



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
INSTITUTO DE POSTGRADO**

TÍTULO

**SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE GESTIÓN ENERGÉTICA
BASADO EN LÓGICA DIFUSA PARA LA REGULACIÓN DEL FLUJO
DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE PARA EL
CONSUMO RESIDENCIAL DEL CANTÓN CHILLA: INTEGRACIÓN
DE ENERGÍA SOLAR Y DE CELDA DE COMBUSTIBLE**

AUTOR

Oyola Pindo, Javier Martín

TRABAJO DE TITULACIÓN

**Previo a la obtención del grado académico en
MAGÍSTER EN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN**

TUTOR

Herrera Muentes, Efrén Vinicio

Santa Elena, Ecuador

Año 2025



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
INSTITUTO DE POSTGRADO
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

**Ing. Alicia Andrade Vera, Mgtr.
COORDINADORA DEL
PROGRAMA**

**Ing. Efrén Herrera Muentes, Ph.D.
TUTOR**

**Ing. Luis Chuquimarca Jiménez, Mgtr.
DOCENTE
ESPECIALISTA**

**Ing. Junior Figueroa Olmedo, Mgtr.
DOCENTE
ESPECIALISTA**

**Abg. María Rivera González, MSc.
SECRETARIA GENERAL
UPSE**



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
INSTITUTO DE POSTGRADO**

CERTIFICACIÓN

Certifico que luego de haber dirigido científica y técnicamente el desarrollo y estructura final del trabajo, este cumple y se ajusta a los estándares académicos, razón por el cual apruebo en todas sus partes el presente trabajo de titulación que fue realizado en su totalidad por OYOLA PINDO JAVIER MARTÍN, como requerimiento para la obtención del título de Magíster en Electrónica y Automatización.

TUTOR

Ing. Efrén Herrera Muentes, Ph.D.

Santa Elena, 19 de febrero de 2025



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
INSTITUTO DE POSTGRADO**

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, OYOLA PINDO JAVIER MARTÍN

DECLARO QUE:

El trabajo de Titulación, SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE GESTIÓN ENERGÉTICA BASADO EN LÓGICA DIFUSA PARA LA REGULACIÓN DEL FLUJO DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE PARA EL CONSUMO RESIDENCIAL DEL CANTÓN CHILLA: INTEGRACIÓN DE ENERGÍA SOLAR Y DE CELDA DE COMBUSTIBLE, previo a la obtención del título en Magíster en Electrónica y Automatización, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Santa Elena, 19 de febrero de 2025

EL AUTOR

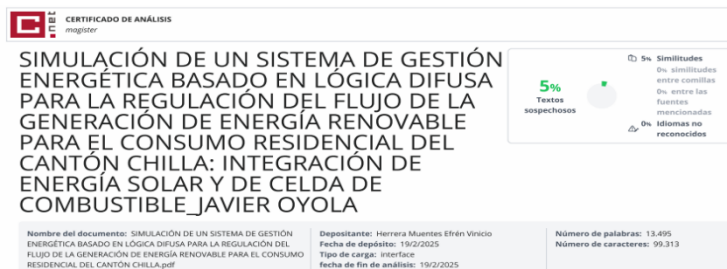
Oyola Pindo Javier Martín



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
INSTITUTO DE POSTGRADO**

CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO

Certifico que después de revisar el documento final del trabajo de titulación denominado simulación de un sistema de gestión energética basado en lógica difusa para la regulación del flujo de la generación de energía renovable para el consumo residencial del cantón chill: integración de energía solar y de celda de combustible, presentado por el estudiante, OYOLA PINDO JAVIER MARTÍN fue enviado al Sistema Antiplagio COMPILATIO, presentando un porcentaje de similitud correspondiente al 5%, por lo que se aprueba el trabajo para que continúe con el proceso de titulación.



TUTOR

Ing. Efrén Herrera Muentes, Ph.D.



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
INSTITUTO DE POSTGRADO**

AUTORIZACIÓN

Yo, OYOLA PINDO JAVIER MARTÍN

Autorizo a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, para que haga de este trabajo de titulación o parte de él, un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los derechos en línea patrimoniales del proyecto de titulación con componentes de investigación aplicada y/o de desarrollo con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este proyecto de titulación con componentes de investigación aplicada y/o de desarrollo dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor

Santa Elena, 19 de febrero de 2025

EL AUTOR

Oyola Pindo Javier Martín

AGRADECIMIENTO

Expreso mi sincero agradecimiento al Ph.D. Efrén Herrera Muentes por su guía y apoyo durante esta investigación, así como a mis compañeros de maestría por brindarme su amistad durante esta experiencia académica.

También extendiendo mi gratitud a quienes, de forma directa o indirecta, contribuyeron con recursos, tiempo y motivación, este logro es el reflejo de un esfuerzo colectivo, por el cual estaré siempre agradecido.

Oyola Pindo, Javier Martín

DEDICATORIA

Dedico este logro a mi familia, cuyo apoyo incondicional fue fundamental durante todo este proceso, su confianza hizo posible alcanzar esta meta. Gracias por estar siempre a mi lado.

Oyola Pindo, Javier Martín

ÍNDICE GENERAL

TÍTULO.....	I
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN	II
CERTIFICACIÓN	III
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD.....	IV
CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO	V
AUTORIZACIÓN	VI
AGRADECIMIENTO	VII
DEDICATORIA.....	VIII
ÍNDICE GENERAL	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	XII
ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
RESUMEN	XVII
ABSTRACT.....	XVIII
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....	4
1.1. Revisión de literatura	4
1.2. Desarrollo teórico y conceptual	5
1.2.1 Lógica difusa	5
1.2.2 Consumo eléctrico.....	7
1.2.3 Irradiancia solar	7
1.2.4 Panel fotovoltaico	8
1.2.5 Modelado de una planta de generación fotovoltaica en Matlab-Simulink.....	8
1.2.6 Celda de combustible de óxido sólido.....	9
1.2.7 Modelo de una planta de celda de combustible de óxido sólido en Matlab-Simulink	10

1.2.8 Interpolación mediante Spline Cúbico	11
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA	12
2.1. Contexto de la investigación	12
2.2. Diseño y alcance de la investigación.....	13
2.3. Tipo y métodos de investigación	13
2.4. Población y muestra	14
2.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	15
2.6. Procesamiento de la evaluación: Validez y confiabilidad de los instrumentos aplicados para el levantamiento de información	18
2.7 Procesamiento de series temporales mediante técnicas de interpolación	18
2.7.1 Interpolación y suavizado de la irradiancia solar diaria en el cantón Chilla	18
2.7.2 Interpolación y suavizado del consumo diario en el cantón Chilla	19
2.8.3 Lectura de datos de irradiancia solar y consumo de electricidad	20
2.8 Diseño e implementación del Controlador de Lógica Difusa	21
2.8.1 Definición de variables de entrada y salida del sistema difuso.....	21
2.8.2 Definición de las reglas difusas del controlador difuso.....	25
2.8.3 Implementación del controlador difuso.....	27
2.9 Adaptación de las plantas de generación eléctrica en MATLAB-Simulink.....	28
2.9.1 Adaptación de la planta de generación eléctrica fotovoltaica	28
2.9.2 Adaptación de la planta de generación eléctrica con celdas de combustible de óxido sólido	30
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	32
3.1 Descripción del sistema de gestión energética implementado	32
3.2 Selección de escenarios de pruebas	33
3.3 Simulación del sistema controlado y resultados de desempeño	39
3.4 Análisis de los resultados obtenidos.....	57
CONCLUSIONES.....	59
RECOMENDACIONES	60

REFERENCIAS	61
ANEXOS	63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Clasificación de las variables de datos	14
Tabla 2	VARIABLES Y SUS FUENTES DE DATOS CORRESPONDIENTES	18
Tabla 3	Reglas difusas definidas para el control del sistema	26
Tabla 4	Coefficientes del controlador difuso	28
Tabla 5	Métricas de desempeño del sistema: 14 de enero de 2023	41
Tabla 6	Métricas de desempeño del sistema: 25 de febrero de 2023	42
Tabla 7	Métricas de desempeño del sistema: 9 de marzo de 2023	44
Tabla 8	Métricas de desempeño del sistema: 17 de abril de 2023.....	45
Tabla 9	Métricas de desempeño del sistema: 2 de mayo de 2023	47
Tabla 10	Métricas de desempeño del sistema: 10 de junio de 2023.....	48
Tabla 11	Métricas de desempeño del sistema: 15 de julio de 2023.....	50
Tabla 12	Métricas de desempeño del sistema: 27 de agosto de 2023.....	51
Tabla 13	Métricas de desempeño del sistema: 9 de septiembre de 2023	53
Tabla 14	Métricas de desempeño del sistema: 21 de octubre de 2023	54
Tabla 15	Métricas de desempeño del sistema: 1 de noviembre de 2023	56
Tabla 16	Métricas de desempeño del sistema: el 31 de diciembre de 2023	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Comparación entre irradiancia instantánea y la irradiación acumulada (Puertes, 2022)	8
Figura 2 Diagrama de bloques de la planta de generación eléctrica fotovoltaica, obtenido de la biblioteca de MATLAB-Simulink (MATLAB, 2024).....	9
Figura 3 Diagrama de bloques de la planta de generación eléctrica con celdas de combustible de óxido sólido, obtenido de la biblioteca de MATLAB-Simulink (MATLAB, 2024).....	11
Figura 4 Registro del consumo de energía eléctrica del cantón Chilla.....	15
Figura 5 Ubicación geográfica y parámetros de consulta de irradiancia solar en el cantón Chilla, obtenidos desde la base de datos de la NASA	16
Figura 6 Datos horarios de Irradiancia solar (Wh/m ²) para el año 2023 en las coordenadas -3.46385, -79.58361	17
Figura 7 Curva de irradiancia solar del día 5 de agosto de 2023.....	19
Figura 8 Curva del consumo de energía eléctrica del día 5 de agosto de 2023	20
Figura 9 Diagrama de bloques de la lectura de irradiancia solar en Simulink	21
Figura 10 Funciones de membresía para la variable de entrada "Error"	23
Figura 11 Funciones de membresía para la variable de entrada "Derivada del Error".	23
Figura 12 Funciones de membresía para la variable de salida "y"	25
Figura 13 Diagrama de bloques del controlador difuso.....	27
Figura 14 Modelo de planta fotovoltaica con la potencia modificada.....	29
Figura 15 Modelo de planta fotovoltaica con adaptación de entrada y salida	29
Figura 16 Modelo de planta celda de combustible con adaptación de entrada y salida	30
Figura 17 Modelo de planta celda de combustible con la potencia modificada.....	31
Figura 18 Diagrama del sistema de gestión energética basado en lógica difusa	32

Figura 19	Curvas de irradiancia y consumo del 14 de enero de 2023	33
Figura 20	Curvas de irradiancia y consumo del 25 de febrero de 2023	34
Figura 21	Curvas de irradiancia y consumo del 9 de marzo de 2023	34
Figura 22	Curvas de irradiancia y consumo del 17 de abril de 2023,.....	35
Figura 23	Curvas de irradiancia y consumo del 2 de mayo de 2023	35
Figura 24	Curvas de irradiancia y consumo del 10 de junio de 2023.....	36
Figura 25	Curvas de irradiancia y consumo del 15 de julio de 2023.....	36
Figura 26	Curvas de irradiancia y consumo del 27 de agosto de 2023	37
Figura 27	Curvas de irradiancia y consumo del 9 de septiembre de 2023	37
Figura 28	Curvas de irradiancia y consumo del 21 de octubre de 2023	38
Figura 29	Curvas de irradiancia y consumo del 1 de noviembre de 2023	38
Figura 30	Curvas de irradiancia y consumo del 31 de diciembre de 2023	39
Figura 31	Comparación entre la potencia generada por la planta fotovoltaica y la celda de combustible, el 14 de enero de 2023	40
Figura 32	Comparación entre la potencia total generada y el consumo (referencia), el 14 de enero de 2023	40
Figura 33	Comparación entre la potencia generada por la planta fotovoltaica y la celda de combustible, el 25 de febrero de 2023	41
Figura 34	Comparación entre la potencia total generada (señal controlada) y el consumo (referencia), el 25 de febrero de 2023	42
Figura 35	Comparación entre la potencia generada por la planta fotovoltaica y la celda de combustible, el 9 de marzo de 2023	43
Figura 36	Comparación entre la potencia total generada (señal controlada) y el consumo (referencia), el 9 de marzo de 2023	43
Figura 37	Comparación entre la potencia generada por la planta fotovoltaica y la celda de combustible, el 17 de abril de 2023	44

Figura 38 Comparación entre la potencia total generada (señal controlada) y el consumo (referencia), el 17 de abril de 2023	45
Figura 39 Comparación entre la potencia generada por la planta fotovoltaica y la celda de combustible, el 2 de mayo de 2023	46
Figura 40 Comparación entre la potencia total generada (señal controlada) y el consumo (referencia), el 2 de mayo de 2023	46
Figura 41 Comparación entre la potencia generada por la planta fotovoltaica y la celda de combustible, el 10 de junio de 2023	47
Figura 42 Comparación entre la potencia total generada (señal controlada) y el consumo (referencia), el 10 de junio de 2023	48
Figura 43 Comparación entre la potencia generada por la planta fotovoltaica y la celda de combustible, el 15 de julio de 2023	49
Figura 44 Comparación entre la potencia total generada (señal controlada) y el consumo (referencia), el 15 de julio de 2023	49
Figura 45 Comparación entre la potencia generada por la planta fotovoltaica y la celda de combustible, el 27 de agosto de 2023	50
Figura 46 Comparación entre la potencia total generada (señal controlada) y el consumo (referencia), el 27 de agosto de 2023	51
Figura 47 Comparación entre la potencia generada por la planta fotovoltaica y la celda de combustible, el 9 de septiembre de 2023	52
Figura 48 Comparación entre la potencia total generada (señal controlada) y el consumo (referencia), el 9 de septiembre de 2023	52
Figura 49 Comparación entre la potencia generada por la planta fotovoltaica y la celda de combustible, el 21 de octubre de 2023	53
Figura 50 Comparación entre la potencia total generada (señal controlada) y el consumo (referencia), el 21 de octubre de 2023	54

Figura 51 Comparación entre la potencia generada por la planta fotovoltaica y la celda de combustible, el 1 de noviembre de 2023.....	55
Figura 52 Comparación entre la potencia total generada (señal controlada) y el consumo (referencia), el 1 de noviembre de 2023	55
Figura 53 Comparación entre la potencia generada por la planta fotovoltaica y la celda de combustible, el 31 de diciembre de 2023.....	56
Figura 54 Comparación entre la potencia total generada (señal controlada) y el consumo (referencia), el 31 de diciembre de 2023	57
Figura 55 Resumen estadístico de las métricas de desempeño del sistema.....	58

RESUMEN

Esta investigación desarrolla y simula un sistema de gestión energética basado en lógica difusa para regular el flujo de generación de energías renovables en el cantón Chilla, integrando fuentes solares y celdas de combustible. Su principal objetivo es garantizar un suministro eléctrico estable, ajustándose dinámicamente a las fluctuaciones de producción y consumo eléctrico, para ello, se implementaron modelos en MATLAB-Simulink y se aplicó interpolación cúbica por splines para reconstruir las curvas de irradiancia y consumo a partir de datos históricos. Los resultados demuestran que el controlador difuso logra un seguimiento preciso de la generación con respecto a al consumo, con un desempeño promedio de 0.00434 y mantiene una cobertura energética del 99.36%, asegurando un equilibrio óptimo entre la generación y el consumo de energía. Se concluye que el sistema es eficiente, sin embargo, se recomienda diversificar la matriz energética mediante la integración de otras energías renovables, para reducir la dependencia de las celdas de combustible.

Palabras claves: Gestión energética, Lógica Difusa, Energía Renovable

ABSTRACT

This research develops and simulates an energy management system based on fuzzy logic to regulate the flow of renewable energy generation in the Chilla canton, integrating solar sources and fuel cells. Its main objective is to ensure a stable energy supply by dynamically adjusting to fluctuations in electricity production and consumption. To achieve this, models were implemented in MATLAB-Simulink, and cubic spline interpolation was applied to reconstruct irradiance and consumption curves from historical data. The results demonstrate that the fuzzy controller achieves accurate tracking of generation relative to consumption, with an average performance of 0.00434, and it maintains an energy coverage of 99.36%, ensuring an optimal balance between energy generation and consumption. It is concluded that the system is efficient, however, it is recommended to diversify the energy matrix by integrating other renewable sources to reduce dependence on fuel cells.

Keywords: Energy Management, Fuzzy Logic, Renewable Energy

INTRODUCCIÓN

El cantón Chilla, ubicado en la provincia de El Oro, Ecuador, ha experimentado un creciente interés en el desarrollo de soluciones energéticas sostenibles debido a su dependencia de fuentes hidroeléctricas y térmicas, esta dependencia ha derivado en crisis energéticas agravadas por las sequías prolongadas, que han afectado gravemente la capacidad de generación hidroeléctrica (Villacrés, 2024).

En este contexto, las tecnologías emergentes, como la energía solar y de celdas de combustible, ofrecen una oportunidad única para diversificar las fuentes de energía y garantizar la estabilidad del suministro eléctrico, no obstante, la intermitencia de estas fuentes renovables requiere un control eficiente para asegurar su integración adecuada al sistema eléctrico del cantón (Carlos Bordons, 2015).

El objetivo de esta investigación es desarrollar y simular un sistema de gestión energética basado en lógica difusa que permita regular el flujo de energía renovable, el sistema está diseñado para optimizar la interacción entre la energía solar y las celdas de combustible, asegurando que la energía generada sea estable y que coincida con los patrones de consumo de energía eléctrica residencial, la implementación de este sistema proporcionará una herramienta avanzada para gestionar las fluctuaciones en la generación de energía, mejorando la resiliencia energética del cantón frente a las condiciones climáticas adversas.

La relevancia de este trabajo radica en su potencial para contribuir al ámbito social, científico y profesional, en el plano social, busca mejorar la calidad de vida de los habitantes de Chilla mediante un suministro eléctrico confiable, en el ámbito científico, plantea una innovación en la gestión de energías renovables mediante el uso de la lógica difusa, una técnica que ha demostrado ser eficaz en la toma de decisiones bajo condiciones de incertidumbre (Diego Cuesta, 2013), además, en el ámbito profesional, este proyecto tiene implicaciones directas para el sector eléctrico, ofreciendo una solución para integrar eficientemente tecnologías renovables emergentes.

El estudio pretende abordar la problemática del desequilibrio en la generación de energía renovable y proponer una solución a través de la simulación de un sistema de gestión automatizado, este sistema, basado en algoritmos de lógica difusa, ajustará

dinámicamente la producción de energía según las necesidades del consumo residencial. La integración de tecnologías avanzadas como la inteligencia artificial (IA) permitirá un monitoreo y control en tiempo real, garantizando la sostenibilidad y eficiencia del sistema energético.

Para resolver la problemática planteada, se implementará un sistema de gestión automatizado basado en lógica difusa que ajustará dinámicamente la producción de energía en función del consumo de energía eléctrica y las condiciones ambientales, este sistema utilizará datos de sensores y de un controlador difuso para medir el nivel de producción de energía solar y el estado de las celdas de combustible, permitiendo que el sistema mantenga un equilibrio óptimo entre la generación y el consumo, de esta manera, el sistema garantizará un suministro eléctrico continuo, adaptado a las necesidades del cantón.

Planteamiento de la investigación

El cantón Chilla enfrenta serios problemas energéticos derivados de su alta dependencia de fuentes hidroeléctricas y térmicas, lo que ha evidenciado la necesidad de adoptar energías renovables, sin embargo, la intermitencia de fuentes como la solar y las celdas de combustible representa un reto importante para su integración eficiente en el sistema eléctrico actual. Este desafío requiere un enfoque avanzado que permita optimizar la gestión de estas energías intermitentes, garantizando un suministro estable para la población.

La propuesta de implementar un sistema de gestión energética basado en lógica difusa responde a la necesidad de un control más preciso y dinámico, este sistema está diseñado para regular el flujo de energía proveniente de las fuentes renovables, ajustando la producción de manera que se mantenga la estabilidad energética, independientemente de las variaciones en la generación. La capacidad de adaptación de la lógica difusa permite gestionar con mayor eficacia las fluctuaciones inherentes a las fuentes renovables, mejorando la respuesta del sistema energético ante cambios en la oferta y la demanda. (Senthilnathan Rajendran, 2023)

El desarrollo de este sistema no solo busca resolver los problemas energéticos inmediatos del cantón, sino que también plantea una solución escalable que puede ser aplicada en otros contextos con condiciones similares, con la optimización de la interacción entre las

fuentes solares y las celdas de combustible, el sistema propuesto tiene el potencial de mejorar la eficiencia energética a nivel regional, promoviendo una transición hacia modelos energéticos más sostenibles y confiables.

Formulación del problema de investigación

¿Cómo contribuyen las tecnologías emergentes, como la lógica difusa, en la regulación del flujo de generación de energías renovables para garantizar un suministro energético estable y eficiente en el cantón Chilla?

Objetivo General:

Desarrollar y simular un sistema de gestión energética basado en lógica difusa que regule y mantenga un flujo constante de energía renovable, asegurando la estabilidad energética en el cantón Chilla a través de la integración efectiva de la energía solar y de celdas de combustible, mediante el software de Matlab.

Objetivos Específicos:

1. Diseñar modelos de simulación que representen la producción intermitente de energía solar y celda de combustible en el cantón Chilla, considerando factores climáticos y patrones de consumo energético residencial, mediante el software de Matlab.
2. Crear un controlador basado en lógica difusa que pueda gestionar la integración de las fuentes de energía renovable y celdas de combustible, ajustando la producción en tiempo real para garantizar un suministro energético estable para el cantón Chilla, mediante el software de Matlab.
3. Realizar simulaciones para evaluar la eficacia del sistema de gestión energética en mantener un flujo energético constante y responder a las fluctuaciones de generación y consumo, con el fin de proponer mejoras.

Planteamiento hipotético

¿Puede un sistema de gestión energética basado en lógica difusa, que integre la energía solar y de celdas de combustible, regular de manera eficiente el flujo de generación de energías renovables, garantizando un suministro estable y ajustándose a las fluctuaciones en la producción y el consumo de energía eléctrica en el cantón Chilla?

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1.1. Revisión de literatura

En la investigación realizada por (León, 2011), se propuso y evaluó el uso de técnicas de inteligencia computacional, específicamente la lógica difusa, para desarrollar un sistema gestor de fuentes de energía alternativas como la eólica, fotovoltaica y de celda de combustible, se verificó la respuesta de un sistema de generación híbrido en términos de disponibilidad, confiabilidad y suministro de energía, considerando condiciones ambientales y demanda eléctrica, luego, se compararon diferentes formas de gestión del suministro para validar que la gestión inteligente de recursos energéticos alternativos logra un mayor aprovechamiento de la energía disponible en estos sistemas. El diseño del gestor basado en lógica difusa permitió seleccionar, según distintos criterios, las fuentes más adecuadas para cumplir con la demanda eléctrica, se implementaron modelos de sistemas de energía alternativa y una herramienta computacional con interfaz gráfica para verificar y evaluar el sistema.

(Isorna, 2013), abordó el estado del arte de la tecnología de plantas de potencia con almacenamiento de energía, centrándose en el desarrollo de técnicas de control avanzadas aplicadas a microrredes de energía renovable con almacenamiento basado en hidrógeno. Se realizó un exhaustivo análisis de las tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica existentes, así como de las estrategias de control en estas plantas, también ,se desarrollaron modelos dinámicos completos de los equipos involucrados y se validaron experimentalmente, posteriormente, se obtuvo una herramienta de simulación para estudiar el funcionamiento de los modos de operación en diferentes condiciones y escenarios, lo que permitió el desarrollo de un controlador basado en la teoría de control predictivo. Los resultados experimentales obtenidos al operar la planta bajo los modos de operación seleccionados en el plan de ensayos, programados para una duración de 24 horas, fueron muestreados cada 41 segundos, contribuyeron significativamente al estado del arte, al ser el primer trabajo de control avanzado de microrredes basadas en hidrógeno validado experimentalmente.

La tesis de (Swinburn, 2013), aborda el desarrollo de un modelo de predicción y gestión de demanda para micro-redes, centrándose en la comunidad de Huatacondo, donde, se utilizan técnicas difusas de Takagi-Sugeno para la predicción de demanda, con análisis

de estabilidad y comparación con redes neuronales, los resultados muestran una mejora en la precisión de las predicciones a "j" pasos. En cuanto a la gestión de demanda, se propone una metodología para determinar el rango de desplazamiento dinámico de carga, basada en intervalos difusos, con resultados satisfactorios en pruebas realizadas, se destaca la importancia de la interacción entre la red y los usuarios, la eficiencia energética y la disponibilidad de información para el diseño de sistemas de gestión de demanda.

1.2. Desarrollo teórico y conceptual

1.2.1 Lógica difusa

Concepto y fundamentos

La lógica difusa es una extensión de la lógica clásica que permite manejar el concepto de incertidumbre y ambigüedad, características comunes en situaciones del mundo real, a diferencia de la lógica clásica, en la cual las proposiciones solo pueden ser verdaderas o falsas (1 o 0), la lógica difusa permite grados intermedios de verdad, representados por valores que varían entre 0 y 1, esto permite modelar problemas donde las fronteras entre los estados no son estrictamente definidas, como en el caso de conceptos vagos como "calor" o "grande" que no tienen límites precisos (Zadeh, 1965).

Funciones de membresía

En la lógica difusa, una función de membresía es una función matemática que asigna a cada elemento de un universo de discurso un grado de pertenencia dentro de un conjunto difuso, su valor varía en el intervalo [0, 1], donde:

- 0 indica no pertenencia al conjunto.
- 1 indica pertenencia total al conjunto.
- Valores intermedios representan grados parciales de pertenencia.

Formalmente, una función de membresía $\mu_A(x)$ de un conjunto difuso A en un universo de discurso X se define como:

$$\mu_A: X \rightarrow [0,1]$$

Esta función permite modelar transiciones suaves entre estados, fundamental en aplicaciones de control difuso, procesamiento de señales y sistemas inteligentes (Mendel, 2024).

Estados difusos

Los estados difusos representan categorías o clasificaciones lingüísticas que describen el comportamiento de una variable dentro de un sistema difuso, a diferencia de la lógica clásica, donde una variable solo puede asumir valores discretos (como "encendido" o "apagado"), en la lógica difusa los estados son transiciones graduales, lo que permite una representación más flexible y realista de fenómenos complejos.

Cada estado difuso está definido por una función de membresía que asigna un grado de pertenencia a un conjunto, permitiendo que un mismo valor pueda pertenecer a múltiples estados con diferentes grados de certeza (Ross, 2010).

Formalmente, un estado difuso S_i en un sistema de control difuso está representado por un conjunto difuso A_i en un universo de discurso X :

$$S_i = \{(x, \mu_{A_i}(x)) \mid x \in X, \mu_{A_i}(x) \in [0,1]\}$$

Donde:

- x es el valor de la variable en el universo de discurso.
- $\mu_{A_i}(x)$ es la función de membresía que define el grado de pertenencia al estado difuso S_i .
- X es el conjunto de valores posibles de la variable.

Reglas difusas

Las reglas difusas son el componente central de los sistemas de inferencia difusa, permitiendo la transformación de valores de entrada en decisiones basadas en conocimiento heurístico, estas reglas utilizan una estructura del tipo "Si-Entonces" (IF-THEN), similar a la lógica humana de toma de decisiones, facilitando la implementación de sistemas de control inteligentes (Pedrycz, 2007).

Formalmente, una regla difusa se expresa como:

$$R_i: \text{ Si } x_1 \text{ es } A_1^i \text{ y } x_2 \text{ es } A_2^i, \text{ entonces } y \text{ es } B^i.$$

Donde:

- x_1, x_2, \dots, x_n son las variables de entrada del sistema.

- $A_1^i, A_2^i, \dots, A_n^i$ son conjuntos difusos que describen los estados de cada variable de entrada.
- y es la variable de salida del sistema.
- B^i es el conjunto difuso asociado a la salida del sistema según la regla i .

1.2.2 Consumo eléctrico

El consumo eléctrico es la cantidad total de energía eléctrica utilizada por un sistema, dispositivo o conjunto de usuarios en un período determinado, generalmente expresada en kilovatios-hora (kWh), se trata de un concepto fundamental en la gestión energética, ya que permite evaluar el comportamiento de los consumidores, prever la demanda futura del suministro eléctrico. El consumo eléctrico varía en función de diversos factores, como la hora del día, la estacionalidad, el tipo de usuarios (residenciales, comerciales o industriales) y la eficiencia de los dispositivos utilizados. Por ejemplo, se observa un incremento significativo en el uso de electricidad durante las denominadas horas pico, que suelen ocurrir entre las 18:00 y las 22:00 horas, cuando la mayoría de las personas regresan a sus hogares y encienden aparatos eléctricos de alto consumo.

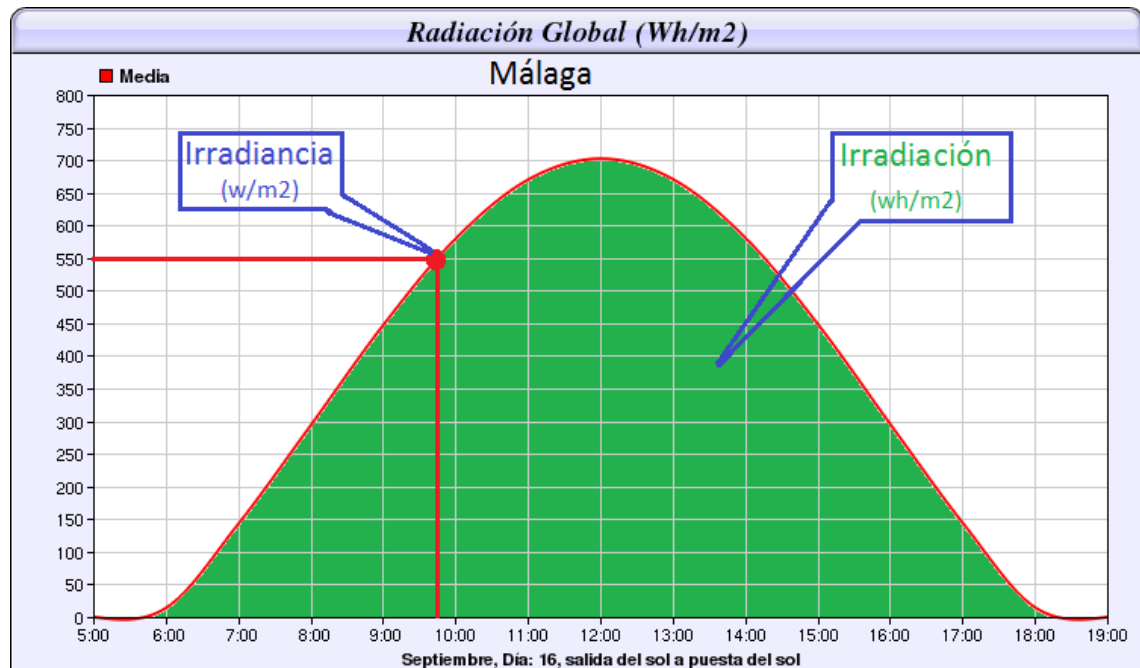
La medición precisa del consumo eléctrico es esencial para el diseño y dimensionamiento de la infraestructura eléctrica, incluyendo la generación, transmisión y distribución de energía (CNEL-EP, 2024).

1.2.3 Irradiancia solar

La irradiancia solar se define como la potencia de radiación solar que incide sobre una superficie por unidad de área, en un momento específico, se mide en vatios por metro cuadrado (W/m^2) y representa la energía que el Sol entrega instantáneamente sobre una superficie dada. Este parámetro es fundamental para evaluar la disponibilidad de energía solar en tiempo real y es ampliamente utilizado en estudios sobre eficiencia energética y diseño de sistemas fotovoltaicos, ya que permite entender cómo varía la potencia solar a lo largo del día bajo diferentes condiciones atmosféricas (Planas, 2019).

Figura 1

Comparación entre irradiancia instantánea y la irradiación acumulada (Puertes, 2022)



1.2.4 Panel fotovoltaico

Los paneles fotovoltaicos son dispositivos diseñados para convertir la energía de la radiación solar en electricidad a través del efecto fotovoltaico, un fenómeno en el cual los fotones de luz solar excitan los electrones en un material semiconductor, típicamente silicio, generando una corriente eléctrica, este proceso es clave en la generación de energía renovable, permitiendo la producción de electricidad sin emisiones directas de gases de efecto invernadero. Los paneles fotovoltaicos son una de las tecnologías más usadas en sistemas de energía solar debido a su eficiencia y bajo costo operativo en comparación con otras fuentes de energía (Bremner, 2017).

1.2.5 Modelado de una planta de generación fotovoltaica en Matlab-Simulink

El modelo de simulación en (MATLAB, 2024), representa un parque fotovoltaico de 2 MW conectado a una red de distribución de 25 kV, compuesto por dos arreglos fotovoltaicos que generan 1.5 MW y 500 kW respectivamente, la conversión de energía se realiza mediante convertidores elevadores (Boost Converters) y un convertidor NPC de tres niveles, que ajusta la tensión y facilita la inyección de potencia en la red.

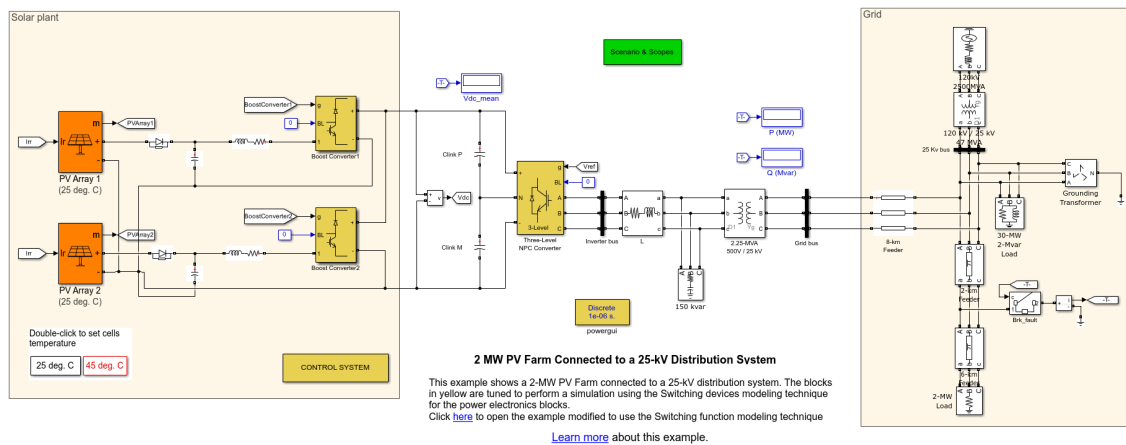
Para maximizar la generación de energía, el sistema implementa un algoritmo *MPPT* (Maximum Power Point Tracking) basado en perturbación y observación (*P&O*), este método ajusta la tensión en los terminales de los módulos para extraer la máxima potencia disponible en función de las condiciones climáticas.

Los módulos fotovoltaicos están conectados a un bus de *CC* común de 1000 V, donde los convertidores elevadores regulan la tensión de salida, luego, un convertidor *NPC* de tres niveles transforma la energía de *DC* a *AC* para su inyección en la red, manteniendo estable la tensión del enlace de *CC* y regulando la potencia reactiva.

Para la conexión con la red de 25 kV, se emplea un transformador trifásico de acoplamiento de 2.25 MVA, lo que permite una integración eficiente con el sistema eléctrico de distribución.

Figura 2

Diagrama de bloques de la planta de generación eléctrica fotovoltaica, obtenido de la biblioteca de MATLAB-Simulink (MATLAB, 2024)



1.2.6 Celda de combustible de óxido sólido

Las celdas de combustible de óxido sólido (SOFC, por sus siglas en inglés) son dispositivos electroquímicos que convierten directamente la energía química de un combustible en electricidad mediante reacciones de oxidación y reducción sin necesidad de combustión, la operación ocurre generalmente entre 600 °C y 1,000 °C y utilizan un electrolito cerámico sólido que conduce iones de oxígeno. Las SOFC se caracterizan por su alta eficiencia energética y su capacidad para utilizar una variedad de combustibles,

incluyendo hidrógeno, monóxido de carbono e hidrocarburos ligeros, lo que las hace versátiles para diferentes aplicaciones energética.

1.2.7 Modelo de una planta de celda de combustible de óxido sólido en Matlab-Simulink

El sistema modelado en (MATLAB, 2024), simula una celda de combustible de óxido sólido (SOFC) conectada a una red trifásica, donde se genera energía en corriente continua (DC) a partir de una reacción química entre hidrógeno, oxígeno y agua.

El modelo implementa un controlador de potencia activa que ajusta la corriente en el eje directo (d) para regular la potencia generada, mientras mantiene la potencia reactiva en 0 VAR , este método de control permite una respuesta rápida ante variaciones en la demanda de potencia activa.

El sistema opera con una referencia de potencia activa (P_{ref}) expresada en unidades por unidad (pu), donde 1 pu equivale a 50 kW .

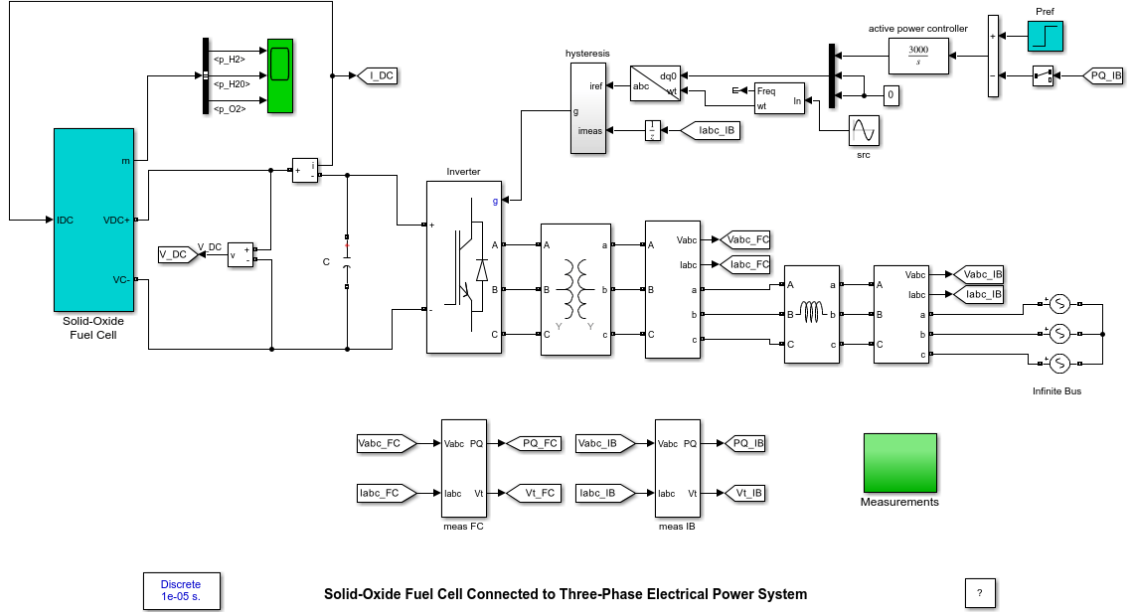
Durante la simulación, se observan los siguientes eventos:

- En $t = 0\text{ s}$, se establece un $P_{ref} = 0.3\text{ pu}$ (15 kW), alcanzando la referencia en 0.2 s .
- En $t = 0.4\text{ s}$, la referencia cambia a $P_{ref} = 1\text{ pu}$ (50 kW), ajustándose nuevamente en 0.2 s .

La potencia generada en corriente continua (DC) es convertida en corriente alterna trifásica (AC) mediante un inversor $IGBT$, permitiendo la inyección de energía en la red trifásica infinita. La regulación de potencia activa asegura que la celda siga la referencia de generación sin introducir variaciones significativas en la estabilidad del sistema.

Figura 3

Diagrama de bloques de la planta de generación eléctrica con celdas de combustible de óxido sólido, obtenido de la biblioteca de MATLAB-Simulink (MATLAB, 2024)



1.2.8 Interpolación mediante Spline Cúbico

La interpolación mediante splines cúbicos es un método para construir una curva suave a partir de un conjunto de puntos, consiste en ajustar polinomios cúbicos en cada subintervalo, garantizando la continuidad y suavidad en las uniones.

Cada spline cúbico, $S_i(x)$, definido en el subintervalo $[x_i, x_{i+1}]$, es un polinomio de tercer grado de la forma:

$$S_i(x) = a_i + b_i(x - x_i) + c_i(x - x_i)^2 + d_i(x - x_i)^3$$

Donde:

a_i, b_i, c_i, d_i son los coeficientes que se determinan a partir de las condiciones de continuidad y suavidad de la curva.

Los polinomios cúbicos se construyen de manera que la función resultante y sus primeras y segundas derivadas sean continuas en los nodos, además, las condiciones de continuidad implican que, en dichos nodos, no solo la función es continua, sino también sus derivadas de primer y segundo orden:

$$S_i(x_{i+1}) = S_{i+1}(x_{i+1}), \quad S_i'(x_{i+1}) = S_{i+1}'(x_{i+1}), \quad S_i''(x_{i+1}) = S_{i+1}''(x_{i+1})$$

Estas condiciones garantizan que la curva generada mediante splines cúbicos sea suave y libre de discontinuidades a lo largo del intervalo considerado (Ayuso, 2011).

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

2.1. Contexto de la investigación

El estudio se realizará en el cantón Chilla, ubicado en la provincia de El Oro, Ecuador, debido a su relevancia en la producción de energía renovable, con una notable incidencia de energía eólica y solar, presenta un entorno geográfico ideal que facilita la prueba de tecnologías de energía renovable, siendo un punto estratégico para la investigación en gestión energética.

El cantón Chilla, ubicado en la provincia de El Oro, Ecuador, es una región predominantemente rural que enfrenta desafíos energéticos significativos debido a su alta dependencia de la generación hidroeléctrica. La región se encuentra en una zona montañosa, con altitudes que varían entre los 400 y 2,200 metros sobre el nivel del mar, lo que influye en la disponibilidad de recursos hídricos para la producción energética. Durante la temporada seca, la disminución del caudal de los ríos ha ocasionado un déficit en la generación hidroeléctrica, afectando tanto a la comunidad residencial como a las actividades económicas locales.

El presente proyecto se centrará en la simulación, utilizando el software MATLAB, de un sistema híbrido que combine energía solar fotovoltaica y celdas de combustible para diversificar la matriz energética local, este sistema controlado tiene como objetivo evaluar el potencial de un sistema de gestión energética basado en lógica difusa para optimizar la integración de fuentes de energía renovable en el cantón Chilla, mejorando así la estabilidad del suministro eléctrico bajo diversas condiciones climáticas.

El cantón Chilla fue seleccionado para esta simulación debido a su demanda eléctrica, que ronda aproximadamente 1.2 MW, presenta fluctuaciones menores en comparación con otras ciudades más grandes, esta característica hace que sea un entorno adecuado para probar la capacidad del sistema para manejar variaciones tanto en la generación como en el consumo, evaluando la eficacia de la lógica difusa para mantener un suministro constante para las necesidades locales.

2.2. Diseño y alcance de la investigación

La investigación será de carácter experimental ya que involucra la simulación y evaluación de un sistema de gestión energética basado en lógica difusa para regular el flujo de energía renovable.

El alcance de la investigación es principalmente explicativo, ya que busca explicar cómo la implementación de la lógica difusa puede mejorar la gestión y estabilidad de la energía renovable en Chilla.

2.3. Tipo y métodos de investigación

La presente investigación se enmarca en un enfoque cuantitativo, ya que su objetivo principal es medir y analizar el rendimiento de un sistema de gestión energética que integra una planta fotovoltaica y una celda de combustible, controladas mediante un sistema difuso, a través de simulaciones en MATLAB/Simulink, se modelará el comportamiento de este sistema en función del consumo de energía eléctrica residencial del cantón Chilla, con el propósito de evaluar de manera objetiva si el sistema controlado logra cubrir el consumo bajo diferentes condiciones.

El método Hipotético-Deductivo es el principal método utilizado, ya que el estudio parte de una hipótesis central: que el controlador difuso es capaz de ajustar de manera eficiente el flujo de energía generado por la planta fotovoltaica y la celda de combustible, de forma que el consumo de energía eléctrica sea cubierto adecuadamente.

Además, se adopta una metodología analítica para el análisis detallado de los resultados de cada simulación, observando cómo se comporta cada componente del sistema y cómo responde ante fluctuaciones en el consumo y la irradiancia solar, este análisis facilitará la identificación de posibles ajustes en el controlador difuso para mejorar su desempeño. Posteriormente, el método sintético permitirá integrar los hallazgos individuales en una conclusión global sobre la efectividad del sistema, ofreciendo una visión completa de su capacidad para cubrir el consumo eléctrico en el contexto del cantón.

Finalmente, el método deductivo complementa el estudio, ya que el diseño y la configuración del sistema de control se basan en teorías y principios previamente establecidos en el ámbito de la lógica difusa y la gestión energética, este enfoque deductivo permite aplicar conocimientos teóricos sobre control difuso, lo que facilita la

interpretación de los resultados al compararlos con las respuestas previstas del sistema bajo distintos escenarios.

2.4. Población y muestra

La población de estudio en esta investigación está constituida por el conjunto de datos del consumo de energía eléctrica residencial y los datos de irradiancia solar del cantón Chilla para el año 2023.

Dado que esta investigación se basa en la simulación de un sistema de gestión energética cuyo objetivo es cubrir el consumo eléctrico completo de la población del cantón Chilla, no se trabaja con una muestra en el sentido convencional, en su lugar, se utiliza un censo de datos al incluir la totalidad de los datos de consumo y de irradiancia solar disponibles, lo cual permite modelar fielmente el comportamiento del consumo residencial y la generación de energía renovable en el área.

El enfoque de censo asegura que el sistema de gestión energética simulado en MATLAB/Simulink sea representativo de las condiciones reales del cantón a lo largo del año 2023, sin necesidad de muestreo probabilístico o no probabilístico. La inclusión de todos los datos de consumo de energía eléctrica e irradiancia solar durante el año proporciona una visión completa del comportamiento eléctrico de la región, lo que permite evaluar la efectividad del controlador difuso en cubrir el consumo de energía en distintos escenarios.

Tabla 1

Clasificación de las variables de datos

Variable	Tipo
Irradiancia solar	Independiente
Referencia de potencia activa	Dependiente
Consumo eléctrico	Independiente

2.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Las técnicas de recolección de datos empleadas en esta investigación son de carácter cuantitativo, ya que el estudio se basa en datos numéricos que representan el comportamiento del consumo energético y la irradiancia solar en el cantón Chilla durante el año 2023.

El consumo eléctrico residencial típico en intervalos de tiempo, para cada día del año 2023 del cantón Chilla fue proporcionado por la Corporación Nacional de Electricidad (CNEL EP), estos datos fueron obtenidos mediante una carta aval emitida por la Universidad Estatal Península de Santa Elena (UPSE), la cual autorizó la colaboración con CNEL EP para el acceso a información específica sobre el consumo energético del cantón Chilla.

Figura 4

Registro del consumo de energía eléctrica del cantón Chilla

3	01/01/2023 0:30	638,51
4	01/01/2023 0:45	632,98
5	01/01/2023 1:00	631,75
6	01/01/2023 1:15	624,45
7	01/01/2023 1:30	625,17
8	01/01/2023 1:45	625,04
9	01/01/2023 2:00	617,23
10	01/01/2023 2:15	612,97
11	01/01/2023 2:30	611,44
12	01/01/2023 2:45	610,45
13	01/01/2023 3:00	610,25
14	01/01/2023 3:15	608,74
15	01/01/2023 3:30	610,98
16	01/01/2023 3:45	606,18
17	01/01/2023 4:00	605,01
18	01/01/2023 4:15	604,11
19	01/01/2023 4:30	605,52
20	01/01/2023 4:45	597,03
21	01/01/2023 5:00	593,85
22	01/01/2023 5:15	590,82
23	01/01/2023 5:30	586,19
24	01/01/2023 5:45	589,06
25	01/01/2023 6:00	588,98
26	01/01/2023 6:15	563,94
27	01/01/2023 6:30	444,24
28	01/01/2023 6:45	353,06
29	01/01/2023 7:00	333,51
30	01/01/2023 7:15	319,92
31	01/01/2023 7:30	312,28
32	01/01/2023 7:45	309,2
33	01/01/2023 8:00	305,06
34	01/01/2023 8:15	303,82
35	01/01/2023 8:30	312,09
36	01/01/2023 8:45	313,79

Por otro lado, los datos de irradiancia solar fueron extraídos de la base de datos NASA POWER Data Access Viewer (DAV) (Administration, 2024), una fuente confiable y reconocida internacionalmente por proporcionar información detallada sobre parámetros meteorológicos y climáticos. La precisión y detalle de esta base de datos permiten obtener valores de irradiancia solar específicos para el área de estudio, los cuales son fundamentales para modelar con exactitud el comportamiento del sistema fotovoltaico bajo condiciones reales en el cantón Chilla.

Figura 5

Ubicación geográfica y parámetros de consulta de irradiancia solar en el cantón Chilla, obtenidos desde la base de datos de la NASA

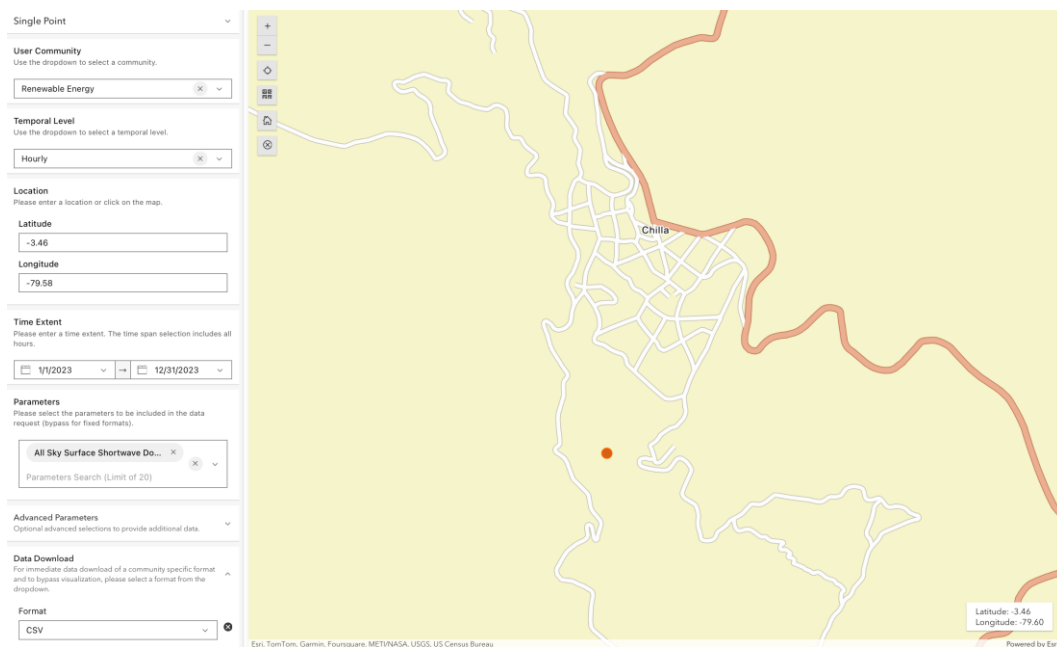


Figura 6

Datos horarios de Irradiancia solar (Wh/m^2) para el año 2023 en las coordenadas -3.46385, -79.58361

POWER_Point_Hourly_20230101_20231231_003d46S_079d58W_LST-3

-BEGIN HEADER-				
NASA/POWER CERES/MERRA2 Native Resolution Hourly Data				
Dates (month/day/year): 01/01/2023 through 12/31/2023				
Location: Latitude -3.4638 Longitude -79.5836				
Elevation from MERRA-2: Average for 0.5 x 0.625 degree lat/lon region = 1976.38 meters				
The value for missing source data that cannot be computed or is outside of the sources availability range: -999				
Parameter(s):				
ALLSKY_SFC_SW_DWN CERES SYN1deg All Sky Surface Shortwave Downward Irradiance (Wh/m^2)				
-END HEADER-				
YEAR	MO	DY	HR	ALLSKY_SFC_SW_DWN
2023	1	1	0	0.0
2023	1	1	1	0.0
2023	1	1	2	0.0
2023	1	1	3	0.0
2023	1	1	4	0.0
2023	1	1	5	0.0
2023	1	1	6	22.97
2023	1	1	7	92.95
2023	1	1	8	219.34
2023	1	1	9	375.26
2023	1	1	10	434.95
2023	1	1	11	473.95
2023	1	1	12	514.59
2023	1	1	13	507.62
2023	1	1	14	419.76
2023	1	1	15	206.66
2023	1	1	16	110.45
2023	1	1	17	41.97
2023	1	1	18	8.02
2023	1	1	19	0.0
2023	1	1	20	0.0
2023	1	1	21	0.0
2023	1	1	22	0.0
2023	1	1	23	0.0
2023	1	2	0	0.0

La recopilación de estos datos de consumo e irradiancia fue esencial para la construcción del modelo en MATLAB/Simulink, que permite simular el comportamiento del sistema de gestión energética propuesto.

La calidad y precisión de los datos aseguran que la simulación represente con fidelidad las condiciones de generación y de consumo de energía eléctrica en el cantón, facilitando el análisis del desempeño del controlador difuso en la satisfacción del consumo eléctrico.

Tabla 2

Variables y sus fuentes de datos correspondientes.

Variable	Fuente de datos
Irradiancia solar	NASA
Referencia de potencia activa	Controlador difuso
Consumo eléctrico	CNEL

2.6. Procesamiento de la evaluación: Validez y confiabilidad de los instrumentos aplicados para el levantamiento de información

La validez de los instrumentos se asegurará mediante la verificación de la precisión del software de MATLAB, comprobando que los modelos implementados sean consistentes con las leyes físicas y los principios de la ingeniería energética.

La confiabilidad de los resultados se verificará mediante pruebas de replicabilidad de los resultados obtenidos

2.7 Procesamiento de series temporales mediante técnicas de interpolación

El procesamiento de series temporales es fundamental para analizar y modelar datos históricos, con el objetivo de obtener una representación continua y suavizada de los valores medidos, en este estudio, se han utilizado técnicas de interpolación para reconstruir las series temporales de irradiancia solar y consumo de energía eléctrica en el cantón Chilla.

2.7.1 Interpolación y suavizado de la irradiancia solar diaria en el cantón Chilla

Para la reconstrucción de la serie temporal de irradiancia solar del año 2023 en el cantón Chilla, se han utilizado datos obtenidos de la plataforma NASA POWER Data Access Viewer (DAV), los cuales incluyen valores horarios de irradiancia solar descendente medida en Wh/m^2 .

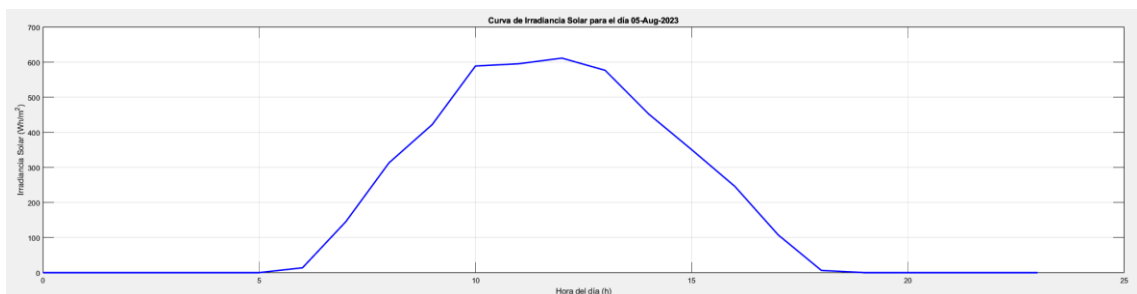
El procesamiento de estos datos inició con la lectura del archivo CSV, extrayendo las columnas correspondientes al año, mes, día, hora y el valor de irradiancia, luego, se aplicó un filtrado para descartar valores no válidos o negativos, asegurando la consistencia de los datos, permitiendo así, la selección de una fecha específica con los valores de irradiancia correspondientes del día.

Para obtener una representación continua y suavizada de la irradiancia solar, se empleó interpolación spline cúbica, generando valores intermedios entre los puntos de datos originales, este método permite mejorar la resolución horaria de los datos, proporcionando una visión más precisa de la variación de la energía solar disponible a lo largo del día. Finalmente, se generó un gráfico de la irradiancia interpolada para visualizar la evolución de la radiación solar durante el día seleccionado.

El código implementado para la interpolación y suavizado de la irradiancia solar diaria se encuentra en el (**Anexo 1**).

Figura 7

Curva de irradiancia solar del día 5 de agosto de 2023



2.7.2 Interpolación y suavizado del consumo diario en el cantón Chilla

Los datos del consumo de energía eléctrica utilizados en este estudio fueron proporcionados por CNEL, en un archivo Excel con registros del consumo eléctrico en intervalos de 15 minutos, para obtener una representación continua y suavizada del perfil de consumo diario, estos datos fueron procesados y analizados.

Inicialmente, se realizó la lectura del archivo, extrayendo la fecha y la potencia consumida en kW, que posteriormente fue convertida a vatios (W) para facilitar su comparación con

la generación solar, luego, se permitió la selección de una fecha específica, lo que permitió la extracción de los valores de consumo correspondientes a dicho día.

Para suavizar la serie de datos y mejorar su resolución, se aplicó una interpolación spline cúbica, lo que permitió obtener una curva de consumo continua, este procedimiento garantizó una mejor representación de la evolución del consumo eléctrico a lo largo del día. Esta reconstrucción de datos es fundamental para estudios de gestión energética y optimización del uso de recursos renovables en el cantón Chilla.

El código implementado para la interpolación y suavizado del consumo de energía eléctrica diario, se encuentra en el (Anexo 1).

Figura 8

Curva del consumo de energía eléctrica del día 5 de agosto de 2023



2.8.3 Lectura de datos de irradiancia solar y consumo de electricidad

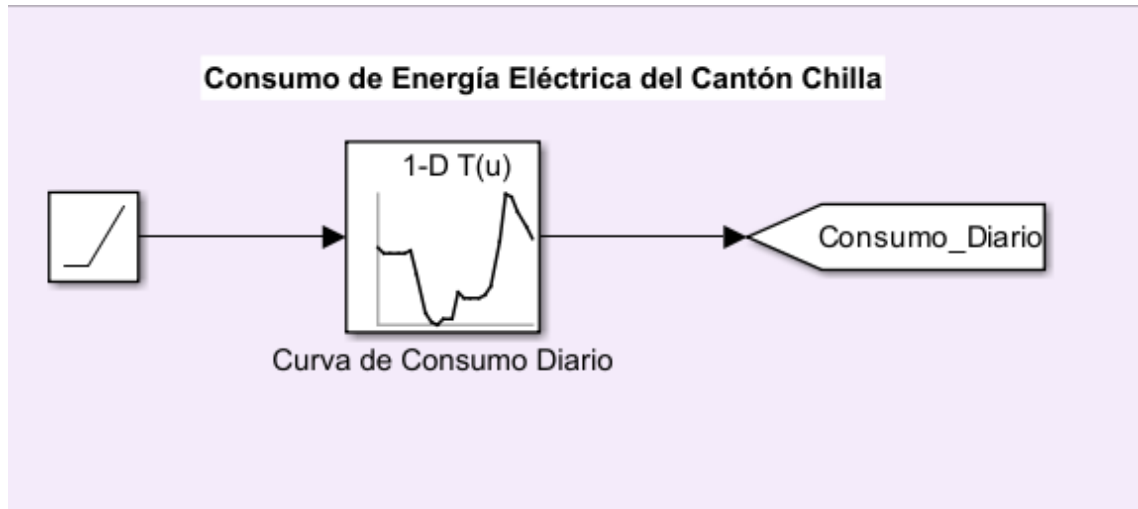
Para la lectura de los datos de irradiancia solar en la simulación, se empleó un bloque Ramp en Simulink, que actúa como un índice temporal para acceder secuencialmente a los valores almacenados en un bloque 1-D Lookup Table, donde se encuentra la curva interpolada y suavizada. Esta curva puede representar tanto el consumo como la irradiancia diaria de un día específico, según su aplicación en el sistema.

La señal generada por el bloque Ramp avanza de manera continua, permitiendo una lectura precisa de la serie temporal de irradiancia solar o el consumo eléctrico, reconstruida en el bloque Lookup Table. Este enfoque es clave para representar con

precisión la variabilidad diaria de la energía solar en el cantón Chilla y evaluar el desempeño del sistema de gestión energética ante distintas condiciones climáticas.

Figura 9

Diagrama de bloques de la lectura de irradiancia solar en Simulink



2.8 Diseño e implementación del Controlador de Lógica Difusa

2.8.1 Definición de variables de entrada y salida del sistema difuso

El sistema de control difuso regula la generación de energía renovable en función del consumo y las condiciones operativas de las fuentes generadoras, para ello, se emplean dos variables de entrada: el error, que representa la diferencia entre el consumo y la generación total de energía, por otro lado, la derivada del error, indica la tasa de cambio de esta diferencia en el tiempo.

El error del sistema se genera a partir de la diferencia entre el consumo de potencia $P_c(t)$ y la potencia generada por las fuentes de generación eléctrica, es decir, la planta fotovoltaica $P_{PV}(t)$ y la celda de combustible $P_{FC}(t)$, este error es escalado antes de ingresar al controlador difuso.

Matemáticamente, se expresa como:

$$e(t) = P_c(t) - P_{PV}(t) - P_{FC}(t)$$

donde:

- $e(t)$ representa el error del sistema en el instante de tiempo t .

- $P_c(t)$ el consumo de potencia en kilovatios (kW).
- $P_{PV}(t)$ es la potencia generada por la planta fotovoltaica en kilovatios (kW).
- $P_{FC}(t)$ es la potencia generada por la celda de combustible en kilovatios (kW).

La derivada del error ($\dot{e}(t)$) representa la tasa de cambio del error en el tiempo y es fundamental en el control difuso, ya que proporciona información sobre la tendencia del error, permitiendo ajustes dinámicos en la respuesta del sistema, se calcula como:

$$\dot{e}(t) = \frac{d}{dt} [P_c(t) - P_{PV}(t) - P_{FC}(t)]$$

$$\dot{e}(t) = \frac{dP_c(t)}{dt} - \frac{dP_{PV}(t)}{dt} - \frac{dP_{FC}(t)}{dt}$$

Donde:

- $\dot{e}(t)$ es la derivada del error, que mide la variación del error en función del tiempo.
- $\frac{dP_c(t)}{dt}$ representa la tasa de cambio del consumo de potencia.
- $\frac{dP_{PV}(t)}{dt}$ representa la tasa de cambio de la potencia fotovoltaica generada.
- $\frac{dP_{FC}(t)}{dt}$ representa la tasa de cambio de la potencia generada por la celda de combustible.

Ambas variables se procesan mediante un conjunto de funciones de membresía, que las clasifican en los siguientes estados difusos:

- **NB (Negativo Grande):** Representa un valor muy alto en sentido negativo, indicando una desviación significativa con respecto al punto de referencia.
- **NS (Negativo Pequeño):** Indica un valor negativo de menor magnitud, reflejando una desviación moderada en sentido descendente.
- **Z (Cero o Equilibrio):** Se encuentra cerca de cero, lo que sugiere un estado de estabilidad o mínima variación.
- **PS (Positivo Pequeño):** Señala un valor positivo de baja magnitud, indicando una desviación moderada en sentido ascendente.
- **PB (Positivo Grande):** Representa un valor muy alto en sentido positivo, lo que indica una desviación significativa con respecto al punto de referencia.

Figura 10

Funciones de membresía para la variable de entrada "Error"

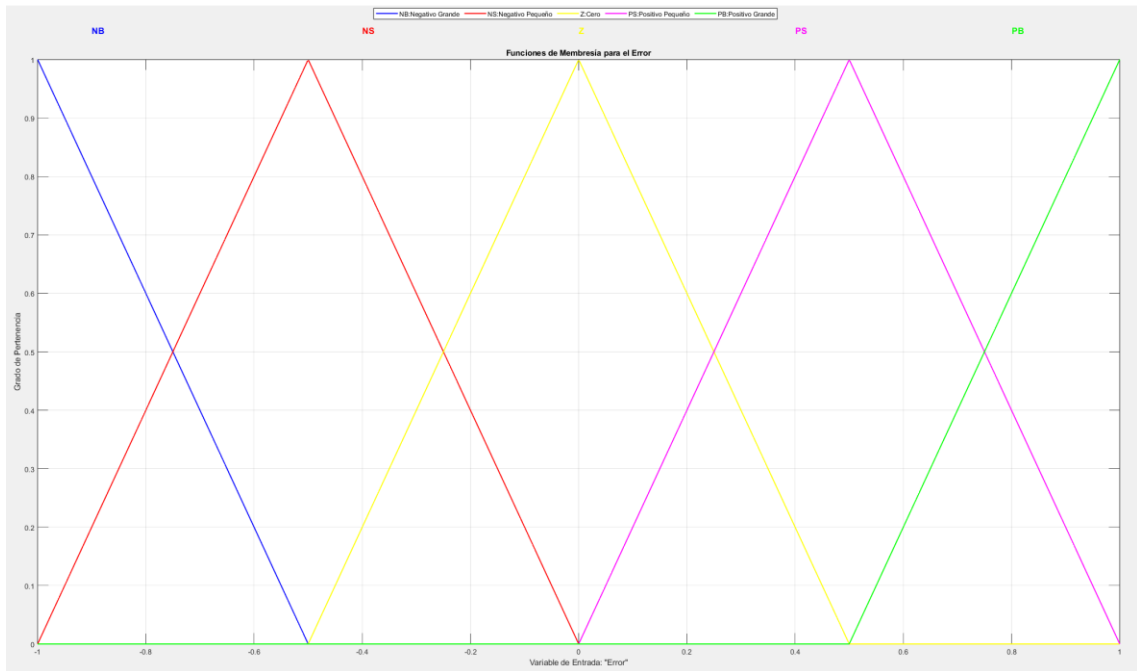
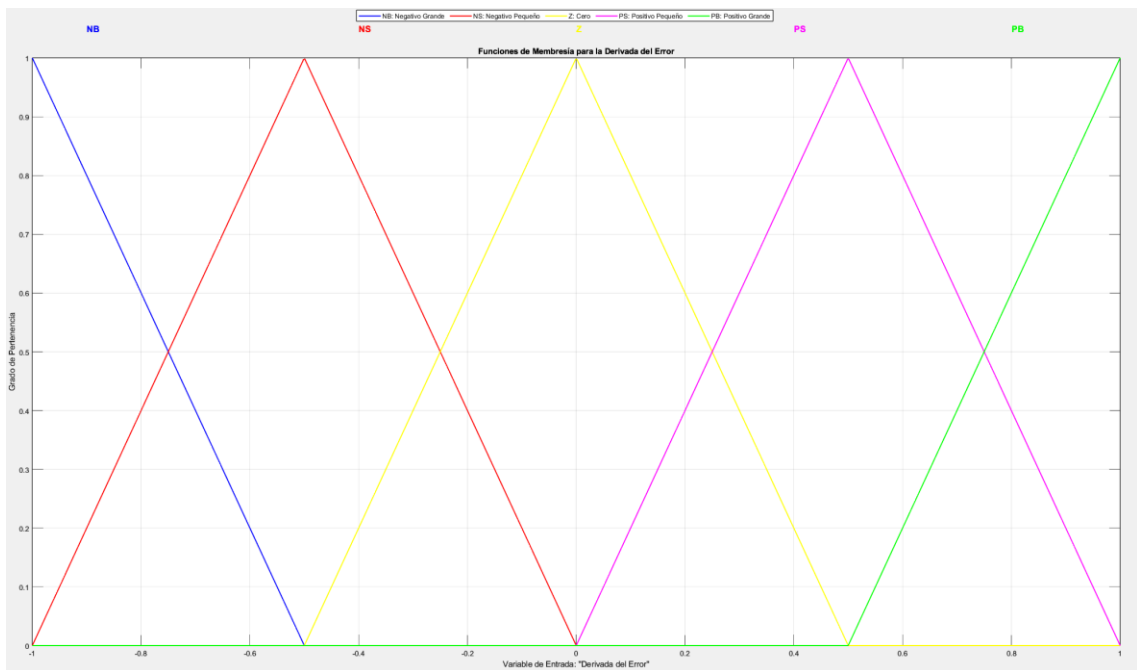


Figura 11

Funciones de membresía para la variable de entrada "Derivada del Error"



El uso de funciones de membresía triangulares en lugar de funciones gaussianas o trapezoidales responde a su simplicidad en términos computacionales, facilitando la implementación del controlador difuso en MATLAB-Simulink, además, las transiciones lineales de las funciones triangulares permiten interpretar de manera intuitiva el impacto de los cambios en la entrada sobre la respuesta del sistema.

Estas funciones han sido definidas en un intervalo normalizado $[-1, +1]$ y la distribución de estos conjuntos ha sido diseñada de manera simétrica y superpuesta, permitiendo que un mismo valor de entrada active más de un conjunto simultáneamente, logrando así, una transición gradual en la acción de control en lugar de generar respuestas abruptas.

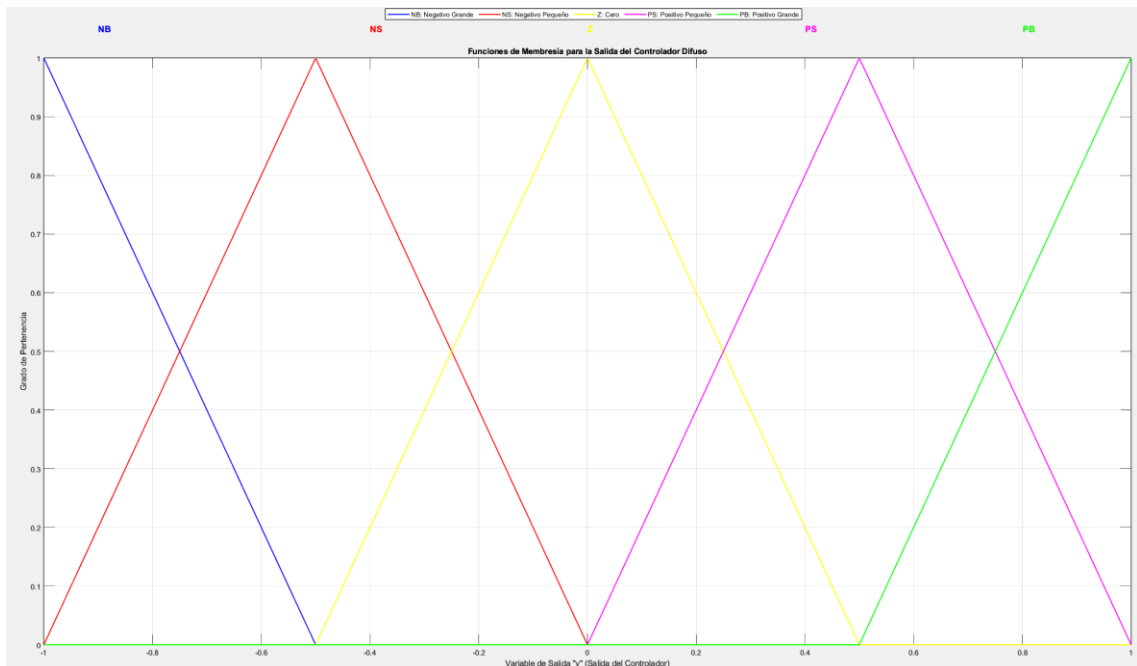
En particular, la superposición ocurre en los siguientes puntos clave del intervalo de definición:

- NB (Negativo Grande) se superpone con NS (Negativo Pequeño), permitiendo una transición gradual desde valores negativos extremos hacia valores más cercanos a cero.
- NS (Negativo Pequeño) se superpone con Z (Cero), lo que garantiza que valores próximos a cero puedan ser interpretados parcialmente como negativos o neutros.
- Z (Cero) se superpone con PS (Positivo Pequeño), asegurando que la transición entre estados neutros y positivos se realice sin cambios bruscos.
- PS (Positivo Pequeño) se superpone con PB (Positivo Grande), permitiendo una transición progresiva hacia valores de error más grandes en la dirección positiva.

Esta configuración es clave para la estabilidad del controlador, ya que evita discontinuidades en la respuesta del sistema, debido a esta superposición, los valores de entrada pueden pertenecer simultáneamente a dos conjuntos difusos con distintos grados de pertenencia, lo que permite generar una salida más precisa y adaptativa.

Figura 12

Funciones de membresía para la variable de salida "y"



La salida del controlador difuso es un valor denominado pu , el cual actúa como la señal de control que regula el funcionamiento de la planta de celda de combustible, este valor representa el porcentaje de generación de la planta, determinando su nivel de operación en función de las condiciones del sistema.

Las funciones de membresía de la salida del controlador utilizan los mismos estados difusos definidos para las variables de entrada, garantizando coherencia en la interpretación de los niveles de control, además, también comparten la misma superposición y simetría, lo que refuerza la continuidad y suavidad en la transición entre los distintos estados, evitando cambios bruscos en la respuesta del sistema.

2.8.2 Definición de las reglas difusas del controlador difuso

El controlador difuso está basado en un conjunto de 25 reglas difusas, obtenidas de la combinación de los 5 estados difusos del error $e(t)$ y los 5 estados difusos de la derivada del error $\dot{e}(t)$, con estas combinaciones se genera una matriz de reglas, donde cada intersección representa una acción de control específica.

Tabla 3*Reglas difusas definidas para el control del sistema*

		Derivada del Error (Δe)				
		NB	NS	Z	PS	PB
Error (e)	NB	NB	NB	NB	NS	Z
	NS	NB	NB	NS	Z	PS
	Z	NB	NS	Z	PS	PB
	PS	NS	Z	PS	PB	PB
	PB	Z	PS	PB	PB	PB

La estructura matricial de las reglas garantiza que cada combinación posible de los estados difusos del error y su derivada tenga una respuesta específica en la salida del sistema.

Por ejemplo:

- Cuando tanto el error como su derivada son negativos grandes, el sistema responde con una salida NB, lo que indica la necesidad de reducir drásticamente la generación de energía, evitando sobreproducción.
- Si el error es levemente negativo y su variación es pequeña, indica que la generación de energía es ligeramente superior al consumo y se requiere una reducción moderada en la producción sin afectar la estabilidad del suministro.
- En un escenario donde el error sea cero y la derivada también, la salida se mantiene en Z, promoviendo la estabilidad del sistema sin ajustes innecesarios.
- Cuando el error es levemente positivo y su variación es pequeña, el consumo es ligeramente superior a la generación, por lo que es necesario aumentar la producción de manera controlada, sin generar una respuesta excesiva que pueda llevar a sobrecompensaciones.

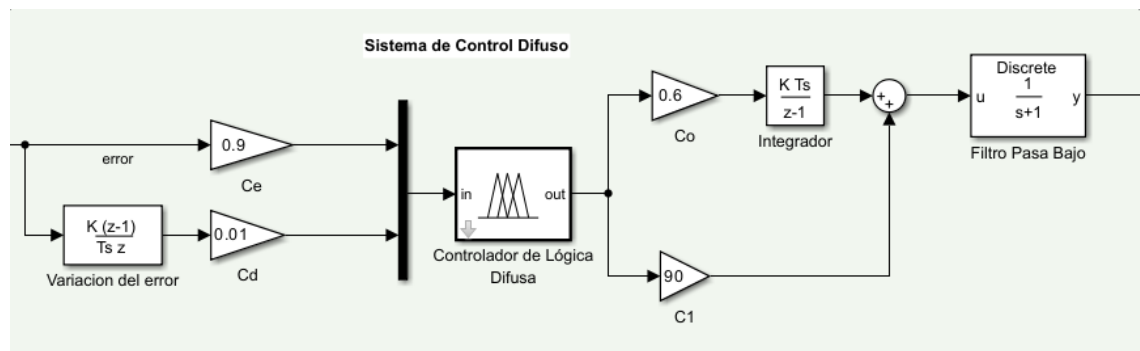
- Para errores positivos grandes y tendencias crecientes, la respuesta se ajusta a PB, incentivando un aumento en la producción energética, particularmente relevante en picos de consumo.

Las reglas difusas implementadas, no solo asegura un seguimiento preciso del consumo, sino que también contribuye a la robustez del sistema frente a perturbaciones, como cambios bruscos en la irradiancia solar o en el consumo eléctrico residencial.

2.8.3 Implementación del controlador difuso

Figura 13

Diagrama de bloques del controlador difuso



Para la implementación del controlador basado en lógica difusa, se ha empleado los métodos MADAMI y centroide para la defuzzificación, este controlador sigue un esquema de tipo PID, dado que su estructura permite observar el efecto de los bloques Ce, Cd, C0 y C1 sobre su comportamiento.

Tabla 4*Coefficientes del controlador difuso*

Coefficiente	Descripción	Valor
Ce	Ganancia aplicada al error para su escalado antes de ingresar al controlador difuso.	0.9
Cd	Ganancia aplicada a la variación del error para su escalado antes de ingresar al controlador difuso.	0.01
Co	Coefficiente que modula la salida del controlador antes de pasar por el bloque integrador.	0.6
C1	Coefficiente que modula la salida del controlador en la segunda rama del sistema.	90

2.9 Adaptación de las plantas de generación eléctrica en MATLAB-Simulink

Para desarrollar el sistema de gestión energética que integrará la producción de energía eléctrica proveniente tanto de la planta fotovoltaica como de la celda de combustible de óxido sólido, se emplearán modelos preexistentes disponibles en la librería de MATLAB-Simulink, estos modelos, previamente analizados en el marco teórico, deben ser adaptados para representar de manera precisa las condiciones de generación y consumo en el cantón Chilla.

La personalización de estos modelos permitirá simular la interacción entre las fuentes de energía renovable y el consumo, optimizando la estabilidad del suministro eléctrico en función de las variaciones del consumo y las condiciones climáticas de la región.

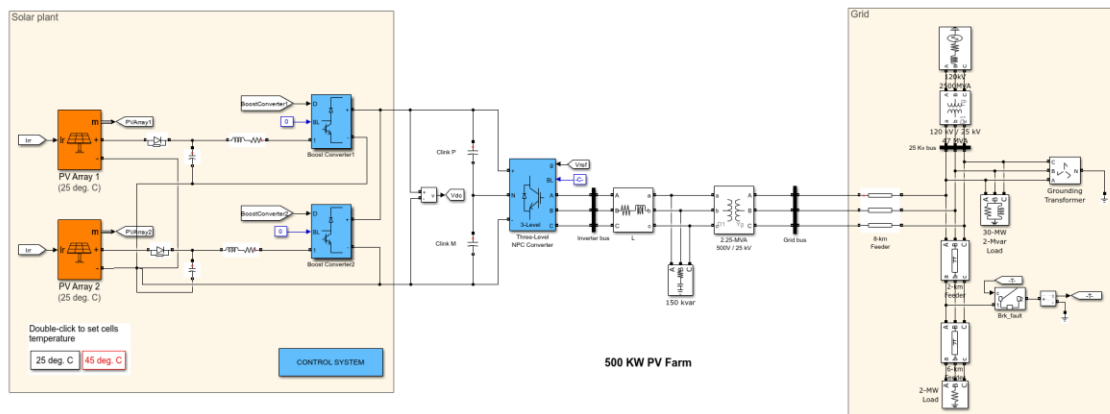
2.9.1 Adaptación de la planta de generación eléctrica fotovoltaica

Para la simulación de la planta de generación fotovoltaica, se ha modificado el modelo base disponible en MATLAB-Simulink, ajustando la configuración de los arreglos fotovoltaicos y la integración de los datos de irradiancia solar.

La configuración del sistema fotovoltaico se modificó estableciendo 70 paneles conectados en paralelo en el PV Array 1 y 31 paneles en paralelo en el PV Array 2, garantizando que la suma de la potencia total generada alcance 500 kW. Este ajuste permite representar con mayor precisión la capacidad instalada y la distribución de generación dentro del sistema energético modelado.

Figura 14

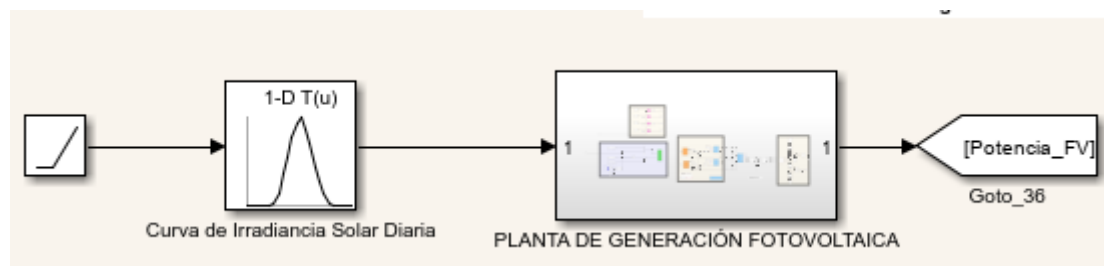
Modelo de planta fotovoltaica con la potencia modificada



Además, se configuró la entrada de la planta fotovoltaica para que reciba la irradiancia solar de manera dinámica a través del bloque 1-D Lookup Table, donde se almacena la curva de irradiancia solar del día, esta implementación permite que la simulación refleje con precisión la variabilidad horaria de la irradiancia, afectando directamente la producción de energía de los paneles solares y proporcionando un comportamiento más realista del sistema de generación fotovoltaica bajo diferentes condiciones climáticas.

Figura 15

Modelo de planta fotovoltaica con adaptación de entrada y salida



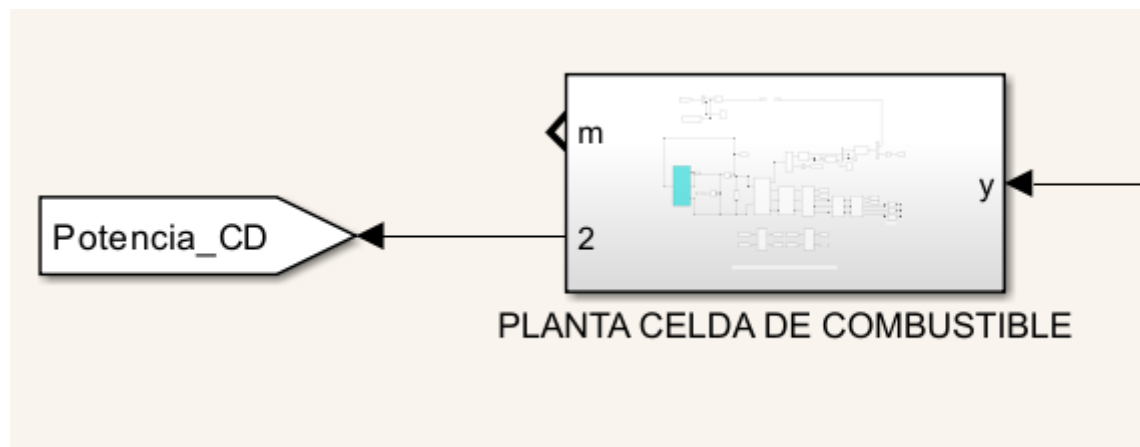
2.9.2 Adaptación de la planta de generación eléctrica con celdas de combustible de óxido sólido

Para la simulación de la planta de generación con celdas de combustible de óxido sólido (SOFC, por sus siglas en inglés), se realizaron modificaciones en la configuración del modelo para su integración con el controlador difuso.

La entrada de la planta fue conectada directamente a la salida del controlador difuso, asegurando que la señal de control generada en unidades por unidad (pu) module dinámicamente el nivel de generación de la celda de combustible. Esta configuración permite que el sistema regule la producción de energía de acuerdo con las condiciones establecidas por el controlador difuso.

Figura 16

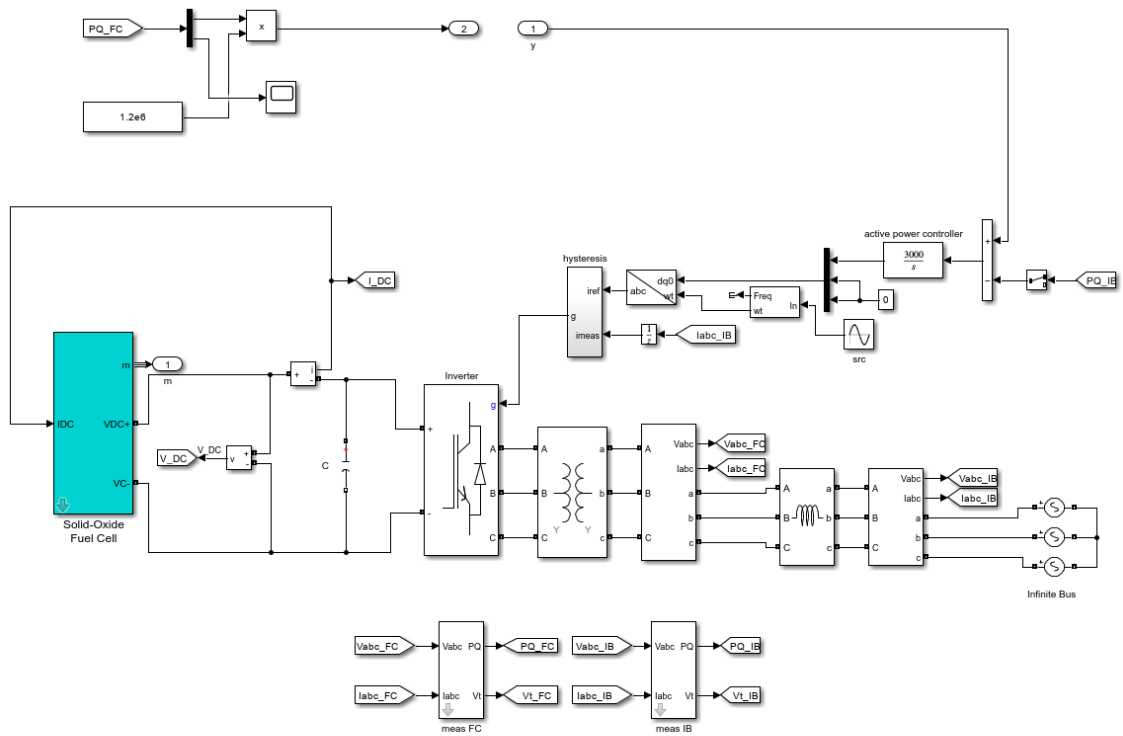
Modelo de planta celda de combustible con adaptación de entrada y salida



Asimismo, se ajustó la capacidad de generación de la celda de combustible, configurándola para alcanzar una potencia máxima de 1.2 W, esta modificación garantiza que el modelo represente con precisión los límites operativos de la tecnología de celdas de combustible utilizadas en el sistema de gestión energética.

Figura 17

Modelo de planta celda de combustible con la potencia modificada



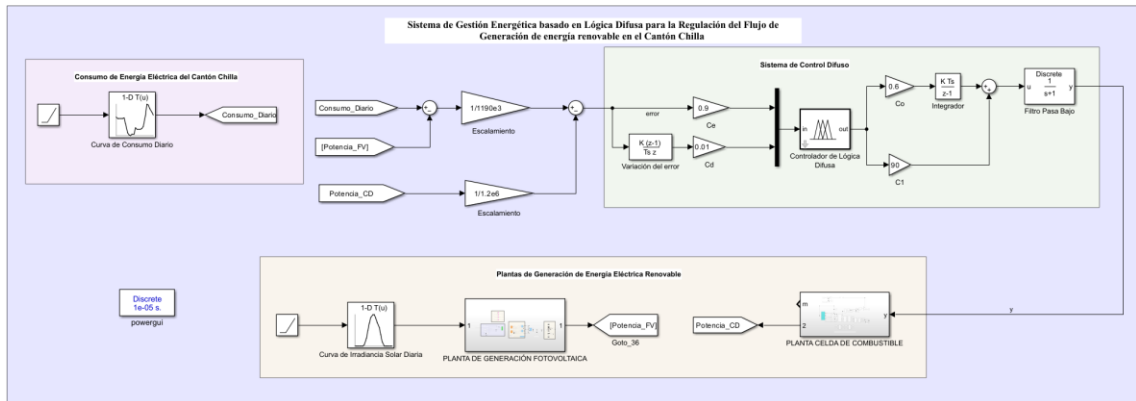
Solid-Oxide Fuel Cell Connected to Three-Phase Electrical Power System

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Descripción del sistema de gestión energética implementado

Figura 18

Diagrama del sistema de gestión energética basado en lógica difusa



El diagrama muestra la interacción entre el consumo, la generación fotovoltaica y celda de combustible, con un controlador de lógica difusa que ajusta la potencia generada.

El sistema está dividido en tres secciones principales:

Entrada de Datos: Se incluyen las curvas de consumo eléctrico e irradiancia solar del cantón Chilla, las cuales son escaladas para ingresar al controlador.

Sistema de Control Difuso: Se calcula el error y la variación del error entre el consumo y la generación, enviando la señal ajustada al controlador difuso, el cual procesa la información y genera una salida que regula la potencia de la celda de combustible.

Planta de Generación de Energía Renovable: Se observa la interacción entre la planta fotovoltaica y la celda de combustible, donde el controlador regula la generación para mantener el balance entre la oferta y el consumo de energía eléctrica.

Este modelo permite evaluar la estabilidad del suministro eléctrico bajo diferentes condiciones de irradiancia y consumo, optimizando la integración de energías renovables.

3.2 Selección de escenarios de pruebas

Para la obtención de las muestras que serán simuladas en el sistema, se seleccionará aleatoriamente un día de cada mes del año 2023, con base en las curvas de irradiancia y consumo registradas en dichos días, se llevará a cabo la evaluación del desempeño y funcionamiento del sistema.

El análisis se realizará en el rango horario de 5:00 a 22:00 horas, ya que a partir de las 6:00 comienza la generación de potencia fotovoltaica, mientras que el pico de consumo se produce entre las 18:00 y 22:00 horas, lo que permite evaluar la capacidad del sistema para gestionar el suministro eléctrico en condiciones críticas.

Figura 19

Curvas de irradiancia y consumo del 14 de enero de 2023

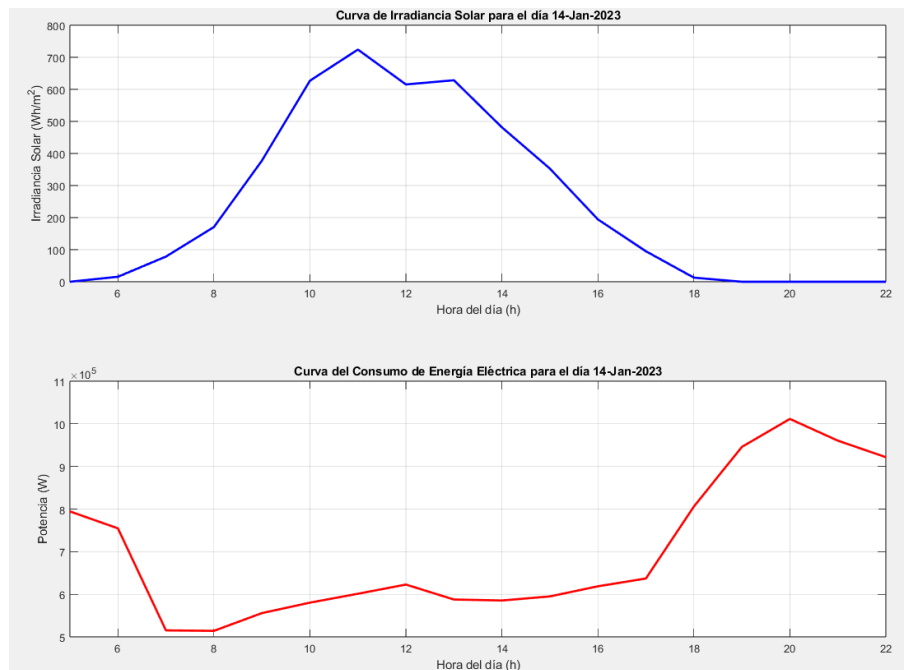


Figura 20

Curvas de irradiancia y consumo del 25 de febrero de 2023

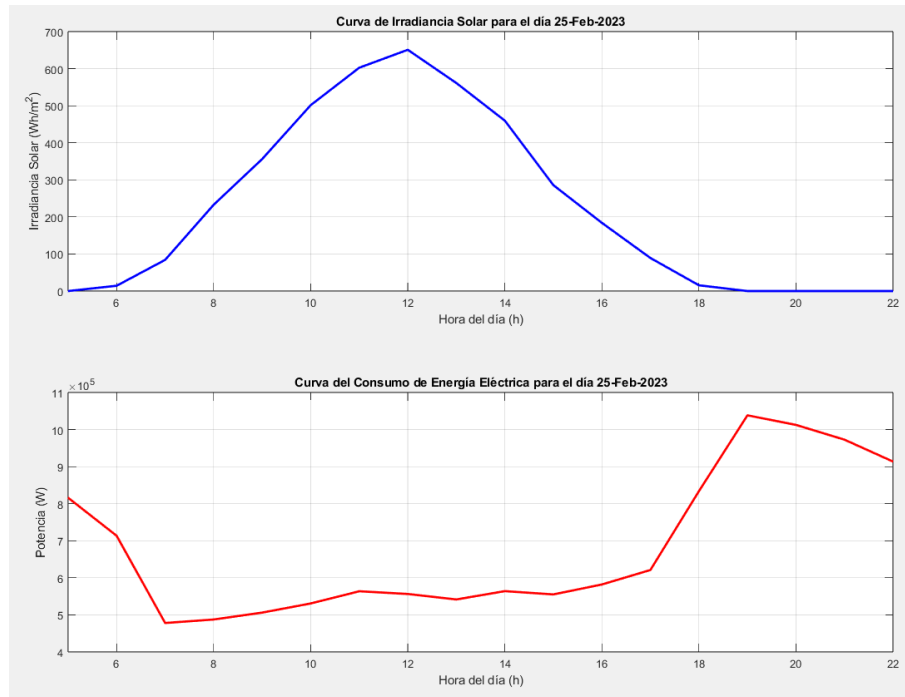


Figura 21

Curvas de irradiancia y consumo del 9 de marzo de 2023

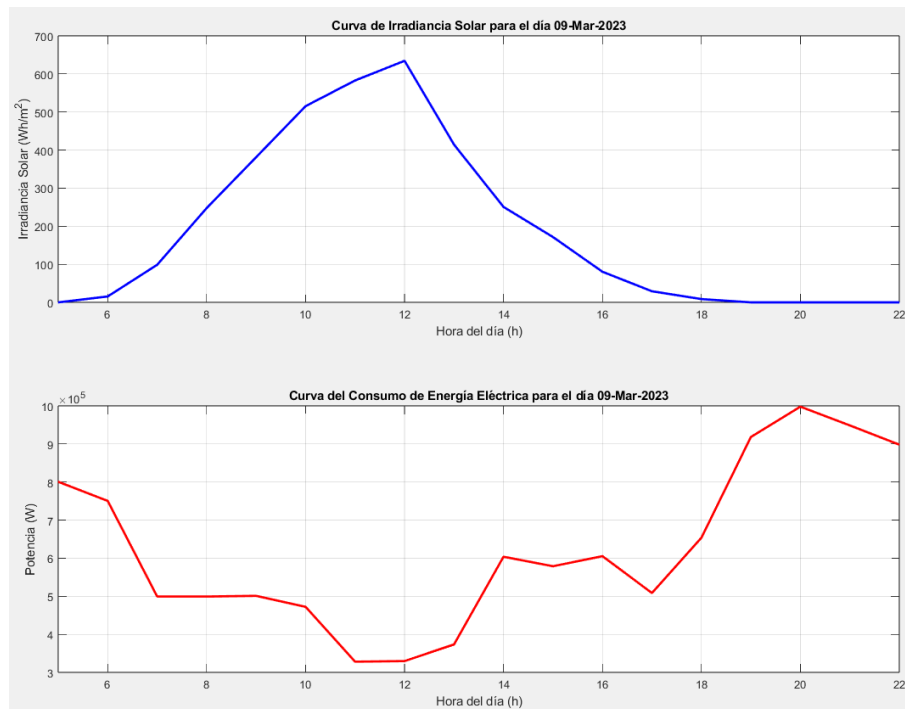


Figura 22

Curvas de irradiancia y consumo del 17 de abril de 2023,

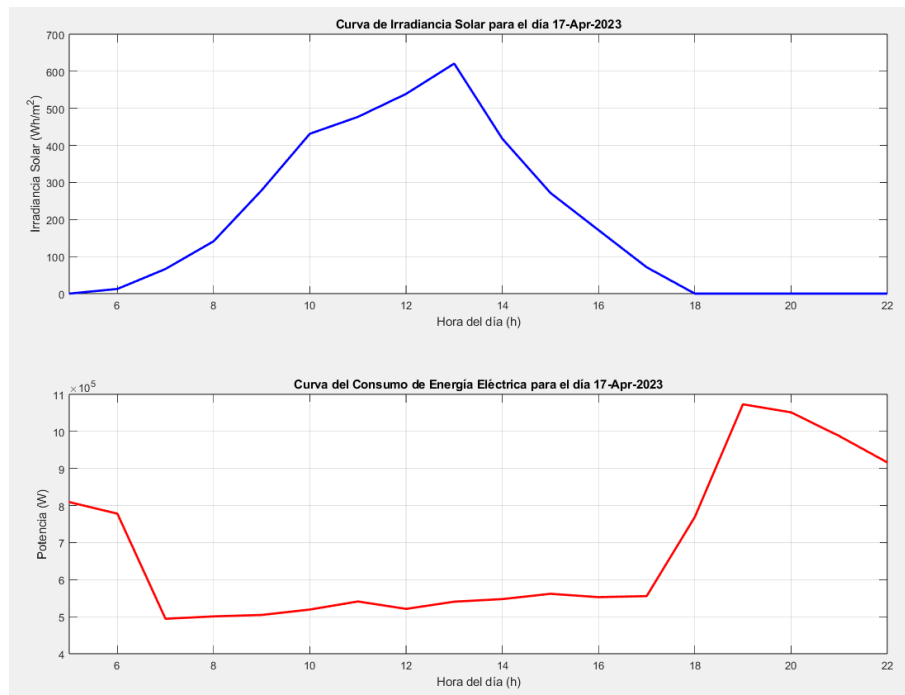


Figura 23

Curvas de irradiancia y consumo del 2 de mayo de 2023

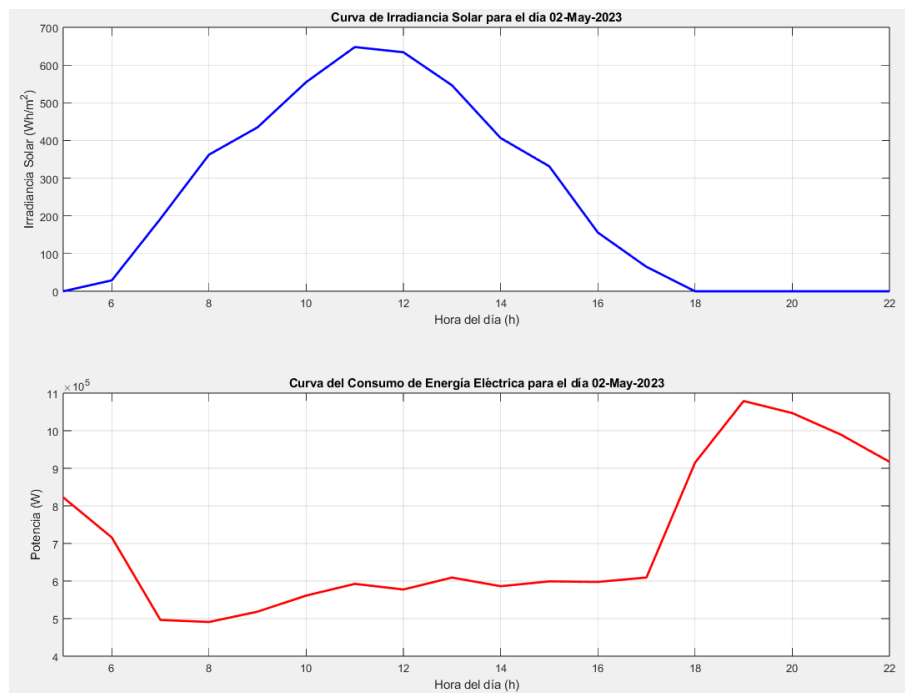


Figura 24

Curvas de irradiancia y consumo del 10 de junio de 2023

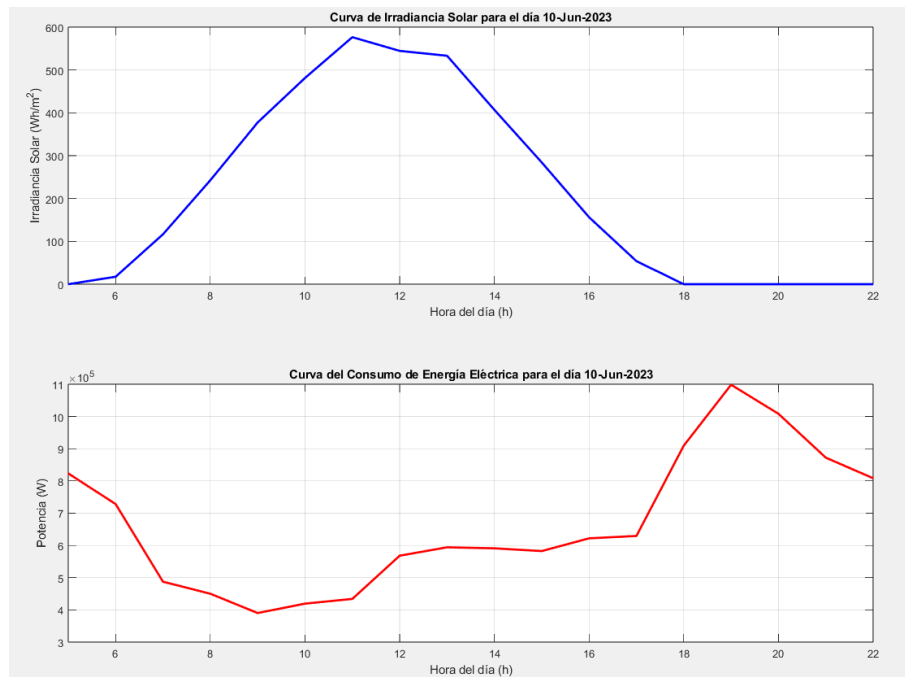


Figura 25

Curvas de irradiancia y consumo del 15 de julio de 2023

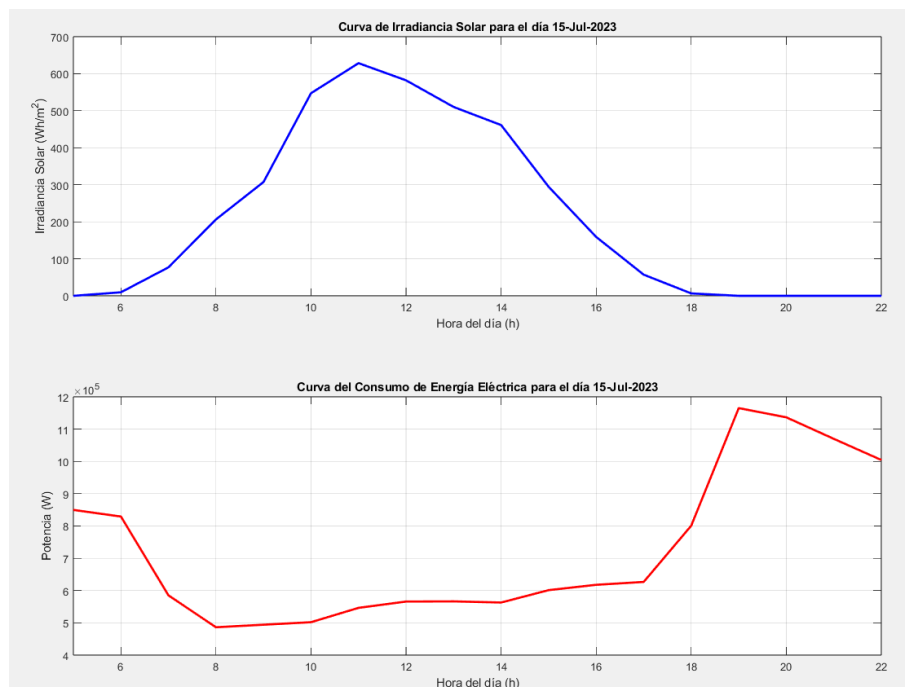


Figura 26

Curvas de irradiancia y consumo del 27 de agosto de 2023

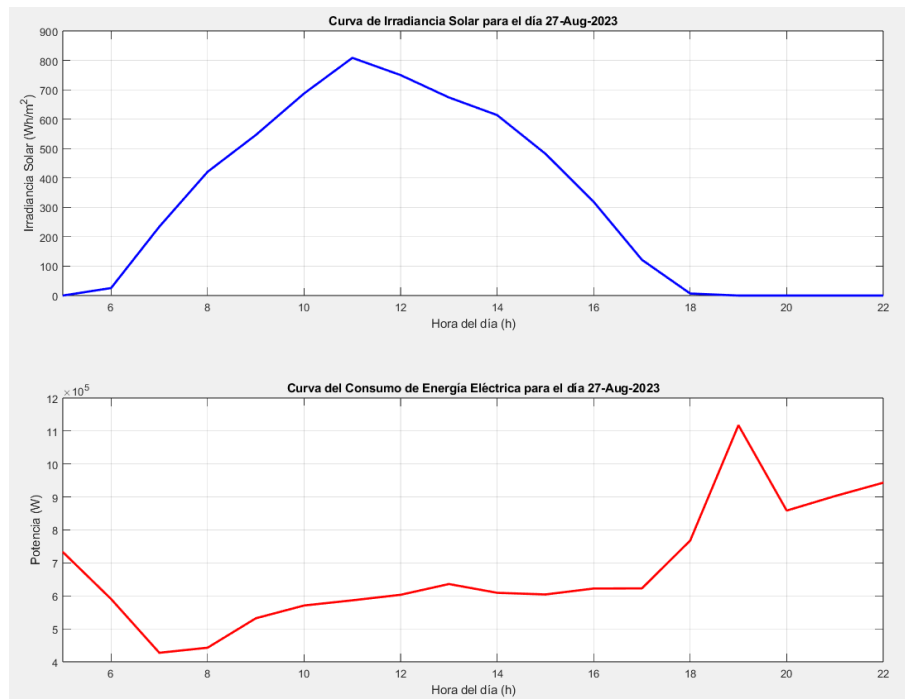


Figura 27

Curvas de irradiancia y consumo del 9 de septiembre de 2023

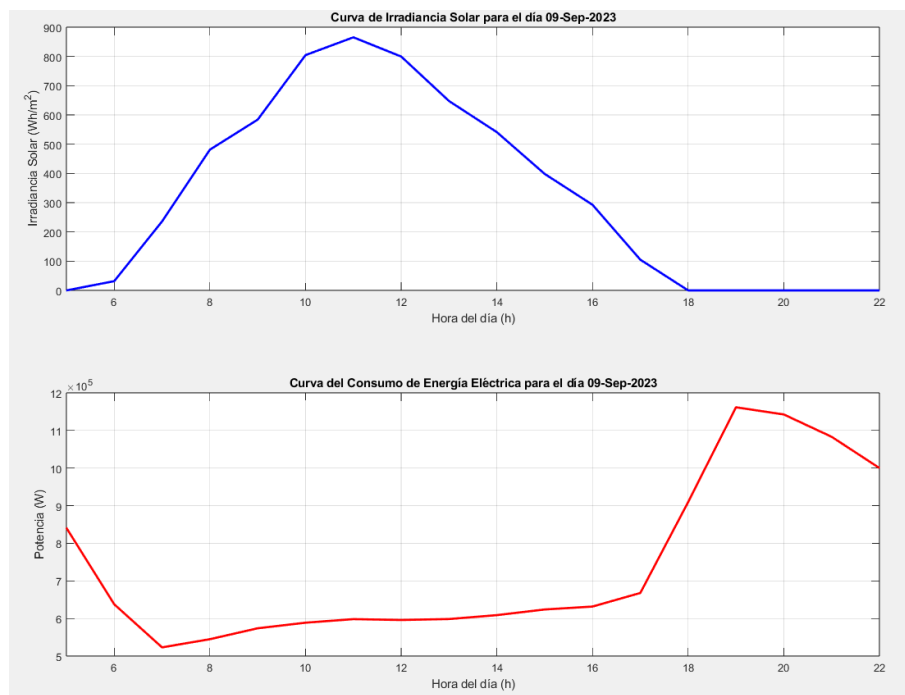


Figura 28

Curvas de irradiancia y consumo del 21 de octubre de 2023

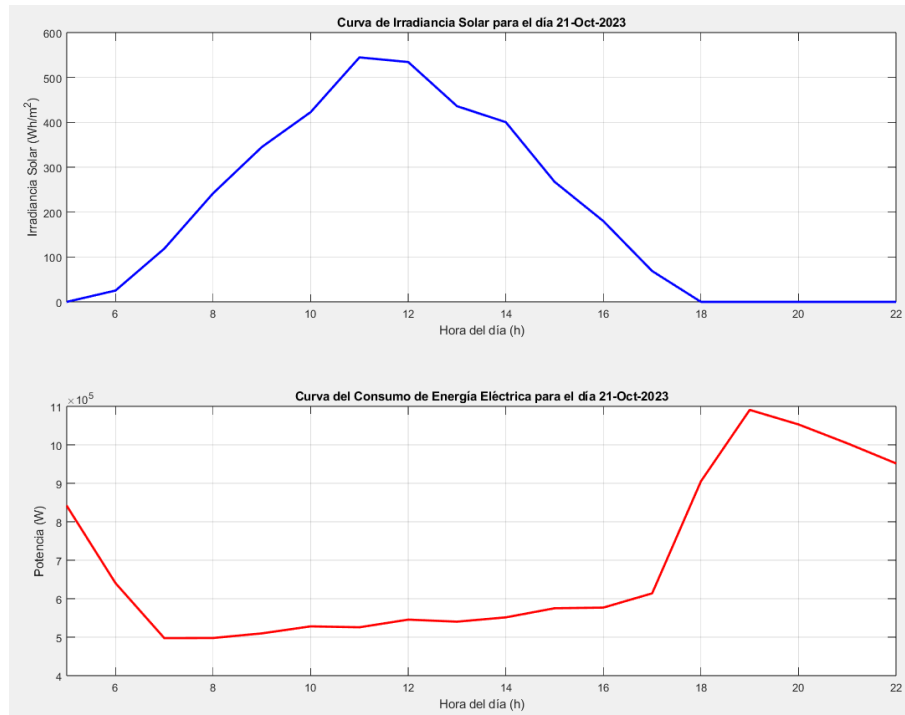


Figura 29

Curvas de irradiancia y consumo del 1 de noviembre de 2023

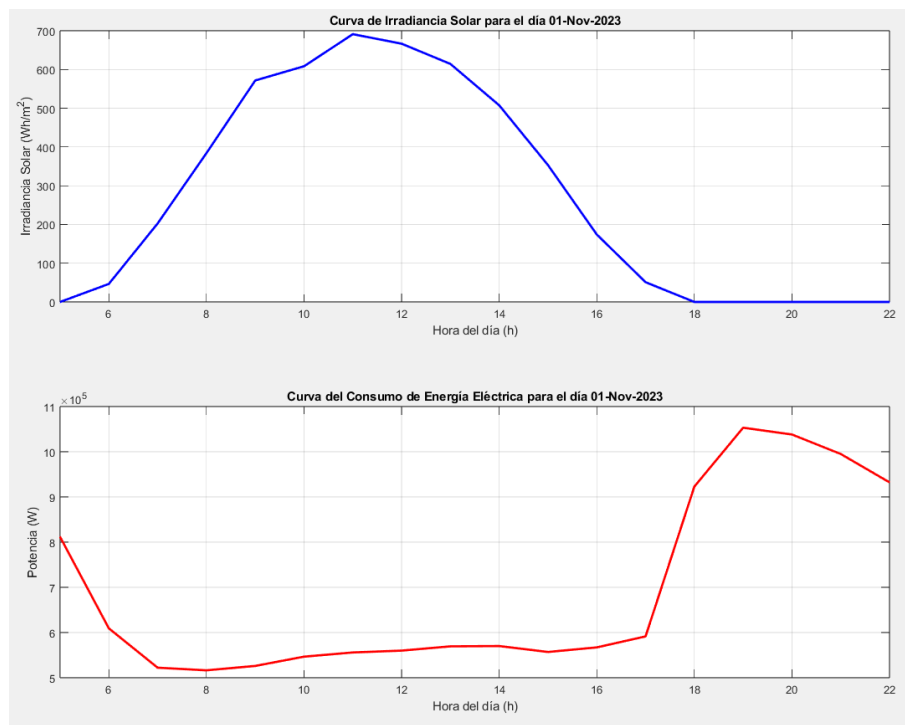
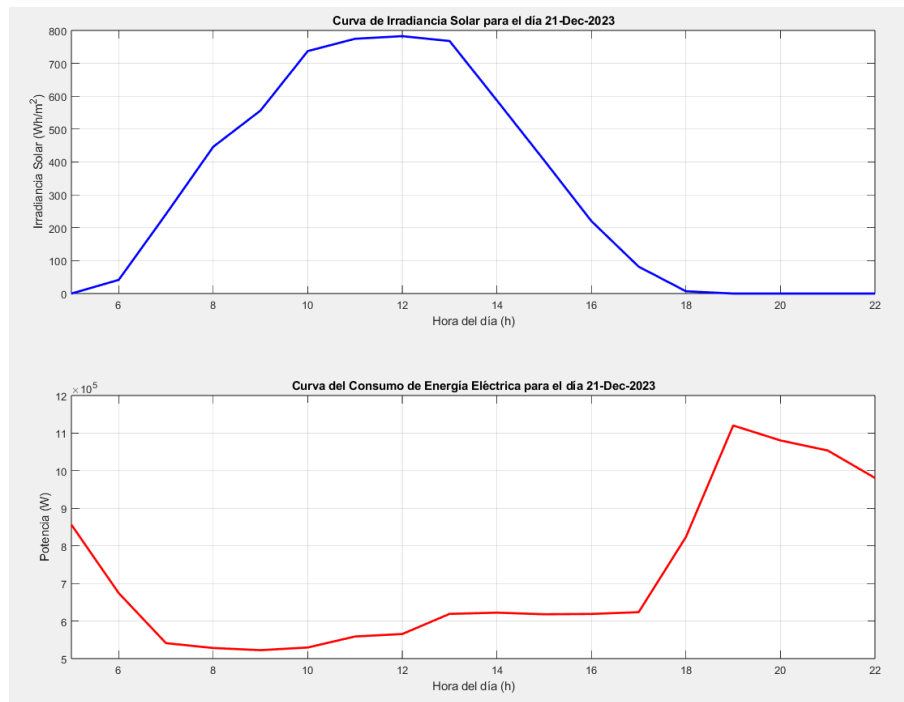


Figura 30

Curvas de irradiancia y consumo del 31 de diciembre de 2023



3.3 Simulación del sistema controlado y resultados de desempeño

Para evaluar el desempeño del sistema de gestión energética basado en lógica difusa, se han definido cuatro métricas fundamentales que permiten cuantificar la estabilidad y distribución del suministro eléctrico (**Anexo 2**).

El Índice de Seguimiento de la Referencia, se emplea para medir la capacidad del sistema de ajustar la generación de energía en función del consumo, asegurando una regulación precisa del flujo energético.

El Índice de Cobertura Energética, es una métrica técnica que cuantifica la proporción de la demanda energética de un sistema que es satisfecha por el suministro disponible durante un período determinado

Los porcentajes de energía fotovoltaica y de celda de combustible utilizadas permiten analizar la distribución del suministro eléctrico, estas métricas determinan la contribución de cada fuente de energía renovable en la generación total, lo que resulta clave para

evaluar la eficiencia del sistema en la integración de fuentes renovables dentro del cantón Chilla.

En los apartados siguientes, se presentan los resultados obtenidos a partir de la simulación del sistema controlado, detallando la evolución de cada una de estas métricas en diferentes escenarios de prueba.

Figura 31

Comparación entre la potencia generada por la planta fotovoltaica y la celda de combustible, el 14 de enero de 2023

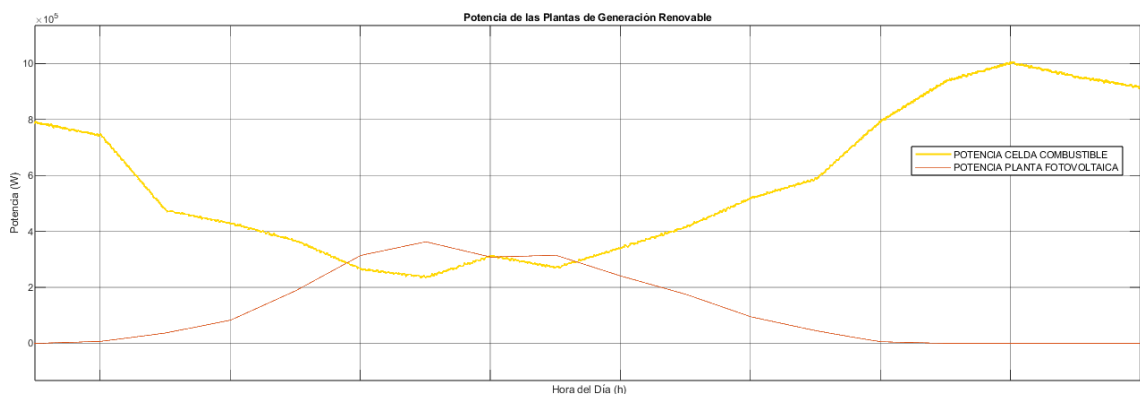


Figura 32

Comparación entre la potencia total generada y el consumo (referencia), el 14 de enero de 2023

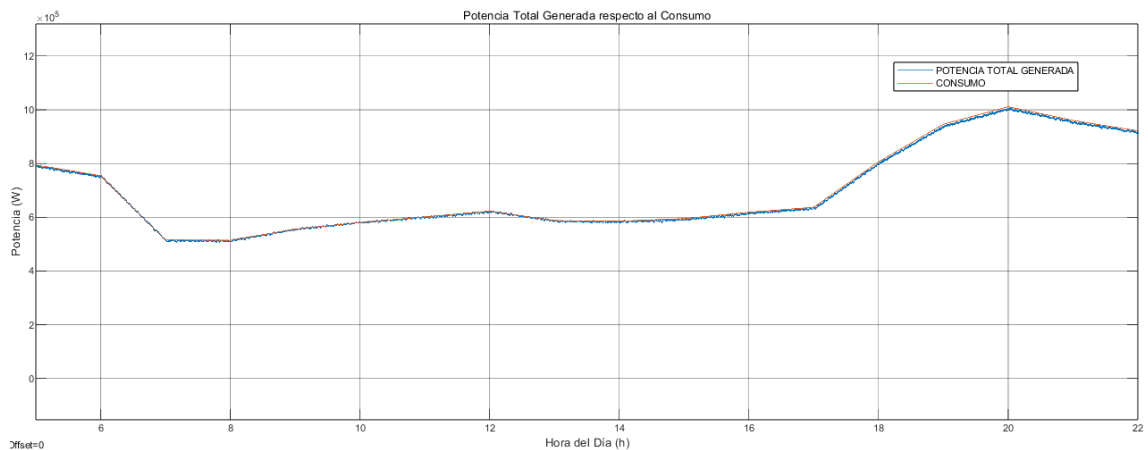


Tabla 5

Métricas de desempeño del sistema: 14 de enero de 2023

Métrica de Desempeño	Valor
Índice de Seguimiento de la Referencia	0.0044
Índice de Cobertura Energética	99.39%
Energía Celda de Combustible Utilizada	81.38%
Energía Solar Utilizada	18.62%

Figura 33

Comparación entre la potencia generada por la planta fotovoltaica y la celda de combustible, el 25 de febrero de 2023

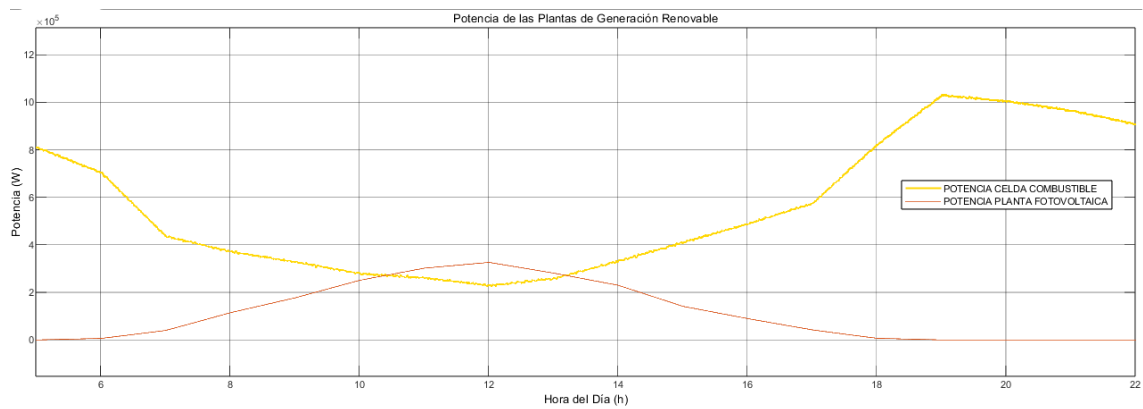


Figura 34

Comparación entre la potencia total generada (señal controlada) y el consumo (referencia), el 25 de febrero de 2023

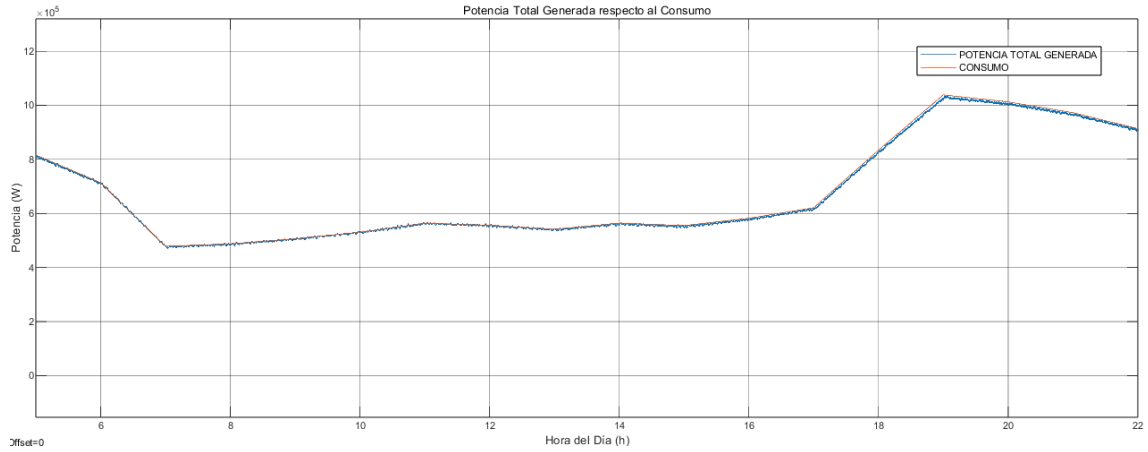


Tabla 6

Métricas de desempeño del sistema: 25 de febrero de 2023

Métrica de Desempeño	Valor
Índice de Seguimiento de la Referencia	0.0043
Índice de Cobertura Energética	99.38%
Energía Celda de Combustible Utilizada	82.34%
Energía Solar Utilizada	17.66%

Figura 35

Comparación entre la potencia generada por la planta fotovoltaica y la celda de combustible, el 9 de marzo de 2023

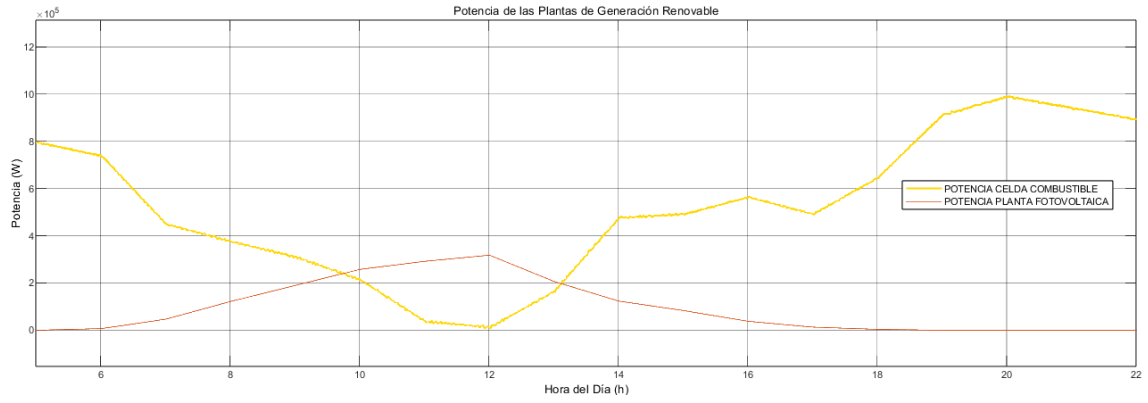


Figura 36

Comparación entre la potencia total generada (señal controlada) y el consumo (referencia), el 9 de marzo de 2023

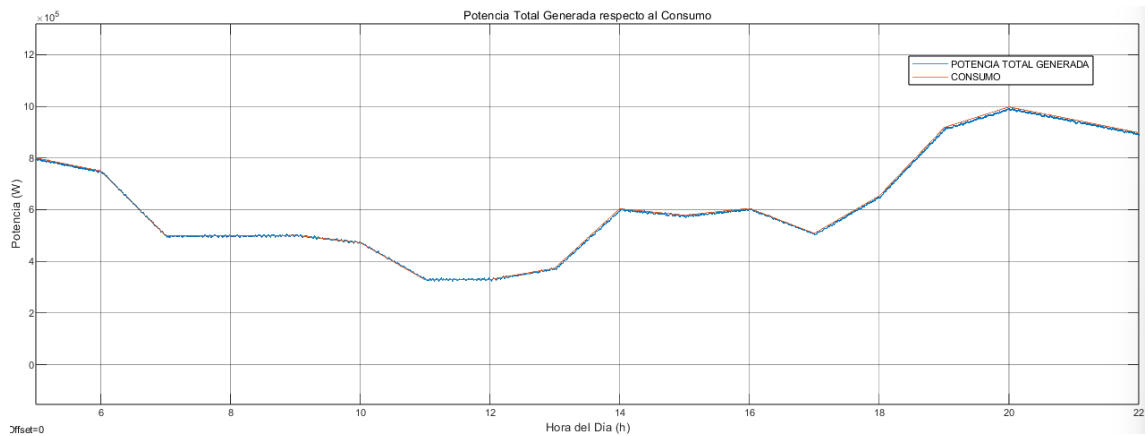


Tabla 7

Métricas de desempeño del sistema: 9 de marzo de 2023

Métrica de Desempeño	Valor
Índice de Seguimiento de la Referencia	0.0045
Índice de Cobertura Energética	99.38%
Energía Celda de Combustible Utilizada	83.59%
Energía Solar Utilizada	16.41%

Figura 37

Comparación entre la potencia generada por la planta fotovoltaica y la celda de combustible, el 17 de abril de 2023

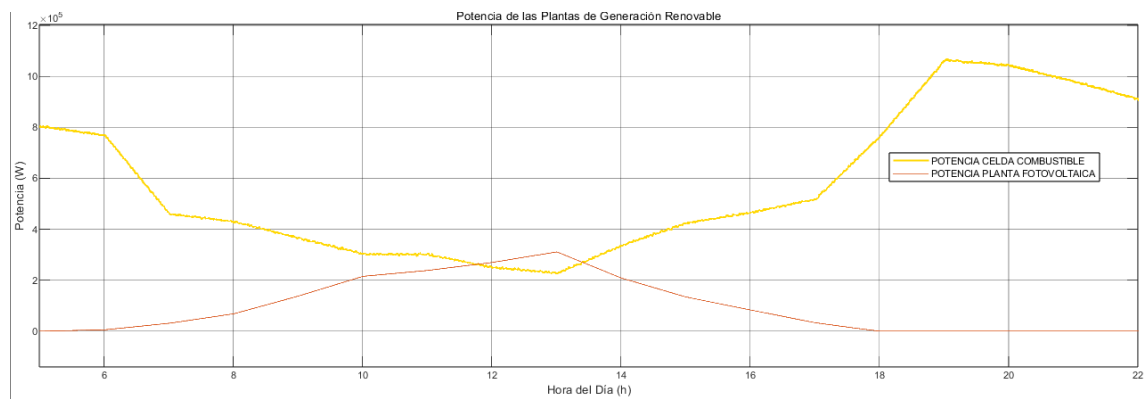


Figura 38

Comparación entre la potencia total generada (señal controlada) y el consumo (referencia), el 17 de abril de 2023

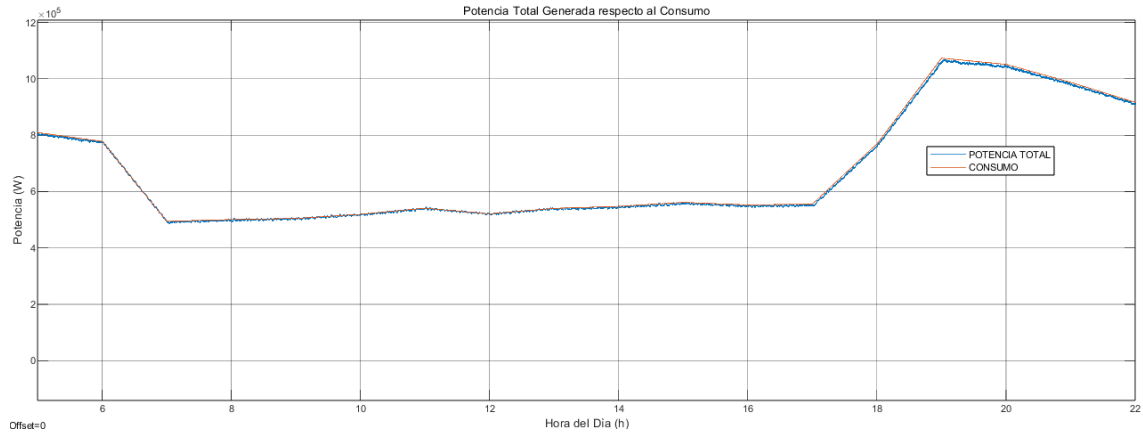


Tabla 8

Métricas de desempeño del sistema: 17 de abril de 2023

Métrica de Desempeño	Valor
Índice de Seguimiento de la Referencia	0.0044
Índice de Cobertura Energética	99.35%
Energía Celda de Combustible Utilizada	84.64%
Energía Solar Utilizada	15.36%

Figura 39

Comparación entre la potencia generada por la planta fotovoltaica y la celda de combustible, el 2 de mayo de 2023

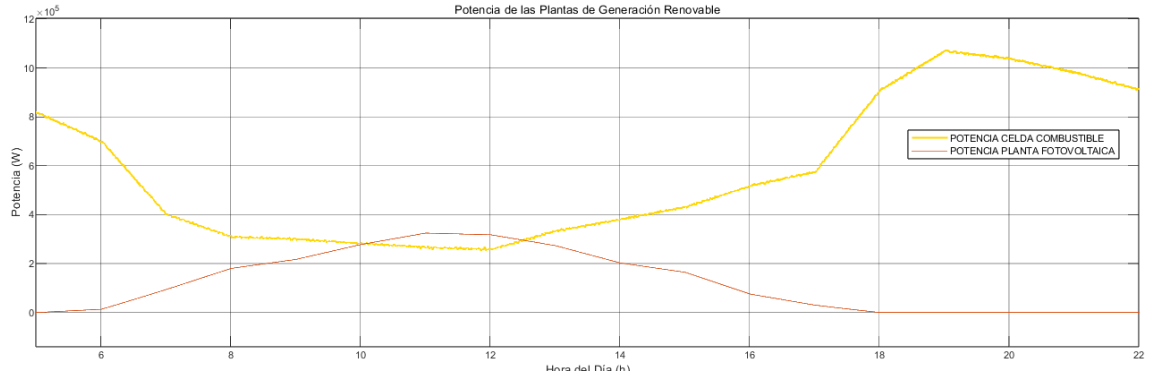


Figura 40

Comparación entre la potencia total generada (señal controlada) y el consumo (referencia), el 2 de mayo de 2023

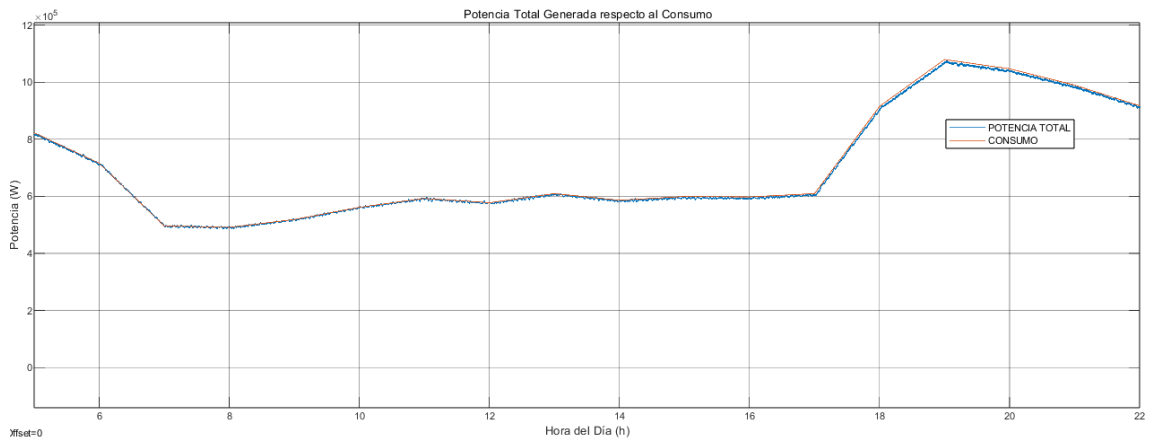


Tabla 9

Métricas de desempeño del sistema: 2 de mayo de 2023

Métrica de Desempeño	Valor
Índice de Seguimiento de la Referencia	0.0044
Índice de Cobertura Energética	99.37%
Energía Celda de Combustible Utilizada	81.60%
Energía Solar Utilizada	18.40%

Figura 41

Comparación entre la potencia generada por la planta fotovoltaica y la celda de combustible, el 10 de junio de 2023

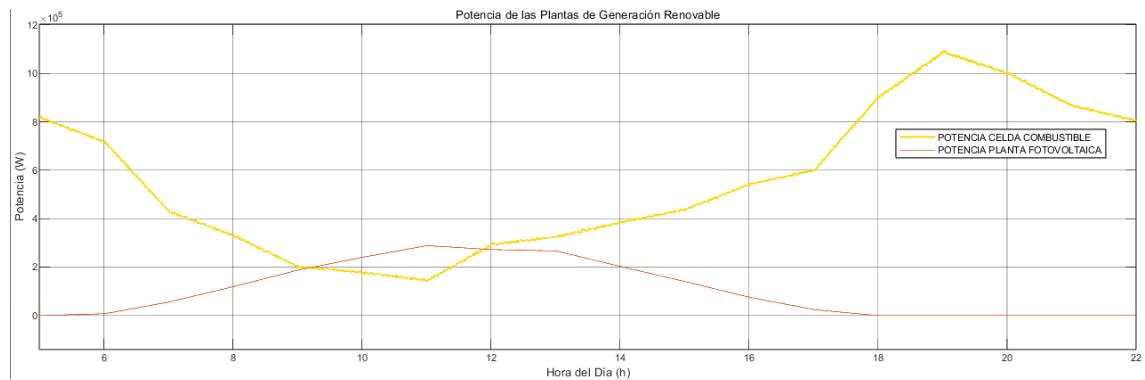


Figura 42

Comparación entre la potencia total generada (señal controlada) y el consumo (referencia), el 10 de junio de 2023

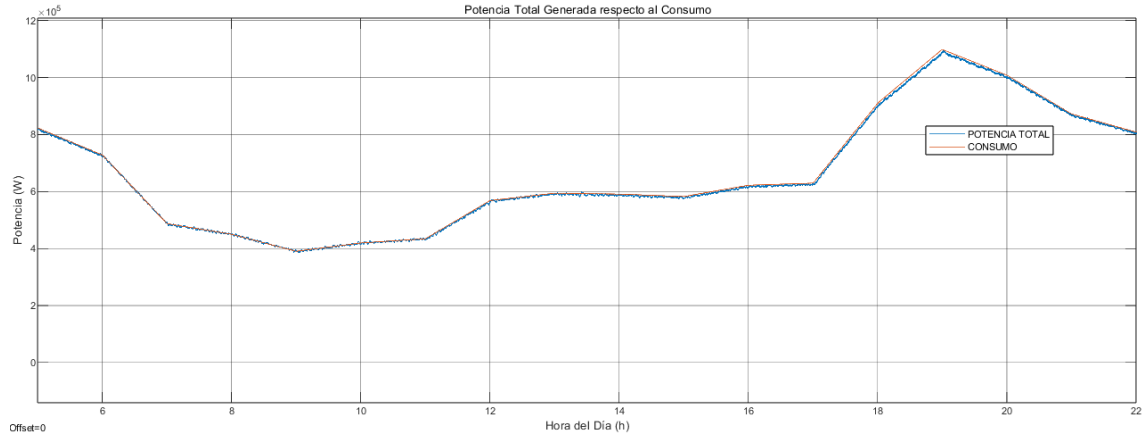


Tabla 10

Métricas de desempeño del sistema: 10 de junio de 2023

Métrica de Desempeño	Valor
Índice de Seguimiento de la Referencia	0.0041
Índice de Cobertura Energética	99.39%
Energía Celda de Combustible Utilizada	83.10%
Energía Solar Utilizada	16.90%

Figura 43

Comparación entre la potencia generada por la planta fotovoltaica y la celda de combustible, el 15 de julio de 2023

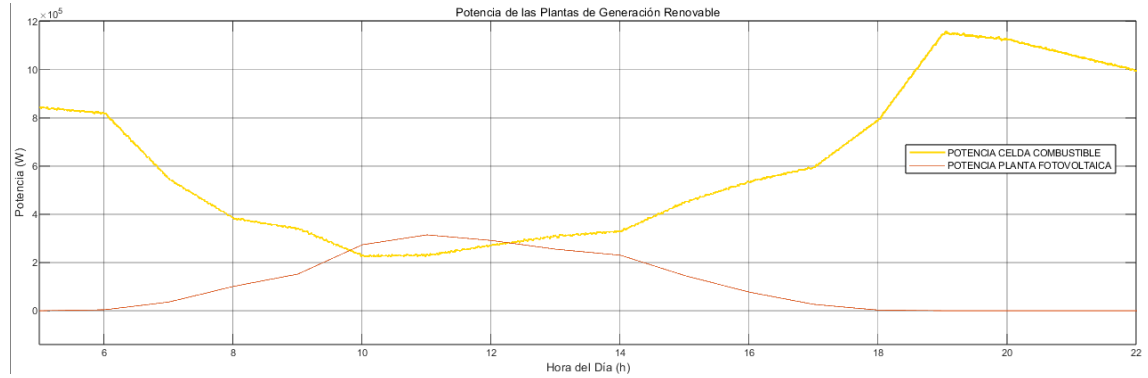


Figura 44

Comparación entre la potencia total generada (señal controlada) y el consumo (referencia), el 15 de julio de 2023

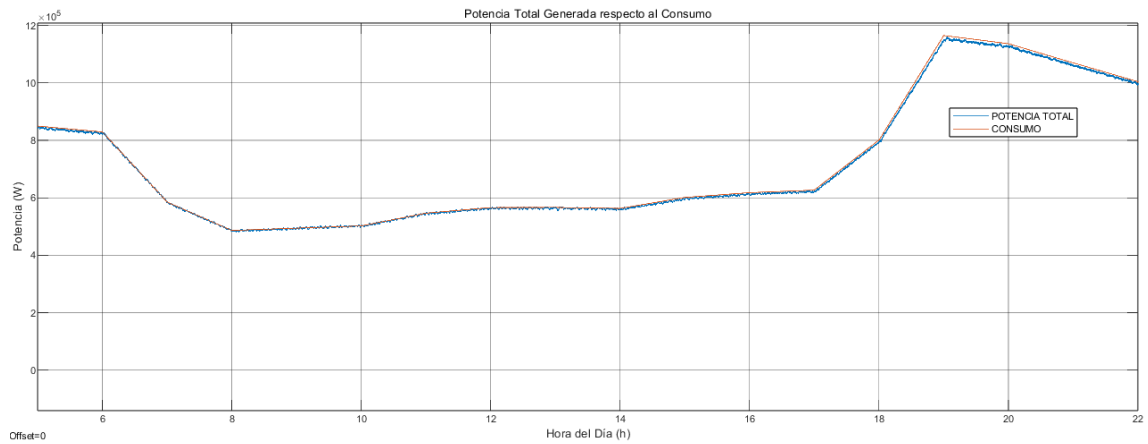


Tabla 11

Métricas de desempeño del sistema: 15 de julio de 2023

Métrica de Desempeño	Valor
Índice de Seguimiento de la Referencia	0.0044
Índice de Cobertura Energética	99.32%
Energía Celda de Combustible Utilizada	84.09%
Energía Solar Utilizada	15.91%

Figura 45

Comparación entre la potencia generada por la planta fotovoltaica y la celda de combustible, el 27 de agosto de 2023

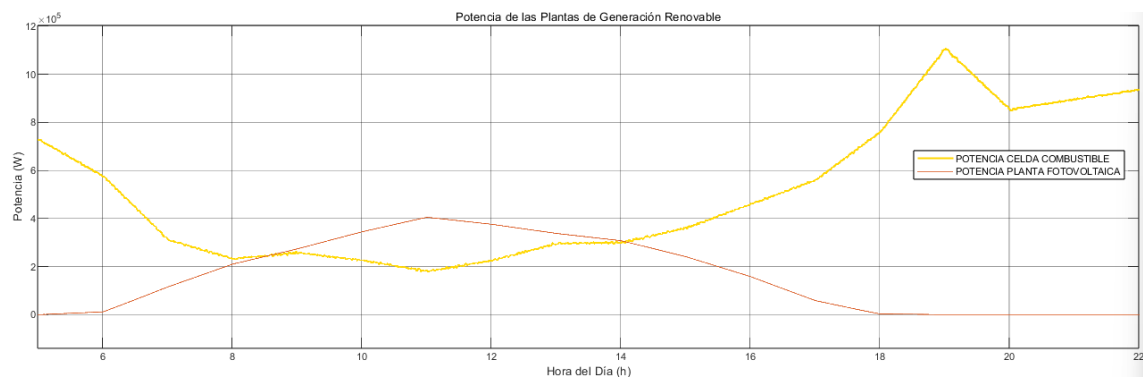


Figura 46

Comparación entre la potencia total generada (señal controlada) y el consumo (referencia), el 27 de agosto de 2023

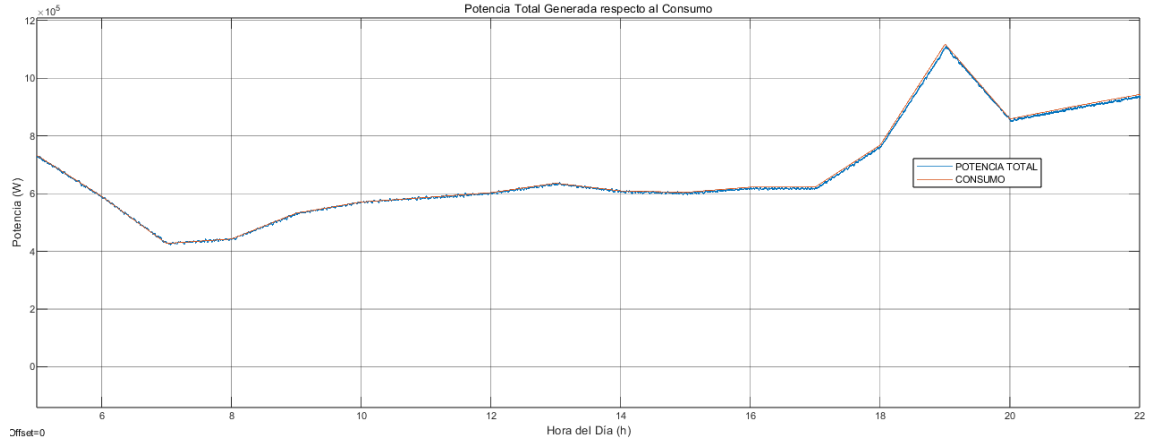


Tabla 12

Métricas de desempeño del sistema: 27 de agosto de 2023

Métrica de Desempeño	Valor
Índice de Seguimiento de la Referencia	0.0039
Índice de Cobertura Energética	99.42%
Energía Celda de Combustible Utilizada	74.81%
Energía Solar Utilizada	25.19%

Figura 47

Comparación entre la potencia generada por la planta fotovoltaica y la celda de combustible, el 9 de septiembre de 2023

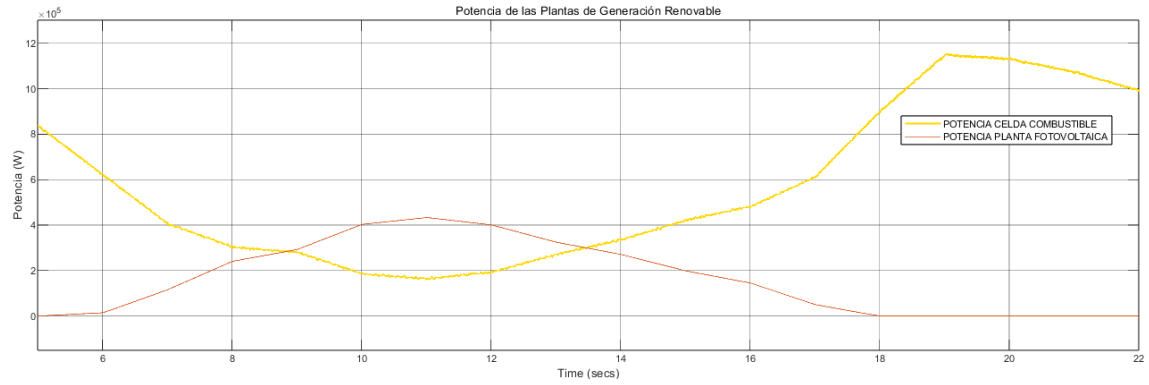


Figura 48

Comparación entre la potencia total generada (señal controlada) y el consumo (referencia), el 9 de septiembre de 2023

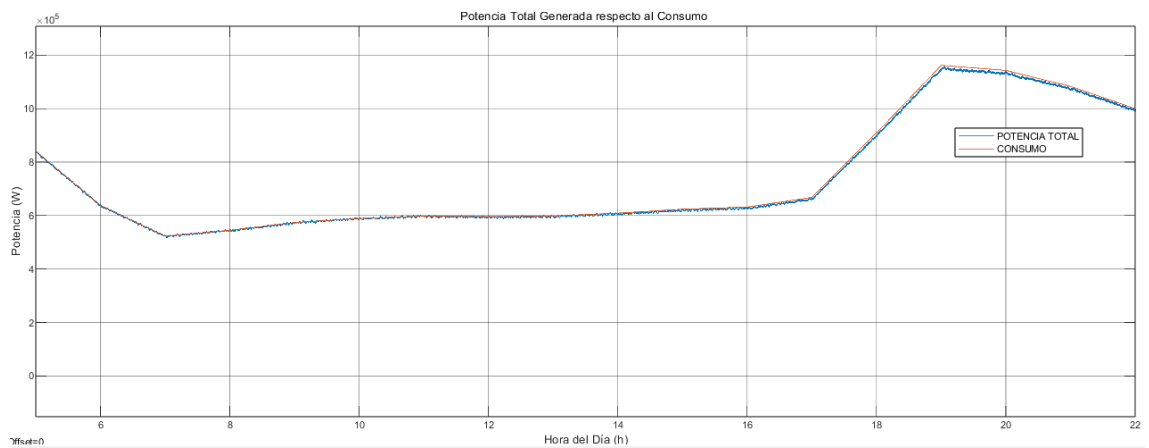


Tabla 13

Métricas de desempeño del sistema: 9 de septiembre de 2023

Métrica de Desempeño	Valor
Índice de Seguimiento de la Referencia	0.0044
Índice de Cobertura Energética	99.36%
Energía Celda de Combustible Utilizada	76.59%
Energía Solar Utilizada	23.41%

Figura 49

Comparación entre la potencia generada por la planta fotovoltaica y la celda de combustible, el 21 de octubre de 2023

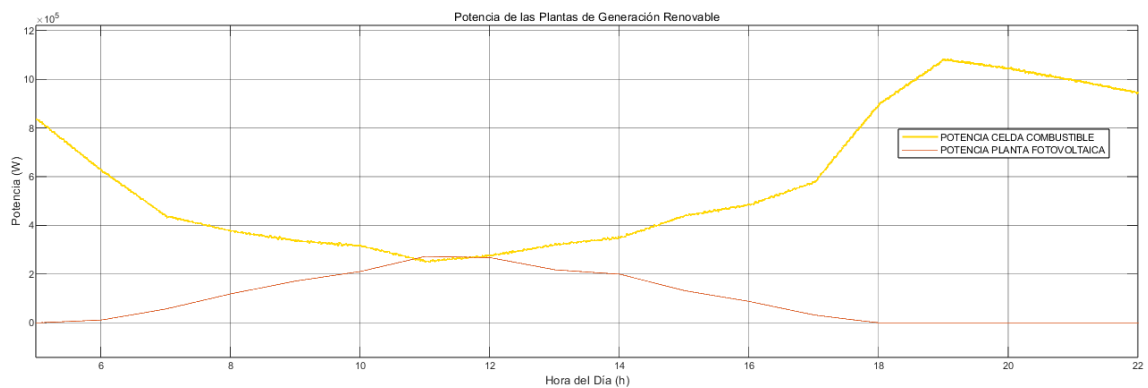


Figura 50

Comparación entre la potencia total generada (señal controlada) y el consumo (referencia), el 21 de octubre de 2023

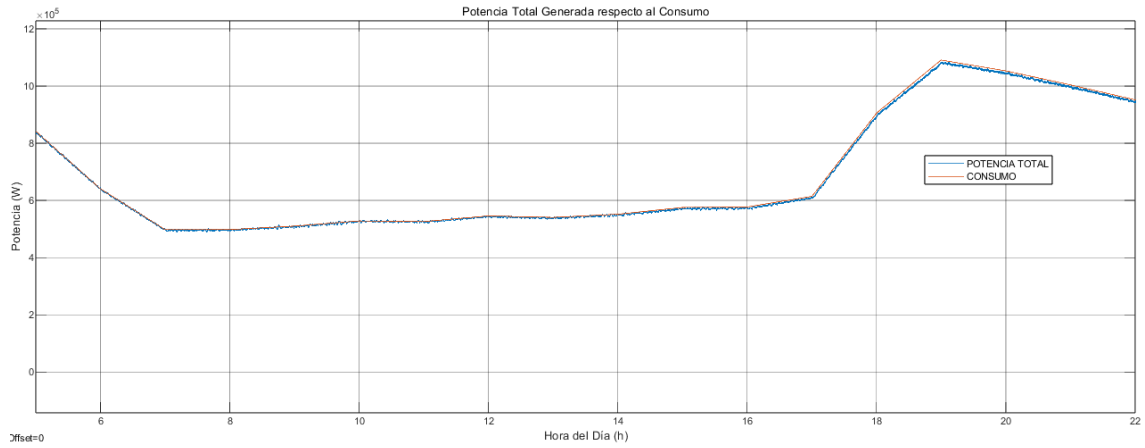


Tabla 14

Métricas de desempeño del sistema: 21 de octubre de 2023

Métrica de Desempeño	Valor
Índice de Seguimiento de la Referencia	0.0043
Índice de Cobertura Energética	99.34%
Energía Celda de Combustible Utilizada	84.53%
Energía Solar Utilizada	15.47%

Figura 51

Comparación entre la potencia generada por la planta fotovoltaica y la celda de combustible, el 1 de noviembre de 2023

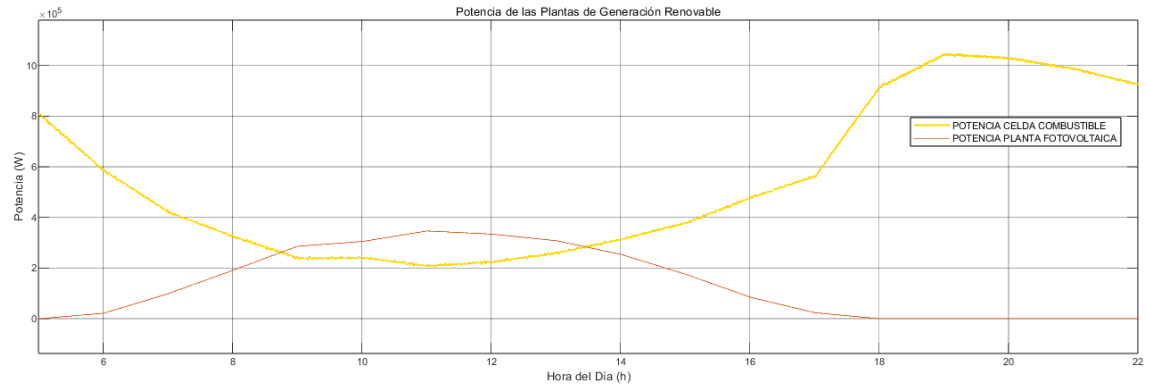


Figura 52

Comparación entre la potencia total generada (señal controlada) y el consumo (referencia), el 1 de noviembre de 2023

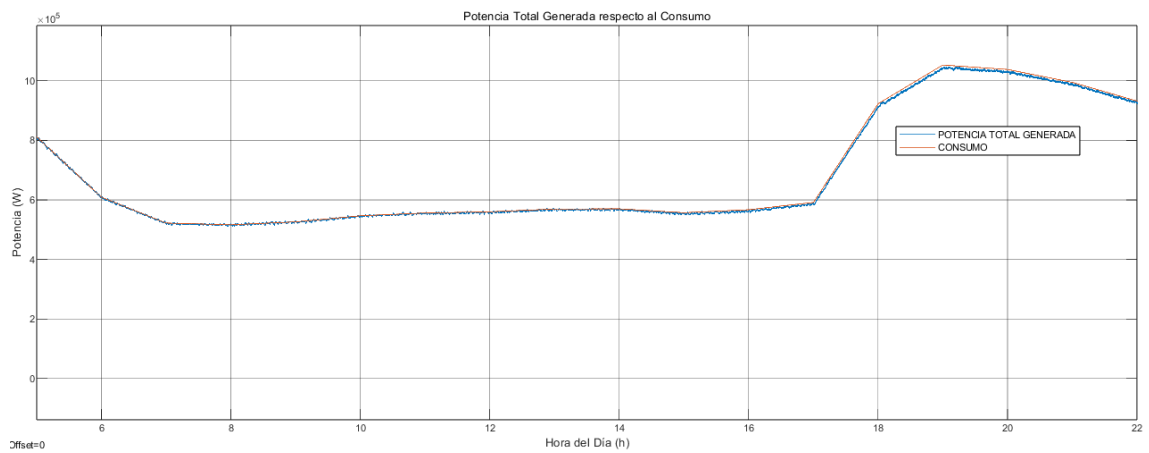


Tabla 15

Métricas de desempeño del sistema: 1 de noviembre de 2023

Métrica de Desempeño	Valor
Índice de Seguimiento de la Referencia	0.0044
Índice de Cobertura Energética	99.38%
Energía Celda de Combustible Utilizada	78.91%
Energía Solar Utilizada	21.09%

Figura 53

Comparación entre la potencia generada por la planta fotovoltaica y la celda de combustible, el 31 de diciembre de 2023

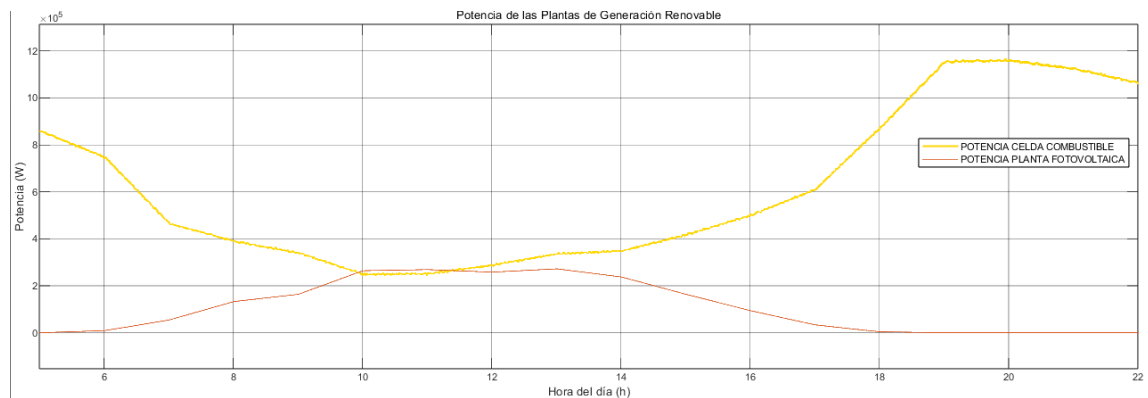


Figura 54

Comparación entre la potencia total generada (señal controlada) y el consumo (referencia), el 31 de diciembre de 2023

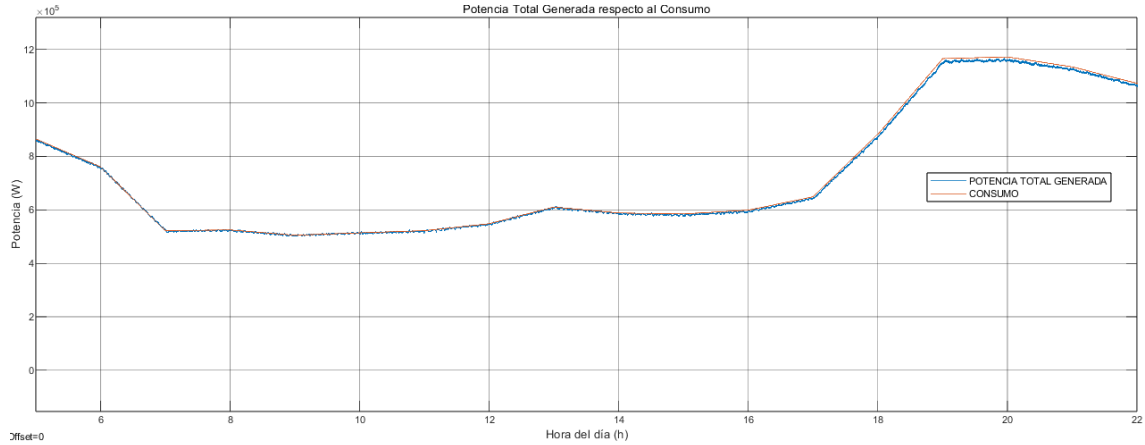


Tabla 16

Métricas de desempeño del sistema: el 31 de diciembre de 2023

Métrica de Desempeño	Valor
Índice de Seguimiento de la Referencia	0.0046
Índice de Cobertura Energética	99.30%
Energía Celda de Combustible Utilizada	83.93%
Energía Solar Utilizada	16.07%

3.4 Análisis de los resultados obtenidos

Para llevar a cabo el análisis de los resultados, se procesaron todas las métricas de desempeño obtenidas, calculando su promedio, desviación estándar, valores mínimos y máximos mediante un código desarrollado y ejecutado en MATLAB, para más detalles sobre la implementación (**Anexo 3**).

Figura 55

Resumen estadístico de las métricas de desempeño del sistema

Resumen de Métricas de Desempeño:	Promedio	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo
Métrica				
"Índice de Seguimiento de la Referencia (ITR)"	0.0043417	0.0001832	0.0039	0.0046
"Índice de Cobertura Energética"	99.365	0.033166	99.3	99.42
"% Energía Celda de Combustible Utilizada"	81.626	3.229	74.81	84.64
"% Energía Solar Utilizada"	18.374	3.229	15.36	25.19

--

Con estos resultados se puede responder a la hipótesis planteada inicialmente, evaluando si un sistema de gestión energética basado en lógica difusa, que integra la energía solar y las celdas de combustible, puede regular de manera eficiente el flujo de generación de energías renovables, garantizando un suministro estable y ajustándose a las fluctuaciones en la producción y el consumo en el cantón Chilla.

El Índice de Seguimiento de la Referencia, con un valor promedio de 0.00434 y una desviación estándar de 0.00018, confirma que el sistema mantiene un control preciso sobre la generación, asegurando un adecuado ajuste entre la producción y el consumo eléctrico.

Por otro lado, el Índice de Cobertura Energética, presenta un promedio de 99.36%, confirma que prácticamente la totalidad de la demanda energética fue cubierta por el sistema de generación renovable.

En cuanto a la distribución de energía, los resultados muestran que la celda de combustible aporta en promedio 81.63% del suministro total, mientras que la energía solar representa un 18.37%, con una variabilidad de hasta 25.19% en los meses con mayor irradiación, esto evidencia que el sistema ajusta la generación en función de la disponibilidad de recursos renovables, priorizando la celda de combustible como fuente principal para garantizar estabilidad.

En general, los datos respaldan la viabilidad del sistema de gestión energética basado en lógica difusa, demostrando su capacidad para integrar fuentes renovables y responder a las fluctuaciones en la producción y el consumo eléctrico en el cantón Chilla.

CONCLUSIONES

Se logró diseñar modelos de simulación que representan la producción intermitente de energía solar y celdas de combustible en el cantón Chilla, considerando tanto los factores climáticos como los patrones de consumo eléctrico residencial, para ello, se implementó un método de interpolación cúbica por splines en MATLAB, lo que permitió reconstruir y suavizar las curvas de irradiancia solar y el consumo eléctrico a partir de datos históricos. Este enfoque permitió obtener curvas continuas y ajustadas que reflejan con precisión la disponibilidad de energía solar y la evolución del consumo eléctrico a lo largo del día, garantizando una base sólida para la integración de fuentes renovables en el sistema de gestión energética.

La evaluación del desempeño del sistema de gestión energética basado en lógica difusa demostró que el controlador mantiene un seguimiento preciso del consumo, el Índice de Seguimiento de la Referencia, con un valor promedio de 0.00434 y una desviación estándar de 0.00018, confirma que el sistema logra regular la generación de energía minimizando desviaciones significativas, además, el análisis de Cobertura Energética presenta un promedio del 99.36% con una variabilidad mínima, lo que confirma la eficiencia del sistema de control implementado para equilibrar la generación y el consumo energético, evitando déficits significativos.

Los resultados obtenidos evidencian que la celda de combustible constituye la principal fuente de generación, aportando en promedio el 81.63% del suministro total, con una desviación estándar de 3.23%, mientras que la energía solar representa un 18.37% en promedio, alcanzando un máximo del 25.19% en periodos de mayor irradiación, esto indica que el sistema logra una integración eficiente de las fuentes renovables, garantizando estabilidad en el suministro eléctrico, sin embargo, se identifican oportunidades de mejora en la diversificación de fuentes de energía. La incorporación de generación eólica o el uso de almacenamiento mediante baterías podrían reducir la dependencia de la celda de combustible, mejorando la sostenibilidad del sistema y optimizando el aprovechamiento de los recursos renovables disponibles en el cantón Chilla.

RECOMENDACIONES

Para analizar un sistema de control con la mayor fidelidad posible a la realidad, es recomendable obtener los datos oficiales de instituciones públicas que gestionan esta información, como CNEL o INAMHI.

En caso de que la señal de control no alcance la señal de referencia, es necesario sintonizar los coeficientes del controlador PID para mejorar su desempeño.

Si el error anterior persiste, se debe verificar que las reglas difusas estén correctamente definidas y estructuradas, asegurando su coherencia con el sistema de control.

REFERENCIAS

- Administration, N. A. (2024). *NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER) / Data Access Viewer (DAV)* . Obtenido de <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Bremner, M. A. (2017). Energy conversion approaches and materials for high-efficiency photovoltaics. *Nature Mater*, 16(1), 23-34.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1038/nmat4676>
- Carlos Bordons, F. G. (2015). Gestión Óptima de la Energía en Microrredes con Generación Renovable. *Universitat Politècnica de València*, 16.
<https://doi.org/10.1016/j.riai.2015.03.001>
- CNEL-EP. (2024). *CNELEP*. Obtenido de Glosario de rubros contenidos en la factura: <https://www.cnelep.gob.ec/glosario/>
- Diego Cuesta, E. T. (2013). Aplicación de la lógica difusa en redes eléctricas inteligentes smart grid. *Vínculos*, 10(2), 10.
<https://doi.org/10.14483/2322939X.6452>
- Fernández, E. M. (2018). *Modelo matemático para un panel solarfotovoltaico*. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Isorna, L. V. (2013). *Gestión de Energía en Sistemas con Fuentes Renovables y Almacenamiento de Energía Basado en Hidrógeno Mediante Control Predictivo*. Universidad de Sevilla.
- León, J. A. (2011). *GESTIÓN INTELIGENTE DE FUENTES DE ENERGÍA ALTERNATIVA MEDIANTE UN SISTEMA BASADO EN LÓGICA DIFUSA*. Universidad del Norte.
- MATLAB. (2024). *2-MW PV Farm Connected to a 25-kV Distribution System*. Obtenido de MATHWORKS: <https://la.mathworks.com/help/sps/ug/2-mw-pv-farm-connected-to-a-25-kv-distribution-system.html>
- MATLAB. (2024). *Solid-Oxide Fuel Cell Connected to Three-Phase Electrical Power System*. Obtenido de MATHWORKS:

<https://la.mathworks.com/help/sps/ug/solid-oxide-fuel-cell-connected-to-three-phase-electrical-power-system.html>

Planas, O. (4 de febrero de 2019). *Irradiancia solar e irradiación solar: diferencias, origen y tipos*. Obtenido de ENERGÍA SOLAR: <https://solar-energia.net/que-es-energia-solar/radiacion-solar/irradiacion-solar>

Senthilnathan Rajendran, V. T. (2023). DC Link Voltage Enhancement in DC Microgrid Using PV Based High Gain Converter with Cascaded Fuzzy Logic Controller. *Multidisciplinary Digital Publishing (MPI)*, 16(9), 28.
<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/en16093928>

Swinburn, F. I. (2013). *DISEÑO DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE DEMANDA BASADO EN LÓGICA DIFUSA PARA MICRO-REDES*. Universidad de Chile.

Villacrés, N. M. (2024). Gestión de la demanda de energía mediante la aplicación del método de PEAK SHAVING en una carga del tipo comercial de la red de distribución eléctrica. *Universidad Politécnica Salesiana - Ecuador*, 11.

Zadeh, L. (1965). Fuzzy sets. *sciencedirect*, 8(3), 338-353.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)

ANEXOS

Anexo 1: Código implementado en Matlab para la generación de la curva de Irradiancia y consumo de energía eléctrica diaria, del cantón Chilla mediante un método de interpolación (Spline Cúbico).

```
clc;
clear all;
%%
% ### CONFIGURACIÓN DE ARCHIVOS ###
% Archivos de datos
filename_irradiancia = 'IRRDATA.csv';
filename_consumo = 'CONSUMO.xlsx';

% ### LECTURA DE DATOS ###
% Leer los datos de Irradiancia
data_irradiancia = readtable(filename_irradiancia, 'HeaderLines', 10);

% Leer los datos del consumo
data_consumo = readtable(filename_consumo, 'Sheet', 'CONSUMO ALIM CHILLA',
'VariableNamingRule', 'preserve');

% ### ASIGNACIÓN DE DATOS ###
% Datos de Irradiancia
year_irr = data_irradiancia(:,1); % Año
month_irr = data_irradiancia(:,2); % Mes
day_irr = data_irradiancia(:,3); % Día
hour_irr = data_irradiancia(:,4); % Hora
irradiancia = data_irradiancia(:,5); % Irradiancia (Wh/m2 por hora)

% Datos de consumo
fecha_hora = datetime(data_consumo(:,1), 'InputFormat', 'yyyy-MM-dd
HH:mm:ss'); % Fecha y hora en formato datetime
consumo_kw = data_consumo(:,2); % Consumo en kW
consumo_W = consumo_kw * 1000; % Convertir el consumo de kW a W

% ### SOLICITAR FECHA ###
anio_deseado = 2023; % Ajustar el año, si es necesario
mes_deseado = input('Mes del 2023: ');
dia_deseado = input('Día del mes: ');

% ### PROCESAR DATOS DE IRRADIANCIA ###
% Convertir la fecha deseada a número serial
fecha_deseada_num = datenum(anio_deseado, mes_deseado, dia_deseado);

% Filtrar los datos correspondientes al día seleccionado
indices_dia_irr = find(datenum(year_irr, month_irr, day_irr) ==
fecha_deseada_num);
horas_actuales_irr = hour_irr(indices_dia_irr); % Horas del día actual
irradiancia_actual = irradiancia(indices_dia_irr); % Irradiancia del día
actual

% Filtrar los valores de irradiancia positiva (mayor a cero)
indices_validos_irr = irradiancia_actual >= 0; % Solo mantener valores > 0
horas_actuales_irr = horas_actuales_irr(indices_validos_irr); % Mantener las
horas correspondientes
```

```

irradiancia_actual = irradiancia_actual(indices_validos_irr); % Mantener los
valores positivos

% ### PROCESAR DATOS DE CONSUMO ###
% Filtrar los datos correspondientes al día seleccionado
fecha_deseada = datetime(año_deseado, mes_deseado, día_deseado);
fecha_deseada = datetime(año_deseado, mes_deseado, día_deseado, 'Format',
'yyyy-MM-dd');
indices_día_consumo = isbetween(fecha_hora, fecha_deseada, fecha_deseada +
days(1));
horas_actuales_consumo = hour(fecha_hora(indices_día_consumo)); % Horas del
día actual
consumo_actual = consumo_W(indices_día_consumo); % Consumo del día actual en
W

% Promediar valores de consumo en horarios duplicados
[horas_unicasconsumo, ~, idx_unicos] = unique(horas_actuales_consumo);
consumo_promediada = accumarray(idx_unicos, consumo_actual, [], @mean);

% ### GRAFICAR AMBOS RESULTADOS ###
figure;
% --- GRAFICA DE IRRADIANCIA ---
if length(horas_actuales_irr) > 1
    % Crear una interpolación spline cúbico para la irradiancia
    horas_estandar_irr = min(horas_actuales_irr):max(horas_actuales_irr); %
Rango de horas válido
    irradiancia_interpolada = spline(horas_actuales_irr, irradiancia_actual,
horas_estandar_irr);

    % Guardar la curva interpolada en una variable en el espacio de trabajo
    irradiancia_diaria = [horas_estandar_irr; irradiancia_interpolada]';
    assignin('base', 'irradiancia_diaria', irradiancia_diaria); % Guardar en
el espacio de trabajo

    % Graficar la curva de irradiancia
    subplot(2, 1, 1); % Crear un subplot para tener dos gráficos en una
ventana
    plot(horas_estandar_irr, irradiancia_interpolada, '-b', 'LineWidth', 2);
    xlabel('Hora del día (h)');
    ylabel('Irradiancia Solar (Wh/m^2)');
    title(['Curva de Irradiancia Solar para el día ',
datestr(fecha_deseada)]);
    grid on;
else
    disp('No hay suficientes datos válidos para generar una curva de
irradiancia en el día seleccionado.');
```

```

end
% --- GRAFICA DE CONSUMO ---
if length(horas_unicasconsumo) > 1
    % Crear una interpolación spline cúbico para el consumo
    horas_estandar_consumo =
min(horas_unicasconsumo):max(horas_unicasconsumo); % Rango de horas válido
    consumo_interpolada = spline(horas_unicasconsumo, consumo_promediada,
horas_estandar_consumo);

    % Guardar la curva interpolada en una variable en el espacio de trabajo
    consumo_diaria = [horas_estandar_consumo; consumo_interpolada]';

```

```

    assignin('base', 'consumo_diario', consumo_diaria); % Guardar en el
espacio de trabajo
    % Graficar la curva de consumo
    subplot(2, 1, 2); % Crear un subplot para la segunda gráfica
    plot(horas_estandar_consumo, consumo_interpolada, '-r', 'LineWidth', 2);
    xlabel('Hora del día (h)');
    ylabel('Consumo Energético (W)');
    title(['Curva del consumo energético para el día ',
datestr(fecha_deseada)]);
    grid on;
else
    disp('No hay suficientes datos válidos para generar una curva de consumo
en el día seleccionado.');
```

Anexo 2: Código implementado en Matlab para el análisis de las métricas de desempeño en las pruebas de simulación.

```

clc;
clear all;
%% Cargar la figura
fig = openfig('31_DICIEMBRE_2023.fig', 'invisible');
% Obtener todos los objetos dentro de la figura
axesObjs = findall(fig, 'Type', 'axes'); % Encuentra todos los ejes
lineObjs = findall(axesObjs, 'Type', 'line'); % Encuentra todas las líneas
% Inicializar arrays para almacenar datos
numSignals = length(lineObjs);
xData = cell(1, numSignals);
yData = cell(1, numSignals);
% Extraer los datos de cada línea en la figura
for i = 1:numSignals
    xData{i} = get(lineObjs(i), 'XData');
    yData{i} = get(lineObjs(i), 'YData');
```

```

end
% Cerrar la figura después de extraer datos
close(fig);
% Guardar los datos en un archivo .MAT
save('datos_figura.mat', 'xData', 'yData');
disp('Datos guardados en datos_figura.mat');
```

```

%% Cargar los datos desde el archivo .MAT
if exist('datos_figura.mat', 'file')
    load('datos_figura.mat');
```

```

% Filtrar las señales en ese intervalo
tiempo_filtrado = tiempo_horas(idx_intervalo);
consumo_filtrada = Consumo(idx_intervalo);
potencia_total_filtrada = potencia_total(idx_intervalo);
potencia_solar_filtrada = potencia_solar(idx_intervalo);
potencia_celda_filtrada = potencia_celda(idx_intervalo);
%% Calcular métricas de desempeño en el intervalo 5-22 horas
% 1. Índice de Seguimiento de la Referencia (ITR)
error_signal = consumo_filtrada - potencia_total_filtrada;
ITR = mean(abs(error_signal) ./ max(consumo_filtrada));
% 2. Porcentaje de Uso de Energía Generada
energia_total_suministrada = trapz(tiempo_filtrado, potencia_total_filtrada);
energia_solar_utilizada = trapz(tiempo_filtrado, potencia_solar_filtrada);
energia_celda_utilizada = trapz(tiempo_filtrado, potencia_celda_filtrada);
porcentaje_energia_solar = (energia_solar_utilizada /
energia_total_suministrada) * 100;
porcentaje_energia_celda = (energia_celda_utilizada /
energia_total_suministrada) * 100;
% 3. Porcentaje del Consumo Cubierto
energia_consumo = trapz(tiempo_filtrado, consumo_filtrada);
porcentaje_consumo_cubierto = (energia_total_suministrada / energia_consumo)
* 100;
%% Mostrar Resultados
fprintf('Métricas de Desempeño (Evaluadas en el intervalo de 5 a 22
horas):\n');
fprintf('1. Índice de Seguimiento de la Referencia (ITR): %.4f\n', ITR);
fprintf('2. %% Energía Solar Utilizada: %.2f%%\n', porcentaje_energia_solar);
fprintf('3. %% Energía Celda de Combustible Utilizada: %.2f%%\n',
porcentaje_energia_celda);
fprintf('4. %% del Consumo Cubierto: %.2f%%\n', porcentaje_consumo_cubierto);

```

Anexo 3: Código implementado en Matlab, utilizado para el procesamiento de las métricas de desempeño, incluyendo el cálculo del promedio, desviación estándar, valores mínimos y máximos.

```

clear; close all;

% Definir los datos de las 12 tablas en matrices
fechas = ["14-Ene-2023", "25-Feb-2023", "09-Mar-2023", "17-Abr-2023", ...
"02-May-2023", "10-Jun-2023", "15-Jul-2023", "27-Ago-2023", ...
"09-Sep-2023", "21-Oct-2023", "01-Nov-2023", "31-Dic-2023"];
ITR = [0.0044, 0.0043, 0.0045, 0.0044, 0.0044, 0.0041, 0.0044, 0.0039,
0.0044, 0.0043, 0.0044, 0.0046];
COBERTURA = [99.39, 99.38, 99.38, 99.35, 99.37, 99.39, 99.32, 99.42, 99.36,
99.34, 99.38, 99.30];
energia_celda = [81.38, 82.34, 83.59, 84.64, 81.60, 83.10, 84.09, 74.81,
76.59, 84.53, 78.91, 83.93];
energia_solar = [18.62, 17.66, 16.41, 15.36, 18.40, 16.90, 15.91, 25.19,
23.41, 15.47, 21.09, 16.07];
% Calcular métricas estadísticas
promedio_ITR = mean(ITR);
desviacion_ITR = std(ITR);
min_ITR = min(ITR);
max_ITR = max(ITR);

```

```

promedio_covertura = mean(COBERTURA);
desviacion_covertura = std(COBERTURA);
min_covertura = min(COBERTURA);
max_covertura = max(COBERTURA);
promedio_energia_celda = mean(energia_celda);
desviacion_energia_celda = std(energia_celda);
min_energia_celda = min(energia_celda);
max_energia_celda = max(energia_celda);
promedio_energia_solar = mean(energia_solar);
desviacion_energia_solar = std(energia_solar);
min_energia_solar = min(energia_solar);
max_energia_solar = max(energia_solar);
% Crear tabla de resumen
tabla_resultados = table(...
    ["Índice de Seguimiento de la Referencia (ITR)"; "Índice de Cobertura
Energética"; ...
    "% Energía Celda de Combustible Utilizada"; "% Energía Solar
Utilizada"], ...
    [promedio_ITR; promedio_covertura; promedio_energia_celda;
promedio_energia_solar], ...
    [desviacion_ITR; desviacion_covertura; desviacion_energia_celda;
desviacion_energia_solar], ...
    [min_ITR; min_covertura; min_energia_celda; min_energia_solar], ...
    [max_ITR; max_covertura; max_energia_celda; max_energia_solar], ...
    'VariableNames', {'Métrica', 'Promedio', 'Desviación Estándar', 'Mínimo',
'Máximo'});
% Mostrar tabla en la consola
disp('Resumen de Métricas de Desempeño:');
disp(tabla_resultados);

```