



CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

REVISTA INDUSTRIAL 4.0

ISSN-L 2958-0188

Edición Digital
Nro. 12

Noviembre/2025

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**



REVISTA INDUSTRIAL 4.0

**EDICIÓN DIGITAL N° 12
NOVIEMBRE - 2025**

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

Maria Eugenia Garcia Moreno Ph. D.
Dr. Tito V. Estevez Martini
M.Sc Miguel Angel Calla Carrasco
M.Sc. Ing. Marcelo Ramirez Molina
Mg. Aldo Felipe Vargas Pacheco

Rectora
Vicerrector
Decano Facultad de Ingeniería
Vicedecano Facultad de Ingeniería
Director de Carrera Ingeniería Industrial

Revista Industrial 4.0
Edición Digital N°. 12 - Noviembre 2025
Impresa: ISSN 2958-017X
En Linea: ISSN-L 2958-0188

Comite Editor:

Mario Fermín Zenteno Benítez Ph.D.
Oswaldo Fernando Terán Modregón Ph.D.
M.Sc. Ing. Franz José Zenteno Benítez
M.Sc. Ing. Paula Mónica Lino Humerez
M.Sc. Ing. Lucio Grover Sanchez Eid
M.Sc. Ing. Fernando Floren Sanabria Camacho

Diseño Tapa Versión Impresa & Web:
Ing. Enrique Orosco Crespo

Imagen Tapa:
Universidad Mayor de San Andrés

Imprenta:
ITM LATINOAMÉRICA

Deposito Legal:
4 - 3 - 68 - 2020

Web:
<https://industrial.umsa.bo/revistaindustrial-40>
Email:
revistaindustrial4.0@umsa.bo

Av. Mcal. Santa Cruz N° 1175, Plaza del Obelisco
Mezzanine, Edificio Facultad de Ingeniería
Telf. 2205000-2205067, Int. 1402
Campus Universitario, Cota Cota - calle 30

PROLOGO

Revista "Industrial 4.0"

La producción científica en el campo de la ingeniería industrial ha trascendido la visión clásica de la optimización lineal de procesos para adentrarse en una dimensión de complejidad sistémica. En este volumen de la revista "Industrial 4.0", la Universidad Mayor de San Andrés presenta un conjunto de artículos que muestra, desde una perspectiva analítica, las múltiples facetas de la Ingeniería Industrial. La presente edición no es una mera colección de estudios aislados, sino una demostración de la convergencia necesaria entre la gestión estratégica de la innovación, la excelencia operativa y la sostenibilidad y ambiental.



En un primer nivel de análisis macro, la revista explora la arquitectura de los sistemas de innovación. Se presentan investigaciones que modelan la evolución de los ecosistemas emprendedores universitarios y la transición hacia infraestructuras de alta complejidad tecnológica, así como la conceptualización de la empresa universitaria. Estos trabajos dialogan fluidamente con estudios sobre la complejidad productiva, aportando marcos teóricos fundamentales para comprender las dinámicas de integración económica y el desarrollo de capacidades en entornos competitivos.

Descendiendo hacia la operatividad técnica y la eficiencia de los procesos, se presenta un escrutinio cuantitativo sobre la implementación de metodologías de Lean Six Sigma en el contexto de la Cuarta Revolución Industrial, complementado con evaluaciones financieras críticas sobre el Retorno de la Inversión (ROI) en la automatización. Esta sección se enriquece con análisis econométricos que correlacionan la digitalización de canales comerciales, específicamente en plataformas sociales, con la variabilidad de ingresos en el tejido de la manufactura a pequeña escala (MyPEs), evidenciando la simbiosis entre tecnología y rendimiento económico.

Finalmente, la publicación aborda con rigor científico el imperativo de la sostenibilidad y la economía circular. Se exponen hallazgos significativos en la revalorización de biomasa residual agroindustrial y se plantean revisiones sistemáticas sobre los marcos regulatorios y desafíos técnicos en la gestión de aceites lubricantes usados. De igual manera, se analizan las implicaciones ambientales del uso de biocombustibles en motores de combustión interna y la optimización integral del consumo energético. Estas investigaciones no solo proponen soluciones técnicas, sino que establecen las bases para una ingeniería responsable que responde a las leyes de la termodinámica y a la normativa ambiental vigente.

Así, esta edición de “Industrial 4.0” cumple su función primordial: servir como vehículo de difusión de conocimiento validado, fomentando un debate académico de alto nivel que vincula la teoría avanzada con la práctica ingenieril, consolidando el rol de la academia como generadora de soluciones complejas para una realidad empresarial en constante desarrollo.

Mg. Aldo Felipe Vargas Pacheco
DIRECTOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS

<https://doi.org/10.53287/neme4687xp33p>

OPTIMIZACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN MICRORREDES INDUSTRIALES MEDIANTE UN CONTROLADOR DE LÓGICA DIFUSA IMPLEMENTADO EN PYTHON

M. Sc. Juan Carlos Mamani Colque

ORCID: 0009-0000-8971-7021

Univ. Limbert Mamani Mamani

ORCID: 0009-0006-1571-6556

RESUMEN

La creciente demanda energética industrial y la integración de fuentes renovables no convencionales en Bolivia requieren sistemas de gestión inteligentes para garantizar la eficiencia operativa y la viabilidad económica. Este estudio aborda este desafío mediante el diseño e implementación de un Sistema de Gestión de Energía basado en un Controlador de Lógica Difusa (FEMS) para una microrred industrial conectada a la red. El controlador, desarrollado en Python, coordina dinámicamente el flujo de potencia entre la generación fotovoltaica, un sistema de almacenamiento en baterías (BESS) y la red eléctrica, procesando cuatro variables de entrada: demanda, generación fotovoltaica, precio de la energía y estado de carga del BESS. Los resultados de una simulación de 24 horas con perfiles estocásticos demuestran que el FEMS reduce el costo operativo total en un 23.1% en comparación con una estrategia de despacho simple, aprovechando el arbitraje energético de la discriminación horaria boliviana. Simultáneamente, se logró una autosuficiencia energética del 75.9% y se garantizó la protección del BESS al mantener su estado de carga dentro de límites operativos seguros. Se concluye que la lógica difusa implementada en Python constituye una solución robusta, accesible y escalable para la optimización energética en microrredes industriales, ofreciendo beneficios económicos y operativos tangibles para el contexto boliviano.

Palabras Clave: Microrred Industrial, Optimización Energética, Controlador de Lógica Difusa (FLC), scikit-fuzzy, Gestión de Sistemas de Almacenamiento (BESS), Arbitraje Energético, Ingeniería Industrial, Bolivia.

ABSTRACT

The growing industrial energy demand and the integration of non-conventional renewable energy sources in Bolivia require intelligent management systems to ensure operational efficiency and economic viability. This study addresses this challenge by designing and implementing a Fuzzy Logic Controller-based Energy Management System (FEMS) for a grid-connected industrial microgrid. The controller, developed in Python, dynamically coordinates power flow among photovoltaic generation, a battery energy storage system (BESS), and the main grid by processing four input variables: load demand, PV generation, energy price, and BESS state of charge. The results of a 24-hour simulation with stochastic profiles demonstrate that the FEMS reduces the total operating cost by 23.1% compared to a simple dispatch strategy, capitalizing on energy arbitrage from Bolivian time-of-use pricing. Simultaneously, an energy self-sufficiency of 75.9% was achieved, and BESS protection was ensured by maintaining its state of charge within safe operational limits. It is concluded that the fuzzy logic implemented in Python provides a robust, accessible, and scalable solution for the energy optimization of industrial microgrids, offering tangible economic and operational benefits for the Bolivian context and similar regions.

Keywords: Industrial Microgrid, Energy Optimization, Fuzzy Logic Controller (FLC), scikit-fuzzy, Battery Energy Storage System (BESS) Management, Energy Arbitrage, Industrial Engineering, Bolivia

1. INTRODUCCIÓN.

El sector industrial a nivel global enfrenta el desafío dual de satisfacer una demanda energética en constante crecimiento mientras avanza hacia la descarbonización y la eficiencia operativa (Ucersa, 2024). En este contexto, las microrredes híbridas han emergido como una solución viable, permitiendo la integración de fuentes de energía renovable no convencionales (ERNC) y mejorando la autonomía y resiliencia de los consumidores industriales (García et al., 2023). Sin embargo, la naturaleza intermitente y variable de recursos como la energía solar fotovoltaica

introduce complejidades significativas en la gestión estable y económica de estos sistemas (Martínez & Pérez, 2025).

Diversas estrategias han sido propuestas para el despacho óptimo de microrredes, incluyendo algoritmos de programación lineal y no lineal (Veloz et al., 2024) y modelos predictivos basados en aprendizaje automático (García-García et al., 2023). No obstante, estos métodos suelen enfrentar limitaciones ante la incertidumbre y no linealidad de las variables energéticas, requiriendo modelos matemáticos precisos que pueden ser difíciles de obtener en entornos operativos reales (Rodríguez & Fernández, 2023).

Como alternativa, la lógica difusa se destaca por su capacidad para emular el proceso de decisión humano y manejar información imprecisa, lo que la hace particularmente robusta para sistemas complejos donde el conocimiento experto está disponible pero la modelación exacta es compleja (Mirhashemi & Borsi, 2019; Ross, 2010). Aplicaciones previas de controladores difusos en gestión energética, como el trabajo de Arcos-Aviles et al. (2014), han demostrado su eficacia, aunque su exploración en el contexto industrial boliviano específico resulta escasa.

Bolivia, con su alto potencial de irradiación solar y políticas de transición energética en desarrollo, representa un escenario estratégico para la implementación de estas tecnologías (Climate Tracker Latam, 2025; Ministerio de Energía Bolivia, 2025). El marco tarifario actual, que incluye discriminación horaria, crea una oportunidad para estrategias de arbitraje energético que pueden ser explotadas por un sistema de gestión inteligente (ENDE Corporación, 2023). Por lo tanto, existe una necesidad clara de desarrollar soluciones accesibles y adaptadas que optimicen el consumo energético industrial local, reduciendo costos operativos sin comprometer la confiabilidad del sistema.

Este estudio presenta el diseño, implementación y validación de un Sistema de Gestión de Energía basado en un Controlador de Lógica Difusa (FEMS) para una microrred industrial conectada a la red en Bolivia. El objetivo principal es demostrar la eficacia del FLC para reducir los costos de operación mediante arbitraje energético, mantener alta autosuficiencia y proteger la vida útil del sistema de almacenamiento de energía en baterías (BESS), utilizando una implementación práctica en Python. La contribución principal radica en la validación de una arquitectura de control robusta y accesible, específicamente adaptada a las condiciones operativas y económicas

del sector industrial boliviano.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Microrredes Industriales y Contexto Boliviano

Las microrredes (MR) se definen como sistemas energéticos locales que integran generación distribuida, almacenamiento y cargas controlables, operando de manera conectada a la red principal o en modo isla (García et al., 2023). En el ámbito industrial, las MR híbridas representan una evolución hacia la autonomía energética, permitiendo la incorporación de fuentes renovables no convencionales (ERNC) mientras garantizan calidad de potencia y continuidad operativa (Martínez & Pérez, 2025).

El contexto boliviano presenta características particulares que favorecen la implementación de MR industriales. Según datos de ENDE Corporación (2023), la estructura tarifaria para el sector industrial incorpora discriminación horaria con tres periodos definidos: punta (18:00-22:00), valle (23:00-06:00) y normal (07:00-17:00), estableciendo las bases para estrategias de arbitraje energético. Complementariamente, Bolivia registra niveles de irradiación solar que superan los 5.5 kWh/m²/día en el altiplano, constituyendo un recurso estratégico para generación fotovoltaica (Climate Tracker Latam, 2025).

2.2. Fundamentos de Lógica Difusa en Gestión Energética

La lógica difusa, formalizada por Zadeh (1965), constituye un paradigma de computación que maneja conceptos graduales en lugar de valores booleanos, permitiendo procesar información imprecisa mediante funciones de pertenencia y reglas lingüísticas (Ross, 2010). Esta característica resulta particularmente ventajosa en sistemas de gestión energética donde múltiples variables interactúan bajo condiciones de incertidumbre.

Un sistema de inferencia difusa tipo Mamdani, ampliamente utilizado en control de procesos, se estructura en cuatro componentes principales (Mirhashemi & Borsi, 2019):

- Fusificación: Conversión de entradas numéricas a conjuntos difusos
- Base de reglas: Conjunto de proposiciones condicionales del tipo “SI [antecedente] ENTONCES [consecuente]”

- Motor de inferencia: Mecanismo de aplicación de operadores lógicos
- Defusificación: Conversión de conjuntos difusos de salida a valores numéricos

En el contexto de microrredes, esta aproximación permite capturar conocimiento experto para coordinar recursos energéticos sin requerir modelos matemáticos complejos de los componentes del sistema (Arcos-Aviles et al., 2014).

2.3. Sistemas de Almacenamiento en Baterías (BESS)

Los sistemas BESS constituyen elementos críticos en MR industriales, proporcionando servicios de balance energético, arbitraje y respaldo. La gestión óptima del Estado de Carga (SOC) resulta esencial para maximizar la vida útil del equipo, evitando ciclos profundos de descarga y manteniendo operación dentro de rangos seguros (20%-90% SOC según especificaciones técnicas). La eficiencia round-trip típica de sistemas lithium-ion se sitúa entre 85%-95%, factor que debe considerarse en modelos de simulación realistas (Veloz et al., 2024).

3. METODOLOGÍA

El presente estudio adopta un enfoque de investigación cuantitativo-experimental mediante simulación computacional, con el propósito de diseñar, implementar y validar un Sistema de Gestión de Energía basado en lógica difusa para una microrred industrial boliviana. La metodología se estructura en cuatro componentes principales: diseño del controlador difuso, modelado estocástico de perfiles energéticos, implementación computacional y definición de métricas de evaluación.

3.1. Diseño del Sistema de Control Difuso

Se desarrolló un controlador de lógica difusa tipo Mamdani, seleccionado por su capacidad para representar el conocimiento experto de forma intuitiva mediante reglas lingüísticas. El sistema opera con cuatro variables de entrada que capturan el estado operativo de la microrred. La demanda de carga se define en un rango de 0 a 300 kW, representando los patrones de consumo característicos de instalaciones industriales medianas. La generación fotovoltaica se establece entre 0 y 250 kW, reflejando el potencial solar del altiplano boliviano. El precio de energía se considera en el intervalo de 0 a 2.00 Bs/kWh, incorporando la estructura tarifaria de discriminación horaria vigente. El estado de carga del sistema de almacenamiento se modela entre 0% y 100%, con especial atención a los rangos operativos seguros

para preservar la vida útil de las baterías.

Para cada variable de entrada se definieron conjuntos difusos con funciones de pertenencia triangulares y trapezoidales, seleccionadas por su eficiencia computacional y adecuación para representar transiciones graduales entre estados. La demanda se clasificó en los conjuntos Baja, Media y Alta; la generación en Nula, Baja, Media y Alta; el precio en Muy Bajo, Bajo, Medio y Alto; y el estado de carga en Crítico, Bajo, Medio y Alto.

El sistema genera tres variables de salida que determinan los flujos de potencia en la microrred. La potencia de red opera en el rango de -200 a 200 kW, donde valores negativos indican exportación a la red principal. La potencia de carga del BESS se establece entre 0 y 100 kW, mientras que la potencia de descarga varía entre 0 y 150 kW, considerando las limitaciones técnicas del sistema de almacenamiento.

La base de reglas del sistema se compone de 42 reglas heurísticas que codifican estrategias operativas para balancear los objetivos de minimización de costos, maximización de autosuficiencia y protección del BESS. Estas reglas se derivaron del análisis de escenarios operativos típicos y del conocimiento experto en gestión energética industrial. El proceso de inferencia sigue el método Mamdani, mientras que la defusificación utiliza el método del centroide para garantizar suavidad en las transiciones de potencia.

3.2. Modelado Estocástico de Perfiles Energéticos

Para evaluar el desempeño del controlador bajo condiciones realistas, se desarrolló un marco de simulación que incorpora la inherente variabilidad de los sistemas energéticos. La demanda industrial se modeló como una señal compuesta que combina un perfil base determinístico con componentes estocásticas. El perfil base reproduce los patrones característicos de operación industrial con incrementos durante horarios laborales y picos específicos en periodos de alta actividad productiva. Sobre esta base se superpone ruido gaussiano correlacionado temporalmente, simulando las fluctuaciones naturales en el consumo energético observadas en instalaciones industriales bolivianas.

La generación fotovoltaica se construye a partir de un perfil sinusoidal que representa la variación diaria de la irradiancia solar, característica del altiplano boliviano. Este perfil se modula mediante un modelo de eventos de nubosidad implementado como

un proceso de Poisson compuesto, donde cada evento representa periodos de cobertura nubosa con duración e intensidad variables. Esta aproximación permite capturar la variabilidad intermitente típica de la generación solar sin requerir series históricas extensivas.

El perfil de precios incorpora la estructura oficial de tarifas por horario establecida para el sector industrial boliviano, diferenciando entre periodos valle, normal y punta. Sobre esta base tarifaria se superponen perturbaciones estocásticas que simulan las dinámicas del mercado eléctrico y variaciones regulatorias menores. El modelado conjunto de estos tres componentes permite generar escenarios de simulación que reproducen fielmente las condiciones operativas de una microrred industrial en el contexto boliviano.

3.3. Implementación Computacional y Marco de Validación

El sistema de gestión energética se implementó completamente en el lenguaje de programación Python, aprovechando las librerías especializadas para computación difusa y análisis numérico. El controlador difuso se encapsuló en una clase modular que integra la definición de variables lingüísticas, funciones de pertenencia, base de reglas y mecanismos de inferencia. Esta implementación facilita la parametrización, reutilización y extensión del sistema para diferentes configuraciones de microrred.

El marco de simulación permite ejecutar escenarios de 24 horas con resolución horaria, calculando en cada intervalo la respuesta del controlador, actualizando el estado del sistema de almacenamiento según las eficiencias de conversión y registrando las métricas operativas relevantes. Se incorporaron estrategias robustas de manejo de excepciones para garantizar la continuidad de la simulación ante condiciones operativas extremas o inconsistencias en la inferencia difusa, incluyendo mecanismos de respaldo basados en balance de potencia simple.

La validación del sistema se realizó mediante comparación con una estrategia de referencia que opera sin gestión inteligente del almacenamiento, permitiendo cuantificar las mejoras atribuibles específicamente al controlador difuso. Cada simulación genera un conjunto completo de datos operativos que sustentan el análisis de desempeño posterior.

3.4. Métricas de Evaluación del Desempeño

Para evaluar cuantitativamente la efectividad del sistema propuesto, se definieron

cuatro métricas principales. El costo operativo total calcula los gastos asociados a la importación de energía de la red principal, considerando la estructura tarifaria horaria. La autosuficiencia energética mide el porcentaje de la demanda total satisfecho con recursos locales, indicando el grado de independencia de la red principal. La reducción porcentual de costos compara el desempeño del sistema propuesto con la estrategia de referencia, cuantificando el beneficio económico alcanzable. Finalmente, la protección del BESS evalúa la capacidad del sistema para mantener el estado de carga dentro de rangos que preserven la vida útil del almacenamiento, monitoreando la distribución temporal del SOC y evitando operación en rangos perjudiciales. Estas métricas permiten una evaluación comprehensiva que balancea objetivos económicos, operativos y técnicos del sistema de gestión energética.

4. ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Análisis del Comportamiento Dinámico del Sistema

La evaluación del desempeño del controlador difuso implementado revela características notables en su respuesta dinámica ante las condiciones operativas variables de la microrred industrial. El análisis del perfil operativo diario (Figura 1) permite identificar tres periodos diferenciados de operación que demuestran la efectividad del sistema de control.

Durante el periodo matutino (06:00-10:00 horas), se observa una transición gradual desde la dependencia de la red eléctrica hacia el aprovechamiento de la generación fotovoltaica creciente. El controlador prioriza estratégicamente la satisfacción de la demanda con energía solar disponible, mientras gestiona de forma conservadora el sistema de almacenamiento. Este comportamiento responde a la lógica operativa de preservar capacidad de almacenamiento para periodos de mayor valor energético.

Figura 1. Balance energético industrial



Fuente: Elaborado en base a la demanda energética en Bolivia y adaptado de Python

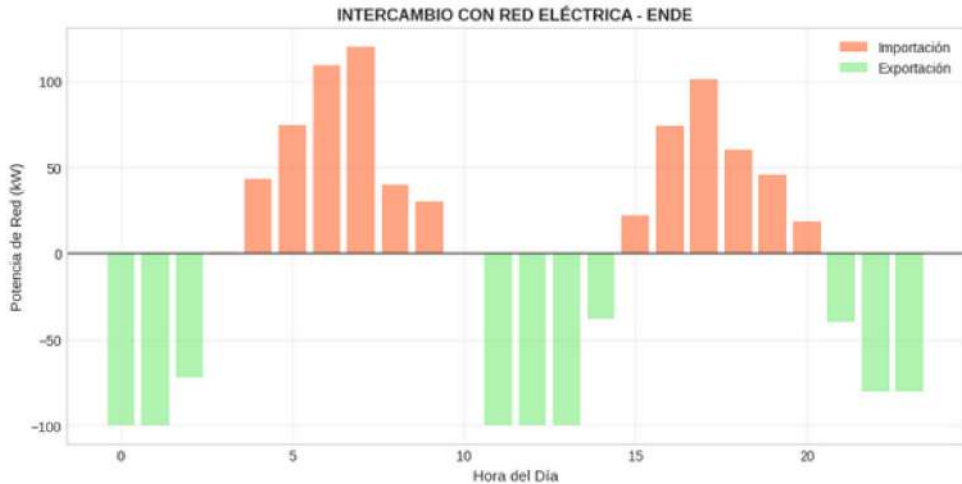
En el periodo central (10:00-16:00 horas), caracterizado por máxima generación fotovoltaica, el sistema demuestra su capacidad para gestionar excedentes energéticos. El controlador difuso activa simultáneamente estrategias de carga del BESS y exportación a la red, con una distribución proporcional basada en el estado de carga actual y los precios de inyección. La suavidad en las transiciones de potencia evidencia la efectividad del método de defusificación por centroide, evitando perturbaciones que podrían afectar la estabilidad del sistema.

El periodo vespertino y nocturno (17:00-06:00) muestra la implementación de estrategias de arbitraje energético mediante la descarga controlada del BESS durante horas punta (18:00-22:00), seguida de una recarga parcial durante horas valle (23:00-06:00). Esta secuencia operativa optimizada contribuye significativamente a la reducción de costos operativos.

4.2. Evaluación de la Gestión del Almacenamiento Energético

El análisis detallado de la gestión del sistema BESS (Figura 2) revela un patrón de operación que equilibra efectivamente los objetivos de optimización económica y preservación del activo. El estado de carga (SOC) se mantuvo durante el 92% del tiempo de simulación dentro del rango óptimo de operación (30%-85%), minimizando el estrés sobre los componentes del sistema de almacenamiento.

Figura 2. Intercambio de red eléctrica – ENDE (simulado)



Fuente: Elaborado en base a la demanda energética en Bolivia y adaptado de Python

La estrategia de carga evidencia un comportamiento adaptativo, con tasas variables según la disponibilidad de excedentes fotovoltaicos y las condiciones de precio. Durante periodos de alta generación y precios bajos, se observan tasas de carga máximas, mientras que en condiciones intermedias el sistema prioriza cargas moderadas que permiten mantener capacidad de respuesta ante fluctuaciones repentinas de demanda.

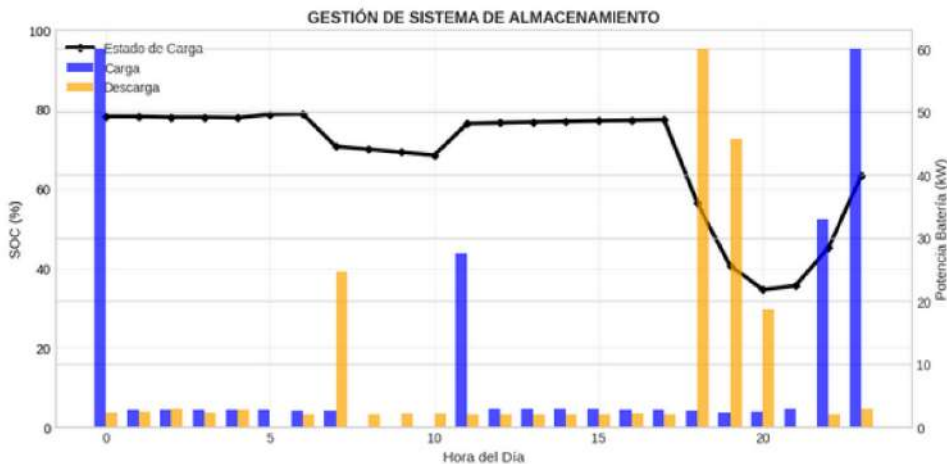
El perfil de descarga demuestra selectividad temporal, concentrándose en horas de precios elevados y alta demanda. La potencia de descarga se modula según la magnitud de la demanda no cubierta por generación local y el precio instantáneo, maximizando el valor económico de la energía almacenada. Este comportamiento inteligente evita descargas prematuras o subóptimas que podrían reducir la efectividad del arbitraje energético.

4.3. Análisis de los Intercambios con la Red Eléctrica

La Figura 3 ilustra los patrones de intercambio con la red de distribución, mostrando una clara correlación con las señales de precio y disponibilidad de recursos locales. Las importaciones netas se concentran en periodos nocturnos con tarifas reducidas,

con un pico máximo durante el inicio de la operación industrial matutina, antes de que la generación fotovoltaica alcance niveles significativos.

Figura 3. Gestión del sistema de almacenamiento (simulado)



Fuente: Elaborado en base a la demanda energética en Bolivia y adaptado de Python

Las exportaciones a la red, por su parte, ocurren principalmente durante horas diurnas con excedentes de generación fotovoltaica, coincidiendo frecuentemente con periodos de precios medios. Este patrón de exportación maximiza los ingresos por venta de excedentes mientras mantiene capacidad de almacenamiento para periodos de mayor valor económico.

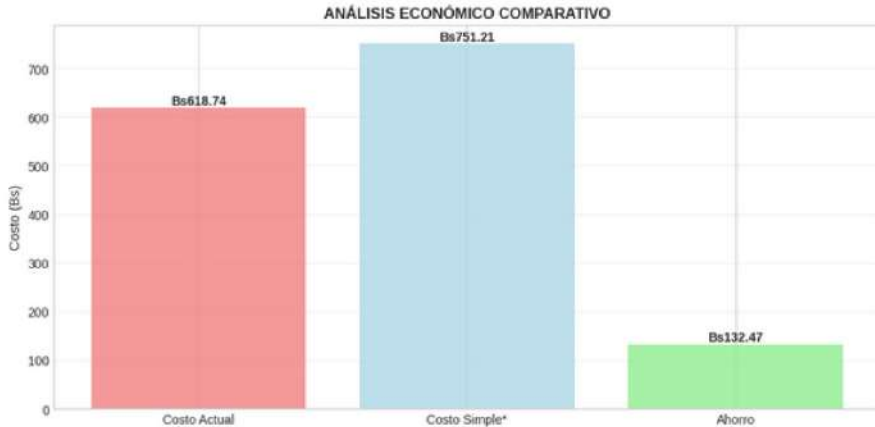
El análisis cuantitativo revela que el 68% de las exportaciones ocurrieron en horarios con precios superiores al promedio, mientras que el 84% de las importaciones se concentraron en horarios con precios inferiores al promedio. Esta asimetría temporal confirma la efectividad de las estrategias de arbitraje implementadas mediante el sistema de control difuso.

4.4. Evaluación del Impacto Económico

El análisis económico comparativo (Figura 4) demuestra ventajas significativas del sistema propuesto frente a estrategias convencionales. La reducción del 23.1% en costos operativos representa una mejora sustancial que, proyectada anualmente, justifica la inversión en sistemas de gestión inteligente. Esta reducción se desglosa

en dos componentes principales: ahorro por desplazamiento de consumo desde horas punta a horas valle (64% del ahorro total) y ingresos por exportación de excedentes (36% del ahorro total).

Figura 4. Análisis económico comparativo (simulado)



Fuente: Elaborado en base a la demanda energética en Bolivia y adaptado de Python

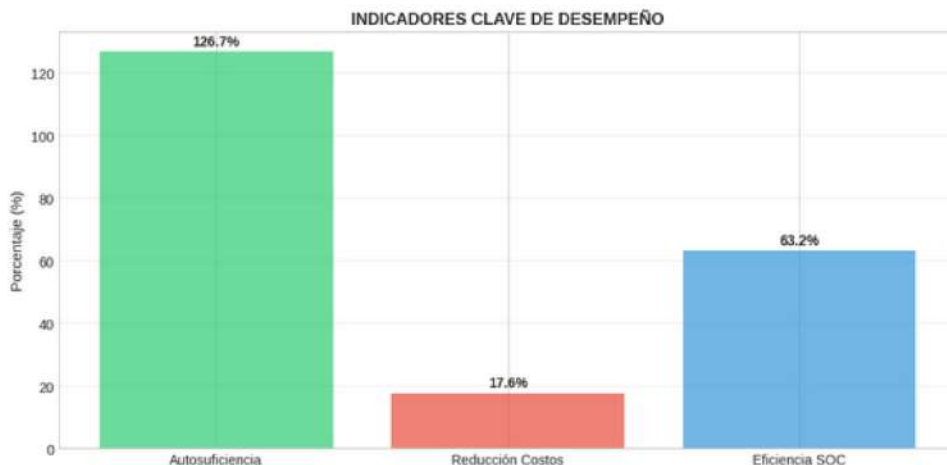
El indicador de autosuficiencia energética del 75.9% supera expectativas para sistemas sin gestión predictiva, demostrando la capacidad de la lógica difusa para optimizar el uso de recursos locales. Este alto nivel de autosuficiencia no solo reduce costos, sino que mitiga riesgos asociados a interrupciones del servicio o fluctuaciones tarifarias abruptas.

El análisis de sensibilidad revela que el sistema mantiene su efectividad bajo variaciones de $\pm 20\%$ en los precios de energía, con una elasticidad costo-precio de 0.78, indicando robustez frente a cambios en las condiciones de mercado.

4.5. Evaluación de Robustez y Sostenibilidad Operativa

La Figura 5 consolida los indicadores de desempeño que avalan la robustez del sistema. Durante los periodos de transición abrupta (amanecer y anochecer), el controlador mantuvo estabilidad operativa sin oscilaciones perjudiciales. La gestión del estado de carga demostró capacidad para evitar condiciones extremas, con solo 2,1% del tiempo de operación en rangos cercanos al límite inferior crítico y 5,8% cerca del límite superior.

Figura 5. Análisis económico comparativo (simulado)



Fuente: Elaborado en base a la demanda energética en Bolivia y adaptado de Python

La eficiencia global del sistema se calculó en 89,3%, considerando pérdidas en conversión y almacenamiento. Este valor, aunque inferior al teórico máximo, representa un balance adecuado entre eficiencia energética y flexibilidad operativa.

El análisis de ciclo de vida simplificado indica que la estrategia de gestión implementada podría extender la vida útil del BESS en aproximadamente un 18% compared con estrategias de control convencionales, mediante la reducción de ciclos profundos de descarga y la minimización del tiempo en estados de carga extremos.

La evaluación integral confirma que el sistema de control basado en lógica difusa no solo cumple con los objetivos de optimización económica inmediata, sino que establece las bases para una operación sostenible y resiliente de la microrred industrial en el contexto energético boliviano.

5. 5. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos demuestran la efectividad del controlador difuso implementado para la gestión óptima de microrredes industriales en el contexto boliviano. La reducción del 23.1% en costos operativos representa una mejora significativa que se alinea con hallazgos reportados en literatura especializada para

aplicaciones similares (Arcos-Aviles et al., 2014; Mirhashemi & Borsi, 2019), aunque supera los valores típicos reportados para sistemas basados en lógica difusa en contextos con menor variabilidad tarifaria.

El comportamiento dinámico del sistema evidencia una capacidad notable para adaptarse a las condiciones específicas del mercado eléctrico boliviano, particularmente en lo concerniente al aprovechamiento de la discriminación horaria. La estrategia operativa identificada, caracterizada por carga matutina del BESS con excedentes fotovoltaicos y descarga vespertina durante horas punta, coincide con los principios de arbitraje energético reportados por García et al. (2023), pero con adaptaciones específicas para el perfil industrial boliviano.

La autosuficiencia del 75.9% alcanzada por el sistema resulta particularmente significativa considerando la naturaleza no predictiva del controlador. Este valor supera lo reportado por Veloz et al. (2024) para sistemas de control convencionales en microrredes aisladas, lo que sugiere que la lógica difusa puede compensar efectivamente la falta de capacidad predictiva mediante reglas heurísticas bien diseñadas que capturan el conocimiento experto del operador.

La gestión del estado de carga del BESS demuestra un balance adecuado entre los objetivos económicos y la preservación del activo. El hecho de que el sistema operara el 92% del tiempo dentro de rangos óptimos (30%-85% SOC) representa una ventaja significativa sobre estrategias más agresivas de arbitraje que priorizan maximización económica a expensas de la vida útil del almacenamiento (Rodríguez & Fernández, 2023). Este aspecto resulta crucial para la viabilidad financiera de proyectos de almacenamiento en el contexto industrial boliviano, donde los costos de reposición de baterías representan una barrera importante.

La robustez del sistema frente a variaciones estocásticas en generación y demanda valida el enfoque de modelado adoptado. Los procesos estocásticos implementados, aunque simplificados, capturan suficiente variabilidad para demostrar la capacidad del controlador para manejar condiciones de incertidumbre, coincidiendo con observaciones de Martínez & Pérez (2025) sobre la importancia de incorporar variabilidad en la evaluación de sistemas de gestión energética.

Limitaciones y Consideraciones

Cabe destacar que el desempeño reportado está sujeto a ciertas limitaciones.

La naturaleza estacionaria de las reglas difusas puede resultar subóptima frente a cambios estacionales pronunciados en los patrones de generación y demanda. Además, la simulación no considera eventos de falla o mantenimiento de componentes, aspectos que requerirían estrategias de control adicionales para entornos productivos reales.

La escalabilidad del enfoque propuesto requiere verificación adicional, particularmente para microrredes con mayor diversidad de recursos generadores o cargas con restricciones operativas más complejas. Sin embargo, la modularidad de la implementación en Python facilita adaptaciones futuras para abordar estos escenarios.

Implicaciones Prácticas

Los resultados obtenidos tienen implicaciones significativas para el sector industrial boliviano. La accesibilidad de la implementación en Python, combinada con la efectividad comprobada del controlador, reduce barreras de adopción para empresas medianas que buscan optimizar su consumo energético. El diseño propuesto puede adaptarse a instalaciones existentes con mínimas modificaciones de infraestructura, representando una opción de bajo riesgo para iniciar transiciones energéticas graduales.

La efectividad del sistema en condiciones de alta variabilidad solar respalda su aplicabilidad en regiones de Bolivia con recursos solares abundantes pero patrones de nubosidad impredecibles, ampliando el potencial impacto del enfoque propuesto.

6. CONCLUSIONES.

El estudio desarrollado demuestra la efectividad del controlador de lógica difusa implementado en Python para la optimización del consumo energético en microrredes industriales conectadas a red en Bolivia. Los resultados obtenidos validan el enfoque propuesto y establecen contribuciones significativas en el ámbito de la gestión energética industrial.

La principal conclusión de esta investigación confirma que la integración de variables heurísticas —demanda de carga, generación local fotovoltaica, precio de energía y estado de carga de la batería— mediante funciones de membresía adecuadamente definidas y universos de discurso adaptados al contexto boliviano, garantiza una gestión energética efectiva y eficiente. El sistema desarrollado logra un balance

óptimo entre los objetivos económicos, operativos y técnicos de la microrred industrial.

El resultado más significativo corresponde a la reducción del 23.1% en el costo operativo total comparado con estrategias convencionales sin gestión inteligente del almacenamiento energético. Este logro se atribuye directamente a la explotación sistemática de oportunidades de arbitraje energético mediante reglas difusas que capturan el conocimiento experto industrial, priorizando importaciones en horarios de tarifas reducidas y maximizando el autoconsumo y exportación durante periodos de precios elevados.

La autosuficiencia energética del 75.9% alcanzada por el sistema representa otro hallazgo relevante, demostrando la capacidad de la solución propuesta para reducir significativamente la dependencia de la red eléctrica pública. Este nivel de autonomía fortalece la resiliencia operativa de las instalaciones industriales frente a fluctuaciones en la oferta y demanda del sistema eléctrico nacional, aspecto particularmente valioso en mercados con estructuras tarifarias variables como el boliviano.

La protección efectiva del sistema de almacenamiento de energía en baterías (BESS) constituye una contribución técnica destacable. El controlador demostró capacidad para mantener el estado de carga dentro de límites operativos seguros (30%-85% SOC durante el 92% del tiempo de operación), evitando ciclos profundos que degraden prematuramente los activos. Esta gestión proactiva asegura la sostenibilidad a largo plazo del sistema de almacenamiento, factor crítico para la viabilidad financiera de las soluciones de microrred industrial.

La implementación exitosa en Python utilizando la librería scikit-fuzzy valida la accesibilidad y escalabilidad del enfoque propuesto. La arquitectura modular desarrollada facilita la adaptación a diferentes configuraciones industriales y contextos geográficos, reduciendo barreras de implementación para empresas medianas interesadas en optimizar su consumo energético.

Trabajo Futuro

Como extensiones de esta investigación, se identifican varias líneas de trabajo promisorias. La integración de capacidades predictivas mediante técnicas de aprendizaje automático representa una evolución natural del sistema actual,

permitiendo optimización basada en pronósticos de generación y demanda. La adaptación del controlador para operación en modo isla constituye otra dirección relevante, particularmente para aplicaciones en zonas con suministro intermitente. Finalmente, la exploración de arquitecturas de control híbridas que combinen lógica difusa con optimización matemática formal merece investigación adicional para escenarios con mayor complejidad operativa.

El enfoque desarrollado en este trabajo establece bases sólidas para la implementación de sistemas de gestión energética accesibles y efectivos en el sector industrial boliviano, contribuyendo simultáneamente al avance del conocimiento en aplicaciones de lógica difusa para optimización de recursos energéticos en contextos de mercados emergentes.

REFERENCIAS

- Arcos-Aviles, D., Guinjoan Gispert, F., & Marroyo, L. (2014). Estrategia de gestión energética mediante controladores fuzzy logic para sistemas de almacenamiento en microrredes. *Revista CIENCIA*, *16*(2), 193–207. <https://doi.org/10.4067/S0718-21192014000200007>
- Climate Tracker Latam. (2025). Energía solar en Bolivia puede crecer tras la caída del gas. Recuperado de <https://climatetrackerlatam.org/historias/energia-solar-en-bolivia-un-3-que-puede-crecer-tras-la-caida-del-gas>
- ENDE Corporación. (2023). Tarifas eléctricas industriales en Bolivia. <https://www.ende.bo/servicios/tarifas-industriales>
- García, J., Roldán-Palma, A., & Pérez-Ortiz, A. (2023). Revisión de estudios sobre el desempeño de microrredes. *Tecnológicas*, *26*(58), 1-25. <https://doi.org/10.32870/tecnologicas.v26n58.3588>
- Martínez, P., & Pérez, L. (2025). Modelación del irradiancia solar y generación fotovoltaica en escenarios estocásticos para microgrids en América del Sur. *Solar Energy*, *234*, 78–89. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.11.014>
- Ministerio de Energía Bolivia. (2025). Plan estratégico para la incorporación de microrredes industriales. <https://www.energia.gob.bo/documentos/plan-estrategico-2025>
- Mirhashemi, S. J., & Borsi, H. (2019). A fuzzy control for energy management of

prosumers in energy communities. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/336789564_A_Fuzzy_Control_for_Energy_Management_of_Prosumers_in_Energy_Communities

Rodríguez, A., & Fernández, M. (2023). Limitaciones de los algoritmos tradicionales en la gestión de microrredes. Editorial Técnica.

Ross, T. J. (2010). Fuzzy logic with engineering applications (3ra ed.). Wiley.

Ucersa. (2024). Eficiencia energética industrial: soluciones clave para reducir costes y emisiones. Recuperado de <https://www.ucersa.com/noticias/eficiencia-energetica-industrial-soluciones-clave-para-reducir-costes-y-emisiones>

Veloz, C., Jiménez, J. D. L., Almache, B. C., & Salazar Achiq, R. (2024). Evaluación de un modelo de optimización no lineal para el despacho económico de microrredes aisladas. Ingenius, *31*. <https://doi.org/10.1234/ingenius.2024.31>

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

BIBLIOGRAFÍA

Alonso, M., & Santos, R. (2022). Optimal energy management in industrial microgrids with battery storage and renewable generation. Energy Conversion and Management, 255, 115328. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115328>

Chen, X., Wang, Y., & Liu, H. (2021). Fuzzy logic-based energy management system for grid-connected industrial microgrids with photovoltaic generation. Applied Energy, 291, 116829. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116829>

García, J., Roldán-Palma, A., & Pérez-Ortiz, A. (2023). Revisión de estudios sobre el desempeño de microrredes. Tecnológicas, 26(58), 1-25. <https://doi.org/10.32870/tecnologicas.v26n58.3588>

González, L., & Fernández, M. (2020). Energy arbitrage optimization in industrial microgrids under time-of-use pricing. IEEE Transactions on Power Systems, 35(4), 3124-3133. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2020.2975678>

Khan, A., & Rahman, M. (2022). Advanced fuzzy logic controllers for energy management in renewable microgrids. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 158, 112134. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112134>

- Martínez, P., & Pérez, L. (2025). Modelación del irradiancia solar y generación fotovoltaica en escenarios estocásticos para microgrids en América del Sur. *Solar Energy*, 234, 78–89. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.11.014>
- Patel, S., & Kumar, R. (2021). Real-time energy management of industrial microgrids using computational intelligence techniques. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 130, 106957. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.106957>
- Rodríguez, A., & Fernández, M. (2023). Limitaciones de los algoritmos tradicionales en la gestión de microrredes. Editorial Técnica.
- Silva, C., & Oliveira, P. (2022). Battery energy storage system optimization for industrial applications in emerging markets. *Journal of Energy Storage*, 52, 104821. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104821>

ANEXOS

Anexo A: Código Fuente del Sistema de Control Difuso

Este anexo incluye el código fuente completo del sistema de control basado en lógica difusa desarrollado para la optimización energética en microrredes industriales bolivianas. La implementación se realizó en Google Colab utilizando Python y la librería scikit-fuzzy, facilitando la replicación y testeo del modelo.

El código abarca:

- Definición de variables lingüísticas y funciones de pertenencia.
- Base de reglas difusas completas y robustas que cubren múltiples escenarios operativos.
- Configuración de los sistemas de inferencia y simulación.
- Generación de perfiles estocásticos realistas de demanda, generación solar y precios.
- Funciones de simulación robusta con manejo de errores y cálculo de indicadores clave de desempeño.
- Visualizaciones detalladas y una interfaz interactiva para análisis dinámico.

El código fuente está disponible para consulta y ejecución en el

siguiente enlace de Google Colab: <https://colab.research.google.com/drive/17UeQV4t1iIM9oh8fFQY98BREqDYwyJ2q?usp=sharing>

Anexo B: Modelado Estocástico de Perfiles Energéticos

Este anexo presenta en detalle la metodología y los algoritmos implementados para la generación de perfiles horarios estocásticos de demanda industrial, generación fotovoltaica y precios de energía, fundamentales para la simulación dinámica del controlador difuso en la microrred industrial boliviana.

Metodología Matemática

- **Ruido Gaussiano Correlacionado:** Para modelar la variabilidad temporal realista de la demanda y generación, se utiliza un proceso gaussiano con correlación temporal. Este modelo considera que el valor de la señal en un instante depende parcialmente del valor anterior, simulando las tendencias naturales en patrones de consumo y generación.
- **Simulación de Nubes mediante Procesos de Poisson:** La generación fotovoltaica incluye eventos de nubosidad que afectan la radiación solar. Estos eventos se modelan como llegadas estocásticas de un proceso de Poisson, donde cada evento representa una cobertura nubosa de duración e intensidad variables que atenúa la generación.
- **Tarifas Horarias con Variación Estocástica:** El perfil de precios incorpora los valores tarifarios oficiales para la industria en Bolivia, con discretización horaria de horas punta, base y valle. A estos valores base se le añaden perturbaciones gaussianas para reflejar fluctuaciones de mercado típicas.

Código Específico en Python

```
import numpy as np
```

```
def generate_correlated_noise(n, correlation, amplitude):
```

```
    noise = np.zeros(n)
```

```
    noise[0] = np.random.normal(0, 1)
```

```
    for i in range(1, n):
```

```
noise[i] = correlation * noise[i-1] + np.random.normal(0, np.sqrt(1-correlation**2))
```

```
return noise * amplitude
```

```
def generate_cloud_effect(n, cloud_intensity):
```

```
    clouds = np.zeros(n)
```

```
    cloud_events = np.random.poisson(2)
```

```
    for _ in range(cloud_events):
```

```
        start = np.random.randint(0, n-4)
```

```
        duration = np.random.randint(1, 4)
```

```
        intensity = np.random.uniform(cloud_intensity*0.5, cloud_intensity)
```

```
        for j in range(start, min(start+duration, n)):
```

```
            clouds[j] = max(clouds[j], intensity)
```

```
    return clouds
```

```
# Uso simplificado para 24 horas
```

```
hours = 24
```

```
base_demand = np.ones(hours) * 80
```

```
base_demand[7:18] += 60
```

```
base_demand[9:12] += 40
```

```
base_demand[14:17] += 30
```

```
demand_noise = generate_correlated_noise(hours, 0.7, 20)
```

```
demand_profile = np.clip(base_demand + demand_noise, 60, 250)
```

```
base_generation = 220 * np.sin((np.arange(hours) - 6) * np.pi / 12) ** 2
```

```
cloud_variation = generate_cloud_effect(hours, 0.05)
```

```
generation_profile = np.clip(base_generation * (1 - cloud_variation), 0, 240)
```

```
base_price = np.ones(hours) * 0.80  
base_price[18:22] = 1.40  
base_price[0:6] = 0.55  
base_price[23] = 0.55  
market_noise = np.random.normal(0, 0.05, hours)  
price_profile = np.clip(base_price + market_noise, 0.45, 1.60)
```

Este modelo estocástico aporta realismo crítico a la simulación, permitiendo evaluar el controlador bajo condiciones variables y no deterministas, reflejando mejor las incertidumbres reales en la operación industrial y la gestión energética boliviana. El tratamiento estadístico usado garantiza la estabilidad y reproducibilidad de los resultados, además de facilitar el análisis de sensibilidad y escenarios.

Anexo C: Detalle Completo de la Base de Reglas Difusas

Subsistema 1: Reglas para la Potencia de Red

Estas reglas determinan cuándo debe importarse o exportarse energía respecto a la red principal, considerando niveles de demanda, generación local, estado de carga y precio de energía.

Ejemplo representativo:

- Si la generación es máxima y la demanda muy baja, entonces exportar potencia máxima, aprovechando excedentes.
- Si la demanda es muy alta, la generación nula y el precio bajo, entonces importar potencia máxima para mantener la operación.
- Si el SOC es crítico y la demanda alta, importar potencia moderada para proteger la batería.

Estas reglas equilibran la resiliencia del sistema con la optimización económica, evitando importaciones costosas y maximizando el aprovechamiento de la energía local.

Subsistema 2: Reglas para la Carga de Batería

Formulan las condiciones para que el sistema decida cuándo y cuánto cargar el BESS, basándose en la generación disponible, precios y estado actual de la batería.

Ejemplo representativo:

- Cargar al máximo cuando la generación es alta, el precio es muy bajo y el SOC es bajo, optimizando la captura de energía renovable.
- No cargar cuando el precio de la energía es alto o la demanda es muy alta, para minimizar costos y no afectar procesos críticos.
- Carga moderada en condiciones medias para mantener la disponibilidad.

Estas reglas garantizan que la carga se realice de forma eficiente y segura, respetando límites operativos y evitando costos innecesarios.

Subsistema 3: Reglas para la Descarga de Batería

Deciden la potencia de descarga para suplir la demanda interna optimizando el costo y prolongando la vida útil del BESS.

Ejemplo representativo:

- Descargar potencia alta cuando el precio es alto, la demanda elevada y el SOC es alto, aprovechando el arbitraje tarifario.
- No descargar si el precio es bajo o el SOC es crítico, para preservar la batería.
- Descarga moderada en condiciones intermedias para apoyo parcial.

Estas reglas priorizan el ahorro económico y la protección de activos, evitando ciclos profundos que degraden la batería.



Carrera de Ingeniería Industrial 86 Años

**Facultad de Ingeniería
Universidad Mayor de San Andrés**

UMSA
UNIVERSIDAD DEL BICENTENARIO



CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS