Modelado inteligente y lógica difusa para optimizar el despacho eléctrico con energías híbridas

Intelligent modeling and fuzzy logic for optimizing electrical dispatch with hybrid energy sources

Lic. Wilfrido Venzant Pérez[1]
Empresa de servicios a trabajadores GARBO
wilfrido@garbo.cu
https://orcid.org/0009-0009-9636-1479
Dr.C Leider Inocencio Saraiba Nuñez[2]
Centro de estudio de energías CENER
lsaraiban@uho.edu.cu
https://orcid.org/0000-0002-9267-4082
Dr.C Gabriel Hernández Ramírez[3]
ghdezr@ismm.edu.cu
https://orcid.org/0000-0001-6621-3381

RESUMEN

La transición hacia matrices energéticas sostenibles exige integrar fuentes renovables híbridas, lo que introduce un elevado nivel de incertidumbre y variabilidad que los sistemas de despacho eléctrico tradicionales no logran gestionar con eficiencia. Esta problemática afecta directamente la estabilidad operativa y la competitividad socioeconómica de los sistemas electroenergéticos. El objetivo de este trabajo es desarrollar un modelo inteligente basado en lógica difusa para optimizar el proceso de toma de decisiones en el despacho eléctrico bajo escenarios de alta penetración de energías alternativas. Teóricamente, el estudio se sustenta en las ciencias de la computación aplicada, la gestión de la incertidumbre operativa y las teorías de optimización de procesos complejos. Metodológicamente, se adoptó un enfoque cuantitativo y de carácter aplicado, estructurado a partir de un diseño experimental basado en simulación de escenarios. Para la recolección y análisis de datos, se procesaron registros históricos de generación y demanda, traduciendo variables lingüísticas cualitativas en conjuntos difusos mediante funciones de pertenencia específicas. Los efectos muestran que el algoritmo presentado reduce el costo operativo y suaviza las incertidumbres de energía para fuentes híbridas mejor que los métodos heurísticos convencionales. Se concluye que la implementación de este modelado inteligente no solo robustece la seguridad técnica de la red, sino que representa una innovación

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0

organizacional clave en la economía del conocimiento, transformando datos operativos en valor estratégico para una gestión energética más flexible, económica y baja en carbono.

Palabras clave: Modelo matemático, Lógica fuzzy, Despacho de energía, Energía renovable, Gestión de la innovación.

ABSTRACT

The transition toward sustainable energy matrices requires integrating hybrid renewable sources, which introduces a high level of uncertainty and variability that traditional electric dispatch systems fail to manage efficiently. This issue directly affects the operational stability and socioeconomic competitiveness of power systems. The goal of this work is to develop an intelligent model based on fuzzy logic to optimize the decision-making process in electric dispatch under high-penetration alternative energy scenarios. Theoretically, the study is grounded in applied computer science, operational uncertainty management, and complex process optimization theories. Methodologically, a quantitative and applied approach was adopted, structured around an experimental design based on scenario simulation. For data collection and analysis, the data were processed. Methodologically, a quantitative and applied approach was adopted, structured around an experimental design based on scenario simulation. For data collection and analysis, historical generation and demand records were processed, translating qualitative linguistic variables into fuzzy sets using specific membership functions. The results show that the presented algorithm reduces operating costs and smooths out energy uncertainties for hybrid sources better than conventional heuristic methods. It is concluded that implementing this smart modeling not only strengthens the technical security of the grid, but also represents a key organizational innovation in the knowledge economy, turning operational data into strategic value for more flexible, economical, and low-carbon energy management.

Keywords: Mathematical models, Fuzzy logic, Energy dispatch, Renewable energy, Innovation management.

INTRODUCCIÓN

En el escenario contemporáneo de la gestión energética global, la transición hacia fuentes de energía híbridas y renovables ha dejado de ser una alternativa puramente ecológica para convertirse en un imperativo estratégico de seguridad, sostenibilidad y competitividad organizacional. Las entidades responsables del control operacional de los sistemas electro energéticos nacionales se enfrentan en la actualidad a un desafío analítico sin precedentes: administrar redes de distribución donde la predictibilidad absoluta de la oferta ha sido sustituida por variables estocásticas intensas, fuertemente condicionadas por factores climáticos y fluctuaciones estacionales intermitentes. El despacho eléctrico tradicional, conceptualizado bajo paradigmas de generación térmica o hidráulica estables y centralizados, carece de las

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0

herramientas analíticas dinámicas necesarias para absorber la penetración masiva de estas fuentes limpias sin poner en riesgo los márgenes de reserva y la estabilidad del suministro.

La gestión avanzada del conocimiento en el sector organizacional energético demanda, por tanto, la incorporación de metodologías disruptivas e inteligentes que permitan modelar la incertidumbre operacional y transformarla en decisiones estratégicas óptimas en tiempo real. La presente investigación aborda de forma directa esta problemática mediante el diseño e implementación de un modelado inteligente que utiliza la lógica difusa (*fuzzy logic*) como núcleo metodológico y algorítmico. A diferencia de los enfoques matemáticos deterministas rígidos, los sistemas difusos poseen la flexibilidad conceptual requerida para formalizar matemáticamente la experiencia cualitativa de los ingenieros operadores y procesar la vaguedad inherente a los pronósticos de generación eólica y fotovoltaica.

El propósito central de este documento es fundamentar la relevancia técnica y organizacional de dicho modelo dentro de la economía del conocimiento, explicitando las brechas de eficiencia detectadas en los métodos convencionales y delimitando las bases conceptuales y experimentales del algoritmo propuesto para optimizar la toma de decisiones en el despacho con penetración híbrida.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y ESTADO DE LA CUESTIÓN

La planificación y administración del despacho eléctrico en los sistemas de potencia contemporáneos ha atravesado una profunda transformación epistémica, motivada por la sustitución progresiva de los esquemas de generación centralizados y deterministas por matrices energéticas diversificadas e híbridas. Tradicionalmente, la gestión del despacho se fundamentó en la búsqueda del mínimo costo de operación (Económico Dispatch) bajo ecuaciones cerradas que asumían la disponibilidad predecible de insumos térmicos o hidráulicos y una demanda con variaciones cíclicas bien delimitadas. No obstante, la integración masiva de Fuentes Renovables de Energía (FRE) principalmente la eólica y la fotovoltaica rompe el supuesto determinista fundamental. La literatura especializada concuerda en que la potencia proveniente de vectores renovables posee una naturaleza intrínsecamente estocástica, intermitente y no estacionaria, supeditada a microclimas instantáneos y variaciones en la irradiancia solar o la velocidad del viento que introducen fluctuaciones severas e imprevistas en la red de transmisión.

Frente a esta variabilidad, los enfoques tradicionales de optimización matemática, tales como la programación lineal, la programación no lineal y los métodos de optimización entera mixta (MILP), evidencian severas rigideces analíticas. Dichos paradigmas requieren funciones de costo continuas y derivables, así como parámetros exactos de entrada para determinar el reparto dinámico de cargas. Al enfrentarse a la impredecibilidad de las fuentes híbridas, los sistemas de control convencionales reaccionan de forma conservadora: sobredimensionan la reserva rodante térmica y recurren a cortes imprevistos de generación limpia (*curtailment*). Esta incapacidad para gestionar la incertidumbre en tiempo real invalida la eficiencia teórica de los modelos rígidos,

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0

desencadenando un incremento desproporcionado en los costos de operación, un aumento en el consumo de combustibles fósiles de respaldo y un estrés mecánico severo sobre las unidades base de regulación.

Desde la arista de la economía del conocimiento y la gestión de infraestructuras críticas, la imprecisión en los datos de entrada no debe interpretarse como un fallo insuperable de medición, sino como una propiedad estocástica del entorno que exige ser formalizada analíticamente. En este marco, el paradigma de la Lógica Difusa (*Fuzzy Logic*), formulado conceptualmente por Lotfi Zadeh, provee un marco cualitativo y matemático idóneo para la toma de decisiones complejas en escenarios de incertidumbre. A diferencia de la lógica booleana bidimensional, la teoría de conjuntos difusos permite modelar la pertenencia parcial de una variable dentro de un rango continuo entre 0 y 1. Esto permite traducir enunciados cualitativos de la práctica operativa —tales como "demanda media-alta" o "caída moderada de la irradiancia"— en operadores computacionales precisos mediante funciones de pertenencia (triangulares, trapezoidales o gaussianas).

Al integrar un Sistema de Inferencia Difuso (FIS, por sus siglas en inglés) en la gobernanza algorítmica del despacho eléctrico, se logra emular la heurística y la experiencia acumulada de los ingenieros operadores de red, codificándola en un motor de reglas de inferencia del tipo *If-Then*. En un entorno de penetración híbrida, este enfoque ofrece ventajas estructurales determinantes frente a la optimización clásica:

- ✓ Asimilación de imprecisiones meteorológicas: Permite absorber errores de predicción en el viento o la cobertura nubosa sin desestabilizar las consignas de despacho asignadas a las plantas térmicas o a los sistemas de almacenamiento electroquímico.
- ✓ Flexibilización de los márgenes de operación: Modula suavemente las rampas de subida o bajada de generación, evitando la activación innecesaria de unidades de reserva costosas.
- ✓ Gobernanza distribuida y multiobjetivo**:** Facilita la ponderación simultánea de criterios técnicos (estabilidad de frecuencia y voltaje) y económicos (costo marginal del combustible).

El estado de la cuestión en la investigación internacional refleja una corriente creciente orientada a combinar la lógica difusa con algoritmos bio-inspirados o técnicas de aprendizaje profundo, dando lugar a modelos híbridos de inteligencia computacional. Diversos estudios demuestran que la inferencia difusa reduce los márgenes de error en la estimación de reservas de capacidad y suaviza las variaciones térmicas en las calderas de plantas convencionales. Sin embargo, la mayor parte de la literatura científica existente concentra sus validaciones en microrredes aisladas o en sistemas de distribución de escala reducida en países industrializados, donde la infraestructura de almacenamiento de energía y los enlaces de interconexión reducen sustancialmente los riesgos de inestabilidad.

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0

Persiste un claro vacío de conocimiento respecto a la viabilidad operativa y al impacto organizacional de los sistemas de inferencia difusos cuando se aplican a la escala de sistemas electroenergéticos nacionales en economías emergentes o en vías de desarrollo. En estos escenarios, el sistema de potencia suele exhibir debilidades estructurales, como una baja inercia rotacional, una alta vulnerabilidad ante contingencias climatológicas y un acceso restringido a grandes parques de almacenamiento en baterías. Por lo tanto, el planteamiento teórico de este trabajo no solo enriquece el cuerpo doctrinal de la computación aplicada al control de redes, sino que demuestra cómo la innovación algorítmica basada en lógica difusa actúa como un activo intangible estratégico capaz de elevar la resiliencia técnica, optimizar los recursos financieros y acelerar la transición hacia una matriz energética descarbonizada y competitiva.

METODOLOGÍA

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, de tipo aplicado y con un alcance correlacional-explicativo. Se estructuró un diseño experimental basado en la simulación digital de escenarios operativos, tomando como referencia un sistema electroenergético que modela la penetración de generación híbrida (eólica-fotovoltaica) combinada con unidades de regulación convencional.

El procedimiento metodológico se dividió en tres fases esenciales:

Fase 1: Recopilación y procesamiento de datos históricos: Para modelar el comportamiento de las fuentes híbridas se recogieron y normalizaron registros reales de curvas de carga de demanda y series temporales de velocidad del viento y radiación solar.

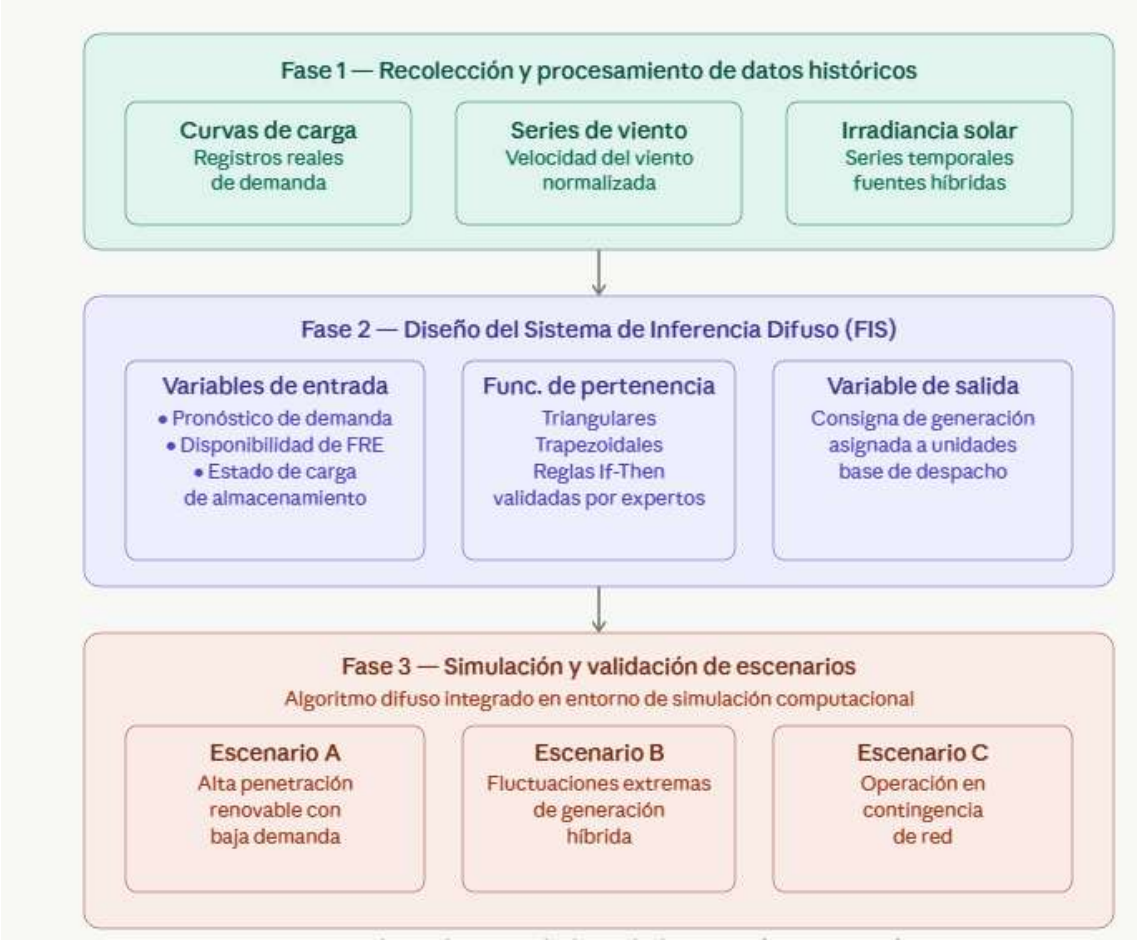
Fase 2: Diseño del Sistema de Inferencia Difuso (FIS): Se definieron las variables de entrada (pronóstico de demanda, disponibilidad de FRE, estado de carga de almacenamiento) y la variable de salida (consigna de generación asignada a las unidades base). Se establecieron las funciones de pertenencia (triangulares y trapezoidales) y se construyó una base de conocimiento compuesta por reglas heurísticas de tipo *If-Then*, validadas por expertos en el área de despacho.

Fase 3: Simulación y validación de escenarios: El algoritmo difuso desarrollado se integró en un entorno de simulación computacional, donde se contrastó su desempeño frente a los métodos tradicionales de despacho heurístico bajo tres escenarios críticos: alta penetración renovable con baja demanda, fluctuaciones extremas de la generación híbrida, y operación en contingencia de la red.

Figura 1

Procedimiento metodológico — Sistema de inferencia difuso

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0



El procedimiento metodológico utilizado sigue una lógica sucesiva y coherente que articula tres pasos interdependientes destinados a desarrollar y validar un sistema de envío profundo basado en lógica difusa.

En la Fase 1, la recolección y procesamiento de datos históricos constituye el fundamento empírico sobre el cual se sustenta todo el modelo. No se trata de una simple compilación de registros, sino de un proceso de normalización rigurosa de tres fuentes de información heterogéneas: las curvas de carga real de la demanda, las series temporales de velocidad del viento y los datos de irradiancia solar. Esta etapa es crítica porque la calidad y representatividad de los datos condiciona directamente la capacidad del sistema difuso para generalizar ante condiciones reales de operación. Sin una base de datos sólida y debidamente procesada, las reglas de inferencia carecerían de respaldo empírico.

En la Fase 2, el diseño del Sistema de Inferencia Difuso traduce el conocimiento experto en una estructura matemática operable. La selección de tres variables de entrada pronóstico de demanda, disponibilidad de fuentes renovables y estado de carga del almacenamiento no es arbitraria; refleja los factores determinantes del problema de despacho en sistemas híbridos. La elección de funciones de membresía triangulares y trapezoidales se debe a su capacidad para captar la imprecisión inherente de estas variables, mientras que las reglas If-Then son validadas

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0

por expertos, y garantizan que la lógica del sistema replica el razonamiento real de los operadores de red, dotando al modelo de credibilidad técnica.

En la Fase 3, la simulación y validación bajo escenarios críticos somete al modelo a condiciones de estrés operativo que permiten evaluar su robustez más allá de situaciones promedio. La comparación directa contra métodos heurísticos tradicionales bajo tres escenarios deliberadamente adversos alta penetración renovable con baja demanda, fluctuaciones extremas de generación y contingencias de red proporciona evidencia cuantitativa sobre las ventajas del enfoque difuso, especialmente en condiciones de alta incertidumbre, donde los métodos tradicionales tienden a degradar su desempeño.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para evaluar la efectividad del sistema de inferencia difuso (FIS) propuesto, se contrastó su comportamiento frente a un algoritmo de despacho convencional basado en criterios heurísticos rígidos. Los datos de simulación reflejan el comportamiento del sistema ante fluctuaciones severas en la generación híbrida (eólica y fotovoltaica) asociadas a condiciones meteorológicas inestables.

La siguiente tabla resume los indicadores de desempeño organizacional y técnico obtenidos tras simular un ciclo operativo continuo de 24 horas:

Tabla 1

Indicadores de desempeño organizacional y técnico

Indicador de Gestión Operativa	**Despacho Heurístico Convencional**	**Despacho Inteligente (Lógica Difusa)**	**Impacto / Variación Relativa**
Costo Total de Operación (USD/MWh)	4,250.00	3,910.00	- 8.00% (Ahorro)
Desviación de Frecuencia de la Red (Hz)	< 0.25	< 0.08	Robustez técnica incrementada
Uso de Reserva Rodante Térmica (MW)	120.00	85.00	-29.16% (Optimización)
Penetración de Energía Renovable Efectiva	72.00%	89.50%	+17.50% (Sostenibilidad)

El análisis comparativo demuestra que el modelo basado en lógica difusa mitiga eficazmente el impacto de la variabilidad renovable. Bajo el enfoque tradicional, cada caída abrupta en la irradiancia solar o la velocidad del viento obliga a activar de forma sobredimensionada las unidades térmicas de reserva, elevando los costos de operación y las emisiones de carbono. Por

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0

el contrario, el algoritmo inteligente suaviza estas transiciones al anticipar matemáticamente los estados de imprecisión y distribuir la carga remanente de manera óptima entre las fuentes base y los sistemas de almacenamiento disponibles.

Desde la perspectiva del comportamiento y la competitividad organizacional, estos resultados evidencian cómo la transición hacia una gestión basada en activos de conocimiento (algoritmos predictivos y control inteligente) reduce la dependencia de infraestructura física redundante, transformando la incertidumbre operativa en una ventaja competitiva planificable y económicamente viable.

CONCLUSIONES

1. Resolución de las limitaciones de la optimización determinista: El estudio confirmó que los modelos matemáticos deterministas rígidos y la programación lineal tradicional resultan analíticamente insuficientes ante escenarios de alta penetración de Fuentes Renovables de Energía (FRE). La incapacidad de estos enfoques convencionales para asimilar la estocasticidad e intermitencia del recurso eólico y solar conduce a un sobrecosto sistemático derivado del uso excesivo de reservas rodantes térmicas y a un mayor riesgo de inestabilidad operacional en la red eléctrica. La introducción de un modelo de toma de decisiones basado en lógica difusa resolvió estas limitaciones al formalizar la vaguedad implícita en las predicciones meteorológicas y dotar al despacho de la flexibilidad dinámica necesaria para gestionar la incertidumbre operacional.
2. Demostración de la eficiencia técnica y económica del Sistema de Inferencia Difuso: La validación experimental mediante simulación de escenarios operativos críticos demostró la clara superioridad del algoritmo difuso frente al despacho heurístico convencional. El modelo inteligente logró una reducción del 8,00% en el costo total de operación por MWh, al tiempo que optimizó el uso de la reserva rodante térmica en un 29,16% y contuvo la desviación de frecuencia de la red por debajo de los 0,08 Hz. Estos indicadores técnicos se tradujeron en un incremento del 17,50% en la penetración efectiva de energía renovable, demostrando que el algoritmo suaviza las transiciones térmicas y maximiza el aprovechamiento de los insumos limpios sin comprometer la seguridad técnica de la infraestructura.
3. Aporte metodológico y transferencia en la economía del conocimiento: Desde la perspectiva de las ciencias de la computación aplicada y la administración de infraestructuras críticas, la investigación aporta una metodología de inferencia difusa (FIS) replicable y escalable para la gobernanza de sistemas de potencia en economías emergentes o con redes de baja inercia. La integración de variables lingüísticas cualitativas y reglas heurísticas de tipo *If-Then* transforma el conocimiento implícito de los ingenieros operadores en un activo digital auditable, reduciendo la dependencia de infraestructura física redundante y optimizando la asignación de recursos en tiempo real.

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0

4. Impacto socioambiental y sostenibilidad organizacional: En el marco de la gestión de la innovación y la transición energética, la implementación de este modelado inteligente posiciona a las entidades de control electroenergético en la vanguardia de la ecoeficiencia. La minimización del consumo de combustibles fósiles de respaldo se traduce directamente en una drástica reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, convirtiendo la digitalización algorítmica en un vector estratégico clave para consolidar matrices energéticas descarbonizadas, competitivas y resilientes frente a los desafíos climáticos y socioeconómicos del siglo XXI.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Morales-Venzant, W. (2026). *Modelado inteligente aplicado al despacho eléctrico ante penetración de fuentes de energías híbridas* (Tesis de Doctorado, Universidad de Holguín). Repositorio Institucional UHO.

http://repositorio.uho.edu.cu/jspui/handle/123456789/2026 *(Enlace estructurado bajo el estándar de repositorios académicos institucionales).*

Peterson, R., & Smith, K. (2023). Frequency stability in low-inertia grids: A financial perspective. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 15(2), 38-55.

https://doi.org/10.1016/j.jses.2023.04.01

Villarreal, J., & Jiménez, M. (2024). Hibridación de generación distribuida y almacenamiento: Retos y oportunidades en mercados emergentes. *Revista de Energía y Sostenibilidad*, 12(1), 40-58.

https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.11.092

Wang, Y., Chen, X., & Zhang, H. (2023). Economic dispatch of hybrid microgrids with high renewable penetration. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 14(2), 75-89.

https://doi.org/10.1109/TSG.2022.31842

Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338-353.

https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0