

A Metrological Validation Methodology for SCADA/EMS Signals via Comparison with Reference Revenue Metering Systems

Metodología para la Validación Metrológica de Señales SCADA/EMS mediante Comparación con Mediciones Comerciales de Referencia

C. Del Hierro¹  0000-0001-5795-0312 V. Espinosa¹  0009-0008-5059-0957
J.C. Enríquez¹  0000-0002-3711-9588 D.M. Panchi¹  0000-0003-2701-531X
A.B. Bravo²  0009-0004-3059-5786

¹ Operador Nacional de Electricidad, CENACE, Quito, Ecuador
E-mail: cdhierro@cenace.gob.ec, jenriquez@cenace.gob.ec,
vespinosa@cenace.gob.ec, dpanchi@cenace.gob.ec

² Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE, Sangolquí, Ecuador
E-mail: abbravo1@espe.edu.ec

Abstract

The reliability of real-time power system supervision depends on the accuracy of SCADA/EMS telemetry. Unlike commercial metering systems, which are subject to periodic verification under stricter metrological requirements, operational telemetry is not always assessed with the same frequency, which may affect the quality of the data used for monitoring and operation. This paper presents a methodology for the metrological validation of SCADA/EMS signals through systematic comparison with higher-accuracy records from the Commercial Metering System. The study considered active and reactive power time series from approximately 920 signals, using a temporal alignment procedure for asynchronous sources and a multivariable statistical assessment based on percentage accuracy, linear regression parameters, and the Pearson correlation coefficient. A C4.5-based classifier was also used as a complementary tool for signal classification. The results show that, although a large portion of the analyzed telemetry exhibits high trend consistency with respect to commercial reference, the proposed methodology enables the identification of anomalies such as polarity inversions, scaling errors, and frozen signals. The classifier achieved an overall accuracy of 79.10% and a sensitivity of 87.60% for detecting out-of-compliance signals. These results support the proposed approach as an analytical basis for prioritizing technical inspections and supporting compliance assessment under ARCONEL Regulation 003/16.

Resumen

La confiabilidad de la supervisión en tiempo real de los sistemas eléctricos depende de la exactitud de la telemetría SCADA/EMS, la cual, a diferencia de la medición comercial, no siempre dispone de procesos frecuentes de verificación metrológica. En este trabajo se presenta una metodología para la validación de señales operativas mediante su comparación sistemática con registros de referencia de mayor exactitud provenientes del Sistema de Medición Comercial. El enfoque considera el procesamiento de series temporales de potencia activa y reactiva correspondientes a aproximadamente 920 señales, incorporando un procedimiento de alineación temporal entre fuentes asíncronas y una evaluación estadística multivariable. La consistencia metrológica se analizó a partir de la precisión porcentual, los parámetros de regresión lineal (sesgo y pendiente) y el coeficiente de correlación de Pearson, complementados con un clasificador basado en el algoritmo C4.5. Los resultados muestran que, aunque una parte importante de la infraestructura presenta alta consistencia tendencial respecto de la referencia comercial, la metodología permite identificar anomalías como inversiones de polaridad, errores de escala y señales congeladas. El clasificador alcanzó una precisión global del 79,10 % y una sensibilidad del 87,60 % para la detección de señales fuera de norma. En conjunto, el enfoque propuesto aporta una base analítica para apoyar la priorización de revisiones técnicas y el seguimiento del cumplimiento de la Regulación ARCONEL 003/16. No obstante, su aplicación debe interpretarse considerando las limitaciones asociadas a la asincronía temporal entre fuentes y a la menor capacidad discriminante del análisis de correlación en señales con baja dinámica.

Index terms— SCADA/EMS, metrological validation, data quality, Pearson correlation.

Palabras clave— SCADA/EMS, validación metrológica, calidad de datos, correlación de Pearson.

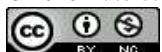
Recibido: 04-05-2026, Aprobado tras revisión: 16-07-2026

Forma sugerida de citación: Del Hierro, C.; Espinosa, V.; Enríquez, J.; Panchi, D.; Bravo, A. (2026). "Metodología para la Validación Metrológica de Señales SCADA/EMS mediante Comparación con Mediciones Comerciales de Referencia". Revista Técnica "energía". No. 23, Issue I, Pp. 65-78

ISSN On-line: 2602-8492 - ISSN Impreso: 1390-5074

Doi: <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v23.n1.2026.767>

© 2026 Autores



Esta publicación está bajo una licencia internacional Creative Commons Reconocimiento – No Comercial 4.0



1. INTRODUCCIÓN

La calidad de las mediciones es un elemento central para la supervisión y la operación segura de los sistemas eléctricos de potencia. Tradicionalmente, los centros de control han dependido de los datos adquiridos mediante sistemas SCADA para mantener la visibilidad del estado de la red y apoyar la toma de decisiones operativas [1]. En este contexto, aplicaciones como la estimación de estado requieren información precisa y oportuna para representar adecuadamente las condiciones del sistema [2]. Dado que los sistemas eléctricos modernos suelen operar cerca de sus límites técnicos, la integridad de los datos de campo resulta determinante para reducir vulnerabilidades ante disturbios y sostener una operación confiable.

No obstante, la infraestructura SCADA basada en unidades terminales remotas (RTU) presenta limitaciones frente a tecnologías de medición más recientes. Entre ellas se encuentran sus tasas de actualización relativamente lentas y la ausencia de sincronización temporal de alta precisión, lo que restringe su capacidad para representar fenómenos dinámicos del sistema [1]. En contraste, las unidades de medición fasorial (PMU) y, en determinados contextos, la infraestructura de medición avanzada (AMI), ofrecen datos con mayor resolución temporal y mejores capacidades de sincronización. La coexistencia de estas fuentes introduce desafíos asociados a la asincronía, al sesgo temporal y a las diferencias en las magnitudes medidas, lo que complica la construcción de una representación coherente del sistema en un mismo instante de análisis [1], [2].

La literatura reciente ha abordado estos problemas principalmente desde la integración de múltiples fuentes de medición. Una parte importante de los trabajos se ha concentrado en la estimación de estado híbrida (HSE), con el propósito de mejorar la observabilidad y la redundancia mediante la combinación de datos SCADA y PMU [3]. De forma complementaria, estudios sobre medidores inteligentes y AMI han mostrado el potencial de estas tecnologías para incrementar la calidad de la información disponible y apoyar tareas de monitoreo, diagnóstico y detección de anomalías [4]. Sin embargo, la mayor parte de estos enfoques se orienta a mejorar el desempeño de la estimación o de la infraestructura de medición, más que a establecer procedimientos sistemáticos de validación metrológica de la telemetría operativa SCADA mediante comparación con una referencia comercial de mayor exactitud [2], [4], [5].

En el Sector Eléctrico Ecuatoriano, este problema adquiere relevancia adicional por su vínculo con los requerimientos regulatorios vigentes. La Regulación No. ARCONEL-003/16 establece que las mediciones

analógicas utilizadas para la supervisión en tiempo real deben cumplir una clase de precisión del 1 % o menor. Por su parte, la Regulación No. ARCONEL-001/16, correspondiente al Sistema de Medición Comercial, exige para los puntos de frontera equipos de mayor exactitud, con clases de precisión de 0.2 % o 0.5 % [6], [7]. Aunque la normativa contempla procesos de auditoría y verificación de mediciones, estos se han desarrollado tradicionalmente bajo esquemas periódicos o manuales.

A partir de esta diferencia entre la precisión exigida a la telemetría operativa y la requerida al sistema de medición comercial, se observa una atención limitada al desarrollo de metodologías aplicadas para la validación metrológica automatizada de señales SCADA/EMS mediante su contraste con mediciones comerciales de mayor exactitud [8]. En consecuencia, este artículo presenta una metodología basada en análisis estadístico comparativo para evaluar la consistencia de señales SCADA/EMS e identificar posibles desviaciones de magnitud y errores de configuración. El alcance del estudio comprende el análisis de aproximadamente 920 señales de potencia activa y reactiva, a partir de su comparación con registros comerciales de referencia integrados en intervalos de 15 minutos, correspondientes al periodo octubre-diciembre de 2025. El resto del manuscrito se organiza de la siguiente manera: la Sección II describe los materiales y métodos, la Sección III presenta los resultados, la Sección IV desarrolla la discusión técnica y la Sección V expone las conclusiones.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Captura y Procesamiento de los datos

La fuente primaria de información del sistema SCADA/EMS corresponde a la telemetría adquirida en las instalaciones del Sistema Nacional Interconectado, tanto en subestaciones como en centrales de generación, de acuerdo con los requerimientos establecidos en la Regulación ARCONEL 003/16. La arquitectura de adquisición de datos sigue la estructura funcional definida en la norma IEC 61850, la cual está conformada por los siguientes niveles:

- Nivel 3: Centro de Control.
- Nivel 2: Sistemas SCADA locales.
- Nivel 1: Sistemas de protección, control y automatización.
- Nivel 0: Equipos de proceso y dispositivos de medición en campo.

Las mediciones provenientes del SCADA/EMS son almacenadas en el subsistema histórico del sistema. Dependiendo de la configuración de cada punto de medición y del protocolo de comunicación utilizado, los

datos pueden registrarse mediante actualización periódica, generalmente cada cuatro segundos, o por excepción cuando la variación de la señal supera el valor de banda muerta configurado.

Como parte de las funcionalidades propias del histórico, el sistema dispone de herramientas de compresión e interpolación que permiten consultar las variables con una resolución uniforme de 15 minutos. Esta resolución fue utilizada en el presente trabajo para realizar la comparación con la información proveniente del Sistema de Medición Comercial.

La fuente de referencia utilizada corresponde al Sistema de Medición Comercial, cuya adquisición de datos se realiza conforme a la Regulación ARCONEL 001/16. En este sistema, el registrador de energía constituye el elemento principal de medición y proporciona información al sistema de adquisición comercial, donde las variables quedan almacenadas con una resolución de 15 minutos. Para este estudio se utilizaron únicamente las mediciones de potencia activa y potencia reactiva.

La comparación entre ambas fuentes fue desarrollada mediante una aplicación implementada en Python, la cual utiliza un diccionario de correspondencia para relacionar cada señal del sistema SCADA/EMS con su respectiva medición en el Sistema de Medición Comercial. Para el acceso y procesamiento de la información se emplearon bibliotecas como Pandas y NumPy para el manejo de series temporales, SQLAlchemy para la consulta de las bases de datos y Pythonet para la obtención de información del histórico SCADA/EMS.

Una vez obtenidas las mediciones, la aplicación realiza de forma automática la alineación temporal de las series, el cálculo de las métricas estadísticas, el análisis de regresión lineal y la clasificación de las señales mediante el algoritmo C4.5, siguiendo la metodología presentada en la Fig. 1.

2.2. Fuente y naturaleza de los datos

Para la evaluación de la consistencia metrológica se emplearon dos conjuntos de datos provenientes de la infraestructura de supervisión del Sistema Nacional Interconectado del Ecuador. El primero correspondió a la telemetría operativa adquirida por el sistema SCADA/EMS a través de unidades terminales remotas (RTU) y dispositivos electrónicos inteligentes (IED). Estas mediciones analógicas se utilizan para la supervisión en tiempo real del sistema y, de acuerdo con la normativa vigente, deben cumplir una clase de precisión del 1 % [7].

El segundo conjunto de datos correspondió al Sistema de Medición Comercial, utilizado en este estudio como fuente de referencia de mayor exactitud. Estos registros provienen de medidores comerciales con clases de precisión de 0.2 % o 0.5 % [6], por lo que constituyen una base adecuada para la comparación con la telemetría operativa.

2.3. Variables analizadas

El análisis se centró en dos variables relevantes para la supervisión y operación del sistema eléctrico: potencia activa (P) y potencia reactiva (Q). Para el caso de estudio se consideró un conjunto aproximado de 920 señales, correspondientes a distintos puntos del sistema eléctrico. La selección de estas variables permite evaluar tanto la exactitud de la magnitud medida como la consistencia del comportamiento temporal entre la telemetría SCADA/EMS y la medición comercial de referencia [1].

2.4. Correspondencia y alineación temporal entre fuentes

Para garantizar que la comparación se realizara sobre el mismo punto físico del sistema, se empleó un diccionario de correspondencia entre las señales operativas del SCADA/EMS y los registros del sistema de medición comercial. Este mecanismo vinculó cada etiqueta operativa con su respectivo identificador en la fuente comercial, permitiendo construir pares de señales equivalentes para el análisis.

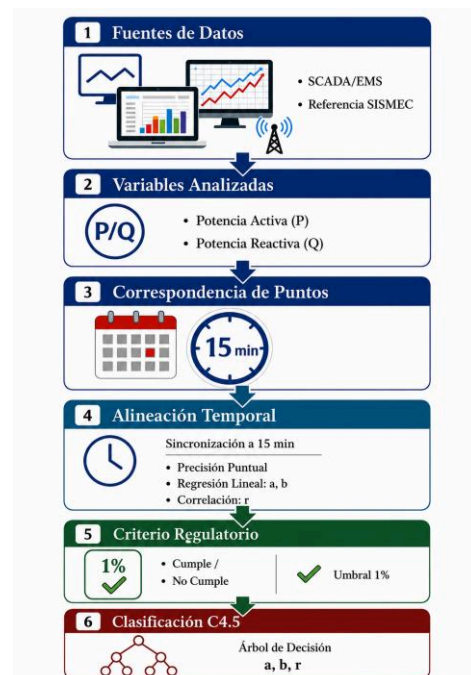


Figura 1: Metodología propuesta para la validación metrológica de señales SCADA/EMS

Debido a la diferencia de resolución temporal entre ambas fuentes, la alineación se realizó tomando como referencia la estampa de tiempo quinceminutal del sistema de medición comercial. Para armonizar las series, la telemetría operativa SCADA/EMS fue interpolada sobre la escala temporal de 15 minutos utilizada por el Sistema de Medición Comercial, de modo que cada registro pudiera compararse con el valor correspondiente en un instante temporal equivalente. Este procedimiento permitió construir pares de datos comparables para cada punto de medición y realizar la evaluación estadística entre ambas fuentes [8].



Figura 2: Esquema de alineación temporal entre telemetría SCADA/EMS y registros comerciales

2.5. Criterios de selección, exclusión y depuración de señales

Antes de aplicar las métricas de comparación, se realizó un proceso de depuración sobre el conjunto de señales analizadas. Este proceso tuvo como finalidad excluir aquellos registros que no permitieran una comparación estadísticamente representativa entre la telemetría operativa y la medición comercial.

Entre los criterios de exclusión se consideraron las señales identificadas como congeladas, entendidas como aquellas que no presentan variación entre registros consecutivos durante el periodo evaluado. Asimismo, se excluyeron del análisis de correlación los casos en los que la magnitud de potencia permaneció de forma persistente en valores muy bajos o con escasa variación, ya que la ausencia de dinámica impide evaluar adecuadamente la relación lineal entre ambas fuentes. De igual forma, se descartaron los registros que no cumplieran las condiciones mínimas de consistencia para ser comparados entre sí.

2.6. Conceptos de evaluación metrológica

Con el fin de facilitar la interpretación de los resultados presentados en las secciones siguientes, se describen brevemente algunos conceptos utilizados durante la evaluación de la consistencia entre las mediciones del sistema SCADA/EMS y el Sistema de Medición Comercial

Exactitud. En metrología [10], la exactitud expresa el grado de concordancia entre un valor medido y un valor de referencia. En este trabajo, las mediciones

provenientes del Sistema de Medición Comercial se consideran como referencia para evaluar el comportamiento de las señales del sistema SCADA/EMS, debido a que cumplen con los requisitos establecidos para la medición comercial de energía.

Precisión porcentual [10]. Para este estudio, la precisión se expresa como el error porcentual existente entre la medición SCADA/EMS y la medición de referencia. Este indicador permite cuantificar la diferencia entre ambas fuentes de información y verificar el cumplimiento del límite de $\pm 1,5\%$ establecido por la regulación vigente para las señales analizadas.

Sesgo y error de escala [10]. Durante la comparación entre ambas fuentes pueden presentarse diferencias sistemáticas asociadas a problemas de parametrización, configuración o transformación de señales. Estas diferencias se analizan mediante la regresión lineal, donde el intercepto permite identificar posibles sesgos y la pendiente evidencia desviaciones asociadas a errores de escala.

Correlación lineal [10]. El coeficiente de correlación de Pearson se utiliza para evaluar el grado de asociación lineal entre las series temporales del sistema SCADA/EMS y las mediciones comerciales. Valores cercanos a uno indican que ambas señales presentan un comportamiento similar a lo largo del tiempo, mientras que valores bajos pueden evidenciar inconsistencias en la medición o en la configuración de la señal.

Con el propósito de evitar ambigüedades, en este artículo el término precisión porcentual hace referencia exclusivamente a la evaluación metrológica de las mediciones. Por otra parte, el desempeño del algoritmo de clasificación se evalúa mediante métricas propias del aprendizaje automático, como la exactitud (accuracy), la matriz de confusión y el estadístico Kappa, las cuales se describen en la Sección 2.9.

2.7. Métricas para la evaluación de la consistencia metrológica

La evaluación de la consistencia metrológica se basó en un conjunto de métricas orientadas a cuantificar tanto la diferencia de magnitud entre la medición SCADA y la referencia comercial como el comportamiento conjunto de ambas señales en el tiempo. Para ello, se emplearon las siguientes métricas.

La precisión puntual, denotada como acc_t , se definió como el valor absoluto de la diferencia entre la medición SCADA y la medición de referencia en un instante t , conforme a la ecuación (1):

$$acc_t = |Med_{SCADA,t} - Med_{PME,t}| \quad (1)$$

A partir de esta definición, la precisión promedio acc se calculó para una serie temporal de longitud p como el promedio de las diferencias absolutas entre ambas mediciones, según la ecuación (2):

$$acc = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p |Med_{SCADA,i} - Med_{PME,i}| \quad (2)$$

Por su parte, la precisión porcentual promedio $acc\%$ se evaluó como el error relativo promedio con respecto a la magnitud de referencia, tal como se expresa en la ecuación (3):

$$acc\% = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \left| \frac{Med_{SCADA,i} - Med_{PME,i}}{Med_{PME,i}} \right| \times 100 \quad (3)$$

Con el fin de analizar la relación entre ambas fuentes de medición, se empleó además un modelo de regresión lineal, presentado en la ecuación (4), donde y representa la medición SCADA y x la referencia comercial:

$$y = a + bx \quad (4)$$

A partir de este modelo se obtuvieron el bias (a), asociado al desplazamiento sistemático de la señal, y la pendiente (b), utilizada para identificar posibles errores de escala.

Para el análisis global de la consistencia tendencial, el coeficiente de correlación se agrupó operativamente en tres categorías basadas en su valor absoluto, $|r|$: alta correlación, baja correlación y sin correlación, según el criterio mostrado en la Tabla 1. El signo de r se analizó de manera complementaria en los casos particulares, con el fin de identificar anomalías asociadas a inversión de polaridad.

Tabla 1: Criterio de clasificación del grado de correlación entre mediciones SCADA/EMS y Sistema de Medición Comercial

Valor de $ r $	Categoría
$0,8 \leq r \leq 1$	Alta correlación
$0 < r < 0,8$	Baja correlación
$ r =0$ o $ r =NaN$	Sin correlación

2.8. Criterio regulatorio de cumplimiento aplicado al análisis

La evaluación del cumplimiento se estableció con base en el umbral de 1 % exigido para la telemetría operativa por la Regulación ARCONEL 003/16 [7]. En función de este criterio, el estado de cada señal se definió

mediante una categorización binaria sustentada en la precisión porcentual promedio, calculada según la ecuación (3):

CUMPLE: si la precisión porcentual es $\leq 1\%$.

NO CUMPLE: si la precisión porcentual es $> 1\%$.

Con el propósito de fortalecer la interpretación de los resultados, esta clasificación se complementó con el análisis de regresión lineal y del coeficiente de correlación de Pearson, de modo que la evaluación no se sustentara únicamente en una sola métrica de error, sino también en la relación funcional y en la concordancia temporal entre las señales comparadas.

2.9. Clasificación de señales mediante árbol de decisión

Como complemento del análisis estadístico, se empleó un árbol de decisión C4.5 para apoyar la clasificación automática de las señales según su condición de cumplimiento. El modelo utilizó como variables de entrada el bias (a), la pendiente (b) y el coeficiente de correlación (r), obtenidos a partir del análisis descrito en la Sección 2.7. La variable objetivo correspondió a la clasificación de las señales en las categorías Cumple y No cumple, de acuerdo con el criterio regulatorio establecido en la Sección 2.8.

La implementación del clasificador se realizó mediante la herramienta WEKA (Waikato Environment for Knowledge Analysis), utilizando el algoritmo J48, implementación del algoritmo C4.5 propuesta por Quinlan para la construcción de árboles de decisión a partir de atributos continuos y categóricos [11], [12].

La evaluación del clasificador se realizó considerando la exactitud de clasificación (accuracy) y el estadístico Kappa (κ). Mientras la exactitud representa la proporción de registros correctamente clasificados, el estadístico Kappa cuantifica el nivel de concordancia entre las clases predichas y las clases reales, descontando la concordancia atribuible al azar [12]. Esta métrica continúa siendo ampliamente utilizada para evaluar modelos de clasificación y la concordancia entre observadores y sistemas automáticos en aplicaciones recientes de aprendizaje automático [13]. En este trabajo, el valor de Kappa fue obtenido automáticamente a partir de la matriz de confusión generada por WEKA y se utilizó como una métrica complementaria para evaluar la confiabilidad del proceso de clasificación.

2.10 Entorno de implementación y desempeño computacional

La metodología propuesta fue desarrollada para ejecutarse de forma automática como parte del proceso diario de validación de las señales del sistema SCADA/EMS. En cada ciclo de ejecución se realiza la



adquisición de las mediciones correspondientes al período de análisis, la correspondencia entre las fuentes de información, la alineación temporal de los registros, el cálculo de las métricas estadísticas y la clasificación automática mediante el árbol de decisión C4.5.

Considerando un intervalo de muestreo de 15 minutos, cada señal genera 96 registros diarios. Para el conjunto aproximado de 920 señales analizado en este estudio, la aplicación procesa alrededor de 88 mil registros por ejecución, realizando automáticamente el cálculo de las métricas estadísticas, la evaluación del criterio regulatorio y la clasificación de las señales.

La herramienta fue desarrollada en Python, utilizando procesamiento paralelo para optimizar el análisis simultáneo de múltiples señales, mientras que la etapa de clasificación fue implementada mediante el algoritmo J48 de la plataforma WEKA. A partir de los registros de ejecución de la aplicación, el tiempo promedio requerido para completar un ciclo diario fue de aproximadamente 10 min 50 s, lo que demuestra que la metodología es adecuada para su aplicación operativa en un entorno de supervisión en tiempo real.

Tabla 2: Características de la implementación y desempeño computacional

Parámetro	Valor
Frecuencia de ejecución	Diaria
Resolución temporal	15 min
Señales analizadas por ejecución	≈920
Registros por señal	96
Registros procesados por ejecución	≈88 320
Lenguaje de programación	Python 3
Clasificador	WEKA (J48 – C4.5)
Estrategia de procesamiento	Paralelo (6 hilos)
Tiempo promedio de ejecución	≈10 min 50 s

3. RESULTADOS

3.1. Evaluación de la integridad global de la telemetría operativa

El análisis inicial de la consistencia metrológica se realizó sobre un conjunto de aproximadamente 920 señales operativas del sistema SCADA/EMS,

comparándolas con los registros de referencia del sistema de medición comercial. Los hallazgos consolidados en la Fig. 3 indican que una proporción del 54.5% de las señales analizadas presenta una asociación lineal clasificada como alta correlación. Este resultado sugiere un seguimiento tendencial adecuado de la dinámica de carga en la mayoría de los puntos monitoreados del sistema. Para fines de presentación de resultados, la clasificación del coeficiente de correlación se realizó mediante la agrupación operativa definida en la Tabla 1.

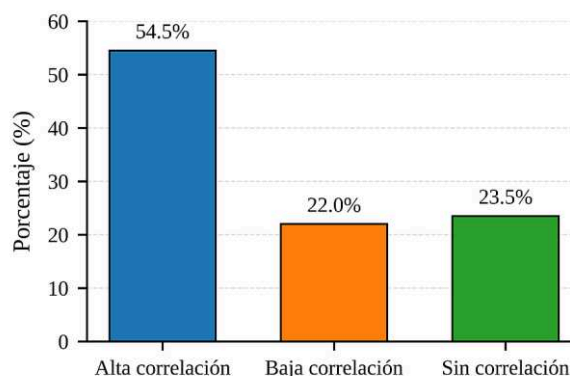
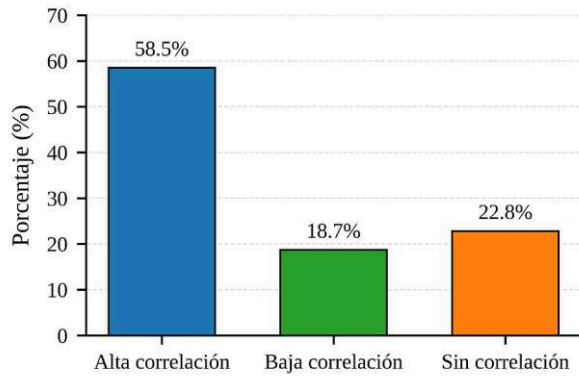


Figura 3: Resumen general de clasificación de correlación según el criterio operativo basado en $|r|$

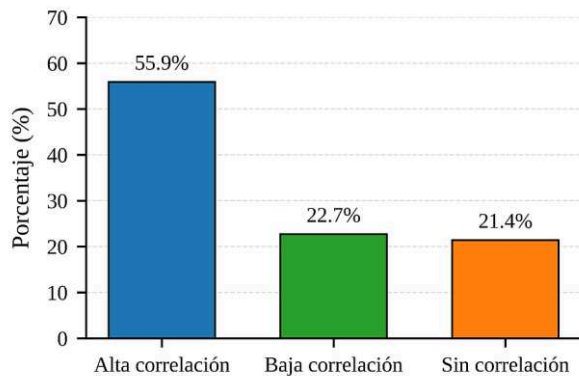
Por otro lado, las señales identificadas con correlación nula corresponden a casos en los que los registros de potencia se mantuvieron en valores cercanos a cero o en estado congelado durante el periodo de evaluación, lo que limita el cálculo de la asociación lineal sin implicar necesariamente una falla del equipo de medición.

3.2. Comportamiento diferencial por naturaleza de la magnitud (P vs. Q)

Con el fin de observar si el tipo de magnitud influye en la calidad del reporte operativo, se desagregaron los resultados comparando 460 señales de potencia activa (P) frente a 460 señales de potencia reactiva (Q). Al contrastar la Fig. 4(a) con la Fig. 4(b), se observa un comportamiento más favorable en las señales de potencia activa, las cuales concentraron una mayor proporción de casos con correlación elevada frente a la referencia comercial. Los datos muestran que las señales de potencia activa mantienen niveles de correlación más elevados y estables frente a la referencia comercial. En contraste, las señales de potencia reactiva presentan una mayor variabilidad en sus indicadores de consistencia, lo que indica que el comportamiento metrológico no fue uniforme entre ambas magnitudes.



(a)



(b)

Figura 4: Clasificación del grado de correlación entre señales SCADA/EMS y Sistema de Medición Comercial para las magnitudes analizadas: (a) potencia activa y (b) potencia reactiva, según el criterio operativo basado en $|r|$

3.3. Análisis de distribución de la fidelidad metrológica

La caracterización del desempeño de la telemetría se complementó mediante el análisis de la distribución del valor absoluto del coeficiente de correlación de Pearson, $|r|$, en intervalos de amplitud 0.1. Como se muestra en la Fig. 5, se observa una alta concentración de registros en los intervalos superiores, particularmente en el rango $|r| > 0.9$. Esta distribución indica que, para una proporción importante del conjunto analizado, existe una fuerte asociación lineal entre la telemetría operativa y la fuente de referencia comercial.

No obstante, el histograma también evidencia la presencia de señales distribuidas en intervalos bajos de $|r|$, lo que revela la existencia de casos con débil correspondencia lineal entre ambas fuentes de medición. Estos registros representan los casos de mayor desviación

estadística dentro del conjunto analizado y son examinados con mayor detalle en las secciones siguientes.

Debe señalarse que, al emplear $|r|$, esta representación permite evaluar la intensidad de la asociación lineal, pero no distingue entre correlaciones positivas y negativas. Por esta razón, la identificación de anomalías asociadas a inversión de signo requirió un análisis complementario del valor y signo del coeficiente de correlación en los casos particulares.

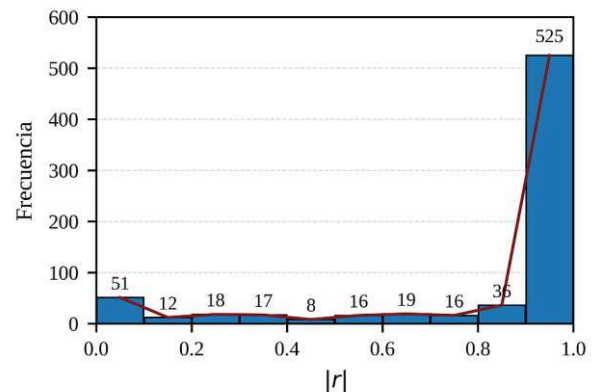
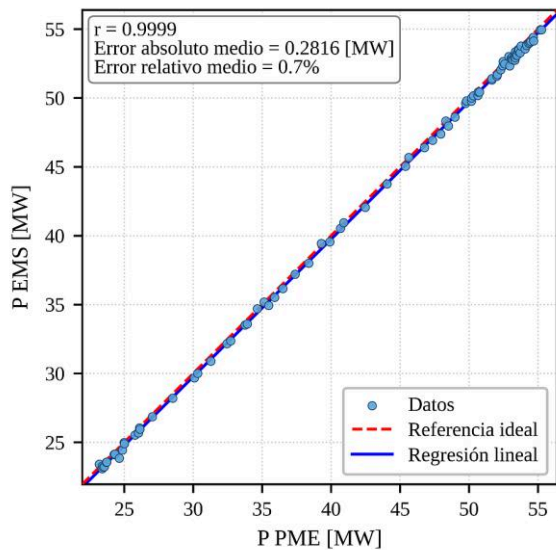


Figura 5: Histograma del valor absoluto del coeficiente de correlación de Pearson, $|r|$

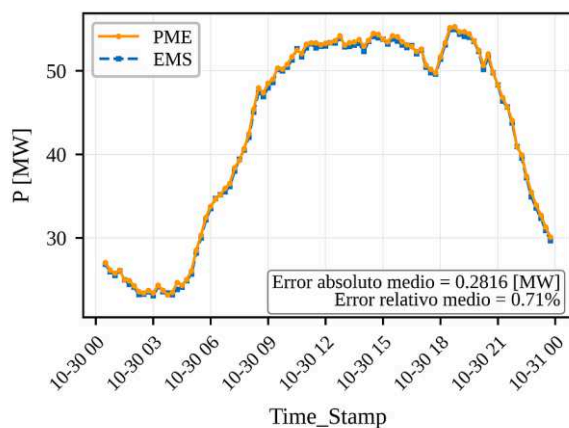
3.4. Caso representativo de cumplimiento metrológico

El comportamiento esperado de una señal metrológicamente consistente se caracteriza por la combinación de un error de magnitud reducido y una alta asociación lineal con respecto a la referencia comercial. En la Fig. 6 se presenta un caso representativo de cumplimiento, en el cual se observa un coeficiente de correlación muy alto $r = 0.9999$ y un error relativo medio de 0.71%, valor inferior al umbral regulatorio del 1%.

La Fig. 6(a) muestra la relación entre la medición operativa y la referencia comercial, junto con su ajuste de regresión lineal. La cercanía de los datos a la recta de ajuste evidencia una correspondencia prácticamente lineal entre ambas fuentes. Por su parte, la Fig. 6(b) muestra la evolución temporal de ambas señales, donde se aprecia que la telemetría operativa reproduce adecuadamente tanto la magnitud como la dinámica temporal registradas por la medición comercial.



(a)



(b)

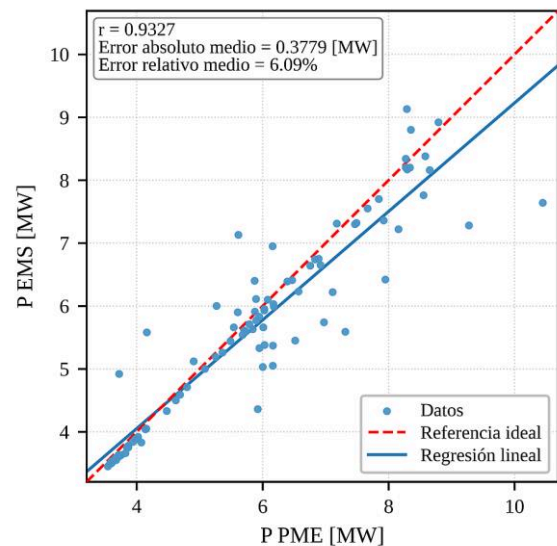
Figura 6: Caso representativo de cumplimiento metrológico: (a) relación entre la medición operativa y la referencia comercial con ajuste de regresión lineal; (b) comparación temporal entre ambas señales

Desde el punto de vista estadístico, este patrón constituye el comportamiento de referencia frente al cual se comparan los demás casos analizados. Su importancia radica en que representa una condición en la que la señal no solo satisface el criterio regulatorio de cumplimiento, sino que además conserva la variabilidad temporal de la magnitud supervisada. En términos de validación metrológica, este tipo de respuesta corresponde al escenario esperado para aplicaciones de supervisión y análisis operativo.

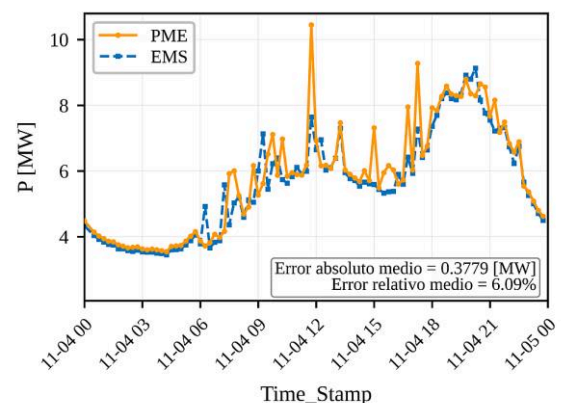
3.5. Disociación entre seguimiento tendencial y exactitud de magnitud

Uno de los hallazgos relevantes del estudio fue la identificación de señales que presentan una asociación lineal alta con la referencia comercial, pero errores de magnitud claramente superiores al umbral regulatorio. Este comportamiento se observa en la Fig. 7, donde se registra un coeficiente de correlación de $r = 0.9327$, acompañado de un error relativo medio de 6.09%, valor que excede el límite de cumplimiento establecido.

La Fig. 7(a) muestra que, aunque los datos siguen una tendencia lineal definida, la relación entre ambas mediciones no coincide con la referencia ideal, lo que evidencia una discrepancia sistemática en magnitud. De manera complementaria, la Fig. 7(b) permite observar que la señal operativa reproduce de forma general la evolución temporal de la referencia comercial, pero mantiene diferencias persistentes en varios intervalos de la serie.



(a)



(b)

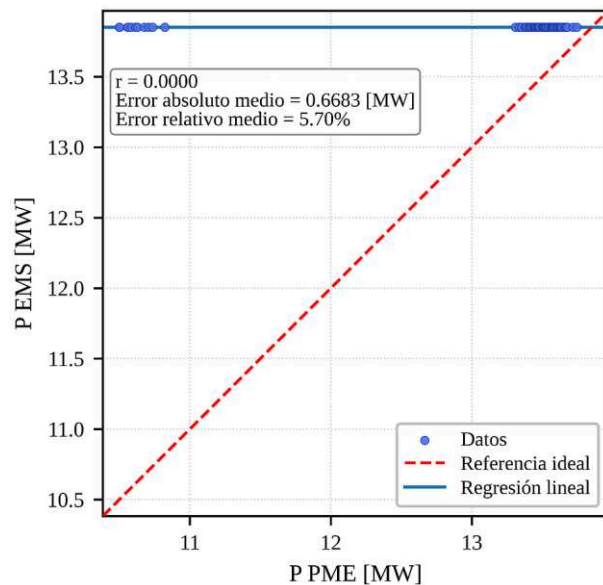
Figura 7: Caso representativo de asociación lineal alta y error de magnitud superior al umbral regulatorio: (a) relación entre la medición operativa y la referencia comercial con ajuste lineal; (b) comparación temporal entre ambas señales

Este resultado pone de manifiesto que una correlación alta no es suficiente, por sí sola, para validar metrológicamente una señal. Aunque la tendencia temporal se conserva, el nivel de error observado sugiere la presencia de una desviación sistemática compatible con un error de escala o parametrización. En términos prácticos, este tipo de comportamiento es especialmente relevante, ya que podría considerarse aceptable si la evaluación se limitara únicamente al seguimiento tendencial, a pesar de no satisfacer los criterios de exactitud exigidos para su uso operativo.

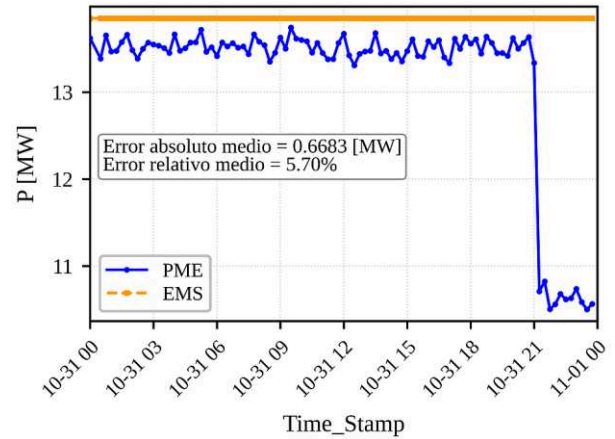
3.6. Registros con correlación nula y señales congeladas

La metodología también permitió identificar señales cuya respuesta temporal resulta incompatible con la dinámica observada en la referencia comercial. La Fig. 8 presenta un caso representativo de esta condición, caracterizado por un coeficiente de correlación prácticamente nulo $r \approx 0.0000$ y un error relativo medio de 5.70%, valor superior al umbral de cumplimiento establecido.

La Fig. 8(a) muestra una dispersión sin tendencia lineal apreciable entre la medición operativa y la referencia comercial, lo que refleja la ausencia de correspondencia entre ambas fuentes. De forma complementaria, la Fig. 8(b) evidencia que la señal operativa permanece prácticamente constante durante el periodo de análisis, mientras la medición de referencia presenta variaciones temporales apreciables en el mismo punto del sistema.



(a)



(b)

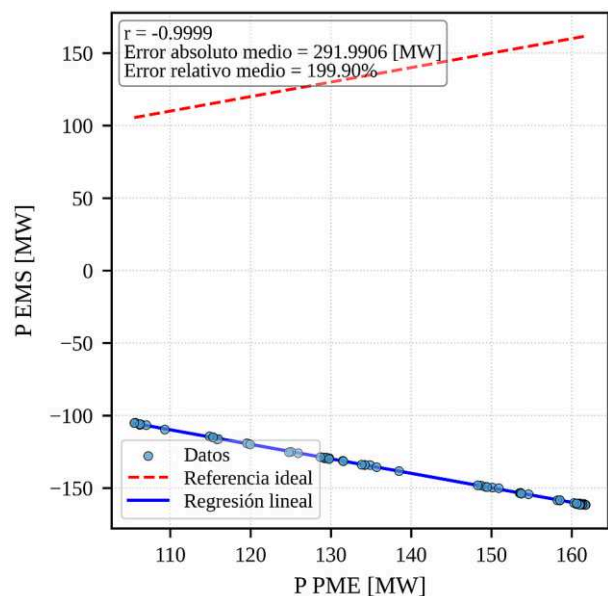
Figura 8: Caso representativo de correlación nula y señal congelada: (a) relación entre la medición operativa y la referencia comercial; (b) comparación temporal entre ambas señales

Desde la perspectiva de la validación metrológica, este patrón resulta especialmente relevante, ya que pone de manifiesto una pérdida de utilidad operativa de la señal, aun cuando el punto de medición continúe existiendo físicamente en el sistema. La ausencia de variación impide representar el comportamiento real de la magnitud supervisada y, en consecuencia, limita su uso para supervisión, análisis y seguimiento en tiempo real. Este tipo de casos justifica su tratamiento diferenciado dentro del procedimiento de depuración y evaluación de consistencia metrológica.

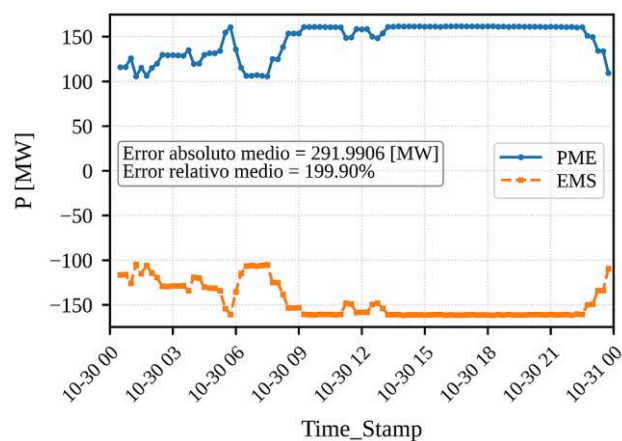
3.7. Anomalías de polaridad e inversión de signo

Entre los comportamientos más críticos identificados en el estudio se encuentran las señales con correlación negativa fuerte, cuya respuesta temporal evoluciona en sentido opuesto al de la referencia comercial. Este patrón se observa en la Fig. 9, donde se registra un coeficiente de correlación de $r = -0.9999$, acompañado de un error relativo medio de 199.90%. En este caso, el incremento de la magnitud en la referencia comercial corresponde a una disminución de la señal operativa, lo que evidencia una asociación lineal inversa entre ambas fuentes.

La Fig. 9(a) muestra que la nube de puntos sigue una tendencia lineal claramente definida, pero con pendiente negativa respecto al comportamiento esperado. De forma complementaria, la Fig. 9(b) permite observar que ambas señales conservan una evolución temporal similar en términos de forma, aunque con signo opuesto durante todo el periodo analizado. Este resultado indica que no se trata de una pérdida aleatoria de exactitud, sino de una inconsistencia sistemática compatible con una inversión de polaridad o de signo en la cadena de medición.



(a)



(b)

Figura 9: Caso representativo de correlación negativa fuerte e inversión de signo: (a) relación entre la medición operativa y la referencia comercial; (b) comparación temporal entre ambas señales

La capacidad diagnóstica de la metodología se aprecia con mayor claridad en la Fig. 10, donde se presenta el mismo caso una vez corregido analíticamente el signo de la señal. Tras esta corrección, la correspondencia entre ambas series mejora de manera sustancial, alcanzando un coeficiente de correlación de $r = 0.9999$ y un error relativo medio de 0.18%, valor compatible con el criterio de cumplimiento adoptado en el estudio.

La comparación entre ambas figuras confirma que la anomalía detectada no estaba asociada a ruido aleatorio ni a una pérdida general de seguimiento temporal, sino a

una inversión de signo. En este sentido, el método propuesto permite diferenciar entre discrepancias de magnitud, señales congeladas y anomalías de polaridad, lo que refuerza su utilidad como herramienta para la evaluación de consistencia metrológica en entornos operativos.

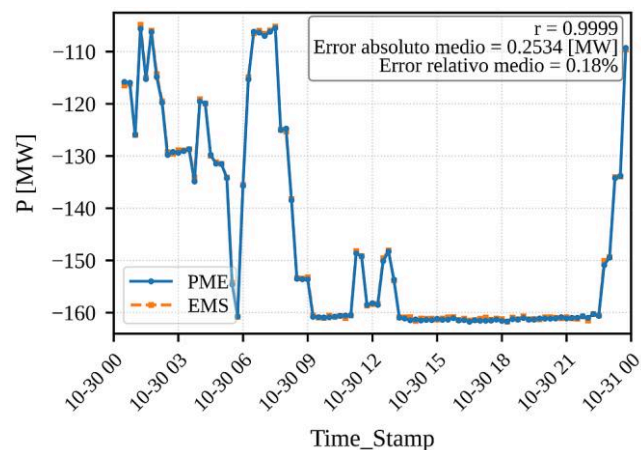


Figura 10: Caso representativo del mismo registro una vez corregida la inversión de signo

3.8. Desempeño del clasificador de cumplimiento metrológico

Como complemento del análisis estadístico descriptivo, se evaluó un clasificador basado en el algoritmo C4.5 para sistematizar la verificación del cumplimiento de la Regulación ARCONEL 003/16. El modelo permite establecer reglas de decisión a partir de las métricas calculadas para cada señal y clasificarlas según su condición de cumplimiento. En la Fig. 11, se presenta la estructura del árbol generado, en la que el coeficiente de correlación (r) aparece como uno de los atributos más influyentes en la separación entre señales que cumplen y no cumplen con el umbral de precisión del 1 %.

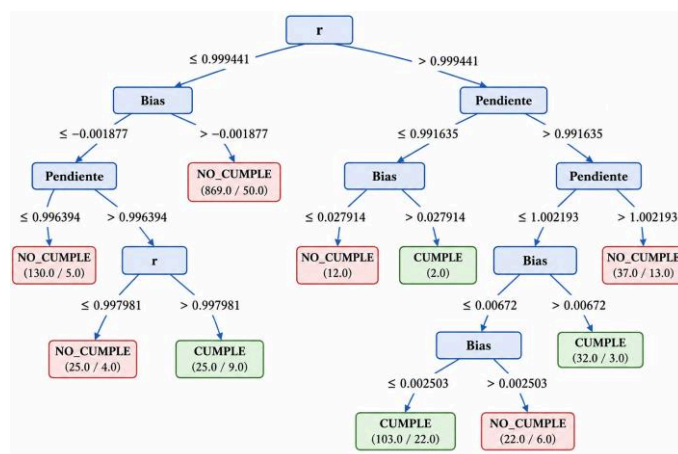


Figura 11: Árbol de decisión C4.5 para clasificación de cumplimiento metrológico

La evaluación global del modelo se resume en la Tabla 2. El clasificador alcanzó una precisión global de 79,10 %, mientras que el estadístico Kappa fue de 0,465, lo que indica una concordancia, moderada entre la clasificación automática y el criterio de referencia utilizado en el estudio. En conjunto, estos resultados muestran que la combinación de correlación, sesgo y pendiente aporta información útil para la clasificación de señales.

Tabla 3: Evaluación global del modelo C4.5

Métrica	Valor	Interpretación
Clasificados Correctamente	79,10%	El modelo es útil, prediciendo el 79% de los casos para evaluar el cumplimiento regulatorio. (Precisión del 1%)
Estadístico Kappa	0,465	Indica una concordancia moderada Kappa (aprox. 0.4-0.6) entre el modelo y la realidad, lo que confirma que las variables de Regresión Lineal sí tienen poder predictivo, pero no perfecto.

El detalle de aciertos y errores se presenta en la matriz de confusión de la Tabla 3. En ella se observa que el modelo identificó correctamente 461 señales de la clase NO CUMPLE, lo que evidencia una capacidad importante para discriminar registros con posibles incumplimientos metrológicos dentro del conjunto analizado.

Tabla 4: Matriz de confusión del modelo C4.5

	Clasificación: NO CUMPLE	Clasificación: CUMPLE
Real: NO CUMPLE	461 (Verdaderos positivos)	65 (Falsos negativos)
Real: CUMPLE	88 (Falsos positivos)	118 (Verdaderos negativos)

Por su parte, la Tabla 4 muestra las métricas de desempeño por clase. El valor de Recall para la categoría NO CUMPLE fue de 87,60 %, lo que indica una sensibilidad elevada para detectar señales fuera del umbral regulatorio. Este resultado refuerza la utilidad del clasificador como apoyo para priorizar la revisión de señales con posibles desviaciones respecto de la referencia comercial.

Tabla 5: Métricas detalladas del modelo C4.5

Clase	Recall (Capacidad de Encontrar)	Precisión (Fiabilidad de la Predicción)
NO CUMPLE	87,60%	84,00%
CUMPLE	57,30%	64,50%

4. DISCUSIÓN

4.1. Evaluación de la fidelidad operativa y su impacto en la supervisión

Los resultados obtenidos muestran que, aunque una proporción mayoritaria de las señales presenta una asociación lineal fuerte con la referencia comercial (Fig. 3), la presencia de una dispersión apreciable en los rangos inferiores de correlación indica que la supervisión del Sistema Nacional Interconectado no puede apoyarse únicamente en la presunción de exactitud de los equipos de campo. Este hallazgo es coherente con la literatura, que señala que el desempeño de las funciones avanzadas de supervisión depende del conocimiento de la calidad y del error asociado a cada fuente de medición [1], [2].

La concentración predominante de registros con $|r| > 0.9$ (Fig. 5) sugiere un desempeño globalmente favorable de la infraestructura de adquisición SCADA. Sin embargo, la existencia de señales atípicas y de registros fuera de norma confirma que el sistema sigue siendo sensible a mediciones inconsistentes, las cuales pueden afectar la representación operativa del estado de la red [2]. En este sentido, la principal implicación del análisis global no es cuestionar la utilidad del SCADA, sino mostrar la necesidad de complementar su operación con procedimientos de verificación sistemática basados en datos.

4.2. Valor de combinar precisión, correlación y regresión

Uno de los aportes más relevantes del estudio es mostrar que el cumplimiento del límite de precisión del 1% establecido en la Regulación ARCONEL 003/16 constituye una condición necesaria, pero no suficiente, para caracterizar la calidad de la telemetría en aplicaciones dinámicas. Los casos analizados en los resultados evidencian que una señal puede mantener un error de magnitud reducido y, aun así, presentar un seguimiento tendencial deficiente respecto de la referencia comercial. Esto indica que una evaluación basada solo en el error porcentual puede ocultar comportamientos problemáticos en la respuesta temporal de la señal.

La incorporación conjunta del coeficiente de correlación y de los parámetros de regresión lineal (a, b) permitió ampliar el análisis más allá de la exactitud puntual. Mientras la precisión porcentual cuantifica la desviación de magnitud, la correlación permite evaluar el seguimiento temporal, y la regresión aporta información útil para distinguir sesgos o errores de escala. Esta combinación resulta especialmente pertinente en contextos donde se comparan fuentes heterogéneas con distinta resolución temporal y distinta exactitud, un problema que ya ha sido identificado en la literatura sobre integración de mediciones en sistemas eléctricos [1], [2], [9].

4.3. Significado técnico de las anomalías detectadas

Los patrones identificados en los resultados muestran que las anomalías observadas no son equivalentes entre sí y, por tanto, no deben interpretarse bajo un único criterio de calidad metrológica. En los casos con alta correlación y error de magnitud elevado, el comportamiento de la señal operativa es compatible con discrepancias sistemáticas de escala o parametrización, ya que la tendencia temporal se conserva, pero la magnitud permanece desplazada con respecto a la referencia comercial. En contraste, las señales clasificadas como congeladas presentan una pérdida sustancial de utilidad operativa, debido a que dejan de reflejar la variación efectiva de la magnitud supervisada.

De manera similar, las señales con correlación negativa fuerte constituyen uno de los hallazgos más relevantes del estudio, ya que su comportamiento es compatible con anomalías de polaridad o inversión de signo en la cadena de medición. La comparación con el caso corregido muestra que este tipo de inconsistencia no corresponde simplemente a ruido o dispersión aleatoria, sino a un patrón sistemático que puede ser identificado mediante el análisis conjunto de error, regresión y correlación [1], [4].

En conjunto, estos resultados evidencian que la metodología propuesta no solo permite detectar señales que incumplen el criterio regulatorio de exactitud, sino también diferenciar distintos tipos de anomalía a partir de evidencia estadística. Esta capacidad resulta relevante para priorizar revisiones técnicas, orientar procesos de depuración de datos y fortalecer la confiabilidad de la información utilizada en supervisión y análisis operativo.

4.4. El papel del clasificador C4.5 en la gestión metrológica

El uso del algoritmo de inducción de árboles de decisión C4.5 no se plantea como un mecanismo autónomo de diagnóstico, sino como una herramienta de apoyo para sistematizar la identificación de señales que

no cumplen con los criterios de evaluación adoptados en el estudio. Su interés radica en la posibilidad de combinar parámetros de regresión lineal, como el sesgo y la pendiente, con el coeficiente de correlación, de modo que la clasificación no dependa de una sola métrica.

El clasificador alcanzó una precisión global del 79,10% y un estadístico Kappa de 0,465 lo que indica una concordancia moderada entre la clasificación automática y el criterio de referencia empleado. De manera complementaria, el recall de 87,60% para la clase NO CUMPLE evidencia una capacidad elevada para identificar señales con posibles desviaciones metrológicas, lo cual resulta especialmente relevante en un contexto de supervisión masiva, donde el principal interés operativo radica en detectar oportunamente los casos que requieren revisión técnica.

En este sentido, el árbol de decisión no sustituye el análisis estadístico ni el criterio especializado, pero sí aporta una base estructurada para priorizar señales con mayor probabilidad de incumplimiento. Su utilidad práctica reside en servir como mecanismo de cribado inicial dentro del proceso de auditoría metrológica, reduciendo el esfuerzo de revisión manual sobre grandes volúmenes de telemetría y orientando la atención hacia registros con mayor evidencia de inconsistencia.

4.5. Implicaciones prácticas en el sistema eléctrico ecuatoriano

La aplicación de esta metodología tiene implicaciones directas en la gestión técnica del Operador Nacional de Electricidad y de los participantes del Sector Eléctrico Ecuatoriano. Al basarse en la comparación entre la telemetría operativa y el Sistema de Medición Comercial, el análisis se apoya en dos infraestructuras que responden a exigencias distintas de exactitud dentro del marco regulatorio nacional [6].

En este contexto, el enfoque propuesto puede apoyar la verificación del cumplimiento del umbral del 1% exigido para la telemetría operativa [7], al identificar señales con posibles errores de escala, inversiones de signo o pérdida de actualización. Su principal valor práctico no radica en reemplazar las revisiones de campo, sino en aportar evidencia para priorizar intervenciones técnicas sobre aquellos puntos donde la comparación estadística revela inconsistencias persistentes.

4.6. Limitaciones del estudio

A pesar de su utilidad, la metodología presenta limitaciones que deben considerarse en su interpretación. En primer lugar, la diferencia entre la resolución temporal de ambas fuentes —del orden de segundos en SCADA/EMS y de 15 minutos en la medición

comercial— obliga a realizar procesos de agregación que pueden atenuar eventos transitorios o variaciones rápidas de la señal. Por ello, el método resulta más apropiado para evaluar consistencia metrológica en escalas operativas que para detectar fenómenos de corta duración.

En segundo lugar, la validez del análisis depende de la consistencia del diccionario de correspondencia entre puntos de medición. Cualquier error o desactualización en este emparejamiento puede afectar la comparación entre fuentes. Finalmente, en señales con flujos cercanos a cero o con escasa variación temporal, el coeficiente de correlación pierde capacidad discriminante, lo que limita la utilidad del análisis tendencial en escenarios de baja dinámica.

5. CONCLUSIONES

El estudio demostró que la comparación entre mediciones SCADA/EMS y registros del Sistema de Medición Comercial constituye una base válida para evaluar la consistencia metrológica de la telemetría operativa en el sistema eléctrico ecuatoriano. Los resultados evidenciaron que, aunque una parte importante de las señales presenta un seguimiento tendencial adecuado respecto de la referencia comercial, persiste un subconjunto con desviaciones sistemáticas que comprometen la fidelidad de la información utilizada en supervisión y operación en tiempo real.

Asimismo, se verificó que la evaluación de estas señales no puede sustentarse únicamente en el cumplimiento del umbral de precisión del 1%. La incorporación conjunta de la precisión porcentual, el coeficiente de correlación y los parámetros de regresión lineal permitió diferenciar comportamientos metrológicos distintos e identificar anomalías asociadas con errores de escala, señales congeladas e inversiones de signo. En este sentido, la metodología propuesta aporta una base estructurada para priorizar revisiones técnicas sobre señales con posibles inconsistencias dentro del marco regulatorio ecuatoriano, sin sustituir la verificación física en campo.

Entre las principales limitaciones del estudio se encuentran la diferencia en la resolución temporal de las fuentes comparadas y la menor capacidad discriminante del análisis de correlación en señales con baja dinámica o valores cercanos a cero. Como línea futura de trabajo, resulta pertinente extender el análisis a otras variables eléctricas e investigar la incorporación de estos indicadores de consistencia en procesos de estimación de estado o en esquemas de ponderación de mediciones.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G. Cheng, Y. Lin, A. Abur, A. Gomez-Exposito, and W. Wu, "A Survey of Power System State Estimation Using Multiple Data Sources: PMUs, SCADA, AMI, and Beyond," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 15, no. 1, pp. 1129–1151, Jan. 2024, doi: 10.1109/TSG.2023.3286401.
- [2] L. Kamyabi, T. T. Lie, S. Madanian, and S. Marshall, "A Comprehensive Review of Hybrid State Estimation in Power Systems: Challenges, Opportunities and Prospects," Oct. 01, 2024, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: 10.3390/en17194806.
- [3] K. G. Koukouvinos, G. K. Koukouvinos, P. Chalkiadakis, S. D. Kaminaris, V. A. Orfanos, and D. Rimpas, "Evaluating the Performance of Smart Meters: Insights into Energy Management, Dynamic Pricing and Consumer Behavior," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 15, no. 2, Jan. 2025, doi: 10.3390/app15020960.
- [4] M. A. Kippke Salomón, J. M. Carou Álvarez, L. Suárez Ramón, and P. Arboleya, "Self-Diagnostic Advanced Metering Infrastructure Based on Power-Line Communication: A Study Case in Spanish Low-Voltage Distribution Networks," *Energies (Basel)*, vol. 18, no. 7, Apr. 2025, doi: 10.3390/en18071746.
- [5] O. Darmis and G. Korres, "A Survey on Hybrid SCADA/WAMS State Estimation Methodologies in Electric Power Transmission Systems," Jan. 01, 2023, MDPI. doi: 10.3390/en16020618.
- [6] Agencia de Regulación y Control de Electricidad, "Regulación No. ARCONEL -001/16," pp. 1–27, Oct. 2016.
- [7] Agencia de Regulación y Control de Electricidad, "Regulación No. ARCONEL -003/16," Oct. 2016.
- [8] X. Kong et al., "A hybrid state estimator based on SCADA and PMU measurements for medium voltage distribution system," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 8, no. 9, Sep. 2018, doi: 10.3390/app8091527.
- [9] Z. Chen, A. M. Amani, X. Yu, and M. Jalili, "Control and Optimisation of Power Grids Using Smart Meter Data: A Review," *Sensors*, vol. 23, no. 4, Feb. 2023, doi: 10.3390/s23042118.
- [10] Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM), *International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM)*, JCGM 200:2012, 3rd ed. DOI: 10.59161/JCGM200-2012

- [11] J. R. Quinlan, C4.5: Programs for Machine Learning. San Mateo, CA, USA: Morgan Kaufmann, 1993.
- [12] I. H. Witten, E. Frank, M. A. Hall, and C. J. Pal, Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques, 4th ed. Cambridge, MA, USA: Morgan Kaufmann, 2017.
- [13] J. Cohen, "A Coefficient of Agreement for Nominal Scales," Educational and Psychological Measurement, vol. 20, no. 1, pp. 37–46, 1960.
- [14] P. Hanegraaf et al., "Inter-reviewer reliability of human literature screening in machine learning-assisted systematic reviews," 2024.



Carlos Arturo Del Hierro Cadena. -Nació en Quito en 1978. Recibió su título de Ingeniero Electrónico en Automatización y Control en el año 2002 en la ESPE y en marzo de 2020, finalizó sus estudios en Máster Universitario en Análisis y Visualización de

Datos Masivos / Visual Analytics and Big Data en la UNIR. Desde el año 2009 hasta el año 2015 se desempeñó en el cargo de Ingeniero de Sistema Remoto de CENACE Corporación Centro Nacional de Control de Energía y hasta la presente fecha desempeña el cargo de Analista Nacional de Servicios de Tiempo Real 2 en CENACE Operador Nacional de Electricidad



José Enríquez Quelal.- Nació en Quito, Ecuador en 1989. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico de la Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador en 2014 y el título de Magister en Electricidad de la Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador en 2022. Desde

2014, trabaja como ingeniero SCADA en el Operador Nacional de Electricidad – CENACE, Quito, Ecuador. Sus intereses de investigación incluyen la Operación de Sistemas Eléctricos de Potencia, SCADA/EMS y Control Automático de Generación.



David Panchi Vergara. - Nació en Quito, en 1992. Obtuvo su título de Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional en 2017, Magister en Electricidad en la Escuela Politécnica Nacional en el año 2022. Actualmente se desempeña como especialista de Investigación y Desarrollo en la Subgerencia Nacional de Investigación y Desarrollo de CENACE. Sus áreas de interés son: Sistemas Eléctricos de Potencia, Modelación y simulación mediante gemelos digitales, Operación de Sistemas Eléctricos de Potencia.



Vanessa Espinosa Acosta.- Nació en Quito en 1992. Recibió su título de Ingeniera en Electrónica y Control de la Universidad de Politécnica Nacional - EPN en 2015; y su título de Máster en Gestión y Automatización de Procesos de la Universidad de las

Américas – UDLA en 2025. Sus campos de investigación están relacionados con la gestión y automatización de procesos.



Angie Bravo Montenegro.- Nació en Tulcán en 1997. Actualmente se encuentra finalizando sus estudios en la carrera de Ingeniera Electromecánica de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE. Sus áreas de interés académico se centran en el modelamiento y

optimización de sistemas eléctricos de potencia, enfocándose en la integración de energías renovables y almacenamiento de energía, priorizando estudios que contribuyan al desarrollo energético sostenible del Ecuador.