radiación UV y suele requerir tratamientos térmicos relativamente altos si se emplea en forma mesoporosa. El ZnO muestra alta movilidad electrónica y puede procesarse a baja temperatura, aunque su superficie básica puede reaccionar con ciertas perovskitas si no se controla la interfaz. El SnO_2 ha ganado importancia por su buena

transparencia, baja temperatura de procesamiento, alineación energética favorable y menor actividad fotocatalítica que TiO_2 . El NiO_x , por su parte, es uno de los óxidos tipo p más usados como HTL en arquitecturas invertidas, aunque su superficie puede requerir pasivación para evitar reacciones indeseadas con la perovskita. (Anaraki et al., 2016; Chiu et al., 2024; Islam et al., 2017; You et al., 2016). En la *tabla 1* se enlistan las propiedades de óxidos metálicos utilizados como capas de transporte en celdas solares de perovskita.

Tabla 1. Propiedades de óxidos metálicos utilizados como capas de transporte en celdas solares de perovskita.

Material	Rol	Beneficio principal	Reto
TiO_2	ETL	Transparencia y extracción de e^-	UV/alta temperatura de procesamiento
ZnO	ETL	Alta movilidad de e^-	Interfaz reactiva
SnO_2	ETL	Baja histéresis y baja temperatura de procesamiento	Defectos superficiales
NiO_x	HTL	Tipo p y estabilidad	Pasivación
$\text{Cu}_2\text{O}/\text{CuO}$	HTL	Bajo costo; tipo p	Defectos/bandas
$\text{MoO}_3/\text{WO}_3/\text{V}_2\text{O}_5$	Intercapa	Alta función de trabajo	Espesor

1.3. APLICACIÓN COMO CAPAS DE TRANSPORTE EN PEROVSKITAS

Las celdas solares de perovskita pueden fabricarse en configuración n-i-p o p-i-n. En la arquitectura n-i-p, la luz entra por el sustrato transparente y atraviesa primero la ETL; después llega a la perovskita, a la HTL y finalmente al metal posterior. En la arquitectura p-i-n el orden de transporte se invierte. En ambos casos, las capas de transporte deben ser selectivas: una ETL eficiente permite el paso de electrones, pero bloquea huecos, mientras que una HTL eficiente permite el paso de huecos, pero bloquea electrones. Esta selectividad disminuye la recombinación y aumenta el voltaje de circuito abierto, el factor de forma y la eficiencia. (Anaraki et al., 2016; Sharma & Mishra, 2025; Tan et al., 2017; Zhou et al., 2014).

La literatura muestra que los óxidos metálicos no solo pueden mejorar la eficiencia, sino también la estabilidad. Dispositivos con NiO_x y ZnO como capas

de transporte lograron retener alrededor de 90% de su eficiencia inicial después de 60 días en aire, mientras que celdas con capas orgánicas de referencia se degradaron rápidamente bajo condiciones similares. (You et al., 2016). De forma análoga, los avances en SnO_2 como ETL han permitido dispositivos con eficiencias superiores a 23%, baja histéresis y mejores rutas hacia procesos escalables. (Chiu et al., 2024; Drygała et al., 2023; Hoang Huy et al., 2023). En la *Tabla 2* se muestran las eficiencias reportadas en la literatura con óxidos metálicos como ETL y HTL.

Tabla 2. Ejemplos de eficiencias reportadas con óxidos metálicos como ETL o HTL en celdas solares de perovskita.

Capa	Arquitectura del dispositivo	Eficiencia	Ref.
TiO_2 ETL	Planar n-i-p	~19.3%	Zhou et al., 2014
$\text{TiO}_2\text{-Cl}$ ETL	Planar n-i-p	~20.1%	Tan et al., 2017
SnO_2 ETL	Planar n-i-p	~21%	Anaraki et al., 2016
m- $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ ETL	Mesoporosa (n-i-p)	23.62%	Chiu et al., 2024
NiO_x/ZnO	p-i-n todo-óxido	16.1%	You et al., 2016
NiO_x HTL	Planar n-i-p	15.2%	Islam et al., 2017
$\text{CuO}/\text{Cu}:\text{NiO}_x$ HTL	p-i-n	15.3%	Galatopoulos et al., 2017

2. METODOLOGÍA

El análisis se realizó mediante simulaciones numéricas en SCAPS-1D, un programa ampliamente utilizado para estudiar celdas solares de película delgada a partir de las ecuaciones de Poisson y continuidad de portadores. (Burgelman et al., 2016) La metodología se organizó en tres etapas: definición de la arquitectura de referencia, selección de parámetros físicos de cada capa y comparación de las respuestas fotovoltaicas obtenidas para distintas combinaciones de ETL y HTL.

2.1 MODELO DE DISPOSITIVO

Se consideró una celda solar de perovskita con arquitectura n-i-p, representada como $\text{FTO}/\text{ETL}/\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{HTL}/\text{Au}$. El óxido de estaño dopado con flúor (FTO) funcionó como contacto frontal transparente y el oro (Au) como contacto posterior. La capa absorbidora fue $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ (MAPI), con espesor de 300 nm. Las capas ETL evaluadas fueron TiO_2 y ZnO , mientras que como HTL se compararon NiO y Spiro-OMeTAD; este último se mantuvo como material de referencia porque es uno de los transportadores orgánicos más

utilizados en celdas solares de perovskitas (Bhattacharai et al., 2023; Montoya De Los Santos et al., 2020; Park et al., 2024), en la Figura 2, se representa la estructura general de la celda de estudio.

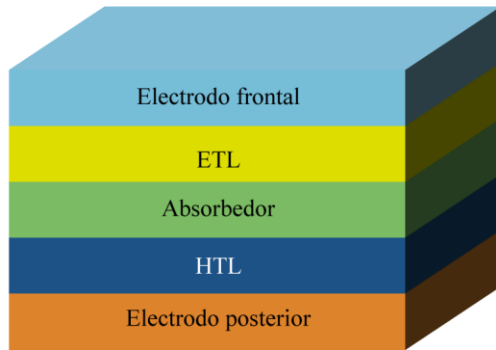


Figura 2. Estructura general FTO/ETL/MAPI/HTL/Au considerada para las simulaciones en SCAPS-1D.

En la tabla 3 se muestran las configuraciones de las celdas simuladas, donde se especifican los materiales que se emplearon para las capas transportadoras de electrones y huecos.

Tabla 3. Configuraciones simuladas en SCAPS-1D.

Celda	ETL	Absorbedor	HTL
C1	TiO ₂	CH ₃ NH ₃ PbI ₃	Spiro-OMeTAD
C2	TiO ₂	CH ₃ NH ₃ PbI ₃	NiO
C3	ZnO	CH ₃ NH ₃ PbI ₃	Spiro-OMeTAD
C4	ZnO	CH ₃ NH ₃ PbI ₃	NiO

En la Figura 3 se muestran las configuraciones de las celdas simuladas, donde se especifican los materiales que se emplearon en cada una de las capas. Como material del electrodo frontal se consideró el Óxido de estaño dopado con Flúor (FTO), mientras que para el electrodo posterior se utilizó el oro (Au).

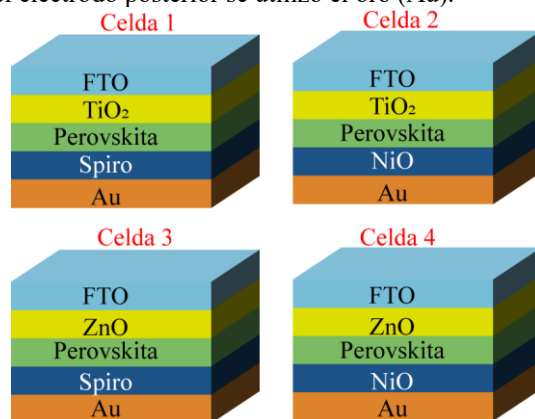


Figura 3. Combinaciones de ETL y HTL evaluadas manteniendo constantes el absorbedor y los contactos.

2.2 CONDICIONES DE SIMULACIÓN Y PARÁMETROS DE ENTRADA

Las simulaciones se realizaron bajo iluminación AM 1.5G, irradiancia de 1000 W m⁻² y temperatura de la celda de 300 K. La condición AM 1.5G corresponde al estándar de prueba para dispositivos fotovoltaicos y representa la radiación solar global que alcanza la superficie terrestre después de atravesar una masa de aire equivalente a 1.5 veces la existente cuando el Sol se encuentra en el cenit (AM1). (Park et al., 2024). Este valor está relacionado con un ángulo cenital solar de aproximadamente 48.2°, lo que indica condiciones promedio de irradiación sobre la superficie terrestre (G2V Optics, s. f.). Para comparar objetivamente el efecto de las capas de transporte, se mantuvieron constantes los parámetros del absorbedor y las condiciones de operación. Los parámetros de entrada fueron tomados del artículo de referencia y de reportes previos de simulación y caracterización de celdas de perovskita. (Bhattacharai et al., 2023; Montoya De Los Santos et al., 2020; Park et al., 2024). Entre ellos se incluyeron espesor, brecha de energía, afinidad electrónica, permitividad relativa, densidades efectivas de estados, velocidades térmicas, movilidades de electrones y huecos, y concentraciones donoras oceptoras. En la tabla 4 se presentan las propiedades de los materiales empleados en la simulación.

Tabla 4. Parámetros principales usados en la simulación (Chiu et al., 2024; Drygała et al., 2023; Montoya De Los Santos et al., 2020)

Parámetro	MAPI	TiO ₂	ZnO	NiO	Spiro
t (nm)	300	300	300	213	213
E _g (eV)	1.5	3.2	3.3	3.6	3
χ (eV)	3.9	4.1	4.1	1.8	2.2
ε _r	6.5	10	9	10.7	3.0
N _c (cm ⁻³)	1x10 ¹⁹	1x10 ¹⁹	4x10 ¹⁸	2.8x10 ¹⁹	1x10 ¹⁹
N _v (cm ⁻³)	1x10 ¹⁹	1x10 ¹⁹	4x10 ¹⁹	1.8x10 ¹⁹	1x10 ¹⁹
v _{thn} (cm/s)	1x10 ⁷	1x10 ⁷	1x10 ⁷	1x10 ⁷	1x10 ⁷
v _{thp} (cm/s)	1x10 ⁷	1x10 ⁷	1x10 ⁷	1x10 ⁷	1x10 ⁷
μ _n (cm ² /Vs)	2.0	2x10 ¹	100	12	1x10 ⁻⁵
μ _p (cm ² /Vs)	2.0	1x10 ¹	25	2.8	1x10 ⁻⁵
N _D (cm ⁻³)	1x10 ¹⁰	1x10 ¹⁶	1x10 ¹⁸	-	0
N _A (cm ⁻³)	1x10 ¹⁰	0	1x10 ⁵	1x10 ¹⁵	2x10 ¹⁹

En la Tabla 5 se presenta la nomenclatura y el significado de cada una de ellas.

Tabla 5. Nomenclatura de los parámetros utilizados en las simulaciones.

Símbolo	Descripción	Unidad
t	Espesor	nm
E _g	Brecha de energía	eV
χ	Afinidad electrónica	eV
ε _r	Permitividad relativa	-
N _c	Densidad efectiva de estados en la banda de conducción	cm ⁻³
N _v	Densidad efectiva de estados en la banda de valencia	cm ⁻³
v _{thn}	Velocidad térmica de electrones	cm/s

v_{thp}	Velocidad térmica de huecos	cm/s
μ_n	Movilidad de electrones	cm ² /Vs
μ_p	Movilidad de huecos	cm ² /Vs
N_D	Concentración de átomos donadores	cm ⁻³
N_A	Concentración de átomos aceptores	cm ⁻³

2.3 CRITERIOS DE ANÁLISIS

Como variables de salida se evaluaron los parámetros eléctricos característicos de una celda solar: el voltaje de circuito abierto (V_{oc} , del inglés Open Circuit Voltage) corresponde al voltaje máximo que puede generar una celda solar cuando no circula corriente eléctrica, la densidad de corriente de cortocircuito (J_{sc} , del inglés Short Circuit Current Density) representa la máxima corriente por unidad de área que una celda solar puede generar bajo iluminación cuando el voltaje es cero, el factor de forma (FF, del inglés Fill Factor) es una medida de la calidad de una celda solar y representa la relación entre la potencia máxima que puede entregar el dispositivo y el producto del V_{oc} y J_{sc} y por último la eficiencia de conversión de potencia (η) indica qué porcentaje de la energía solar incidente es transformada en energía eléctrica por una celda solar. También se analizaron las curvas corriente-voltaje (J-V) y los diagramas de bandas. En estos últimos se tuvo especial cuidado en representar el orden correcto de las capas, ya que una inversión del diagrama puede llevar a interpretar de forma incorrecta el sentido de extracción de electrones y huecos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La [Tabla 6](#) presenta los parámetros fotovoltaicos obtenidos de cada simulación. Entre ellos se incluyen el voltaje de circuito abierto (V_{oc}), la corriente de cortocircuito (J_{sc}), el factor de forma (FF) y la eficiencia (η). Los resultados indican que el cambio de las capas de transporte modifica la extracción de carga y, por lo tanto, el desempeño de la celda. Aunque las diferencias entre algunas configuraciones son pequeñas, son suficientes para evidenciar que la selección de ETL y HTL influye en el desempeño final de la celda.

Tabla 6. Parámetros fotovoltaicos obtenidos mediante SCAPS-1D.

Celda	V_{oc} (V)	J_{sc} (mAcm ⁻²)	FF (%)	η (%)
TiO ₂ /Spiro (Montoya De Los Santos et al., 2020)	0.9600	20.62	66.41	13.15
TiO ₂ /Spiro (este trabajo)	0.9631	20.4194	66.88	13.15
TiO ₂ /NiO	0.9386	20.3041	63.75	12.15

ZnO/Spiro	0.9265	20.4641	72.15	13.68
ZnO/NiO	0.9106	20.3435	68.02	12.60

De acuerdo con la [Tabla 6](#), la configuración ZnO/Spiro presentó la mayor eficiencia simulada, con 13.68%, seguida por ZnO/NiO con 12.60% y TiO₂/NiO con 12.15%. La celda TiO₂/Spiro alcanzó 13.15%, valor que corresponde al caso de referencia incluido en la tabla. En comparación con esta celda de referencia (13.15%), la configuración ZnO/Spiro muestra un incremento en la eficiencia del 4.03%, alcanzando 13.68%. Por otro lado, las configuraciones ZnO/NiO y TiO₂/NiO presentan reducciones de 4.18% y 7.60%, respectivamente.

Esta tendencia indica que, bajo los parámetros empleados, ZnO favorece una mayor J_{sc} que TiO₂, lo que podría estar relacionado con su alta movilidad electrónica y su capacidad para transportar electrones con menores pérdidas resistivas.

El incremento de V_{oc} observado en las configuraciones con Spiro también sugiere que la alineación energética y la selectividad de la interfaz perovskita/HTL modifican las pérdidas por recombinación. Sin embargo, el mejor resultado global no depende de un único parámetro, sino del equilibrio entre J_{sc} , V_{oc} y FF. Por ello, ZnO/Spiro alcanza la mayor eficiencia al combinar una corriente alta con el factor de forma más elevado.

En la [Figura 4](#) se muestran las curvas J-V las cuales presentan un comportamiento similar en las cuatro configuraciones, lo que confirma que todas pueden funcionar como arquitecturas viables. No obstante, las curvas asociadas a ZnO muestran una ligera mejora en la región de máxima potencia. En términos prácticos, esto significa que el dispositivo mantiene una corriente útil más alta antes de alcanzar la zona de caída cercana a V_{oc} . Esta diferencia se refleja en un FF superior y, por consiguiente, en una mayor eficiencia. La mayor eficiencia obtenida con la configuración ZnO/Spiro puede atribuirse al equilibrio favorable entre la extracción de electrones en la ETL y la extracción de huecos en la HTL. Según los parámetros empleados en la simulación, el ZnO presenta una movilidad electrónica superior a la del TiO₂, lo que puede facilitar el transporte de electrones y reducir la acumulación de carga en la interfaz ETL/perovskita. Esto se refleja en una ligera mejora de la densidad de corriente y, principalmente, en un aumento del factor de forma. Por su parte, Spiro-OMeTAD proporciona una interfaz HTL/perovskita más favorable que la de NiO en las condiciones simuladas, lo que contribuye a disminuir las pérdidas por recombinación y a mantener una mejor selectividad para el transporte de huecos. Aunque la configuración ZnO/Spiro no presenta el mayor voltaje de circuito abierto, su mayor factor de forma y su corriente ligeramente superior permiten alcanzar

la eficiencia más alta entre las configuraciones evaluadas.

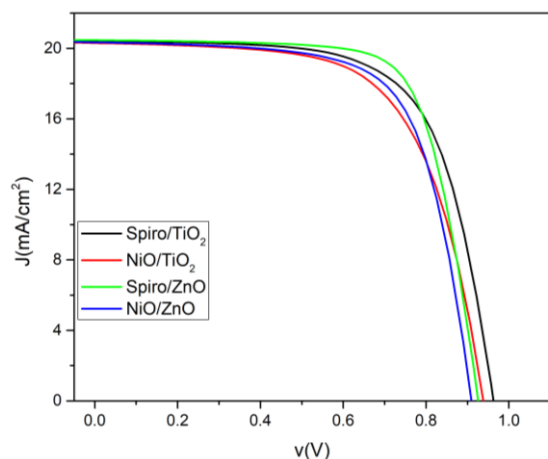


Figura 4. Curvas J-V de las celdas solares de perovskita considerando los óxidos metálicos como capas de transporte de carga.

3.1 INTERPRETACIÓN DE LOS DIAGRAMAS DE BANDAS

La **Figura 5** muestra los diagramas de bandas obtenidos para las diferentes configuraciones evaluadas, los cuales permiten visualizar si los niveles energéticos de cada material favorecen o dificultan el transporte selectivo de carga. Las figuras muestran configuraciones n-i-p, en las cuales las capas se depositan sucesivamente sobre el sustrato conductor transparente FTO, y es en dicho sustrato donde incide la luz.

En una alineación favorable, la banda de conducción de la ETL queda próxima a la banda de conducción de la perovskita, de modo que los electrones pueden transferirse hacia el contacto frontal con una barrera compatible con la perovskita para extraer huecos y bloquear electrones. Si la barrera energética es grande, las cargas se acumulan en la interfaz y aumenta la recombinación. Si la barrera es moderada o el contacto está bien pasivado, la extracción, es más eficiente y mejora el FF.

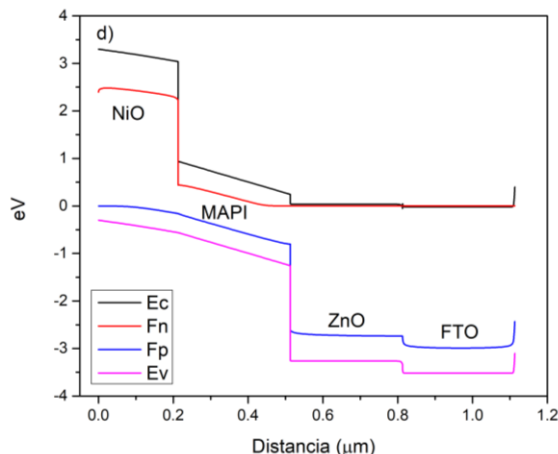
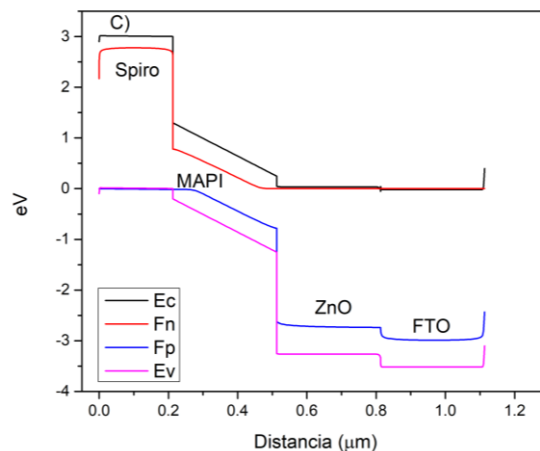
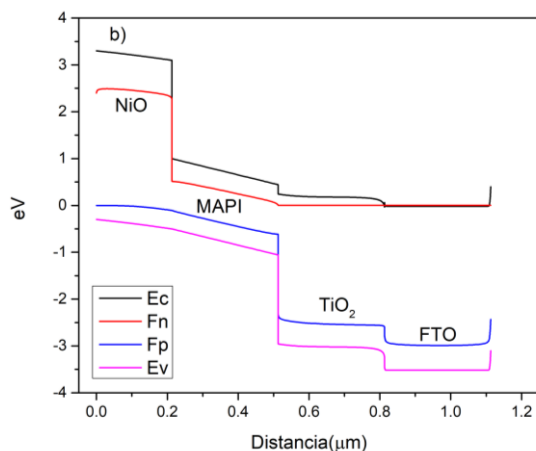
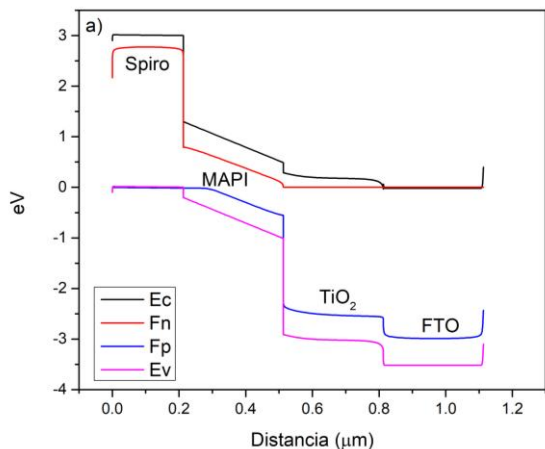


Figura 5. Diagrama de bandas de las celdas solares: a) FTO/TiO₂/MAPI/Spiro/Au, b) FTO/TiO₂/MAPI/NiO/Au, c) FTO/ZnO/MAPI/Spiro/Au y d) FTO/ZnO/MAPI/NiO/Au

La **Figura 5** muestra que las cuatro configuraciones presentan una alineación energética favorable para el transporte selectivo de carga. En los diagramas, Ec corresponde a la banda de conducción y Ev a la banda de valencia, mientras que Fn y Fp representan los cuasi niveles de Fermi de electrones y huecos, respectivamente. En todos los casos, la banda de conducción de la perovskita se encuentra próxima a la de la ETL, mientras que la banda de valencia

presenta una alineación adecuada con la HTL, permitiendo la extracción eficiente de electrones y huecos. Sin embargo, se observan diferencias en la magnitud de los escalones energéticos entre las interfaces. En las configuraciones basadas en ZnO (Figuras 5 c y 5 d), la transición entre la perovskita y la ETL es ligeramente más suave que en las configuraciones con TiO₂ (Figuras 5a y 5b), lo que favorece el transporte de electrones y puede contribuir a los mayores valores de FF y eficiencia observados en la Tabla 6.

Con base en las propiedades eléctricas utilizadas en la simulación, el ZnO presenta una movilidad electrónica mayor que el TiO₂ y una afinidad electrónica similar, lo que favorece a explicar la mejora del desempeño fotovoltaico. En el lado de la HTL, el NiO puede aportar ventajas de estabilidad por ser inorgánico y tipo p, sin embargo, su desempeño depende fuertemente de la calidad de la interfaz y de la concentración de defectos. Por su parte, Spiro-OMeTAD, aunque es un material orgánico, funciona como punto de comparación por su uso extendido y por su alineación favorable con MAPI.

Los resultados de los diagramas de banda indican que los óxidos metálicos son materiales estratégicos, pero su beneficio depende de un diseño interfacial cuidadoso. Así mismo, muestran que todas las arquitecturas estudiadas poseen condiciones energéticas adecuadas para el transporte de carga. No obstante, pequeñas variaciones en la alineación de bandas y en las barreras interfaciales pueden influir en la extracción de portadores y en los procesos de recombinación, afectando el desempeño fotovoltaico de la celda.

3.2 RELEVANCIA PARA LA ESTABILIDAD

La estabilidad de las celdas de perovskita sigue siendo un desafío para su transferencia tecnológica. En este contexto, los óxidos metálicos pueden actuar como barreras parciales frente a humedad y oxígeno, mejorar la resistencia térmica y reducir reacciones en los contactos. Las capas de NiO_x y ZnO han demostrado mejorar la estabilidad en aire cuando sustituyen transportadores orgánicos susceptibles a degradación. (You et al., 2016). Asimismo, SnO₂ se ha convertido en una de las ETL más prometedoras debido a su bajo procesamiento térmico y baja actividad fotocatalítica, lo que puede disminuir la degradación interfacial. (Anaraki et al., 2016; Chiu et al., 2024; Hoang Huy et al., 2023).

No obstante, la estabilidad no depende únicamente del material. La rugosidad, los defectos superficiales, el espesor, el método de depósito y la pasivación de interfaces son factores determinantes. Por esa razón, una misma capa de NiO_x, TiO₂, ZnO o SnO₂ puede producir resultados muy diferentes si cambia la preparación experimental o la composición de la perovskita. La simulación permite identificar

tendencias, pero debe complementarse con caracterización experimental para validar mecanismos de recombinación, degradación e histéresis.

4. CONCLUSIONES

Los óxidos metálicos son componentes esenciales en el desarrollo de celdas solares de perovskita más eficientes y estables. Como ETL, materiales como TiO₂, ZnO y SnO₂ favorecen la extracción de electrones, reducen pérdidas por recombinación y pueden mejorar la estabilidad del dispositivo. Como HTL o capas interfaciales, NiO_x, Cu₂O, CuO, MoO₃, WO₃ y V₂O₅ aportan selectividad para huecos y mayor robustez química frente a alternativas orgánicas.

En las simulaciones SCAPS-1D basadas en la arquitectura FTO/ETL/CH₃NH₃PbI₃/HTL/Au, la configuración ZnO/Spiro alcanzó la mayor eficiencia, con 13.68%, seguida por ZnO/NiO y TiO₂/NiO. Estos resultados sugieren que la movilidad y la alineación energética de la ETL tienen un papel clave en la corriente generada, mientras que la HTL influye en Voc, FF y recombinación interfacial. La comparación también resalta el potencial de NiO como HTL inorgánica, especialmente cuando se optimiza su interfaz con la perovskita.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad del Istmo por el apoyo académico para el desarrollo de actividades de divulgación científica relacionadas con energías renovables y dispositivos fotovoltaicos. Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo económico brindado para el desarrollo de la presente investigación. Los autores agradecen al Prof. Marc Burgelman y a su equipo de la Universidad de Gante por el desarrollo y la disponibilidad del software SCAPS-1D, herramienta fundamental para la realización de las simulaciones presentadas en este trabajo.

DECLARACIONES

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Los autores declaran el uso de herramientas de Inteligencia Artificial, tradicional y/o generativa, como apoyo para la revisión de estilo y organización del manuscrito, conforme a los lineamientos éticos de la revista.

Los datos utilizados en las simulaciones se presentan en las tablas del artículo. Información adicional puede obtenerse de los autores bajo solicitud debidamente sustentada.

REFERENCIAS

Anaraki, E. H., Kermanpur, A., Steier, L., Domanski, K., Matsui, T., Tress, W., Saliba, M., Abate, A., Grätzel, M., Hagfeldt, A., & Correa-Baena, J.-P. (2016). Highly efficient and

- stable planar perovskite solar cells by solution-processed tin oxide. *Energy & Environmental Science*, 9(10), 3128–3134. <https://doi.org/10.1039/C6EE02390H>
- Bhattarai, S., Mohammed, M. K. A., Madan, J., Pandey, R., Abdelkader, H., Ben Farhat, L., Amami, M., & Hossain, M. K. (2023). Comparative study of different perovskite active layers for attaining higher efficiency solar cells: Numerical simulation approach. *Sustainability*, 15(17), 12805. <https://doi.org/10.3390/su151712805>
- Burgelman, M., Decock, K., Niemegeers, A., Verschraegen, J., & Degraeve, S. (2016). *SCAPS manual*. University of Ghent.
- Chen, L., Msiqwa, G., Yang, M., Osman, A. I., Fawzy, S., Rooney, D. W., & Yap, P.-S. (2022). Strategies to achieve a carbon neutral society: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 20(4), 2277–2310. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01435-8>
- Chiu, W. H., Huang, Y. K., Chen, S. H., Wu, M. C., Chen, G., & Lee, K. M. (2024). Exploring the efficiency enhancement of perovskite solar cells by chemical bath depositing SnO₂ on mesoporous TiO₂ electrode. *Materials Today Chemistry*, 41, 102329. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2024.102329>
- Drygała, A., Starowicz, Z., Gawlińska-Nęcek, K., Karolus, M., Lipiński, M., Jarka, P., Matysiak, W., Tillová, E., Palček, P., & Tański, T. (2023). Hybrid mesoporous TiO₂/ZnO electron transport layer for efficient perovskite solar cell. *Molecules*, 28(15), 5656. <https://doi.org/10.3390/molecules28155656>
- G2V Optics. (s. f.). *AMI.5 spectrum*. <https://g2voptics.com/solar-simulation/am1.5-spectrum/>
- Galatopoulos, F., Savva, A., Papadas, I. T., & Choulis, S. A. (2017). The effect of hole transporting layer in charge accumulation properties of p-i-n perovskite solar cells. *APL Materials*, 5(7), 076102. <https://doi.org/10.1063/1.4991030>
- Hoang Huy, V. P., & Bark, C. W. (2023). Review on surface modification of SnO₂ electron transport layer for high-efficiency perovskite solar cells. *Applied Sciences*, 13(19), 10715. <https://doi.org/10.3390/app131910715>
- Islam, M. B., Yanagida, M., Shirai, Y., Nabetani, Y., & Miyano, K. (2017). NiO_x hole transport layer for perovskite solar cells with improved stability and reproducibility. *ACS Omega*, 2(5), 2291–2299. <https://doi.org/10.1021/acsomega.7b00538>
- Kojima, A., Teshima, K., Shirai, Y., & Miyasaka, T. (2009). Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells. *Journal of the American Chemical Society*, 131(17), 6050–6051. <https://doi.org/10.1021/ja809598r>
- Montoya De Los Santos, I., Cortina-Marrero, H. J., Ruíz-Sánchez, M. A., Hechavarria-Difur, L., Sánchez-Rodríguez, F. J., Courel, M., & Hu, H. (2020). Optimization of CH₃NH₃PbI₃ perovskite solar cells: A theoretical and experimental study. *Solar Energy*, 199, 198–205. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.026>
- National Renewable Energy Laboratory. (2026). *Best research-cell efficiency chart*. <https://www.nrel.gov/pv/interactive-cell-efficiency.html>
- Park, H. J., Son, H., & Jeong, B. S. (2024). SCAPS-1D simulation for device optimization to improve efficiency in lead-free CsSnI₃ perovskite solar cells. *Inorganics*, 12(4), 123. <https://doi.org/10.3390/inorganics12040123>
- Sayed, E. T., Wilberforce, T., Elsaid, K., Rabaia, M. K. H., Abdelkareem, M. A., Chae, K.-J., & Olabi, A. G. (2021). A critical review on environmental impacts of renewable energy systems and mitigation strategies: Wind, hydro, biomass and geothermal. *Science of the Total Environment*, 766, 144505. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144505>
- Sharma, P., & Mishra, R. K. (2025). Comprehensive study on photovoltaic cell's generation and factors affecting its performance: A review. *Materials for Renewable and Sustainable Energy*, 14(1), 21. <https://doi.org/10.1007/s40243-024-00292-5>
- Tan, H., Jain, A., Voznyy, O., Lan, X., García de Arquer, F. P., Fan, J. Z., Quintero-Bermudez,

R., Yuan, M., Zhang, B., Zhao, Y., Fan, F., Li, P., Quan, L. N., Zhao, Y., Lu, Z.-H., Yang, Z., Hoogland, S., & Sargent, E. H. (2017). Efficient and stable solution-processed planar perovskite solar cells via contact passivation. *Science*, 355(6326), 722–726.
<https://doi.org/10.1126/science.aai9081>

You, J., Meng, L., Song, T. B., Guo, T. F., Chang, W. H., Hong, Z., Chen, H., Zhou, H., Chen, Q., Liu, Y., De Marco, N., & Yang, Y. (2016). Improved air stability of perovskite solar cells via solution-processed metal oxide transport layers. *Nature Nanotechnology*, 11(1), 75–81.
<https://doi.org/10.1038/nnano.2015.230>

Zhou, H., Chen, Q., Li, G., Luo, S., Song, T.-B., Duan, H.-S., Hong, Z., You, J., Liu, Y., & Yang, Y. (2014). Interface engineering of highly efficient perovskite solar cells. *Science*, 345(6196), 542–546.
<https://doi.org/10.1126/science.1254050>

Generación de una base de datos pública del movimiento aparente del Sol en el Istmo de Tehuantepec

MARÍA FERNANDA URBIETA MARTÍNEZ^{1,*} | GABRIEL CASTILLO SANTIAGO¹ | VÍCTOR IVÁN MORENO OLIVA¹ | MARTÍN JIMÉNEZ RODRÍGUEZ²

¹ División de Estudios de Posgrado, Universidad del Istmo, Campus Tehuantepec, Oaxaca, Mexico.

² Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, Mexico.

* Correspondencia: fernandaurbietamtz@gmail.com

Recibido: 13/06/2026

Revisado: 25/06/2026

Aceptado: 01/07/2026

Publicado: 08/07/2026

RESUMEN: El movimiento aparente del Sol influye directamente en el desempeño de los dispositivos de aprovechamiento solar, ya que la energía captada depende de la dirección e inclinación de la radiación incidente. En este trabajo se analizó la trayectoria solar en el Istmo de Tehuantepec mediante la elaboración de una base de datos generada con la ayuda de las librerías de uso astronómico en Python. A partir de los datos obtenidos se realizaron representaciones de bóveda celeste y una validación experimental con fotografías tomadas en distintos horarios del día. Los resultados muestran una desviación aceptable entre las posiciones solares consultadas y las medidas experimentalmente, abriendo la puerta al desarrollo de dispositivos solares con la intención de mejorar su eficiencia para aplicaciones en esta zona geográfica.

ABSTRACT: The apparent daily path of the sun across the sky directly influences the performance of solar energy collector devices, since the captured energy depends on the direction and inclination of the incident radiation. In this work, the solar trajectory in the Isthmus of Tehuantepec was analyzed through the development of a database generated with the aid of astronomical libraries in Python. Based on the data obtained, celestial dome representations were produced, along with an experimental validation using photographs taken at different times of the day. The results show an acceptable deviation between the consulted solar positions and those measured experimentally, contributing to the advancement for the development of solar devices aimed at improving their efficiency for applications in this geographic context.

Palabras clave: Movimiento aparente del Sol, Energía solar, Trayectoria solar, Posición solar, Istmo de Tehuantepec

1. INTRODUCCIÓN

La energía solar se ha consolidado como una de las principales alternativas para la generación de energía limpia, ya que puede aprovecharse de diferentes maneras para producir electricidad o calor. Gracias a esto, se han desarrollado tecnologías como los paneles solares, los colectores térmicos y los concentradores solares, que permiten captar la radiación solar y transformarla en energía útil. Sin embargo, para que estos dispositivos funcionen de manera eficiente, no basta con la presencia de radiación solar, sino que también es fundamental conocer la dirección de incidencia de la luz y cómo varía la posición aparente del Sol a lo largo del día y del año (Duffie & Beckman, 2013; Hafez et al., 2018; Kalogirou, 2023; Sadeghi et al., 2025). A este cambio en la posición del Sol se le conoce como movimiento

aparente del Sol. Se denomina de esta manera porque, desde la Tierra, parece que el Sol se desplaza por el cielo desde el amanecer hasta el atardecer. En realidad, este fenómeno se debe principalmente a la rotación de la Tierra sobre su eje y a su traslación alrededor del Sol, como se muestra en la [Figura 1](#).

El estudio de este movimiento permite determinar la posición solar en un lugar y momento específicos para distintas implementaciones de dispositivos solares. Conocer la trayectoria del Sol resulta fundamental, ya que las tecnologías que aprovechan la radiación solar dependen directamente de la posición del Sol para optimizar la captación de energía. La máxima captación de energía solar se obtiene cuando los rayos solares inciden perpendicularmente sobre la superficie receptora de radiación; es decir, cuando el ángulo de incidencia de

la radiación es igual a cero con respecto a la normal de la superficie captadora. En este sentido, la cantidad de energía aprovechada no depende únicamente de la intensidad de la radiación solar, sino también del ángulo de incidencia sobre los sistemas. Por ejemplo, en colectores solares, paneles fotovoltaicos y concentradores, una orientación inadecuada puede reducir significativamente su eficiencia, por ello, comprender el movimiento aparente del Sol permite mejorar el diseño, la orientación y el desempeño de estas tecnologías.

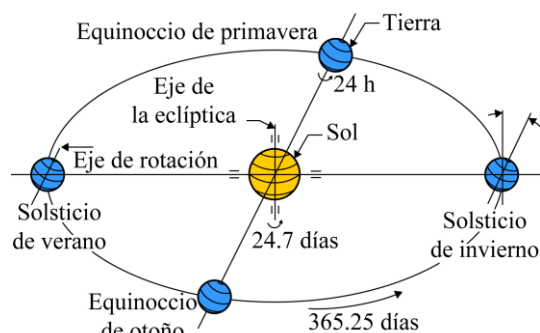


Figura 1 Movimiento de rotación y traslación de la Tierra alrededor del Sol durante el año, mostrando los equinoccios y solsticios. (Duffie & Beckman, 2013)

Este tema adquiere mayor relevancia en regiones con alto potencial solar, como el Istmo de Tehuantepec, en el estado de Oaxaca, caracterizado por presentar niveles elevados de radiación solar durante gran parte del año. Para el aprovechamiento eficiente de este recurso, es necesario considerar tanto las condiciones geográficas como la trayectoria solar, ya que ambos factores influyen directamente en el desempeño de los sistemas solares instalados en la región. Por lo anterior, el presente artículo tiene como objetivo representar el impacto del movimiento aparente del Sol mediante una representación y análisis de una base de datos centralizada en el Istmo de Tehuantepec, con el fin de mostrar cómo la trayectoria solar influye en la orientación tomando en cuenta un cuerpo colocado sobre la superficie terrestre, realizando un aporte para un mejor aprovechamiento de la energía solar y el desarrollo de tecnologías más adecuadas a las condiciones locales.

2. METODOLOGÍA

Para analizar el movimiento aparente del Sol en el Istmo de Tehuantepec a partir de una base de datos, se utilizaron las coordenadas geográficas de latitud y longitud de la Universidad del Istmo, Campus Tehuantepec, localizada en Santo Domingo Tehuantepec, Oaxaca. Es importante mencionar que en este trabajo se utiliza la convención de ángulos solares propuesta por Kalogirou (2023), donde la elevación solar (α) se mide desde el horizonte y el ángulo cenital (θ) desde la vertical. El ángulo azimutal z se define con origen en el norte geográfico y

aumenta en sentido horario. Para la representación tridimensional en Wolfram Mathematica se empleó la conversión a coordenadas esféricas correspondiente a dicho sistema de referencia (Guadarrama, 2019). A partir de esta información, se calculó la posición aparente del Sol mediante la librería *pvl* de Python (Holmgren et al., 2018), obteniendo valores para los ángulos de elevación solar α y azimutal z , tomando en consideración una secuencia continua a lo largo de un año, con intervalos de un minuto.

El cálculo de la posición aparente del Sol se fundamenta en relaciones astronómicas ampliamente utilizadas en geometría solar, las cuales permiten determinar parámetros como el ángulo cenital (θ), la elevación solar (α) y el azimutal solar (z) a partir de la ubicación geográfica, la fecha y la hora de observación (Duffie & Beckman, 2013; Kalogirou, 2023), como se puede apreciar en la Figura 2. La bóveda celeste es una representación geométrica de la esfera celeste utilizada para visualizar la posición aparente del Sol desde el punto de vista del observador. En esta figura r representa la distancia radial desde el observador hasta la posición aparente del Sol sobre la bóveda celeste, la rosa de los vientos está representada por (N), sur (S), este (E) y oeste (O).

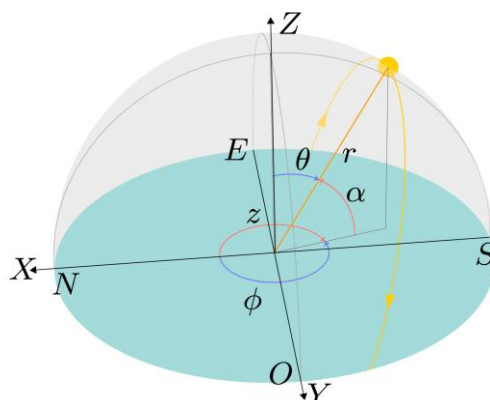


Figura 2. Definición de la geometría solar para la trayectoria aparente del Sol en el cielo desde el amanecer hasta el atardecer, combinando en un modelo de Bóveda celeste, la representación solar, coordenadas esféricas, coordenadas cartesianas y rosa de los vientos.

(Elaboración propia)

Una de las relaciones principales corresponde a la elevación solar α y el ángulo cenital θ , los cuales se relacionan mediante la Ec. (1).

$$\alpha + \theta = 90^\circ \quad (1)$$

Asimismo, para el cálculo de la declinación solar se emplea la Ec. (2).

$$\delta = 23.45^\circ \sin\left(\frac{360}{365}(284 + n)\right) \quad (2)$$

donde δ corresponde a la declinación solar y n representa el número de día del año en formato de año juliano. De igual manera, el ángulo horario puede determinarse mediante la Ec. (3).

$$\omega = 15^\circ(TS - 12) \quad (3)$$

donde ω representa el ángulo horario y TS el tiempo solar verdadero. A partir de estas relaciones es posible determinar la elevación solar para una ubicación geográfica específica mediante la Ec. (4).

$$\sin(\alpha) = \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega) \quad (4)$$

Estas relaciones constituyen la base matemática empleada para el cálculo de la trayectoria aparente del Sol y permiten generar bases de datos solares para distintas regiones geográficas.

3. RESULTADOS

El algoritmo empleado, utiliza como variables de entrada:

- Coordenadas geográficas: latitud = 16.286° , longitud = -95.241° , altitud = 30 m.
- Periodo de estudio: del 1 de enero de 2026 al 31 de diciembre de 2026.
- Resolución temporal: intervalos de 1 minuto.
- Zona horaria: America/Mexico_City.

Los datos generados fueron organizados en archivos CSV que pueden leerse y editarse con Microsoft Excel para facilitar su análisis y visualización. La Figura 3. muestra un ejemplo de la organización de la base de datos solar obtenida de la forma en que se visualiza en Microsoft Excel.

	A	B	C	D
1	fecha_hora	cenit_aparente	azimut	elevacion
2	2026-01-01 00:00:00-06:00	171.20153402510135	219.77594747925627	-81.20153403
3	2026-01-01 00:01:00-06:00	171.35318090917758	218.63519430642356	-81.35318091
4	2026-01-01 00:02:00-06:00	171.5010305829456	217.4528195775294	-81.50103058
5	2026-01-01 00:03:00-06:00	171.6448811239192	216.22775557144448	-81.64488112
6	2026-01-01 00:04:00-06:00	171.78452213017334	214.95902512401278	-81.78452213

Figura 3. Captura de pantalla de la base de datos solar en un archivo (CSV) desde Microsoft Excel.

La posición aparente del Sol se calculó mediante la librería pvlib de Python, la cual implementa algoritmos astronómicos como NREL SPA para determinar los ángulos solares a partir de la fecha, hora y ubicación geográfica. Estos cálculos son independientes de bases de datos meteorológicas, como NASA POWER, las cuales proporcionan información de radiación y variables atmosféricas. A partir de los resultados obtenidos con pvlib, se generó la base de datos empleada en este trabajo para representar la trayectoria aparente del Sol en la región del Istmo de Tehuantepec. (NASA, 2024). Para poder manipular la base de datos en coordenadas esféricas

$\{r, \theta, \varphi\}$ y posteriormente en coordenadas cartesianas $\{x, y, z\}$ se utilizan las siguientes transformaciones

$$\{r, \theta, \phi\} = \{r, \frac{\pi}{2} - \alpha, 2\pi - z\} \quad (5)$$

$$\{x, y, z\} = \{r \cos \phi \sin \theta, r \sin \theta \sin \phi, r \cos \theta\} \quad (6)$$

Con las cuales podemos representar el movimiento aparente del Sol en el Istmo de Tehuantepec en un formato de bóveda celeste mediante Wolfram Mathematica 12, como se muestra en la Figura 4, donde podemos apreciar que debido a que la región del Istmo se encuentra cerca del ecuador. También puede observarse que, debido a la ubicación geográfica de la región, el Sol, en su movimiento aparente se desplaza en una trayectoria predominantemente hacia el sur. Asimismo, durante el verano del hemisferio norte alcanza mayores ángulos de elevación, aproximándose al cenit, lo que favorece un mayor aprovechamiento de la radiación solar.

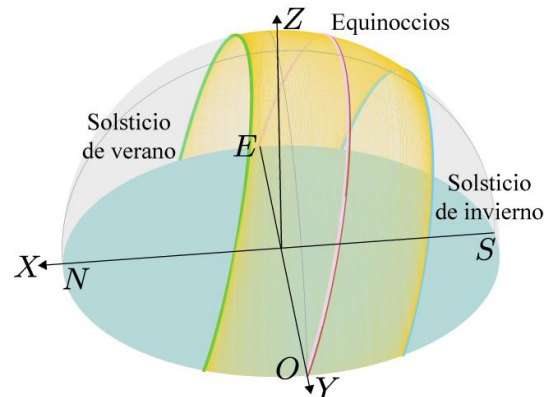


Figura 4. Representación gráfica en un modelo de bóveda celeste en coordenadas cartesianas de la posición aparente del Sol, desde el 1 de enero al 31 de diciembre del 2026, con un muestreo de 1 minuto. (Elaboración propia)

Para validar la base de datos del movimiento aparente del Sol generada para la región del Istmo de Tehuantepec, fue necesario realizar mediciones experimentales mediante fotografías tomadas en días y horas específicas. La validación se basó en que la dirección y la longitud de la sombra proyectada por un objeto vertical dependen directamente de la posición aparente del Sol, representada por los ángulos de elevación y azimut. Por ello, se utilizó una base de madera como plano de referencia y un tubo rectificado de 68 mm colocado verticalmente para medir la longitud y la dirección de las sombras proyectadas, como se muestra en la Figura 5, donde h representa la altura del tubo y l la longitud de la sombra.

La elevación solar se obtuvo a partir de la relación trigonométrica entre la altura del tubo (h) y la longitud de la sombra proyectada (l), mediante la siguiente expresión:

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{h}{l}\right) \quad (8)$$

La orientación del sistema de referencia se realizó mediante el magnetómetro del teléfono móvil. Las pequeñas variaciones observadas en las mediciones pueden atribuirse a la precisión del instrumento y al error asociado a la medición manual de la longitud y dirección de la sombra.

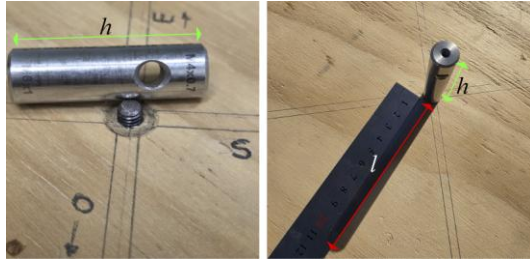


Figura 5. Tubo rectificado para mediciones solares, sección de madera tratada para simular un plano de referencia a la rosa de los vientos. Medición del ángulo cenital y de elevación. (Elaboración propia)

Las mediciones experimentales se realizaron en distintos horarios del día utilizando un sistema de referencia orientado con los puntos cardinales norte (N), sur (S), este (E) y oeste (O). La orientación del sistema se obtuvo mediante la brújula electrónica (magnetómetro) de un teléfono inteligente de gama alta, como se muestra en la **Figura 5**. Posteriormente, se analizaron las sombras proyectadas por un objeto de referencia colocado dentro del sistema de coordenadas establecido. A partir de las fotografías obtenidas, se determinaron la dirección y la longitud de las sombras, las cuales se compararon con los valores de posición solar calculados previamente en la base de datos. Los resultados de esta comparación se presentan en la **Tabla 1**.

La comparación se realizó entre la dirección y longitud de las sombras obtenidas experimentalmente a partir de las fotografías, y los valores de posición solar obtenidos previamente en la base de datos, considerando principalmente los ángulos de elevación solar y azimutal. Los resultados mostraron una buena correspondencia entre ambos conjuntos de datos, validando el procedimiento utilizado para el cálculo de la posición aparente del Sol.

La **Figura 6** presenta ejemplos representativos del proceso de validación experimental. En ella se observa la orientación de las sombras proyectadas por el objeto de referencia en distintos horarios, las cuales se compararon con la posición aparente del Sol obtenida a partir de la base de datos generada. La concordancia visual entre ambos resultados respalda la validez del procedimiento empleado.

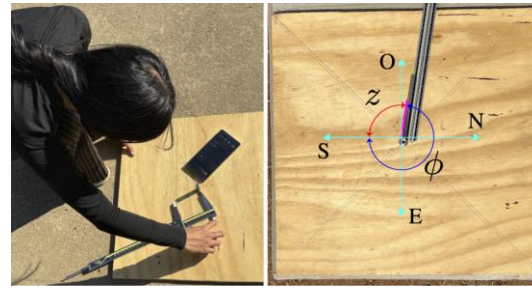


Figura 6. Validación experimental de la trayectoria solar mediante fotografías tomadas el día 10 de abril de 2026 y comparación con la posición solar calculada. Medición del ángulo azimutal. (Elaboración propia)

En la **Tabla 1** se presentan los resultados de la validación experimental de la base de datos, donde α , α_m y $\Delta\alpha$ corresponden al ángulo de elevación calculado mediante la base de datos, al ángulo de elevación medido experimentalmente y a la diferencia entre ambos, respectivamente., asimismo z , z_m y Δz corresponden al ángulo azimutal calculado mediante la base de datos, al ángulo azimutal medido experimentalmente y a la diferencia entre ambos.

Tabla 1. Reporte de validación experimental de la base de datos con intervalos de una hora aproximadamente los resultados corresponden al día 10 de abril de 2026.

Fecha y Hora	α α_m $\Delta\alpha$	z z_m Δz	RMS
10/04/2026 8:14	29.04° 29.66° 0.62°	89.7° 88.07° 1.63°	1.74°
10/04/2026 9:14	44.15° 45° 0.85°	91.96° 90.1° 1.86°	2.04°
10/04/2026 10:11	56.98° 57.33° 0.35°	100.4° 98.58° 1.82°	1.85°
10/04/2026 10:59	69.09° 70.17° 1.08°	105.22° 107.32° 2.1°	2.36°
10/04/2026 11:59	80.06° 80.39° 0.33°	144.71° 142.66° 2.82°	2.83°
10/04/2026 12:59	78.75° 79.46° 0.71°	236.77° 241.08° 4.31°	4.36°
10/04/2026 13:58	65.22° 64.26° 0.96°	253.67° 252.46° 1.21°	1.54°
10/04/2026 14:40	55.56° 56.46° 0.90°	263.19° 262.45° 0.74°	1.16°
10/04/2026 15:23	45.14° 44.41° 0.73°	264.65° 264.04° 0.61°	0.95°
10/04/2026 16:09	34.26° 34.74° 0.48°	270.69° 270.59° 0.10°	0.49°

4. DISCUSIÓN

La base de datos obtenida mediante la librería pvlib de Python fue utilizada para representar la trayectoria aparente del Sol mediante Wolfram Mathematica (Wolfram Research, Inc., 2025), sin embargo, se puede utilizar Python u otro programa que sea capaz de graficar coordenadas en 3D. A partir de los ángulos de elevación y azimutal se generaron representaciones tridimensionales de la bóveda celeste de acuerdo a la nomenclatura establecida en la Figura 2, permitiendo visualizar el comportamiento de la trayectoria solar a lo largo de todo un año como se muestra en la Figura 4. Estas representaciones permiten analizar la dirección de incidencia de la radiación solar y su relación con dispositivos de aprovechamiento solar ya que toman en cuenta la fecha y la hora para una predicción con un alcance de hasta 100 años.

Durante el mediodía del horario solar se registran mayores ángulos de elevación, mientras que durante el amanecer y el atardecer la radiación incide con una mayor inclinación. Asimismo, en verano la trayectoria solar alcanza elevaciones mayores que en invierno, modificando la dirección de incidencia sobre los dispositivos solares. Los resultados de la validación experimental, presentados en la Tabla 1, muestran una buena correspondencia entre la dirección y longitud de las sombras proyectadas por el objeto de referencia y la posición aparente del Sol calculada mediante la base de datos, lo que permitió verificar la confiabilidad de la metodología empleada. Con el fin de evaluar el comportamiento general del error entre los valores calculados y los medidos experimentalmente, se empleó el error RMS (Root Mean Square), el cual proporciona un valor representativo considerando simultáneamente las diferencias en los ángulos de elevación y azimut. El RMS se calculó mediante la siguiente expresión:

$$RMS = \sqrt{(\Delta elevacion)^2 + (\Delta azimut)^2} \quad (8)$$

Donde $\Delta elevacion$ corresponde a la diferencia entre el ángulo de elevación calculado y el medido experimentalmente, mientras que $\Delta azimut$ representa la diferencia entre el ángulo azimutal calculado y el medido experimentalmente. Sin embargo, conforme la medición se aproxima al mediodía, el valor de RMS aumenta debido al tamaño reducido de la sombra y al error humano asociado a su medición. El uso de instrumentos de mayor precisión podría contribuir a mejorar la correspondencia entre los valores calculados y los medidos

La orientación y el ángulo de incidencia de la radiación afectan la cantidad de energía captada por los dispositivos solares. Por ello, conocer el

comportamiento aparente del Sol resulta importante para el diseño y orientación de dispositivos solares adaptados a las condiciones geográficas del Istmo de Tehuantepec.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se generó una base de datos de la posición aparente del Sol para la región del Istmo de Tehuantepec mediante la librería pvlib de Python. La validación experimental, basada en la comparación entre la dirección y longitud de las sombras proyectadas por un objeto de referencia y los valores calculados en la base de datos, mostró una buena correspondencia entre ambos resultados, confirmando la confiabilidad de la metodología empleada. Asimismo, la representación de la trayectoria solar mediante un modelo tridimensional de bóveda celeste constituye una herramienta útil para el análisis y diseño de tecnologías de aprovechamiento solar adaptadas a las condiciones de la región.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto se llevó a cabo en el Laboratorio de Óptica Aplicada de la Universidad del Istmo. La autora Fernanda agradece a SECIHTI por ser beneficiaria de la convocatoria Becas Nacionales para estudios de Posgrado 2024. El autor Martín agradece a SECIHTI por ser beneficiario en la convocatoria de Estancias Posdoctorales por México 2025. Este trabajo fue parcialmente financiado por el proyecto DGAPA-PAPIIT IT104525

DECLARACIONES

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Los autores declaran no haber utilizado herramientas de Inteligencia Artificial, Tradicional y/o Generativa en la elaboración de este manuscrito, conforme a los lineamientos éticos de la revista.

Los archivos CSV que sustentan los resultados de este estudio estarán disponibles como material suplementario de la publicación.

REFERENCIAS

- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes* (4th ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118671603>
- Kalogirou, S. A. (2023). *Solar energy engineering: Processes and systems* (3rd ed.). Academic Press.
- Holmgren, W. F., Hansen, C. W., & Mikofski, M. A. (2018). pvlib python: A python package for modeling solar energy systems. *Journal of*

- Open Source Software*, 3(29), 884.
<https://doi.org/10.21105/joss.00884>
- National Aeronautics and Space Administration. (2024). *NASA POWER Data Access Viewer*. Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER). <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Wolfram Research, Inc. (2025). *Mathematica* (Version 14.0) [Computer software]. <https://www.wolfram.com/mathematica/>
- Guadarrama, C. G. (2019). *Geometría solar para arquitectos*. Unidades de Apoyo para el Aprendizaje, CUAED/Facultad de Arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México. https://repositorio-uapa.cuaed.unam.mx/repositorio/moodle/pluginfile.php/2835/mod_resource/content/1/UAPA-Geometria-Solar-Arquitectos/index.html
- Hafez, A. Z., Yousef, A. M., & Harag, N. M. (2018). Solar tracking systems: Technologies and trackers drive types—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 754–782.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.032>
- Sadeghi, R., Parenti, M., Memme, S., Fossa, M., & Morchio, S. (2025). A review and comparative analysis of solar tracking systems. *Energies*, 18(10), 2553.
<https://doi.org/10.3390/en18102553>

Arquitectura IIoT Escalable para la Gestión Basada en Datos del Sistema FV de la UNISTMO

ALAN LÓPEZ VILLEGAS^{1,*} | LILIANA HECHAVARRÍA DIFUR¹ | HUGO JORGE CORTINA MARRERO¹ | ADÁN ACOSTA BANDA² | GUADALUPE TOLEDO TOLEDO³

¹ División de Estudios de Posgrado, Universidad del Istmo, Campus Tehuantepec, Oaxaca, México.

² Ingeniería en Industrial, Universidad del Istmo, Campus Tehuantepec, Oaxaca México.

³ Ingeniería en Computación, Universidad del Istmo, Campus Tehuantepec, Oaxaca México.

* Correspondencia: contacto.revista@unistmo.edu.mx

Recibido: 14/06/2026

Revisado: 24/06/2026

Aceptado: 29/06/2026

Publicado: 08/07/2026

RESUMEN: En este trabajo se propone una arquitectura escalable basada en el Internet Industrial de las Cosas (IIoT) para la gestión de datos del sistema fotovoltaico de 163.2 kW instalado en la Universidad del Istmo (UNISTMO). La arquitectura integra cinco capas funcionales para la adquisición, transmisión, procesamiento y visualización de datos meteorológicos y eléctricos. Como parte de la estrategia de gestión de datos, se implementaron procesos ETL de ciencia de datos, técnicas de minería de datos y algoritmos de aprendizaje automático para la estimación de variables faltantes y la mejora de la calidad de la información. En la estimación de la temperatura del módulo fotovoltaico, el modelo híbrido basado en Machine Learning redujo el error absoluto medio (MAE) y la raíz del error cuadrático Medio (RMSE) en 47.7 % y 44.7 %, respectivamente. Asimismo, en la estimación de la irradiancia sobre superficie inclinada se observó que la regresión lineal calibrada con datos locales presentó el mejor desempeño. Los resultados demuestran que la arquitectura propuesta, como una arquitectura modular, constituye una alternativa efectiva, escalable y de bajo costo para el monitoreo y gestión basada en datos de sistemas fotovoltaicos.

ABSTRACT: This work proposes a scalable Industrial Internet of Things (IIoT)-based architecture for data management in the 163.2 kW photovoltaic system installed at the Universidad del Istmo (UNISTMO). The proposed architecture integrates five functional layers for the acquisition, transmission, processing, and visualization of meteorological and electrical data. As part of the data management strategy, ETL processes from data science, data mining techniques, and machine learning algorithms were implemented to estimate missing values and improve data quality. For photovoltaic module temperature estimation, the hybrid Machine Learning-based model reduced the MAE (Mean Absolute Error) and RMSE (Root Mean Square Error) by 47.7% and 44.7%, respectively. Likewise, in the estimation of irradiance on the tilted surface, locally calibrated linear regression showed the best performance. The results demonstrate that the proposed modular architecture constitutes an effective, scalable, and low-cost alternative for data-driven monitoring and management of photovoltaic systems.

Palabras clave: Internet Industrial de las Cosas (IIoT), Sistemas Fotovoltaicos; Minería de Datos, Aprendizaje Automático, Computación en el Borde (*Edge Computing*), Gestión Energética Basada en Datos.

1. INTRODUCCIÓN

La transición energética global hacia fuentes renovables ha posicionado a la generación fotovoltaica (PV) como un pilar fundamental para la descarbonización de las redes eléctricas. Sin embargo, el crecimiento de esta tecnología no solo implica la instalación de nuevos sistemas, sino

también la necesidad de garantizar su operación eficiente y estable a lo largo del tiempo (*International Energy Agency, 2023*).

En este contexto, el monitoreo de los sistemas fotovoltaicos juega un papel clave, ya que permite registrar variables meteorológicas y eléctricas, las cuales son fundamentales para evaluar su desempeño.

Un sistema de monitoreo adecuado no solo facilita la supervisión en tiempo real, sino que también permite detectar fallas, analizar el comportamiento del sistema y optimizar su funcionamiento (Ayaz et al., 2019).

No obstante, en muchos sistemas de mediana escala, como los instalados en instituciones educativas, la adquisición de datos presenta diversas limitaciones o problemas, tales como datos incompletos, errores de medición, retrasos en la transmisión de información y falta de integración entre diferentes fuentes, los cuales dificultan la obtención de información confiable. Estas deficiencias afectan directamente el análisis del desempeño del sistema, limitando la identificación de fallas y la toma de decisiones informadas para su mejora (Trillo-Montero et al., 2014).

Ante esta problemática, surge la necesidad de implementar soluciones tecnológicas que permitan una gestión más eficiente de los datos. En este contexto, el Internet Industrial de las Cosas (IIoT) representa una alternativa capaz de conectar sensores, dispositivos y sistemas para la adquisición, procesamiento y análisis de información en tiempo real, facilitando una gestión basada en datos (Rao et al., 2025). Esto contribuye a mejorar la eficiencia y confiabilidad del monitoreo de los sistemas fotovoltaicos, así como, implementar herramientas actuales.

En este trabajo se propone una arquitectura IIoT modular escalable para la gestión del sistema fotovoltaico de la Universidad del Istmo (UNISTMO) Figura 1, incorporando la ciencia de datos y técnicas de minería de datos en algoritmos de regresión con Machine Learning.



Figura 1. “Sistema Fotovoltaico” de la Universidad del Istmo Campus Tehuantepec, Oaxaca, México. Fuente. Fotografía tomada por el autor.

La infraestructura desarrollada permitirá mejorar los procesos de adquisición, almacenamiento y análisis

de datos, así como su conversión en información útil para la gestión energética y la toma de decisiones orientadas a la optimización del desempeño del sistema fotovoltaico. Asimismo, la arquitectura diseñada posee capacidad de escalabilidad, lo que facilita la incorporación futura de nuevos sensores, nuevas variables de monitoreo, mayor volumen de datos e incluso sistemas fotovoltaicos de mayor capacidad, sin alterar su estructura base (Afrin et al., 2025).

2. METODOLOGÍA

La metodología empleada se basó en el desarrollo de una arquitectura IIoT de cinco capas para la adquisición, transmisión, procesamiento y visualización de datos del sistema fotovoltaico de 163.2 kW instalado en la Universidad del Istmo. La arquitectura implementada se compone de cinco capas, las cuales se describen a continuación.

2.1. CAPA DE PERCEPCIÓN

Se instalaron sensores de radiación solar, temperatura del módulo y una estación meteorológica para la adquisición de variables ambientales y operativas del sistema fotovoltaico. Los datos fueron registrados mediante *Dataloggers* y sensores distribuidos estratégicamente en el arreglo fotovoltaico.

Los datos de radiación en la superficie horizontal, velocidad del viento, temperatura ambiente entre otras variables, fueron obtenidos de la estación meteorológica Vantage Pro2 con software WeatherLink 5.8.3 Davis Instruments, que permite conectar dispositivos meteorológicos a una PC para recopilar, visualizar y compartir archivos en tiempo real, Figura 2.



Figura 2. Estación Meteorológica Davis WeatherLink 5.8.3. Fuente. Fotografía tomada por el autor.

La temperatura del módulo fue obtenida con el sensor Temperature Meter 11.1.1.0 TM-747D, el cual es un termómetro digital de 4 canales, con capacidad de

registro de datos o *Datalogger*, diseñado especialmente para trabajar con diferentes tipos de termopares, Figura 3.



Figura 3. Sensor de Temperatura Meter 11.1.1.0 TM-747D. Fuente. Fotografía tomada por el autor.

La radiación en la superficie del módulo fue obtenida con el dispositivo V8.01 Solar Power Meter TEST-132, con *Datalogger*, que mide la potencia solar con amplio rango espectral, corrección cosenoidal (alta precisión angular) y excelente estabilidad a largo plazo. El sensor fue colocado con una desviación aproximada de 16° canalizando la misma orientación e inclinación de los módulos del arreglo FV, Figura 4.



Figura 4. Sensor de Radiación V8.01 Solar Power Meter TEST-132. Fuente. Fotografía tomada por el autor.

Las variables eléctricas del sistema fotovoltaico se recopilaban a través de la plataforma oficial de Fronius (<https://www.solarweb.com/>), Figura 5, y se estableció una sincronización temporal con los datos meteorológicos en intervalos de cinco minutos. Los sensores empleados cumplen con adecuados estándares de calidad prescritos para la evaluación técnica del rendimiento de arreglos fotovoltaicos.

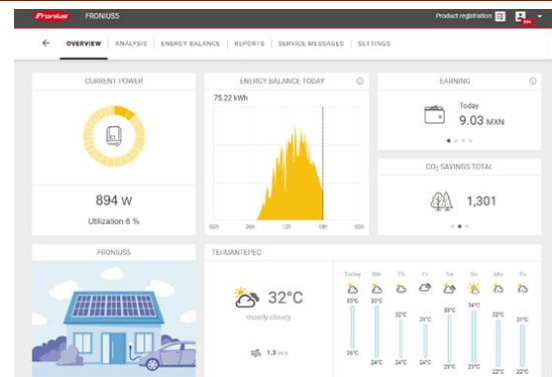


Figura 5. Captura de Pantalla en la plataforma Fronius del Inversor 5 en el Sistema FV de la UNISTMO.

2.2. CAPA DE TRANSPORTE

La comunicación entre los dispositivos y el sistema de monitoreo se realizó mediante una red inalámbrica basada en señal inalámbrica 2.4 Ghz (*Radio*), un *router* configurado como punto de acceso y un enlace asíncrono, permitiendo la transmisión de datos hacia una computadora la cual funciona como *Gateway* Figura 6, Asimismo, se integraron los inversores Fronius mediante conexiones Ethernet y *Wi-Fi* dentro de esta *LAN* interconectada públicamente (Internet).



Figura 6. Equipo de cómputo funcionando como Gateway, con intervención en el borde, en la caseta de inversores de la UNISTMO Campus Tehuantepec. Fuente. Fotografía tomada por el autor.

2.3. Capa de procesamiento en el borde (Edge Computing)

Los datos adquiridos fueron almacenados y preprocesados localmente en el Gateway, mediante scripts de código Python y batch (archivo de lotes) en el sistema operativo Windows. En esta etapa se realizaron tareas de organización, limpieza y estructuración de datos (Ingeniería de características), utilizando la técnica de regresión en minería de datos, apoyado de librerías como Pandas y Scikit-learn (organización de macros), posteriormente fueron respaldados automáticamente en la nube de Google Drive.

En esta etapa, las macros (hojas de cálculo de Google) contienen datos ordenados en función del tiempo, clasificados por dispositivo de adquisición de datos (sensor temperatura del módulo, radiación sobre la superficie del módulo, inversor (IoT-Fronius), y estación meteorológica). De acuerdo con Dasu y Johnson (2003), una parte fundamental del éxito en los proyectos de ciencia de datos depende de las etapas iniciales de preparación de los datos e ingeniería de características (feature engineering), mientras que la selección del algoritmo de aprendizaje constituye una etapa posterior del proceso. En este sentido, la organización, depuración y transformación adecuada de los datos resultan esenciales para obtener modelos predictivos confiables. (Dasu & Johnson, 2003)

2.4. Capa de procesamiento en la nube.

Los datos almacenados en la nube fueron procesados mediante Google Colab (Python 3.4) para la implementación de técnicas de minería de datos, preprocesamiento (ingeniería de características) y algoritmos de regresión (machine learning). Esta etapa permitió desarrollar procesos y archivos crudos en la capa ETL (Extracción, Transformación y carga) de la ciencia de datos, detectar anomalías y outliers, es decir, huecos de lectura debido a variantes eléctricas o de hardware. En esta etapa se realizó la estimación de valores de temperatura del módulo y radiación en la superficie inclinada, para completar vacíos o huecos de lectura de ambos sensores.

La temperatura del módulo fue estimada mediante la Ec. (1), empleando un modelo de temperatura que incluye efectos de la velocidad del viento, y que fue desarrollado para regiones con velocidades de viento promedios $\geq 1\text{m/s}$ (Skoplaki et al., 2009). Para su estimación se emplearon datos reales medidos por los sensores de radiación en la superficie del módulo, la temperatura ambiente y la velocidad del viento. También se emplearon los algoritmos de aprendizaje profundo para reducir el error en la estimación de la temperatura del módulo.

$$T_m = T_a \left[\frac{0.25}{5.7 + 3.8v_w} \right] \cdot G \quad (1)$$

Donde T_m es la temperatura del Módulo, T_a es la temperatura ambiente, G es la irradiancia en la superficie del módulo y v_w es la velocidad del viento paralelo a la superficie del módulo

La estimación de los valores de radiación en la superficie del módulo, se realizó a partir de la radiación en la superficie horizontal, mediante un modelo de regresión lineal para estimación de

radiación en la superficie inclinada 16° , Ec. (2), y mediante el modelo de anisotrópico de Hay-Davis, Ec. (3), (Duffie & Beckman, 2013)

$$G_{inclinada} = \beta_0 + \beta_1 G_{horizontal} + \epsilon \quad (2)$$

Donde $G_{inclinada}$ es la radiación incidente en la superficie del módulo fotovoltaico, $G_{horizontal}$ corresponde a la radiación en la superficie horizontal, medida con la Estación Meteorológica, β_0 (en W/m^2) es el desplazamiento vertical de la recta o intercepto en el gráfico de regresión lineal y β_1 es la razón de cambio o pendiente de la recta. ϵ , es el error entre datos reales y estimados. El modelo anisotrópico de Hay-Davis permite determinar la radiación en superficie inclinada:

$$G_{inclinada} = (G_b + G_d A_i) R_b + G_d (1 - A_i) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + G \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (3)$$

Donde G_b es la radiación directa en la superficie horizontal, G_d es la radiación difusa en la superficie horizontal, G es la radiación global (directa + difusa) en la superficie horizontal R_b es el factor de corrección geométrica que relaciona la radiación directa en la superficie horizontal y en la superficie inclinada. A_i es el índice anisotrópico, o fracción de la radiación directa con respecto a la radiación extraterrestre. Los términos $\left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right)$ y $\left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$ son los factores de vista al cielo y de vista al suelo respectivamente y ρ_g es la reflectividad del suelo.

2.5. Capa de aplicación.

Finalmente, la información procesada puede ser consultada mediante una Aplicación Móvil diseñada en App Sheet de Google y un acceso compartido en Google Drive a una carpeta con los datos crudos, permitiendo la generación de reportes, gráficas interactivas y paneles de monitoreo para apoyar la supervisión y gestión energética del sistema fotovoltaico.

3. RESULTADOS

3.1 ESTIMACIÓN DE LA TEMPERATURA DEL MÓDULO (T_m)

La aplicación de los algoritmos integrados en la capa de Procesamiento en la Nube, tuvo como objetivo optimizar la precisión en la estimación de la temperatura del módulo (T_m) y de la radiación en la superficie del módulo ($G_{Inclinada}$). Primeramente, se estimó la temperatura del módulo ejecutando

solamente un proceso en el código Python, empleando la Ec. (1).

La Figura 7 presenta la comparación entre la temperatura del módulo medida experimentalmente y la estimada mediante el modelo físico propuesto por Skoplaki et al. Se observa que el modelo reproduce la tendencia general de la temperatura del módulo a lo largo del día, e identifica los periodos de calentamiento durante la mañana, el máximo valor alrededor del mediodía y el posterior enfriamiento en las horas de la tarde. Sin embargo, durante las horas de mayor irradiancia se muestran discrepancias importantes entre los valores calculados y medidos.

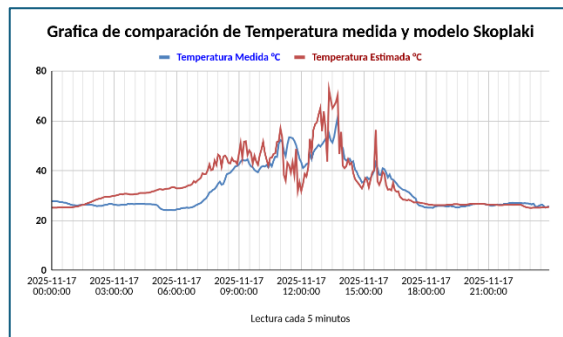


Figura 7. Comparación entre la temperatura del módulo estimada con la ecuación Ec. (1) y la medida por el sensor, el día 17 de noviembre del 2025.

La Figura 8 muestra la correlación entre los valores medidos y calculados mediante el modelo de Skoplaki, para la cual se obtiene un coeficiente de determinación de $R^2=0.734$, lo que indica que el modelo explica aproximadamente el 73 % de la variabilidad observada en la temperatura del módulo. Aunque el modelo reproduce adecuadamente la tendencia general de la temperatura del módulo, presenta limitaciones que pueden relacionarse al uso de coeficientes empíricos obtenidos bajo condiciones experimentales distintas a las del sitio de estudio. Además, al tratarse de un modelo estacionario, no considera efectos dinámicos relacionados con la inercia térmica del módulo, por lo que no logra representar completamente los procesos de calentamiento y enfriamiento que ocurren bajo condiciones reales de operación. Estas limitaciones explican parte de las discrepancias observadas entre los valores estimados y medidos experimentalmente.

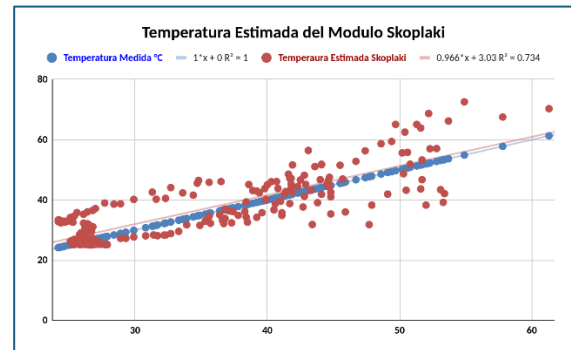


Figura 8. Correlación entre valores de la temperatura del módulo medida y estimada con la ecuación Ec. (1), para el día 17 de noviembre del 2025.

Con el propósito de reducir las limitaciones del modelo físico de Skoplaki, se implementó una técnica de minería de datos mediante un algoritmo de aprendizaje automático basado en regresión lineal para desarrollar un modelo predictivo. Como parte del proceso de entrenamiento, la temperatura estimada mediante el modelo de Skoplaki fue incorporada como una variable adicional de entrada.

De esta manera, el modelo entrenado utilizó como variables predictoras la irradiancia incidente sobre la superficie inclinada, la temperatura ambiente, la velocidad del viento y la temperatura calculada por el modelo físico. Las estimaciones generadas fueron comparadas con los valores reales de temperatura medidos en el módulo fotovoltaico, permitiendo que el algoritmo aprendiera las desviaciones sistemáticas existentes entre el modelo teórico y el comportamiento observado experimentalmente.

Como resultado, se generó una nueva variable predictiva basada en una estrategia de ingeniería de características (feature engineering), en la cual la estimación física proporcionada por el modelo de Skoplaki se combinó con información experimental del sitio para mejorar la precisión de las estimaciones. Este enfoque permitió desarrollar un modelo híbrido físico–basado en datos, capaz de corregir parcialmente las limitaciones del modelo original y adaptarlo a las condiciones particulares de operación del sistema fotovoltaico de la UNISTMO. El flujo completo de procesamiento de datos implementado en la arquitectura propuesta se presenta en la Figura 9.

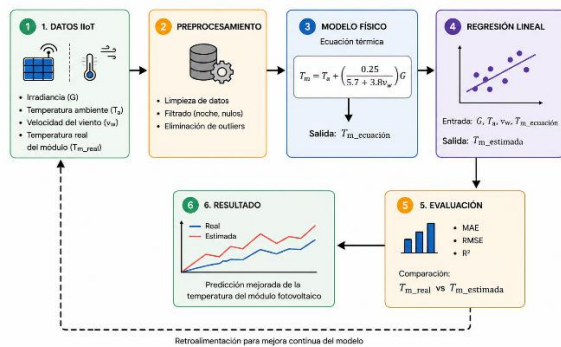


Figura 9. Algoritmo de ML para predicción de temperatura del módulo.

La Figura 10 presenta la comparación entre la temperatura del módulo medida experimentalmente, la estimada mediante el modelo físico de Skoplaki y la obtenida mediante el modelo de regresión lineal entrenado mediante técnicas de minería de datos a partir de los resultados del modelo físico. Los resultados muestran que el modelo entrenado logra seguir más de cerca la evolución en el tiempo de la temperatura real del módulo, reduciendo las sobreestimaciones y suavizando las fluctuaciones observadas en el modelo físico original.

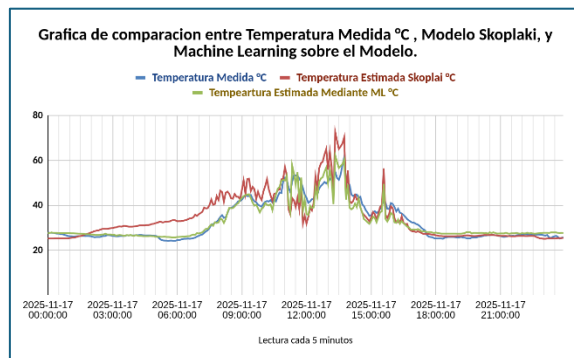


Figura 10. Comparación entre la temperatura del módulo estimada con la ecuación Ec. (1), la generada por el algoritmo de ML y la medida por el sensor, el día 17 de noviembre del 2025.

La Figura 11 muestra la correlación entre la temperatura del módulo medida experimentalmente y la temperatura estimada mediante el modelo de aprendizaje automático. Los resultados evidencian una mejora significativa respecto al modelo físico de Skoplaki, obteniéndose un coeficiente de determinación de $R^2=0.905$.

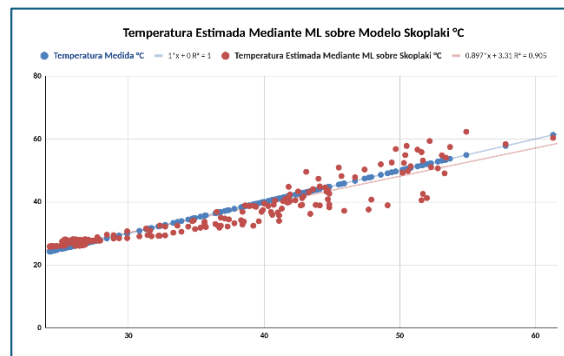


Figura 11. Correlación entre valores de la temperatura del módulo medida y estimada por el algoritmo ML, para el día 17 de noviembre del 2025.

La Tabla 1 presenta una comparación de los parámetros estadísticos entre el modelo físico de Skoplaki y el modelo entrenado con las estimaciones del modelo Skoplaki.

Tabla 1. Parámetros estadísticos comparativos entre los modelos de determinación de la temperatura del módulo.

Modelo de Tm	MAE	RMSE	R ²
Modelo Skoplaki	4.0573 °C	5.5727 °C	0.734
Algoritmo ML (modelo entrenado)	2.1241 °C	3.0895 °C	0.905

Como se observa, el error absoluto medio (MAE) disminuyó de 4.05 °C a 2.12 °C, mientras que el error cuadrático medio (RMSE) se redujo de 5.57 °C a 3.08 °C, con el uso del algoritmo ML. Estas reducciones representan mejoras aproximadas del 47.65 y 44.70 % respectivamente, lo que demuestra que el algoritmo fue capaz de corregir una parte importante de las discrepancias presentes en el modelo físico original.

Los resultados obtenidos sugieren que la incorporación de técnicas de minería de datos, como algoritmos de regresión para aprendizaje automático, permite adaptar el modelo a las condiciones específicas de operación del sistema fotovoltaico, mejorando la precisión de las estimaciones de temperatura del módulo y proporcionando información más confiable para el análisis de desempeño del sistema.

3.2. ESTIMACIÓN DE LA IRRADIANCIA INCLINADA ($G_{INCLINADA}$)

La radiación en la superficie del módulo fotovoltaico fue estimada de dos maneras: 1) empleando un modelo de regresión lineal simple basado en el método matemático de mínimos cuadrados ordinarios

y 2) empleando el modelo anisotrópico propuesto por Hay- Davis (Duffie & Beckman, 2013).

Inicialmente, el algoritmo desarrollado en Python ejecutó las etapas de preprocesamiento de datos, consideradas fundamentales dentro del flujo de trabajo de la ciencia de datos y previas al proceso de minería de datos (Dasu & Johnson, 2003). Estas tareas incluyeron la lectura del archivo experimental, la conversión de variables a formato numérico, la eliminación de valores nulos, el ordenamiento cronológico de los registros y el filtrado de los datos correspondientes al periodo nocturno.

Posteriormente, se estableció una relación entre la radiación solar medida sobre la superficie horizontal y la radiación incidente sobre la superficie inclinada del módulo fotovoltaico. Para ello, se aplicó un análisis de regresión lineal utilizando los datos experimentales disponibles, y se obtuvo el modelo matemático para estimar la irradiancia sobre la superficie inclinada a partir de la irradiancia horizontal, Ec. (2).

El algoritmo desarrollado en Python se describe en la Figura 12. En esta etapa solo se realizó el ajuste lineal clásico basado en mínimos cuadrados ordinarios aplicado sobre datos experimentales reales de la estación meteorológica.

En la Figura 13, se muestra una comparación entre la radiación en la superficie inclinada medida y estimada por regresión lineal, para un día con irradiancia irregular. Como puede observarse, el modelo de regresión lineal reproduce bastante bien los incrementos y disminuciones de la irradiancia.

ALGORITMO: REGRESIÓN LINEAL POR MÍNIMOS CUADRADOS Estimación de radiación inclinada a partir de radiación horizontal

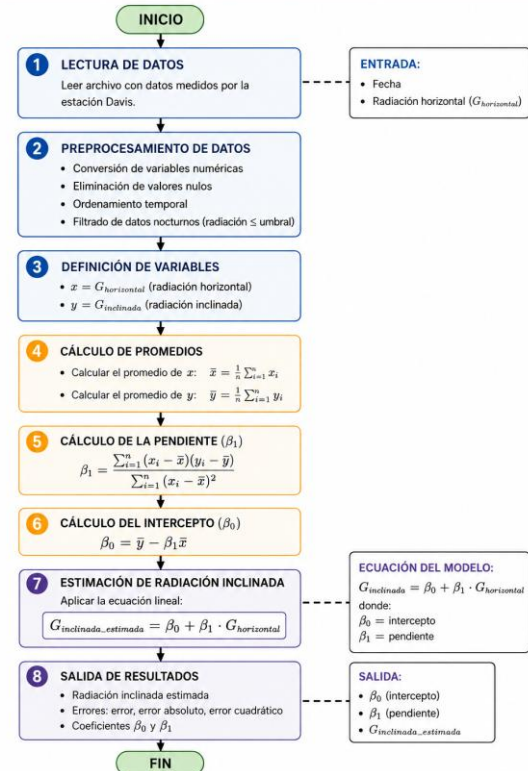


Figura 12. Algoritmo para determinar la irradiancia en superficie inclinada a partir del modelo de regresión lineal, basado en el método matemático de mínimos cuadrados.

Los errores aparecen principalmente en los máximos valores de irradiancia, y no se observa desplazamiento temporal significativo. El error absoluto (MAE) y el error medio cuadrático (RSME), así como, el coeficiente de determinación (R^2) para este modelo se muestran en la Tabla 2. Se observó un error en promedio 83.567W/m², el RSME fue de 138.89 W/m², tampoco significativo, y debido fundamentalmente a la nubosidad.

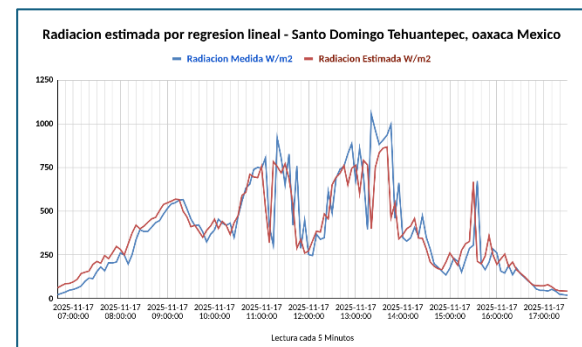


Figura 13. Comparación entre radiación medida y la estimada con la ecuación Ec. (2), para el día 17 de noviembre del 2025.

De igual modo, se realizó la estimación de valores de radiación en la superficie inclinada, a partir de la radiación en la superficie horizontal, ahora mediante el modelo físico anisotrópico, propuesto por Hay-Davis, *Ec. (3)*. La *Figura 14* muestra el algoritmo usado para determinarla.

En la *Figura 15* se compara la radiación medida y estimada por el modelo, para un día de radiación irregular. Los errores estimados y el coeficiente de determinación, obtenidos para este modelo se muestran en la *Tabla 2*.

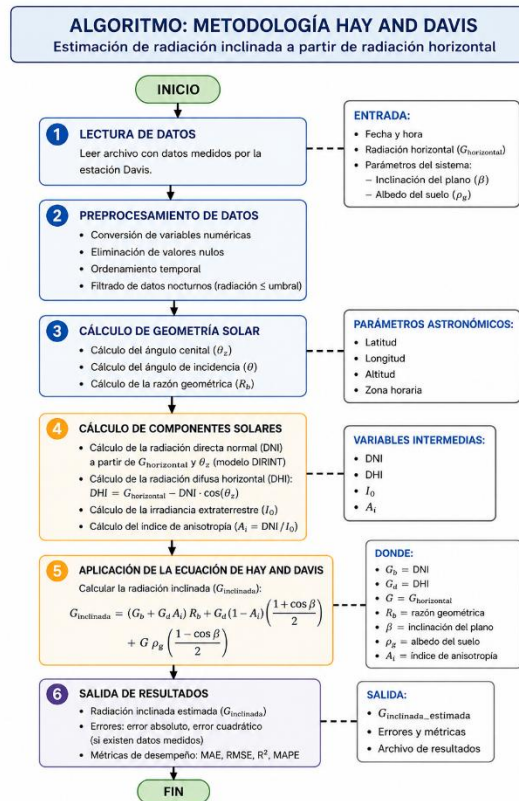


Figura 14. Algoritmo para la estimación de la radiación en el plano inclinado, basado en el modelo de Hay-Davis.

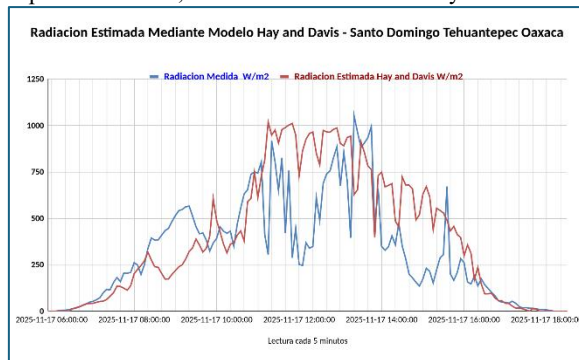


Figura 15. Comparación entre radiación medida y la estimada con la ecuación *Ec. (3)*, para el día 17 de noviembre del 2025.

Como se observa, aunque el modelo anisotrópico representa de forma general el comportamiento de la irradiancia en el día, este tiene peor resultado, probablemente debido a que requiere la estimación previa de las componentes difusa y directa de la radiación solar a partir de la irradiancia global horizontal, lo que introduce incertidumbres adicionales que afectan la precisión de las predicciones.

El modelo basado en regresión lineal mostró una mejor concordancia con los datos experimentales, especialmente durante los periodos de variación rápida de la irradiancia debido a la nubosidad variable. El modelo de regresión muestra menor MAE, menor RMSE y mayor R^2 , como se muestra en la *Tabla 2*. La regresión lineal logró reproducir con mayor precisión tanto la magnitud como la variabilidad temporal de la irradiancia medida sobre la superficie inclinada. El mejor desempeño puede atribuirse a que el modelo fue calibrado utilizando datos experimentales obtenidos directamente en el sitio de estudio, permitiendo incorporar de forma implícita las características atmosféricas locales.

Tabla 2. Parámetros estadísticos comparativos entre los modelos de determinación de la radiación en superficie inclinada, por modelo de regresión lineal y modelo Hay-Davis, día 17 de noviembre del 2025.

Modelo	MAE	RMSE	R^2
Regresión Lineal	83.567W/m2	138.8994	0.7102
Modelo Hay - Davis	166.3147 W/m2	240.9847 W/m2	0.2046

Con el objetivo de mejorar los resultados del modelo anisotrópico, se entrenó el algoritmo ML de regresión, tomando como datos de entrada, la radiación calculada con el modelo anisotrópico y se desarrolló un modelo híbrido físico–basado en datos (Hay-Davis y técnicas de aprendizaje automático), similar al desarrollado para estimar la temperatura del módulo. El algoritmo ML, utilizó estas variables para aprender las desviaciones entre el modelo físico y las mediciones reales y corrigió las estimaciones físicas originales. La *Figura 16* muestra la comparación entre los valores de irradiancia medidos y estimados por el modelo híbrido (algoritmo ML), empleando los datos del modelo anisotrópico.

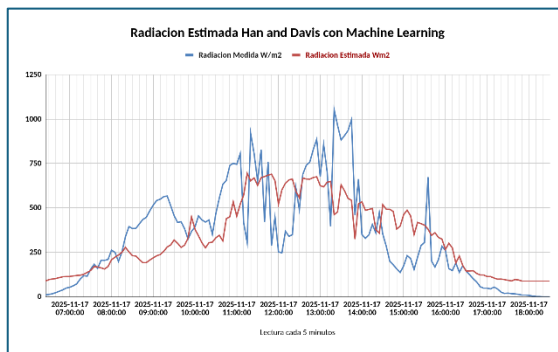


Figura 16. Comparación entre radiación medida y la estimada con el algoritmo ML, para el día 17 de noviembre del 2025.

Puede observarse que identifica los periodos del día de aumento y disminución de la irradiancia, reproduce los valores máximos cercanos al medio día, reduce un poco las discrepancias del modelo original.

La **Tabla 3** muestra los resultados comparativos en los errores y coeficiente de determinación. Los resultados muestran una mejora importante en el desempeño del modelo entrenado, reflejada en el incremento del coeficiente de determinación de $R^2=0.2046$ a $R^2=0.5731$, lo que significa que el modelo incrementó un 37 % la capacidad de explicar la variabilidad observada.

Tabla 3. Parámetros estadísticos comparativos entre los modelos de determinación de la radiación en superficie inclinada, modelo Hay- Davis y modelo del algoritmo ML, día 17 de noviembre del 2025.

Modelo	MAE	RMSE	R^2
Modelo Hay - Davis	166.3147 W/m2	240.9847 W/m2	0.2046
Algoritmo ML (modelo entrenado)	133.8893 W/m2	164.1381 W/m2	0.5731

Asimismo, el MAE disminuyó de 166.31 W/m² a 133.89 W/m², mientras que el RMSE se redujo de 240.98 W/m² a 164.14 W/m². Las reducciones representan mejoras aproximadas del 19.5 y 31.89 % respectivamente, esto refleja que el algoritmo mejoró la precisión promedio de las estimaciones y redujo los errores de mayor magnitud. No obstante, aunque el modelo híbrido mostró un desempeño superior al modelo físico de Hay-Davies, la regresión lineal presentó una mejor capacidad para reproducir el comportamiento de la irradiancia sobre la superficie inclinada del módulo bajo las condiciones específicas analizadas en este estudio.

La **Figura 17** muestra la comparación de la irradiancia medida y estimada por el modelo de regresión lineal, para un día despejado, es decir la irradiancia regular durante todo el día.

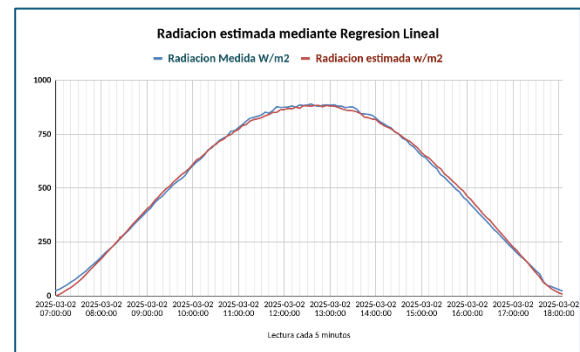


Figura 17. Comparación entre radiación medida y la estimada con la ecuación Ec. (2), para el día 02 de marzo del 2025.

La **Figura 18** muestra la comparación de la irradiancia medida y estimada por el modelo anisotrópico, para un día despejado, es decir la irradiancia regular durante todo el día. Como puede observarse de las **Figuras 17 y 18**, ambos modelos reproducen adecuadamente la tendencia general de la irradiancia incidente sobre el plano inclinado; sin embargo, la regresión lineal mostró nuevamente un desempeño notablemente superior, con un coeficiente de determinación $R^2=0.9979$, con respecto a $R^2=0.8956$ del modelo Hay-Davis. De igual modo, los valores de MAE y RMSE fueron menores.

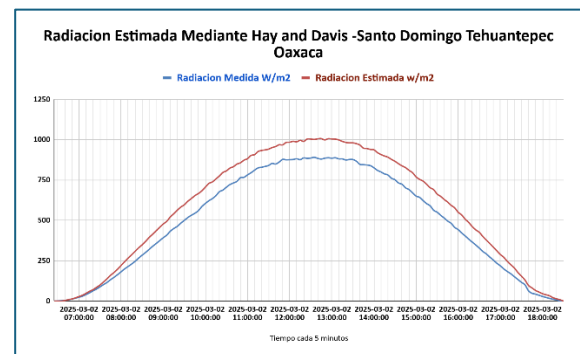


Figura 18. Comparación entre radiación medida y la estimada con la ecuación Ec. (3), para el día 02 de marzo del 2025.

En la **Tabla 4** se resumen los indicadores estadísticos obtenidos de la regresión lineal en ambos resultados.

Puede notarse que el modelo de Hay-Davis arrojó mejores resultados para el día despejado, comparado con el día de irradiancia irregular (ver **Figuras 15 y 18**), con mejoras significativas de $R^2=0.2046$ a $R^2=0.8956$. Este resultado refleja que este modelo representa mucho mejor la variabilidad temporal de la irradiancia cuando las condiciones climatológicas son estables. No obstante, en ambos días, el modelo tiende a sobreestimar los valores de irradiancia incidente sobre la superficie inclinada, tanto en días despejados como en días con irradiancia variable, especialmente durante las horas cercanas al mediodía.

solar. Este comportamiento pudiera deberse a un sesgo positivo asociado a la estimación de las componentes directa y difusa de la radiación solar, así como a las simplificaciones inherentes al propio modelo.

Tabla 4. Parámetros estadísticos comparativos entre los modelos de determinación de la radiación en superficie inclinada, por modelo de regresión lineal y modelo Hay-Davis, día 02 de marzo del 2025.

Modelo	MAE	RMSE	R ²
Regresión	11.2642W/m ²	13.2743 W/m ²	0.9979
Hay - Davis	87.5978W/m ²	93.901W/m ²	0.8956

4.3. CAPA DE APLICACIÓN VISUALIZACIÓN DE LOS RESULTADOS(FRONTEND).

La visualización de todos los datos de los sensores (radiación, temperatura, estación meteorológica y datos eléctricos del sistema FV de la UNISTMO) se lleva a cabo mediante App Sheets de Google, lo que permite consultar, descargar, comparar y realizar comentarios sobre los datos. Mediante la aplicación móvil desarrollada, es posible también obtener gráficos de comportamiento de las variables de interés, tal como se muestra en la [Figura 19](#), [Figura 20](#).

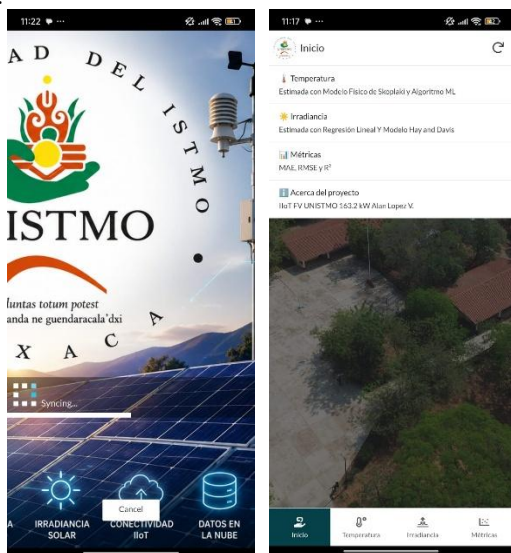


Figura 19. Capturas de pantalla en App sheet IIoT UNISTMO para visualización de datos y su procesamiento, de las variables meteorológicas en el Sistema FV de la UNISTMO.

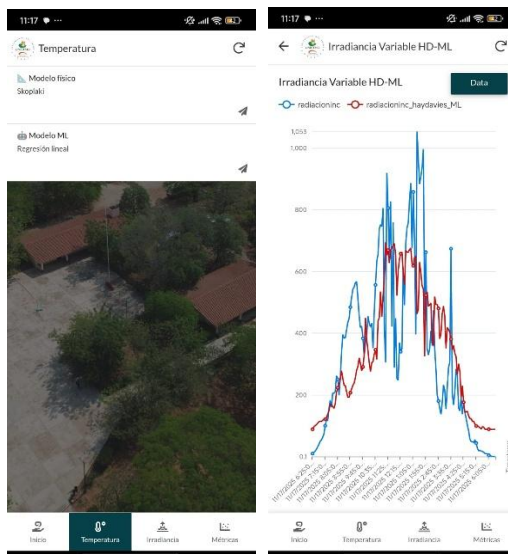


Figura 20. Capturas de pantalla en App sheet IIoT UNISTMO para visualización de datos y su procesamiento, de las variables meteorológicas en el Sistema FV de la UNISTMO.

Si bien esta aplicación facilita un acceso interactivo y móvil, es fundamental destacar que las hojas de cálculo son el resultado de complejos procesos de modelado, extracción, transformación y carga (Backend). Este proceso se ejecuta mediante algoritmos en la nube y en la capa de borde (el Gateway/PC local de la UNISTMO), el cual realiza una lectura constante de los datos de los sensores instalados en el sistema fotovoltaico de 163.2 kW para generar las capturas de resultados finales.

4.4. IIOT ESCALABLE DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO DE LA UNISTMO.

En la [Figura 21](#), presenta la arquitectura IIoT modular escalable desarrollada para la gestión de datos del sistema fotovoltaico de 163.2 kW de la Universidad del Istmo (UNISTMO). La arquitectura integra los principales elementos involucrados en la adquisición, transmisión, procesamiento, almacenamiento y visualización de la información generada por el sistema fotovoltaico.

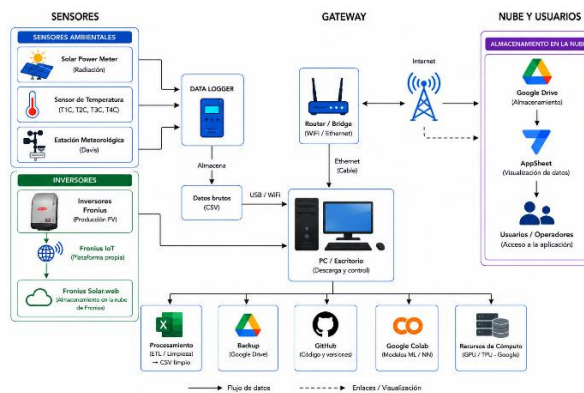


Figura 21. Arquitectura modular escalable IIoT para la gestión de datos de la Universidad del Istmo campus Tehuantepec en el sistema fotovoltaico de 163.2KW.

En la capa de percepción se encuentran los sensores encargados de medir las variables meteorológicas y operativas del sistema. Asimismo, se incorporan los datos eléctricos provenientes de los inversores Fronius mediante la plataforma Solar.web. Toda la información es recopilada mediante dispositivos datalogger y transmitida hacia un Gateway local.

El Gateway, implementado mediante una computadora de escritorio y un router configurado como puente de comunicación, constituye la capa de procesamiento en el borde (*Edge Computing*). En esta capa adquieren, sincronizan, organizan, filtran y respaldan datos. Posteriormente, la información es almacenada en Google Drive y procesada mediante herramientas desarrolladas en Python, empleando librerías especializadas para minería de datos, procesos ETL de ciencia de datos y algoritmos de aprendizaje automático ejecutados en Google Colab.

Los modelos implementados permiten estimar variables faltantes, detectar anomalías y mejorar la calidad de los datos utilizados para el análisis del desempeño del sistema fotovoltaico. Finalmente, los resultados son publicados en una aplicación desarrollada mediante AppSheet, proporcionando acceso remoto a gráficos, reportes e indicadores operativos para usuarios e investigadores.

Una de las principales ventajas de la arquitectura propuesta es su carácter escalable modular, ya que permite incorporar nuevos sensores, nuevas variables de monitoreo e incluso sistemas fotovoltaicos de mayor capacidad sin modificar la estructura funcional de las cinco capas propuestas. Es decir, la escalabilidad se refiere a la capacidad de ampliar progresivamente el sistema mediante la incorporación de nuevos dispositivos y mayores volúmenes de datos, utilizando la misma arquitectura de adquisición, procesamiento y visualización de datos.

5. CONCLUSIONES

Se diseñó e implementó una arquitectura modular escalable IIoT para la adquisición, almacenamiento, procesamiento y visualización de datos de un sistema fotovoltaico de 163.2 kW instalado en la Universidad del Istmo. La arquitectura desarrollada integra sensores meteorológicos y eléctricos, procesamiento en el borde, almacenamiento en la nube y herramientas de análisis basadas en técnicas de preprocesamiento e ingeniería de características básicas en la ciencia de datos para aplicar técnicas de minería de datos y aprendizaje automático, permitiendo una gestión eficiente de la información generada por el sistema.

Los resultados obtenidos demostraron que incorporar algoritmos de entrenamiento (ML) mejora significativamente la estimación de la temperatura del módulo fotovoltaico. El modelo híbrido desarrollado a partir del modelo físico de Skoplaki redujo el MAE en un 47.7 % y el RMSE en un 44.7 %, incrementando el coeficiente de determinación de 0.734 a 0.905.

En la estimación de la irradiancia sobre la superficie inclinada, la regresión lineal calibrada con datos experimentales locales presentó el mejor desempeño tanto para condiciones de irradiancia variable como para días despejados. Por su parte, el modelo anisotrópico de Hay-Davies mostró una tendencia sistemática a sobreestimar la irradiancia incidente sobre el plano inclinado. La incorporación de técnicas de aprendizaje automático permitió reducir parcialmente este sesgo, logrando mejoras del 19.5 % en el MAE y del 31.9 % en el RMSE respecto al modelo físico original.

Los resultados evidencian que la combinación de modelos físicos y técnicas de aprendizaje automático constituye una estrategia efectiva para mejorar la calidad y confiabilidad de los datos utilizados en el monitoreo de sistemas fotovoltaicos. Asimismo, la arquitectura propuesta facilita la incorporación futura de nuevos sensores y funcionalidades sin modificar su estructura principal, lo que garantiza su escalabilidad y adaptabilidad para aplicaciones de investigación y gestión de la energía.

Se concluye que la integración de arquitecturas modulares de IIoT, procesos ETL y herramientas de análisis basadas en datos representa una alternativa robusta para fortalecer el monitoreo, diagnóstico y evaluación del desempeño de sistemas fotovoltaicos en instituciones educativas y centros de investigación.

Finalmente, se considerará para trabajos futuros la incorporación de modelos basados en redes neuronales, como línea de investigación de gran interés para el desarrollo de algoritmos híbridos físicos-basados en datos.

AGRADECIMIENTOS

El autor Alan López Villegas expresa su agradecimiento a la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación por la beca otorgada para poder cubrir el presente trabajo de investigación.

DECLARACIONES

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.
Los autores declaran el uso de herramientas de Inteligencia artificial generativa en la elaboración del manuscrito, conforme a los lineamientos de la revista.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.04.009>

Trillo-Montero, D., Santiago, I., Luna-Rodríguez, J. J., & Real-Calvo, R. (2014). Development of a software application to evaluate the performance and energy losses of grid-connected photovoltaic systems. *Energy Conversion and Management*, 81, 144–159. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.02.026>

REFERENCIAS

- Afrin, S., Rafa, S. J., Kabir, M., Farah, T., Alam, M. S. B., Lameesa, A., Ahmed, S. F., & Gandomi, A. H. (2025). Industrial Internet of Things: Implementations, challenges, and potential solutions across various industries. *Computers in Industry*, 170, 104317. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2025.104317>
- Ayaz, M., Ammad-Uddin, M., Sharif, Z., Mansour, A., & Aggoune, E.-H. M. (2019). Internet-of-Things (IoT)-based smart agriculture: Toward making the fields talk. *IEEE Access*, 7, 129551–129583. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2932609>
- Dasu, T., & Johnson, T. (2003). *Exploratory data mining and data cleaning*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/0471448354>
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes* (4th ed.). Wiley.
- International Energy Agency. (2023). *World energy outlook 2023*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
- Rao, C. K., Sahoo, S. K., & Yanine, F. F. (2025). A comprehensive review of smart energy management systems for photovoltaic power generation utilizing the Internet of Things. *Unconventional Resources*, 7, 100197. <https://doi.org/10.1016/j.uncres.2025.100197>
- Skoplaki, E., & Palyvos, J. A. (2009). Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations. *Renewable Energy*, 34(1), 23–29.

Análisis comparativo del desempeño de un convertidor buck bajo esquemas de control proporcional, integral y derivativo

IVANNA BAÑOS MATUS^{1,*} | ADAN ACOSTA BANDA² | EDUARDO CAMPOS MERCADO³

¹ División de Estudios de Posgrado, Universidad del Istmo, Campus Tehuantepec, Oaxaca, México.

² Ingeniería Industrial, Universidad del Istmo, Campus Tehuantepec, Oaxaca, México.

³ SECIHTI-Universidad del Istmo, Campus Tehuantepec, Oaxaca, México.

* Correspondencia: ivannabanos15@gmail.com

Recibido: 15/06/2026

Revisado: 25/06/2026

Aceptado: 02/07/2026

Publicado: 08/07/2026

RESUMEN: En este trabajo se analiza el comportamiento de un convertidor reductor (*buck*) implementando las acciones de control proporcional (*P*), integral (*I*) y derivativa (*D*), de forma combinada y en conjunto en un esquema *PID* clásico. El objetivo es evaluar su capacidad para regular el voltaje de salida frente a las variaciones de fuentes renovables, como la energía eólica. Utilizando el toolbox *Simscape Electrical* en MATLAB/Simulink, se simuló el sistema en lazo cerrado bajo condiciones nominales e ideales y bajo un escenario crítico con voltaje de entrada variable que emula variaciones en la velocidad del viento. Los resultados muestran que los esquemas *P* y *PD* son insuficientes por sus sobreimpulsos o errores en estado estacionario. En cambio, la sintonización completa del controlador *PID* mitiga las oscilaciones transitorias y disminuye el error en estado estacionario.

ABSTRACT: This work analyzes the behavior of a buck converter by implementing proportional (*P*), integral (*I*), and derivative (*D*) control actions, both combined and together in a classic *PID* scheme. The objective is to evaluate its ability to regulate the output voltage against variations in renewable sources, such as wind energy. Using the toolbox *Simscape Electrical* in MATLAB/Simulink, the closed-loop system was simulated under nominal and ideal conditions, as well as under a critical scenario with a variable input voltage that emulates variations in wind speed. The results show that the *P* and *PD* schemes are insufficient due to their overshoots or steady-state errors. In contrast, full *PID* tuning mitigates transient oscillations and decreases the steady-state error.

Palabras clave: Control PID, Convertidor reductor, Energía Eólica, Simulación

1. INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la electrónica de potencia, los convertidores *CC-CC* desempeñan un papel fundamental debido a su capacidad para transformar y adaptar niveles de voltaje de manera altamente eficiente. Entre las diversas topologías existentes, el convertidor reductor (*buck*) es ampliamente utilizado en aplicaciones industriales y de energías renovables, como la generación eólica, gracias a su simplicidad estructural y su efectividad para disminuir un voltaje de entrada hacia un nivel inferior requerido por la carga (Abaali, 2015).

Sin embargo, debido a la naturaleza cambiante del viento, los sistemas de energía eólica presentan un comportamiento inestable. Esto causa variaciones directas en el voltaje generado y pone en riesgo el funcionamiento del sistema. Por esta razón, es

totalmente necesario usar acciones de control que ayuden a mantener el voltaje de salida regulado, sin verse afectado por las variaciones en la velocidad del viento (Hussain et al., 2019).

El algoritmo de control proporcional-integral-derivativo (*PID*) sigue siendo la estrategia más difundida en la industria debido a su facilidad de implementación y efectividad (Rajamani et al., 2023). Cada una de sus acciones de control posee características particulares: la acción proporcional aporta velocidad de respuesta, la acción integral elimina el error en estado estacionario y la acción derivativa contribuye a amortiguar el comportamiento transitorio.

En la Figura 1 se ilustra el proceso de conversión de energía eólica para su aprovechamiento. Primero, la energía trifásica y variable del aerogenerador es

transformada en corriente continua (CC) mediante un rectificador. Posteriormente, un convertidor regula el voltaje. Finalmente, un inversor convierte la energía estabilizada nuevamente en corriente alterna (CA) con frecuencia y voltaje regulados, dejándola lista para alimentar el panel de cargas.

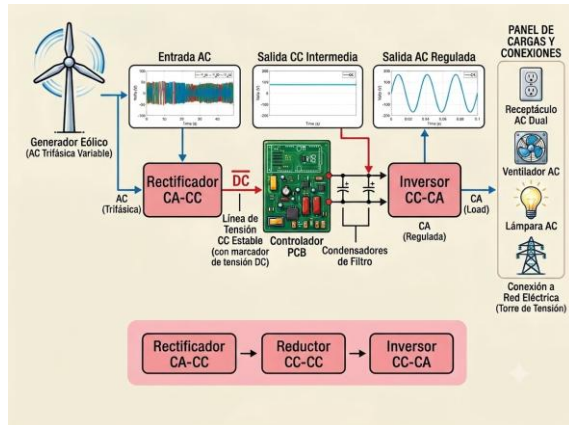


Figura 1. Conversión y regulación de energía en sistemas eólicos de baja potencia.

Este artículo presenta un análisis comparativo del desempeño de un convertidor buck operando bajo diferentes esquemas de control. A través de simulaciones realizadas, se evalúa el comportamiento del sistema en lazo cerrado frente a escenarios de operación ideal y ante perturbaciones que emulan variaciones de viento reales. El estudio busca determinar cómo influye la selección y sintonización de cada acción de control en la mitigación de sobreimpulsos, oscilaciones y errores persistentes, garantizando así la calidad y continuidad del suministro eléctrico hacia la carga.

2. CONVERTIDOR BUCK: FUNDAMENTOS

El convertidor buck está compuesto por una red de conmutación encargada de disminuir el nivel del voltaje de corriente continua y un filtro de paso-bajo que reduce los armónicos de alta frecuencia generados por el proceso de conmutación (Calderón et al., 2006). Este convertidor se utiliza ampliamente en electrónica de potencia para obtener un voltaje de salida $V_{out}(t)$ menor al de entrada $V_{in}(t)$.

La topología del convertidor se presenta en la Figura 2, la cual consta de una fuente de alimentación conectada a un circuito integrado por un interruptor principal (MOSFET), un inductor L , un diodo d , un capacitor C y una carga resistiva R . El control del interruptor electrónico se realiza mediante una señal de modulación por ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés, *Pulse Width Modulation*), cuyo ciclo de trabajo D (duty cycle) define el estado de conducción.

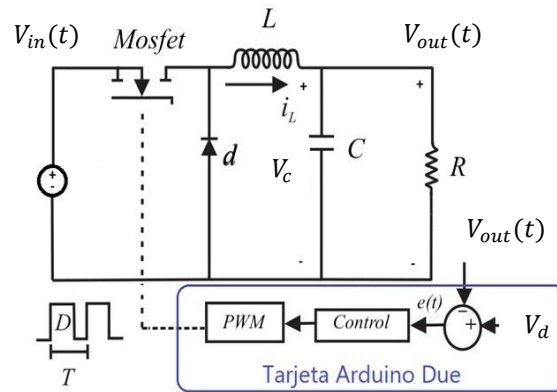


Figura 2. Diagrama del convertidor buck.

El objetivo principal de este convertidor es regular el voltaje en el capacitor V_c donde se conecta la carga. Para lograr dicha regulación, el interruptor de potencia se acciona mediante una señal PWM con un periodo constante T .

Para el desarrollo de las pruebas, se utiliza el entorno de MATLAB/Simulink empleando las librerías de *Simscape Electrical*. Esta herramienta proporciona bloques de modelado preconfigurados que permiten realizar pruebas en el convertidor como se muestra en la Figura 3, asimismo, facilita la simulación de componentes y el análisis de la respuesta del sistema.

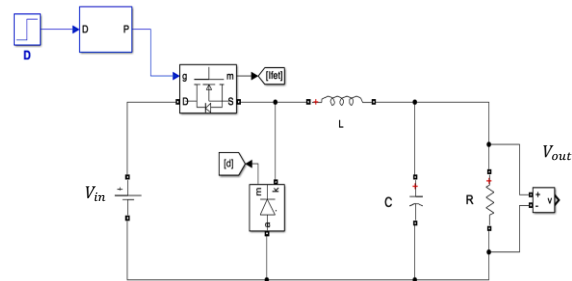


Figura 3. Modelo de simulación del convertidor buck en MATLAB/Simulink.

2.1 MODULACIÓN POR ANCHO DE PULSO

El PWM constituye la base fundamental para la regulación de los convertidores conmutados. Generalmente, la operación de estos dispositivos se basa en el control del voltaje de salida mediante un filtro pasivo (Calderón et al., 2006). En la Figura 4 se muestra la parte superior izquierda del modelo. Está conformado por el bloque de entrada D y el bloque identificado con la letra P , encargado de generar la señal PWM a partir de esta entrada.

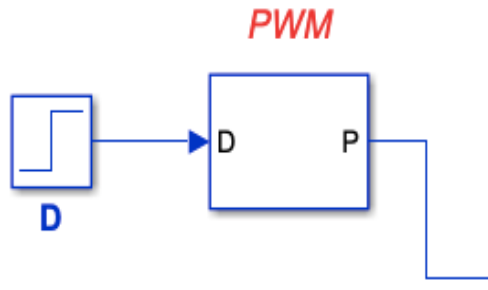


Figura 4. Generador *PWM* implementado en MATLAB/Simulink.

En otras palabras, se trata de una señal de frecuencia fija. Durante cada período, la señal permanece en su valor máximo una parte del tiempo y en cero el resto del intervalo. De manera intuitiva, se puede prever que el voltaje de salida guarda una relación directa con el voltaje de entrada, la cual está dada por la Ec. (1) (Peng & Wang, 2013).

$$V_{out} = D \cdot V_{in} \quad (1)$$

Entre las principales ventajas del *PWM* destacan su facilidad de implementación tanto en sistemas analógicos como digitales, la reducción de la complejidad del diseño de control y su compatibilidad con técnicas de modelado de pequeña señal. Sin embargo, el desempeño de los sistemas basados en esta técnica depende estrechamente de la frecuencia de conmutación seleccionada y de la estrategia de control empleada. Además, las transiciones de encendido y apagado de los dispositivos semiconductores generan pérdidas que pueden afectar la eficiencia del convertidor, especialmente en aplicaciones de alta potencia o alta frecuencia (Kapat & Krein, 2020).

2.2 CICLO DE TRABAJO

El bloque del interruptor *MOSFET*, en conjunto con el diodo, conforma la etapa de conmutación del convertidor como se muestra en la Figura 5, esta etapa es la responsable de gestionar la transferencia de energía desde la fuente hacia la carga.

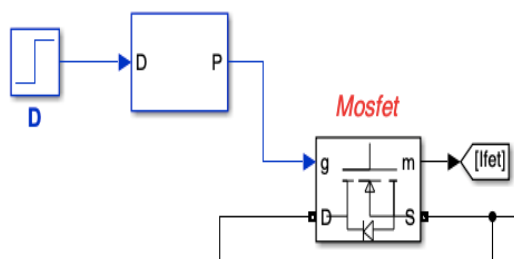


Figura 5. Etapa de conmutación del convertidor buck.

El parámetro crítico en esta operación es el ciclo de trabajo D , representa la fracción del periodo de conmutación T durante la cual el interruptor permanece en estado de conducción T_{on} . Matemáticamente, esta relación se expresa en la Ec. (2).

$$D = \frac{T_{on}}{T} \quad (2)$$

Donde D es un valor adimensional comprendido en el intervalo $[0, 1]$. Dicho parámetro determina el tiempo durante el cual el interruptor de potencia permanece en estado de conducción durante cada periodo de conmutación. Al incrementar el ciclo de trabajo, aumenta la energía transferida desde la fuente de entrada hacia el inductor y la carga, lo que produce un incremento en la tensión de salida. De manera opuesta, una reducción del ciclo de trabajo disminuye la energía suministrada y, por consiguiente, el valor del voltaje de salida (Lin et al., 2007).

Durante el intervalo del ciclo $0 \leq t \leq T_{on}$ el voltaje de salida es igual al voltaje de entrada, este intervalo corresponde al tiempo de encendido del interruptor T_{on} . En cambio, durante el intervalo de apagado $T_{on} \leq t \leq T$, el voltaje de salida es cero y el diodo entra en conducción; este intervalo corresponde al tiempo de apagado (Abhishek et al., 2020).

El período total de conmutación está dado por la siguiente ecuación:

$$T = T_{on} + T_{off} \quad (3)$$

2.3 SIMULACIÓN

Como se mencionó anteriormente, para analizar el comportamiento del convertidor buck se realizaron simulaciones en el entorno de MATLAB/Simulink utilizando las librerías de Simscape Electrical, con un periodo de simulación establecido en 60 segundos.

2.3.1 ESCENARIO 1 - CONDICIONES NOMINALES

Las condiciones nominales definen el punto de operación estándar para el cual se dimensionó el convertidor. En este escenario, se asume que tanto el voltaje de alimentación como la carga permanecen constantes; sus valores específicos se detallan en la Tabla 1, lo que permite evaluar el comportamiento del voltaje de salida bajo este régimen de funcionamiento. Este punto de partida es indispensable para validar el diseño y comprobar que el convertidor suministra el voltaje de salida

requerido en condiciones nominales de funcionamiento.

A continuación, se muestran los parámetros utilizados para la configuración del modelo:

Tabla 1. Parámetros del sistema.

Parámetro	Valor
Resistencia R	$10\ \Omega$
Inductancia L	$0.00003\ \text{F}$
Capacitancia C	$0.003\ \text{H}$
Diodo d	$0.001\ \Omega$
Voltaje de entrada $V_{in}(t)$	$60\ \text{V}$
Voltaje deseado V_d	$40\ \text{V}$
Corriente de salida $I_{out}(t)$	$5\ \text{A}$
Frecuencia del interruptor f	$20\ \text{kHz}$
Frecuencia de conmutación f	$1\ \text{kHz}$
Limites del ciclo de trabajo D	$[0,1]$

La Figura 6 muestra la señal de voltaje de entrada $V_{in}(t)$ aplicada al convertidor durante la simulación, la cual representa la condición de operación a partir de la cual se evalúa su desempeño.

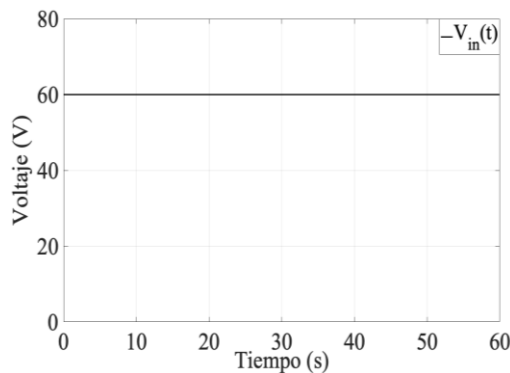


Figura 6. Voltaje de entrada del convertidor buck.

En la Figura 7 se muestra la respuesta del voltaje de salida $V_{out}(t)$ del sistema. Se puede observar que el voltaje obtenido corresponde al valor deseado V_d lo que permite verificar el correcto funcionamiento de la etapa de conversión bajo las condiciones simuladas.

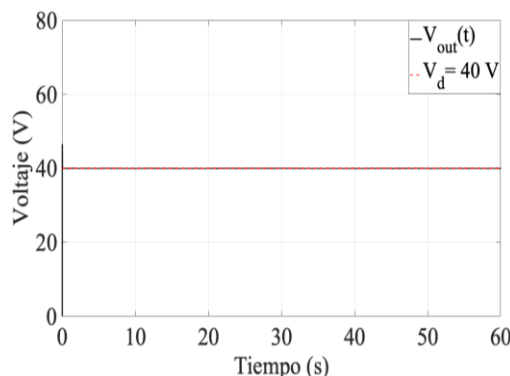


Figura 7. Voltaje de salida del convertidor buck.

Debido a que en los sistemas eólicos la velocidad del viento es altamente variable, las condiciones de entrada al convertidor no permanecen constantes durante su operación. Por ello, se considera un segundo escenario de simulación que incorpora estas variaciones, permitiendo analizar el comportamiento del convertidor bajo condiciones más representativas de la naturaleza del viento.

2.3.2 ESCENARIO 2 – VOLTAJE DE ENTRADA VARIABLE

Para evaluar el comportamiento del sistema, se empleó una base de datos de velocidad del viento para emular en las simulaciones y analizar la respuesta del sistema ante las variaciones del recurso eólico, a partir de la información disponible, se seleccionó aleatoriamente un intervalo de un minuto. En la Figura 8 se presenta la variación de la velocidad del viento correspondiente al minuto seleccionado de la base de datos.

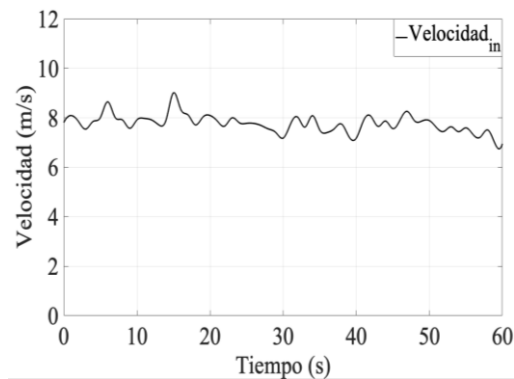


Figura 8. Comportamiento de la velocidad del viento durante el período analizado.

A partir de la velocidad se obtiene un voltaje como se muestra en la Figura 9, esto se calcula multiplicando los valores de velocidad por un factor de conversión que varía según el aerogenerador utilizado; la naturaleza variable del viento provoca cambios continuos en el voltaje generado, lo que introduce perturbaciones en la entrada del convertidor.

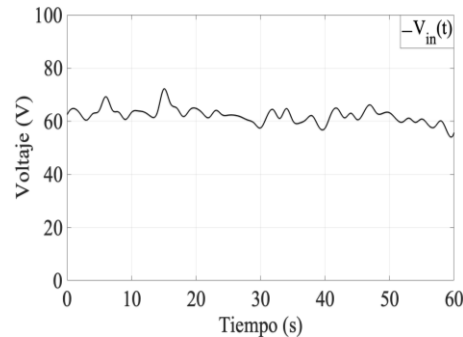


Figura 9. Variación del voltaje de entrada del convertidor bajo condiciones de viento variable.

En la **Figura 10** se muestra el comportamiento del voltaje de salida $V_{out}(t)$ del convertidor ante las variaciones del voltaje de entrada $V_{in}(t)$.

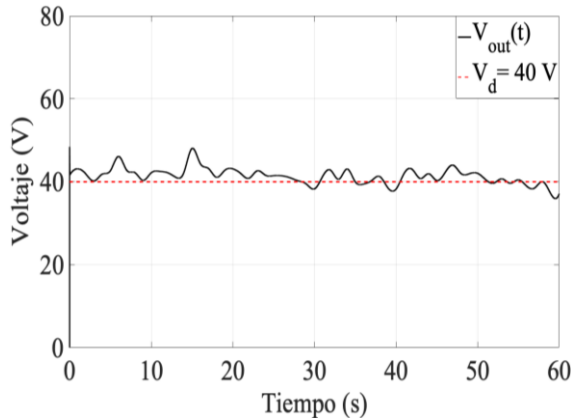


Figura 10. Variación del voltaje de salida del convertidor bajo condiciones de viento variable.

Cuando el voltaje de entrada $V_{in}(t)$ presenta variaciones debido a los cambios en la velocidad del viento, el voltaje de salida $V_{out}(t)$ del convertidor tiende a verse afectado directamente. Sin un sistema de control adecuado, estas fluctuaciones pueden provocar desviaciones respecto al valor de referencia, comprometiendo el desempeño del sistema.

3. ESQUEMA DE CONTROL PID

En los convertidores buck, la estrategia de control se implementa en la etapa de conmutación, específicamente en el control del interruptor electrónico (*MOSFET*). El controlador *PID* procesa el error del sistema y ajusta dinámicamente el ciclo de trabajo D de la señal PWM. De esta manera, se manipula el estado de conducción del interruptor para corregir la desviación detectada. El objetivo es mantener el voltaje de salida estable, compensando perturbaciones y variaciones en la carga o en la fuente de entrada.

Dicho controlador está dado por la Ec. (4).

$$D(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

Las ganancias de un controlador *PID* son parámetros que determinan la forma en que el sistema de control responde ante el error del sistema. La ganancia proporcional (k_p) actúa sobre el error instantáneo, proporcionando una respuesta rápida; la ganancia integral (k_i) acumula el error a lo largo del tiempo para eliminar desviaciones permanentes; y la ganancia derivativa (k_d) anticipa la tendencia del

error, contribuyendo a reducir oscilaciones y mejorar la estabilidad. Aunque existen múltiples metodologías para elegir estos valores, en este artículo se realiza una sintonización fina (prueba y error). El procedimiento implica observar la respuesta del sistema bajo distintas combinaciones, iniciando deliberadamente con valores bajos para realizar un ajuste progresivo.

El error es la diferencia entre el valor deseado V_d y el valor real medido en la salida del sistema $V_{out}(t)$, este parámetro está dado por la Ec. (5). Este error es la señal que utiliza el controlador para determinar las acciones de control necesarias y corregir el comportamiento del sistema.

$$e(t) = V_d - V(t) \quad (5)$$

3.1 ACCIÓN DE CONTROL PROPORCIONAL (P)

Se implementa un control proporcional para regular el voltaje de salida $V_{out}(t)$. El controlador calcula el error y ajusta el ciclo de trabajo (D) del interruptor con el fin de minimizarlo. Para implementar dicha acción de control, se hace uso de la estructura matemática de la Ec. (6):

$$D(t) = k_p e(t) \quad (6)$$

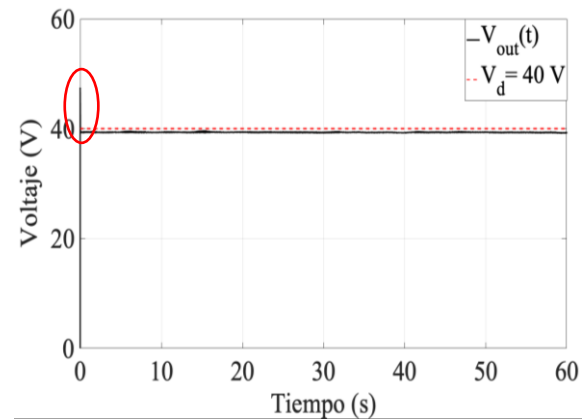


Figura 11. Variación del voltaje de salida del convertidor aplicando el control proporcional (*P*) (primera sintonización).

En la **Figura 11** al inicio de la simulación se observa un pequeño sobreimpulso asociado al proceso de establecimiento del controlador; sin embargo, este es de baja magnitud y se atenúa rápidamente. Posteriormente, el voltaje de salida $V_{out}(t)$, converge hacia un valor cercano al valor deseado V_d y se mantiene constante alrededor de dicho punto de operación durante todo el intervalo analizado.

3.2 ACCIÓN DE CONTROL PROPORCIONAL-DERIVATIVO (PD)

Para corregir el sobreimpulso observado en la respuesta del sistema, se incorpora una acción de control derivativa. Esta componente permite anticipar los cambios en el error, amortiguando la respuesta, disminuyendo el sobreimpulso.

Para implementar la acción de control proporcional-derivativa, se hace uso de la estructura de la Ec. (7).

$$D(t) = k_p e(t) + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (7)$$

Para poder observar correctamente el comportamiento del controlador, es necesario realizar algunos ajustes en la configuración del modelo.

En la ventana de *Modeling*, dentro de *Model Settings*, se accede a la sección *Solver* y posteriormente a las opciones de *Zero-crossings*. En este apartado, se selecciona *Zero-crossings control* y se deshabilita la opción (*Disable all*) como se muestra en la Figura 12.

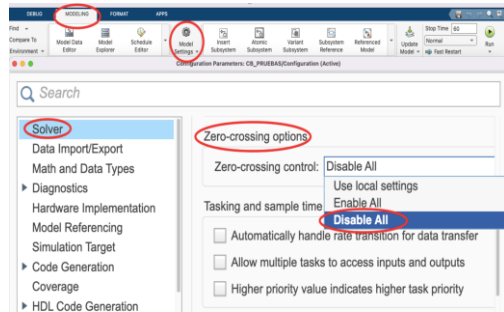


Figura 12. Ajuste realizado en MATLAB/Simulink.

Este ajuste permite evitar detecciones innecesarias de cruces por cero durante la simulación, logrando así una respuesta adecuada; su desactivación se realiza con el propósito de flexibilizar la tolerancia del integrador numérico, agilizando la ejecución de las simulaciones temporales a cambio de una aproximación en el microsegundo exacto del evento. En la Figura 13 se observa que el sobreimpulso inicial ha sido eliminado; sin embargo, el voltaje de salida $V_{out}(t)$, continúa presentando fluctuaciones, manteniéndose por debajo del valor deseado V_d .

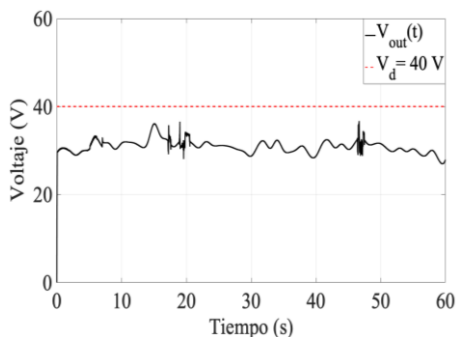


Figura 13. Variación del voltaje de salida del convertidor aplicando el control proporcional-derivativo (PD) (primera sintonización).

Los resultados obtenidos en la Figura 13 evidenciaron la necesidad de una sintonización adicional. En consecuencia, se realizó un ajuste de las ganancias con el propósito de mejorar la respuesta del sistema y minimizar el error. Tras la nueva configuración, se ejecutó nuevamente la simulación como se muestra en la Figura 14.

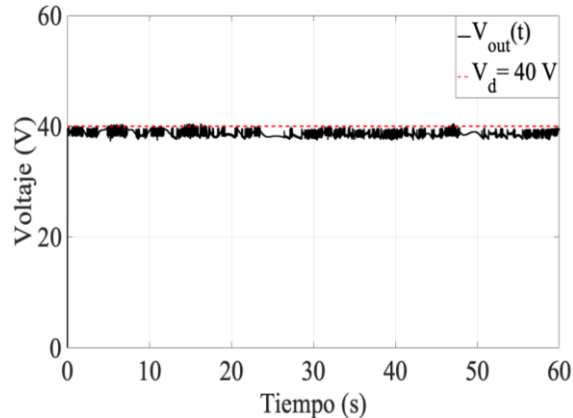


Figura 14. Variación del voltaje de salida del convertidor aplicando el control proporcional-derivativo (PD) (segunda sintonización).

Se demuestra una mejor sintonización, logrando estabilizar la etapa de conversión en un punto de operación considerablemente más cercano a las condiciones de salida deseadas. A pesar de esto, la persistencia de las oscilaciones indica que el controlador no logra compensar por completo las perturbaciones del sistema.

3.3 ACCIÓN DE CONTROL PROPORCIONAL- INTEGRAL (PI)

Con el propósito de mejorar el desempeño y la precisión del sistema, se implementa una acción de control proporcional-integral, la cual está dada por la siguiente ecuación:

$$D(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (8)$$

La acción integral se incorpora para acumular el error a lo largo del tiempo, corrigiendo desviaciones persistentes y reduciendo el error en estado estacionario.

Como resultado, esta estrategia conjunta proporciona una respuesta rápida y una mejor regulación, permitiendo que la variable controlada alcance y mantenga el valor deseado con mayor exactitud, como se muestra en la Figura 15.

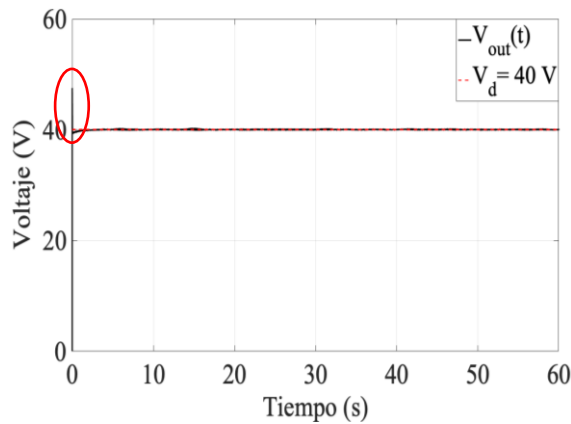


Figura 15. Variación del voltaje de salida del convertidor aplicando el control proporcional-integral (PI) (primera sintonización).

Aunque el sistema presenta una rápida convergencia, se evidencia nuevamente la presencia de un sobreimpulso inicial. Si bien este fenómeno desaparece en un corto periodo de tiempo, se llevó a cabo una segunda sintonización con el fin de reducir dicho sobreimpulso y mejorar el desempeño del convertidor. Los resultados correspondientes se muestran en la Figura 16.

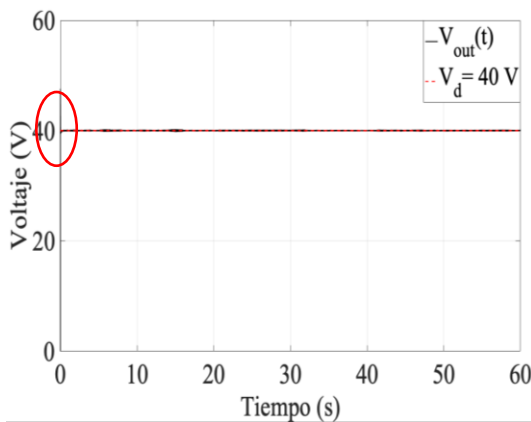


Figura 16. Variación del voltaje de salida del convertidor aplicando el control proporcional-integral (PI) (segunda sintonización).

Los resultados de la segunda sintonización muestran que el sobreimpulso inicial aún está presente; no obstante, la convergencia hacia el valor deseado V_d se produce de manera más rápida. Este comportamiento evidencia una reducción en el tiempo de establecimiento, aunque sin eliminar completamente el efecto transitorio.

3.4 ACCIÓN DE CONTROL PROPORCIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVO (PID)

Para la disminución del error en estado estacionario observado en las simulaciones previas, se incorpora

un controlador *PID*, el cual está dado por la Ec. (4). Los resultados se muestran en la Figura 17.

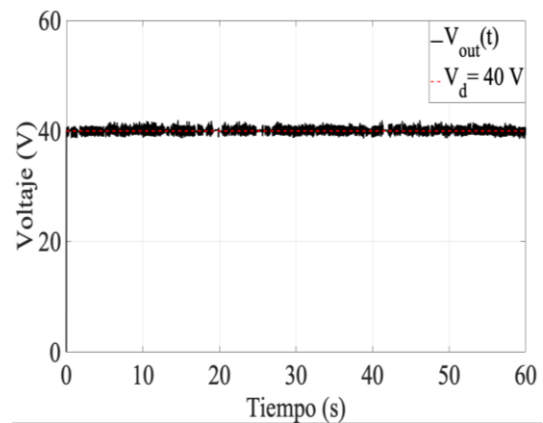


Figura 17. Variación del voltaje de salida del convertidor aplicando el control proporcional-integral-derivativo (PID) (primera sintonización).

Se observa que el voltaje de salida sigue de manera adecuada la referencia establecida, manteniéndose oscilando alrededor de este valor durante todo el intervalo de simulación. A diferencia de los casos anteriores, la señal converge rápidamente y no presenta desviaciones sostenidas ni errores significativos en estado estacionario. Aunque continúan presentándose pequeñas fluctuaciones debido a las variaciones de la entrada, estas son menos pronunciadas. En la Figura 18. Se muestra el diagrama con la implementación final del controlador PID.

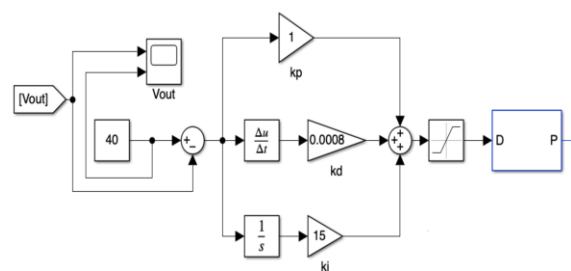


Figura 18. Modelo de simulación del convertidor buck con la implementación del controlador PID.

4. ANÁLISIS COMPARATIVO

En la Tabla 2 se muestran los valores de las ganancias utilizadas en las simulaciones:

Tabla 2. Valores de las ganancias utilizadas

Control	Valor de la ganancia
P	$K_p = 1$

PD	$K_p = 1, K_d = 0.0008$
PI	$K_p = 1, K_i = 15$
PID	$K_p = 1, K_i = 10, K_d = 0.0008$

Para evaluar y comparar cuantitativamente el desempeño de las estrategias de control P, PD, PI y PID aplicadas al convertidor buck, se analizaron sus respuestas utilizando cuatro métricas fundamentales: el Error Medio Cuadrático (EMC) como indicador global, el error en estado estacionario (E_{ss}) para medir la precisión en régimen permanente, y el Error en estado transitorio (E_{tr}) junto al porcentaje de sobreimpulso (%OS) para calificar la calidad de la respuesta. Los valores numéricos obtenidos en las simulaciones se concentran en la [Tabla 3](#).

Tabla 3. Resultados obtenidos

Control	ECM	E_{ss}	E_{tr}	Sobreimpulso
P	4.78	0.562	-7.49	18.74%
PD	2.748	0.793	18.12	0.1973%
PI	1.44	0.0012	0	18.92%
PID	0.2034	0.1428	0.4520	4.225%

4.1 DISCUSIÓN

El análisis comparativo de las estructuras de control evaluadas y mostradas en la [Tabla 3](#), permite identificar cómo la naturaleza matemática de cada algoritmo modifica directamente la respuesta y comportamiento del convertidor.

Las arquitecturas P y PD exhiben un error en estado estable mayor, el cual surge porque ambas dependen exclusivamente de una señal de control proporcional a la magnitud instantánea del error o a su velocidad de cambio. El controlador PI mitiga casi por completo esta limitación; su término integral actúa como un acumulador de desviaciones a lo largo del tiempo, incrementando de manera sostenida el esfuerzo de control hasta extinguir la diferencia entre el voltaje de salida y la referencia. Durante el arranque del convertidor, la acumulación continua de error en el integrador satura el lazo antes de que la variable alcance la consigna, manifestándose en un sobreimpulso pronunciado y en oscilaciones que comprometen la integridad operativa.

En este escenario donde se fundamenta la viabilidad del controlador PID como la mejor solución. Al unificar las tres acciones de control, la componente derivativa opera de manera predictiva midiendo la tasa de cambio de la señal. Al detectar un crecimiento acelerado del voltaje, la derivada introduce una acción de amortiguamiento que actúa como un freno anticipado, disipando de forma controlada la energía transitoria en los elementos de almacenamiento (inductor y capacitor). Esta propiedad mitiga el

sobreimpulso característico del controlador. De este modo, la estructura PID unifica los beneficios individuales de las configuraciones precedentes, consolidando una respuesta que es simultáneamente rápida y operativamente segura para el hardware.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó la simulación de un convertidor buck, evaluando el desempeño de distintas estrategias de control para la regulación del voltaje de salida. A través de las simulaciones, se demostró que el uso de un controlador PID resulta fundamental para garantizar el correcto funcionamiento del sistema. Mientras que el control proporcional y proporcional-integral presentaron un sobreimpulso y el control proporcional-derivativo mostró un error en estado estacionario mayor, la implementación de la acción integral permitió que el sistema convergiera al valor de referencia deseado. Se concluye que una sintonización adecuada de los parámetros del controlador PID permite minimizar las oscilaciones y el tiempo de respuesta transitoria, logrando un suministro de energía estable y eficiente. Estas características son críticas para aplicaciones en sistemas de energía renovable, donde se requiere compensar la variabilidad inherente de fuentes como la generación eólica para asegurar la calidad de la energía entregada a la carga.

AGRADECIMIENTOS

La autora Ivanna Baños Matus agradece al equipo de diseño gráfico de la Universidad del Istmo por su valioso apoyo en proceso de producción. A la SECIHTI por el apoyo al proyecto 75 de Investigadores por México y a la Universidad del Istmo por las facilidades que ha dado para utilizar el equipo del laboratorio de Energías Renovables.

DECLARACIONES

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Los autores declaran el uso de herramientas de Inteligencia Artificial, Tradicional y/o Generativa en la elaboración de este manuscrito, conforme a los lineamientos éticos de la revista.

La base de datos que sustenta los resultados presentados en este artículo no está disponible públicamente en este momento, pero puede obtenerse de los autores bajo una solicitud debidamente sustentada.

REFERENCIAS

Abhishek, R., Zoting, P., & Ragit, P. (2020). Design and analysis of a DC-DC converter and boost converter to achieve high efficiency by altering duty cycle and input voltage. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 10(6), 731–738.

<https://doi.org/10.29322/IJSRP.10.06.2020.p10285>

- Abaali, H. (2015). Design modelling control and simulation of DC/DC power buck converter. *International Journal of Energy and Power Engineering*, 9(10), 1229–1235.
- Calderón, A. J., Vinagre, B. M., & Feliu, V. (2006). Fractional order control strategies for power electronic buck converters. *Signal Processing*, 86(10), 2803–2819. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2006.02.022>
- Hussain, J., Hussain, M., Raza, S., & Siddique, M. (2019). Power quality improvement of grid connected wind energy system using DSTATCOM-BESS. *International Journal of Renewable Energy Research*, 9(3), 1388–1397. <https://doi.org/10.20508/ijrer.v9i3.9802.g7717>
- Kapat, S., & Krein, P. T. (2020). A tutorial and review discussion of modulation, control and tuning of high-performance DC-DC converters based on small-signal and large-signal approaches. *IEEE Open Journal of Power Electronics*, 1, 339–371. <https://doi.org/10.1109/OJPEL.2020.3018311>
- Lin, Y. T., Jen, M. C., Chung, W. Y., Wu, D. S., Lin, H. C., & Chen, J. J. (2007). A monolithic buck DC-DC converter with on-chip PWM circuit. *Microelectronics Journal*, 38(8–9), 923–930. <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2007.05.013>
- Peng, C., & Wang, C. J. (2013). An analysis of buck converter efficiency in PWM/PFM mode with Simulink. *Energy and Power Engineering*, 5, 64–69. <https://doi.org/10.4236/epe.2013.53B013>
- Rajamani, M. P. E., Rajesh, R., & Willjuice Iruthayarajan, M. (2023). Design and experimental validation of PID controller for buck converter: A multi-objective evolutionary algorithms based approach. *IETE Journal of Research*, 69(1), 21–32. <https://doi.org/10.1080/03772063.2021.1905564>

Física en el gimnasio: modelo matemático del remo de tierra

ÁLVARO CASTAÑEDA MENDOZA¹

¹ Licenciatura en Matemáticas Aplicadas, Universidad del Istmo, Campus Tehuantepec, Oaxaca, México.

* Correspondencia: alvaro.c.m@unistmo.edu.mx

Recibido: 15/06/2026

Revisado: 29/06/2026

Aceptado: 05/07/2026

Publicado: 08/07/2026

RESUMEN: Los implementos utilizados para el entrenamiento de fuerza suelen analizarse desde el punto de vista fisiológico y biomecánico, mientras que sus propiedades físicas prácticamente no han recibido atención. En el presente trabajo se introducen los conceptos de función de resistencia mecánica y peso efectivo como magnitudes físicas que permiten caracterizar un implemento de entrenamiento a partir de sus propiedades mecánicas sin atender aspectos fisiológicos o biomecánicos. Como caso de estudio se analiza el remo de tierra (Landmine Barbell), que siendo modelado como una palanca permite obtener expresiones analíticas simples para ambas magnitudes. Finalmente se discute brevemente la utilidad de estas magnitudes para el análisis de otros implementos de entrenamiento basados en máquinas simples o mecanismos inerciales.

ABSTRACT: Strength training equipment is commonly analyzed from physiological and biomechanical perspectives, while its physical properties have received comparatively little attention. In the present work, the concepts of mechanical resistance function and effective weight are introduced as physical quantities that allow the characterization of a training implement based on its mechanical properties without considering physiological or biomechanical aspects. As a case study, the landmine barbell is analyzed. By modeling the system as a lever, simple analytical expressions are obtained for both quantities. Finally, the usefulness of these concepts for the analysis of other training implements based on simple machines or inertial mechanisms is briefly discussed.

Palabras clave: modelamiento matemático, función de resistencia, peso efectivo, entrenamiento, remo de tierra

1. INTRODUCCIÓN

El entrenamiento de fuerza constituye una de las formas más utilizadas de acondicionamiento físico tanto en el ámbito deportivo profesional como recreativo. Para esto existe una amplia gama de implementos diseñados para generar diferentes tipos de resistencia mecánica, que, cuando el usuario actúa en contra de ellos, desarrolla capacidades físicas específicas. (Haff & Triplett, 2016; Zatsiorsky et al., 2020).

A pesar de que existe una gran variedad de equipos e implementos disponibles, la literatura existente se centra predominantemente en aspectos biomecánicos y funcionales (Hall, 2019), o bien en respuestas experimentales del usuario (Smith et al., 2022). En contraste, las propiedades físicas e intrínsecas del implemento de manera aislada casi no reciben atención; por ejemplo, Lincoln et al. (2023) describen

cualitativamente la descomposición de fuerzas vectoriales, pero lo hacen desde un enfoque estrictamente biomecánico orientado a la técnica del ejercicio y no a las ecuaciones mecánicas del implemento en sí.

En este contexto resulta de particular interés desarrollar herramientas que permitan describir el comportamiento mecánico de los aparatos de entrenamiento independientemente de las características de los usuarios. En el presente trabajo se propone una aproximación basada en principios de mecánica clásica utilizando como caso de estudio el remo de tierra (Landmine Barbell).

1.1 CONTEXTO HISTÓRICO

El entrenamiento con resistencia ha evolucionado de manera importante a lo largo del último siglo, dando lugar a una gran cantidad de implementos destinados

al desarrollo de fuerza y potencia. Entre estos sistemas destaca el remo de tierra, cuyo origen se asocia a las configuraciones artesanales utilizadas durante las décadas de los 60 y 70 en gimnasios de levantamiento de pesas, donde se popularizó el uso de barras olímpicas pivotadas sobre un extremo libre. Actualmente, la evolución de estas configuraciones ha dado lugar a dispositivos comerciales basados en mecanismos de junta universal (articulación de cardán) con dos grados de libertad rotacionales, los cuales sirven de anclaje y apoyo estructural. Debido a su versatilidad y simplicidad mecánica, el remo de tierra se ha consolidado como un implemento accesible y ampliamente utilizado tanto para el entrenamiento de fuerza como para el acondicionamiento físico general (Lincoln et al., 2023).

1.2 EQUIPAMIENTO DE GIMNASIO COMO SISTEMAS MECÁNICOS

Desde el punto de vista físico, los implementos de entrenamiento pueden ser vistos como sistemas mecánicos (Hall, 2019; Adams, 2018), basados típicamente en bandas elásticas, pesos libres y máquinas simples (Cardinale et al., 2011; Haff & Triplett, 2016; Knudson, 2021), que permiten al usuario realizar algún movimiento en contra de una fuerza. Bajo esta perspectiva, varios autores han propuesto herramientas de modelado para simular la adaptación neuromuscular (Arandjelovic, 2010), demostrando la utilidad de enfoques analíticos para describir fenómenos complejos de entrenamiento.

Usualmente el comportamiento de estos implementos se analiza desde la perspectiva del usuario mediante conceptos asociados a la biomecánica y fisiología del ejercicio; por ejemplo, Nolte et al. (2013) desarrollaron un modelo musculoesquelético tridimensional enfocado en evaluar la seguridad antropométrica y las cargas articulares del sujeto durante el ejercicio de remo. En contraste con estos estudios centrados en el organismo humano, la caracterización física analítica desde la perspectiva del propio aparato de forma aislada suele recibir menor atención en la literatura de divulgación. Bajo esta perspectiva surge la necesidad de introducir magnitudes intrínsecas que permitan caracterizar la función de resistencia generada por un implemento de forma independiente al usuario.

1.3 EL REMO DE TIERRA

El remo de tierra es un implemento versátil debido a la posibilidad de llevar a cabo diferentes modalidades de entrenamiento, como entrenamiento de fuerza, entrenamiento por intervalos de alta intensidad, entrenamiento funcional y postural (Lincoln et al., 2023; Zweifel, 2017).

Desde el punto de vista mecánico de sólidos rígidos, el sistema no es más que una palanca (Kittel et al., 1973) que, dependiendo del punto de agarre, es una palanca del segundo o tercer género sin modificar su configuración mecánica. Esto es analíticamente diferente de los sistemas musculoesqueléticos del usuario que tradicionalmente son tratados en la literatura biomecánica como se describe en Knudson (2021).

Cabe destacar que el remo de tierra permite llevar a cabo una gran variedad de ejercicios dinámicos multiplanares y unilaterales (como remos, sentadillas y empujes vectoriales) mientras el usuario estabiliza su postura contra torques de rotación axial (Fenwick et al., 2009; Lincoln et al., 2023). De esta manera, el implemento facilita la dosificación de entrenamientos orientados tanto al desarrollo de la fuerza general como a adaptaciones metabólicas de alta intensidad y densidad neuromuscular (Carvalho et al., 2022; Lincoln et al., 2023). En la Figura 1 se muestran las posiciones inicial y final de la ejecución de un press unilateral con remo de tierra.

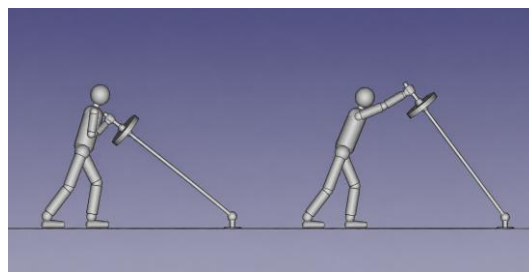


Figura 1. Ejecución del press unilateral con remo de tierra. Se muestran, a la izquierda la posición inicial y a la derecha la posición final.

En este trabajo se utiliza el término *remo de tierra* para referirse al implemento conocido en la literatura anglosajona como *Landmine Barbell*, con el propósito de disponer de una denominación en español a lo largo del manuscrito.

1.4 OBJETIVO DEL TRABAJO

El objetivo del trabajo es introducir el concepto de *función de resistencia mecánica*. Esta función describe la manera como un implemento de entrenamiento ofrece una resistencia cuando es movido.

También se propone el concepto de *peso efectivo*, que caracteriza la fuerza que el usuario debe ejercer en función del punto de agarre utilizado.

Para demostrar la utilidad de estos conceptos se desarrolla un modelo mecánico del remo de tierra para movimientos simples en forma de arco.

2. FUNCIÓN DE RESISTENCIA MECÁNICA

En esta sección se introduce el concepto de función de resistencia mecánica como magnitud complementaria al perfil de resistencia.

2.1 PERFIL DE RESISTENCIA

En el ámbito del entrenamiento de fuerza el término *perfil de resistencia* se utiliza para describir la manera como se experimenta la resistencia de un aparato o implemento de ejercitación durante su recorrido (Haff & Triplett, 2016; Knudson, 2021).

El perfil de resistencia depende del implemento utilizado así como de la configuración corporal del usuario y las características mecánicas del sistema musculoesquelético involucrado en el ejercicio. De esta manera, un mismo implemento puede generar perfiles de resistencia distintos cuando son utilizados de manera diferente, ya sea por la manera de usar el implemento o las características antropométricas.

Desde esta perspectiva, el perfil de resistencia es una herramienta útil para describir la respuesta mecánica del cuerpo humano durante la ejecución de un ejercicio. De la misma manera, se puede introducir una magnitud complementaria enfocada exclusivamente en la descripción del aparato, misma que se describe a continuación.

2.2 FUNCIÓN DE RESISTENCIA MECÁNICA

Con el fin de caracterizar las propiedades mecánicas de un aparato o implemento de entrenamiento se propone el concepto de *función de resistencia mecánica*.

Definición 1. La *función de resistencia mecánica* $R(q_i)$ se define como la componente de la fuerza de un aparato o implemento de ejercitación que se opone al movimiento permitido por sus restricciones geométricas y depende de una o varias variables generalizadas q_i . A diferencia del perfil de resistencia, esta magnitud depende exclusivamente de las características mecánicas y geométricas del implemento sin considerar las características fisiológicas y biomecánicas del usuario.

La importancia de definir la función de resistencia mecánica es que constituye una propiedad intrínseca del aparato o implemento analizado. Su forma funcional depende de la manera como se configuran sus diferentes partes y es completamente independiente del usuario.

Es importante notar que, si bien en la literatura biomecánica se utilizan los conceptos de *perfil de resistencia* (Jones, 1970) y *carga efectiva* (Biscarini, 2026) para describir la interacción usuario-máquina,

en el presente trabajo se emplean las definiciones de *función de resistencia mecánica* y *peso efectivo* (más adelante). Estos términos corresponden a la necesidad de diferenciar magnitudes que dependen exclusivamente de la geometría del implemento de aquellas que integran variables antropométricas.

En la siguiente sección se describe el remo de tierra y se calcula su función de resistencia.

3. MODELO FÍSICO DEL REMO DE TIERRA

En esta sección se aborda el modelamiento del remo de tierra. Es importante aclarar que este es un modelo estático que aún no considera momentos de inercia.

3.1 EL REMO DE TIERRA

El remo de tierra, *Figura 2*, es un implemento de entrenamiento compuesto por una barra rígida de longitud L cuyo extremo inferior rota libremente alrededor de un punto de sujeción fijo. En el extremo opuesto se colocan discos de diferentes pesos haciendo que su masa m pueda ser regulada y dando lugar a la resistencia del sistema. Durante la ejecución de un ejercicio el usuario aplica una fuerza sobre la barra con el objetivo de modificar su posición angular respecto al suelo utilizando diferentes configuraciones corporales.

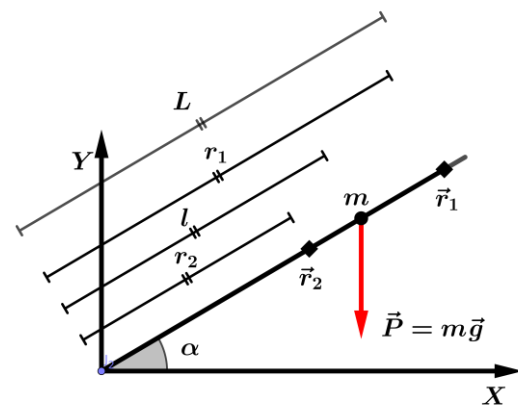


Figura 2. Geometría general del remo de tierra. Se muestran la barra rígida de longitud L , el punto de apoyo y la posición de la carga a una distancia l del centro de rotación y los posibles puntos de agarre r_1 y r_2 . El ángulo de elevación se mide respecto al suelo.

Independientemente de la técnica utilizada durante la ejecución de un ejercicio, el movimiento del implemento puede aproximarse por una rotación restringida a un plano vertical. Bajo esta consideración el sistema puede modelarse como una palanca sometida a la fuerza gravitacional (Kittel et al., 1973; Raine, 2006).

La forma de la barra hace que los discos se coloquen a cierta distancia l del punto de sujeción y al mismo tiempo permite que el usuario pueda modificar el punto de aplicación de la fuerza mediante diferentes agarres r_1 y r_2 (Figura 2). Esta característica hace que una misma carga produzca sensaciones de esfuerzo diferentes dependiendo del punto de agarre, definiendo el concepto de *peso efectivo*.

3.2 ANÁLISIS DE FUERZAS

Sin pérdida de generalidad es factible considerar que la masa total del sistema se encuentra concentrada en el punto L , dado que es el punto donde se aplicará la fuerza al realizar el ejercicio. Utilizando el teorema de Varignon, el peso distribuido de la barra y la carga concentrada de los discos pueden reducirse estáticamente a una única fuerza resultante en un centro de gravedad equivalente (Sears et al., 2018).

De esta manera la variable m puede absorber la masa efectiva total del implemento balanceado en condiciones de equilibrio estático. De esta manera

$$P = mg$$

donde P es el peso, m la masa del sistema y g el valor de la aceleración gravitacional. Es importante notar que este peso es medido en el punto de agarre.

Dado que el movimiento permitido es el de una rotación alrededor del punto de apoyo, es conveniente descomponer el peso en una componente tangencial y una radial (o axial) respecto a la trayectoria del movimiento (Adams, 2018). Esta descomposición se lleva a cabo mediante la proyección del peso total en un sistema de referencia normal de acuerdo a la Figura 3.

Considerando el peso que apunta hacia abajo y el remo con un ángulo α respecto al suelo las expresiones para las fuerzas radial y tangencial son

$$f_t = mg \cos(\alpha)$$

y

$$f_r = mg \sin(\alpha)$$

donde m es la masa y g la aceleración gravitacional.

La componente tangencial es la responsable de oponerse directamente al movimiento permitido por el sistema, mientras que la componente radial no contribuye directamente al desplazamiento angular analizado en el presente artículo.

Más tarde se hará uso de la componente tangencial, por ahora se hará uso de una propiedad interesante de las palancas.

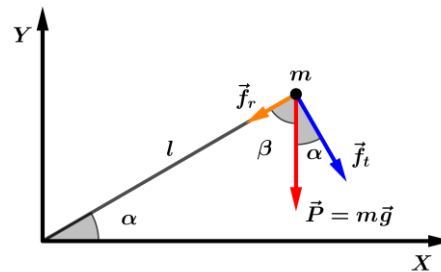


Figura 3. Descomposición del peso en componentes tangencial y radial.

3.3 PESO EFECTIVO

Como el remo de tierra es una palanca, la fuerza asociada al ejercicio depende tanto del peso del sistema como del punto de agarre, de acuerdo con las leyes de equilibrio de momentos aplicadas a sistemas de palancas (Kittel et al., 1973; Raine, 2006). Para cuantificar esto se define el concepto de *peso efectivo*.

Definición 2. Se define el *peso efectivo* como la fuerza que debe ejercer el usuario en un punto de agarre determinado para contrarrestar el efecto mecánico producido por el implemento.

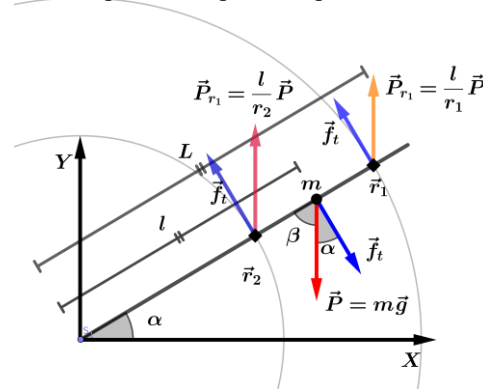


Figura 4. Peso efectivo asociado a diferentes puntos de agarre. Debido al efecto de palanca, una misma carga puede generar valores diferentes de peso efectivo.

En particular para el remo de tierra se tienen dos puntos de agarre r_1 y r_2 con $0 < r_2 < l < r_1 < L$ como se puede ver en la Figura 4.

Considerando que el momento está dado por $lP = r_i P_{r_i}$ queda claro que para los puntos de agarre r_1 y r_2 se tiene

$$P_{r_1} = \frac{l}{r_1} P$$

y

$$P_{r_2} = \frac{l}{r_2} P$$

De esta manera, el remo es un caso en el cual es factible tener que realizar un esfuerzo superior al peso total del sistema.

3.4 FUNCIÓN DE RESISTENCIA DEL REMO DE TIERRA

De acuerdo con la Definición 1, y considerando el modo de uso del remo de tierra, la función de resistencia corresponde a la componente tangencial del peso, es decir

$$R(\alpha) = P \cos(\alpha)$$

y cuyo comportamiento en función del ángulo puede observarse en la Figura 5.

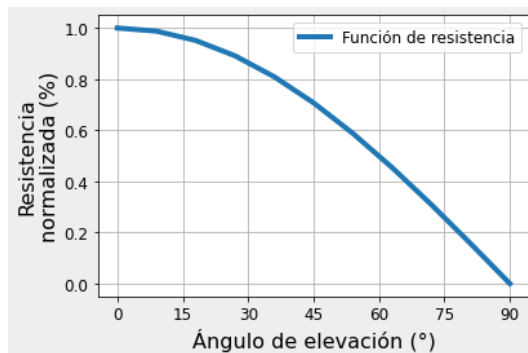


Figura 5. Función de resistencia mecánica del remo de tierra normalizada respecto al peso total del sistema.

Puede observarse que el valor máximo corresponde a la posición horizontal y disminuye conforme el ángulo de elevación aumenta. Esto significa que el implemento ofrece una resistencia elevada al inicio del movimiento que va disminuyendo progresivamente a medida que la carga es elevada.

Cabe destacar que esta propiedad es muy útil desde el punto de vista musculoesquelético permitiendo llevar a cabo ejercicios de fuerza y funcionales, pero estos detalles están fuera del alcance del presente artículo.

3.5 ANÁLISIS DE ENERGÍA

La elevación de la carga, implica una variación en la energía potencial gravitacional del sistema (Feynman et al., 2011). Dada la configuración del sistema queda claro que la energía potencial del sistema está dada por

$$U(\alpha) = mgl \sin(\alpha)$$

y cuyo comportamiento puede observarse en la Figura 6.

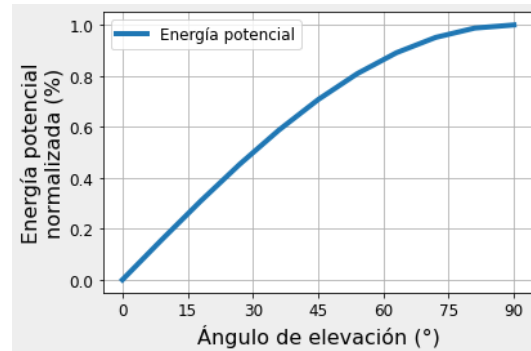


Figura 6. Energía potencial gravitacional normalizada en función del ángulo de elevación.

El trabajo mecánico realizado por el usuario corresponde al cambio de energía del sistema debido al cambio de elevación. Desde este punto de vista, el ejercicio puede interpretarse como un proceso continuo de conversión de energía química, producida por el usuario, en energía cinética que a su vez es convertida en energía potencial gravitacional.

Un detalle interesante es que aunque el peso efectivo depende del punto de agarre, el trabajo mecánico neto necesario para elevar una carga es independiente de dicho punto, aún cuando la fuerza ejercida por el usuario puede ser diferente.

4. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos muestran que la función de resistencia constituye una propiedad inherente al implemento analizado y permite describir el comportamiento de la resistencia a lo largo del movimiento sin considerar las características del usuario. Esta característica la hace diferente del perfil de resistencia, que depende tanto del implemento como del usuario.

En el caso particular del remo de tierra la función de resistencia disminuye conforme aumenta el ángulo de elevación haciendo que la mayor exigencia mecánica ocurra al inicio del movimiento y disminuya conforme la carga es elevada. Esto permite llevar a cabo movimientos con una resistencia variable utilizando únicamente la acción de la fuerza gravitacional y la geometría del sistema.

Otro resultado importante es la introducción del concepto de peso efectivo. Los resultados muestran que una misma carga puede requerir de esfuerzos diferentes que dependen del punto de agarre. Sin embargo, a pesar de esta diferencia, el trabajo mecánico permanece constante puesto que sin importar el punto de agarre la carga se eleva a la misma altura.

Finalmente, aunque en el presente trabajo la función de resistencia se define para el remo de tierra, en realidad este concepto puede ser aplicado a cualquier equipamiento de gimnasio sin importar si el sistema está basado en poleas, elementos elásticos, palancas compuestas o mecanismos inerciales.

5 CONCLUSIONES

En el presente trabajo se introdujo el concepto de función de resistencia mecánica como una magnitud que describe la resistencia producida por un implemento de ejercitación y que solo depende de su geometría. Esto permite llevar a cabo un análisis desde un punto de vista mecánico sin introducir conceptos asociados al sistema musculoesquelético.

Aplicando esta definición al caso particular del remo de tierra se obtuvo una expresión analítica para su función de resistencia, mostrando que la resistencia disminuye conforme aumenta el ángulo de elevación. También se introdujo el concepto de peso efectivo, mostrando que una misma carga puede producir esfuerzos diferentes que dependen del punto de agarre utilizado.

Finalmente, los resultados sugieren que la función de resistencia mecánica puede utilizarse como una herramienta general para el análisis y clasificación de implementos de entrenamiento basados en máquinas simples o mecanismos inerciales, proporcionando un marco común para el estudio físico de este tipo de sistemas.

DECLARACIONES

El autor declara no tener conflictos de interés relacionados con el presente trabajo.

REFERENCIAS

- Adams, S. (2018). *Foundations of physics*. Mercury Learning and Information.
- Arandjelović, O. (2010). A mathematical model of neuromuscular adaptation to resistance training and its application in a computer simulation of accommodating loads. *European Journal of Applied Physiology*, 110(3), 523–538. <https://doi.org/10.1007/s00421-010-1526-3>
- Biscarini, A. (2026). Control of joint reaction forces during single-joint strengthening exercises via adaptive electromechanical technologies: An analytical biomechanical framework. *Bioengineering*, 13(3), 270. <https://doi.org/10.3390/bioengineering13030270>

- Cardinale, M., Newton, R., & Nosaka, K. (Eds.). (2011). *Strength and conditioning: Biological principles and practical applications*. Wiley-Blackwell.
- Carvalho, L., Junior, R. M., Barreira, J., Schoenfeld, B. J., Orazem, J., & Barroso, R. (2022). Muscle hypertrophy and strength gains after resistance training with different volume-matched loads: A systematic review and meta-analysis. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 47(4), 357–368. <https://doi.org/10.1139/apnm-2021-0515>
- Fenwick, C. M. J., Brown, S. H. M., & McGill, S. M. (2009). Comparison of different rowing exercises: Trunk muscle activation and lumbar spine motion, load, and stiffness. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 23(2), 350–358. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181942019>
- Feynman, R. P., Leighton, R. B., & Sands, M. (2011). *The Feynman lectures on physics: Vol. I. Mainly mechanics, radiation, and heat*. Basic Books.
- Haff, G. G., & Triplett, N. T. (Eds.). (2016). *Essentials of strength training and conditioning* (4th ed.). Human Kinetics.
- Hall, S. J. (2019). *Basic biomechanics* (8th ed.). McGraw-Hill Education.
- Jones, A. (1970). *Nautilus training principles*. Nautilus Sports/Medical Industries.
- Kittel, C., Knight, W. D., & Ruderman, M. A. (1973). *Berkeley physics course: Vol. 1. Mechanics* (2nd ed.). McGraw-Hill.
- Knudson, D. (2021). *Fundamentals of biomechanics* (3rd ed.). Springer.
- Lincoln, M. A., Sapstead, G. W., Moore, K. N., & Weldon, A. (2023). Exercise technique: The landmine row. *Strength & Conditioning Journal*, 45(3), 371–378. <https://doi.org/10.1519/SSC.0000000000000751>
- Nolte, K., Krüger, P. E., Els, P. S., & Nolte, H. W. (2013). Three-dimensional musculoskeletal modelling of the seated row resistance-training exercise. *South African Journal of Sports Medicine*, 25(3), 67–73. <https://doi.org/10.7196/SAJSM.470>

- Raine, D. (2006). *Newtonian mechanics: A modelling approach*. Mercury Learning and Information.
- Sears, F. W., Zemansky, M. W., Young, H. D., & Freedman, R. A. (2018). *Física universitaria con física moderna* (V. I. Flores Flores, Trad.; 14.^a ed., Vol. 1). Pearson Educación.
- Smith, R. W., Housh, T. J., Anders, J. P. V., Neltner, T. J., Arnett, J. E., Ortega, D. G., Schmidt, R. J., & Johnson, G. O. (2022). Torque and neuromuscular responses are not joint angle dependent during a sustained, isometric task anchored to a high perceptual intensity. *American Journal of Sports Science and Medicine*, 10(2), 29–39. <https://doi.org/10.12691/ajssm-10-2-1>
- Zatsiorsky, V. M., Kraemer, W. J., & Fry, A. C. (2020). *Science and practice of strength training* (3rd ed.). Human Kinetics.
- Zweifel, M. (2017). Importance of horizontally loaded movements to sports performance. *Strength & Conditioning Journal*, 39(1), 21–26.

Evaluación de perfiles aerodinámicos independientes en una sección de álabe para aerogenerador de baja potencia mediante proyección de franjas

JAIME PEÑA ANTONIO^{1,*} | VÍCTOR IVÁN MORENO OLIVA¹ | GABRIEL CASTILLO SANTIAGO²

¹ División de Estudios de Posgrado, Universidad del Istmo, Campus Tehuantepec, Oaxaca, Mexico.

² Ingeniería en Energías Renovables, Universidad del Istmo, Campus Tehuantepec, Oaxaca, México.

* Correspondencia: jpeanto@gmail.com

Recibido: 15/06/2026

Revisado: 25/06/2026

Aceptado: 02/07/2026

Publicado: 08/07/2026

RESUMEN: Este trabajo propone un método por metrología óptica utilizando proyección de franjas, para evaluar de forma cuantitativa la forma geométrica de perfiles aerodinámicos independientes en una sección de álabe para aerogenerador de baja potencia. El sistema óptico propuesto consiste en un proyector comercial modelado como un sistema pinhole virtual, el cual ilumina una superficie de interés ubicada a cierta distancia conocida frente al proyector, resaltando un patrón de franjas en la superficie, que se interpreta como un cuerpo opaco, se coloca una cámara con un sensor CMOS que observa la superficie bajo prueba desde un ángulo definido, para la toma de fotografías. Asimismo, se presenta un procesamiento de imágenes para obtener la reconstrucción de perfiles aerodinámicos por cada franja analizada.

ABSTRACT: This work proposes an optical metrology method by using fringe projection to quantitatively evaluate the geometric shape of independent airfoils in a blade section for a small wind turbine. The proposed optical system consists of a commercial projector modeled as a virtual pinhole system, which illuminates a surface of interest placed at a known distance in front of the projector, highlighting a fringe pattern on the surface. The surface is interpreted as an opaque body, and a camera with a CMOS sensor is placed at a defined angle to observe the surface under test and capture photographs. Likewise, an image processing procedure is presented to obtain the reconstruction of aerodynamic profiles for each analyzed fringe.

Palabras clave: Álabes, Proyección de franjas, Perfil aerodinámico, Procesamiento de imágenes

1. INTRODUCCIÓN

La energía eólica es una de las fuentes de energía renovable más utilizadas en la actualidad a nivel mundial debido a que aprovecha un recurso natural abundante e inagotable, el viento. Su funcionamiento se basa en la conversión de la energía cinética del aire en movimiento en energía mecánica mediante aerogeneradores o turbinas eólicas. Posteriormente, esta energía puede emplearse en aplicaciones específicas, como el bombeo de agua, la molienda de granos, o transformarse en energía eléctrica mediante aerogeneradores o turbinas eólicas (Probst, 2024; Roga et al., 2022). El crecimiento de la tecnología eólica ha impulsado la mejora de los procesos de fabricación de componentes como los álabes, la precisión geométrica y la calidad superficial de los álabes influye directamente en su desempeño aerodinámico, eficiencia y vida útil. Por ello, es necesario implementar técnicas de inspección que

permitan verificar sus características después de la manufactura comparándolas con el modelo ideal esperado. En metrología óptica, destacan las técnicas ópticas sin contacto, las cuales ofrecen alta precisión. Técnicas como la triangulación láser y la proyección de patrones son herramientas ampliamente utilizadas para la obtención de información tridimensional. La triangulación láser permite generar modelos digitalizados y detallados de las superficies bajo prueba, mientras que la proyección utiliza patrones luminosos que se deforman de acuerdo con la topografía del objeto inspeccionado; usualmente se utilizan franjas o puntos, cuyos cambios son registrados mediante cámaras o sistemas de detección. Posteriormente, mediante el procesamiento de imágenes y el uso de algoritmos especializados, es posible reconstruir digitalmente los objetos, obteniendo sus dimensiones y formas originales (Castillo-Santiago et al., 2024; García-Granero et al., 2023; Moreno-Oliva et al., 2019). Una

gran variedad de técnicas de óptica aplicada en metrología se utiliza tanto en investigación científica, como en instalaciones industriales.

2. CONCEPTOS BÁSICOS

En este apartado se describen algunos conceptos necesarios para la aplicación de técnicas de reconstrucción en superficies aerodinámicas, particularmente en álabes de aerogeneradores de baja potencia. Para ello, es importante analizar los perfiles de los álabes y verificar que su geometría se ajuste a las características ideales definidas por el perfil aerodinámico de diseño, garantizando así un desempeño adecuado durante su operación (Soomro et al., 2026).

2.1 AEROGENERADOR

Un aerogenerador o turbina eólica es una instalación compleja que convierte la energía cinética del viento en energía mecánica, y posteriormente en electricidad. Los aerogeneradores se pueden clasificar según la orientación de sus álabes, de eje horizontal y de eje vertical como la Figura 1. Los más eficientes y utilizados actualmente son los de eje horizontal debido a su gran tamaño y altura (Maradin et al., 2021). Sus tres componentes principales para la conversión de energía son el rotor o sistema de captación del viento, la caja de engranajes o multiplicadora y el generador eléctrico.

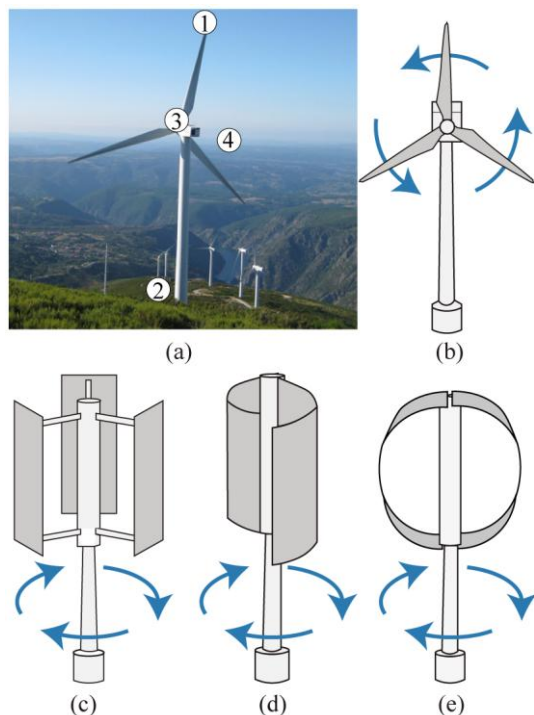


Figura 1. (a) Aerogenerador que muestra sus partes principales: (1) Álabes. (2) Torre. (3) Buje del rotor. (4) Gondola (AMDEE, 2024). (b) HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine). (c) H-Rotor. (d) Savonius. (e) Darrieus.

2.2 ÁLABES

Los álabes de los aerogeneradores son superficies aerodinámicas diseñadas para captar la energía cinética del viento y transformarla en energía mecánica de rotación del rotor como en la Figura 2. Su geometría caracterizada por una forma alargada y un perfil aerodinámico curvo permite generar fuerzas de sustentación al interactuar con el flujo de aire. Su diseño influye directamente en la eficiencia del aerogenerador determinando cuánta energía puede extraerse del viento.



Figura 2. Montaje de un álabes de aerogenerador (Schmidbauer, 2026).

2.3 PERFIL AERODINÁMICO

El perfil aerodinámico constituye el elemento geométrico fundamental en un álabes, así como en la Figura 3, ya que determina la distribución de presiones que se genera debido al flujo de aire y las fuerzas aerodinámicas que ponen en funcionamiento el rotor (Afshari et al., 2023).

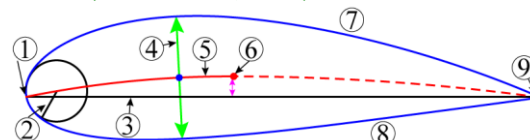


Figura 3. Estructura de un perfil aerodinámico. (1) Borde de ataque. (2) Radio de borde de ataque. (3) Línea de cuerda. (4) Espesor máximo. (5) Región de curva máxima. (6) Línea de curvatura media. (7) Superficie exterior (Extradós). (8) Superficie inferior (Intradós). (9) Borde de salida.

2.4 MODELO PINHOLE

El modelo *pinhole* explica la propagación rectilínea de la luz entre dos cavidades, a través de un orificio de dimensiones muy pequeñas. Una cámara ideal se puede modelar como un sistema pinhole donde la luz proveniente de un objeto atraviesa una pequeña abertura y los rayos luminosos se proyectan en línea recta sobre una superficie receptora, formando una imagen invertida en el sensor de la cámara Figura 4. Debido a esta simplificación, se puede analizar y modelar de manera eficiente los sistemas de captura

y procesamiento de imágenes (Jang et al., 2022; Zhou et al., 2022).

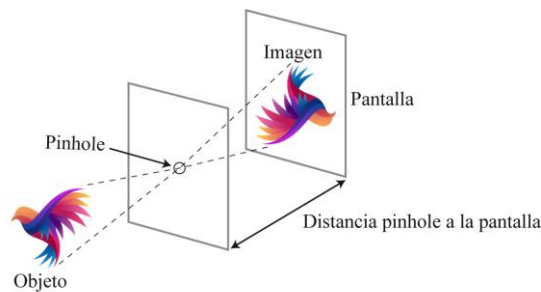


Figura 4. Formación de imagen en un modelo *pinhole*.

3. METODOLOGÍA

En esta sección se presenta la metodología empleada en el sistema óptico para la reconstrucción de perfiles aerodinámicos en álabes de aerogeneradores bajo condiciones controladas de laboratorio. Asimismo, se describe de manera general el procedimiento seguido para la calibración de la cámara y el procesamiento de imágenes.

3.1 PROPUESTA DEL SISTEMA ÓPTICO

El sistema óptico que se muestra en la **Figura 5**, consiste en una computadora, un proyector y una cámara como elementos electrónicos, y el objeto bajo prueba, que en este trabajo es una sección de álabes para aerogenerador. La superficie es tratada como un objeto opaco por lo cual el proyector puede iluminar o desplegar un patrón de franjas el cual es editable desde la computadora. La cámara, al estar colocada a un ángulo de 45° respecto al eje Z, observa el patrón proyectado con deformaciones.

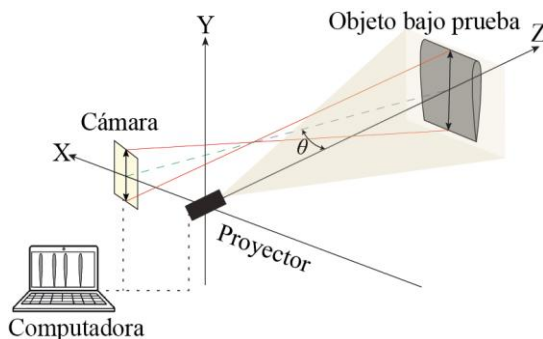


Figura 5. Propuesta del montaje experimental de proyección de franjas en una superficie aerodinámica.

Primeramente, se alinea el sistema utilizando un plano de referencia, **Figura 6**, se realiza una proyección de franjas prediseñadas sobre una superficie opaca que se considera plana y al observarse desde un ángulo de 45° se tomará una fotografía que se considera la posición ideal o inicial del sistema. Esta referencia visual permite ajustar ambos dispositivos respecto al plano de referencia,

asegurando que la cámara quedará centrada y que el sistema de medición funcionará bajo las condiciones geométricas adecuadas.

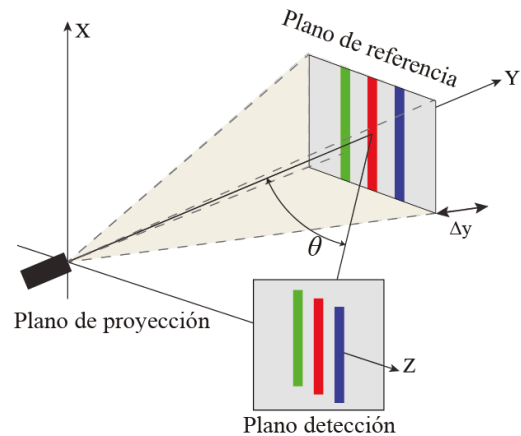


Figura 6. Esquema del montaje experimental de proyección de franjas en una superficie plana.

3.2 DISEÑO DEL PATRÓN DE FRANJAS

Como se mencionó, la metodología se utilizan tres elementos electrónicos los cuales comparten la característica de tener o desplegar píxeles, el proyector utilizado tiene una resolución de 1920 1080 px y la cámara una resolución de 752 480 px; la resolución de la computadora debe ser igual o mayor al del proyector. Una franja como la unión vertical u horizontal de una serie de píxeles del mismo color, definiendo así el ancho y largo de una franja en términos del píxel del proyector o de la cámara. En la **Figura 7**, se puede observar una franja clara en fondo oscuro, con un ancho de 6 px, considerando que el rectángulo oscuro mide 1920 1080 px. Se crean algoritmos simples o utilizar programas de diseño para crear una cantidad variable de franjas, así como modificar su ancho y largo. Este procedimiento permite obtener una distribución controlada de franjas que posteriormente puede emplearse en sistemas de medición óptica y análisis de superficies (Lin & Han, 2021; Zhang, 2010). La imagen resultante se almacena en formato TIFF para conservar su calidad, evitar los errores de muestreo en los píxeles y permitir su implementación en el sistema de proyección.

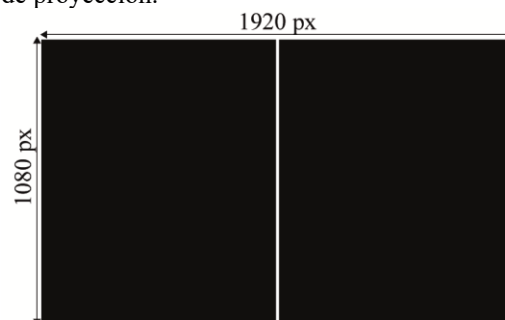


Figura 7. Diseño de una franja clara de 6 píxeles sobre una imagen con resolución de 1920 × 1080 píxeles.

Para diseñar el patrón de múltiples franjas que se utilizará para la evaluación, se considera el grosor de las franjas, el largo de las franjas, la frecuencia y la cantidad final, ya que las dimensiones de la imagen proyectada en el plano de referencia deben contener a la superficie bajo prueba, en la **Figura 8** podemos observar patrones con distintas frecuencias de acuerdo con la cantidad de perfiles aerodinámicos que sea posible analizar simultáneamente y a las capacidades de proyección y detección del sistema óptico utilizado.

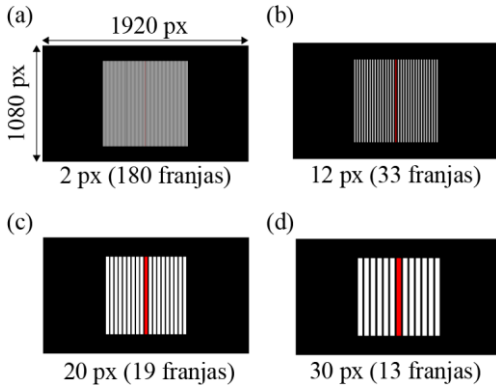


Figura 8. Patrones de franjas con diferentes grosores y frecuencias con resolución de 1920×1080 px para diferentes anchos de franja: (a) 2 px, (b) 12 px, (c) 20 px y (d) 30 px (la franja central se indica de color rojo).

3.3 MONTAJE EXPERIMENTAL

A partir de las pruebas realizadas, fue posible identificar el patrón de franjas necesario para la evaluación de la superficie bajo prueba en este trabajo. Las franjas de 2 píxeles presentan dificultades para analizarse en conjunto debido a su proximidad, las de 12 píxeles ofrecen mejores resultados al contar con mayor separación, finalmente las franjas de 30 píxeles permiten un procesamiento de imágenes más robusto, por esta razón, este patrón fue seleccionado. Como se muestra en la **Figura 9**, se debe considerar que el tamaño de las franjas proyectadas en el plano de referencia varía con la distancia respecto del proyector, cada franja proyectada tiene un ancho de 4.8 mm y una separación de $\Delta z = 9.6$ mm entre centros.

3.4 TOMA DE FOTOGRAFÍAS

Para poder evaluar una superficie colocada en una posición cercana al plano de referencia, en este trabajo se propone una calibración por corrimiento mecánico en dirección de la propagación de la proyección. Se realizaron capturas fotográficas del plano de referencia utilizando una cámara CMOS colocada a un ángulo de $\theta = 45^\circ$ respecto al proyector. Durante el proceso, se aplicaron desplazamientos mecánicos controlados de 1 mm con un desplazamiento acumulado de 20 mm, obteniendo una secuencia de 21 imágenes, cuyo muestreo se puede apreciar en la **Figura 10**.

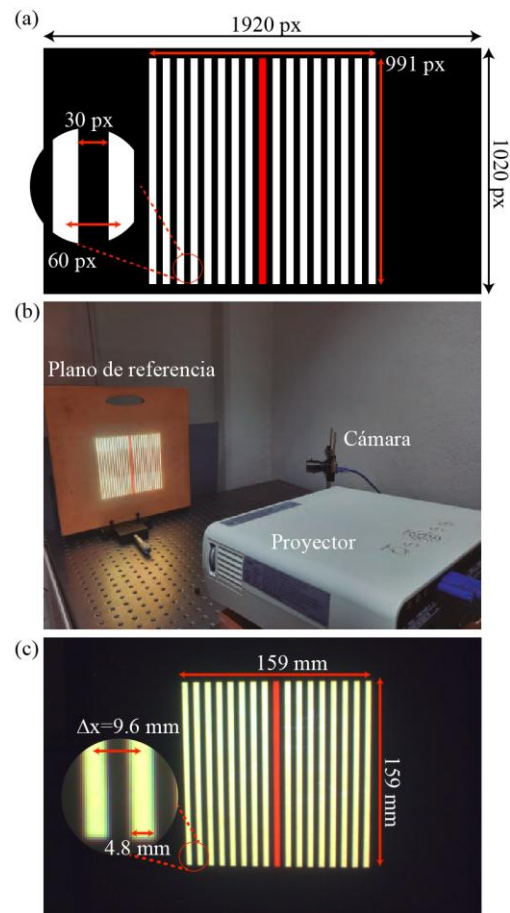


Figura 9. Relación entre el diseño original y su proyección: (a) Patrón prediseñado. (b) Montaje a nivel laboratorio. (c) Fotografía obtenida en el plano de proyección.

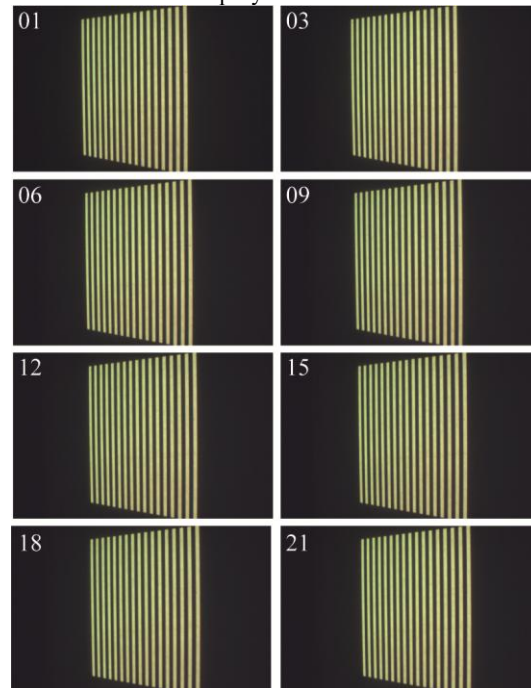


Figura 10. Fotografía con la cámara CMOS de la proyección en el plano de referencia.

3.5 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

El proceso inicia importando las fotografías capturadas a un lenguaje de programación adecuado, por ejemplo, Python o Wolfram Mathematica. Inicialmente, el programa o algoritmo lee la imagen, como se muestra en la Figura 11, (a) todas las imágenes son convertidas a escala de grises promediando los tres canales RGB, como se muestra en el inciso (b). Para eliminar todo el ruido de la imagen que no pertenezca a las franjas, se fabrica la máscara del inciso (c) mediante la selección del nivel de intensidad correspondiente para aplicar un proceso de binarización, resultando en el inciso (c). La selección adecuada de la binarización es fundamental, ya que una elección incorrecta puede provocar pérdida de información y generar franjas incompletas en la imagen procesada. Finalmente, se aplica la imagen binarizada como máscara al inciso (b), con la finalidad de analizar exclusivamente las franjas completas proyectadas sobre el plano de referencia, manteniendo los valores de intensidad originales eliminando regiones que no aportan información relevante.

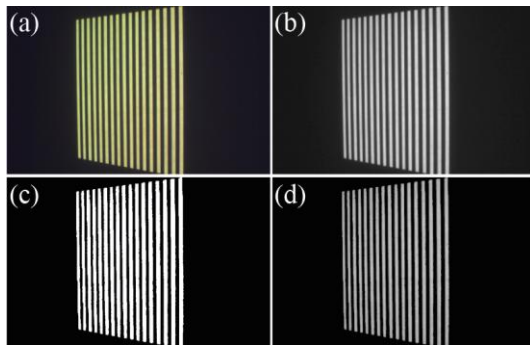


Figura 11. (a) Fotografía con la cámara CMOS. (b) Escala de grises. (c) Binarización. (d) Aplicación de máscara binarizada sobre escala de grises.

Resultado del procedimiento anterior, cada renglón de la matriz de píxeles en las imágenes de escala de grises tendrá la información de al menos una franja y, como máximo, del número total de franjas, lo que le permite al algoritmo obtener el centroide pesado por cada franja, por cada renglón, permitiendo el análisis de cada franja de manera independiente como un conjunto de centroides. El objetivo de este procedimiento es localizar las franjas proyectadas y calcular la estimación de los centroides correspondientes a cada una de ellas. En la Figura 12 se muestra una imagen procesada de las 21 obtenidas, donde es evidente que cada franja original está representada como una serie de centroides; asimismo, el renglón central de la imagen, marca en color magenta los centroides correspondientes, idealmente, al centro de cada franja.

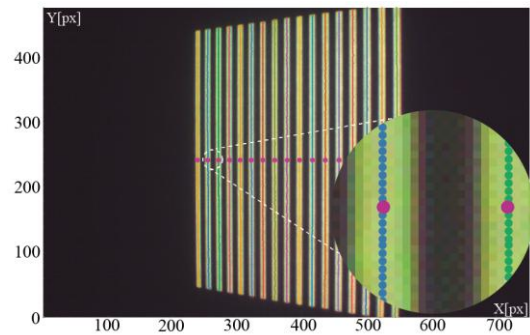


Figura 12. Representación de franjas a través de la estimación de una secuencia de centroides por renglón.

En la Tabla 1 se muestra un ajuste de recta con la estimación de centroides de cada franja en la fotografía central para corroborar la rectitud de las mismas.

Tabla 1. Ajuste de la recta con la estimación de centroides.

Franja	Forma $y = mx + b$
1	$146.315 x - 75484.7$
2	$164.316 x - 81682.1$
3	$179.026 x - 85680.0$
4	$200.537 x - 92348.6$
5	$270.064 x - 119653.0$
6	$285.662 x - 121608.0$
7	$392.812 x - 160605.0$
8	$390.664 x - 153198.0$
9	$390.664 x - 153198.0$
10	$432.899 x - 155904.0$
11	$219.813 x - 75610.1$
12	$-262.53 x + 86860.5$
13	$-206.89 x + 65390.3$
14	$-443.92 x + 133637.0$
15	$-295.81 x + 84889.7$
16	$-251.61 x + 68733.5$
17	$-257.764 x + 66925.8$

3.6 CALIBRACIÓN DEL SISTEMA ÓPTICO

El proceso de calibración del sistema de adquisición de imágenes ocupa un lugar muy importante para acceder a una aproximación tridimensional de un objeto que se coloque dentro del volumen calibrado por medio de desplazamientos mecánicos. Para esto, es necesario definir un modelo matemático para el proceso de transformación de la escena 3D a la imagen 2D, así como se muestra en la Figura 13, donde es evidente que los desplazamientos en Δy tienen una relación geométrica con Δz sin embargo en este trabajo se aproxima esa relación mediante una curva de calibración.

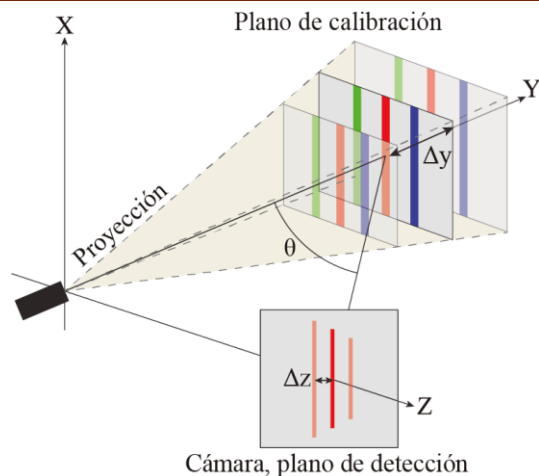


Figura 13. Diagrama de la relación entre los desplazamientos en el eje Y, y su relación con el plano de detección.

La calibración tiene como objetivo principal, conocer la sensibilidad que tendrá el sistema de medición en el espacio tridimensional donde se va a trabajar, y también la relación que existe entre píxeles y milímetros de los dos planos involucrados. En este trabajo se calcula una curva de calibración por el movimiento de cada franja, para iniciar el procedimiento de una franja, se toma como punto inicial la posición del centroide correspondiente al renglón central de la fotografía número 01, en la **Figura 14** (a) se muestra en color magenta el centroide correspondientes al renglón central en todas las franjas de la fotografía central, y en color verde el comportamiento del centroide último de izquierda a derecha, mostrando como el desplazamiento mecánico de Δy causa un desplazamiento de las franjas en el plano de detección provocando un desplazamiento Δz medido píxeles. Es decir, por cada desplazamiento de 1 mm realizado cada franja se mueve una cantidad determinada de píxeles, que podemos graficar, como se muestra en la **Figura 14** (b). Este procedimiento permitió analizar la variación espacial de las franjas durante el desplazamiento.

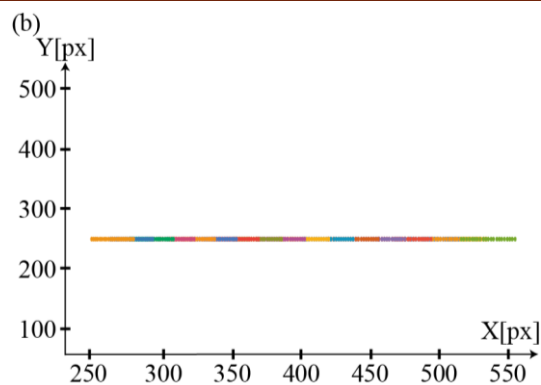
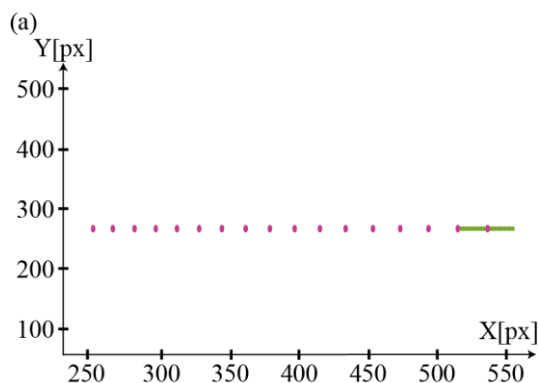


Figura 14. Estimación de los centroides de las franjas proyectadas. (a) Distribución obtenida para la última imagen. (b) Superposición de las estimaciones correspondientes al conjunto de las 21 imágenes.

Una vez obtenida la una relación Δz en píxeles y su respectivo valor en Δy en milímetros, se aplicaron ajustes polinómicos de primer, segundo y tercer grado para obtener curvas aproximadas de calibración, como se muestra en la **Figura 15**, para una única franja. Los pequeños desplazamientos realizados permitieron obtener una buena concordancia con los modelos del ajuste. Los ajustes de orden del segundo y tercer grado representan mejor los efectos no lineales de la distorsión y la profundidad de campo, efectos intrínsecos cuando se utilizan lentes en metrología óptica. En la **Figura 16**, se puede observar una mejor concordancia del ajuste lineal con los datos obtenidos, que presentan los puntos experimentales a los desplazamientos lineales de la franja central, ajustados mediante un polinomio de segundo grado. Finalmente, en la **Figura 17**, se presenta el ajuste del polinomio de segundo grado para cada una de las franjas claras. Esto con la finalidad de observar que todas las franjas necesitan su propia curva de calibración ya que la variación entre ellas sustancial.

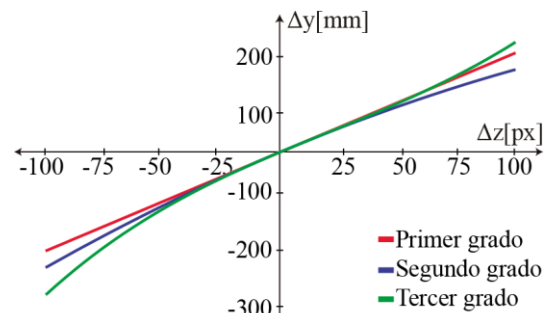


Figura 15. Curva de ajuste de polinomios para primer, segundo y tercer grado.

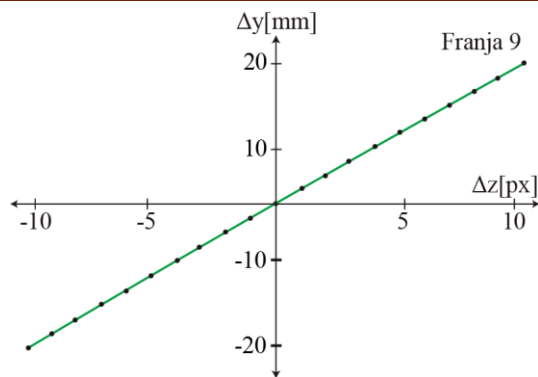


Figura 16. Curva de calibración para la franja central mostrando los centroides centrales.

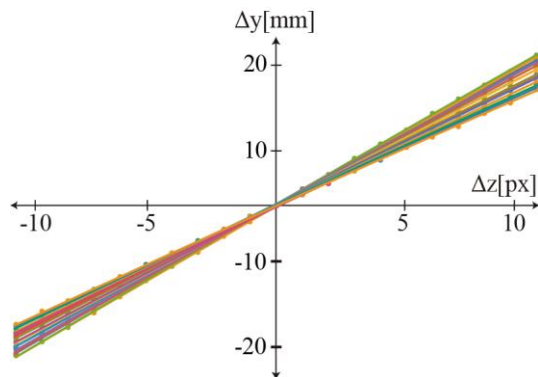


Figura 17. Curvas de calibración para cada una de las franjas mostrando los centroides centrales.

4. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de las mediciones experimentales realizadas sobre el objeto de estudio, utilizando el sistema óptico desarrollado presentado y calibrado previamente, para la adquisición y análisis de datos. Los resultados obtenidos permiten evaluar el desempeño del método propuesto y verificar su capacidad para caracterizar la geometría del objeto bajo condiciones controladas de laboratorio como iluminación controlada, exposición constante de la cámara, distancias fijas entre el arreglo experimental y el ángulo determinado de la cámara.

4.1 ANÁLISIS DE PERFILES AERODINÁMICOS INDEPENDIENTES

Una vez completada la alineación del sistema, como se muestra en la Figura 18, se procede a capturar las imágenes de la sección del álabo para aerogenerador de baja potencia. Esta etapa permite registrar la información proyectada sobre la superficie de prueba, la cual será utilizada posteriormente para el procesamiento digital de imágenes y la reconstrucción de la geometría del perfil. Es importante mencionar que, debido a la forma de los perfiles aerodinámicos y al utilizar solamente una cámara, es necesario tomar dos fotografías; una en cada cara de la sección, que podemos identificar como extradós e intradós.

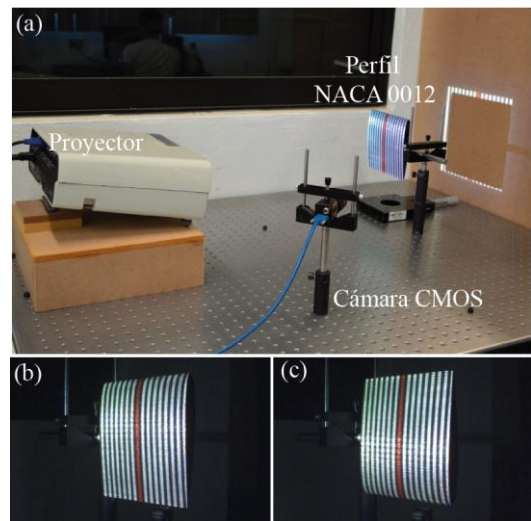


Figura 18. Implementación de la técnica de proyección de franjas: a) Montaje experimental utilizado. b) Patrón de franjas proyectado sobre el intradós del perfil NACA 0012. c) Patrón de franjas proyectado sobre el extradós del mismo perfil.

Una vez capturadas las imágenes, estas se exportan para ser procesadas mediante un algoritmo que permite obtener los centroides de las franjas deformadas en el objeto analizado, como se muestra en la Figura 19. Dichos centroides, representan la posición de las franjas sobre el perfil NACA 0012 y son exportados para su uso en la reconstrucción y análisis geométrico del objeto.

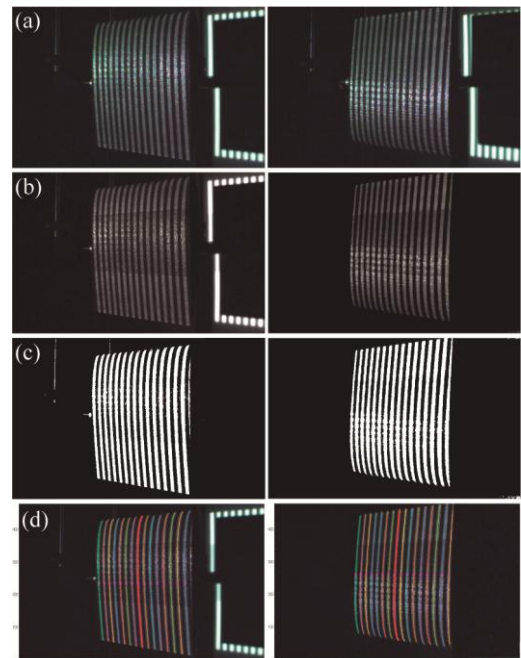


Figura 19. Etapas del procesamiento de imágenes aplicadas al perfil NACA 0012 para el intradós y el extradós del perfil: a) Captura de imagen. b) Conversión a escala de grises. c) Binarización. d) Estimación de centroides.

Una vez obtenido la estimación de centroides del intradós y extradós dentro del espacio de píxeles, se

realiza una comparación grafica de las franjas rectas de la sección de calibración, como se muestra en la Figura 20, se utiliza cada franja de la fotografía central, para obtener la unión del intradós y extradós y formar el perfil completo en la sección del álabe, se utiliza como referencia el centroide superior e inferior de la imagen central y así obtener la relación entre ellas.

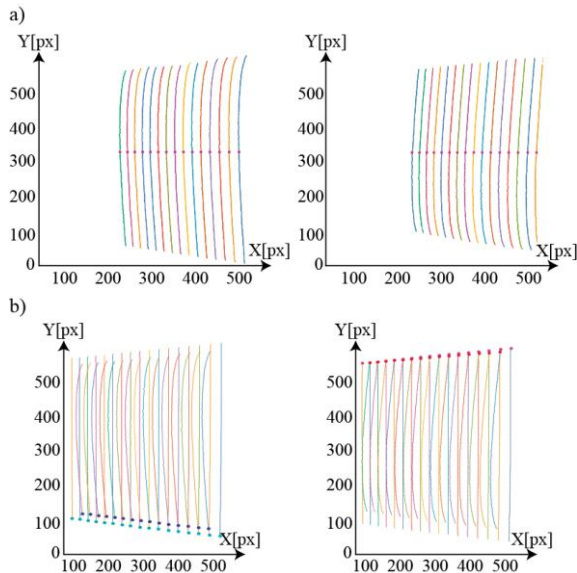


Figura 20. Estimación de centroides de la sección NACA 0012 a) Verificación de centroides. b) Cálculo de la relación entre centroides inicial y final con sus homónimos en las franjas deformadas.

A partir de los desplazamientos determinados en la calibración del eje “Y”, se capturó una imagen central en la que las franjas proyectadas sobre el plano de referencia se visualizan las franjas completas. La relación entre las distancias en píxeles (px) y milímetros (mm) para todas las franjas, así como en la Tabla 2, los ajustes se realizaron mediante suma o resta de píxeles empleados para calcular la posición de cada punto.

Tabla 2. Ajuste de coordenadas mediante variación del número de píxeles empleados en el cálculo de posición.

Intradós	Extradós
527.515 px, 239.5 px	527.515 px, 239.5 px
508.363 px, 239.5 px	508.363 px, 239.5 px
489.469 px, 239.5 px	489.469 px, 239.5 px
471.035 px, 240.5 px	471.035 px, 240.5 px
452.999 px, 239.5 px	452.999 px, 239.5 px
435.474 px, 240.5 px	435.474 px, 240.5 px
418.135 px, 240.5 px	418.135 px, 240.5 px
401.489 px, 240.5 px	401.489 px, 240.5 px
385.270 px, 240.5 px	385.270 px, 240.5 px
368.957 px, 240.5 px	368.957 px, 240.5 px
353.067 px, 240.5 px	353.067 px, 240.5 px
337.952 px, 241.5 px	337.952 px, 241.5 px

En la Tabla 3, se muestra la relación en píxeles verticales, se obtuvo a través de una medición de manera manual, con la proyección que se realizó con el plano de referencia del punto central obteniendo la medición de cada franja del plano de referencia con una medición de 162 mm.

Tabla 3. Relación de píxeles a milímetros.

Franja	Relación a mm
1	0.387 mm
2	0.392 mm
3	0.396 mm
4	0.400 mm
5	0.406 mm
6	0.411 mm
7	0.415 mm
8	0.420 mm
9	0.425 mm
10	0.429 mm
11	0.434 mm
12	0.440 mm
13	0.446 mm
14	0.450 mm
15	0.455 mm
16	0.460 mm
17	0.465 mm

Con las relaciones en píxeles verticales y del plano de referencia obtenemos la reconstrucción de la sección del álabe y se realiza una comparación con el perfil ideal esto con la finalidad de visualizar si concuerda.

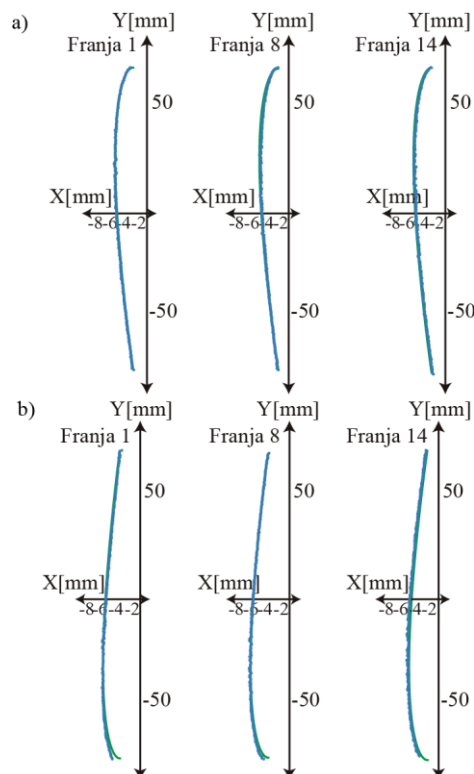


Figura 21. Reconstrucción de una sección del perfil NACA 0012. a) Intradós. b) Extradós.

Se realizó una segunda prueba experimentales utilizando una sección de álabe con nomenclatura FX63-137, como se presenta en la Figura 22, mediante la aplicación de la proyección de franjas claras y oscuras.

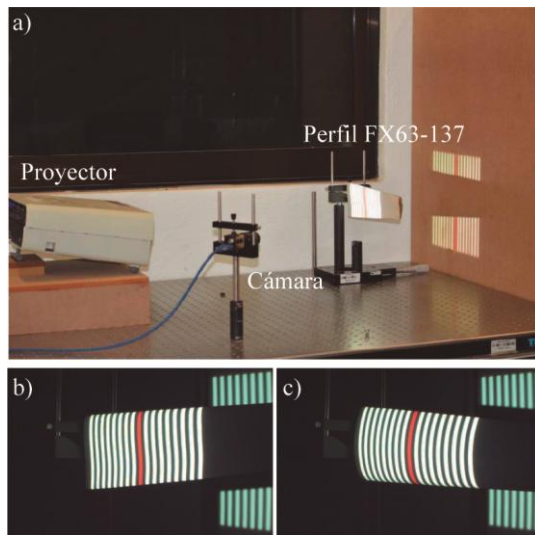


Figura 22. Fotografía de la sección FX63-137: a) Implementación de la técnica de proyección de franjas. b) Intrados. c) Extradós.

Se llevó a cabo una reconstrucción cualitativa de una sección del álabe FX63-137, obteniendo los centroides del intradós y extradós, como se muestra en la Figura 23, con el propósito de realizar una reconstrucción completa de su geometría.

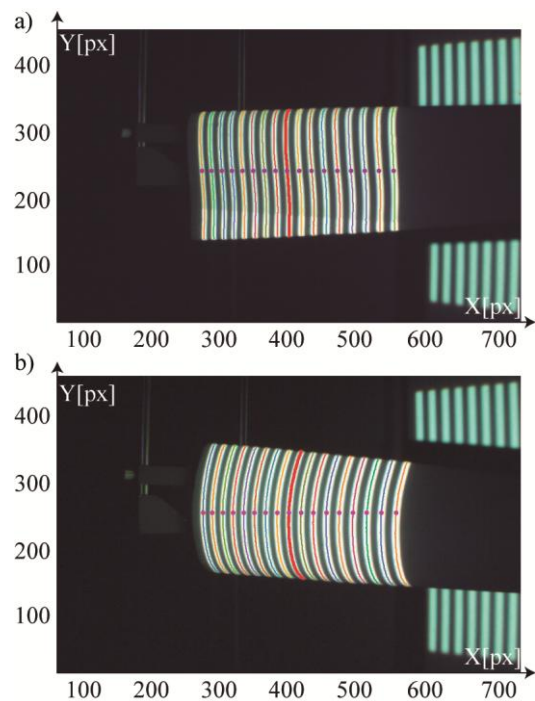


Figura 23. Análisis de imagen aplicado al perfil FX63-137 para la estimación de centroides. a) Intrados. b) Extradós.

Se obtuvieron las reconstrucciones del extradós de la sección de álabe analizada, correspondiente al perfil FX63-137, y posteriormente se realizó una comparación con el perfil ideal.

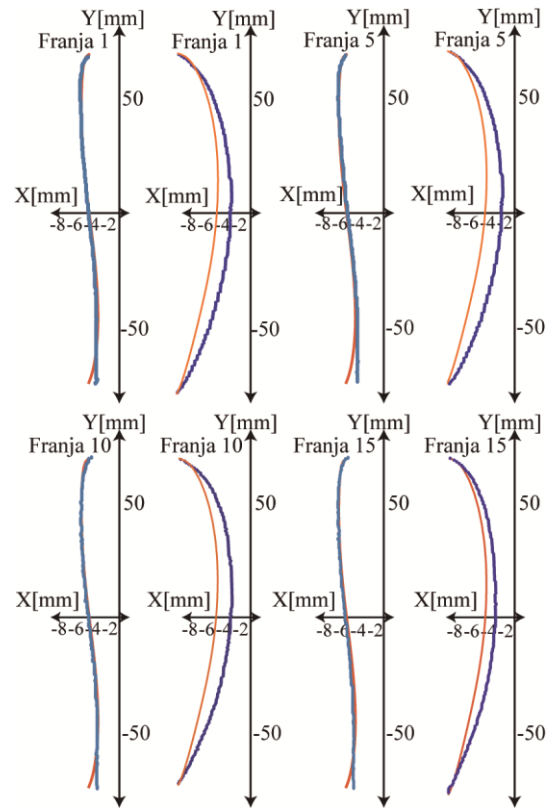


Figura 24. Reconstrucción de una sección del perfil FX63-137. a) Intrados. b) Extradós.

4.2 COMPARACIÓN DE DISTINTOS PERFILES

Se obtiene la reconstrucción de la sección del álabe, se realiza la unión de todas las reconstrucciones de estas dos superficies (extradós e intradós) con la ayuda del emparejamiento de posiciones para obtener el perfil completo y para validar el método, se utilizó el perfil ideal de la familia NACA 0012, el cual tiene la ecuación:

$$z_t = 5t \left[0.2969 \sqrt{\left(\frac{y}{c}\right)} - 0.1260 \left(\frac{y}{c}\right) - 0.1365 \left(\frac{y}{c}\right)^2 + 0.2843 \left(\frac{y}{c}\right)^3 - 0.1015 \left(\frac{y}{c}\right)^4 \right] \quad (1)$$

En la Figura 25, se muestra la unión de los perfiles de la comparación de los datos experimentales obtenidos por la técnica óptica y el perfil ideal.

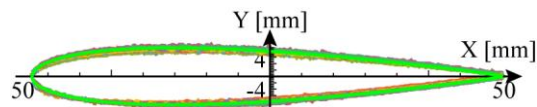


Figura 25. Resultado de la unión de las curvas del intradós y extradós del perfil NACA 0012 comparado con la geometría ideal.

En la **Tabla 4**, se muestra las discrepancias RMS que presentan los datos experimentales del intradós y extradós respecto al perfil ideal.

Tabla 4. Discrepancias RMS del NACA 0012.

Reconstrucción	Error RMS Intradós	Error RMS Extradós
1	0.0461 mm	0.0281 mm
2	0.0536 mm	0.0328 mm
3	0.0467 mm	0.0261 mm
4	0.0471 mm	0.0362 mm
5	0.0446 mm	0.0366 mm
6	0.0435 mm	0.0370 mm
7	0.0479 mm	0.0355 mm
8	0.0369 mm	0.0373 mm
9	0.0354 mm	0.0353 mm
10	0.0544 mm	0.0499 mm
11	0.0558 mm	0.0479 mm
12	0.0459 mm	0.0467 mm
13	0.0455 mm	0.0691 mm
14	0.0465 mm	0.0536 mm
15	0.0467 mm	0.0835 mm
Prom. Gral.	0.0465 mm	0.0438 mm

En la **Figura 26**, se observa que existe una buena calidad de manufactura de la sección NACA 0012 bajo prueba comparado con el perfil ideal, ya que los errores promedios tanto del extradós e intradós son del orden de 0.04515 mm.

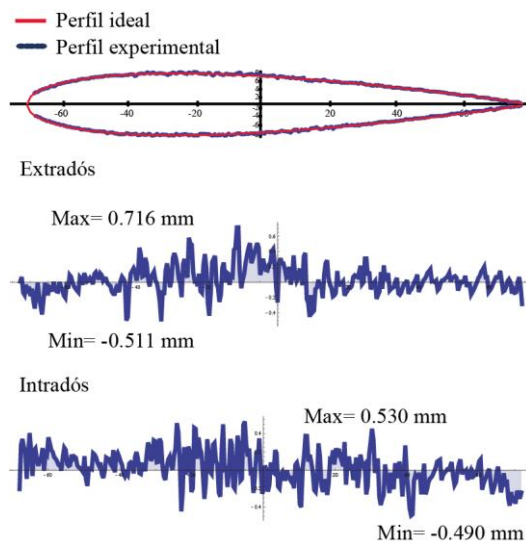


Figura 26. Comparación del perfil NACA0012 ideal contra el perfil experimental.

En la **Figura 27**, se presenta la superposición de todos los perfiles reconstruidos junto con el perfil ideal FX63-137 para realizar su comparación. De manera cualitativa, se observan mayores discrepancias en el extradós; esto se atribuye a modificaciones realizadas al diseño original del perfil con el objetivo de facilitar su manufactura, incrementando el espesor en el borde de salida.

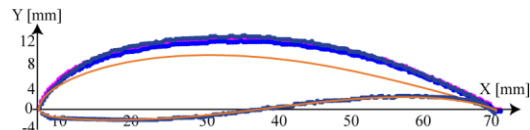


Figura 27. Superposición de los perfiles experimentales reconstruidos con el perfil ideal FX63-137.

En la **Tabla 5**, se muestra las discrepancias RMS que presentan los datos experimentales del intradós y extradós respecto al perfil ideal.

Tabla 5. Discrepancias RMS del FX63-137.

Reconstrucción	Error RMS Intradós	Error RMS Extradós
1	7.056 mm	0.0498 mm
2	5.029 mm	0.0508 mm
3	7.286 mm	0.0531 mm
4	7.077 mm	0.0455 mm
5	7.510 mm	0.0458 mm
6	9.463 mm	0.0317 mm
7	7.610 mm	0.0340 mm
8	6.271 mm	0.0359 mm
9	6.506 mm	0.0397 mm
10	6.396 mm	0.0716 mm
11	6.396 mm	0.0605 mm
12	5.581 mm	0.0418 mm
13	5.010 mm	0.0684 mm
14	3.922 mm	0.0487 mm
15	2.118 mm	0.0442 mm
Prom. Gral.	6.146 mm	0.0481 mm

En la **Figura 28**, se observa una superposición de la franja central y el perfil teórico, además de sus discrepancias verticales en milímetros.

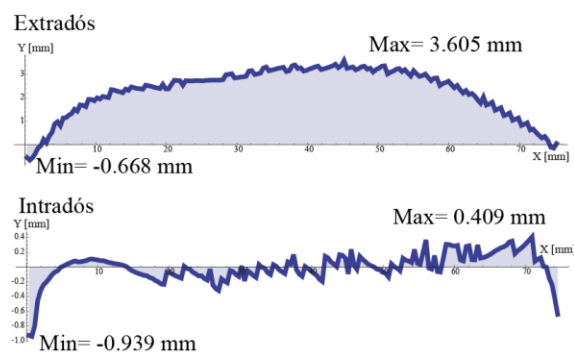


Figura 28. Comparación del perfil FX63-163 ideal contra el perfil experimental.

5. DISCUSIÓN

La técnica de proyección de franjas constituye una alternativa de bajo costo para la reconstrucción tridimensional de superficies, al requerir una instrumentación relativamente sencilla y permitir la adquisición rápida de imágenes. La resolución obtenida en este trabajo (≈ 0.05 mm) es comparable con la reportada en estudios similares y resulta adecuada para la inspección geométrica de perfiles aerodinámicos. Sin embargo, esta resolución depende de factores como la resolución de la cámara, la geometría del sistema, el ángulo de observación y la distancia de medición. La calibración individual de cada franja mejora la correspondencia entre el patrón proyectado y la geometría reconstruida, lo que contribuye a reducir errores y aumentar la precisión de la medición. No obstante, este procedimiento incrementa el tiempo de calibración y requiere mantener estable la configuración experimental para conservar la exactitud del sistema. Como limitaciones, el procesamiento de imágenes y la reconstrucción tridimensional demandan tiempos de cómputo considerables, mientras que la obtención manual puede afectar la repetibilidad de las mediciones. A pesar de ello, la metodología presenta un alto potencial para aplicaciones de inspección y control de calidad de componentes aerodinámicos, especialmente en sistemas de bajo costo, siendo recomendable la automatización del proceso y calibración para su implementación en entornos industriales.

6. CONCLUSIÓN

En este trabajo se presentó una metodología para la reconstrucción tridimensional de álabes mediante la técnica de proyección de franjas, orientada a la inspección de calidad de perfiles aerodinámicos en aerogeneradores de baja potencia y desarrollada en el Laboratorio de Óptica Aplicada de la UNISTMO. Las contribuciones científicas más relevantes de este trabajo son: (i) el desarrollo e implementación de un sistema experimental basado en proyección de franjas capaz de realizar reconstrucción tridimensional y análisis simultáneo de múltiples perfiles del álabe dentro de una misma; (ii) la demostración experimental de que la técnica constituye una alternativa de bajo costo para la caracterización de piezas de gran tamaño, permitiendo la evaluación de álabes con dimensiones del orden de 1–2 metros; y (iii) la identificación de que la calibración debe realizarse de forma individual para cada franja proyectada, debido a que una calibración global introduce errores sistemáticos que aumentan con la distancia respecto al centro del campo de medición. En términos metrológicos, el método alcanzó un error RMS de 0.0449 mm en la reconstrucción del perfil NACA 0012, obteniendo una precisión comparable e

incluso superior a la reportada mediante triangulación láser (0.06 mm), lo que valida la confiabilidad y exactitud del sistema desarrollado. Finalmente, la capacidad de reconstruir múltiples perfiles dentro de una misma sección aporta una herramienta para la inspección de calidad de manufactura, al permitir analizar variaciones geométricas longitudinales y fortalecer la evaluación integral del desempeño aerodinámico del álabe.

DECLARACIONES

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Los autores declaran no haber utilizado herramientas de Inteligencia Artificial, tradicional y/o generativa.

Los datos utilizados que sustentan los resultados que se presentan en las tablas y las imágenes del artículo no están disponibles públicamente. Información adicional puede obtenerse de los autores bajo solicitud debidamente sustentada.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto se llevó a cabo en el Laboratorio de Óptica Aplicada de la Universidad del Istmo. Este trabajo fue parcialmente financiado por el proyecto DGAPA-PAPIIT IT104525.

REFERENCIAS

- Probst, O. (2024). Clean energy and carbon emissions in Mexico's electric power sector: Past performance and current trend. *Energies*, 17(23), 5859. <https://doi.org/10.3390/en17235859>
- Roga, S., Bardhan, S., Kumar, Y., & Dubey, S. K. (2022). Recent technology and challenges of wind energy generation: A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102239. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102239>
- Moreno-Oliva, V. I., Román-Hernández, E., Torres-Moreno, E., Dorrego-Portela, J. R., Avendaño-Alejo, M., Campos-García, M., & Sánchez-Sánchez, S. (2019). Measurement of quality test of aerodynamic profiles in wind turbine blades using laser triangulation technique. *Energy Science & Engineering*, 7(5), 2180–2192. <https://doi.org/10.1002/ese3.423>
- Castillo-Santiago, G., Moreno-Oliva, V. I., Roman-Hernandez, E., Ortega-Vidals, P., Campos-García, M., & Montoya-De Los Santos, I. (2024). Null projection screen test for aerodynamic surfaces on wind turbine blades. *Applied Optics*, 63(28), 7580–7587. <https://doi.org/10.1364/AO.533708>

- Soomro, S. A., Mirjat, N. H., Arshad, N., Uqaili, M. A., & Khatri, S. A. (2026). Machine learning applications in wind energy production: Current status, challenges, and future directions. *Wind Engineering*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1177/0309524X261423723>
- Asociación Mexicana de Energía Eólica. (2024). *México podría atraer hasta 50 mil millones de dólares en el sector eólico para 2050*. <https://amdee.org/en/noticias/mexico-podria-atraer-hasta-50-mil-millones-de-dolares-en-el-sector-eolico-para-2050/>
- Maradin, D., Cerović, L., & Šegota, A. (2021). The efficiency of wind power companies in electricity generation. *Energy Strategy Reviews*, 37, 100708. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2021.100708>
- Schmidbauer. (2026). *Time to turn: The second wind turbine in Freimann was erected with the support of Schmidbauer*. Retrieved February 24, 2026, from <https://www.schmidbauer-group.com/our-projects/detail/zeit-dass-sich-was-dreht-das-zweite-windrad-in-freimann-steht-mit-unterstuetzung-von-schmidbauer/>
- Afshari, F., Khanlari, A., Sözen, A., Tuncer, A. D., Ates, I., & Sahin, B. (2023). CFD analysis and experimental investigation to determine the flow characteristics around NACA 4412 airfoil blades at different wind speeds and blade angles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 237(5), 1915–1925. <https://doi.org/10.1177/09544089221128421>
- Zhang, S. (2010). Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques. *Optics and Lasers in Engineering*, 48(2), 149–158. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2009.03.008>
- Lin, H., & Han, Z. (2021). Automatic optimal projected light intensity control for digital fringe projection technique. *Optics Communications*, 484, 126574. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.126574>
- Jang, M., Lee, S., Kang, J., & Lee, S. (2022). Technical consideration towards robust 3D reconstruction with multi-view active stereo sensors. *Sensors*, 22(11), 4142. <https://doi.org/10.3390/s22114142>
- Zhou, P., Wang, Y., Xu, Y., Cai, Z., & Zuo, C. (2022). Phase-unwrapping-free 3D reconstruction in structured light field system based on varied auxiliary point. *Optics Express*, 30(17), 29957–29968. <https://doi.org/10.1364/OE.468049>
- García-Granero, A., Jerí Mc-Farlane, S., Gamundí Cuesta, M., & González-Argente, F. X. (2023). Aplicación de reconstrucción 3D e inteligencia artificial a la escisión completa de mesocolon y linfadenectomía D3 en el cáncer de colon. *Cirugía Española*, 101(5), 359–368. <https://doi.org/10.1016/j.ciresp.2022.10.023>

Realidad virtual inmersiva como herramienta didáctica para la comprensión de prototipos dentro del sector eólico: el caso del aerogenerador Quetzal

J. JESÚS ARELLANO PIMENTEL¹ | JHOVANA ARAMIS ESCOBAR LÓPEZ¹ | GUADALUPE TOLEDO TOLEDO^{1,*}

¹ Ingeniería en Computación, Universidad del Istmo, Campus Tehuantepec, Oaxaca, México.

* Correspondencia: gtoledo@unistmo.edu.mx

Recibido: 15/06/2026

Revisado: 25/06/2026

Aceptado: 01/07/2026

Publicado: 08/07/2026

RESUMEN: La realidad virtual inmersiva se ha consolidado como un recurso didáctico con alto potencial para favorecer la comprensión de sistemas complejos mediante experiencias interactivas, contextualizadas y de elevada riqueza perceptual. En este trabajo se presenta el desarrollo de una plataforma inmersiva 3D del aerogenerador Quetzal de 30 kW, diseñado por el Centro de Tecnología Avanzada de Querétaro (CIATEQ), con el propósito de apoyar procesos de formación técnica y aprendizaje en el sector eólico. La construcción del Sistema de Realidad Virtual Inmersivo (SRVI) se sustentó en un modelo de desarrollo incremental de software e integró herramientas de modelado 3D, un motor gráfico, dispositivos de interacción y un casco de realidad virtual. La versión preliminar del sistema fue sometida a una evaluación inicial mediante una encuesta de satisfacción, con el fin de estimar su aceptabilidad y utilidad percibida como apoyo al aprendizaje, así como de orientar mejoras posteriores. Los resultados obtenidos permiten valorar favorablemente el sistema desarrollado como una herramienta didáctica para la visualización, exploración y comprensión de un prototipo eólico y de su entorno de instalación.

ABSTRACT: Immersive virtual reality has emerged as a didactic resource with strong potential to support the understanding of complex systems through interactive, contextualized, and perceptually rich experiences. This paper presents the development of a 3D immersive platform for the 30 kW Quetzal wind turbine designed by the Advanced Technology Center of Querétaro (CIATEQ), with the aim of supporting technical training and learning processes in the wind sector. The construction of the Immersive Virtual Reality System (SRVI) was based on an incremental software development model and integrated 3D modeling tools, a graphics engine, interaction devices, and a virtual reality headset. A preliminary version of the system was assessed through an initial satisfaction survey to estimate its acceptability and perceived usefulness as a learning support tool, as well as to guide subsequent improvements. The findings allow a favorable appraisal of the developed system as a didactic tool for the visualization, exploration, and understanding of a wind-energy prototype and its installation environment.

Palabras clave: Indicadores macroeconómicos, Crecimiento, Inflación, Política monetaria, Perspectivas 2026

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el desarrollo de ambientes virtuales inmersivos ha cobrado especial relevancia debido a su capacidad para generar experiencias de alta presencia y favorecer la comprensión de fenómenos complejos en contextos difíciles de reproducir físicamente. La Realidad Virtual (RV) se ha extendido hacia ámbitos como el industrial, el educativo y el energético, donde se aprovecha para representar sistemas complejos, apoyar la visualización tridimensional y enriquecer procesos de formación. Estudios recientes y revisiones sistemáticas han documentado que la RV puede fortalecer la

adquisición de conocimientos, la comprensión espacial y la motivación en contextos educativos y de capacitación técnica (Acevedo et al., 2024; Lampropoulos et al., 2025).

Un caso particularmente relevante es el del Centro de Tecnología Avanzada de Querétaro (CIATEQ), institución con un interés estratégico en el sector energético y, de manera específica, en la generación eólica. En este contexto, CIATEQ desarrolló el aerogenerador Quetzal de 30 kW (AQ-30kW), cuya configuración tecnológica constituye un referente valioso para la formación y la divulgación técnica en torno a sistemas eólicos de pequeña escala. De ahí, surge la necesidad de emplear un ambiente de

Realidad Virtual Inmersiva (RVI) como recurso didáctico que permita presentar la estructura, la topología y los elementos constitutivos del sistema sin depender exclusivamente de un modelo físico a escala. Desde esta perspectiva, el presente trabajo se inscribe en la línea de investigación que concibe la RVI como un medio para apoyar la comprensión de tecnologías existentes o en desarrollo.

El aprovechamiento de sistemas virtuales con orientación didáctica ofrece beneficios significativos para docentes, estudiantes y profesionales en formación. La evidencia reciente indica que la RV inmersiva puede contribuir a la comprensión de contenidos complejos, al desarrollo de habilidades espaciales y a la retención del aprendizaje, especialmente en áreas STEM e ingeniería (Conrad et al., 2024; Muzata et al., 2024). En este sentido, el realismo perceptual de las simulaciones inmersivas permite proyectar escenarios a escala natural y proporcionar experiencias de exploración difícilmente alcanzables mediante recursos de enseñanza tradicionales. Así, resulta posible observar, analizar y evaluar prototipos en etapas tempranas de desarrollo sin necesidad de producirlos, trasladarlos o intervenirlos físicamente.

Más allá de los contextos de formación formal, los medios inmersivos también han mostrado un potencial relevante para la difusión y divulgación de desarrollos científicos y tecnológicos. La literatura reciente sobre comunicación científica inmersiva señala que la realidad virtual y otras tecnologías extendidas permiten presentar información compleja de manera más accesible, interactiva y espacialmente comprensible, favoreciendo la apropiación social del conocimiento y ampliando las posibilidades de comunicación de prototipos, procesos e infraestructuras tecnológicas (Rubio-Tamayo et al., 2025).

En este orden de ideas, el área de interés del presente trabajo se enfoca en el uso de la RV dentro del sector energético, específicamente en lo relacionado con las energías renovables. En este mismo sentido, la literatura reciente ha documentado el valor de los entornos inmersivos para apoyar la comprensión de infraestructuras energéticas, la capacitación técnica y la apropiación conceptual de sistemas complejos (Alqallaf & Ghannam, 2024; Rahmaniar et al., 2025). En consecuencia, el objetivo de este trabajo consiste en documentar el desarrollo de un Sistema de Realidad Virtual Inmersivo (SRVI) orientado a favorecer la comprensión, visualización e interpretación de prototipos en el sector eólico, tomando como caso de estudio el aerogenerador Quetzal AQ-30kW.

2. MÉTODOS

A partir del trabajo de Arellano Pimentel et al. (2017) sobre el uso didáctico de la realidad virtual inmersiva

enfocada a la inspección de aerogeneradores, el desarrollo de un SRVI puede entenderse como la articulación de tres dimensiones fundamentales: la inmersión, la interacción y la convergencia tecnológica entre dispositivos de visualización, adquisición de información y software gráfico. En la presente investigación, dichos principios permiten establecer un marco base para la virtualización del aerogenerador AQ-30kW y su potencial ambiente de instalación, considerando cuatro componentes operativos para la implementación del sistema:

- Un mundo virtual: se trata de un espacio tridimensional compuesto de objetos y propiedades físicas que los gobiernan. Es decir, se tiene un contenido en realidad virtual. En particular, son las características más relevantes dentro del ambiente del Centro Regional de Tecnología Eólica (CERTE) situado en el municipio de Juchitán, Oaxaca. Es el lugar en donde asume estará instalado físicamente el aerogenerador AQ-30kW para sus pruebas físicas.
- Un grado de inmersión: provisto al involucrar al usuario dentro de la realidad alternativa ofrecida a través de la incorporación de un Head-Mounted Display (HMD) de la línea Oculus. Este tipo de HMD constituye el principal dispositivo de salida.
- Interactividad: para dotar la capacidad del mundo virtual de responder a las acciones de los usuarios empleando dispositivos de entrada o control como el XBOX360, el teclado y el mouse.
- Realimentación sensorial: a través de un posicionamiento activo mediante respuestas sensoriales en función a la posición física del usuario en el medio virtual, considerando respuestas visuales y/o auditivas. En el caso del HMD Oculus, además de realizar el seguimiento de la cabeza, también proporciona estímulos auditivos.

Tener en cuenta los elementos anteriores permitió precisar aspectos fundamentales que identifican a un SRVI con el fin de otorgar una verdadera experiencia virtual a los usuarios, la cual tiene el propósito de favorecer la comprensión de la estructura, funcionamiento y contexto de instalación de un prototipo del sector eólico. No obstante, para llevar a cabo la estructura tridimensional del entorno y los objetos que lo componen, fue necesario hacer uso de diferentes herramientas de software y de interacción e inmersión. Las consideraciones bajo las cuales estas fueron seleccionadas partieron de la compatibilidad entre ellas y el propósito funcional para el que fueron requeridas, previendo requisitos actuales y futuros. Así, se decidió que el motor gráfico fuera Unity3D, dado que es compatible con diversos dispositivos de inmersión e interacción (por ejemplo, el HMD Oculus y el control del XBOX 360), además de que puede importar modelos 3D en diversos formatos producidos por herramientas de modelado, como lo son SolidWorks, Blender o Sketchup.

A su vez, la elección de una de estas tres herramientas de modelado dependió del nivel de detalle y precisión

requerido en el modelo 3D a integrar en los escenarios tridimensionales. Otro aspecto fundamental en la elección de Unity3D es la gran cantidad de componentes de software ya disponibles para construir ambientes de realidad virtual 3D. En lo que respecta a la elección del casco de realidad virtual, Oculus obedece a su costo cada vez más asequible en comparación con años anteriores y también en cuanto a costo beneficio en comparación a otros equipos similares.

En lo concerniente al diseño y desarrollo del software, fue necesario recurrir a metodologías formales de Ingeniería de Software. Para este trabajo se adoptó el modelo de desarrollo incremental descrito por [Pressman & Maxim \(2019\)](#), dado que permite estructurar de manera progresiva las actividades del proceso de construcción, mantener ciclos de evaluación continua y realizar entregas funcionales parciales que contribuyen al aseguramiento de la calidad del producto. De manera complementaria, se consideraron los planteamientos de [Sommerville \(2021\)](#), particularmente en lo relativo a la organización del proceso de desarrollo y la articulación entre enfoques planificados y prácticas iterativas. A partir de los requerimientos identificados, se definieron los siguientes seis incrementos:

1. Construcción virtual del ambiente del CERTE en Unity3D.
2. Integración del casco Oculus con Unity3D.
3. Conversión y exportación del diseño CAD del AQ-30kW a Unity3D.
4. Animación del rotor para el AQ-30kW en el ambiente RV.
5. Funciones de navegación e interacción dentro del SRVI.
6. Paneles informativos con contenido técnico-didáctico para el AQ-30kW.

En cada uno de los incrementos anteriores fue necesario el uso de herramientas y componentes de software para su desarrollo ([Tabla 1](#)).

Una vez concluida la versión preliminar completa del sistema, se incorporó una etapa de evaluación inicial mediante una encuesta de satisfacción, con el propósito de orientar la obtención de una versión final mejorada. Cabe señalar que las pruebas de usabilidad constituyen procedimientos sistemáticos de evaluación orientados a analizar cómo interactúan los usuarios con un sistema y a determinar en qué medida este favorece un desempeño satisfactorio, eficiente y libre de obstáculos relevantes para el cumplimiento de sus tareas ([Dehghani Mahmoodabadi et al., 2025](#)). De acuerdo con [Nielsen \(2012\)](#), la usabilidad comprende cinco atributos de calidad: facilidad de aprendizaje, memorabilidad, eficiencia de uso, tasa de errores y satisfacción.

Tabla 1. Herramientas para el desarrollo del SRVI. Elaboración propia.

Incremento	Herramientas y componentes de Software
Incremento 1	Google Earth, fotografías in-situ y fotografías. Modelado 3D con Sketchup. Exportación e importación de archivos en formato .dae.
Incremento 2	Oculus Setup, Unity, OVRPlugin Update.
Incremento 3	SolidWorks, Blender, Unity 3D. Exportación e importación en formatos .stl y .obj.
Incremento 4	Herramientas Animación y Animator de Unity 3D. Scripting Animation Controller.
Incremento 5	GameObject Canvas, Text Assets y configuraciones Rich Text.

Considerando que el valor de uso del sistema depende, en gran medida, de la percepción del usuario final, la primera aproximación a su aceptabilidad se centró en la valoración subjetiva de la satisfacción y de la utilidad percibida. Este proceso de inspección se llevó a cabo mediante una encuesta aplicada a integrantes del grupo directivo y responsables técnicos del Centro Mexicano de Innovación en Energía Eólica (CEMIE-Eólico), del cual forma parte CIATEQ. Desde el punto de vista metodológico, se trata de un muestreo no probabilístico por conveniencia ([Otzen & Manterola, 2017](#)). La selección de este grupo obedeció a su pertinencia como conjunto de usuarios potenciales en procesos de formación, análisis y apropiación de nuevos desarrollos tecnológicos relacionados con el sector eólico, así como a su interés en explorar el potencial de la RVI para comprender productos y prototipos en escenarios de escala natural.

De manera particular, se aplicaron dos cuestionarios estructurados de la siguiente forma: el primero con 10 preguntas que contribuyeron a obtener información relacionada al usuario (perfil), y el segundo compuesto de 10 preguntas con respuestas empleando una escala ordinal simulando las categorías tipo Likert, en un rango de 1 a 5. La valoración anterior permite obtener un valor cuantificable del grado de satisfacción que el usuario manifiesta al hacer uso del sistema permitiendo la retroalimentación necesaria con prontitud, además de que permite evaluar la calidad de la experiencia virtual en cuanto a presencia y tecnoestrés.

Los materiales y métodos, es decir, las herramientas y componentes de software y hardware, así como el modelo de desarrollo y la evaluación a través de la encuesta de satisfacción mencionados anteriormente se pueden resumir en una metodología de cuatro etapas ([Figura 1](#)).



Figura 1. Metodología aplicada a la construcción del SRVI. Elaboración propia

Después de haber recolectado los requerimientos funcionales del sistema (Etapa 1), a través de entrevistas dirigidas de preguntas abiertas a personal de CIATEQ, se procedió a organizarlos por incrementos y desarrollar el SRVI (Etapa 2), se obtuvo la versión preliminar completa del mismo, el cual, fue sometido a una encuesta de satisfacción (Etapa 3) por considerarla como un método de inspección que permite un acercamiento hacia pruebas de usabilidad más formales, con ello se obtuvo la retroalimentación necesaria para corregir y generar una versión mejorada del SRVI (Etapa 4).

3. RESULTADOS

Previo a hacer uso del sistema (Figura 2), dentro de los resultados de la encuesta de satisfacción, se corroboró un perfil de usuario establecido en 10 atributos de interés (Tabla 2) a un total de 15 usuarios. Una vez efectuado el cuestionario 1 se procedió a hacer uso del sistema, con el fin de valorar su capacidad para apoyar la comprensión visual y técnica del aerogenerador y su entorno.



Figura 2. Aplicación de la prueba de usabilidad. Fotografía tomada por los autores

La Tabla 3 presenta los resultados de la aplicación del cuestionario 2. Las columnas etiquetadas del 1 – 5 hacen referencia a la escala tipo Likert, donde 1 representó estar totalmente en desacuerdo, 2 en desacuerdo, 3 ni de acuerdo ni en desacuerdo, 4 de acuerdo y 5 totalmente de acuerdo. Aspectos relevantes de dicha tabla se abordan en la sección de discusión.

Tabla 2. Atributos del perfil del usuario participante en la encuesta de satisfacción. Elaboración propia

	Atributo	Relevancia
A1	Edad	Personas adultas. Considerando una edad mínima de 20 años y máxima de 60 años.
A2	Género	Indistinto. Sin embargo, el género de mayor afluencia en los proyectos del CEMIE-Eólico es el género masculino.
A3	Escolaridad	Los usuarios tienen un grado de estudios de nivel licenciatura y posgrado.
A4	Ocupación	Integrantes o colaboradores de proyectos del CEMIE-Eólico (estudiantes, empleados, investigadores y profesores).
A5	Uso de Videojuegos	Usuarios sin o con experiencia en el uso de videojuegos y sus dispositivos.
A6	Uso del HMD Oculus Rift	Usuarios sin o con experiencia en el uso de recursos tecnológicos tipo HMD.
A7	Pruebas de un SRVI	Usuarios con o sin experiencia previa de participar en pruebas a un SRVI, pero con disponibilidad a realizar una prueba
A8	Vértigo a las alturas	Usuarios preferentemente sin vértigo a las alturas.
A9	Visitas al CERTE	Usuarios que conozcan las instalaciones del CERTE con al menos una visita o visitas frecuentes.
A10	Físicamente cerca de un aerogenerador	Usuarios con oportunidad de estar físicamente cerca de pequeños o grandes aerogeneradores.

Tabla 3. Resultados del cuestionario 2. Elaboración propia.

Pregunta	1	2	3	4	5
1. Considera que la calidad visual del SRVI es buena	0%	0%	0%	67%	33%
2. Pudo percibir las pruebas realizadas como una experiencia cercana a la realidad.	0%	0%	7%	80%	13%
3. ¿Le parece que la información que se presenta en los paneles es completamente legible?	0%	7%	7%	50%	36%
4. En caso de conocer las instalaciones del CERTE, ¿qué tan similar a lo real lo percibe en el sistema?	0%	0%	0%	57%	43%
5. Al visualizar los componentes del AQ-30kW, ¿el resaltado con iluminación hace distinguible al componente al cual	0%	0%	7%	43%	50%

se presenta su información?					
6. ¿Considera que la inclusión de sonido ambiental contribuye en aumentar en nivel de inmersión en el sistema?	0%	0%	0%	53%	47%
7. ¿Le resulta complicado emplear el joystick?	50%	0%	21%	29%	0%
8. ¿Considera que la RVI puede contribuir en la difusión y divulgación de productos, prototipos o servicios tecnológicos?	0%	0%	0%	40%	60%
9. El uso del casco HMD Oculus Rift le causó algún tipo de malestar como mareo o vértigo.	47%	13%	27%	13%	0%
10. ¿Siente que el SRVI produce mucha fatiga visual?	47%	20%	20%	13%	0%

Además de los resultados cuantitativos presentados en la **Tabla 3**, se observaron algunas dificultades durante el uso del SRVI, entre de ellas están:

- Dificultad en identificar las zonas que activan los paneles. A razón de esto, se adaptaron cápsulas informativas ubicadas en las áreas como indicativo de información disponible al usuario.
- Tiempo invertido en el desplazamiento entre las edificaciones y el AQ-30kW. A fin de agilizar el traslado del usuario se adaptó una ventana de selección para elegir entre un recorrido libre, que lo sitúa al frente de las edificaciones, o ver Quetzal que lo posiciona al frente de este.
- Falta de control sobre el despliegue de los datos. Se le proporcionó el control al usuario mediante acciones de visualización anterior y siguiente, lo cual le permite avanzar o retroceder en el despliegue de la información presentada.

A partir de las observaciones listadas anteriormente y además de lo recuperado en las preguntas 3, 5 y 7, tendientes a realizar mejoras en el SRVI, a continuación, en las **Figuras 3 - 6** se presenta la versión final mejorada. En la **Figura 3**, se observan fracciones exteriores del AQ-30kW, en un modo de navegación libre, con sus respectivas cápsulas informativas que señalan al usuario la información específica (amarillo) o general (verde) contenida en los paneles ocultos.

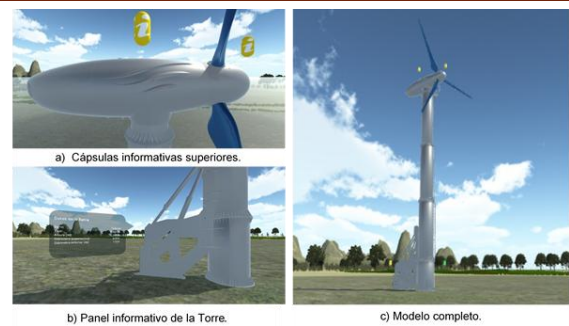


Figura 3. Vistas externas del AQ-30 kW.

Elaboración propia.

Así mismo, en la **Figura 4** se hace referencia a componentes interiores del AQ-30kW, en modo de navegación fijo, con su respectiva información técnica específica a la vez que se señalan y resaltan los componentes que incluye, lo que favorece la identificación y comprensión de sus partes.

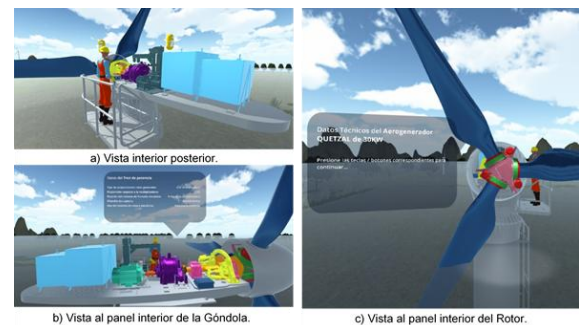


Figura 4. Vistas internas del AQ-30kW. Elaboración propia.

También en la **Figura 5**, se muestra la virtualización final de una de las edificaciones del CERTE, el cuarto de control, con su respectiva cápsula informativa que expone información general de las instalaciones para el conocimiento del usuario.



Figura 5. Vista de las edificaciones del CERTE.

Elaboración propia.

Por último, en la **Figura 6**, se presentan imágenes contrastadas que evidencian la labor de virtualización realizada comparando capturas reales, obtenidas con la herramienta Google Earth y fotografías in-situ, con tomas virtuales del ambiente que muestran que el SRVI construido no dista de lo que existe en el ambiente real.



Figura 6. Contraste de una vista aérea entre lo real y lo virtual del CERTE. Elaboración propia.

4. DISCUSIÓN

El interés contemporáneo del uso de la realidad virtual inmersiva se ha desplazado con mayor claridad hacia sus aplicaciones educativas, formativas y de capacitación técnica. Revisiones recientes en educación en ingeniería muestran que la RV constituye una herramienta eficaz para complementar prácticas de enseñanza existentes, promover el aprendizaje experiencial y apoyar el desarrollo de habilidades de visualización, comprensión espacial y resolución de problemas (Lampropoulos et al., 2025). En el caso del presente trabajo, el interés se concentra en la utilidad didáctica de un entorno de RVI orientado a la comprensión de un prototipo eólico. Para ello, se emplearon casco HMD Oculus y el control Xbox 360, posibilitando la interacción en primera persona dentro de una aplicación construida bajo principios de Ingeniería de Software.

En el ámbito energético, investigaciones recientes también han señalado el valor de la RVI para fortalecer la comprensión de sistemas renovables, la capacitación técnica y la apropiación conceptual de infraestructuras complejas (Alqallaf & Ghannam, 2024; Rahmaniar et al., 2025). De manera específica, se ha reportado que los entornos inmersivos favorecen la visualización tridimensional, la comprensión de relaciones funcionales entre componentes y la motivación del estudiantado en contextos de educación en energías renovables (Rahmaniar et al., 2025). En consonancia con ello, los resultados cuantitativos obtenidos mediante las preguntas 1, 2, 4 y 6 del cuestionario 2 (Tabla 3) muestran que la mayoría de los participantes valoró positivamente la calidad visual del SRVI y percibió la experiencia como cercana a la realidad. De este modo, la similitud entre el entorno virtualizado y las instalaciones existentes contribuye a la comprensión espacial y técnica del AQ-30kW (Figura 6). Asimismo, la inclusión de sonido ambiental fortaleció la sensación de inmersión y presencia, aspecto que la literatura reciente vincula con una mejora del compromiso del usuario y del aprendizaje en entornos virtuales (Austermann et al., 2025).

De igual forma, las respuestas a las preguntas 3, 5, 6, 7, 9 y 10 del cuestionario aportaron información relevante sobre aspectos funcionales del sistema y

sobre la experiencia de uso reportada por los participantes. Esta retroalimentación resultó útil para identificar necesidades específicas de mejora, particularmente en relación con la legibilidad de la información, la navegación y ciertos efectos asociados al uso prolongado de dispositivos inmersivos.

En conjunto, la valoración positiva de los usuarios permite sostener, con base en sus autoinformes, que esta tecnología posee un potencial significativo como medio para la comprensión, visualización e interpretación de sistemas y prototipos tecnológicos; en este caso, del AQ-30kW.

En lo relativo al tecnoestrés asociado al uso del control Xbox 360 y del HMD Oculus, las respuestas a la pregunta 7 indican que el 29% de los participantes consideró complejo el empleo del dispositivo de entrada. Por su parte, en las preguntas 9 y 10, el 13% reportó mareo, vértigo o fatiga visual durante la experiencia inmersiva. Estos resultados sugieren que, aunque la experiencia general fue favorable, persisten aspectos ergonómicos y de diseño de interacción susceptibles de optimización. En cuanto al realismo del ambiente virtualizado, los resultados del atributo 9 de la Tabla 2 muestran que los participantes que conocían las instalaciones del CERTE valoraron positivamente la similitud entre el entorno real y su representación virtual. En consecuencia, puede afirmarse que el esfuerzo de virtualización logró una representación suficientemente verosímil para fines didácticos, aun cuando subsisten oportunidades de mejora en términos de fidelidad ambiental y confort de uso.

5. CONCLUSIONES

El presente trabajo describe la construcción de un SRVI mediante una metodología de desarrollo incremental (Pressman & Maxim, 2019), retomando además los principios de inmersión, interacción y convergencia tecnológica señalados por Arellano Pimentel et al. (2017) para la construcción de herramientas didácticas basadas en realidad virtual, y aportando detalles técnicos relevantes para su replicación y análisis. Asimismo, a partir de una evaluación inicial basada en encuesta, fue posible recuperar las primeras percepciones de los usuarios e identificar aspectos susceptibles de mejora. En conjunto, los resultados obtenidos permiten valorar positivamente la aceptación del sistema como una herramienta para la visualización, exploración y comprensión del aerogenerador AQ-30kW y de su entorno de instalación.

Los entornos virtuales inmersivos se han extendido en múltiples sectores y niveles educativos debido a su capacidad para representar tecnología compleja, facilitar la exploración de escenarios y favorecer el aprendizaje experiencial. La literatura reciente coincide en señalar que la RV puede contribuir de

manera significativa al fortalecimiento de la comprensión conceptual, la motivación y el desarrollo de habilidades técnicas; sin embargo, también advierte la necesidad de continuar investigando sus condiciones de eficacia en contextos formativos específicos (Conrad et al., 2024; Lampropoulos et al., 2025). En consecuencia, existe la posibilidad de que el SRVI desarrollado sea un recurso valioso en la divulgación y formación técnica relacionada con la tecnología eólica, no obstante, dicho potencial de formación debe ser estudiado con mayor profundidad para dimensionar su valor didáctico, lo cual se plantea como un trabajo a futuro del presente estudio.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al CIATEQ por proporcionar los componentes del modelo del aerogenerador AQ-30kW y al CERTE por permitir el acceso a sus instalaciones ubicadas en la ventosa, oaxaca para su replicación en este entorno virtual.

DECLARACIONES

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Los autores declaran que no utilizaron Inteligencia Artificial tradicional y/o Generativa en la redacción de este artículo

La base de datos que sustenta los resultados presentados en este artículo no está disponible públicamente en este momento, pero puede obtenerse de los autores bajo una solicitud debidamente sustentada

REFERENCIAS

- Acevedo, P., Magaña, A. J., Benes, B., & Mousas, C. (2024). A systematic review of immersive virtual reality in STEM education: Advantages and disadvantages on learning and user experience. *IEEE Access*, 12, 189359–189386. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3489233>
- Alqallaf, N., & Ghannam, R. (2024). Immersive learning in photovoltaic energy education: A comprehensive review of virtual reality applications. *Solar*, 4(1), 136–161. <https://doi.org/10.3390/solar4010006>
- Arellano Pimentel, J. J., Cantón Enríquez, D., Hernández López, M. Á., & Nieva García, O. S. (2017). Uso didáctico de la realidad virtual inmersiva con interacción natural de usuario enfocada a la inspección de aerogeneradores. *Apertura*, 9(2), 8–23. <https://doi.org/10.32870/Ap.v9n2.1049>
- Austermann, C., Blanckenburg, F., Blanckenburg, K., & Utesch, T. (2025). Exploring the impact of virtual reality on presence: Findings from a classroom experiment. *Frontiers in Education*, 10, 1560626. <https://doi.org/10.3389/educ.2025.1560626>
- Conrad, M., Kablitz, D., & Schumann, S. (2024). Learning effectiveness of immersive virtual reality in education and training: A systematic review of findings. *Computers & Education: X Reality*, 4, Article 100053. <https://doi.org/10.1016/j.cexr.2024.100053>
- Dehghani Mahmoodabadi, A., Dehghan, H., Kimiafar, K., Karami, M., Mousavi Baigi, S. F., & Farsi Mehrabadi, M. (2025). Usability evaluation methods for hospital information systems: A systematic review. *BMC Health Services Research*, 25, 1540. <https://doi.org/10.1186/s12913-025-13745-y>
- Lampropoulos, G., Fernández-Arias, P., de Bosque, A., & Vergara, D. (2025). Virtual reality in engineering education: A scoping review. *Education Sciences*, 15(8), 1027. <https://doi.org/10.3390/educsci15081027>
- Muzata, A. R., Singh, G., Stepanov, M. S., & Musonda, I. (2024). Immersive learning: A systematic literature review on transforming engineering education through virtual reality. *Virtual Worlds*, 3(4), 480–505. <https://doi.org/10.3390/virtualworlds3040026>
- Nielsen, J. (2012, January 3). Usability 101: Introduction to usability. *Nielsen Norman Group*. <https://www.nngroup.com/articles/usability-101-introduction-to-usability/>
- Otzen, T., & Manterola, C. (2017). Técnicas de muestreo sobre una población a estudio. *International Journal of Morphology*, 35(1), 227–232. <https://doi.org/10.4067/S0717-95022017000100037>
- Pressman, R. S., & Maxim, B. R. (2019). *Software engineering: A practitioner's approach* (9th ed.). McGraw-Hill.
- Rahmaniar, R., Junaidi, A., & Wijaya, R. F. (2025). Renewable energy education through virtual reality tours. *TEM Journal*, 14(2), 1642–1649. <https://doi.org/10.18421/TEM142-61>

Rubio-Tamayo, J. L., Gertrudix, M., & Wuebben, D. (2025). Immersive scientific communication: A multidimensional theoretical model for approaching extended reality as a medium. *PRESENCE: Virtual and Augmented Reality*, 34, 135–157. https://doi.org/10.1162/pres_a_00444

Sommerville, I. (2021). *Software engineering* (10th ed.). Pearson.

La importancia de la geometría en sistemas de concentración solar

DIANA PAOLA SUAREZ REYES¹ | EDUARDO TORRES MORENO² | VÍCTOR IVÁN MORENO OLIVA¹

¹ División de Estudios de Posgrado, Universidad del Istmo, Campus Tehuantepec, Oaxaca, México.

² Instituto Tecnológico de Salina Cruz, Tecnológico Nacional de México, Salina Cruz, Oaxaca, México.

* Correspondencia: diana.suarezreyes0@gmail.com

Recibido: 15/06/2026

Revisado: 25/06/2026

Aceptado: 02/07/2026

Publicado: 08/07/2026

RESUMEN: Este trabajo describe el papel fundamental que desempeña la geometría de los concentradores solares en el rendimiento y la eficiencia óptica de los sistemas de Energía Solar Concentrada (CSP). Se presentan las principales tecnologías CSP clasificadas según su tipo de enfoque: lineal o puntual. Asimismo, se analiza la óptica geométrica y la ley de la reflexión como los principios básicos para comprender la trayectoria de los rayos solares al interactuar con dispositivos. Para ello, se aplicó el método de trazado exacto de rayos con el fin de modelar tridimensionalmente la trayectoria de los rayos incidentes y reflejados, identificar el proceso de concentración focal y examinar las tecnologías CSP ante variaciones geométricas. Se destaca que el modelado geométrico de las superficies es un elemento clave para predecir pérdidas ópticas, optimizar el sistema y mejorar el aprovechamiento de la energía solar concentrada.

ABSTRACT: This work describes the fundamental role of the geometry of solar concentrators in the optical performance and efficiency of Concentrated Solar Power (CSP) systems. The main CSP technologies are presented and classified according to their focusing configuration as either line-focus or point-focus systems. In addition, geometric optics and the law of reflection are examined as the fundamental principles governing the propagation of solar rays interacting with these devices. To this end, the exact ray-tracing method was employed to develop three-dimensional models of the incident and reflected ray paths, identify the solar concentration process at the focal region, and analyze the performance of CSP technologies under geometric variations. The results highlight that the geometric modeling of concentrator surfaces is a key factor in predicting optical losses, optimizing system performance, and enhancing the utilization of concentrated solar energy.

Palabras clave: sistemas de concentración solar, superficie reflectante, óptica geométrica, trazado exacto de rayos

1. INTRODUCCIÓN

La radiación solar es una de las fuentes de energías renovables más abundantes y prometedoras para el desarrollo energético sostenible. Sin embargo, su disponibilidad varía a lo largo del día y depende de las condiciones atmosféricas, lo que la convierte en un recurso intermitente. Esta característica plantea desafíos complejos, tanto técnicos como económicos, en el diseño de tecnologías y procesos que buscan mejorar la eficiencia de los sistemas, especialmente en las etapas de captación y transformación de la energía solar en calor o electricidad (Kalogirou, 2023).

Los sistemas CSP (*Concentrated Solar Power*) son tecnologías que emplean espejos o lentes para

concentrar la radiación solar y generar calor a altas temperaturas, el cual se utiliza para producir vapor y obtener electricidad (Lovegrove & Stein, 2012). Dentro de este grupo de tecnologías pueden mencionarse: 1) el concentrador solar de canal parabólico (CCP, por sus siglas), donde los espejos tienen forma de parábola que concentra los rayos en una línea focal, considerada una de las tecnologías más maduras y ampliamente utilizadas; 2) el concentrador lineal Fresnel, cuenta con múltiples espejos planos organizados en filas para reflejar la radiación solar hacia un receptor lineal fijo elevado; 3) el concentrador de plato parabólico o disco parabólico que concentra la radiación solar en un punto focal; y, por último, 4) la torre central, que utiliza un campo de espejos móviles llamados heliostatos que siguen la trayectoria del Sol y reflejan

la radiación hacia un receptor central situado en la parte superior de una torre. Este tipo de sistemas alcanza temperaturas más elevadas y resulta favorable para mejorar la eficiencia en la generación de energía (Blanco & Miller, 2017).

Cada una de estas tecnologías presenta diferentes configuraciones geométricas que determinan su eficiencia, costos de implementación y aplicaciones para las cuales son más adecuadas.

El proceso de concentración depende directamente de los principios de la óptica geométrica, la cual describe cómo los rayos solares inciden sobre la superficie del concentrador y se reflejan hacia un receptor.

Predecir y medir la distribución del flujo de calor en la región focal es fundamental para el diseño y análisis del rendimiento de los sistemas receptores en tecnologías de CSP (Blanco & Miller, 2017). Para lograrlo, la óptica geométrica constituye la base analítica fundamental, ya que permite modelar matemáticamente la concentración de la radiación solar en el receptor.

La técnica del trazado exacto de rayos es una herramienta computacional que permite simular el comportamiento de la radiación solar al interactuar con superficies reflectantes y cómo los rayos son concentrados en la región focal. Con estos elementos, se genera un modelo que representa el comportamiento del sistema real bajo condiciones ideales. Esta técnica permite analizar los rayos que se reflejan, se desvían y se concentran en la región focal, proporcionando información clave sobre la distribución de la energía y posibles pérdidas ópticas (Kilner et al., 2012).

Por eso, es crucial evaluar el impacto de la geometría en el rendimiento de los sistemas CSP. Este trabajo tiene como objetivo analizar el papel de la óptica geométrica en dichos sistemas, mediante la explicación del fenómeno de concentración solar y su representación a través de herramientas como el trazado exacto de rayos.

2. METODOLOGÍA

Este trabajo se desarrolló mediante el análisis de información sobre los sistemas CSP, con especial énfasis en el impacto de la geometría sobre el rendimiento óptico de estas tecnologías

2.1 MODELO DE RAYOS DE LUZ

La propagación de la luz puede describirse a través de tres mecanismos principales mediante los cuales esta se desplaza desde una fuente hasta un punto determinado. En primer lugar, sucede cuando la luz viaja directamente de la fuente a través del vacío,

como ocurre con la radiación emitida por el Sol que llega a la Tierra. En segundo lugar, ocurre cuando se propaga a través de diversos medios, como el aire o el vidrio, hasta el observador. Finalmente, la luz también puede llegar después de ser reflejada por una superficie, como puede ser un espejo. En cada uno de estos casos, la trayectoria de la luz puede modelarse como una línea recta llamada rayo. Esto se debe a que, cuando la luz interactúa con objetos cuyas dimensiones son considerablemente mayores que su longitud de onda, su comportamiento puede describirse adecuadamente mediante el modelo de rayos. Esta aproximación permite modelar su trayectoria mediante la geometría y trigonometría, lo que constituye la base de estudio de la óptica geométrica y facilita la comprensión de fenómenos ópticos presentes en la vida diaria. Dentro de la óptica geométrica existen dos leyes fundamentales que describen cómo cambia la dirección de la luz al interactuar con la materia: la ley de reflexión y la ley de refracción (OpenStax, 2016). Específicamente para este trabajo, resulta de interés la ley de la reflexión, la cual describe el comportamiento de la luz cuando incide sobre una superficie y se refleja.

2.2 LEY DE LA REFLEXIÓN

La ley de la reflexión establece que, cuando un rayo de luz incide sobre una superficie reflectante, el ángulo con el que llega a dicha superficie es igual al ángulo con el que se refleja, ambos medidos con respecto a la línea normal a la superficie; asimismo, el rayo incidente, el rayo reflejado y la normal a la superficie se encuentran en el mismo plano (Dereniak & Dereniak, 2008). Dicha ley está expresada mediante la Ec. (1):

$$\theta_i = \theta_r, \quad (1)$$

donde θ_i es el ángulo de incidencia del rayo incidente y θ_r es el ángulo de reflexión del rayo reflejado. En la Figura 1 se representa la interacción que muestra el principio de la ley de la reflexión aplicada a una superficie plana.

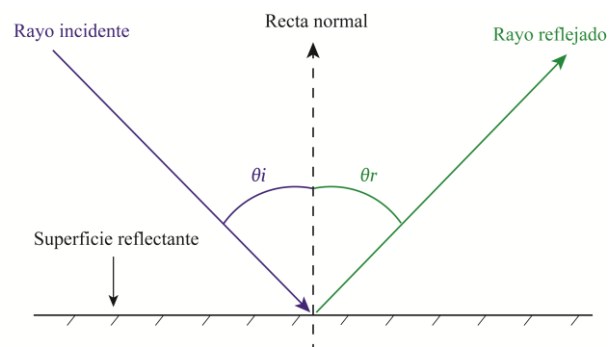


Figura 1. “Representación geométrica de la ley de reflexión sobre una superficie plana, principio

fundamental en el diseño de sistemas CSP”. Fuente: Elaboración propia.

Este principio constituye el pilar de la óptica geométrica para comprender el funcionamiento de los sistemas CSP, pues permite predecir la trayectoria de los rayos solares al interactuar con superficies reflectantes.

2.3 TECNOLOGÍAS CSP

En los sistemas de concentración solar, la geometría de las superficies reflectantes determina la forma en que la radiación solar es captada y dirigida hacia el receptor. Dependiendo de la configuración geométrica empleada, los sistemas CSP pueden clasificarse en tecnologías de enfoque lineal y enfoque puntual, cada una con diferentes niveles de concentración, temperaturas de operación y eficiencias ópticas (Blanco & Miller, 2017).

Los sistemas de enfoque lineal concentran la energía sobre una línea focal, mientras que los de tipo puntual permiten alcanzar mayores factores de concentración y temperaturas más elevadas al dirigir la radiación hacia un único receptor. Estas diferencias influyen directamente en la eficiencia óptica y la distribución del flujo térmico. A continuación, se describen las tecnologías CSP clasificadas según su tipo de enfoque:

- Enfoque lineal.

1. CCP: superficie parabólica continua con forma de canal parabólico, se asume que la función principal de un CCP es reflejar los rayos solares hacia un receptor en forma tubular colocado en la línea focal de la parábola. Los CCP pueden entregar energía térmica útil hasta 398 °C (Zarza Moya, 2012). En la [Figura 2](#) se presenta el CCP y se observa cómo los rayos solares se concentran en la línea focal.

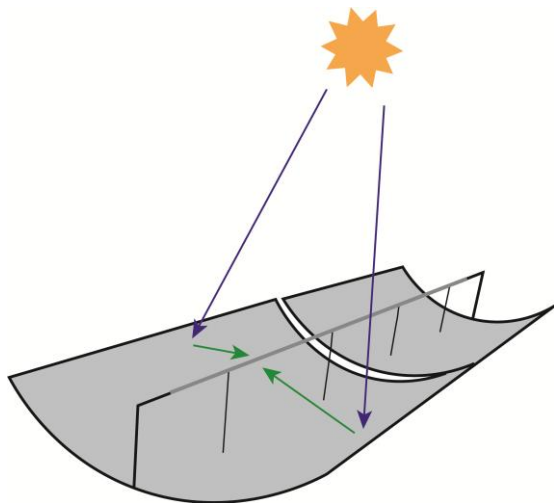


Figura 2. “Esquema de un concentrador solar tipo canal parabólico (CCP)”. Fuente: Elaboración propia.

2. Concentrador lineal Fresnel: difiere de un CCP ya que su reflector está compuesto por muchos segmentos de espejos planos o ligeramente curvados, los cuales enfocan colectivamente a un receptor lineal elevado (Mills, 2012). En la [Figura 3](#) se muestra el concentrador solar tipo lineal Fresnel, donde se observa cómo los rayos solares inciden sobre la superficie y se concentran en el receptor lineal.

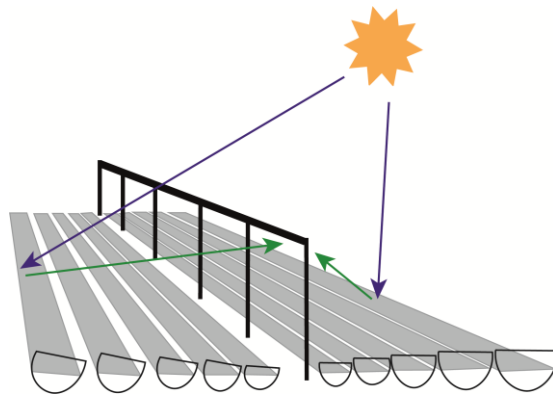


Figura 3. “Esquema de un concentrador solar tipo lineal Fresnel”. Fuente: Elaboración propia.

- Enfoque puntual.

3. Torre central: consiste en una matriz de espejos móviles llamados heliostatos. Cada heliostato sigue la trayectoria aparente del Sol y refleja la radiación solar hacia un receptor ubicado en la parte superior de una torre central. En conjunto, el arreglo del campo de heliostatos y el receptor central conforman una configuración de concentración solar de forma radial escalonada (Vant-Hull, 2012). La [Figura 4](#) describe cómo los rayos solares interactúan en el arreglo de una central termosolar con heliostatos y torre central.

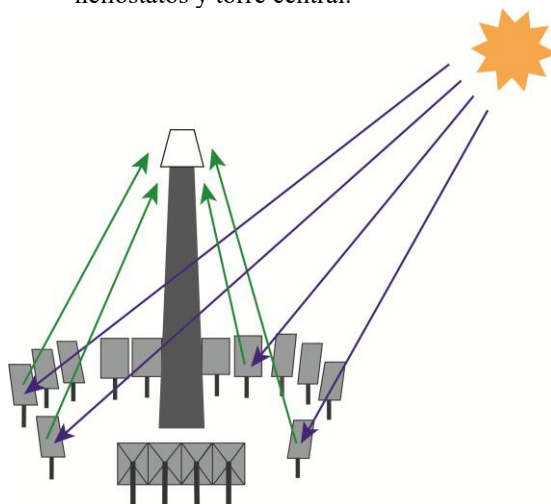


Figura 4. “Esquema de una torre central con heliostatos”.
Fuente: Elaboración propia.

- Disco o plato parabólico: las superficies reflectantes de los espejos presentan una geometría paraboloïdal y cuentan con sistemas de seguimiento solar que les permiten orientarse continuamente hacia el Sol. De esta manera, la radiación solar reflejada es concentrada en un receptor central, incrementando la densidad de energía térmica disponible para su aprovechamiento (Schiel & Keck, 2012). En la Figura 5 se indica cómo los rayos interactúan con el colector solar de disco parabólico y se enfocan en el receptor central.

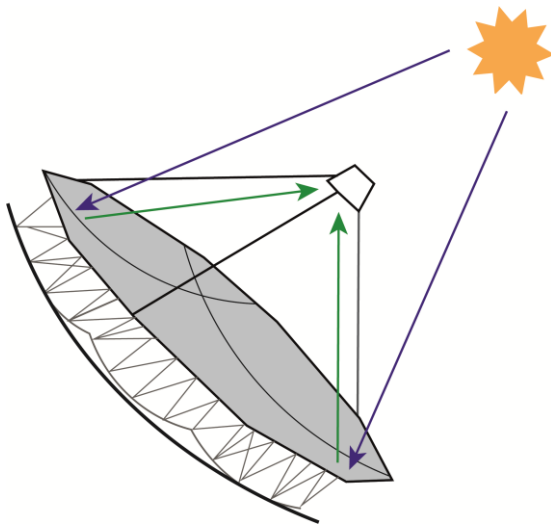


Figura 5. “Esquema de un concentrador solar de disco parabólico”. Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, los sistemas con geometrías parabólicas o paraboloidales permiten que los rayos solares incidentes sean reflejados hacia un mismo punto o línea focal, según el principio geométrico de estas superficies, incrementando así la densidad de energía concentrada en el receptor. Sin embargo, este tipo de configuraciones presenta una alta sensibilidad a pequeñas desviaciones respecto a su geometría ideal. En la Tabla 1 se presentan las principales ventajas que muestra cada una de las tecnologías de concentración.

Tabla 1. Principales ventajas de las tecnologías de concentración solar. (Lovegrove & Stein, 2012).

Tecnología de concentración	Ventajas
Enfoque lineal	
Concentrador solar de canal	- Tecnología madura. - Alta eficiencia óptica.

parabólico (CCP)	
Concentrador lineal Fresnel	- Menor costo de implementación. - Estructura más simple.
Enfoque puntual	
Torre central	- Operación a altas temperaturas. - Gran capacidad de generación energética.
Concentrador solar de Disco o plato parabólico	- Mayores factores de concentración solar. - Máxima eficiencia de conversión térmica.

Las desventajas son las siguientes (Lovegrove & Stein, 2012):

- Los sistemas de concentración solar captan poca o ninguna radiación difusa.
- Se requiere algún tipo de sistema de seguimiento para que el colector siga el movimiento aparente del Sol.
- Requieren limpieza y reacondicionamiento periódicos; si no, se pierde la capacidad de reflexión de las superficies.

2.4 ANÁLISIS GEOMÉTRICO DEL CONCENTRADOR

Como se describió anteriormente, la mayoría de los concentradores solares utilizados en tecnologías de energía solar concentrada (CSP) se diseñan a partir de geometrías parabólicas o paraboloidales.

Para comprender el análisis geométrico de un CCP, es importante considerar que la sección transversal tiende a comportarse como una parábola. (Kalogirou, 2014). La parábola es una curva geométrica obtenida a partir de las secciones cónicas que posee propiedades ópticas y geométricas particulares, tales como el foco, la directriz y la excentricidad. Mientras que la excentricidad define la forma de la curva, el foco representa la región específica hacia la cual convergen todos los rayos reflejados (Lehmann, 1989). Debido a esta propiedad de reflexión única, las superficies parabólicas son ideales para la concentración solar, ya que reflejan los rayos incidentes paralelos de luz hacia un solo punto o línea focal. Esto permite concentrar la radiación en un área reducida, incrementando drásticamente la temperatura del fluido de trabajo y la eficiencia térmica del sistema; una característica que no se logra con la misma precisión empleando otras cónicas como la elipse o la hipérbola (OpenStax, 2016).

En la Figura 6 se presenta el diagrama de la parábola y sus propiedades.

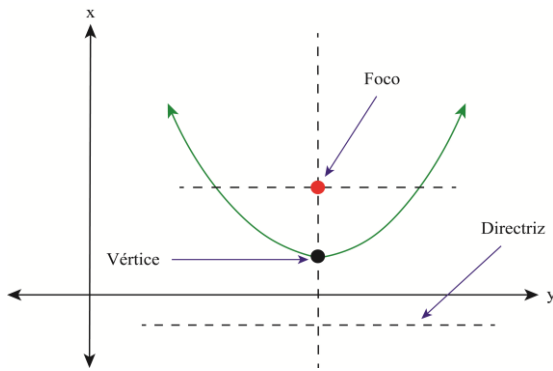


Figura 6. “Esquema de una parábola y sus propiedades geométricas”. Fuente: Elaboración propia.

Matemáticamente, una parábola con eje horizontal y vértice en el origen se describe mediante la Ec. (2) (Lehmann, 1989):

$$y^2 = 4fx, \quad (2)$$

donde f es la distancia focal desde el vértice hasta el foco de la parábola.

En la ingeniería de sistemas solares, esta ecuación es el punto de partida para el diseño geométrico del concentrador. Al fijar una distancia focal (f) según el tamaño del tubo receptor disponible, la ecuación permite calcular las coordenadas (x, y) exactas para modelar y fabricar la curvatura del espejo

En un sistema real, la elección del valor de f define directamente las dimensiones y la configuración física del concentrador. Una distancia focal pequeña genera un concentrador más profundo, lo que disminuye el impacto de las corrientes de aire sobre el receptor; sin embargo, exige una curvatura muy pronunciada que incrementa la dificultad de fabricación con la precisión requerida. Por el contrario, una distancia focal grande da como resultado un concentrador más plano y fácil de curvar, pero requiere un sistema de seguimiento solar extremadamente preciso, ya que cualquier desalineación mínima provocará que los rayos reflejados se desvíen y no impacten el tubo receptor, disminuyendo drásticamente la eficiencia del sistema

2.5 APLICACIÓN DEL TRAZADO EXACTO DE RAYOS

El trazado exacto de rayos consiste en simular rayos paralelos al eje óptico y aplicar la ley de la reflexión para determinar las trayectorias reflejadas. A través de principios geométricos, esta técnica permite obtener información numérica sobre las propiedades ópticas del espejo, tales como el punto focal o la eficiencia óptica del concentrador (Mahajan, 2014). Esta herramienta se emplea principalmente para determinar las aberraciones de un sistema, utilizando un software especializado en la materia.

En la Figura 7 se presenta una simulación mediante el trazado exacto de rayos sobre una superficie parabólica. Cuando un rayo incide sobre esta superficie, los vectores (k_i, l_i, m_i) y (k_r, l_r, m_r) actúan como cosenos directores que describen la dirección del rayo incidente y reflejado en el espacio tridimensional (Mahajan, 2014). Asimismo, los ángulos correspondientes se denotan como θ_i para la incidencia y θ_r para la reflexión. Matemáticamente, este comportamiento se rige por la ley de la reflexión en su forma vectorial, la cual se expresa mediante la Ec. (3):

$$\vec{v}_r = \vec{v}_i - 2(\vec{v}_i \cdot \vec{v}_n)\vec{v}_n, \quad (3)$$

donde $\vec{v}_r$ es el vector director del rayo reflejado, $\vec{v}_i$ es el vector director del rayo incidente y $\vec{v}_n$ es el vector normal a la superficie.

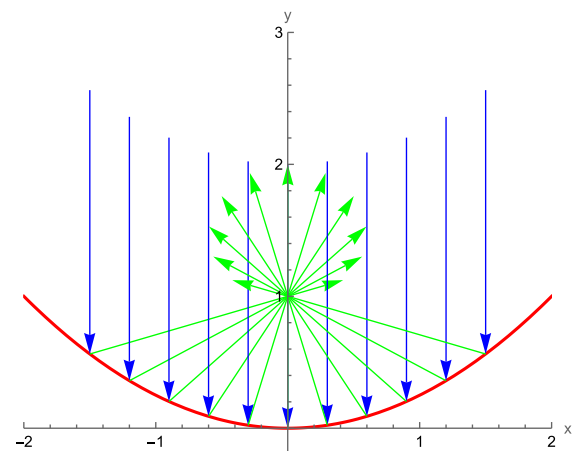


Figura 7. “Esquema de la simulación del comportamiento óptico ideal de una superficie parabólica mediante el trazado exacto de rayos”. Fuente: Elaboración propia.

Además de validar el comportamiento teórico del sistema, el verdadero valor del trazado exacto de rayos en la optimización de concentradores solares radica en su capacidad para simular escenarios reales de operación. Por ejemplo, permite introducir en el modelo los errores comunes de fabricación (como pequeñas desviaciones en la curvatura del espejo) o simular cómo el viento deforma ligeramente la estructura en condiciones de campo. Al analizar el comportamiento de miles de rayos bajo estas condiciones simuladas, se pueden modificar los parámetros del concentrador (como su forma o la distancia focal) hasta encontrar el diseño óptimo que asegure la mayor concentración de calor sobre el receptor, garantizando un alto rendimiento en la práctica.

2.6 IDENTIFICACIÓN DE PÉRDIDAS ÓPTICAS

Para lograr altas temperaturas con buena eficiencia se requiere un concentrador solar de alto rendimiento. Sin embargo, a medida que aumenta la capacidad de focalización de estos sistemas, también se elevan los estándares de manufactura para alcanzar dichos niveles. Esto conlleva a exigir mayor precisión en el diseño y la alineación de los componentes ópticos, ya que pequeñas desviaciones en la forma de la superficie reflectante pueden reducir significativamente el rendimiento global (Duffie & Beckman, 2013).

Estas desviaciones pueden generar pérdidas ópticas significativas, ya que los rayos reflejados dejan de converger correctamente en la región focal, lo que altera la distribución del flujo térmico y reduce la eficiencia del sistema. Por ello, la geometría del concentrador determina directamente la trayectoria de los rayos solares tras la reflexión. En consecuencia, garantizar la precisión geométrica en las superficies reflectantes resulta fundamental para obtener una adecuada distribución del flujo de calor y maximizar el aprovechamiento de la energía.

La eficiencia óptica (η_o) se define como la relación entre la energía que el receptor logra absorber y la energía que entra por la apertura del colector. Este parámetro depende de las propiedades de los materiales, la geometría del diseño y las imperfecciones de fabricación (Kalogirou, 2014), y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\eta_o = \rho\tau\alpha\gamma(1 - A_f(\theta) \cos(\theta)), \quad (4)$$

donde:

- ρ (reflectividad del espejo): la capacidad del espejo para reflejar la luz solar incidente.
- τ (transmisividad de la cubierta de vidrio): la fracción de luz que logra atravesar la cubierta de vidrio del receptor.
- α (absortividad del receptor): la capacidad del tubo receptor para capturar el calor de la radiación.
- γ (factor de intercepción): el porcentaje de rayos reflejados que logran incidir directamente sobre el receptor.
- A_f : el factor geométrico de pérdidas.
- θ : el ángulo de incidencia del Sol.

No todos estos factores tienen el mismo peso en la práctica. Por ejemplo, la reflectividad (ρ) y la absorptividad (α) dependen enteramente de las propiedades ópticas de los materiales seleccionados. Sin embargo, el verdadero reto en la operación real suele ser el factor de intercepción (γ). Si la superficie del concentrador sufre una deformación milimétrica o si el sistema de seguimiento solar se desvía respecto al ángulo θ , los rayos solares

desviados no lograrán llegar al receptor. De este modo, un diseño con materiales excelentes en el papel puede perder drásticamente su eficiencia si falla la precisión geométrica en la práctica.

La geometría del concentrador solar determina el factor geométrico A_f , el cual mide la reducción efectiva en el área de apertura debido a efectos de incidencia anómalos, como obstrucciones, sombras y pérdida de radiación. Dado que, durante la operación del equipo, algunos de los rayos reflejados no alcanzan el receptor (Kalogirou, 2014). Este factor resulta de gran importancia en el diseño y evaluación de los concentradores, ya que permite analizar cómo la geometría del sistema afecta la capacidad de aprovechar la energía incidente.

Los errores asociados a la superficie reflectante son de dos tipos (Kalogirou, 2014):

1. Aleatorios: se identifican como cambios aparentes del Sol y efectos de dispersión causados por errores de pendiente (es decir, distorsión de la parábola debido a la carga del viento).
2. No aleatorios: surgen durante el montaje o funcionamiento del colector, tales como las imperfecciones en el perfil del reflector, los errores de desalineación y las desviaciones en la ubicación del receptor.

Guven y Bannerot (1986) mencionaron que los errores aleatorios y no aleatorios pueden combinarse con los parámetros geométricos del colector, la relación de concentración y el diámetro del receptor, con el fin de obtener parámetros de error universales para todas las geometrías disponibles.

3. CONCLUSIONES

La geometría es un elemento esencial en el funcionamiento de los sistemas de concentración solar, ya que determina la forma en que los rayos incidentes son captados, reflejados y dirigidos hacia el receptor. Geometrías como las parabólicas y paraboloideas demuestran que el diseño formal del colector es el que permite concentrar la radiación en una línea o punto focal, aumentando drásticamente la densidad de la energía térmica disponible.

Para lograr esto, principios como la ley de la reflexión y la óptica geométrica son indispensables para comprender el comportamiento de la luz, mientras que la técnica del trazado exacto de rayos se consolida como una herramienta virtual clave. Esta simulación no solo representa superficies ideales, sino que permite anticipar el comportamiento de colectores reales, ayudando a analizar la distribución de la

radiación, identificar la zona focal y detectar posibles pérdidas ópticas antes de la etapa de manufactura.

Finalmente, la eficiencia de estos sistemas no depende únicamente de la calidad de los materiales de fábrica, sino de una combinación precisa entre la exactitud geométrica, la alineación del receptor y la tolerancia del seguimiento solar en el campo. Más allá del análisis matemático, el verdadero reto actual consiste en llevar el diseño teórico a la manufactura real sin perder eficiencia. Herramientas como el trazado de rayos demuestran que la optimización geométrica es el camino fundamental para desarrollar concentradores solares más eficientes, robustos y adaptados a las condiciones de operación reales.

AGRADECIMIENTOS

La autora Diana Paola Suarez Reyes agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación por la beca otorgada bajo el número 2069596. En este trabajo se utilizaron recursos parciales de dicho apoyo institucional.

DECLARACIONES

Los autores declaran no tener conflictos de interés. Los autores declaran el uso de herramientas de Inteligencia Artificial, Tradicional y/o Generativa en la elaboración de este manuscrito, conforme a los lineamientos éticos de la revista.

REFERENCIAS

- Kalogirou, S. A. (2023). *Solar energy engineering: Processes and systems* (3rd ed.). Academic Press.
- Lovegrove, K., & Stein, W. (2012). Introduction to concentrating solar power (CSP) technology. In K. Lovegrove & W. Stein (Eds.), *Concentrating solar power technology: Principles, developments and applications*. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857096173.1.3>
- Blanco, M., & Miller, S. (2017). Introduction to concentrating solar thermal (CST) technologies. In M. Blanco & L. R. Santigosa (Eds.), *Advances in concentrating solar thermal research and technology*. Woodhead Publishing.
- Kilner, J. A., Skinner, S. J., Irvine, S. J. C., & Edwards, P. P. (Eds.). (2012). *Functional materials for sustainable energy applications*. Woodhead Publishing.
- OpenStax. (2016). *University physics volume 3*. Rice University. <https://openstax.org/details/books/university-physics-volume-3>
- Dereniak, E. L., & Dereniak, T. D. (2008). *Geometrical and trigonometric optics*. Cambridge University Press.
- Zarza Moya, E. (2012). Parabolic-trough concentrating solar power (CSP) systems. In K. Lovegrove & W. Stein (Eds.), *Concentrating solar power technology: Principles, developments and applications* (pp. 197–239). Woodhead Publishing.
- Mills, D. R. (2012). Linear Fresnel reflector (LFR) technology. In K. Lovegrove & W. Stein (Eds.), *Concentrating solar power technology: Principles, developments and applications* (pp. 153–196). Woodhead Publishing.
- Vant-Hull, L. L. (2012). Central tower concentrating solar power (CSP) systems. In K. Lovegrove & W. Stein (Eds.), *Concentrating solar power technology: Principles, developments and applications* (pp. 240–283). Woodhead Publishing.
- Schiell, W., & Keck, T. (2012). Parabolic dish concentrating solar power (CSP) systems. In K. Lovegrove & W. Stein (Eds.), *Concentrating solar power technology: Principles, developments and applications* (pp. 285–322). Woodhead Publishing.
- Lehmann, C. H. (1989). *Geometría analítica*. Limusa.
- Mahajan, V. N. (2014). *Fundamentals of geometrical optics* (2nd ed.). SPIE Press.
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes* (4th ed.). Wiley.
- Kalogirou, S. A. (2014). *Solar energy engineering: Processes and systems* (2nd ed.). Academic Press.
- Guen, H. M., & Bannerot, R. B. (1986). Determination of error tolerances for the optical design of parabolic troughs for developing countries. *Solar Energy*, 36(6), 535–550.

Universidad del Istmo

OFERTA EDUCATIVA



CAMPUS TEHUANTEPEC

- Ingeniería Química
- Ingeniería de Petróleos
- Ingeniería en Diseño
- Ingeniería en Computación
- Ingeniería Industrial
- Licenciatura en Matemáticas Aplicadas
- Ingeniería en Energías Renovables
- Maestría en Ciencias en Energía Eólica
- Maestría en Ciencias en Energía Solar
- Doctorado en Ciencias e Ingeniería en Energía



CAMPUS IXTEPEC

- Licenciatura en Ciencias Empresariales
- Licenciatura en Derecho
- Licenciatura en Desarrollo de Software y Sistemas Inteligentes
- Ingeniería en Logística y Cadena de Suministros
- Licenciatura en Comercio Exterior y Gestión de Aduanas



CAMPUS JUCHITÁN

- Licenciatura en Nutrición
- Licenciatura en Enfermería



Instituto de Estudios de la Energía



Laboratorios de Estudios de la Energía



Instituto de Estudios Constitucionales y Administrativos



Centro de Investigación en Nutrición y Alimentación



Clínica Robotizada de Enfermería



Laboratorios



Revista Multidisciplinaria: Energía, Ciencia y Tecnología
Revista Institucional de la Universidad del Istmo