

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

FACULTAD DE INGENIERIA E INDUSTRIA

CARRERA DE ELECTRICIDAD

ANÁLISIS DE LAS REDES DE TELECOMUNICACIONES BASADO EN ALGORITMOS DE LÓGICA DIFUSA PARA LOS SISTEMAS DE MEDICIÓN INTELIGENTE AMI

PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO

AUTOR: CARLOS SEBASTIÁN NIVELO GALARZA

DIRECTOR: JAVIER BERNARDO CABRERA MEJÍA

CUENCA - ECUADOR

2026

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

FACULTAD DE INGENIERIA E INDUSTRIA

CARRERA DE ELECTRICIDAD

ANÁLISIS DE LAS REDES DE TELECOMUNICACIONES BASADO EN ALGORITMOS DE LÓGICA DIFUSA PARA LOS SISTEMAS DE MEDICIÓN INTELIGENTE AMI

PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO

AUTOR: CARLOS SEBASTIÁN NIVELO GALARZA

DIRECTOR: JAVIER BERNARDO CABRERA MEJÍA

CUENCA - ECUADOR

2026

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO

DECLARATORIA DE AUTORIA Y RESPONSABILIDAD

Carlos Sebastián Nivelo Galarza portador de la cédula de ciudadanía **N.º 0106461585.** Declaro ser autor de la obra: **"Análisis de las redes de telecomunicaciones basado en algoritmos de Lógica Difusa para los sistemas de medición inteligente AMI"**, sobre la cual me hago responsable sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaro que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximimos a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaro finalmente que mi obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también nos responsabilizamos y eximimos a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

Cuenca, 16 de 07 de 2026

F: .....

Carlos Sebastián Nivelo Galarza

0106461585

CERTIFICADO

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Carlos Sebastián Nivelo Galarza, bajo mi supervisión.



Ing. Javier Bernardo Cabrera Mejía PhD.
DIRECTOR

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de titulación a Dios, por guiarme en cada paso de este camino y darme la fuerza necesaria para superar los momentos difíciles

A mi esposa Diana, por ser mi apoyo constante durante mi formación académica, por confiar en mí, por su paciencia y por motivarme siempre a seguir adelante.

A mis padres Salvador y Ana también es de ustedes, porque con su esfuerzo y cariño me ayudaron a cumplir una de mis metas más importantes. A las personas presentes en este proceso, brindándome palabras de ánimo y apoyo cuando más lo necesitaba.

Cada muestra de confianza fue importante para no rendirme y continuar hasta alcanzar este objetivo, con gratitud y cariño dedico esta tesis a quienes han sido fundamental de mi vida y de mi formación profesional.

RESUMEN

Esta investigación analiza el desempeño de las redes de telecomunicaciones aplicadas a sistemas de medición inteligente (AMI), mediante lógica difusa y la teoría de los efectos olvidados, tomando como caso de estudio el alimentador 1522 del cantón Gualaceo. Con el fin de mitigar las pérdidas no técnicas y mejorar la confiabilidad del sistema, así como transmisión de datos en entornos eléctricos complejos. La metodología integró una revisión bibliográfica sistemática de la literatura y el criterio técnico de especialistas de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur, permitiendo identificar y cuantificar variables determinantes mediante el uso de matrices difusas normalizadas. El estudio identificó doce factores causas y doce efectos centrados en infraestructura, seguridad, disponibilidad de datos y la calidad del servicio. A través de un modelo en MATLAB con una composición difusa max-min, permitió calcular los efectos olvidados y categorizar las variables según su nivel de incidencia. De acuerdo con los resultados, muestran que la incidencia negativa de la gestión de claves criptográficas, la actualización de firmware, el ancho de banda, los ataques cibernéticos y el hardware defectuoso en medidores o concentradores son los factores que más afectan el rendimiento del sistema AMI. También se encontró que los efectos previamente ignorados escondían relaciones indirectas que la evaluación inicial no había contemplado, en especial la que existe entre seguridad y autenticación. Estos hallazgos dejan claro que, al juntar la lógica difusa con el análisis matricial de efectos olvidados, se logra una herramienta de buen apoyo para la toma de decisiones técnicas y que hace que el sistema sea más confiable en condiciones reales.

Palabras clave: redes de telecomunicaciones, efectos olvidados, lógica difusa, medición inteligente, ciberseguridad.

ABSTRACT

This research analyzes the performance of telecommunications networks used in advanced metering infrastructure (AMI) systems by applying fuzzy logic and the theory of forgotten effects, using feeder 1522 in the canton of Gualaceo as a case study. The study aims to mitigate non-technical losses, improve system reliability, and enhance data transmission in complex electrical environments. The methodology included a systematic literature review and technical input from specialists at the Empresa Eléctrica Regional Centro Sur, enabling the identification and quantification of key variables through the use of normalized fuzzy matrices. The study identified twelve causal factors and twelve effects related to infrastructure, security, data availability, and service quality. Using a MATLAB model with max-min fuzzy composition, the study calculated the forgotten effects and categorized the variables according to their level of impact. The results show that the negative impact of cryptographic key management, firmware updates, bandwidth, cyberattacks, and defective hardware in meters or concentrators represents the factors that most affect the performance of the AMI system. It was also found that previously overlooked effects concealed indirect relationships that the initial evaluation had not considered, particularly the relationship between security and authentication. These findings demonstrate that combining fuzzy logic with the matrix analysis of forgotten effects provides a valuable tool for technical decision-making and can improve system reliability under real-world conditions.

Keywords: telecommunications networks, forgotten effects, fuzzy logic, smart metering, cybersecurity.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1 1

1. INTRODUCCIÓN 1

1.1 Objetivos 1

1.1.1 Objetivo general 1

1.1.2 Objetivos específicos 1

1.2 Delimitación del problema 1

1.3 Justificación 2

1.4 Zona de estudio 3

1.5 Metodología 5

1.5.1 Aplicada 5

1.5.2 Mixta 5

1.5.3 Exploratorio 5

1.5.4 Descriptiva 5

1.5.5 Cuasi-experimental 6

CAPÍTULO 2 7

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA 7

2.1 Redes de telecomunicaciones 7

2.1.1 Concepto 7

2.1.2 Parámetros de desempeño 7

2.2 Infraestructura de medición avanzada AMI 8

2.2.1 Medidores inteligentes 9

2.2.2 Red FAN 10

2.2.3 Red WAN 11

2.2.4 Comunicaciones alámbricas e inalámbricas en AMI 11

2.2.5 Gestión de datos de medición (MDMS) 12

2.2.6 Sistemas, aplicaciones y productos SAP Y CRM 12

2.2.7 Protocolos de red AMI 14

2.2.8 Desafíos en la seguridad y almacenamiento de información 16

2.3 Lógica difusa 16

2.3.1 Variable lingüística 17

2.3.2 Componentes 17

2.3.3 Operaciones 18

2.3.4 Teoría de efectos olvidados (TEO) 19

2.4 Sistemas difusos en MATLAB 22

CAPÍTULO 3 24

3. SITUACIÓN Y RETOS OPERATIVOS DE LAS REDES ELÉCTRICAS DE LA CENTRO SUR C.A. 24

3.1 Plan Estratégico de la Centro sur C.A. 24

3.1.1 Planificación de la distribución en un ambiente caracterizado por el cambio tecnológico y la innovación. 24

3.1.2 Área de concesión 25

3.1.3 Estructura organizacional 26

3.1.4 Exigencias para el SDE 28

3.1.5 Realidades que condicionan la transición a nivel regional y nacional 29

3.1.6 Área de la empresa a cargo de la instalación de medidores de energía 30

3.2 Contadores AMI en la actualidad 31

CAPÍTULO 4 33

4. DISEÑO METODOLÓGICO 33

4.1 Diseño del sistema difuso 33

4.2 Aplicación de la TEO 34

4.3 Identificación de variables 35

CAPÍTULO 5 41

5. APLICACION DE LA METODOLOGIA DIFUSA 41

5.1 Aplicación de la metodología difusa para redes de telecomunicación en el sistema de medición AMI 41

5.2 Determinación de las variables causa – efecto 42

5.3 Análisis de las variables de confiabilidad con el método de efectos olvidados 47

CAPÍTULO 6 58

6. RESULTADOS 58

6.1 Efectos olvidados relevantes encontrados 59

6.2 Principales efectos olvidados crítico 60

6.3 Visualización de datos numéricos en las variables críticas 62

CONCLUSIONES.....70

RECOMENDACIONES.....71

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....72

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Zona de estudio 4

Figura 2 Componentes base de la AMI 8

Figura 3 Medidor inteligente 10

Figura 4 Modelo CIM 13

Figura 5 Esquema de lógica difusa 17

Figura 6 Operaciones de lógica difusa 19

Figura 7 Organigrama Centro sur 27

Figura 8 Diseño del sistema difuso 34

Figura 9 Variables críticas 61

Figura 10 Relaciones causa–efecto con menor incidencia directa en la matriz normalizada M. 62

Figura 11 Relaciones causa–efecto con mayor incidencia directa en la matriz normalizada M. 63

Figura 12 Incidencias indirectas de menores magnitudes en la matriz $C=A\circ M$. 64

Figura 13 Relaciones con mayor incidencia indirecta obtenidas en la matriz $C=A\circ M$. 65

Figura 14 Menores efectos olvidados positivos obtenidos en la matriz $O=M*-M$. 66

Figura 15 Matriz de efectos olvidados $O=M*-M$ 67

Figura 16 Matriz de efectos olvidados $O=M*-M$ con umbrales de incidencia relevantes y críticos. 68

Figura 17 Efectos olvidados relevantes 69

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Área de concesión de la Centro sur C.A. 26

Tabla 2 Competencias, atribuciones y facultades institucionales 28

Tabla 3 Causas identificadas para el análisis de sistemas AMI 39

Tabla 4 Efectos identificados para el análisis de sistemas AMI 40

Tabla 5 Causas y efectos para el AMI 43

Tabla 6 Escala de incidencia empleada en la valoración 44

Tabla 7 Valoración promedio de los expertos: incidencia de las causas sobre los efectos 45

Tabla 8 Valoración promedio de los expertos: relaciones entre causas 46

Tabla 9 Valoración promedio de los expertos: relaciones entre efectos 47

Tabla 10 Matriz C 50

Tabla 11 Matriz M* 53

Tabla 12 Matriz Convolución 56

Tabla 13 Matriz Causa - Efecto 57

Tabla 14 Matriz de efectos olvidados 59

Tabla 15 Efectos olvidados relevantes 60

Tabla 16 Efectos olvidados críticos 61

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Analizar las redes de telecomunicaciones mediante algoritmos de Lógica Difusa que permiten la integración de los sistemas de medición inteligente AMI.

1.1.2 Objetivos específicos

Fortalecer el estado del arte relacionado a las redes de telecomunicaciones y los sistemas de medición inteligente AMI a partir de una revisión de literatura en bases de datos científicas.

Analizar el estado actual de las redes de telecomunicaciones y los sistemas de medición de energía eléctrica a nivel nacional, considerando como referencia geográfica y operativa una zona del alimentador 1522 de la E. E. Regional Centro Sur, mediante la aplicación de una encuesta técnica a expertos vinculados con la operación, comunicación y gestión de estos sistemas.

Determinar las variables que permitan la integración de redes de telecomunicaciones en medición inteligente basado en algoritmos de lógica difusa que permita integrar sistemas AMI.

1.2 Delimitación del problema

Los alcances del presente trabajo involucran la evaluación de variables que afectan el rendimiento en la transmisión de datos de los AMI. Estas variables se reflejan en el ancho de banda, la latencia, la pérdida de paquetes, los errores de comunicación (ruido) y las limitaciones de seguridad y escalabilidad. Desde la perspectiva geográfica, el alcance de este análisis se

concentra en el área operativa del alimentador 1522 de la Empresa Eléctrica Regional Centro sur, localizada en el cantón Gualaceo. Su ubicación ha sido elegida apropiadamente para las actividades de medición inteligente y las interfaces de la solución para la recolección y el procesamiento de información, así como tiene la representación suficiente para la evaluación de estos factores críticos.

Desde el punto de vista técnico, se limita al uso de algoritmos lógicos difusos para modelar y evaluar las variables mencionadas. El presente estudio utiliza el entorno MATLAB como una plataforma para simular estas interfaces y generar un modelo capaz de clasificar el nivel de impacto de cada variable, y proponer soluciones técnicas inmediatas que mejoren el desempeño de las redes AMI. Por lo tanto, no incluye aspectos relacionados con el hardware físico ni intervenciones directas con los medidores; se basa únicamente en simulaciones lógicas y juicio experto, con apoyo en datos históricos y bibliografía científica al respecto.

1.3 Justificación

La implementación del AMI ha revolucionado la gestión energética en diversos países a través de un sistema de datos basado en tiempo real y una interacción bidireccional de usuarios con operadores. Aun así, debido a la ausencia de enfoques tecnológicos implementados en entornos urbanos tales como los del cantón Gualaceo, la eficiencia del sistema se ve gravemente afectada por problemas de interferencia electromagnética y alta latencia, pérdida de paquetes de datos, ancho de banda limitado para las conexiones de telecomunicaciones y otros.

Estos problemas tienen un impacto directo en la exactitud de la medición de consumo, incidiendo en la justicia entre usuarios, en la estabilidad operativa y en la confiabilidad del sistema en caso de fallos. Para tratar con estas y otras problemáticas ya identificadas, la lógica difusa es

una herramienta sólida para la toma de decisiones característica de sistemas AMI, ayudando a mitigar efectos y definiciones de comportamiento para un sistema con alto grado de variabilidad y datos inciertos.

Se desarrolla una estructura organizada, la cual cumple la función de una clasificación de las variables críticas en la red de telecomunicaciones. Para ello, se necesita un conjunto de datos como base y el modelado en el software Matlab. Estas variables deben ser cuantitativas y organizadas, para promover el uso de nuevas tecnologías en la infraestructura de la red. De igual manera, el trabajo brinda una base técnica a empresas como la E.E. Regional Centro sur para el diseño de soluciones que mitiguen las pérdidas no técnicas e incrementen la eficacia de sus sistemas de medición. En cuanto al ámbito académico, el proyecto realiza un llamado al uso de herramientas modernas para el análisis en la ingeniería eléctrica, promoviendo el análisis computacional, el procesamiento difuso y las decisiones expertas.

1.4 Zona de estudio

El presente estudio aborda en una parte del área de concesión de la Empresa Eléctrica Regional Centro sur, en especial, el alimentador primario 1522, correspondiente a la Subestación 15, situado en el cantón Gualaceo, provincia del Azuay. Se trata de un entorno urbano con condiciones y topología variables, por lo que constituye un escenario apropiado para el análisis del rendimiento de redes de telecomunicación en torno a sistemas de medición inteligente AMI. Para contextualizar el análisis, se consideró un sector de la ruta de lectura 0519M215, delimitado referencialmente por la calle Antonio Delgado en el norte, la calle Dávila Chica, hasta la Fidel Antonio Piedra, Luis Ríos Rodríguez y Vicente Peña Reyes al este, y la Av. Santa Bárbara en el sur y Colon en el oeste. Esta delimitación permite ubicar geográficamente el área de estudio y

relacionarla con posibles condiciones que puede influir en el desempeño de la comunicación, como interferencias, variaciones de señal, perdidas de datos o limitaciones de cobertura.

Debido a la falta de acceso al número total de abonados conectados al alimentador 1522, no se realizó una medición directa a usuarios. En su lugar la valoración de las variables se efectuó mediante una encuesta técnica aplicada a expertos vinculados con la operación, comunicación y gestión de los sistemas AMI. De esta manera el alimentador 1522 se considera como referencia geográfica y operativa, mientras el análisis técnico se fundamenta en el criterio de profesionales de la E. E. Regional Centro Sur.

Figura 1

Zona de estudio



Nota. Elaboración propia.

1.5 Metodología

1.5.1 Aplicada

Esta investigación es un estudio aplicado, ya que está orientada a solucionar un problema técnico en particular: la mejora de la transmisión de información en sistemas AMI a través de lógica difusa. El objetivo del enfoque es proporcionar un modelo cuyo uso pueda ser implementado por empresas como la E.E. Regional Centro Sur.

1.5.2 Mixta

Se considera una investigación mixta, porque envuelve enfoques cualitativos y cuantitativos. En la parte cualitativa, se toma la opinión de expertos para determinar las variables críticas que influyen en la calidad de la comunicativa de los sistemas AMI. En la parte cuantitativa, estas identificaciones son valoradas de acuerdo con la lógica difusa y computarizadas en MATLAB para determinar sus cantidades numéricas para clasificar.

1.5.3 Exploratorio

Se define como una investigación debido a que existen pocos antecedentes, particularmente regionales, que relacionen el uso de la lógica difusa con la aplicación técnica de los sistemas AMI. Este estudio representa un primer acercamiento al fenómeno mediante una muestra de conveniencia y simulaciones.

1.5.4 Descriptiva

A su vez, si se observa desde la perspectiva descriptiva, se caracteriza la condición actual de las redes AMI en cuanto a nuestro entorno seleccionado. Entre los aspectos medidos figuran los técnicos, como la latencia, la perdida de datos y la interferencia electromagnética, entre otros.

1.5.5 Cuasi-experimental

Este enfoque también se desprende del carácter de la simulación cuasi experimental, descrita también a través de simulaciones, en las cuales se establece el sistema lógico por computadora en MATLAB, el que es puesto en juego en distintos escenarios para validar el modelo. Si bien no se manipula el ambiente real físicamente, las simulaciones permiten observar el funcionamiento del sistema para verificar hipótesis técnicas en un entorno controlado.

CAPÍTULO 2

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Redes de telecomunicaciones

2.1.1 Concepto

Las redes de telecomunicaciones se refieren a un conjunto de nodos y caminos de transmisión vinculados entre sí que habilitan el diálogo entre artefactos, esquemas o clientes indiferentemente del espacio donde se posicionen físicamente. Estas cuantifican los mensajes de la moderna sociedad digital conectando voz, información y video asequibles y fiables (Riso & Saibene, 2020).

2.1.2 Parámetros de desempeño

Existen algunos parámetros de desempeño en red de telecomunicaciones, los cuales son aspectos críticos para garantizar la calidad y eficiencia en la transmisión de datos, descritos a continuación:

La latencia es el lapso que se demora un paquete de datos en viajar desde el emisor hasta el receptor, en el marco de una red de telecomunicaciones (Quintanilla Mayuri, 2024). Para AMI, una baja latencia es fundamental para la comunicación en tiempo real. Altos índices de latencia reducen la eficiencia en la lectura remota de medidores, la detección de fallas o señales de control enviadas, entre otros procesos (Ajiboye et al., 2024).

El ancho de banda determina la mayor cantidad de datos que una parte de correspondencia puede transmitir en la cantidad de tiempo que se le permita. Para AMI, la cantidad apropiada de ancho de banda empodera la transmisión a la vez que una multitud de mediciones hechas por un

número de milímetros inteligentes conocidas por miles. En el caso de una alta congestión de la cantidad de tráfico de datos, se perdieron muchos datos dentro del sistema o se extendieron causas de retraso y los datos se producen (Fundamentals of AMI, 2025).

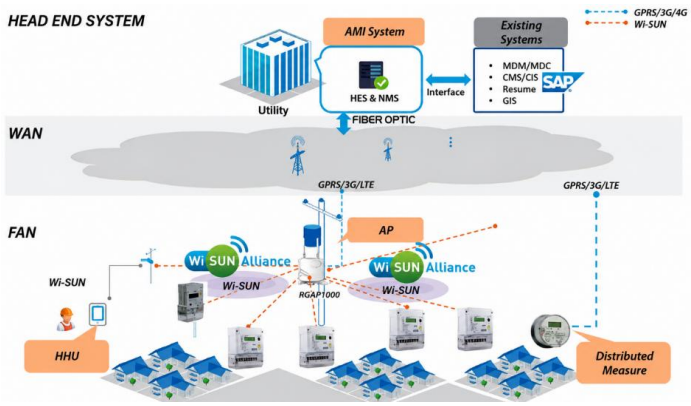
La tasa de error por bit (BER, por sus siglas en inglés) es la proporción de bits enviados que llegan con errores con respecto al total de bits enviados (Quintanilla Mayuri, 2024).

2.2 Infraestructura de medición avanzada AMI

La infraestructura de medición avanzada (AMI, Advanced Metering Infrastructure) es el conjunto de equipos y enlaces con el que la empresa distribuidora recoge, envía y gestiona a distancia y en tiempo real la información de consumo de cada medidor inteligente, gracias a una comunicación en ambos sentidos entre el medidor y la distribuidora (Serrano, 2021). La estructura de un sistema AMI se basa, en su mayoría, en tres niveles: el sistema central (Headend System HES), la red de área amplia (WAN) y la de campo (FAN), como se ilustra en la Figura 2 (E.E. Regional Centrosur C.A., 2024).

Figura 2

Componentes base de la AMI



Nota. Tomado de E.E. Regional Centro sur C.A., 2024.

En FAN, los medidores inteligentes se pueden conectar a los puntos de acceso (AP, Access Point) mediante redes inalámbricas, como Wi-SUN (Wireless Smart Utility Network). El dominio de los AP, a su vez, envía la información al HES mediante WAN utilizando tecnologías GPRS (General Packet Radio Service), LTE (Long Term Evolution) o fibra óptica. El HES, finalmente, se comunica con sistemas de gestión como GIS (Geographic Information System), SAP o MDMS (Meter Data Management System) en el centro de datos. En estos, los datos de medición se consolidan, procesan y analizan para la toma de decisiones (E.E. Regional Centrosur C.A., 2024).

2.2.1 Medidores inteligentes

Los medidores inteligentes (smart meters) se refieren a dispositivos electrónicos de medición en puntos de consumo que tienen una capacidad de registro suficientemente precisa y, con un intervalo temporal adecuado, de la cantidad de energía eléctrica, gas o agua consumida. También tienen la capacidad en enviar información de manera bidireccional (Koukouvinos et al., 2025). Además, se basan en capacidades de medición de energía y presentan sistemas de comunicación y funciones de procesamiento local remoto para admitir en la facturación, gestión de la demanda y el control en redes inteligentes (Sabry, 2022). La Figura 3, se representa ciertas vistas y diagramas de conexión del smart meters.

Figura 3

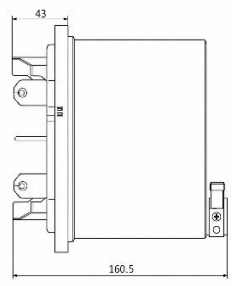
Medidor inteligente



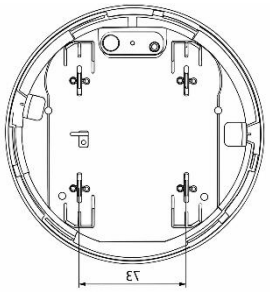
Frontal



Interna

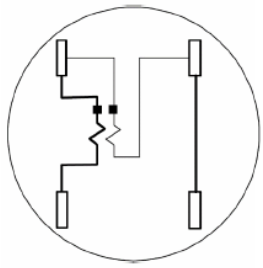


Lateral (FM12S)

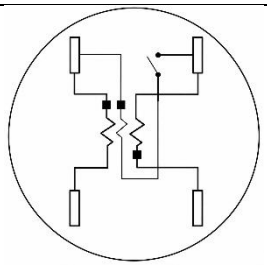


Frontal (conexiones)

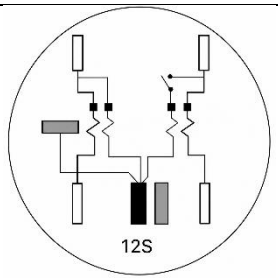
Vistas del medidor inteligente HEXING



FM1S



FM2S



FM12S

Diagramas de conexión del medidor tipo

Nota. Elaboración propia.

2.2.2 Red FAN

FAN es una red local del sistema AMI que conecta los medidores inteligentes a algunos AP, formando una malla topológica capaz de distribuir la carga de datos en el campo. Se encarga de recopilar datos de consumo, alarmas y comandos remotos y utilizando protocolos de baja energía. Además, su eficiencia es esencial para asegurar la confiabilidad y bajar la latencia en la transmisión de datos (Quispe et al., 2024).

2.2.3 Red WAN

Las redes WAN abarcan grandes extensiones geográficas, interconectando ciudades, países e incluso continentes a través de tecnologías como la fibra óptica, los satélites y los enlaces de microondas. Este tipo de red es la base de Internet y subyace a la telefonía y la transmisión de datos entre millones de dispositivos distribuidos por el globo. Su mayor virtud es la cobertura masiva, pero sus desventajas radican en la latencia y los costos de operación, ya que requiere una infraestructura física compleja detrás (Serrano, 2021).

2.2.4 Comunicaciones alámbricas e inalámbricas en AMI

Existe una variedad de tecnologías que aplican comunicaciones alámbricas e inalámbricas para el envío/recepción de información. Con respecto a las AMI, se mencionan las siguientes:

Wi-SUN: Es un estándar de red inalámbrica adecuado para aplicaciones de servicios públicos. El estándar de red Wi-SUN se utiliza con mayor frecuencia en FAN debido a su alta confiabilidad y autoconfiguración, que asegura múltiples saltos entre nodos y resiliencia a fallas. Esta característica contribuye a una mejor cobertura en entornos urbanos y rurales. Wi-SUN es, además, eficiente, escalable y resistente, características que explican su amplio uso en redes de servicios públicos (Quispe et al., 2024).

GPRS: El Servicio General de Radio por Paquetes (GPRS) funciona sobre la red GSM (Global System for Mobile Communications) y usa conmutación de paquetes, de modo que varios usuarios comparten los recursos de radio y la red puede transportar datos además de voz. En otras palabras, en una conexión dedicada, los datos del usuario se colocan en paquetes, y luego se transmite realmente sobre las necesidades del usuario, por ejemplo, el canal de radio (Bima et al., 2020).

3G: Integra en la red móvil la transmisión de voz, datos y video mediante la conmutación de paquetes y de circuitos, y las tasas de descarga variaban, por ejemplo, desde unos pocos kbps hasta varios Mbps (Haq et al., 2023).

4G/LTE: Es una tecnología móvil de 4ta generación, que se caracteriza por transmitir datos más eficientemente gracias a una arquitectura completamente basada en IP, acceso por paquetes, menor demora y uso más eficiente del espectro (Alam et al., 2023).

Fibra óptica: Transporta la información como pulsos de luz modulada a lo largo de hilos muy finos de vidrio o plástico, con lo que alcanza velocidades de datos extremadamente altas con atenuación muy baja (López Flores, 2021).

2.2.5 Gestión de datos de medición (MDMS)

Respecto al sistema de gestión, explica que la información reportada por los medidores inteligentes y transmitida por la infraestructura de telecomunicaciones, debe ser gestionada de forma adecuada para habilitar todas las funcionalidades del AMI. Además, se forma mediante el software de gestión y la plataforma MDMS que ofrece capacidad para el monitoreo, control y automatización de la lectura de los medidores, así como la gestión remota de los cortes y reconexiones, adaptándose a las soluciones de los proveedores y requisitos de la empresa de servicios (Serrano, 2021).

2.2.6 Sistemas, aplicaciones y productos SAP Y CRM

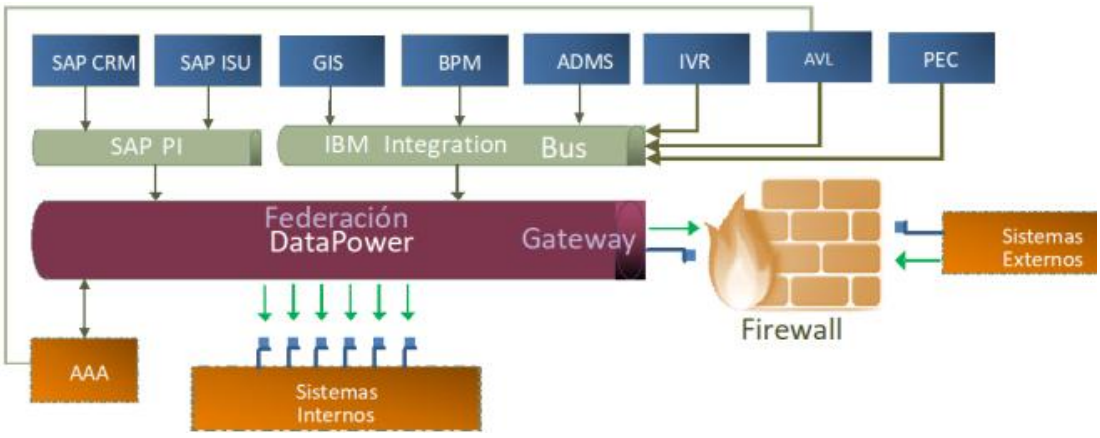
SAP es un sistema de software empresarial de planificación de recursos (ERP) que integra módulos funcionales como finanzas, logística, ventas y recursos humanos en una única plataforma para facilitar el flujo de información en tiempo real (SAP SE, 2025). Dentro del proyecto SIGDE

(Sistema Integrado para la Gestión de la Distribución Eléctrica), la Centro sur dejó su antiguo sistema comercial SICO y pasó a la plataforma CIS/CRM, orientada a la información y la relación con el cliente. Con SAP, la empresa organizó sus procesos de negocio en dos áreas. La primera abarca los medidores y la medición avanzada, las pérdidas comerciales, la facturación, las órdenes de trabajo, la recaudación y la cartera vencida. La segunda corresponde al CRM, que reúne la atención al cliente en ventanillas y por teléfono, entre otros canales (E.E. Regional Centrosur C.A., 2024).

La Figura 4 expresa la arquitectura de interoperabilidad de los sistemas corporativos. Esta plataforma lo que permite que se comuniquen entre sí, como el SAP CRM, SAP ISU (servicios públicos – industria), GIS (Geographic Information System), BPM (Business Process Management), ADMS (Advanced Distribution Management System), IVR (Interactive Voice Response), AVL (Automatic Vehicle Location) y PEC (Portal Empresarial de Clientes) a través de buses de integración, tales como SAP PI (Process Integration) y buses de integración IBM (Ministerio de Energía y Recursos naturales No Renovables [MERNNR], 2020).

Figura 4

Modelo CIM



Nota. Tomado de MERNNR, 2020.

Estos buses enfocan la información a una Data Power Gateway, la cual se encarga de normalizar, asegurar y direccionar los datos de los sistemas internos, los sistemas externos y el módulo de autenticación (AAA). Mediante el firewall, se administran los accesos a sistemas externos para proteger la infraestructura. La arquitectura respeta los lineamientos del modelo CIM, que bajan un estándar para el intercambio de información entre aplicaciones heterogéneas, lo cual facilita la administración integrada de recursos eléctricos e influye en el incremento de la eficiencia operativa de las redes eléctrica inteligente, como el de AMI (MERNNR, 2020).

2.2.7 Protocolos de red AMI

Las ciudades inteligentes responden a estos retos con nuevas tecnologías que vuelven más eficientes la infraestructura y los servicios y, en general, mejoran la vida diaria de sus habitantes. Dentro de este marco, los más relevantes desde hace poco tiempo son los medidores inteligentes. Estos permiten no solo saber el consumo energético de la casa al final de mes, sino que también diaria o casi actualmente. Para este propósito se utilizan tanto los medidores tradicionales y los de tipo inteligentes, estos últimos son una herramienta indispensable en los sistemas energéticos actuales (Valencia & García, 2024).

En Ecuador, la primera norma sobre redes inteligentes y generación distribuida fue la Regulación Nro. ARCONEL 003/18, que fijó los requisitos para que el consumidor instale sistemas fotovoltaicos de hasta 100 kW para su autoconsumo. Después, la Resolución ARCONEL 001/21 amplió a 1 MW el límite de la generación distribuida para autoconsumo y permitió ubicar los equipos dentro o fuera del inmueble del consumidor, con la condición de que estén en el área de concesión de su distribuidora. Así, las centrales pueden instalarse donde el sol u otras fuentes alternas se aprovechen mejor, y baja el consumo tomado de la red convencional. En 2023, la

Agencia de Regulación y Control de Recursos Naturales No Renovables emitió la Resolución 083/23, que elevó a 2 MW la capacidad de estas centrales y abrió varias modalidades de autoconsumo: local o remoto, individual o compartido (Valencia & García, 2024).

En 2023, cerca del 92% de la electricidad del país provino de centrales hidroeléctricas, alrededor del 7% de fuentes térmicas y aproximadamente el 1% de fuentes no convencionales (solar fotovoltaica, eólica, biomasa, biogás y geotérmica). Esta energía abastece la demanda nacional, reduce el impacto ambiental y favorece la exportación de excedentes eléctricos a países vecinos, como Colombia y Perú. Fortalecer los sistemas de medición de consumo eléctrico es, además, una prioridad del Gobierno para disminuir las pérdidas por deficiencias en la transmisión, distribución y comercialización (Valencia & García, 2024).

Según el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, las pérdidas son uno de los problemas más frecuentes en el sector. En este sentido, se han desarrollado ensayos piloto de implementación de medición inteligente; sin embargo, todavía no se cuenta con un modelo para implementación a nivel país. También, se establecieron medidas para limitar la comercialización de equipos ineficientes, promover la sustitución de medidores obsoletos y modernizar las redes. Estas acciones promueven la eficiencia energética con la utilización de instrumentos de medición más avanzados, los cuales permiten una administración más efectiva del consumo y ahorro económico. Además, estos sistemas sirven para mitigar errores de facturación y otras dificultades en la administración de información, lo que persuade a las empresas a implementar tecnologías que impliquen viabilidad económica y sostenibilidad. De este modo, se minimizan los costos en relación con las pérdidas de energía (MERNNR, 2020).

2.2.8 Desafíos en la seguridad y almacenamiento de información

Los riesgos de seguridad que enfrentan los sistemas AMI son reales. Pueden venir de ataques con fines terroristas o de personas que buscan evitar las regulaciones. Sea cual sea el motivo, el acceso no autorizado, la falsificación o interrupción de la información y, sobre todo, el control ilegítimo de los medidores inteligentes afecta gravemente al servicio AMI. Como posibles amenazas de seguridad directas al sistema AMI, se tiene lo siguiente (MERNNR, 2020):

Divulgación: cuando alguien accede sin autorización a la información, los datos dejan de ser confidenciales.

Engaño o fraude: el sistema recibe y da por válidos datos falsos.

Interrupción: la desconfianza de información correcta.

Usurpación: el control no autorizado de una parte del sistema.

2.3 Lógica difusa

La lógica difusa (fuzzy logic) amplía la lógica clásica. Además, tiene como finalidad modelar situaciones donde las fronteras de verdad y falsedad no son nítidas, sino borrosas o graduales. Mientras que la lógica estándar se basa en dos valores binarios, (0 = falso y 1 = verdadero), la lógica difusa admite cualquier valor intermedio dentro del intervalo [0,1] (Armas, 2022).

2.3.1 Variable lingüística

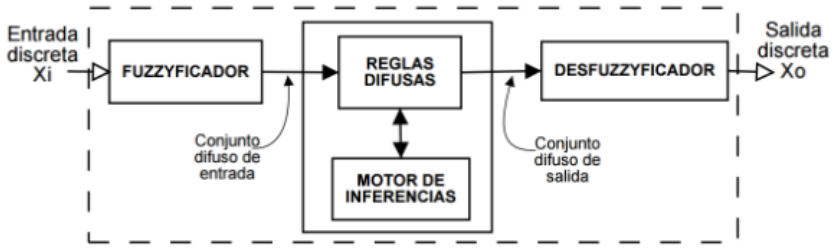
Una variable lingüística también puede ser considerada como un conjunto de caracteres léxicos legibles como palabras, colores, símbolos o sonidos que puedan representar y comunicar en forma sencilla el estado o condición de un sistema (Armas, 2022).

2.3.2 Componentes

A través de la Figura 5 se indica los componentes de un modelo basado en lógica difusa, descritos a continuación (Sancho, 2025):

Figura 5

Esquema de lógica difusa



Nota. Tomado de Sancho, 2025.

Fuzzificación

La operación de fuzzificación implica una conversión cualitativa de datos de entrada precisos (datos reales) en sus equivalentes cualitativos en conjuntos difusos. Para ello, es necesario utilizar funciones de pertenencia, independientemente de qué tipo sean. Pueden ser funciones triangulares, trapezoidales, entre otras; sin embargo, 2 factores deben estar presentes como la razonabilidad y configuración.

Reglas difusas (base de conocimientos)

La base de conocimientos se refiere a la definición de los conjuntos difusos y las reglas lingüísticas previamente establecidas por expertos. Incluye la forma en que se define alto o bajo y las acciones que se deben tomar después. Esta base contiene la experiencia y, por lo tanto, es el núcleo desde el cual el sistema puede razonar.

Motor de inferencia

El mecanismo de inferencia es la parte de un sistema difuso que aplica reglas base para relacionar entradas con respuestas específicas, seleccionando la condición de operación más adecuada. Inferencia es el proceso por el cual se interpreta el sistema, se determina la mejor salida posible y se eligen las funciones de membresía aplicables de su base de conocimiento para generar la respuesta apropiada (Armas, 2022).

Desfuzzificación

En esta etapa, la salida difusa del motor de inferencia se transforma en un valor nítido, es decir, en un número concreto que se puede usar. Los métodos más comunes incluyen el centroide y la media de máximos.

2.3.3 Operaciones

A través de la lógica difusa, se opera mediante valores intermedios entre 0 y 1, el cual extiende a la lógica booleana tradicional. Eso quiere decir que los operadores AND, OR y NOT, son redefinidos para operar sobre grados de pertenencia difusos, tal como se establece en la Ecuación 1 (Chiliquinga Sampedro & Castillo Fiallos, 2024).

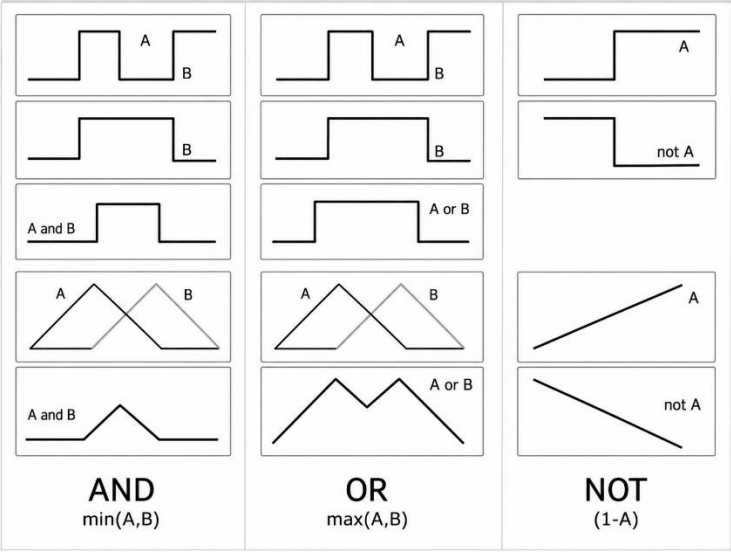
$$\begin{cases} U_{A\wedge B}(x) = \min\left(U_A(x), U_B(x)\right) \\ U_{A\vee B}(x) = \max\left(U_A(x), U_B(x)\right) \\ U_{\tilde{A}}(x) = 1 - U_A(x) \end{cases}$$

Ecuación 1

En la Figura 6 se ilustra el comportamiento ante el uso de operación de lógica difusa, basado en una función triangular.

Figura 6

Operaciones de lógica difusa



Nota. Tomado de Chiliquinga Sampedro y Castillo Fiallos, 2024.

2.3.4 Teoría de efectos olvidados (TEO)

TEO es un método desarrollado para revelar relaciones indirectas entre causas y efectos en un determinado sistema y, particularmente, para revelar aquellas relaciones que no son obvias desde el principio o son típicamente pasadas por alto en una investigación nueva y normal. Este método es útil para apoyar la toma de decisiones en entornos complejos en los que no sería suficiente tener una idea de los componentes básicos y directos del sistema y podría necesitarse una orientación adicional en términos de su tarea relativa. En otras palabras, TEO se dirige a esos

efectos olvidados u obviados y, al hacerlo, revela el estado sistémico del sistema y sus componentes. A continuación, se desglosa el siguiente procedimiento (Anido & Ancizar, 2021):

Paso 1. Cada elemento de A puede contribuir a diversos grados en cada elemento de B a través de lo que puede expresarse como una función de pertenencia en el rango [0,1]. Los conjuntos A y B se expresa bajo la Ecuación 2.

$$\begin{cases} Causas\ A = \{a_i\}, & i = 1,2,\dots,n \\ Efectos\ B = \{b_j\}, & j = 1,2,\dots,m \\ \mu: A \times B \to [0,1]\ para\ \forall(a_i, b_j) \in A \times B, \mu(a_i, b_j) \in [0,1] \end{cases}$$ Ecuación 2

Paso 2. Se construye una matriz de incidencia M de orden $n \times m$ donde cada celda $\mu(a_i, b_j)$ manifiesta el grado de relación de cada causa sobre los efectos considerados, entre un elemento de A y uno de B. Esta matriz registra los grados de incidencia directa y constituye la base para las operaciones posteriores del método de efectos olvidados.

$$M = [\mu_{a_i b_j}] \in [0,1]^{n \times m}$$ Ecuación 3

Paso 3. Una forma de detectar efectos no observados en el primer paso es mediante un tercer conjunto C, donde cada c_k se presenta como un puente entre A y B, tal como se indica en la Ecuación 4.

$$\begin{cases} C = \{c_k\}, & k = 1,2,\dots,p \\ M = [\mu_{a_i b_j}] \in [0,1]^{n \times m}\ (relación\ A \to B) \\ N = [\mu_{b_j c_k}] \in [0,1]^{m \times p}\ (relación\ B \to C) \end{cases}$$ Ecuación 4

Paso 4. Se realiza un cálculo de la matriz de composición P la cual refleja la relación entre A y C por medio de una operación de convolución tipo máximo-mínimo dada por la Ecuación 5.

$$\begin{cases} \mu(a_i, c_p)_P = \bigvee_j \left[\mu_{a_i b_j} \wedge \mu_{b_j c_k}\right] \\ P = \text{M o N} \end{cases}$$

Ecuación 5

Paso 5. Para capturar los efectos indirectos y reflexivos, se forjan 2 matrices que definen las causas y efectos que influyen en la Ecuación 6.

$$\begin{cases} A = \left[\mu_{a_i a_j}\right] \in [0,1]^{n \times n} \rightarrow \mu_{a_i a_j} = \begin{cases} 1, & si\ i = j \\ 0, & si\ i \neq j \end{cases} \\ B = \left[\mu_{b_j b_k}\right] \in [0,1]^{m \times m} \rightarrow \mu_{b_j b_k} = \begin{cases} 1, & si\ j = k \\ 0, & si\ j \neq k \end{cases} \end{cases}$$

Ecuación 6

Paso 6. Una vez más se realiza la convolución máximo-mínimo, pero de 3 matrices, a fin de conseguir los efectos de 2da generación M^*, indicado en la Ecuación 10. Esta matriz muestra relaciones que no fueron consideradas explícitamente; no obstante, pueden influir en la toma de decisiones.

$$M^* = AoMoB$$

Ecuación 7

Paso 7. Por último, se identifica la matriz de los efectos olvidados $O(a_i, b_j)$, resultante de la diferencia entre M^* y M. A medida que se incrementa este valor, mayor es el riesgo de que ese vínculo.

$O(a_i, b_j) = M^* - M$	Ecuación 8

2.4 Sistemas difusos en MATLAB

La lógica difusa de esta investigación se desarrolló basado un script propio en MATLAB, sin recurrir a la aplicación Fuzzy Logic Designer del Fuzzy Logic Toolbox. El script define las matrices de entrada M (Causa-Efecto), A (Causa-Causa) y B (Efecto-Efecto) como arreglos numéricos normalizados entre 0 y 1, que recibe las matrices principales y devuelve el resultado de la composición C = A∘M o M* = C∘B, según corresponda.

La función maxmin_comp realiza la combinación de causa i y efecto j utilizando el ciclo for dos veces, realizando el cálculo del valor mínimo entre los elementos correspondientes de ambas matrices para cada variable intermedia k y acarreando el valor máximo de esos mínimos, siguiendo la misma lógica descrita como pseudocódigo en la sección 4.3. A partir de las matrices resultantes, el script genera de forma automática los mapas de calor (heatmap, imagesc), los gráficos de barras de mayor y menor incidencia (bar), la tabla de efectos olvidados resaltada (rectangle y text) y la exportación de todas las matrices y del listado de efectos olvidados a un archivo Excel mediante array2table y writetable (Vidal-Martínez et al., 2025).

El software MATLAB tiene en sus plugin Fuzzy Logic Toolbox, que permite desarrollar sistemas de inferencia difusa (FIS) de tipo Mamdani, Sugeno o tipo-2 (Vidal-Martínez et al., 2025). Sin embargo, esa herramienta está pensada para sistemas de entrada-salida tipo control, mientras que el problema abordado en este trabajo es relacional. La incidencia entre pares de causas y efectos, por lo que se seleccionó por implementar directamente la composición máximo-mínimo en código, en lugar de construir un FIS con la aplicación gráfica del toolbox (MathWorks, 2024; Vidal-Martínez et al., 2025).

CAPÍTULO 3

3. SITUACIÓN Y RETOS OPERATIVOS DE LAS REDES ELÉCTRICAS DE LA CENTRO SUR C.A.

3.1 Plan Estratégico de la Centro sur C.A.

En su Plan Estratégico para el período 2022-2025, la E.E. Centro sur fijó como objetivo ser una entidad líder en Latinoamérica. Para ello, se propone prestar servicios de energía eléctrica y alumbrado público de excelencia y promover una cultura centrada en el cliente y un enfoque social fuerte. Para lograr esta misión, la institución definió los siguientes ejes estratégicos: la transformación organizacional, la modernización integral de la red de infraestructura, la adopción de soluciones digitales de vanguardia y la mejora de la gestión de proyectos (E.E. Regional Centrosur C.A., 2025a).

Uno de sus objetivos prioritarios es modernizar la red eléctrica. Esto supone incorporar comunicaciones actuales y sensores inteligentes que vigilen la red y actúen de forma preventiva ante situaciones imprevistas, además de procesar y analizar grandes cantidades de datos para mejorar la relación entre los agentes generadores y los usuarios conectados al SDE. Con estas medidas se busca una red más confiable, eficiente y resiliente, que opere con mayor seguridad y sea sostenible en el tiempo (E.E. Regional Centro sur C.A., 2025a).

3.1.1 Planificación de la distribución en un ambiente caracterizado por el cambio tecnológico y la innovación.

Con el avance del tiempo, E.E. Centro Sur C.A. ha sabido posicionarse como una de las empresas más representativas a nivel nacional en cuanto a liderazgo, visión y compromiso en la

gestión eléctrica. De la mano del talento humano de su personal técnico y administrativo, la institución ha enfocado sobre todo su atención en orientar sus decisiones para contar con una infraestructura eléctrica moderna y eficiente de alto desempeño, con un enfoque en la planificación del corto y largo plazo (E.E. Regional Centro sur C.A., 2025b).

En el presente, se ha creado un proceso de transformación sin precedentes en la industria eléctrica impulsado por la digitalización, la energía renovable y un cambio en la adición de recursos energéticos distribuidos. Todo esto ha desatado una redefinición de los modelos de operación y planificación para hacer más tecnológica y sostenible el entorno. En este sentido, la distribución eléctrica también requiere adaptarse a entornos tecnológicamente cambiantes, así como a entornos sociales y económicos, para fomentar una evolución integral del sistema de energía (E.E. Regional Centro sur C.A., 2025b).

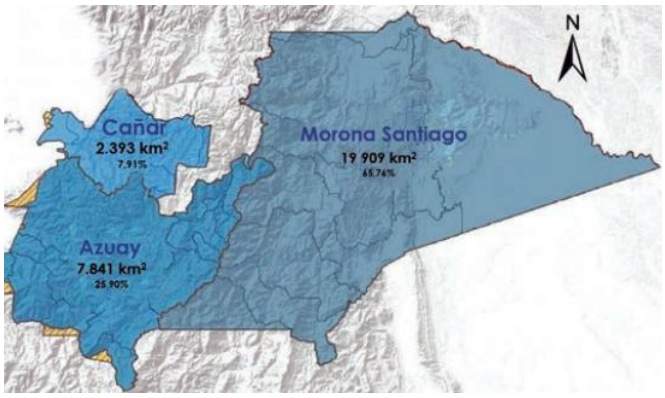
3.1.2 Área de concesión

El área de concesión de Centro sur corresponde a las provincias del Azuay con 7.840,72 km^2 (dando una participación del 25,90%), Cañar con 2.393,32 km^2 (equivalente al 7,91%), Morona Santiago presenta un área de 19.908,55 km^2 (65,76%) y por último zonas parciales de área 130,81 km^2 (representando un 0,43% de participación); dando por total de 30.273,40 km^2, tal como se detalla en la Tabla 1 (E.E. Regional Centro sur C.A., 2025b).

Tabla 1

Área de concesión de la Centro sur C.A.

Provincia	Área (km^2)	Intervención (%)
Azuay	7.840,72	25,90
Cañar	2.393,32	7,91
Morona Santiago	19.908,55	65,76
Zonas parciales	130,81	0,43
Total	30.273,4	100,00



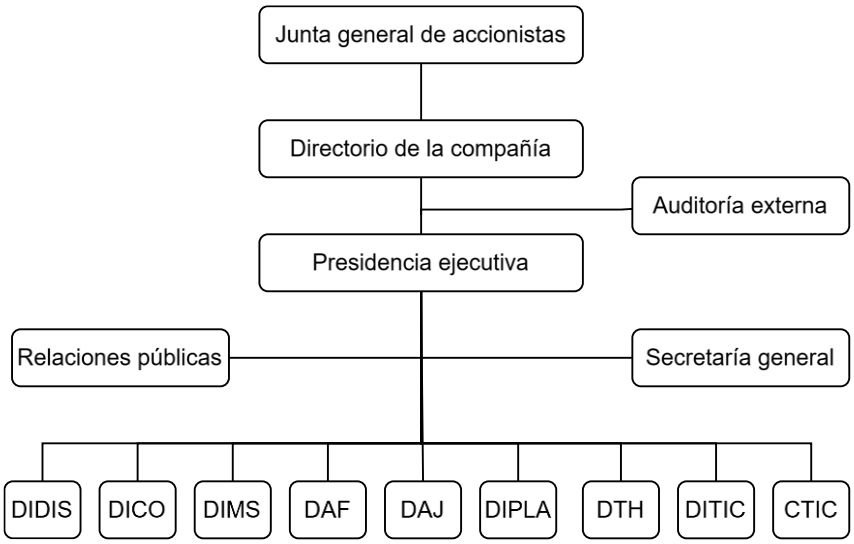
Nota. Tomado de E.E. Regional Centrosur C.A., 2025b.

3.1.3 Estructura organizacional

La E.E. Centro Sur C.A. cuenta con una Presidencia Ejecutiva como máxima autoridad administrativa, la cual rinde informes al Directorio. La estructura institucional se organiza en 9 direcciones principales: Dirección de Distribución (DIDIS), Dirección de Comercialización (DICO), Dirección de Morona Santiago (DIMS), Dirección Administrativa Financiera (DAF), Dirección de Asesoría Jurídica (DAJ), Dirección de Planificación (DIPLA), Dirección de Talento Humano (DTH), Dirección de Tecnología de la Información y Comunicaciones (DITIC) y Centro Temporal de Implementaciones y Competencias (CTIC), tal como se visualiza en la Figura 10 (E.E. Regional Centro sur C.A., 2025a).

Figura 7

Organigrama Centro sur



Nota. Tomado de E.E. Regional Centro sur C.A., 2025a.

CENTROSUR ejerce sus competencias según la Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica (LOSPEE), su Reglamento General y su Estatuto Social vigente. Como empresa autorizada por el Estado para prestar el servicio público de electricidad en Azuay, Cañar y Morona Santiago, cumple sus actividades bajo criterios de obligatoriedad, eficiencia, responsabilidad, continuidad, calidad, accesibilidad y universalidad del servicio.

Centro sur orienta su gestión a garantizar la prestación del servicio eléctrico, manteniendo condiciones de regularidad y calidad para los usuarios en su zona de concesión. En el siguiente gráfico se detallan las competencias institucionales de Centro sur, así como las atribuciones específicas y facultades legales que fundamentan su gestión dentro del servicio público de energía eléctrica como se puede observar en la tabla 2.

Tabla 2

Competencias, atribuciones y facultades institucionales

Competencia	Atribuciones	Facultad
1. Distribución y Comercialización de Energía Eléctrica	• Operar, mantener y construir sistemas de distribución de alto, medio y bajo voltaje • Expandir el sistema en función de lineamientos de planificación del MAE • Satisfacer toda demanda de servicio dentro del área de prestación de servicio • Facturar y recaudar valores por servicio de energía, APG y peajes • Suscribir contratos de compraventa de energía bajo condiciones regulatorias	Planificación / Ejecución
2. Alumbrado Público General (SAPG)	• Planificar, construir, operar y mantener sistemas de iluminación en vías públicas • Suministrar energía para semaforización y seguridad ciudadana • Implementar plan de renovación progresiva con tecnología LED y/o solar (hasta 2030)	Planificación / Ejecución
3. Gestión Comercial y Atención al Cliente	• Instalar sistemas de medición técnica y comercial, realizar lectura de consumos • Emitir facturas mensuales claras y accesibles • Operar canales de atención 24/7 para consultas, solicitudes y reclamos • Resarcir daños en bienes del consumidor por fallas imputables a calidad del servicio • Garantizar cumplimiento de índices técnicos y comerciales de calidad del servicio	Ejecución / Control-Gestión
4. Infraestructura y Desarrollo Técnico	• Garantizar la calidad del producto y continuidad del suministro según estándares regulatorios • Planificar para permitir libre acceso a redes para generadores, auto generadores y grandes consumidores • Diseñar y construir infraestructura eléctrica conforme necesidades territoriales • Cumplir permisos ambientales y fomentar uso eficiente de energía	Planificación / Ejecución
5. Servicios Tecnológicos y Telecomunicaciones	• Diseñar, instalar, operar y explotar Servicios Finales, Valor Agregado y Portadores de Telecomunicaciones relacionados con SPEE • Ofrecer televisión y radio por suscripción o bajo demanda • Proveer servicios de geoposicionamiento satelital relacionados con actividad empresarial	Ejecución
6. Facultades Legales Especiales	• Ejercer jurisdicción coactiva para cobro de deudas vencidas por servicio eléctrico y APG • Suspender suministro por falta de pago, instalaciones clandestinas o manipulación de medidores • Imponer sanciones a consumidores por infracciones contractuales según debido proceso • Establecer servidumbres forzosas y declarar utilidad pública de bienes necesarios para la red • Recaudar valores para terceros (tasas/impuestos en planillas) • Recaudar contribuciones para construcción de infraestructura eléctrica de terceros	Ejecución / Control-Gestión

Nota. Elaboración propia.

3.1.4 Exigencias para el SDE

El sistema eléctrico en el que operan las distribuidoras enfrenta un entorno energético que impone crecientes desafíos técnicos y ambientales, y disposiciones regulatorias más exigentes.

Bajo este escenario, la E.E. Centro sur C.A. guía su gestión a una distribución moderna, digital, resiliente, y sustentable, ante los desafíos de cambio climático, transición energética y nuevas tendencias y demandas de los consumidores. Los SDE actuales deben operar en un entorno dinámico y colaborativo. Además, deben permitir ciertos aspectos, tales como (E.E. Regional Centro sur C.A., 2025b, 2025a):

La integración de la generación distribuida, cada vez con mayor relevancia dada su procedencia de fuentes de energía renovables.

Tener en cuenta el aumento de electrificación debido al Tranvía y a la movilidad (servicio de carga a vehículos eléctricos) local y regional.

A partir de las tecnologías digitales, brindar soluciones basadas en 3 situaciones como el monitoreo, operación y analítica predictiva.

Asimismo, los proyectos deben ser versátiles y reacción y, a la vez, prever situaciones de incertidumbre y preservar tanto el abastecimiento continuo como la evolución de la red en torno al prosumidor y otros esquemas de tratamiento de distribuidoras, consumidores y generadores.

3.1.5 Realidades que condicionan la transición a nivel regional y nacional

En el proceso de transición a sistemas de distribución más modernos, también hay varios problemas. Cada uno de ellos está directamente relacionado con la base nacional y regional existente. Entre los problemas más significativos están la escasez de infraestructura en las áreas urbanas y rurales, la falta de fondos para la automatización de las redes, la restricción gubernamental exceso de dependencia y la necesidad de modernizar el marco regulatorio actual de acuerdo con las nuevas tecnologías en el campo. Hasta ahora, se han logrado los primeros resultados en las áreas del desarrollo de la red inteligente, el inicio de la electromovilidad y el uso

generalizado de los contratos de suministro de sistemas fotovoltaicos y la inclusión activa del regulador y partes interesadas externas en el proceso (E.E. Regional Centro sur C.A., 2025b).

3.1.6 Área de la empresa a cargo de la instalación de medidores de energía

Con la migración del antiguo Sistema Comercial (SICO) a la nueva plataforma del centro de atención al cliente y sistema de información de relación con el cliente, derivada de los procesos del SIGDE, la Centro sur ha adaptado la estructura de procesos basaba en un estándar de mejora continua y está focalizado en las actividades relacionadas con la facturación del sistema SAP. En términos de dominios funcionales, la utilización del sistema SAP en la Centro sur ha incorporado un modelo de procesos de negocio, el cual ha sido estructurado en dos dominios funcionales. El primero agrupa el manejo de los medidores y de la medición avanzada, el control de pérdidas comerciales, la facturación, los pedidos de trabajo, la recaudación y el seguimiento de la cartera vencida. El segundo reúne las funciones del módulo CRM (Customer Relationship Management): atención presencial y telefónica, autoservicio telefónico, oficinas virtuales, marketing, campañas y programas, gestión de colas de trabajo y manejo de datos de clientes, entre otras (Castillo & Araujo, 2022).

Castillo y Araujo (2022) sostienen que la adopción de SAP CIS/CRM mejoró el desempeño de la empresa, con una disminución del 55,47% en el error de facturación y el 9,71% de aumento en la demanda de energía facturable. De acuerdo con los autores, se logró gracias a las capacidades y al recurso humano que asegura la implementación exitosa del sistema en la empresa. El personal de los departamentos de lectura y facturación goza de una vasta experiencia, especialmente capacitado y comprometido con los objetivos de la empresa.

3.2 Contadores AMI en la actualidad

A nivel nacional, la modernización de la medición eléctrica avanza de forma desigual entre las empresas distribuidoras del Ecuador. Al cierre de 2025, las pérdidas de energía a escala nacional representaron el 5,90 % por causas técnicas y el 9,96 % por pérdidas comerciales o "pérdidas negras" (conexiones ilegales, manipulación de medidores y errores de facturación), lo que equivale a un total cercano a 3 245 GWh no facturados; frente a este panorama, el Plan Maestro de Electricidad del Ecuador plantea como meta reducir las pérdidas totales al 9 % para el año 2032 mediante, entre otras medidas, la instalación de medidores inteligentes con capacidad de detección remota de manipulación (Ecuavisa, 2026). En este proceso, la Empresa Eléctrica Quito ha instalado cerca de 22 000 medidores inteligentes, tanto en clientes con facturación masiva especial como en transformadores de distribución (Empresa Eléctrica Quito [EEQ], 2023), mientras que CNEL EP ha instalado más de 114 000 medidores AMI en distintos sectores de Guayaquil (El Universo, 2022). Frente a estas cifras, la Empresa Eléctrica Regional Centro sur es una de las distribuidoras que más ha avanzado en el país.

Al realizar un diagnóstico del sistema de medición inteligente, me parece pertinente considerar el alcance real de la infraestructura AMI. Actualmente Centro sur C.A. han instalado 460.684 medidores AMI, una cifra que no responde solo a un avance tecnológico, sino que también representa un verdadero desafío operativo. A partir de ello, se ha determinado que la correcta instalación y comunicación de los medidores son elementos clave para garantizar la eficiencia del sistema.

Esta es una de las condiciones bajo las cuales es posible recurrir a herramientas de análisis más avanzadas, como la lógica difusa, para establecer qué variables afectan realmente al

funcionamiento del sistema AMI. Así, se utilizará esta herramienta a fin de evaluar valores intermedios de rendimiento total que no se reflejan en las evaluaciones convencionales porque son relevantes para los resultados en una forma dispersa y compleja. Aquí se menciona de la capacidad del método basado en el efecto olvidado para establecer efectos difusos y relaciones indirectas entre causas y consecuencias. Por lo tanto, la necesidad de recurrir a ambos tipos de análisis es un enfoque adecuado para identificar, analizar y eliminar problemas técnicos.

CAPÍTULO 4

4. DISEÑO METODOLÓGICO

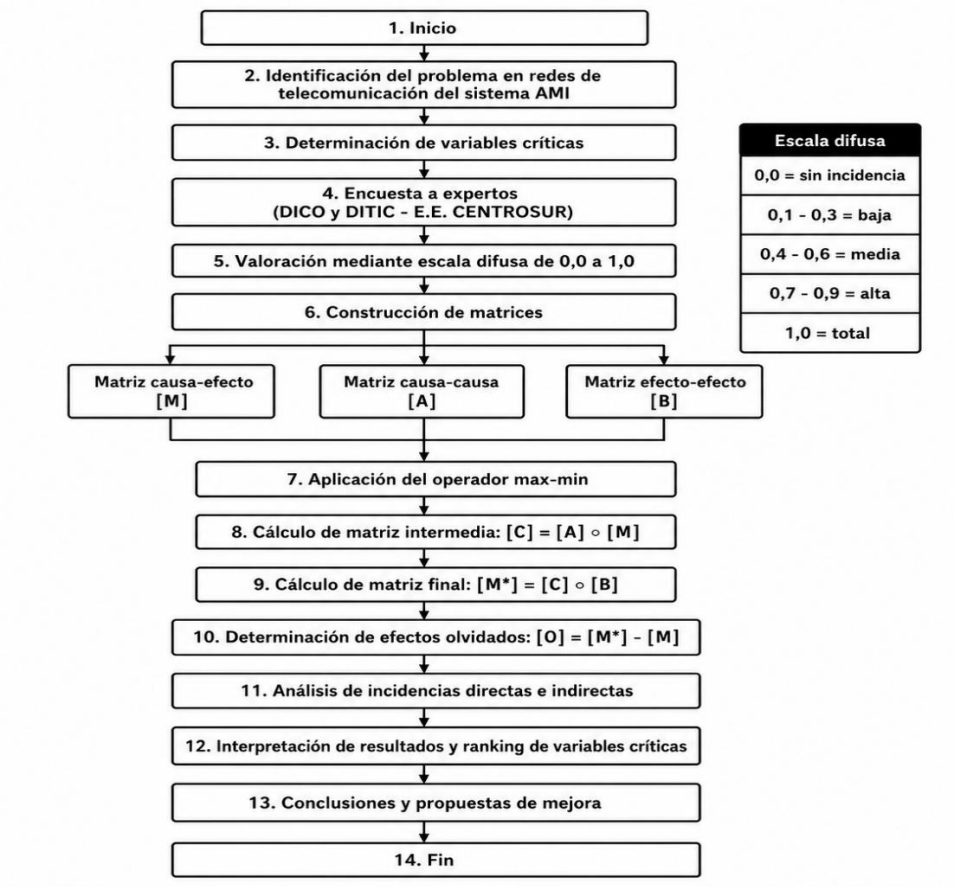
4.1 Diseño del sistema difuso

El diseño propuesto en la Figura 8, es una alternativa adecuada para representar la incertidumbre y la subjetividad del análisis del desempeño de los sistemas AMI aplicando lógica difusa relacional. Basado en los efectos y las causas identificadas, el modelo se construye consistente, a través de matrices difusas normalizadas, que representa el grado de la relación de causalidad e influencia entre las variables, permitiendo la exploración de las relaciones directas e indirectas a través del operador Max-Min compuesto.

Además, los resultados pueden identificar efectos acumulativos y relaciones que no son obvias para el análisis tradicional basado en el determinismo, proporcionando una imagen más amplia del comportamiento del sistema. El modelo también se construye a partir de variables críticas seleccionadas cuyos patrones de interacción difusos se analizan; La visualización resultante facilita la interpretación del rendimiento del sistema AMI y guía los esfuerzos para mejorar la planificación, operación y confiabilidad de las redes de telecomunicaciones.

Figura 8

Diseño del sistema difuso



Nota. Elaboración propia.

4.2 Aplicación de la TEO

El método de Efectos Olvidados se emplea aquí para estudiar de forma integral cómo se comportan los medidores AMI. Esto resulta en posibilidad de identificar áreas críticas que necesitan ser intervenidas, jerarquizar prioridades en las acciones de mejora y sustentación de la planificación y operación de las redes de telecomunicaciones asociadas. Además, permitirá una mejor visión más cercana a la realidad del desempeño del sistema, en sintonía con los elementos

requeridos hoy por las distribuidoras de energía y los marcos regulatorios de uso de las tecnologías AMI.

4.3 Identificación de variables

Diversos autores presentados, fundamentan ciertas causas y efectos conocidos que impactan en la eficiencia AMI, descritos a continuación:

Si la infraestructura de comunicación no es confiable, con frecuencia se produce un corte en la conexión de los datos recopilados entre medidores, concentradores y centros de control. Esto termina afectando la operación ininterrumpida del sistema AMI. Como Sidhartha et al. (2020), la caída central del sistema de los DCU (data concentrator units) o de la red eliminaron la información en tiempo real y reduce la visibilidad del estado del sistema. A medida que se degradan las interrupciones, la confiabilidad del sistema AMI también se va reduciendo simultáneamente. En consecuencia, el sistema no es capaz de respaldar aún más los procesos de administración energética y promoción de energía, la facturación y la toma de decisiones técnicas.

Según Barai et al. (2015), las arquitecturas centralizadas de MDMS no fueron adecuadas para asegurar la capacidad de escalabilidad del sistema para gestionar el crecimiento progresivo del sistema AMI generado. Mientras tanto, un sistema diseñado alrededor de un único servidor o incluso una infraestructura operativa mínimamente distribuida crea cuellos de botella en la infraestructura de procesamiento y almacenamiento. A su vez, esa es la fuente de retrasos en el tiempo de actualización de registros, la pérdida de datos y la disminución de la capacidad del sistema para responder. Como resultado, una arquitectura de MDMS inescalable impidió que un sistema de medición inteligente brinde el rendimiento general necesario y reduzca la eficiencia de la empresa eléctrica.

La transmisión y la reconexión de datos en las redes AMI resultan en fallas que llevan a la pérdida de información, interrupciones en la comunicación y lecturas incompletas. Abrahamsen et al. (2021) y Sidhartha et al. (2020) argumentaron que los entornos con un alto número de nodos y diferentes condiciones ambientales también empeoraron la situación. Además, Dinesh et al. (2024) señalaron la influencia de las fallas mencionadas en los procesos de monitoreo remoto, retrasan la facturación y degradan la confiabilidad de los medidores.

Otra de las falencias mencionadas por Dinesh et al. (2024), se refirieron a las múltiples fuentes de errores debido a los procesos de actualización de firmware durante las pruebas de AMI. Los autores mencionaron que los errores afectan a los procesadores de hardware y software propensos a sufrir vulnerabilidades.

Los problemas físicos también afectan el rendimiento de los medidores; según Dinesh et al. (2024) indicaron la existencia de fallas debido a la falta de respuesta a comandos y a la desconexión sin conocer la procedencia de este. Como resultado de ello, los dispositivos no cumplen con la tarea asignada.

Potter y Rosinski (2023) destacaron que la falta de regulaciones claras restringe la extensión coherente de AMI. La regulación afecta a los estándares técnicos y operativos. Un marco regulador insuficiente crea múltiples implementaciones.

Desde la perspectiva de Serrano (2021) señaló que los sistemas AMI usan muchas tecnologías inalámbricas y con cable. Estos suelen verse afectados por interferencias electromagnéticas y ruido, lo que a su vez afecta la calidad de la señal y la estabilidad.

Sidhartha et al. (2020) examinaron los ataques como MITM (man-in-the-middle), spoofing y reply attacks en sistemas AMI que comprometieron la confidencialidad, integridad y

disponibilidad de la información transmitida. Estos ataques posibilitaron la interceptación, alteración o reenvío de los paquetes de datos en los procedimientos de comunicación entre medidores, concentradores y sistemas centrales. Como resultado, se produjeron la manipulación o pérdida de los datos de medición, lo que implicó en la precisión de los registros energéticos y la confiabilidad de los registros del sistema. También, dichas vulnerabilidades posibilitaron la realización de fraudes energéticos, accesos no permitido y fallas en los procedimientos de facturación y control de operación.

Niveles de seguridad del protocolo DLMS/COSEM (Device Language Message Specification/Companion Specification for Energy Metering): el protocolo estipuló varios niveles de seguridad que debieron cumplirse en la autenticación y la protección de las comunicaciones entre medidores y sistemas centrales. Sidhartha et al. (2020) subrayaron que la configuración débil de contraseñas o contraseñas transmitidas en texto plano es uno de los principales componentes de los accesos no autorizados. Tal gestión deficiente de la criptografía da como resultado fallas en la autenticación, intrínsecamente inseguridad del sistema y comunicaciones

Según Abrahamsen et al. (2021), los AMI requirieron un cierto nivel mínimo de ancho de banda para permitir la transmisión ininterrumpida de datos. La congestión en la red se produce cuando la capacidad de transmisión es baja. La congestión se produjo especialmente en los segmentos WAN y NAN (red de área vecinal, por sus siglas en inglés), lo que afectó toda la red por completo. La congestión contribuyó a un aumento en la latencia, lo que resultó en una entrega retrasada de la información y una disminución en la fiabilidad de los elementos internos. Por tanto, el bajo ancho de banda limitó la capacidad de cada empresa eléctrica de facturar clientes, supervisar su consumo y tomar medidas apropiadas.

Dinesh et al. (2024) afirmaron que existe interrupciones en la reintegración automática de los procedimientos después de los recargos, cortes externos o intentos de reimplementación. En ocasiones, los medidores tampoco cumplen con los plazos del acuerdo del nivel de servicio, lo que dificulta la reacción del sistema. Estos errores tuvieron un impacto negativo en la normalización de la energía eléctrica y disminuyen la calidad de la experiencia del cliente.

Abrahamsen et al. (2021); por otro lado, hicieron hincapié en la necesidad de implementar mecanismos de QoS diferenciada para aplicaciones críticas, como AMI, SCADA y sistemas de automatización. Sin estos mecanismos, la red eléctrica carecería de segmentación suficiente y de políticas de priorización y detección, lo que significó que la competencia entre los diferentes tipos de tráfico es imposible. Al igual que en la computación en la nube, esto daría lugar a que los paquetes de datos más importantes se retrasaran, a su vez esto influiría negativamente en la estabilidad y eficiencia operativa del cielo. Por lo tanto, ante una inadecuada gestión de la QoS dejaría a la red incapaz de responder a eventos críticos.

Tabla 3

Causas identificadas para el análisis de sistemas AMI

Código	Causa	Referencia	Evidencia bibliográfica sintetizada	Justificación de la variable en la investigación
C1	Infraestructura de comunicación inestable	Sidhartha et al. (2020)	La caída de unidades concentradoras o de la red elimina la información en tiempo real y reduce la visibilidad del sistema, afectando la operación ininterrumpida.	Esta causa afecta directamente la confiabilidad y disponibilidad de la comunicación, impactando en la pérdida de datos, desconexión de medidores y alta latencia, lo cual es crítico para la operación del AMI.
C2	Arquitectura MDMS no escalable / limitada	Barai et al. (2015)	Las arquitecturas centralizadas de MDMS crean cuellos de botella, retrasos, pérdida de datos y no son adecuadas para gestionar el crecimiento progresivo del sistema.	Una arquitectura no escalable limita el procesamiento y el almacenamiento, lo que genera congestión y retrasos, lo que dificulta el rendimiento general del sistema de medición inteligente.
C3	Fallas en transmisión y reconexión de datos	Abrahamsen et al. (2021); Sidhartha et al. (2020); Dinesh et al. (2024)	La transmisión y reconexión de datos en entornos con muchos nodos fallan, resultando en pérdida de información, lecturas incompletas y degradación de la confiabilidad.	Estas fallas interrumpen el monitoreo remoto, retrasan la facturación y disminuyen la confiabilidad de los medidores, afectando la integridad de los datos.
C4	Falla en actualización de firmware	Dinesh et al. (2024)	Los procesos de actualización de firmware son propensos a errores que afectan a los procesadores de hardware y software, creando vulnerabilidades.	Los errores en la actualización introducen fallas operativas y vulnerabilidades de seguridad en los dispositivos, comprometiendo la estabilidad del sistema.
C5	Hardware defectuoso en medidores o concentradores	Dinesh et al. (2024)	Los problemas físicos, como la falta de respuesta a comandos o desconexiones, provocan que los dispositivos no cumplan con su tarea.	El hardware defectuoso es una causa directa de medidores fuera de servicio (offline), pérdida de comunicación y lecturas incorrectas, afectando la operatividad del AMI.
C6	Falta de claridad regulatoria	Potter y Rosinski (2023)	La falta de regulaciones claras restringe la extensión coherente de AMI, afectando los estándares técnicos y operativos, y creando múltiples implementaciones no estandarizadas.	Esta causa genera una implementación no estandarizada, lo que dificulta la interoperabilidad y la gestión eficiente del sistema a nivel regional y nacional.
C7	Interferencias electromagnéticas / ruido eléctrico residencial	Serrano (2021)	Los sistemas AMI usan múltiples tecnologías inalámbricas y con cable, las cuales se ven afectadas por interferencias que degradan la calidad y estabilidad de la señal.	Las interferencias son una fuente importante de errores de comunicación y atenuación de señal, afectando la calidad del servicio y la fiabilidad de la transmisión de datos.
C8	Ataques cibernéticos	Sidhartha et al. (2020)	Ataques como MITM, suplantación de identidad y ataques de respuesta comprometen la confidencialidad y la integridad de la información, permitiendo que los datos de medición se manipulen o se pierdan.	Estos ataques pueden llevar a fraudes energéticos, fallas en la facturación y pérdida de confiabilidad, afectando directamente la seguridad y operación del sistema.
C9	Gestión ineficiente de claves criptográficas	Sidhartha et al. (2020)	En la configuración débil de contraseñas o su transmisión en texto plano da como resultado fallas en la autenticación, intrínsecamente inseguridad del sistema y comunicaciones inseguras.	La mala gestión criptográfica provoca fallas de autenticación y comunicación insegura, siendo un punto crítico de vulnerabilidad para el acceso no autorizado.
C10	Ancho de banda insuficiente	Abrahamsen et al. (2021)	La congestión se produce cuando la capacidad de transmisión es baja, especialmente en WAN y NAN, contribuyendo a un aumento en la latencia y disminución de la fiabilidad.	El bajo ancho de banda limita la capacidad de facturación, supervisión y toma de decisiones, resultando en alta latencia y congestión de la red AMI.
C11	Fallas en la reconexión automática	Dinesh et al. (2024)	Existen interrupciones en la reintegración automática después de recargos o cortes, incumpliendo los plazos del nivel de servicio y dificultando la reacción del sistema.	Estas fallas impactan negativamente en la normalización del servicio eléctrico, disminuyendo la calidad de la experiencia del cliente y generando retrasos operativos.
C12	Falta de segmentación / QoS en la red	Abrahamsen et al. (2021)	La falta de mecanismos de QoS diferenciada para aplicaciones críticas como AMI provoca que los paquetes de datos importantes se retrasen, influyendo negativamente en la estabilidad operativa.	Una QoS inadecuada deja a la red incapaz de responder a eventos críticos, provocando una priorización incorrecta del tráfico AMI y afectando su eficiencia.

Nota. Elaboración propia.

Respecto a los efectos propuesto representa la manifestación concreta de estas disfunciones en la operación continua de la red. como se ve en la tabla 4.

Tabla 4

Efectos identificados para el análisis de sistemas AMI

Código	Efecto propuesto	Autor / institución (fecha)	Evidencia bibliográfica sintetizada	Justificación de la variable en la tesis
E1	Pérdida de confiabilidad del sistema AMI	Sidhartha et al. (2020)	La caída de la red o de las unidades concentradoras elimina la información en tiempo real y reduce la visibilidad del estado del sistema, degradando su confiabilidad.	Este efecto es el resultado directo de fallos en la infraestructura y la comunicación, disminuyendo la capacidad del sistema para soportar procesos de gestión energética y toma de decisiones.
E2	Congestión del MDMS y retrasos en el procesamiento	Barai et al. (2015)	Una arquitectura que no puede subir de nivel crea cuellos de botella en la infraestructura de procesamiento y almacenamiento, fuente de retrasos y pérdida de datos.	La congestión limita la capacidad de respuesta del sistema, afectando la actualización de registros y la eficiencia de la empresa eléctrica.
E3	Pérdida de paquetes y lecturas incompletas	Abrahamsen et al. (2021); Sidhartha et al. (2020); Dinesh et al. (2024)	Los entornos con alto número de nodos y fallas en la transmisión llevan a la pérdida de información, interrupciones y lecturas incompletas.	Este efecto afecta directamente la calidad del dato, retrasando la facturación y degradando la confiabilidad del medidor.
E4	Vulnerabilidades de seguridad y fallas operativas	Dinesh et al. (2024); Sidhartha et al. (2020)	Errores en la actualización de firmware y ataques cibernéticos comprometen la seguridad y estabilidad del sistema, generando fallas operativas.	Estas vulnerabilidades pueden ser explotadas para fraudes o interrupciones del servicio, siendo un efecto crítico para la operación segura del AMI.
E5	Medidores fuera de servicio (offline)	Dinesh et al. (2024)	Problemas físicos en el hardware, como la falta de respuesta o desconexión, provocan que los dispositivos no cumplan su tarea asignada.	La pérdida de conexión de los medidores bloquea la toma de lectura, el control remoto, lo que termina afectando tanto la gestión de la demanda como la facturación.
E6	Implementación AMI no estandarizada	Potter y Rosinski (2023)	La falta de regulaciones claras crea múltiples implementaciones técnicas y operativas que no son coherentes.	No adoptar un estándar en el despliegue del sistema limita la interoperabilidad y la mantenibilidad del sistema a largo plazo.
E7	Errores de comunicación y atenuación de señal	Serrano (2021)	La aparición de ruido e interferencias electromagnéticas degradan la calidad de la señal, perjudicando las comunicaciones guiadas y no guiadas.	Este impacto perjudica directamente la calidad del servicio, disminuyendo la eficiencia en la lectura remota y complica la detección de fallas.
E8	Manipulación o pérdida de datos de medición	Sidhartha et al. (2020)	A través de ataques cibernéticos es posible interceptar, alteración o reenvío de paquetes, dejando los datos expuestos a manipulación o pérdida.	La integridad de los datos de medición es fundamental para la facturación y la confianza en el sistema. Este efecto representa un riesgo comercial y operativo.
E9	Fallas de autenticación y comunicación insegura	Sidhartha et al. (2020)	Transmitir contraseñas sin cifrar y gestionar mal las claves criptográficas, genera problemas de autenticación y dejan vulnerables las comunicaciones.	Estas fallas son la puerta de entrada para accesos no autorizados, comprometiendo la seguridad de toda la infraestructura AMI.
E10	Alta latencia y congestión de la red AMI	Abrahamsen et al. (2021)	La congestión aparece cuando el ancho de banda no alcanza, especialmente en los segmentos WAN y NAN, y trae consigo mayor latencia y reduce la fiabilidad del sistema	La alta latencia impide la comunicación en tiempo real, afectando procesos críticos como la detección de fallas y el envío de señales de control.
E11	Retrasos en la normalización del servicio	Dinesh et al. (2024)	La capacidad de respuesta del sistema se ve limitada por fallas en la reconexión automática y por incumplimientos en los acuerdos de nivel de servicio.	Como consecuencia, la calidad del servicio al usuario final se deteriora, con el problema de generar insatisfacción e incluso sancione regulatorias.
E12	Priorización inadecuada del tráfico AMI	Abrahamsen et al. (2021)	La falta de mecanismos de QoS diferenciada provoca que los paquetes de datos más importantes se retrasen, influyendo en la estabilidad operativa.	Una mala priorización deja vulnerable a la red red incapaz de responder a eventos críticos, lo que afecta tanto la eficiencia como la seguridad del sistema.

Nota. Elaboración propia.

CAPÍTULO 5

5. APLICACION DE LA METODOLOGIA DIFUSA

5.1 Aplicación de la metodología difusa para redes de telecomunicación en el sistema de medición AMI

La metodología utilizada en este trabajo tuvo un enfoque cuantitativo, ya que se basó en la valoración numérica de diferentes variables relacionadas con el funcionamiento de los sistemas AMI. Para obtener esta información, se aplicó una encuesta técnica al personal de la Dirección de Comercialización (DICO), la Dirección de Tecnología de la Información y Comunicaciones (DITIC) y la Dirección de Distribución (DIDIS) de la E.E. CENTROSUR, considerando la participación de ingenieros, jefes de grupo y profesionales que se encuentran vinculados con la operación, comunicación y gestión de estos sistemas. La experiencia de estos profesionales permitió evaluar el grado de incidencia entre las variables relacionadas con las redes de telecomunicaciones y los sistemas de medición inteligente.

La encuesta fue respondida por 10 profesionales de las direcciones DICO, DITIC y DIDIS de la E.E. CENTROSUR. De acuerdo con su perfil profesional, participaron 6 ingenieros eléctricos, 3 ingenieros electrónicos/en telecomunicaciones y 1 profesional del área operativa de la empresa eléctrica; en cuanto a su experiencia en el sistema eléctrico, dos encuestados tenían entre 2 y 5 años de experiencia, tres entre 5 y 10, y cinco más de 10 años.

El análisis de expertos se desarrolló mediante una escala difusa normalizada de 0,0 a 1,0, donde cada valor representó el nivel de incidencia entre causas y efectos. Con la información recolectada en las encuestas, se construyeron las matrices causa–efecto, causa–causa y efecto–

efecto, detalladas en las Tablas 7, 8 y 9. Estas matrices permitieron transformar el conocimiento técnico de los expertos en datos cuantificables para su posterior procesamiento.

5.2 Determinación de las variables causa – efecto

Los factores que pueden afectar a las redes de telecomunicaciones de los sistemas AMI se identificaron a partir del estado del arte presentado en el marco teórico, se estructuró la tabla 3 y tabla 4, donde se presentan las 12 causas y los 12 efectos considerados para el análisis, sustentados en la literatura revisada en la sección 2.2 (Abrahamsen et al., 2021; Ajiboye et al., 2024). En particular de los aspectos relacionados con la infraestructura de comunicación, la gestión de datos (MDMS), la ciberseguridad y los protocolos de red AMI. A partir de esta revisión, las variables fueron organizadas en dos grupos: el conjunto A, correspondiente a las causas, y el conjunto B, correspondiente a los efectos. Posteriormente, la encuesta técnica aplicada al personal de las direcciones DICO, DITIC y DIDIS permitió valorar el grado de incidencia entre estas variables, mas no su identificación inicial.

Estas variables sirvieron como base para construir las matrices causa–efecto, causa–causa y efecto–efecto, cuyos valores de incidencia se determinaron con la encuesta aplicada a los expertos, y que se utilizaron después en el modelo de lógica difusa y en el método de efectos olvidados.

La selección de las variables no se realizó arbitrariamente, sino con base en el estado del arte, mientras que la valoración de su incidencia se sustentó en el criterio y experiencia de los expertos encuestados, lo que permitió sustentar técnicamente el análisis desarrollado en la investigación.

Datos de entrada

El sistema experto diseñado para las redes de telecomunicación en el sistema AMI, toma como entradas 12 variables de causa y entrega como salidas 12 variables de efecto, los cuales se detallan en la Tabla 5.

Tabla 5

Causas y efectos para el AMI

CAUSA – (CONJUNTO A)	EFECTO – (CONJUNTO B)
C1. Infraestructura de comunicación inestable	E1. Pérdida de confiabilidad del sistema AMI
C2. Arquitectura MDMS no escalable / limitada	E2. Congestión del MDMS y retrasos en el procesamiento
C3. Fallas en transmisión y reconexión de datos	E3. Pérdida de paquetes y lecturas incompletas
C4. Falla en actualización de firmware	E4. Vulnerabilidades de seguridad y fallas operativas
C5. Hardware defectuoso en medidores o concentradores	E5. Medidores fuera de servicio (offline)
C6. Falta de claridad regulatoria	E6. Implementación AMI no estandarizada
C7. Interferencias electromagnéticas / ruido eléctrico residencial	E7. Errores de comunicación y atenuación de señal
C8. Ataques cibernéticos	E8. Manipulación o pérdida de datos de medición
C9. Gestión ineficiente de claves criptográficas	E9. Fallas de autenticación y comunicación insegura
C10. Ancho de banda insuficiente	E10. Alta latencia y congestión de la red AMI
C11. Fallas en la reconexión automática	E11. Retrasos en la normalización del servicio
C12. Falta de segmentación / QoS en la red	E12. Priorización inadecuada del tráfico AMI

Nota. Elaboración propia.

Inicialización

En esta etapa se definieron los componentes básicos del modelo de lógica difusa. Las causas son las variables de entrada y los efectos, las de salida. A cada variable se le asignan conjuntos difusos para sus posibles niveles y funciones de membresía que dan a cada valor del conjunto un grado de pertenencia entre 0 y 1, según la Tabla 6. Con esta escala, las opiniones de los expertos se traducen a valores decimales, lo que facilita interpretar los resultados y clasificar las relaciones causa-efecto.

Tabla 6

Escala de incidencia empleada en la valoración

Nivel	Etiqueta Semántica de Incidencia
0	Ninguna
0,1	Prácticamente sin incidencia
0,2	Casi sin incidencia
0,3	Muy débil
0,4	Débil
0,5	Mediana
0,6	Incidencia sensible
0,7	Bastante
0,8	Fuerte
0,9	Muy fuerte
1	Máxima Incidencia

Nota. Elaboración propia.

Matriz Causa – Efecto (M)

Cada elemento de la matriz M indica cuánto incide una causa del conjunto A sobre un efecto del conjunto B; así se puede analizar la relación entre ambos y su impacto. Esta información se presenta en la Tabla 7.

Tabla 7

Valoración promedio de los expertos: incidencia de las causas sobre los efectos

M	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12
C1	0,92	0,74	0,83	0,52	0,92	0,54	0,82	0,43	0,54	0,92	0,74	0,73
C2	0,72	0,92	0,63	0,52	0,55	0,83	0,40	0,55	0,63	0,82	0,74	0,91
C3	0,82	0,74	0,91	0,52	0,84	0,44	0,82	0,64	0,54	0,82	0,84	0,63
C4	0,62	0,55	0,63	0,82	0,74	0,54	0,62	0,64	0,83	0,52	0,74	0,54
C5	0,72	0,55	0,83	0,62	0,92	0,44	0,72	0,55	0,54	0,62	0,84	0,44
C6	0,52	0,55	0,30	0,52	0,31	0,91	0,29	0,43	0,54	0,40	0,74	0,83
C7	0,72	0,55	0,83	0,29	0,74	0,30	0,92	0,31	0,30	0,82	0,64	0,44
C8	0,82	0,55	0,44	0,92	0,64	0,54	0,29	0,92	0,91	0,52	0,64	0,63
C9	0,72	0,43	0,44	0,82	0,55	0,54	0,29	0,84	0,91	0,40	0,55	0,63
C10	0,72	0,92	0,83	0,40	0,64	0,44	0,72	0,43	0,44	0,92	0,64	0,83
C11	0,82	0,64	0,83	0,52	0,92	0,44	0,72	0,43	0,54	0,72	0,92	0,54
C12	0,72	0,84	0,73	0,52	0,64	0,54	0,72	0,55	0,63	0,92	0,64	0,91

Nota. Elaboración propia.

Con el mismo procedimiento se promedian las valoraciones de la matriz de relaciones entre causas (Matriz A); los resultados aparecen en la Tabla 8. Los valores resaltados en amarillo representan las relaciones causa–causas ubicadas respecto a la diagonal principal de la matriz. Esta sección permite comparar la incidencia entre pares de causas en sentido transpuesto, es decir,

analizar la relación y su correspondiente relación. La diagonal principal mantiene el valor de 1,00, debido a que representa la relación directa de cada causa consigo misma. $\boldsymbol{Ci \rightarrow CjCj \rightarrow Ci}$

Tabla 8

Valoración promedio de los expertos: relaciones entre causas

A	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
C1	1,00	0,29	0,52	0,29	0,40	0,19	0,52	0,29	0,29	0,40	0,52	0,40
C2	0,29	1,00	0,43	0,31	0,21	0,64	0,21	0,43	0,31	0,55	0,31	0,43
C3	0,52	0,43	1,00	0,44	0,73	0,30	0,83	0,30	0,20	0,73	0,63	0,54
C4	0,29	0,31	0,44	1,00	0,40	0,40	0,19	0,40	0,40	0,19	0,29	0,19
C5	0,40	0,21	0,73	0,40	1,00	0,21	0,43	0,31	0,21	0,31	0,55	0,21
C6	0,19	0,64	0,30	0,40	0,21	1,00	0,10	0,30	0,44	0,20	0,20	0,54
C7	0,52	0,21	0,83	0,19	0,43	0,10	1,00	0,09	0,09	0,40	0,40	0,29
C8	0,29	0,43	0,30	0,40	0,31	0,30	0,09	1,00	0,64	0,21	0,21	0,43
C9	0,29	0,31	0,20	0,40	0,21	0,44	0,09	0,64	1,00	0,20	0,20	0,44
C10	0,40	0,55	0,73	0,19	0,31	0,20	0,40	0,21	0,20	1,00	0,40	0,82
C11	0,52	0,31	0,63	0,29	0,55	0,20	0,40	0,21	0,20	0,40	1,00	0,43
C12	0,40	0,43	0,54	0,19	0,21	0,54	0,29	0,43	0,44	0,82	0,43	1,00

Nota. Elaboración propia.

Luego se obtienen los valores de las relaciones entre efectos, que forman la matriz B (Tabla 9). De igual manera que en la Tabla 8, los valores resaltados en amarillo por encima de la diagonal principal corresponden a la transpuesta exacta de los valores ubicados por debajo de ella, y la diagonal principal mantiene el valor de 1,00 al representar la relación directa de cada efecto consigo mismo.

Tabla 9

Valoración promedio de los expertos: relaciones entre efectos

B	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12
E1	1,0	0,72	0,92	0,82	0,82	0,62	0,82	0,92	0,82	0,82	0,82	0,62
E2	0,72	1,0	0,74	0,55	0,64	0,74	0,64	0,55	0,55	0,92	0,64	0,92
E3	0,92	0,74	1,0	0,54	0,73	0,54	0,91	0,63	0,54	0,83	0,63	0,73
|E4	0,82	0,55	0,54	1,0	0,52	0,72	0,40	0,82	0,92	0,52	0,52	0,52
E5	0,82	0,64	0,73	0,52	1,0	0,55	0,74	0,64	0,64	0,74	0,84	0,55
E6	0,62	0,74	0,54	0,72	0,55	1,0	0,44	0,63	0,63	0,54	0,63	0,73
E7	0,82	0,64	0,91	0,40	0,74	0,44	1,0	0,40	0,40	0,72	0,52	0,72
E8	0,92	0,55	0,63	0,82	0,64	0,63	0,40	1,0	0,84	0,43	0,64	0,43
E9	0,82	0,55	0,54	0,92	0,64	0,63	0,40	0,84	1,0	0,54	0,54	0,63
E10	0,82	0,92	0,83	0,52	0,74	0,54	0,72	0,43	0,54	1,0	0,62	0,92
E11	0,82	0,64	0,63	0,52	0,84	0,63	0,52	0,64	0,54	0,62	1,0	0,64
E12	0,62	0,92	0,73	0,52	0,55	0,73	0,72	0,43	0,63	0,92	0,64	1,0

Nota. Elaboración propia.

5.3 Análisis de las variables de confiabilidad con el método de efectos olvidados

Establecidas las tres matrices $[M]$, $[A]$ y $[B]$ se buscan las relaciones causales indirectas con el operador máx.-min.

$$[M^*] = [A] \circ [M] \circ [B]$$

Se calcula la composición difusa $[A] \circ [M]$ con la que se obtiene la matriz intermedia $[C]$ la cual refleja cómo las relaciones entre causas influyen indirectamente sobre los efectos del sistema AMI. Para ello, se aplica el operador max–min, comparando las filas de la matriz $[A]$ con las columnas de la matriz $[M]$.

$$[C] = Con\ (M, A)$$

La fórmula utilizada es:

$$\boldsymbol{Cij} = \frac{max}{k}[min(\boldsymbol{a_{ik}}, \boldsymbol{m_{kj}})]$$

Donde:

- i representa la causa analizada, desde C1 hasta C12.
- j representa el efecto analizado, desde E1 hasta E12.
- k representa cada causa intermedia.
- A es la matriz causa–causa de dimensión 12×12.
- M es la matriz causa–efecto de dimensión 12×12.
- C es la matriz resultante de dimensión 12×12.

PSEUDOCODIGO PARA CÁLCULO DE LA MATRIZ (C=CON (M, A)) MEDIANTE COMPOSICIÓN MÁXIMO–MÍNIMO

```
ENTRADAS:
  A: matriz Causa–Causa de dimensión 12 × 12
  M: matriz Causa–Efecto de dimensión 12 × 12

SALIDA:
  C: matriz resultante de dimensión 12 × 12

INICIO

  nCausas ← 12
  nEfectos ← 12

  Crear matriz C de dimensión 12 × 12
  Inicializar todos los elementos de C en cero

  PARA i ← 1 HASTA nCausas HACER

    PARA j ← 1 HASTA nEfectos HACER

      valor Máximo ← 0

      PARA k ← 1 HASTA nCausas HACER
```

```
            valor Mínimo ← MINIMO (A [i, k], M [k, j])

            SI valor Mínimo > valor Máximo ENTONCES
               valor Máximo ← valor Mínimo
            FIN SI

         FIN PARA

         C [i, j] ← valor Máximo

      FIN PARA

   MOSTRAR matriz C
FIN
```

Este procedimiento se aplica de la misma forma para cada par (Ci, Ej), comparando la fila Ci de la matriz [A] con la columna Ej de la matriz [M]. A continuación, se desarrolla, a modo de ejemplo, el caso (C1, E1); el resto de las combinaciones se calcula de manera análoga.

Se explica el procedimiento de forma análoga únicamente, para ($C1$, $E1$):

$(C1\text{-}C1 \wedge C1\text{-}E1) \vee (C1\text{-}C2 \wedge C2\text{-}E1) \vee (C1\text{-}C3 \wedge C3\text{-}E1) \vee (C1\text{-}C4 \wedge C4\text{-}E1) \vee (C1\text{-}C5 \wedge C5\text{-}E1) \vee (C1\text{-}C6 \wedge C6\text{-}E1) \vee (C1\text{-}C7 \wedge C7\text{-}E1) \vee (C1\text{-}C8 \wedge C8\text{-}E1) \vee (C1\text{-}C9 \wedge C9\text{-}E1) \vee (C1 - C10 \wedge C10 - E1) \vee (C1 - C11 \wedge C11 - E1) \vee (C1 - C12 \wedge C12 - E1)$

Remplazando valores se obtiene:

$(1 \wedge 0{,}92) \vee (0{,}29 \wedge 0{,}72) \vee (0{,}52 \wedge 0{,}82) \vee (0{,}29 \wedge 0{,}62) \vee (0{,}40 \wedge 0{,}72) \vee (0{,}19 \wedge 0{,}52) \vee (0{,}52 \wedge 0{,}72) \vee (0{,}29 \wedge 0{,}82) \vee (0{,}29 \wedge 0{,}72) \vee (0{,}40 \wedge 0{,}72) \vee (0{,}52 \wedge 0{,}82) \vee (0{,}40 \wedge 0{,}72)$

En cada par se toma el valor más bajo:

$0{,}92 \vee 0{,}29 \vee 0{,}52 \vee 0{,}29 \vee 0{,}40 \vee 0{,}19 \vee 0{,}52 \vee 0{,}29 \vee 0{,}29 \vee 0{,}40 \vee 0{,}52 \vee 0{,}40$

Entre esos mínimos se elige el más alto, 0,92, que corresponde a la posición (C1, E1) de la matriz $[C]$ como se observa en la Tabla 10.

El valor obtenido, 0,92, corresponde a la intersección (C1, E1) de la matriz [C]. El mismo procedimiento se repite para las 143 combinaciones restantes de causas y efectos, cuyos resultados se presentan de forma consolidada en la Tabla 10.

Tabla 10

Matriz C

C=Con (M, A)	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12
C1	0,92	0,74	0,83	0,52	0,92	0,54	0,82	0,52	0,54	0,92	0,74	0,73
C2	0,72	0,92	0,63	0,52	0,55	0,83	0,55	0,55	0,63	0,82	0,74	0,91
C3	0,82	0,74	0,91	0,62	0,84	0,54	0,83	0,64	0,54	0,82	0,84	0,73
C4	0,62	0,55	0,63	0,82	0,74	0,54	0,62	0,64	0,83	0,52	0,74	0,54
C5	0,73	0,73	0,83	0,62	0,92	0,44	0,73	0,64	0,54	0,73	0,84	0,63
C6	0,64	0,64	0,63	0,52	0,55	0,91	0,54	0,55	0,63	0,64	0,74	0,83
C7	0,82	0,74	0,83	0,52	0,83	0,52	0,92	0,64	0,54	0,82	0,83	0,63
C8	0,82	0,55	0,44	0,92	0,64	0,54	0,43	0,92	0,91	0,52	0,64	0,63
C9	0,72	0,55	0,44	0,82	0,64	0,54	0,44	0,84	0,91	0,52	0,64	0,63
C10	0,73	0,92	0,83	0,52	0,73	0,55	0,73	0,64	0,63	0,92	0,73	0,83
C11	0,82	0,64	0,83	0,55	0,92	0,52	0,72	0,63	0,54	0,72	0,92	0,63
C12	0,72	0,84	0,82	0,52	0,64	0,54	0,72	0,55	0,63	0,92	0,64	0,91

Nota. Elaboración propia.

Después se calcula la matriz [M*] mediante la convolución (composición máx.-mín.) de [C] con [B], con el mismo procedimiento anterior.

$$[M^*] = [C][B]$$

Cada elemento M_{ij}^{*} se calcula mediante:

$$m_{ij}^{*} = \frac{\boldsymbol{max}}{k=1,\ldots,12}[\boldsymbol{min}(c_{ik}, b_{kj})]$$

Donde:

i representa cada causa C1,…,C12.

j representa el efecto final E1,…,E12.

k representa cada efecto intermedio.

C es la matriz obtenida en la primera composición.

B es la matriz efecto–efecto.

$M*$ es la matriz de incidencia acumulada causa–efecto.

PSEUDOCODIGO de la matriz estrella M*

```
ENTRADAS:
   C: matriz resultante Causa–Efecto de dimensión 12 × 12
   B: matriz Efecto–Efecto de dimensión 12 × 12

SALIDA:
   M*: matriz estrella de dimensión 12 × 12

INICIO

   numero Causas ← 12
   numero Efectos ← 12

   Crear matriz M* de dimensión 12 × 12
   Inicializar todos los elementos de M* en cero

   PARA i ← 1 HASTA número Causas HACER

      PARA j ← 1 HASTA número Efectos HACER
```

```
        valor Máximo ← 0
        PARA k ← 1 HASTA número Efectos HACER
          valor Mínimo ← MINIMO (C [i, k], B [k, j])
          SI valor Mínimo > valor Máximo ENTONCES
            valor Máximo ← valor Mínimo
          FIN SI
        FIN PARA
        M*[i,j] ← valor Máximo
      FIN PARA
    FIN PARA
    MOSTRAR matriz M*
FIN
```

A continuación, se presenta, a modo de ejemplo, el caso (C1, E1); el resto de las combinaciones se calcula de forma análoga y su resultado completo se presenta en la Tabla 11.

$(E1\text{-}E1 \wedge C1\text{-}E1) \vee (E1\text{-}E2 \wedge C1\text{-}E2) \vee (E1\text{-}E3 \wedge C1\text{-}E3) \vee (E1\text{-}E4 \wedge C1\text{-}E4) \vee (E1\text{-}E5 \wedge C1\text{-}E5) \vee (E1\text{-}E6 \wedge C1\text{-}E6) \vee (E1\text{-}E7 \wedge C1\text{-}E7) \vee (E1\text{-}E8 \wedge C1\text{-}E8) \vee (E1\text{-}E9 \wedge C1\text{-}E9) \vee (E1\text{-}E10 \wedge C1\text{-}E10) \vee (E1\text{-}E11 \wedge C1\text{-}E11) \vee (E1\text{-}E12 \wedge C1\text{-}E12)$

Remplazando valores se obtiene:

$(1 \wedge 0{,}92) \vee (0{,}72 \wedge 0{,}74) \vee (0{,}92 \wedge 0{,}83) \vee (0{,}82 \wedge 0{,}52) \vee (0{,}82 \wedge 0{,}92) \vee (0{,}62 \wedge 0{,}54) \vee (0{,}82 \wedge 0{,}82) \vee (0{,}92 \wedge 0{,}52) \vee (0{,}82 \wedge 0{,}84) \vee (0{,}82 \wedge 0{,}92) \vee (0{,}82 \wedge 0{,}74) \vee (0{,}62 \wedge 0{,}73)$

En cada par se toma el valor más bajo:

0,92 ϒ 0,72 ϒ 0,83 ϒ 0,52 ϒ 0,82 ϒ 0,54 ϒ 0,82 ϒ 0,52 ϒ 0,54 ϒ 0,82 ϒ 0,74 ϒ 0,62

Entre esos mínimos se elige el más alto, 0,92, que corresponde a la posición (C1, E1) de la matriz $[M^*]$ como se observa en la Tabla 11.

El valor obtenido, 0,92, corresponde a la intersección (C1, E1) de la matriz [M*]. El mismo procedimiento se repite para las 143 combinaciones restantes, cuyos resultados se presentan de forma consolidada en la Tabla 11.

Tabla 11

Matriz M*

M*= conv (C, B)	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12
C1	0,92	0,92	0,92	0,82	0,92	0,74	0,83	0,92	0,82	0,92	0,84	0,92
C2	0,82	0,92	0,82	0,72	0,74	0,83	0,72	0,72	0,72	0,92	0,74	0,92
C3	0,91	0,82	0,91	0,82	0,84	0,74	0,91	0,82	0,82	0,83	0,84	0,82
C4	0,82	0,64	0,73	0,83	0,74	0,72	0,74	0,83	0,83	0,74	0,74	0,64
C5	0,83	0,74	0,83	0,73	0,92	0,73	0,83	0,73	0,73	0,83	0,84	0,73
C6	0,74	0,83	0,73	0,72	0,74	0,91	0,72	0,64	0,64	0,83	0,74	0,83
C7	0,83	0,82	0,91	0,82	0,83	0,74	0,92	0,82	0,82	0,83	0,83	0,82
C8	0,92	0,72	0,82	0,92	0,82	0,72	0,82	0,92	0,92	0,82	0,82	0,64
C9	0,84	0,72	0,72	0,91	0,72	0,72	0,72	0,84	0,91	0,72	0,72	0,64
C10	0,83	0,92	0,83	0,73	0,74	0,74	0,83	0,73	0,73	0,92	0,73	0,92
C11	0,83	0,74	0,83	0,82	0,92	0,64	0,83	0,82	0,82	0,83	0,92	0,73
C12	0,82	0,92	0,83	0,72	0,74	0,74	0,82	0,72	0,72	0,92	0,72	0,92

Nota. Elaboración propia.

La matriz $[M^*]$ reúne las relaciones de segunda generación entre causas y efectos, y de ella se obtienen los efectos olvidados. Para ello, se separan los efectos acumulados de la matriz $[M^*]$

(ver Tabla 11) de los efectos directos de la matriz $[M]$ (ver Tabla 7) mediante la siguiente resta algebraica.

$$[O] = [M^*] - [M]$$

Cada elemento se calcula mediante:

$$o_{ij} = m_{ij}^* - m_{ij}$$

Para evitar valores negativos ocasionados por redondeos o inconsistencias numéricas, puede emplearse:

$$o_{ij} = max(0, m_{ij}^* - m_{ij})$$

Donde:

M: matriz original causa–efecto.

$M*$: matriz de incidencias directas e indirectas.

O: matriz final de efectos olvidados.

i: causa analizada, desde C1 hasta C12.

j: efecto analizado, desde E1 hasta E12.

PSEUDOCODIGO de la matriz de efectos olvidados $[O] = [M^*] - [M]$

```
ENTRADAS:
   M: matriz directa Causa–Efecto de dimensión 12 × 12
   M*: matriz estrella de dimensión 12 × 12

SALIDA:
   O: matriz final de efectos olvidados de dimensión 12 × 12

INICIO

   numero Causas ← 12
   numero Efectos ← 12

   Crear matriz O de dimensión 12 × 12
   Inicializar todos los elementos de O en cero

   PARA i ← 1 HASTA número Causas HACER

      PARA j ← 1 HASTA número Efectos HACER

         diferencia ← M*[i, j] - M [i, j]

         SI diferencia > 0 ENTONCES

            O [i, j] ← diferencia

         SINO

            O [i, j] ← 0

         FIN SI

      FIN PARA

   FIN PARA

   MOSTRAR matriz O

FIN
```

Una vez obtenido la matriz $[M^*]$ y la matriz $[M]$ se procede a sacar los resultados para la matriz de efectos olvidados $[O] = [M^*] - [M]$ dichos resultados podemos observar en la tabla 13.

Tabla 12

Matriz Convolución

M*= conv (C, B)	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12
C1	0,92	0,92	0,92	0,82	0,92	0,74	0,83	0,92	0,82	0,92	0,84	0,92
C2	0,82	0,92	0,82	0,72	0,74	0,83	0,72	0,72	0,72	0,92	0,74	0,92
C3	0,91	0,82	0,91	0,82	0,84	0,74	0,91	0,82	0,82	0,83	0,84	0,82
C4	0,82	0,64	0,73	0,83	0,74	0,72	0,74	0,83	0,83	0,74	0,74	0,64
C5	0,83	0,74	0,83	0,73	0,92	0,73	0,83	0,73	0,73	0,83	0,84	0,73
C6	0,74	0,83	0,73	0,72	0,74	0,91	0,72	0,64	0,64	0,83	0,74	0,83
C7	0,83	0,82	0,91	0,82	0,83	0,74	0,92	0,82	0,82	0,83	0,83	0,82
C8	0,92	0,72	0,82	0,92	0,82	0,72	0,82	0,92	0,92	0,82	0,82	0,64
C9	0,84	0,72	0,72	0,91	0,72	0,72	0,72	0,84	0,91	0,72	0,72	0,64
C10	0,83	0,92	0,83	0,73	0,74	0,74	0,83	0,73	0,73	0,92	0,73	0,92
C11	0,83	0,74	0,83	0,82	0,92	0,64	0,83	0,82	0,82	0,83	0,92	0,73
C12	0,82	0,92	0,83	0,72	0,74	0,74	0,82	0,72	0,72	0,92	0,72	0,92

Nota. Elaboración propia.

Tabla 13

Matriz Causa - Efecto

M	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12
C1	0,92	0,74	0,83	0,52	0,92	0,54	0,82	0,43	0,54	0,92	0,74	0,73
C2	0,72	0,92	0,63	0,52	0,55	0,83	0,40	0,55	0,63	0,82	0,74	0,91
C3	0,82	0,74	0,91	0,52	0,84	0,44	0,82	0,64	0,54	0,82	0,84	0,63
C4	0,62	0,55	0,63	0,82	0,74	0,54	0,62	0,64	0,83	0,52	0,74	0,54
C5	0,72	0,55	0,83	0,62	0,92	0,44	0,72	0,55	0,54	0,62	0,84	0,44
C6	0,52	0,55	0,30	0,52	0,31	0,91	0,29	0,43	0,54	0,40	0,74	0,83
C7	0,72	0,55	0,83	0,29	0,74	0,30	0,92	0,31	0,30	0,82	0,64	0,44
C8	0,82	0,55	0,44	0,92	0,64	0,54	0,29	0,92	0,91	0,52	0,64	0,63
C9	0,72	0,43	0,44	0,82	0,55	0,54	0,29	0,84	0,91	0,40	0,55	0,63
C10	0,72	0,92	0,83	0,40	0,64	0,44	0,72	0,43	0,44	0,92	0,64	0,83
C11	0,82	0,64	0,83	0,52	0,92	0,44	0,72	0,43	0,54	0,72	0,92	0,54
C12	0,72	0,84	0,73	0,52	0,64	0,54	0,72	0,55	0,63	0,92	0,64	0,91

Nota. Elaboración propia.

CAPÍTULO 6

6. RESULTADOS

El resultado obtenido corresponde a una matriz de efectos olvidados $[O]$, que muestra la diferencia entre la matriz de incidencias acumuladas $[M*]$ y la matriz directa $[M]$. Estos valores representan relaciones indirectas que no fueron consideradas con alta incidencia por los expertos durante la encuesta inicial, pero que adquieren mayor importancia al aplicar el método de efectos olvidados.

Para el análisis se consideraron relevantes los valores: Oij≥0,30 debido a que representan incrementos significativos dentro de la escala difusa normalizada. Los valores iguales o superiores a este umbral permiten identificar efectos olvidados importantes dentro del sistema AMI.

Los valores de esta matriz que se acercan a la unidad corresponden a los efectos olvidados, es decir, a relaciones que los expertos no tomaron en cuenta en la encuesta. Se consideraron relevantes los valores iguales o mayores a 0,30, que se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14

Matriz de efectos olvidados

EO=(M*-M)	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12
C1	0,00	0,18	0,09	0,30	0,00	0,20	0,01	0,49	0,28	0,00	0,10	0,19
C2	0,10	0,00	0,19	0,20	0,19	0,00	0,32	0,17	0,09	0,10	0,00	0,01
C3	0,09	0,08	0,00	0,30	0,00	0,30	0,09	0,18	0,28	0,01	0,00	0,19
C4	0,20	0,09	0,10	0,01	0,00	0,18	0,12	0,19	0,00	0,22	0,00	0,10
C5	0,11	0,19	0,00	0,11	0,00	0,29	0,11	0,18	0,19	0,21	0,00	0,29
C6	0,22	0,28	0,43	0,20	0,43	0,00	0,43	0,21	0,10	0,43	0,00	0,00
C7	0,11	0,27	0,08	0,53	0,09	0,44	0,00	0,51	0,52	0,01	0,19	0,38
C8	0,10	0,17	0,38	0,00	0,18	0,18	0,53	0,00	0,01	0,30	0,18	0,01
C9	0,12	0,29	0,28	0,09	0,17	0,18	0,43	0,00	0,00	0,32	0,17	0,01
C10	0,11	0,00	0,00	0,33	0,10	0,30	0,11	0,30	0,29	0,00	0,09	0,09
C11	0,01	0,10	0,00	0,30	0,00	0,20	0,11	0,39	0,28	0,11	0,00	0,19
C12	0,10	0,08	0,10	0,20	0,10	0,20	0,10	0,17	0,09	0,00	0,08	0,01

Nota. Elaboración propia.

6.1 Efectos olvidados relevantes encontrados

Los valores encontrados con grados de incidencia en efectos olvidados críticos son los que cumplen que se aprecia en la tabla 15.

$$Oij \geq 0{,}30$$

Tabla 15

Efectos olvidados relevantes

N.º	Relación	Valor (O)	Interpretación	N.º	Relación	Valor (O)	Interpretación
1	C8 → E7	0,53	Efecto olvidado crítico	14	C10 → E6	0,39	Efecto olvidado relevante
2	C7 → E4	0,53	Efecto olvidado crítico	15	C8 → E3	0,38	Efecto olvidado relevante
3	C7 → E9	0,52	Efecto olvidado crítico	16	C7 → E12	0,38	Efecto olvidado relevante
4	C7 → E8	0,51	Efecto olvidado crítico	17	C10 → E4	0,33	Efecto olvidado relevante
5	C1 → E8	0,48	Efecto olvidado crítico	18	C9 → E10	0,32	Efecto olvidado relevante
6	C7 → E6	0,44	Efecto olvidado crítico	19	C8 → E10	0,30	Efecto olvidado relevante
7	C6 → E3	0,44	Efecto olvidado crítico	20	C5 → E12	0,30	Efecto olvidado relevante
8	C9 → E7	0,43	Efecto olvidado crítico	21	C3 → E6	0,30	Efecto olvidado relevante
9	C6 → E7	0,43	Efecto olvidado crítico	22	C3 → E4	0,30	Efecto olvidado relevante
10	C6 → E5	0,43	Efecto olvidado crítico	23	C11 → E6	0,30	Efecto olvidado relevante
11	C6 → E10	0,43	Efecto olvidado crítico	24	C11 → E4	0,30	Efecto olvidado relevante
12	C2 → E7	0,42	Efecto olvidado crítico	25	C10 → E8	0,30	Efecto olvidado relevante
13	C11 → E8	0,39	Efecto olvidado relevante	26	C1 → E4	0,30	Efecto olvidado relevante

Nota. Elaboración propia.

6.2 Principales efectos olvidados crítico

Los valores más importantes con más grados de incidencia son los que cumplen, como se puede observar en la tabla 16 y ver figura 9 sus representaciones variable críticas.

$$Oij \geq 0{,}40$$

Tabla 16

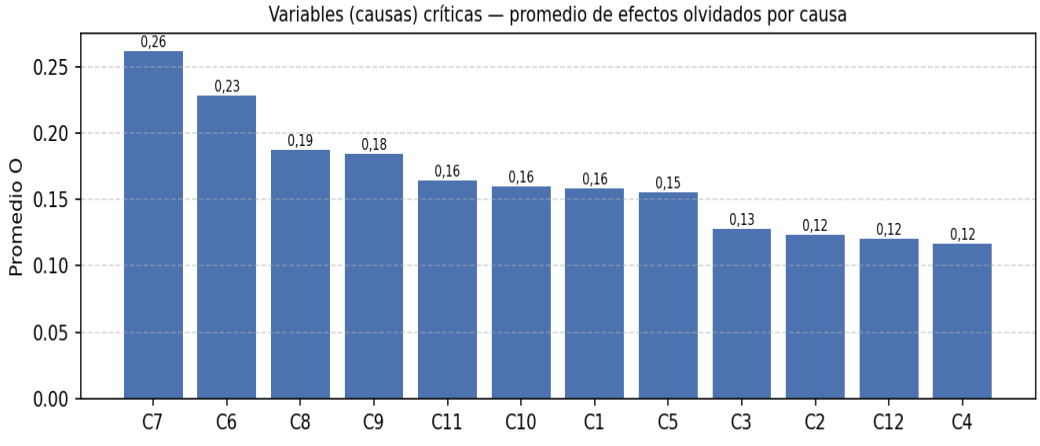
Efectos olvidados críticos

C8 → E7	0,53	Los ataques cibernéticos pueden derivar indirectamente en errores de comunicación y atenuación de señal.
C7 → E4	0,53	Las interferencias electromagnéticas pueden generar indirectamente vulnerabilidades de seguridad y fallas operativas.
C7 → E9	0,52	Las interferencias electromagnéticas pueden ocasionar indirectamente fallas de autenticación y comunicación insegura.
C7 → E8	0,51	Las interferencias electromagnéticas pueden incidir indirectamente en la manipulación o pérdida de datos de medición.
C1 → E8	0,48	Una infraestructura de comunicación inestable puede favorecer indirectamente la manipulación o pérdida de datos de medición.
C7 → E6	0,44	Las interferencias electromagnéticas pueden contribuir indirectamente a una implementación AMI no estandarizada.
C6 → E3	0,44	La falta de claridad regulatoria puede generar indirectamente pérdida de paquetes y lecturas incompletas.
C9 → E7	0,43	Una gestión ineficiente de claves criptográficas puede provocar indirectamente errores de comunicación y atenuación de señal.
C6 → E7	0,43	La falta de claridad regulatoria puede incidir indirectamente en errores de comunicación y atenuación de señal.
C6 → E5	0,43	La falta de claridad regulatoria puede influir indirectamente en medidores fuera de servicio u offline.
C6 → E10	0,43	La falta de claridad regulatoria puede agravar indirectamente la alta latencia y congestión de la red AMI.
C2 → E7	0,42	Una arquitectura MDMS no escalable puede provocar indirectamente errores de comunicación y atenuación de señal.

Nota. Elaboración propia.

Figura 9

Variables críticas



Nota.

Elaboración propia.

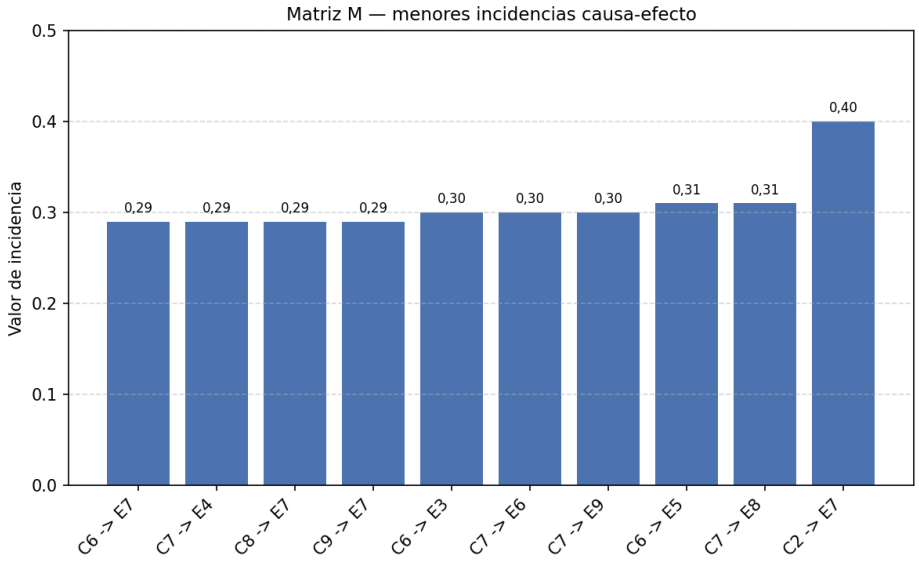
6.3 Visualización de datos numéricos en las variables críticas

En la figura 10 se presenta las menores incidencias causa–efecto identificadas en la matriz normalizada M. Esta matriz corresponde a la relación directa entre las causas técnicas del sistema AMI y los efectos asociados a la operación de la red de telecomunicaciones.

Los valores mostrados se encuentran aproximadamente entre 0,29 y 0,40, por lo tanto, corresponden a relaciones de baja incidencia o incidencia sensible. Esto significa que, según la valoración directa de los expertos, estas relaciones no fueron consideradas como críticas dentro de la matriz inicial.

Figura 10

Relaciones causa–efecto con menor incidencia directa en la matriz normalizada M.



Nota. Elaboración propia, generado en MATLAB.

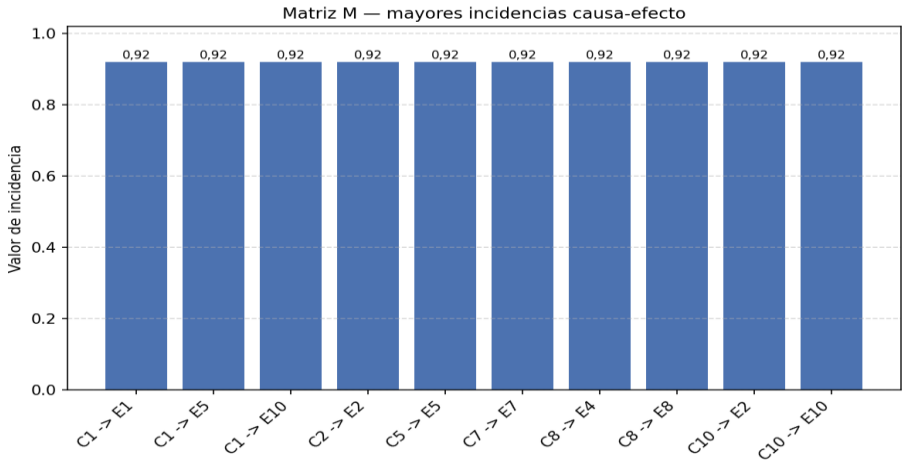
La figura 11 se presentan las relaciones causa–efecto con mayor incidencia dentro de la matriz normalizada M. Los valores obtenidos son de 0,92, lo que indica una incidencia muy fuerte entre las variables analizadas.

Se observa que las causas con mayor influencia están relacionadas con la infraestructura de comunicación inestable, la arquitectura MDMS no escalable, fallas de firmware, hardware defectuoso, interferencias electromagnéticas, ataques cibernéticos y ancho de banda insuficiente. Estas causas afectan directamente a efectos como la pérdida de confiabilidad del sistema AMI, congestión del MDMS, alta latencia, medidores fuera de servicio, errores de comunicación y pérdida de datos.

En este grafico representa las relaciones críticas que deben ser consideradas para mejorar la operación de las redes de telecomunicaciones en sistemas AMI. Siendo la base para continuar con el método de efectos olvidados porque indica las incidencias directas antes de analizar las relaciones indirectas

Figura 11

Relaciones causa–efecto con mayor incidencia directa en la matriz normalizada M.



Nota. Elaboración propia, generado en MATLAB.

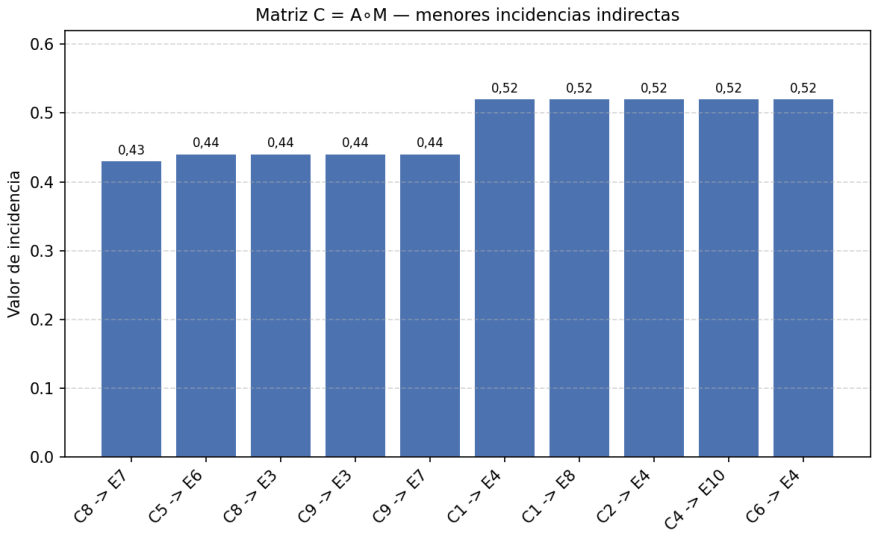
La Figura 12 muestra las relaciones con menor incidencia indirecta dentro de la matriz C = A∘M. Los valores obtenidos se encuentran entre 0,43 y 0,52, lo que representa una incidencia

media dentro de la escala difusa normalizada. Es decir, si bien estas relaciones no son las más críticas del sistema, igual ejercen una influencia indirecta sobre los efectos estudiados. $C = A \circ M$

La matriz C indica que algunas relaciones, pese a parecer poco relevantes conservan importancia al considerar la interacción entre causas. Esto ayuda a contribuir mejor el comportamiento del sistema AMI y permite encontrar vínculos secundarios que el análisis de efectos olvidados no puede dejar de lado.

Figura 12

Incidencias indirectas de menores magnitudes en la matriz C=A∘M.



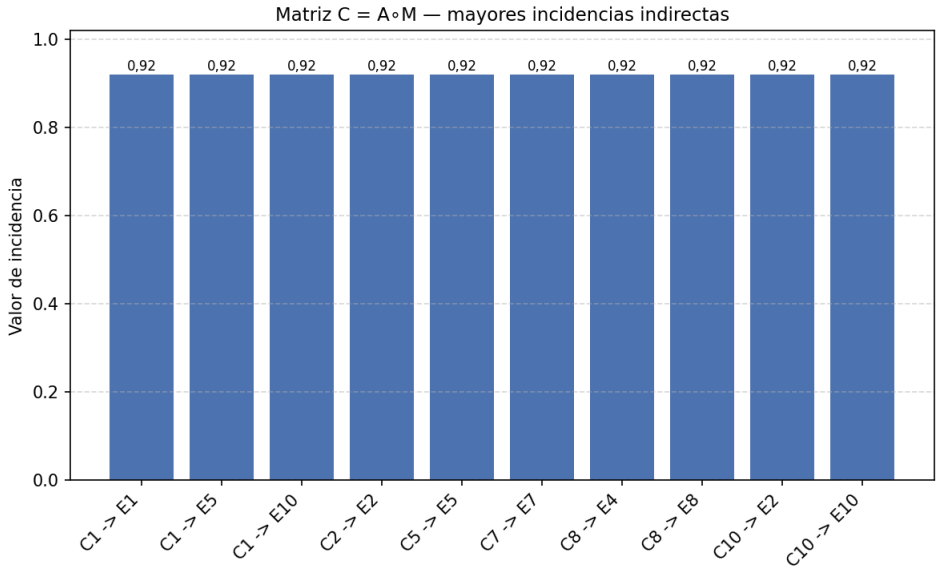
Nota. Elaboración propia, generado en MATLAB.

La Figura 13 muestra la relación con mayor ocurrencia indirecta en la matriz C=A∘M. Los valores obtenidos rondan el 0,92, lo que indica una coocurrencia muy fuerte entre las variables analizadas. Esto demuestra que, al considerar las relaciones internas entre causas, ciertas variables aumentan su influencia sobre los efectos del sistema AMI.

De esta manera, la matriz C permite identificar relaciones indirectas importantes que no dependen únicamente de la incidencia directa inicial, sino también de la interacción entre las causas. Por lo tanto, este gráfico ayuda a reconocer los puntos críticos que deben ser considerados para mejorar la confiabilidad, disponibilidad y operación de las redes de telecomunicaciones aplicadas a los sistemas de medición inteligente AMI.

Figura 13

Relaciones con mayor incidencia indirecta obtenidas en la matriz C=A∘M.



Nota. Elaboración propia, generado en MATLAB.

La Figura 14 muestra los menores efectos olvidados positivos obtenidos en la matriz O = M* - M. Los valores representados se encuentran entre 0,01 y 0,08, lo que evidencia incrementos mínimos entre la matriz de incidencia directa M y la matriz final M*. $O = M * -M.MM *$.

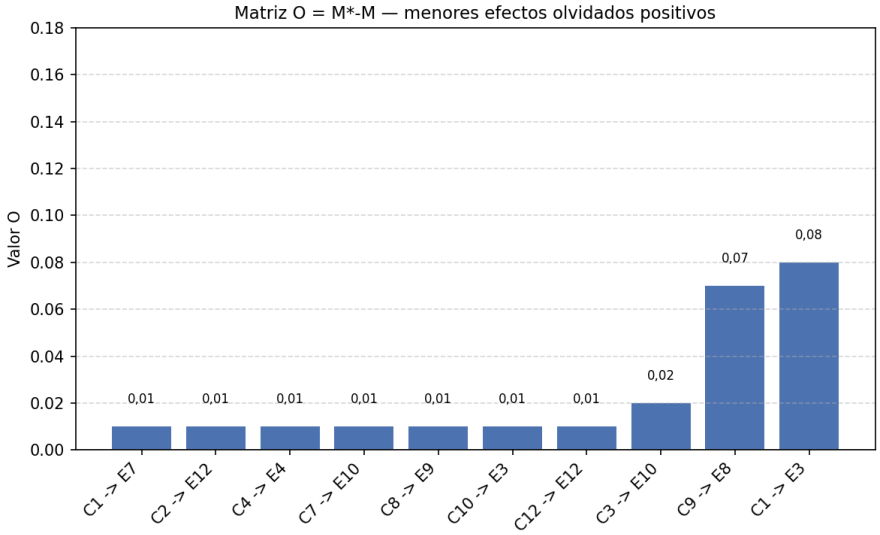
Estos resultados indican que las relaciones presentadas no generan cambios importantes después de aplicar el método de efectos olvidados. Por esta razón, no se consideran relaciones

críticas ni relevantes dentro del análisis, ya que se encuentran muy por debajo del umbral establecido de 0,30 para identificar efectos olvidados significativos.

En consecuencia, este gráfico permite diferenciar las relaciones con bajo incremento de aquellas que realmente presentan un efecto olvidado importante. De esta manera, se confirma que no todas las relaciones indirectas modifican de forma significativa el comportamiento del sistema AMI.

Figura 14

Menores efectos olvidados positivos obtenidos en la matriz $O=M*-M$.



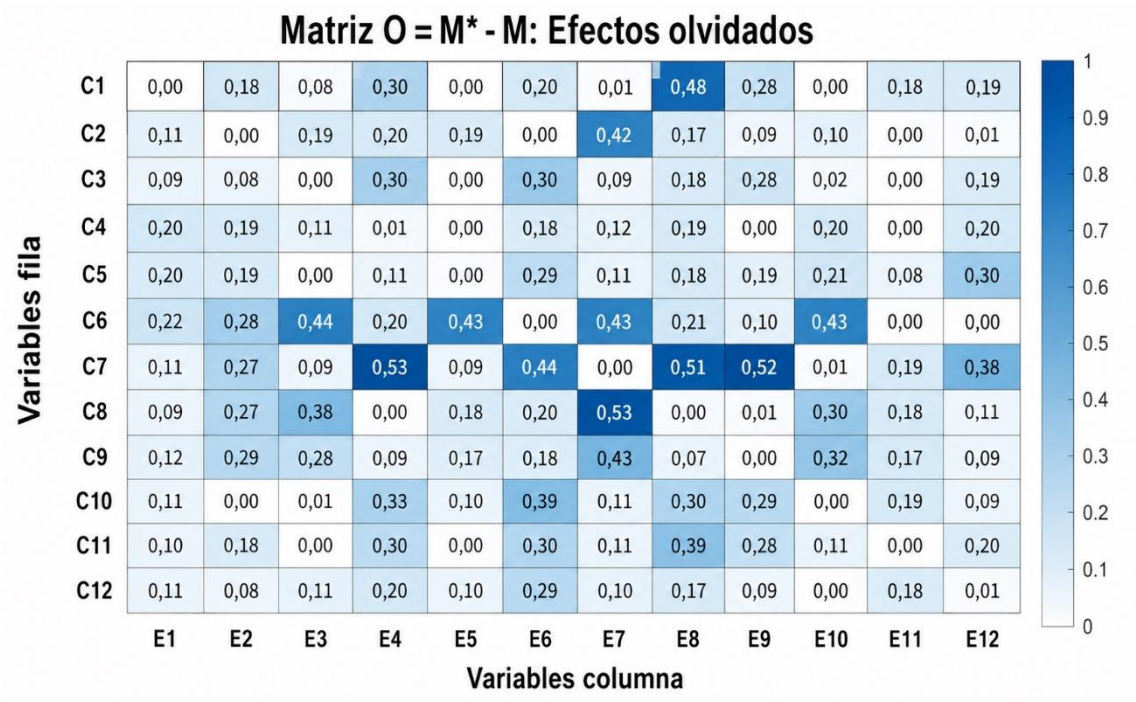
Nota. Elaboración propia, generado en MATLAB.

La figura 15 presenta la matriz de efectos olvidados O = M* - M en formato de tabla resaltada. Los resultados muestran que las relaciones con mayor incremento corresponden principalmente a las causas C7 (interferencias electromagnéticas) y C8 (ataques cibernéticos), las cuales presentan incidencias indirectas sobre errores de comunicación, vulnerabilidades de seguridad y manipulación de datos de medición. Esto demuestra que ciertos factores que

inicialmente no fueron considerados como críticos por los expertos adquieren mayor relevancia al aplicar el método de efectos olvidados, permitiendo identificar relaciones ocultas que pueden afectar el desempeño del sistema de medición inteligente AMI. $O = M * -M.C$

Figura 15

Matriz de efectos olvidados O=M∗−M



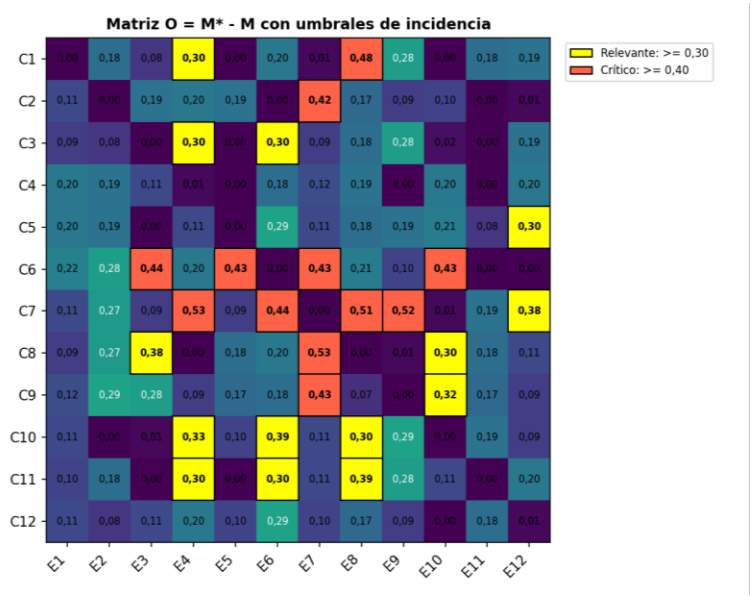
Nota. Elaboración propia, generado en MATLAB.

En la figura 16 se muestra la matriz de efectos olvidados O = M* - M, en la cual se identifican las relaciones causa–efecto que presentan un incremento de incidencia al considerar las interacciones indirectas del sistema AMI. Los valores resaltados en amarillo corresponden a efectos olvidados relevantes (O ≥ 0,30), mientras que los valores resaltados en color tomate representan efectos olvidados críticos (O ≥ 0,40).$O = M * -MO \geq 0{,}30(O \geq 0{,}40)$.

Los resultados evidencian que los ataques cibernéticos y las interferencias electromagnéticas generan varios efectos indirectos importantes sobre los errores de comunicación, las vulnerabilidades de seguridad y la manipulación de datos de medición. Por lo tanto, esta matriz permite reconocer relaciones que no fueron suficientemente consideradas en la evaluación inicial, pero que son importantes para mejorar la confiabilidad y operación de las redes de telecomunicaciones en sistemas AMI.

Figura 16

Matriz de efectos olvidados O=M∗−M con umbrales de incidencia relevantes y críticos.



Nota. Elaboración propia, generado en MATLAB.

La figura 17 presenta los diez efectos olvidados más relevantes obtenidos a partir de la matriz O = M* - M, ordenados de mayor a menor. Esta matriz permite identificar las relaciones causa–efecto que aumentaron su incidencia después de aplicar el método de efectos olvidados, entre ellas C8→E7 y C7→E4, relacionadas con ataques cibernéticos e interferencias electromagnéticas. .$O = M * -M$

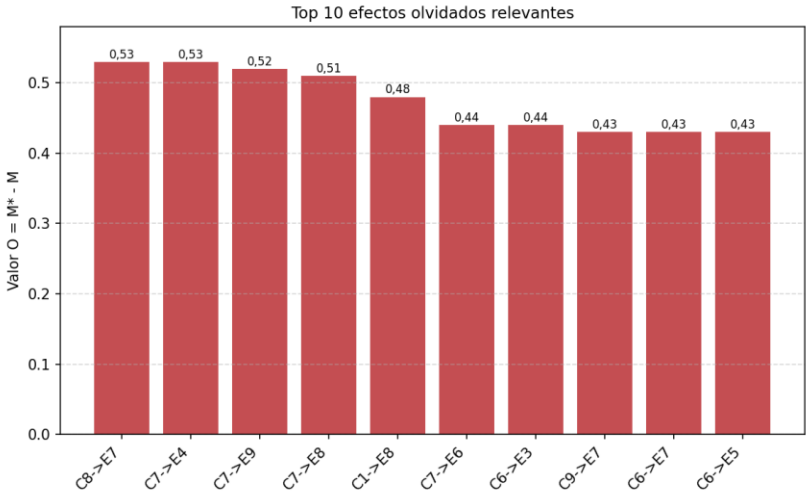
El eje horizontal muestra cada relación evaluada y el eje vertical, su valor de efecto olvidado O. Los valores del gráfico se encuentran entre 0,43 y 0,53, por lo que superan ampliamente el umbral definido de:

$$O \geq 0{,}30$$

Esto significa que todas las relaciones mostradas son consideradas efectos olvidados relevantes. Además, las relaciones con valores iguales o superiores a 0,40 pueden considerarse como efectos olvidados críticos.

Figura 17

Efectos olvidados relevantes



Nota. Elaboración propia, generado en MATLAB.

CONCLUSIONES

A través de la revisión bibliográfica en bases científicas se consolidó un marco teórico enfocado en ciertas temáticas como las redes de telecomunicaciones, sistemas AMI y lógica difusa. Además, se investigó sobre las causas que se tienen en el AMI, eso incluye ciertos aspectos relacionados al ancho de banda, hardware, infraestructura, regulaciones, seguridad y gestión de la información. Asimismo, se identificó sus efectos como la pérdida de paquetes, congestión del MDMS, vulnerabilidades de seguridad; entre otros, lo que valida la inclusión de estos en este trabajo.

Con el modelo de lógica difusa y el método de efectos olvidados se identificaron, ordenaron por importancia y relacionaron entre sí las variables que más influyen en el sistema de medición inteligente AMI. A partir de las matrices causa–efecto, causa–causa y efecto–efecto, mediante la matriz de efectos olvidados $O = M * -M$, se identificaron relaciones indirectas relevantes que no fueron evidentes en la evaluación inicial realizada por los expertos.

Mientras que, en términos cuantitativos se consiguió sistematizar un total de 12 causas y 12 efectos, esto nos permitió evidenciar relaciones indirectas que no eran visibles mediante una evaluación directa tradicional. Desde el punto de vista cualitativo, el modelo permitió integrar el criterio experto con datos numéricos normalizados, facilitando la interpretación del comportamiento del sistema AMI. Como resultado, se obtiene una herramienta válida para la toma de decisiones técnicas orientadas a la planificación, operación, control y mejora de las redes de telecomunicaciones aplicadas a los sistemas de medición inteligente AMI, se pudo constatar las causas y efectos a nivel internacional en el campo de aplicación AMI, lo que permite afirmar la novedad del aporte en el contexto ecuatoriano.

RECOMENDACIONES

Si bien es posible tener acceso a prácticamente todo el material investigativo requerido, es relevantes que en futuras investigaciones amplíen su estudio abarcando otras técnicas más avanzadas como de inteligencia artificial (aprendizajes automático o profundo) u otros aplicables en sistemas AMI. Esto permitirá compararse con el presente modelo de lógica difusa con la teoría de los efectos olvidados y estimar sus aceptaciones frente a otros modelos.

Se recomienda institucionalizar el uso de modelos basados en lógica difusa y teoría de efectos olvidados como herramientas para la gestión técnica del sistema AMI. Adicionalmente, proporcionar alguna capacitación en el uso de estas técnicas y en MATLAB para garantizar la interpretación adecuada de los resultados. Por último, se recomienda a futuras investigaciones integrar estos modelos en los sistemas de gestión existentes para tomar decisiones oportunas, imparciales y basadas en evidencia cuantitativa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abrahamsen, F. E., Ai, Y., & Cheffena, M. (2021). Communication Technologies for Smart Grid: A Comprehensive Survey. *Sensors, 21*(23), 8087. https://doi.org/10.3390/s21238087

Ajiboye, P. O., Agyekum, K. O.-B. O., & Frimpong, E. A. (2024). Privacy and security of advanced metering infrastructure (AMI) data and network: A comprehensive review. *Journal of Engineering and Applied Science*, *71*(1), 91. https://doi.org/10.1186/s44147-024-00422-w

Alam, M. J., Hossain, M. R., Azad, S., & Chugh, R. (2023). An overview of LTE/LTE-A heterogeneous networks for 5G and beyond. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, *34*(8), e4806. https://doi.org/10.1002/ett.4806

Anido, L. S., & Ancizar, Y. M. (2021). La teoría de los efectos olvidados vinculada a la gestión de los recursos humanos en las organizaciones. *Revista de Desarrollo Sustentable, Negocios, Emprendimiento y Educación RILCO DS*, (17), 65-79.

Armas, F. O. M. (2022). *Ciencia de la sostenibilidad: Construcción de un paradigma salvacionista (ePub)*. Editorial Universitaria (Cuba).

Barai, G. R., Krishnan, S., & Venkatesh, B. (2015). Smart metering and functionalities of smart meters in smart grid—A review. *2015 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*, 138-145. https://doi.org/10.1109/EPEC.2015.7379940

Bima, I. W. K., Suryani, V., & Wardana, A. A. (2020). A Performance Analysis of General Packet Radio Service (GPRS) and Narrowband Internet of Things (NB-IoT) in Indonesia. *Kinetik:*

Game Technology, Information System, Computer Network, Computing, Electronics, and Control, 11-20. https://doi.org/10.22219/kinetik.v5i1.947

Castillo, W., & Araujo, G. (2022). Impacto de la implementación del sistema CIS/CRM en la facturación de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C.A. *ConcienciaDigital*, *5*(2), 122-139. https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v5i2.2143

Chiliquinga Sampedro, K. I., & Castillo Fiallos, J. N. (2024). Análisis de gases disueltos para la identificación de falla en transformadores de potencia mediante lógica difusa [Tesis de Grado, Universidad Técnica de Cotopaxi]. Repositorio UTC. [URL A VERIFICAR POR EL AUTOR]

Dinesh, J., Sinha, S. K., Kapoor, S., Agarwal, S., Pradish, M., Shivakumar, V., & Jain, A. (2024). Testing of Advanced Metering Infrastructure Systems: Evaluation Process and Analysis. *Power Research - A Journal of CPRI*, 75-82. https://doi.org/10.33686/pwj.v20i1.1167

E.E. Regional Centrosur C.A. (2024). *Boletín Estadístico 2019-2023* (p. 104). https://www.centrosur.gob.ec/wp-content/uploads/2024/06/Trayectoria-edicion-20.pdf

E.E. Regional Centrosur C.A. (2025a). *Plan Estratégico 2022-2025* (I-DIPLA-383; p. 99). https://www.centrosur.gob.ec/wp-content/uploads/pdfsvarios/5.1-Plan-Estrategico-2022-2025.pdf

E.E. Regional Centrosur C.A. (2025b). *Trayectoria Boletín estadístico 2020-2024* (p. 104). https://www.centrosur.gob.ec/wp-content/uploads/2025/10/TRAYECTORIA-2025-low.pdf

Ecuavisa. (2026, 20 de abril). Ecuador pierde el 15 % de su energía en robos y fallas técnicas. Ecuavisa. https://www.ecuavisa.com/la-noticia-a-fondo/pais-pierde-15-energia-robos-y-fallas-tecnicas-20260419-0003.html

El Universo. (2022, 8 de agosto). Guayaquil tiene 114.000 medidores inteligentes de energía instalados en el norte y centro. El Universo. https://www.eluniverso.com/guayaquil/comunidad/guayaquil-tiene-114-mil-medidores-inteligentes-de-energia-instalados-en-el-norte-y-centro-este-mes-los-dispositivos-se-implementaran-en-tres-etapas-de-samanes-nota/

Empresa Eléctrica Quito [EEQ]. (2023, 9 de mayo). Empresa Eléctrica Quito firma contrato para adquirir medidores inteligentes. Empresa Eléctrica Quito. https://www.eeq.com.ec/w/empresa-electrica-quito-firma-contrato-para-adquirir-medidores-inteligentes

Fundamentals of AMI. (2025). Eaton. https://www.eaton.com/ca/en-gb/products/utility-grid-solutions/advanced-metering-infrastructure/fundamentals-of-ami.html

Haq, I., Soomro, J. A., Mazhar, T., Ullah, Ikram, Shloul, T. A., Ghadi, Y. Y., Ullah, Inam, Saad, A., & Tolba, A. (2023). Impact of 3G and 4G Technology Performance on Customer Satisfaction in the Telecommunication Industry. *Electronics*, *12*(7), 1697. https://doi.org/10.3390/electronics12071697

Koukouvinos, K. G., Koukouvinos, G. K., Chalkiadakis, P., Kaminaris, S. D., Orfanos, V. A., & Rimpas, D. (2025). Evaluating the Performance of Smart Meters: Insights into Energy

Management, Dynamic Pricing and Consumer Behavior. *Applied Sciences*, *15*(2), 960. https://doi.org/10.3390/app15020960

López Flores, B. A. (2021). *El análisis y la transmisión de señales* [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle]. https://repositorio.une.edu.pe/entities/publication/repositorio.une.edu.pe

MathWorks. (2024). MathWorks—Creadores de MATLAB y Simulink—MATLAB y Simulink. https://la.mathworks.com/

Ministerio de Energía y Recursos naturales No Renovables [MERNNR]. (2020). *Anexo A5. Integración e interoperabilidad* (p. 19). https://www.centrosur.gob.ec/wp-content/uploads/2020/02/Anexo-A5.-Integraci%C3%B3n-e-Interoperabilidad.pdf

Potter, K., & Rosinki, J. (2023). *Advanced Metering Infrastructure (AMI)* (F5428_v1). OSF Preprints. https://doi.org/10.31219/osf.io/f5428

Quintanilla Mayuri, L. M. (2024). *Reducción de latencia en redes 5G* [Tesis de Grado, Universidad Nacional San Luis Gonzaga]. https://hdl.handle.net/20.500.13028/6661

Quispe, A. A., Riella, R. J., Iantorno, L. M., Mariani, L. S., & Fernandez, E. M. G. (2024). Analysis of Wi-SUN FAN Network Formation Time. *Sensors (Basel, Switzerland)*, *24*(4), 1142. https://doi.org/10.3390/s24041142

Riso, H., & Saibene, O. (2020). *Redes de Telecomunicaciones*. Jorge Sarmiento Editor ; Universitas Editorial Científica Universitaria.

Sabry, F. (2022). *Red Inteligente: Intercambio de electricidad e información entre hogares y centrales eléctricas.* One Billion Knowledgeable.

Sancho, F. (2025). *Fuzzy sets*. Information and Control. https://www.cs.us.es/~fsancho/Blog/posts/Introduccion_logica_Difusa.md.html

SAP SE. (2025). *What is ERP? The Essential Guide*. SAP. https://www.sap.com/products/erp/what-is-erp.html

Serrano, V. (2021). *Estudio del impacto y viabilidad de la implementación de la infraestructura de medición avanzada (AMI) para los operadores de red EMCALI y ENEL-CODENSA en el mercado eléctrico colombiano* [Tesis de Grado, Universidad de los Andes]. https://hdl.handle.net/1992/51508

Sidhartha, D., Mahendra, L., Jagan Mohan, K., Senthil Kumar, R. K., & Bindhumadhava, B. S. (2020). Secure and Fault-tolerant Advanced Metering Infrastructure. *2020 IEEE International Conference on Power Systems Technology (POWERCON)*, 1-6. https://doi.org/10.1109/POWERCON48463.2020.9230565

Valencia, M. N., & García, R. A. (2024). Impacto de la Tecnología de Medición entre Medidores Tradicionales e Inteligentes en el Sector urbano del cantón Esmeraldas. *Reincisol., 3*(6), 427-544. https://doi.org/10.59282/reincisol.V3(6)427-544

Vidal-Martínez, R., García-Martínez, J. R., Rojas-Galván, R., Álvarez-Alvarado, J. M., González-Lee, M., & Rodríguez-Reséndiz, J. (2025). A Review of Mamdani, Takagi–Sugeno, and

Type-2 Fuzzy Controllers for MPPT and Power Management in Photovoltaic Systems. Technologies, 13(9), 422. https://doi.org/10.3390/technologies13090422

AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, Carlos Sebastián Nivelo Galarza portador de la cédula de ciudadanía N.° 0106461585. En calidad de autor/a y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación "Análisis de las redes de telecomunicaciones basado en algoritmos de Lógica Difusa para los sistemas de medición inteligente AMI" de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, Así mismo; autorizo a la Universidad para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 12 de octubre de 2026

F: .....

Carlos Sebastián Nivelo Galarza

0106461585