

DOI: <https://doi.org/10.46296/ig.v8i15.0255>

EVALUACIÓN TÉCNICO Y ECONÓMICO INTEGRAL PARA MICROGENERADOR DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN ECUADOR

EVALUATION OF MACHINE LEARNING MODELS IN SOLAR RADIATION PREDICTION FOR PHOTOVOLTAIC SYSTEM DESIGN

Barrera-Rojas Ambar Jocabed ¹; Pazuna-Naranjo William Paul ²;
Vásquez-Carrera Paco Jovanni ³; Paguay-Llamuca Alex Iván ⁴

¹ Universidad Técnica de Cotopaxi. Riobamba, Ecuador. Correo: ambar.barrera2427@utc.edu.ec.

² Universidad Técnica de Cotopaxi. Riobamba, Ecuador. Correo: william.pazuna2@utc.edu.ec.

³ Universidad Técnica de Cotopaxi. Riobamba, Ecuador. Correo: paco.vasquez@utc.edu.ec.

⁴ Universidad Técnica de Cotopaxi. Riobamba, Ecuador. Correo: alex.paguay4248@utc.edu.ec.

Resumen

Este estudio evalúa la viabilidad técnica y económica de un microgenerador de energía fotovoltaica en Ecuador, adaptado a los sectores residencial, comercial e industrial. Se utilizó un modelo de Máquinas de Soporte Vectorial (SVM) para predecir la radiación solar, logrando métricas de precisión (0.96), sensibilidad (0.96) y exactitud (0.92). En el sector residencial, el sistema requiere 11.76 kW y 39 paneles para cubrir una demanda diaria de 50 kWh, con una inversión inicial de \$4,950 USD y un ahorro anual de \$1,200 USD, alcanzando el punto de equilibrio en 4.12 años. En el sector comercial, se necesitan 11.76 kW para una demanda diaria similar, mientras que en el sector industrial se requieren 78.43 kW y 261 paneles para cubrir 333.33 kWh/día. La herramienta desarrollada optimiza el dimensionamiento del sistema, considerando factores como eficiencia de paneles, capacidad de batería, potencia del inversor y días de autonomía. Además, analiza costos de instalación y retorno de inversión, demostrando que los sistemas fotovoltaicos son rentables y reducen las emisiones de CO₂. Los resultados destacan la viabilidad de estos sistemas para diversificar la matriz energética en Ecuador, maximizando beneficios económicos y ambientales.

Palabras clave: Radiación solar, dimensionamiento, costos, Ecuador.

Abstract

This study evaluates the technical and economic feasibility of a photovoltaic microgenerator in Ecuador, tailored to the residential, commercial, and industrial sectors. A Support Vector Machine (SVM) model was used to predict solar radiation, achieving metrics of precision (0.96), sensitivity (0.96), and accuracy (0.92). In the residential sector, the system requires 11.76 kW and 39 panels to meet a daily demand of 50 kWh, with an initial investment of \$4,950 USD and an annual saving of \$1,200 USD, reaching the break-even point in 4.12 years. In the commercial sector, 11.76 kW is needed for a similar daily demand, while in the industrial sector, 78.43 kW and 261 panels are required to cover 333.33 kWh/day. The developed tool optimizes system sizing, considering factors such as panel efficiency, battery capacity, inverter power, and days of autonomy. It also analyzes installation costs and return on investment, demonstrating that photovoltaic systems are cost-effective and reduce CO₂ emissions. The results highlight the feasibility of these systems to diversify Ecuador's energy matrix, maximizing economic and environmental benefits.

Keywords: Solar radiation, sizing, costs, Ecuador.

Información del manuscrito:

Fecha de recepción: 12 de enero de 2025.

Fecha de aceptación: 19 de marzo de 2025.

Fecha de publicación: 10 de abril de 2025.



1. Introducción

La creciente preocupación por la sostenibilidad energética y el cambio climático ha impulsado la búsqueda de fuentes de generación eléctrica más limpia, así como eficientes. En este contexto, los sistemas solares fotovoltaicos han surgido como una de las soluciones más prometedoras para la producción de energía renovable. Estos sistemas convierten la radiación solar en electricidad mediante módulos fotovoltaicos fabricados con materiales semiconductores como el silicio monocristalino, policristalino y amorfo. La confiabilidad a largo plazo de estos sistemas dependen de múltiples factores, entre ellos, un diseño adecuado, el correcto dimensionamiento y la óptima orientación de los paneles solares.

En Ecuador, la demanda energética varía significativamente según el tipo de usuario, con los sectores residencial, comercial e industrial como principales consumidores de electricidad. Según datos de 2023, el consumo promedio en el sector residencial fue de 143,36 kWh por usuario, mientras que los sectores comercial e industrial presentaron valores considerablemente más

altos, influenciados por factores geográficos y actividades económicas. Estas diferencias en el consumo resaltan la necesidad de contar con soluciones energéticas adaptadas a las particularidades de cada sector.

Para diseñar y evaluar un sistema fotovoltaico eficiente en Ecuador, es fundamental considerar diversas variables, como la disponibilidad de radiación solar, la ubicación geográfica, el perfil de consumo energético y las características de los componentes del sistema. En este sentido, la aplicación de metodologías avanzadas de predicción y análisis de datos resulta clave para optimizar la generación de energía solar y maximizar su aprovechamiento.

Este estudio presenta una evaluación técnica y económica de un sistema fotovoltaico de microgeneración en Ecuador, empleando modelos predictivos para mejorar su planificación y gestión. En particular, se implementa un modelo basado en Máquinas de Soporte Vectorial (SVM) para prever la radiación solar, lo que permite optimizar el desempeño del sistema fotovoltaico y ajustarlo a las

necesidades energéticas de los usuarios.

La metodología propuesta abarca desde el preprocesamiento de datos de radiación solar hasta la integración de herramientas de modelado y análisis económico. Mediante una interfaz gráfica interactiva, los usuarios pueden cargar datos desde archivos Excel, realizar el preprocesamiento y entrenar un modelo SVM para predecir la radiación solar. Los resultados se presentan en gráficos y se almacenan en archivos Excel, facilitando su análisis. Adicionalmente, se calculan parámetros clave del sistema fotovoltaico, como la capacidad de la batería, la potencia del inversor y la eficiencia general del sistema, considerando las variaciones en el consumo y las horas de máxima radiación solar.

Desde una perspectiva económica, este estudio evalúa el costo total de instalación y el período de recuperación de la inversión, además de analizar la reducción de emisiones de CO₂ asociada al uso de energía solar. A pesar de la inversión inicial, los resultados evidencian que los sistemas

fotovoltaicos generan ahorros significativos a largo plazo, constituyendo una alternativa viable para la sostenibilidad energética en los sectores residencial, comercial e industrial. La herramienta desarrollada facilita la toma de decisiones informadas, permitiendo optimizar el rendimiento del sistema y maximizar sus beneficios tanto económicos como ambientales.

2. Metodología

De acuerdo [1] los sistemas solares fotovoltaicos son un conjunto de elementos que conectados entre si generan, controlan y generan, controlan y generan energía en corriente. El funcionamiento de este sistema se desarrolla cuando el sol emite su energía en formas de ondas electromagnéticas, éstas se trasladan hasta llegar a nuestro planeta Tierra; tienen una partícula llamada fotón, que son absorbidos por los módulos fotovoltaicos [2]. Los módulos fotovoltaicos deben estar orientados de tal manera que garanticen la máxima generación de energía eléctrica estos módulos fotovoltaicos están contruidos con semiconductores NP (negativo-positivo), regularmente, estos

módulos son de Silicio siendo los más comunes: monocristalino, policristalino y amorfo [3].

Consumo residencial

Con respecto a los consumidores residenciales en el 2023, en la CNEL EP, las Unidades de Negocio que tuvieron un mayor consumo promedio fueron: Guayaquil, Guayas Los Ríos y Manabí; su consumo promedio mensual fue mayor a 150 kWh/consumidor. Mientras la Unidad de Negocio Bolívar es la que menor consumo promedio presentó (65,31kWh/consumidor) [4].

Por parte de las empresas eléctricas, la E.E. Galápagos y la E.E. Quito son las distribuidoras que mayor consumo promedio tuvieron (superior a 120 kWh/consumidor). La E.E. Riobamba es la que menor consumo promedio presentó (75,04 kWh/consumidor).

A nivel nacional el consumo promedio mensual de los consumidores residenciales fue de 143,36 kWh/consumidor.

Consumo industrial

En el 2023, en la CNEL EP, las Unidades de Negocio que tuvieron

un mayor consumo promedio fueron: Milagro y Sucumbíos, las cuales presentaron un consumo promedio superior a 80.000 kWh/consumidor. Por su parte, la Unidad de Negocio Bolívar es la que menor consumo promedio presentó (415,02 kWh/consumidor) [4].

Por parte de las empresas eléctricas, la E.E. Sur y la E.E. Riobamba son las distribuidoras que mayor consumo promedio tuvieron (superior a 10.000 kWh/consumidor). La E.E. Galápagos es la distribuidora que menor consumo promedio presentó (349,34 kWh/consumidor). A nivel nacional se reporta un consumo promedio mensual de los consumidores industriales de 13.327,26 kWh/consumidor.

Consumo comercial

La información revela que las empresas de mayor consumo promedio en el 2023, en cuanto a consumidores comerciales, fueron las Unidades de Negocio de CNEL EP, específicamente: Guayas Los Ríos, Manabí, Guayaquil y Santa Elena; éstas registraron consumos promedios superiores a los 1.000 kWh/consumidor. La CNEL EP

Unidad de Negocio Bolívar, es la que menor consumo promedio presentó (341,74 kWh/consumidor) [4].

Por parte de las empresas eléctricas, la E.E. Galápagos y la E.E. Quito son las distribuidoras que mayor consumo promedio registraron (superior a 500 kWh/ consumidor). La E.E. Riobamba es la distribuidora que menor consumo promedio presentó (282,25 kWh/consumidor). A nivel nacional se estableció que el

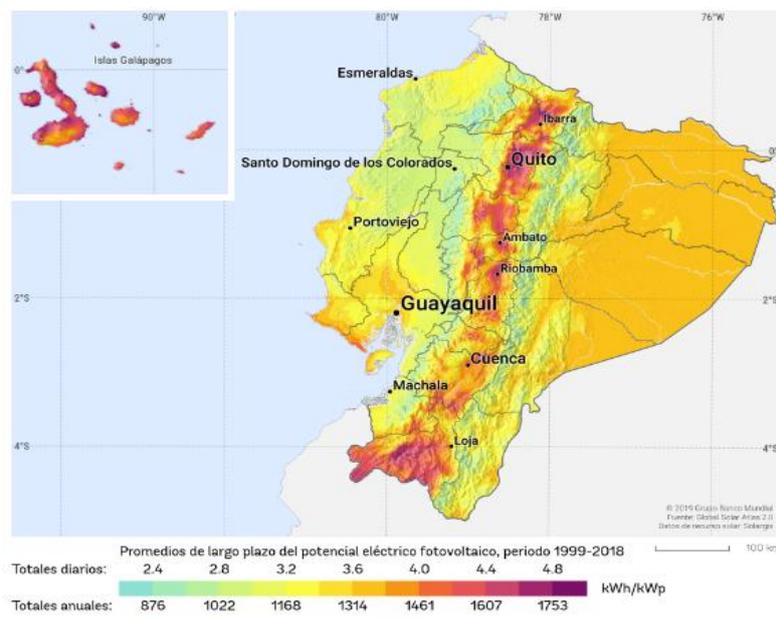
consumo promedio mensual de los consumidores comerciales fue 723,03 kWh/consumidor.

Sistema propuesto

Ubicación

El valor máximo de La radiación en Ecuador es de 5.748 Wh/m²/día, la mínima El valor es de 3.634 Wh/m²/día mientras que el valor medio es 4.574 Wh/m²/día [5].

Fig. 1 Mapa Solar del Ecuador



El dimensionamiento del sistema debe considerar diversos factores clave para garantizar su eficiencia y correcto funcionamiento. Entre estos aspectos se incluyen la ubicación del recinto donde se instalará el sistema, la orientación e inclinación de los

paneles, y el tipo de soporte a utilizar. Además, es fundamental evaluar las condiciones del suelo o techo en el que se fijarán los soportes, así como el espacio disponible en metros cuadrados (m²).

Demanda y oferta de energía.

Los sistemas fotovoltaicos son de fácil instalación, tienen bajos costos de mantenimiento, larga vida útil, alta confiabilidad y pueden ser usados para la generación distribuida donde se requiera un suministro de electricidad [8]. En instalaciones PV, a más de estos factores, la temperatura superficial de los módulos fotovoltaicos también afecta a la eficiencia del sistema. Adicionalmente, es necesario considerar los aspectos económicos y las demandas energéticas, para así maximizar la producción en los momentos de mayor demanda o de mayor costo energético.

Para obtener los resultados esperados en un proyecto fotovoltaico se deben considerar: la eficiencia energética del sistema a instalar; su dimensionamiento tecnológico; el potencial promedio de la energía solar diaria promedio anual; el ángulo de inclinación de los módulos; el nivel de sombreado presente en el área; la calidad y características de la tecnología que está en la oferta del mercado; la evaluación de los posibles daños ocasionados por desastres naturales; y demás aspectos que de

forma particular se deben analizar [9].

La eficiencia del sistema FV está compuesta por el producto de la eficiencia de los paneles FV y la de los inversores. Estos datos fueron obtenidos de hojas técnicas de varios fabricantes para establecer la eficiencia del año base 2013, 10.8% (paneles 14.5% e inversor 92%). Se predice que la eficiencia al 2050 llegue a un 27.0% (paneles 27.6% e inversor 98%).

Preprocesamiento de Datos

Preprocesamiento de Datos El primer paso en la metodología consistió en la indexación y estructuración de los datos de radiación solar. Se extrajeron las fechas y valores de radiación del archivo Excel y se convirtieron a un formato de serie temporal utilizando pandas. Para facilitar el procesamiento, se generó un DataFrame con las fechas como índice y los valores de radiación como columna principal [6].

La normalización de los datos se realizó utilizando MinMaxScaler con el objetivo de escalar los valores de radiación en un rango de [0,1]. Este

procedimiento es fundamental para evitar que valores de magnitudes distintas generen un sesgo en el modelo, asegurando que todos los datos sean tratados de manera equitativa. La normalización se calculó con la siguiente ecuación:

$$X_{norm} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (1)$$

División de Datos en Conjuntos de Entrenamiento y Prueba Para evaluar la capacidad predictiva del modelo, se dividieron los datos en dos conjuntos: entrenamiento y prueba. Donde D_{train} y D_{test} representan los conjuntos de entrenamiento y prueba, respectivamente, y t_{corte} es la fecha de separación [6].

$$D_{train} = \{X(t) | t < t_{corte}\} \quad D_{test} = \{X(t) | t \geq t_{corte}\} \quad (2)$$

Creación de Secuencias de Entrada para el Modelo

Para capturar la dinámica temporal de la radiación solar, se utilizó una ventana de tiempo de 24 horas [7]. Esto significa que cada muestra de entrada X_t se formó con los valores de radiación de las 24 horas anteriores:

$$X_t = \{R_{t-24}, R_{t-23}, \dots, R_{t-1}\} \quad (3)$$

Y la salida correspondiente Y_t es el valor de radiación en el tiempo actual:

$$Y_t = R_t \quad (4)$$

Entrenamiento del Modelo SVM

El modelo utilizado para la predicción de la radiación solar fue una Máquina de Soporte Vectorial (SVM) con un kernel radial base (rbf) [7]. El modelo fue entrenado minimizando el error cuadrático medio (MSE):

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (5)$$

Predicción y Evaluación del Modelo

Una vez entrenado el modelo, se realizaron predicciones sobre el conjunto de datos de prueba. Se evaluaron las predicciones utilizando la matriz de confusión y métricas de clasificación:

Precisión

La precisión es una métrica utilizada en la evaluación de modelos de clasificación que indica la proporción de predicciones positivas que son realmente correctas. Se calcula como la razón entre los verdaderos positivos (TP) y la suma de

verdaderos positivos (TP) y falsos positivos (FP) [8].

Un alto valor de precisión indica que el modelo comete pocos errores al clasificar instancias negativas como positivas.

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (6)$$

Sensibilidad (Recall o Tasa de Verdaderos Positivos)

La sensibilidad mide la capacidad del modelo para identificar correctamente todas las instancias positivas. Es la proporción de verdaderos positivos detectados respecto al total de instancias positivas existentes (la suma de verdaderos positivos y falsos negativos) [8].

$$Sensibilidad = \frac{TP}{TP + FN} \quad (7)$$

Exactitud: Es una métrica global que mide qué tan bien el modelo clasifica tanto las instancias positivas como negativas. Se define como la proporción de predicciones correctas (verdaderos positivos y verdaderos negativos) respecto al total de casos evaluados [9].

$$Exactitud = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (8)$$

Donde TP, TN, FP y FN representan verdaderos positivos, verdaderos negativos, falsos positivos y falsos negativos respectivamente.

Visualización y Análisis de Resultados

Los resultados se presentaron a través de una interfaz gráfica en Tkinter, donde se graficaron: Radiación real vs. radiación predicha, promedios diarios y mensuales, para las métricas de error se utilizó la matriz de confusión.

Sistema Fotovoltaico

El dimensionamiento de un sistema fotovoltaico es fundamental para garantizar un suministro energético eficiente y sostenible. Los cálculos consideran múltiples variables, como el consumo energético, la radiación solar disponible y la eficiencia de los componentes del sistema. A continuación, se presentan los cálculos fundamentales junto con sus ecuaciones y referencias.

Cálculo de la Demanda Energética Diaria

Para dimensionar un sistema fotovoltaico, es necesario conocer la demanda diaria de energía [10]. Se

obtiene a partir del consumo mensual de energía eléctrica, dividiéndolo por los días del mes:

$$E_{diaria} = \frac{E_{mensual}}{D_{mes}} \quad (9)$$

Cálculo de la Capacidad del Sistema Fotovoltaico

La capacidad necesaria del sistema fotovoltaico se determina dividiendo la demanda diaria entre el producto de las horas pico de sol y la eficiencia total del sistema:

$$P_{STC} = \frac{E_{diaria}}{H_{PSH} \cdot \eta_{total}} \quad (10)$$

Cálculo del Área de los Paneles Solares

El área de los paneles solares requerida se obtiene dividiendo la capacidad del sistema entre la radiación solar estándar y la eficiencia del panel:

$$A_{panel} = \frac{P_{STC}}{G_{STC} \cdot \eta_{panel}} \quad (11)$$

Referencia: Markvart (2000), Solar Electricity.

Cálculo de la Capacidad de Almacenamiento en Baterías

En [11] se garantiza autonomía energética en ausencia de radiación solar, se calcula la capacidad de las baterías en función de la energía

diaria, los días de autonomía, la profundidad de descarga y la eficiencia de la batería:

$$C_{bateria} = \frac{E_{diaria} \cdot D_{autonomia}}{DOD \cdot \eta_{bateria}} \quad (12)$$

Cálculo de la Potencia del Inversor

El inversor debe ser dimensionado para manejar la potencia máxima que el sistema fotovoltaico puede generar. Para garantizar un funcionamiento eficiente y seguro, la potencia del inversor debe ser al menos igual a la potencia pico del sistema:

$$P_{inversor} = P_{pico} \quad (13)$$

Kalogirou (2014), Solar Energy Engineering: Processes and Systems.

Cálculo del Número de Paneles Solares

El número total de paneles solares necesarios se determina dividiendo la capacidad total del sistema entre la potencia nominal de un solo panel en condiciones estándar de prueba (STC):

$$N_{paneles} = \frac{P_{STC}}{P_{panel}} \quad (14)$$

Referencia: Boyle (2012), Renewable Energy: Power for a Sustainable Future.

La metodología utilizada en el código para el cálculo del sistema fotovoltaico se basa en la evaluación de costos, producción de energía y sostenibilidad del sistema, utilizando diversas ecuaciones matemáticas y factores de eficiencia [12].

Inicialmente, el usuario ingresa los valores de costo y eficiencia del sistema, los cuales son validados para garantizar que se encuentren dentro de un rango aceptable [13]. Posteriormente, se realizan los siguientes cálculos principales:

Cálculo del costo total del sistema:

Esta ecuación estima el costo total inicial del sistema fotovoltaico, considerando la inversión en paneles solares, inversor, baterías y costos asociados a la instalación. Se multiplica el costo de los paneles por 1000 para reflejar su precio en función de la capacidad instalada, y el costo de las baterías se ajusta con un factor de 10 para reflejar su impacto en la inversión total [3].

$$C_{total} = (C_{paneles} \times 1000) + C_{inversor} + C_{instalacion} + (C_{baterias} \times 10) \quad (15)$$

Cálculo del periodo de recuperación (Payback Period):

Este cálculo determina el tiempo requerido para recuperar la inversión inicial del sistema a través de los ahorros anuales en la factura eléctrica. Se expresa en años y es un indicador clave para evaluar la viabilidad financiera del proyecto [14].

$$Paybackperiod = \frac{C_{total}}{Ahorro_{anual}} \quad (16)$$

Producción total de energía durante la vida útil:

Esta ecuación estima la cantidad total de energía que el sistema fotovoltaico producirá durante su vida útil. Se obtiene multiplicando la energía generada anualmente por la cantidad de años que el sistema puede operar eficientemente [15].

$$Producción_{total} = E_{generada} \times Vida_{util} \quad (17)$$

Reducción de emisiones de CO₂: 2:

Permite calcular el impacto ambiental positivo del sistema fotovoltaico al estimar la cantidad de

emisiones de CO₂ evitadas en comparación con fuentes de energía convencionales. El factor de emisión depende del mix energético del país o región donde se instala el sistema.

$$\begin{aligned} & \text{ReducciónCO}_2 \\ & = \text{Producción}_{total} \\ & \times \text{Factor}_{emision} \end{aligned} \quad \begin{pmatrix} (\\ 18 \\) \end{pmatrix}$$

Costo nivelado de la energía (LCOE):

El LCOE representa el costo unitario de generación de cada kWh producido por el sistema fotovoltaico. Es un indicador clave para comparar la competitividad del sistema con otras fuentes de energía [14].

$$LCOE = \frac{C_{total}}{Producción_{total}} \quad (19)$$

Ahorros totales durante la vida útil:

Esta ecuación determina el beneficio económico total que el usuario obtendrá a lo largo de la vida útil del sistema mediante la reducción en la factura de electricidad.

$$Ahorros_{totales} = Ahorro_{anual} \times Vida_{util} \quad (20)$$

Energía útil generada considerando pérdidas:

Permite ajustar la energía generada considerando las ineficiencias del sistema, como pérdidas en la

conversión de energía, degradación de los paneles y eficiencia del inversor.

$$E_{util} = E_{generada} \times (1 - Tasa_{pérdidas}) \quad (21)$$

Energía sobrante tras el consumo

Calcula la cantidad de energía excedente disponible después de satisfacer el consumo del usuario. Si la energía generada es menor que la consumida, el resultado será cero, indicando que no hay excedente [14].

$$\begin{aligned} E_{sobrante} \\ & = \max(0, E_{util} \\ & - E_{consumida}) \end{aligned} \quad (22)$$

Determina cuánta energía queda disponible después del consumo propio.

Cálculo de la cantidad de árboles equivalentes plantados:

Este cálculo estima el impacto ambiental del sistema en términos de compensación de CO₂, comparándolo con la cantidad de CO₂ absorbida por un árbol promedio a lo largo de su vida.

$$\begin{aligned} \text{Árboles plantados} \\ & = \frac{\text{Reducción CO}_2}{\text{CO}_2_{\text{árbol}}} \end{aligned} \quad (23)$$

Costo total de mantenimiento:

Permite evaluar el gasto acumulado en mantenimiento a lo largo de la vida útil del sistema, incluyendo inspecciones, reemplazo de componentes y otros costos operativos.

$$\begin{aligned} \text{Costo mantenimiento} &= C_{total} \\ &+ (\text{Costo}_{\text{mantenimiento}} \times \text{Vida}_{\text{util}}) \end{aligned} \quad (24)$$

Energía almacenada en baterías:

Calcula la cantidad de energía efectiva que se puede almacenar en las baterías considerando su eficiencia. La eficiencia de las baterías varía según el tipo de tecnología utilizada (litio, plomo-ácido, etc.).

$$E_{\text{almacenada}} = C_{\text{baterias}} \times \frac{\text{Eficiencia}_{\text{baterias}}}{100} \quad (25)$$

Vida útil ajustada por descargas profundas:

Toma en cuenta el impacto de las descargas profundas en la vida útil de las baterías. Una mayor profundidad de descarga reduce la cantidad de ciclos de vida del sistema de almacenamiento.

$$\begin{aligned} \text{Vidaajustada} &= \text{Vida}_{\text{util}} \times (1 \\ &- \text{Descargas}_{\text{profundas}}) \end{aligned} \quad (26)$$

Las ecuaciones utilizadas en este modelo están basadas en metodologías estándar de análisis económico y de energía en sistemas fotovoltaicos, como las propuestas en estudios de viabilidad técnica y financiera de energía renovable (Kalogirou, 2014; Duffie & Beckman, 2013).

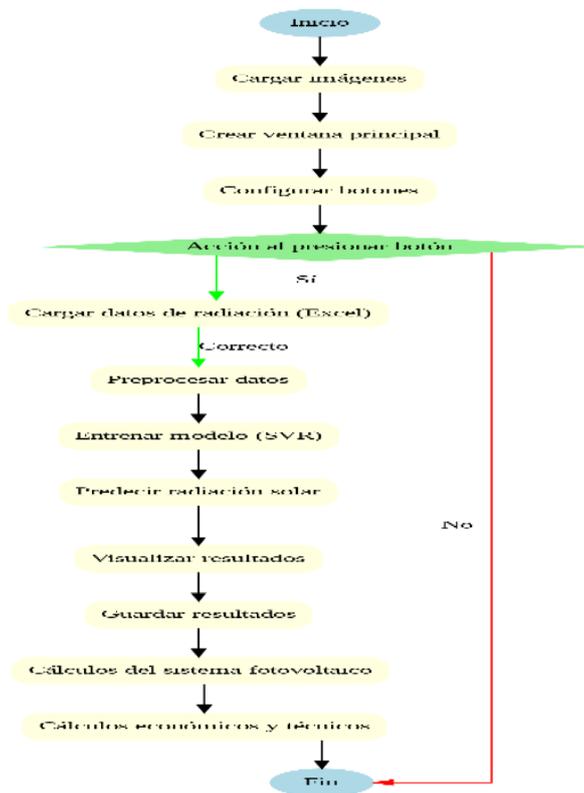
Metodología de la programación

El procedimiento para el diagrama de flujo comienza con la ejecución de la interfaz gráfica, que incluye la carga de imágenes, la configuración de la ventana principal, la colocación de botones y la asignación de funciones para cada acción. Luego, se cargan los datos de radiación solar desde un archivo Excel, se realiza el preprocesamiento mediante la normalización y división en conjuntos de entrenamiento y prueba, y se generan secuencias de datos para entrenar un modelo de soporte vectorial (SVR) con kernel RBF. Una vez entrenado, el modelo predice la radiación solar, se desnormalizan los valores y se calculan los promedios diarios y mensuales. Finalmente, los resultados se visualizan mediante gráficos y se guardan en un archivo Excel.

Posteriormente, se calculan los parámetros clave del sistema fotovoltaico, como el consumo energético, la capacidad de la batería y la potencia del inversor, validando los datos ingresados por el usuario. También se incluyen cálculos económicos como el costo total, el período de recuperación, la

reducción de CO₂, mostrando los resultados en la interfaz. Dicha aplicación permite visualizar tablas de datos, reiniciar valores, permanece activa hasta su cierre manual. La estructura del diagrama de flujo sigue una secuencia lógica que facilita la comprensión y organización del sistema.

Fig. 2. Diagrama de Flujo



3. Resultados y discusión

Interfaz gráfica para la evaluación técnico y económico

La herramienta permite analizar variables clave como el consumo energético, la radiación solar

disponible, así también, como los costos asociados a la instalación, operación del sistema. Además, ofrece una experiencia interactiva y fácil de usar, facilitando la toma de decisiones informadas para la implementación de sistemas fotovoltaicos.

Fig. 3 Interfaz grafica principal



Resultados de las métricas de error causal

En esta sección se presentan las métricas de error obtenidas al evaluar el modelo de predicción de radiación solar. Las métricas incluyen precisión, sensibilidad y exactitud, que permiten medir el rendimiento del modelo al clasificar correctamente los datos. A continuación, se detalla un resumen de los resultados:

Tabla 1. Métricas de error causal

Métrica	Valor
Precisión	0.96
Sensibilidad	0.96
Exactitud	0.92

Estas métricas indican un alto rendimiento del modelo en términos

de precisión y sensibilidad, lo que sugiere que el modelo predice de manera efectiva tanto los valores positivos como negativos de radiación solar.

Reporte de Clasificación:

El reporte de clasificación proporciona una visión más detallada del desempeño del modelo para cada clase (Negativa y Positiva). Se utilizan las métricas de precisión, recall (sensibilidad), y F1-Score para evaluar el rendimiento en la clasificación de cada categoría. A continuación, se presentan los resultados:

Tabla 2 Reporte de Métricas de Error Causal

Clase	Precisión	Recall	F1-Score	Support
Negativa	0.00	0.00	0.00	150
Positiva	0.96	0.96	0.96	3624

Estos resultados muestran que el modelo tiene un rendimiento excelente para la clase Positiva, lo que indica una alta capacidad para predecir correctamente los días con alta radiación solar. Sin embargo, el desempeño para la clase Negativa es nulo, lo que sugiere que el modelo no está logrando identificar adecuadamente los días con baja radiación. Esto podría deberse a un desbalance en el conjunto de datos o a la necesidad de ajustar los parámetros del modelo.

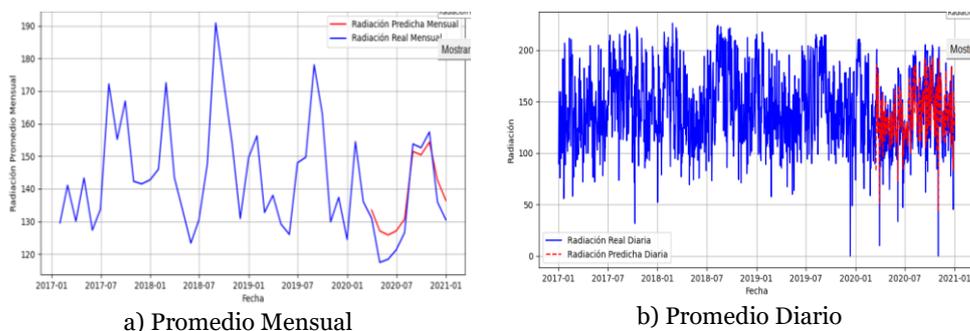
Resultados de la radiación mensual y diaria de la base de datos y lo predicho por medio del modelo de aprendizaje automático.

Esta sección compara la radiación solar observada en la base de datos

con las predicciones generadas utilizando el modelo de Máquinas de Soporte Vectorial (SVM). Se presentan gráficos que muestran la variación mensual y diaria de la radiación, permitiendo visualizar la precisión de las predicciones en relación con los datos reales.

El análisis de estas comparativas ayuda a identificar patrones estacionales y variaciones diarias en la radiación solar, proporcionando información valiosa para optimizar el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos. Además, se evalúa la capacidad del modelo para adaptarse a cambios en las condiciones climáticas, lo que es crucial para aplicaciones en zonas con alta variabilidad de radiación solar, como es el caso de Ecuador.

Fig. 4 Resultados de la radiación solar Real y Predicha



Cálculo de los sistemas Fotovoltaicos

El cálculo de los sistemas fotovoltaicos es fundamental para dimensionar correctamente la generación de energía solar en diferentes tipos de instalaciones, como residenciales, comerciales e industriales. Para ello, se consideran múltiples parámetros que afectan el desempeño del sistema, tales como el consumo mensual de energía, la

cantidad de horas pico de sol disponibles, la eficiencia total del sistema y del panel solar, los días de autonomía de las baterías, la profundidad de descarga y la eficiencia de almacenamiento energético. Estos datos permiten estimar la capacidad del sistema, la cantidad de paneles solares requeridos, la capacidad de almacenamiento en baterías y la potencia del inversor necesario para garantizar un suministro confiable.

Tabla 3. Datos Referenciales para el ingreso a la Interfaz grafica

Parámetro	Residencial	Comercial	Industrial
Consumo mensual (kWh)	300	1500	10000
Horas pico de sol (H_PSH)	5	5	5
Eficiencia total del sistema (η_{total})	0.85	0.85	0.85
Eficiencia del panel solar (η_{panel})	0.18	0.18	0.18
Días de autonomía (D_autonomía)	2	2	3
Profundidad de descarga (DoD)	0.5	0.5	0.5
Eficiencia de las baterías ($\eta_{batería}$)	0.9	0.9	0.9
Potencia pico requerida (P_pico, kW)	5	15	100
Potencia de un panel solar (kW)	0.3	0.3	0.3

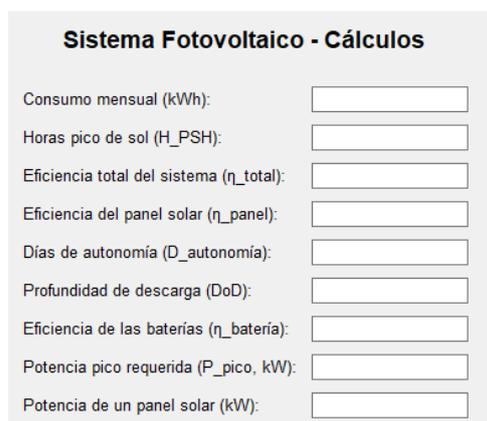
El código en Python, desarrollado con la biblioteca Tkinter, proporciona una interfaz gráfica intuitiva que permite a los usuarios ingresar estos parámetros y obtener los cálculos esenciales de manera rápida y eficiente. Al introducir los valores correspondientes al tipo de usuario (residencial, comercial o industrial), la aplicación realiza automáticamente los cálculos, mostrando resultados clave como la

demanda diaria promedio, la capacidad del sistema fotovoltaico, el área de los paneles solares, la capacidad de almacenamiento de energía en baterías, la potencia del inversor y el número de paneles solares requeridos. Esta herramienta facilita la planificación y diseño de sistemas fotovoltaicos, optimizando el uso de la energía solar y mejorando la toma de decisiones en proyectos de energías renovables.

Resultados del sistema fotovoltaico para el sistema residencial comercial e industrial

El diseño de un sistema fotovoltaico varía según el tipo de usuario: residencial, comercial o industrial. Factores clave como el consumo energético mensual, las horas pico de sol, la eficiencia del sistema, la capacidad de almacenamiento en baterías y la autonomía requerida influyen en la configuración del sistema. A continuación, se presentan los resultados detallados para cada sector.

Fig. 5 Interfaz grafica del cálculo del sistema fotovoltaico



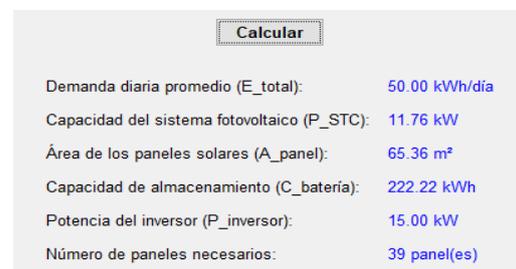
Sistema Fovoltaiico - Cálculos	
Consumo mensual (kWh):	<input type="text"/>
Horas pico de sol (H_PSH):	<input type="text"/>
Eficiencia total del sistema (η_{total}):	<input type="text"/>
Eficiencia del panel solar (η_{panel}):	<input type="text"/>
Días de autonomía (D_autonomía):	<input type="text"/>
Profundidad de descarga (DoD):	<input type="text"/>
Eficiencia de las baterías ($\eta_{batería}$):	<input type="text"/>
Potencia pico requerida (P_pico, kW):	<input type="text"/>
Potencia de un panel solar (kW):	<input type="text"/>

Calculo para el sistema comercial

Los resultados indican una demanda diaria promedio de 50.00 kWh/día, una capacidad del sistema fotovoltaico de 11.76 kW, un área de paneles solares de 65.36 m², una

capacidad de almacenamiento de 222.22 kWh, una potencia del inversor de 15.00 kW y 39 panel(es) necesarios. Estos cálculos ayudan a dimensionar el sistema fotovoltaico de manera precisa para un entorno comercial, considerando el consumo energético moderado, la radiación solar disponible, la eficiencia del sistema, los días de autonomía y la capacidad de almacenamiento requerida.

Fig. 6 Resultados sistema comercial



Calcular	
Demanda diaria promedio (E_total):	50.00 kWh/día
Capacidad del sistema fotovoltaico (P_STC):	11.76 kW
Área de los paneles solares (A_panel):	65.36 m ²
Capacidad de almacenamiento (C_batería):	222.22 kWh
Potencia del inversor (P_inversor):	15.00 kW
Número de paneles necesarios:	39 panel(es)

Calculo para el sistema industrial

Los resultados obtenidos muestran una demanda diaria promedio de 333.33 kWh/día, una capacidad del sistema fotovoltaico de 78.43 kW, un área de paneles solares de 435.73 m², una capacidad de almacenamiento de 20.00 kWh, una potencia del inversor de 15.00 kW y 261 panel(es) necesarios. Estos cálculos permiten dimensionar el sistema fotovoltaico de manera adecuada para un entorno industrial,

considerando el alto consumo energético, la radiación solar disponible, la eficiencia del sistema, los días de autonomía y la capacidad de almacenamiento requerida.

Fig. 7 Resultados sistema Industrial

Calcular	
Demanda diaria promedio (E_total):	333.33 kWh/día
Capacidad del sistema fotovoltaico (P_STC):	78.43 kW
Área de los paneles solares (A_panel):	435.73 m ²
Capacidad de almacenamiento (C_batería):	20.00 kWh
Potencia del inversor (P_inversor):	15.00 kW
Número de paneles necesarios:	261 panel(es)

Calculo para el sistema residencial

Los resultados obtenidos incluyen una demanda diaria promedio de 50.00 kWh/día, una capacidad del sistema fotovoltaico de 11.76 kW, un área de paneles solares de 65.36 m², una capacidad de almacenamiento de 222.22 kWh, una potencia del inversor de 15.00 kW y 39 panel(es) necesarios. Estos cálculos permiten dimensionar adecuadamente el sistema fotovoltaico considerando el consumo energético, la radiación solar, la eficiencia del sistema, la autonomía y la capacidad de almacenamiento requerida.

Fig. 8 Resultados sistema Residencial

Calcular	
Demanda diaria promedio (E_total):	10.00 kWh/día
Capacidad del sistema fotovoltaico (P_STC):	2.35 kW
Área de los paneles solares (A_panel):	13.07 m ²
Capacidad de almacenamiento (C_batería):	44.44 kWh
Potencia del inversor (P_inversor):	5.00 kW
Número de paneles necesarios:	8 panel(es)

Costos y rendimientos del sistema fotovoltaico Residencial

El sistema fotovoltaico residencial (Tipo) representa una inversión eficiente con un costo inicial de \$4,950.00 USD y un ahorro anual estimado de \$1,200 USD, lo que permite recuperar la inversión en 4.12 años. Durante su vida útil de 25 años, se proyectan ahorros totales de \$30,000.00 USD, aunque el mantenimiento acumulado asciende a \$6,200.00 USD. La producción energética anual es de 3,000 kWh, alcanzando 75,000 kWh en total, con un consumo residencial de 3,500 kWh/año y un almacenamiento en baterías de 170 kWh con 85% de eficiencia.

Desde el punto de vista ambiental, el sistema permite reducir 30 toneladas de CO₂, equivalentes a la plantación de 1,500 árboles, con un factor de emisión de 0.0004 Ton/kWh. Su costo nivelado de energía (LCOE) es de \$0.0660 USD/kWh, con una tasa

de pérdidas del 8% y descargas profundas de hasta 70%. En conclusión, este sistema ofrece un equilibrio entre inversión, ahorro y sostenibilidad, siendo una solución eficiente para el suministro energético residencial.

Costos y rendimientos del sistema fotovoltaico Residencial Comercial

La tabla de datos proporciona los parámetros clave para calcular costos y rendimiento de sistemas fotovoltaicos en Python, diferenciando entre usuarios residenciales, comerciales e industriales. Se incluyen costos de paneles solares, inversores, baterías e instalación, los cuales varían según la escala del sistema. También se consideran la energía generada y consumida anualmente, la vida útil del sistema y la eficiencia de las baterías, lo que permite

estimar la producción y el almacenamiento de energía.

Además, se incluyen factores ambientales y financieros como el ahorro anual, el costo nivelado de la energía (LCOE), el factor de emisión de CO₂ y la cantidad absorbida por árboles, evaluando el impacto ecológico. La tasa de pérdidas y la profundidad de descarga de las baterías afectan la eficiencia y durabilidad del almacenamiento de energía. El costo de mantenimiento también es un factor crucial en la rentabilidad del sistema.

Estos parámetros permiten simular distintos escenarios en el código, ajustando variables para optimizar costos y beneficios. La información es esencial para tomar decisiones informadas sobre la implementación de sistemas fotovoltaicos en distintos sectores, maximizando el rendimiento y reduciendo el impacto ambiental.

Tabla 4 Datos promedio para el cálculo del sistema fotovoltaico

Parámetro	Residencial	Comercial	Industrial
Costo de Paneles Solares (USD/Wp)	0.80 - 1.20	0.70 - 1.00	0.60 - 0.90
Costo de Inversor (USD/kW)	150 - 200	120 - 170	100 - 150
Costo de Baterías (USD/kWh)	200 - 300	180 - 250	150 - 220
Costo de Instalación (USD)	2,000 - 5,000	10,000 - 50,000	50,000 - 150,000
Energía Generada Anualmente (kWh)	3,000 - 6,000	50,000 - 200,000	200,000 - 1,000,000
Vida Útil del Sistema (años)	25	25	25

Ahorro Anual (USD)	500 - 1,200	8,000 - 25,000	50,000 - 200,000
Factor de Emisión de CO ₂ (Ton/kWh)	0.0004 - 0.0007	0.0003 - 0.0006	0.0002 - 0.0005
Tasa de Pérdidas (%)	8 - 12	5 - 10	3 - 8
Costo de Mantenimiento (USD)	50 - 150	500 - 2,000	3,000 - 10,000
Energía Consumida Anualmente (kWh)	3,500 - 7,000	100,000 - 250,000	300,000 - 1,200,000
CO ₂ Absorbido por Árbol (Ton/año)	0.02 - 0.05	0.5 - 1.0	2.0 - 5.0
Eficiencia de Baterías (%)	85 - 90	90 - 95	95 - 98
Descargas Profundas (%)	70 - 80	60 - 70	50 - 60

El sistema fotovoltaico Comercial (Tipo) analizado presenta un costo total de \$12,620 USD y un período de recuperación de 1.58 años, lo que indica una inversión rentable a corto plazo. Con una producción total de 1,250,000 kWh de energía y un ahorro total estimado de \$2,000,000 USD, el sistema demuestra ser altamente eficiente en términos económicos. Además, el costo nivelado de energía (LCOE) es de \$0.0101 USD/kWh, lo que sugiere una energía accesible y competitiva en comparación con fuentes convencionales. En términos de impacto ambiental, la reducción total de CO₂ es de 500 toneladas, equivalente a la absorción de 1,000 árboles, lo que resalta su contribución a la sostenibilidad y mitigación del cambio climático.

Sin embargo, aunque la energía útil generada es de 475,000 kWh, la energía almacenada en las baterías

es de solo 162.00 kWh, lo que sugiere una dependencia del sistema en el consumo directo de la energía producida. La vida útil ajustada de las baterías se reduce a 10 años, lo que implica la necesidad de reemplazo antes del fin de vida útil del sistema de 25 años, lo que podría afectar la rentabilidad a largo plazo. Asimismo, el costo total de mantenimiento asciende a \$25,120 USD, lo que debe considerarse en la evaluación económica del proyecto. A pesar de estos desafíos, el sistema sigue representando una opción viable y eficiente para la generación de energía limpia y sostenible.

Costos y rendimientos del sistema fotovoltaico Residencial Industrial

El análisis del sistema fotovoltaico industrial (Tipo) muestra un costo total de \$52,200 USD y un período de recuperación de 1.04 años, lo que indica una inversión altamente rentable en el corto plazo. La

producción total de energía a lo largo de la vida útil del sistema es de 5,000,000 kWh, con un ahorro total estimado de \$1,250,000 USD. El costo nivelado de energía (LCOE) es de \$0.0104 USD/kWh, lo que lo hace competitivo frente a otras fuentes energéticas. En términos ambientales, la reducción de CO₂ es de 2,000 toneladas, lo que equivale a la absorción de 1,000 árboles, destacando su impacto positivo en la mitigación del cambio climático.

A pesar de la alta eficiencia del sistema, la energía útil generada es de 1,940,000 kWh, lo que implica pérdidas significativas respecto a la energía consumida anualmente. La energía almacenada en las baterías es de solo 142.50 kWh, lo que puede limitar la disponibilidad de energía en momentos de baja generación. La vida útil ajustada de las baterías es de 12.50 años, lo que sugiere que deberán reemplazarse antes del fin de vida útil del sistema de 25 años. Además, el costo total de mantenimiento asciende a \$1,772,000 USD, lo que representa un factor relevante en la evaluación económica del proyecto. A pesar de estos aspectos, el sistema sigue siendo una opción viable para la

generación de energía limpia y sostenible.

4. Conclusiones

El modelo de Máquinas de Soporte Vectorial (SVM) utilizado en el estudio demuestra un alto rendimiento en la predicción de radiación solar, con una precisión de 0.96 y sensibilidad de 0.96. Esto permite mejorar la planificación y el diseño de sistemas fotovoltaicos al identificar con precisión los días con alta radiación. Sin embargo, la identificación de días con baja radiación podría mejorarse con un mayor balanceo en el conjunto de datos o ajustes en los parámetros del modelo.

El análisis técnico revela que el dimensionamiento adecuado de los sistemas fotovoltaicos en función de la demanda energética de los sectores residencial, comercial e industrial es crucial para maximizar la eficiencia del sistema. En particular, se identificó que el sector comercial necesita 11.76 kW y 39 paneles para cubrir 50 kWh/día, mientras que el sector industrial requiere una capacidad mucho

mayor de 78.43 kW con 261 paneles solares.

A nivel económico, el sistema fotovoltaico para el sector residencial muestra una inversión inicial de \$4,950 USD, con un ahorro anual de \$1,200 USD, alcanzando la recuperación de la inversión en 4.12 años. Este análisis demuestra que los sistemas fotovoltaicos no solo son una opción viable desde el punto de vista técnico, sino también económicamente atractiva a largo plazo, con un ahorro total estimado de \$30,000 USD durante 25 años.

Los sistemas fotovoltaicos contribuyen significativamente a la reducción de emisiones de CO₂, con un ahorro de 30 toneladas de CO₂ durante la vida útil del sistema residencial. Este ahorro es equivalente a la plantación de 1,500 árboles, lo que resalta el beneficio ambiental adicional que estos sistemas pueden ofrecer, además de su viabilidad económica.

El modelo desarrollado en el estudio permite ajustar el diseño y dimensionamiento de los sistemas fotovoltaicos según las necesidades energéticas específicas de los sectores residencial, comercial e

industrial. Este enfoque adaptativo optimiza el rendimiento del sistema y la inversión, garantizando que las soluciones fotovoltaicas sean escalables y eficientes para diferentes perfiles de consumo energético en Ecuador.

Bibliografía

- [1] Tumbaco K. y Pantaleón K, "Generación de energía eléctrica a través de un sistema fotovoltaico Off Grid en la Zona rural de Guayaquil", Investigación, Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, 2024. Consultado: el 15 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/24665/1/UPS-GT004259.pdf>
- [2] W. A. Beckman y N. Blair, "Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind Emeritus Professor of Mechanical Engineering", 2020, Consultado: el 14 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: www.wiley.com/go/permissions.
- [3] Mariela Tapia, Leonard Ramos, Detlev Heinemann, y Edwin Zondervan, "Evaluación del Potencial Fotovoltaico en Tejados en el Cantón Quito.", *Perfiles*, vol.

- 1, núm. 30, pp. 47–56, dic. 2023, doi: 10.47187/PERF.V1I30.240.
- [4] CELEC, “Estadística Anual y Multianual 2023 DEL SECTOR ELÉCTRICO ECUATORIANO Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables”, pp. 20–120, mar. 2024, Consultado: el 15 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2024/04/EstadisticaAnual2023-WEB-2.pdf>
- [5] CONELEC, “ATLAS SOLAR DEL ECUADOR CON FINES DE GENERACIÓN ELÉCTRICA Corporación para la Investigación Energética”, pp. 2–22, ago. 2008.
- [6] H. R. L. Altamirano, O. E. Guerra, N. Z. Garay, y J. A. A. Son, “PREPROCESAMIENTO DE DATOS PRELIMINARES PARA CLASIFICADORES EN APRENDIZAJE SUPERVISADO”, TECTZAPIC. Revista Académico-Científica, pp. 80–87, ene. 2022, doi: 10.51896/TECTZAPIC/HWAL1467.
- [7] C. Fabara et al., “Predicción de la Generación para un Sistema Fotovoltaico mediante la aplicación de técnicas de Minería de Datos”, Revista Técnica energía, vol. 16, núm. 1, pp. 70–78, ene. 2019, doi: 10.37116/REVISTAENERGIA.V16.N1.2019.337.
- [8] B. I. Frauberth Camayo-Lapa, J. I. Eduardo Pomachagua-Paucar, J. I. Raúl Massipe-Hernaández, M. I. Oswaldo Quispe-Flores, y A. Torres-Ten III, “Validación y aplicación del modelo Bristow Campbell para estimar la radiación solar global de la región de Junin”, Tecnología Química, vol. 37, núm. 3, pp. 574–590, 2017, Consultado: el 15 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852017000300015&lng=pt&nrm=iso&tlng=es
- [9] V. N. Vapnik, “The Nature of Statistical Learning Theory”, The Nature of Statistical Learning Theory, 2000, doi: 10.1007/978-1-4757-3264-1.
- [10] R. A. Messenger y J. Ventre, “Photovoltaic Systems Engineering”, Photovoltaic Systems Engineering, 2005.
- [11] J. A. Duffie y W. A. Beckman, “Estimation of Clear-Sky radiation”, Solar Engineering of Thermal Processes, pp. 68–71, 2013, Consultado: el 15 de febrero de 2025. [En

- línea]. Disponible en: <https://www.wiley.com/en-gb/Solar+Engineering+of+Thermal+Processes%2C+4th+Edition-p-9780470873663>
- [12] J. L. García, F. Jurado, y V. Larco, "Review and resource assessment, solar energy in different region in Ecuador", *E3S Web of Conferences*, vol. 80, ene. 2019, doi: 10.1051/E3SCONF/20198001003.
- [13] M. Abuelia y B. Chowdhury, "Solar power forecasting using artificial neural networks", 2015 North American Power Symposium, NAPS 2015, nov. 2015, doi: 10.1109/NAPS.2015.7335176.
- [14] F. Cucchiella, I. D'Adamo, y M. Gastaldi, "The economic feasibility of residential energy storage combined with PV panels: The role of subsidies in Italy", *Energies (Basel)*, vol. 10, núm. 9, p. 149, sep. 2017, doi: 10.3390/en10091434.
- [15] Kieran Thompson, "Southeast Asia's pathway to clean energy is all but clean", pp. 1–4, ago. 2024, Consultado: el 13 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://www.hinrichfoundation.com/research/wp/sustainable/southeast-asia-pathway-to-clean-energy/?utm_source=google&utm_medium=search-](https://www.hinrichfoundation.com/research/wp/sustainable/southeast-asia-pathway-to-clean-energy/?utm_source=google&utm_medium=search-retargeting&utm_campaign=wp-thompson-sea-pathway-to-clean-energy&utm_content=20250121-static&utm_term=clean%20energy%20infrastructure&utm_campaign=Search+%7C+Generic+%7C+Kieran:+Clean+Energy&utm_source=adwords&utm_medium=ppc&hsa_acc=8724352572&hsa_cam=22138256118&hsa_grp=174535073460&hsa_ad=729741001407&hsa_src=g&hsa_tgt=kwd-2224713373813&hsa_kw=clean%20energy%20infrastructure&hsa_mt=b&hsa_net=adwords&hsa_ver=3&gad_source=1&gclid=CjwKCAiA8Lu9BhA8EiwAag16by53fmrCzsS4WSpYTW3JBpa_UPJ-6H3quZc2w_6Vjd7siwP1yCjvGxoCNswQAvD_BwE)