Evaluación de bajo costo del estado de sistemas de puesta a tierra en instalaciones industriales

Juan José Grassi [1]

grassi.juanjose@usal.edu.ar

[1] Ing. Electromecánico, UBA. ORCID: 0009-0004-8717-6689.

Recibido 10/08/2026; Aceptado: 26/10/2026

Resumen: El correcto desempeño de los sistemas de puesta a tierra es fundamental para garantizar la seguridad eléctrica, la protección de los equipos y la continuidad operativa en instalaciones industriales. Sin embargo, las metodologías de evaluación tradicionales suelen basarse en mediciones periódicas que no siempre reflejan el comportamiento real de los sistemas bajo condiciones variables de operación. En este trabajo se presenta una metodología práctica y de bajo costo para la evaluación del estado de sistemas de puesta a tierra, basada en la integración de mediciones mediante telurímetro, inspección visual estructurada y monitoreo continuo. La metodología fue aplicada en dos establecimientos industriales del partido de Pilar, provincia de Buenos Aires, identificados como TEKNIKA y BioMech, cuyos sistemas de puesta a tierra se encuentran separados aproximadamente 120 m. Para complementar las evaluaciones convencionales se implementó un sistema automático de adquisición de datos que permitió registrar de manera sincronizada la evolución temporal de ambos sistemas. Los resultados evidenciaron diferencias significativas en el comportamiento temporal de los sistemas analizados, aun bajo condiciones ambientales similares, sugiriendo la influencia de factores locales asociados al terreno, a los electrodos y a las características propias de cada instalación. La metodología propuesta constituye una herramienta accesible para el diagnóstico preliminar de sistemas de puesta a tierra, permitiendo detectar variaciones que podrían no ser identificadas mediante mediciones periódicas convencionales y aportando información útil para tareas de mantenimiento y futuros desarrollos orientados al monitoreo continuo.

Palabras-clave: seguridad eléctrica; monitoreo continuo; diagnóstico eléctrico; resistencia de tierra; mantenimiento predictivo; instalaciones industriales.

Low-cost assessment of the condition of grounding systems in industrial facilities

Abstract: The proper functioning of grounding systems is fundamental to ensuring electrical safety, equipment protection, and operational continuity in industrial facilities. However, traditional evaluation methodologies are often based on periodic measurements that do not always reflect the actual behavior of the systems under varying operating conditions. This paper presents a practical and low-cost methodology for evaluating the condition of grounding systems, based on the integration of measurements using a ground resistance

tester, structured visual inspection, and continuous monitoring. The methodology was applied in two industrial facilities in the Pilar district, Buenos Aires province, identified as TEKNIKA and BioMech, whose grounding systems are located approximately 120 m apart. To complement the conventional evaluations, an automatic data acquisition system was implemented, allowing for the synchronized recording of the temporal evolution of both systems.

The results showed significant differences in the temporal behavior of the analyzed systems, even under similar environmental conditions, suggesting the influence of local factors associated with the terrain, the electrodes, and the specific characteristics of each installation. The proposed methodology constitutes an accessible tool for the preliminary diagnosis of grounding systems, allowing the detection of variations that might not be identified through conventional periodic measurements and providing useful information for maintenance tasks and future developments aimed at continuous monitoring.

Keywords: electrical safety; continuous monitoring; electrical diagnostics; ground resistance; predictive maintenance; industrial facilities

1. Introducción

Los sistemas de puesta a tierra constituyen uno de los componentes fundamentales de la infraestructura eléctrica de cualquier instalación industrial. Su correcta implementación y funcionamiento contribuyen no solo a la protección de las personas frente a contactos indirectos, sino también a la preservación de equipos, instalaciones y procesos productivos que dependen de condiciones adecuadas de seguridad eléctrica (IEEE[1], 2013; IEEE, 2012).

La creciente complejidad de los entornos industriales modernos, caracterizados por una elevada incorporación de sistemas electrónicos, automatización y equipamiento sensible, ha incrementado la necesidad de disponer de sistemas de puesta a tierra confiables y permanentemente operativos. En este contexto, la evaluación periódica de su desempeño adquiere una importancia estratégica, tanto desde el punto de vista de la seguridad como de la continuidad operativa de los procesos industriales (IEEE, 2013).

No obstante, diversos estudios y normas técnicas especializadas indican que el comportamiento de los sistemas de puesta a tierra puede verse influenciado por múltiples factores relacionados con las características del terreno, las condiciones ambientales, la resistividad del suelo, el estado de conservación de los electrodos y las condiciones particulares de instalación. Dichas variables pueden provocar modificaciones en el comportamiento eléctrico observado a lo largo del tiempo, afectando la representatividad de las evaluaciones realizadas mediante mediciones aisladas (IEEE, 2012; IEEE, 2025).

A partir de estas consideraciones se desarrolla la presente investigación, orientada a evaluar la aplicabilidad de metodologías de bajo costo para el diagnóstico de

[1] IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), publica normas técnicas (*Standards*) utilizadas internacionalmente. Muchas de ellas son referencias obligadas en proyectos de ingeniería, investigación y desarrollo industrial.

sistemas de puesta a tierra en instalaciones industriales, procurando obtener una representación más cercana a las condiciones reales de funcionamiento.

1.1. Descripción del trabajo

A lo largo de mi trayectoria profesional, desarrollada tanto en el ámbito académico como en el sector industrial, he tenido la oportunidad de observar de manera directa diversas situaciones asociadas al desempeño de los sistemas de puesta a tierra en instalaciones productivas. Estas observaciones permitieron advertir que, en numerosas oportunidades, los valores obtenidos mediante evaluaciones convencionales no reflejan completamente el comportamiento que dichos sistemas presentan durante su operación habitual.

La experiencia acumulada en diferentes instalaciones industriales puso de manifiesto que los sistemas de puesta a tierra pueden experimentar variaciones significativas a lo largo del tiempo, aun cuando hayan sido correctamente diseñados e instalados. Asimismo, se observó que sistemas ubicados en una misma región geográfica y sometidos aparentemente a condiciones ambientales semejantes pueden presentar respuestas eléctricas diferentes, situación que ha sido reportada en investigaciones relacionadas con la influencia de la resistividad local del terreno y las condiciones particulares de implantación de los electrodos (IEEE, 2012).

Estas situaciones evidencian la necesidad de complementar los métodos tradicionales de evaluación con herramientas que permitan analizar el comportamiento real de los sistemas bajo condiciones operativas y ambientales variables. En particular, resulta de interés disponer de metodologías accesibles que permitan detectar variaciones, identificar tendencias y mejorar los criterios de diagnóstico sin requerir equipamiento complejo o inversiones significativas, aspecto que en los últimos años ha adquirido creciente relevancia en el ámbito del monitoreo y la gestión de activos eléctricos (IEEE, 2013; IEEE, 2012).

En este contexto, el presente trabajo propone una metodología práctica y de bajo costo para la evaluación del estado de sistemas de puesta a tierra en instalaciones industriales, integrando mediciones convencionales, inspección visual y monitoreo continuo de parámetros eléctricos asociados al sistema.

Surge entonces la siguiente pregunta de investigación:

¿Es posible mejorar la evaluación del estado de los sistemas de puesta a tierra en instalaciones industriales mediante metodologías prácticas y de bajo costo que permitan incorporar el efecto de las condiciones reales de operación y de las características particulares del entorno?

1.2. Planteo del surgimiento de la hipótesis

A partir de las observaciones realizadas en distintas instalaciones industriales, se ha constatado que el comportamiento de los sistemas de puesta a tierra presenta variaciones que no siempre pueden explicarse únicamente a partir de los parámetros considerados durante su diseño e instalación. Diversos estudios han demostrado que factores tales como la resistividad del terreno, la estratificación del suelo, el contenido de humedad y las condiciones particulares de emplazamiento pueden influir significativamente en el desempeño eléctrico de estos sistemas (Dawalibi & Mukhedkar, 1979; IEEE, 2012).

Asimismo, durante las tareas de relevamiento efectuadas en instalaciones industriales se observaron situaciones asociadas al deterioro físico de componentes pertenecientes a los sistemas de puesta a tierra, incluyendo procesos de corrosión, oxidación y degradación de conexiones eléctricas. Estas condiciones pueden afectar la continuidad eléctrica del sistema y modificar su comportamiento a lo largo del tiempo.

La Figura 1 presenta un ejemplo de deterioro observado durante las actividades de inspección, donde se aprecia la presencia de corrosión avanzada en una conexión perteneciente a un sistema de puesta a tierra industrial.

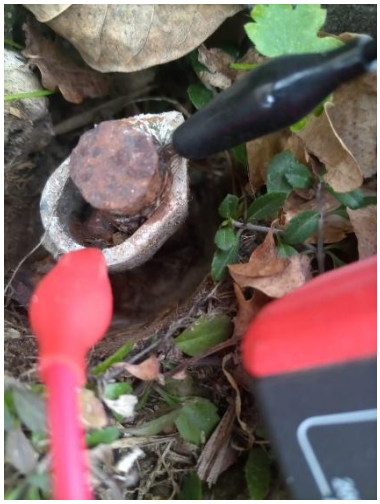


Figura 1 – Ejemplo de deterioro por corrosión observado en una conexión perteneciente a un sistema de puesta a tierra durante las actividades de relevamiento efectuadas en instalaciones industriales. Fuente: Propia

Asimismo, se observó que las metodologías tradicionales de evaluación se basan generalmente en mediciones periódicas efectuadas en momentos específicos, lo que puede limitar la capacidad de representar el comportamiento real del sistema bajo condiciones operativas variables. Las guías técnicas internacionales reconocen que las características eléctricas de una puesta a tierra pueden experimentar variaciones temporales asociadas a cambios ambientales y a las condiciones de servicio, por lo que una medición puntual no necesariamente refleja el comportamiento global del sistema (IEEE, 2012; Tagg, 1964).

Esta situación adquiere especial relevancia en instalaciones industriales donde la seguridad eléctrica, la protección de los equipos y la continuidad operativa dependen en gran medida de la confiabilidad del sistema de puesta a tierra (IEEE, 2013). En este contexto surge la necesidad de desarrollar enfoques de evaluación que complementen las técnicas convencionales mediante herramientas accesibles que permitan obtener información más representativa sobre el estado real de los sistemas en condiciones normales de funcionamiento.

A partir de estas observaciones se formula la siguiente hipótesis general:

- *Hipótesis general*

La integración de mediciones eléctricas convencionales, inspección visual estructurada y monitoreo continuo mediante instrumentación de bajo costo permite obtener una evaluación más representativa del estado de los sistemas de puesta a tierra en instalaciones industriales que la obtenida únicamente mediante mediciones periódicas tradicionales.

- *Hipótesis específicas*

H1. Los sistemas de puesta a tierra presentan variaciones temporales de comportamiento que no son adecuadamente detectadas mediante mediciones aisladas realizadas en intervalos periódicos.

H2. Sistemas de puesta a tierra emplazados en instalaciones industriales próximas y sometidas a condiciones ambientales similares pueden exhibir respuestas eléctricas significativamente diferentes debido a factores locales asociados a las características del terreno, la configuración constructiva y el estado particular de cada instalación.

H3. La incorporación de estrategias de monitoreo continuo utilizando recursos de bajo costo mejora la capacidad de diagnóstico y permite identificar tendencias, anomalías y cambios de comportamiento con mayor efectividad que los métodos convencionales de evaluación.

1.3. Delimitación del objeto de estudio

Las observaciones realizadas durante la actividad profesional y el análisis preliminar de los sistemas estudiados permiten advertir que el desempeño de las puestas a tierra constituye un fenómeno complejo, influenciado por múltiples variables técnicas, constructivas y ambientales. Si bien los criterios de diseño proporcionan una referencia inicial sobre el comportamiento esperado de estos sistemas, las condiciones reales de operación pueden introducir variaciones que no siempre son adecuadamente representadas mediante los procedimientos convencionales de evaluación.

En este contexto, resulta necesario profundizar el estudio del comportamiento de los sistemas de puesta a tierra en ambientes industriales reales, incorporando metodologías que permitan analizar su evolución temporal y mejorar la calidad de los diagnósticos obtenidos. A partir de este planteo se define el objeto de la presente investigación y los objetivos específicos que orientan el desarrollo del trabajo.

- *Objeto de la investigación*

Analizar el comportamiento dinámico de los sistemas de puesta a tierra en instalaciones industriales del corredor productivo de Pilar, provincia de Buenos Aires, mediante la aplicación de una metodología integral de bajo costo que combine mediciones convencionales, inspección visual estructurada y monitoreo continuo, con el fin de identificar factores que afectan su desempeño y mejorar la representatividad de los diagnósticos obtenidos en condiciones reales de servicio.

- *Objetivos específicos*

OE1. Caracterizar el comportamiento operativo de sistemas de puesta a tierra emplazados en instalaciones industriales de la región de Pilar bajo condiciones normales de servicio.

OE2. Analizar las variaciones temporales observadas en sistemas de puesta a tierra próximos geográficamente, identificando posibles diferencias asociadas a las características particulares de cada instalación y del entorno físico donde se encuentran implantados.

OE3. Evaluar la utilidad de herramientas de monitoreo continuo de bajo costo como complemento de las técnicas convencionales de medición para mejorar los procesos de diagnóstico y mantenimiento preventivo de los sistemas de puesta a tierra.

2. Metodología propuesta

La definición de un marco metodológico nos permitirá establecer de manera sistemática la forma en que se obtendrán, procesarán e interpretarán los datos necesarios para responder a la pregunta de investigación.

Adoptamos una estrategia metodológica orientada al estudio de los sistemas de puesta a tierra en entornos industriales reales, combinando técnicas cuantitativas y cualitativas que permitan caracterizar su comportamiento, identificar patrones de variación y evaluar la aplicabilidad de metodologías de diagnóstico de bajo costo. Los apartados siguientes describen el enfoque de investigación, las variables consideradas, los instrumentos utilizados y los procedimientos empleados para la obtención y análisis de la información.

El sistema utilizado se basa en la medición de magnitudes eléctricas presentes en la instalación y fue concebido como una herramienta de monitoreo continuo de bajo costo. Debido a que no implementa una técnica de inyección de corriente alterna a frecuencia específica, los valores obtenidos pueden verse influenciados por corrientes de fuga y perturbaciones propias del entorno industrial. En consecuencia, los resultados deben interpretarse como indicadores de tendencia y variación temporal de la puesta a tierra.

2.1. Enfoque metodológico

Adoptaremos un enfoque mixto, al integrar procedimientos cuantitativos y cualitativos para el análisis del comportamiento de los sistemas de puesta a tierra en instalaciones industriales.

La dimensión cuantitativa se sustenta en la obtención y análisis de mediciones eléctricas realizadas mediante instrumentación específica y en el monitoreo continuo de variables asociadas al comportamiento de los sistemas estudiados. Por su parte, la dimensión cualitativa incorpora la observación directa de las instalaciones, la evaluación del estado físico de los componentes y el análisis contextual de las condiciones de operación.

La combinación de ambos enfoques permite obtener una visión más amplia del fenómeno estudiado y mejorar la interpretación de los resultados obtenidos.

2.2. Alcance de la investigación

La investigación presenta un alcance descriptivo y explicativo.

Es descriptiva porque busca caracterizar el comportamiento de los sistemas de puesta a tierra bajo condiciones reales de operación.

Asimismo, posee un componente explicativo al procurar identificar posibles relaciones entre las variaciones observadas y las particularidades constructivas, operativas y ambientales que caracterizan a cada instalación.

2.3. Diseño de investigación

Se desarrolló un diseño de investigación no experimental, de campo y longitudinal.

Se considera no experimental debido a que las variables analizadas no fueron manipuladas deliberadamente por el investigador, sino observadas en su contexto natural.

Es una investigación de campo porque los datos fueron obtenidos directamente en instalaciones industriales en operación.

Finalmente, posee carácter longitudinal debido a que las observaciones fueron registradas durante un período continuo de tiempo, permitiendo analizar la evolución temporal de los sistemas estudiados.

2.4. Unidad de análisis

Las unidades de análisis se encuentran constituidas por los sistemas de puesta a tierra pertenecientes a dos establecimientos industriales localizados en el partido de Pilar, provincia de Buenos Aires, identificados en esta investigación como TEKNIKA y BioMech.

Ambos sistemas operan en entornos industriales representativos del corredor productivo regional y fueron seleccionados por presentar características de uso y funcionamiento compatibles con el objetivo de investigación.

2.5. Variables de investigación

Nos resulta interesante identificar aquellas variables que intervienen en el fenómeno estudiado y establecer mecanismos que permitan su observación y medición.

La selección de variables se orienta a caracterizar el comportamiento de los sistemas de puesta a tierra bajo condiciones reales de operación, asegurando la vinculación entre los objetivos de investigación, las hipótesis formuladas y las evidencias empíricas obtenidas.

2.6. Variable principal

Estado operativo del sistema de puesta a tierra

Se refiere al comportamiento eléctrico observado durante el período de estudio y a las condiciones generales de funcionamiento del sistema.

2.7. Variables secundarias

- Comportamiento temporal de las mediciones.
- Estado físico observable de los componentes.
- Características del entorno de instalación.
- Condiciones operativas de la instalación.

2.8. Operacionalización de variables

Con el propósito de garantizar la coherencia entre el planteamiento teórico, las hipótesis formuladas y las técnicas de recolección de información empleadas, se realizó la operacionalización de las variables de investigación. Este procedimiento permitió identificar los indicadores observables asociados a cada variable y establecer los instrumentos adecuados para su medición y análisis. La Tabla 1 presenta la correspondencia entre las variables consideradas, los indicadores utilizados y las herramientas empleadas para la obtención de los datos.

Tabla 1 – Matriz de operacionalización de variables de la investigación. Fuente: Propia

Variable	Indicador	Instrumento
Estado del sistema de puesta a tierra	Valores medidos en el sistema	Sistema de medición y monitoreo
Condición estructural	Estado de conductores, uniones y electrodos	Inspección visual
Comportamiento temporal	Variaciones registradas durante el período de estudio	Monitoreo continuo
Condiciones del entorno	Características observadas del terreno y la instalación	Observación directa

La operacionalización presentada permitió estructurar la recolección de información de manera sistemática y garantizar la trazabilidad entre los objetivos de investigación, las hipótesis planteadas y los resultados obtenidos durante el trabajo de campo.

- *Delimitación de la investigación*

La presente investigación se circunscribe al estudio de sistemas de puesta a tierra instalados en establecimientos industriales localizados en el corredor productivo de Pilar, provincia de Buenos Aires. El análisis se enfoca en la evaluación de su comportamiento bajo condiciones reales de servicio mediante la aplicación de metodologías de bajo costo, sin intervenir ni modificar las condiciones normales de operación de las instalaciones estudiadas.

El alcance del trabajo se limita a la observación, medición y análisis de variables asociadas al desempeño de los sistemas de puesta a tierra, sin considerar modificaciones estructurales sobre los mismos durante el período de estudio.

- *Población y muestra*

La población de referencia está constituida por los sistemas de puesta a tierra existentes en instalaciones industriales de la región estudiada.

La muestra seleccionada corresponde a dos establecimientos industriales identificados como TEKNIKA y BioMech, elegidos por su representatividad dentro

del entorno productivo analizado y por la posibilidad de realizar un monitoreo continuo bajo condiciones reales de funcionamiento.

Ambos establecimientos poseen sistemas de puesta a tierra independientes y se encuentran emplazados en una misma región geográfica, separados aproximadamente 120 m entre sí.

- *Criterios de selección de la muestra*

La selección de los casos analizados se realizó mediante un muestreo intencional no probabilístico. Se priorizaron instalaciones industriales con condiciones operativas estables, disponibilidad para la realización del monitoreo y accesibilidad a la información técnica necesaria para el desarrollo de la investigación.

Asimismo, se consideró relevante la proximidad geográfica de ambos establecimientos, ya que ello permite comparar comportamientos eléctricos bajo condiciones ambientales similares.

- *Validez y confiabilidad*

Con el objeto de garantizar la confiabilidad de los datos obtenidos, las mediciones fueron realizadas utilizando procedimientos uniformes de adquisición y registro. La utilización de monitoreo sincronizado permitió comparar la evolución temporal de ambos sistemas bajo un mismo criterio metodológico.

La validez de la investigación se encuentra sustentada en la obtención de información directamente en campo, bajo condiciones reales de operación industrial, minimizando la influencia de entornos experimentales artificiales.

- *Consideraciones éticas y de confidencialidad*

Con el propósito de preservar la confidencialidad de la información técnica y operativa de las organizaciones participantes, los establecimientos involucrados en la investigación fueron identificados mediante las denominaciones de fantasía TEKNIKA y BioMech.

La información presentada tiene fines exclusivamente académicos y científicos, evitando toda referencia que permita la identificación directa de las instalaciones analizadas.

- *Procesamiento y análisis de datos*

Los datos obtenidos durante la campaña de monitoreo fueron organizados cronológicamente y sometidos a procedimientos de análisis descriptivo y comparativo.

Se evaluaron tendencias temporales, variaciones relativas entre sistemas, dispersión de las mediciones y diferencias observadas durante el período analizado.

La representación gráfica de las series temporales permitió identificar patrones de comportamiento y eventos de interés para la interpretación de los resultados experimentales.

2.9. Limitaciones metodológicas

Entre las principales limitaciones del estudio se encuentra la cantidad de sistemas analizados y el período temporal considerado para la campaña de monitoreo.

No obstante, el objetivo principal de la investigación no consiste en obtener conclusiones generalizables para todos los sistemas de puesta a tierra industriales, sino validar una metodología de evaluación de bajo costo y analizar su aplicabilidad bajo condiciones reales de operación.

En cada campaña se recomienda registrar variables ambientales y operativas relevantes, debido a su influencia sobre la resistividad aparente del suelo y, consecuentemente, sobre los valores obtenidos en las mediciones de puesta a tierra.

Una limitación del prototipo empleado es la ausencia de un circuito de inyección de corriente alterna a frecuencia no armónica de la red, técnica que permitiría discriminar la resistencia efectiva de puesta a tierra respecto de corrientes parásitas y señales presentes en la instalación. La incorporación de esta funcionalidad se propone como línea de trabajo futuro.

3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Para la obtención de la información necesaria para el desarrollo de la investigación se emplearon técnicas de relevamiento cualitativas y cuantitativas orientadas a caracterizar el estado y comportamiento de los sistemas de puesta a tierra analizados. La combinación de distintos instrumentos permitió obtener evidencia empírica complementaria, favoreciendo una interpretación integral del fenómeno estudiado.

Para la obtención de información se emplearon:

- *Inspección visual estructurada*

La inspección visual fue utilizada como técnica de observación directa para relevar el estado general de los sistemas de puesta a tierra. Durante esta etapa se verificaron las condiciones de los conductores de protección, las conexiones visibles, los puntos de vinculación equipotencial, el estado de conservación de los componentes y las características generales de instalación.

La información obtenida permitió identificar posibles factores que pudieran influir sobre el comportamiento eléctrico de los sistemas analizados y complementar la interpretación de los resultados instrumentales.

- *Medición mediante telurímetro*

Las mediciones eléctricas se realizaron mediante telurímetro, instrumento ampliamente utilizado para la evaluación de sistemas de puesta a tierra. Estas mediciones permitieron obtener valores de referencia respecto del estado operativo de las instalaciones estudiadas y constituyeron un punto de comparación para el análisis posterior de los registros obtenidos mediante monitoreo continuo.

- *Monitoreo continuo sincronizado*

Con el propósito de complementar las mediciones convencionales, se implementó un sistema de adquisición automática de bajo costo destinado al registro continuo y

sincronizado de parámetros eléctricos asociados a los sistemas de puesta a tierra de los establecimientos identificados como TEKNIKA y BioMech.

La Figura 2 muestra la plataforma empleada para el desarrollo del sistema de monitoreo continuo. La solución fue implementada utilizando una placa Arduino Uno, complementada con una fuente autónoma de alimentación, sensores de tensión y corriente eléctrica, y los circuitos de acondicionamiento necesarios para la adquisición de datos.

A partir de las magnitudes eléctricas registradas, el sistema permitió obtener valores representativos del comportamiento de los sistemas de puesta a tierra bajo análisis.

Asimismo, mediante la incorporación de un sistema de referencia temporal, fue posible almacenar cronológicamente cada medición y construir series temporales que reflejaran la evolución de los parámetros monitoreados durante todo el período experimental.

La utilización de esta plataforma posibilitó la automatización del proceso de adquisición de datos, permitiendo realizar mediciones continuas en condiciones reales de operación industrial y generando una base de información adecuada para el análisis posterior de tendencias, variaciones y comportamientos observados en los sistemas estudiados.



Figura 2 – Plataforma Arduino Uno utilizada para la adquisición continua de datos durante la campaña experimental de monitoreo de los sistemas de puesta a tierra. Fuente: Propia

La adquisición continua de datos permitió observar la evolución temporal de ambos sistemas bajo condiciones reales de funcionamiento y detectar variaciones que podrían no ser advertidas mediante evaluaciones efectuadas en momentos puntuales.

- *Registro de observaciones de campo*

Durante las tareas de relevamiento se efectuó el registro sistemático de observaciones relacionadas con las características del terreno, condiciones de instalación, entorno operativo y demás aspectos considerados relevantes para la interpretación de los resultados obtenidos. La información recopilada fue utilizada como elemento complementario para el análisis comparativo de los sistemas estudiados.

3.1. Procedimiento metodológico

La investigación fue desarrollada mediante un procedimiento secuencial compuesto por cuatro etapas principales, orientadas a garantizar la obtención sistemática de información y la adecuada interpretación de los resultados.

- *2.1. Relevamiento preliminar*

En una primera etapa se efectuó el reconocimiento de las instalaciones seleccionadas, recopilando información general sobre los sistemas de puesta a tierra, características constructivas, entorno de implantación y condiciones operativas de los establecimientos analizados.

- *2.2. Inspección y caracterización inicial*

Posteriormente se realizaron inspecciones visuales y mediciones iniciales destinadas a caracterizar el estado general de los sistemas estudiados. Esta fase permitió establecer una línea de base para la posterior evaluación comparativa de los resultados obtenidos.

- *2.3. Implementación del monitoreo continuo*

En la tercera etapa se instaló un sistema de adquisición automática de datos que permitió registrar de manera sincronizada la evolución temporal de los sistemas de puesta a tierra correspondientes a TEKNIKA y BioMech. Las mediciones fueron obtenidas bajo condiciones reales de operación industrial, sin intervenir ni alterar el funcionamiento habitual de las instalaciones.

- *2.4. Procesamiento y análisis de la información*

Finalmente, los datos obtenidos fueron organizados, depurados y analizados mediante procedimientos estadísticos descriptivos y técnicas de representación gráfica que permitieron identificar tendencias, variaciones temporales y diferencias de comportamiento entre los sistemas monitoreados.

Los resultados derivados de estas etapas constituyen la base empírica utilizada para evaluar la aplicabilidad de la metodología propuesta y analizar el comportamiento de los sistemas de puesta a tierra bajo condiciones reales de servicio.

3.2. Procesamiento y análisis de datos

Los datos obtenidos durante la campaña de monitoreo fueron recopilados, organizados y procesados con el propósito de garantizar su consistencia y facilitar su posterior análisis. Para ello, las mediciones registradas fueron ordenadas cronológicamente y sometidas a una revisión preliminar destinada a identificar posibles inconsistencias, registros incompletos o anomalías atribuibles a factores ajenos al fenómeno bajo estudio. De acuerdo con Hernández Sampieri, Fernández Collado y Baptista Lucio (2014), la depuración y validación inicial de los datos constituye una etapa fundamental para asegurar la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Posteriormente, la información fue estructurada en series temporales sincronizadas correspondientes a los sistemas de puesta a tierra de TEKNIKA y BioMech, permitiendo la comparación directa de las respuestas observadas en ambos establecimientos durante un mismo período de monitoreo.

El tratamiento de la información incluyó la aplicación de técnicas de estadística descriptiva orientadas a caracterizar el comportamiento general de los registros obtenidos. Para ello se analizaron indicadores de tendencia central y dispersión, tales como promedio, mediana, valores máximos y mínimos, rango, desviación estándar y coeficiente de variación. Según Triola (2018), estas herramientas permiten resumir e interpretar conjuntos de datos, facilitando la identificación de patrones y diferencias entre observaciones.

De manera complementaria, se emplearon herramientas de representación gráfica para visualizar la evolución temporal de las mediciones y facilitar la identificación de tendencias y variaciones observadas durante el período de estudio. La comparación gráfica simultánea de ambas series temporales permitió reconocer comportamientos comunes y diferencias significativas entre los sistemas monitoreados.

Los resultados obtenidos mediante el procesamiento estadístico y gráfico constituyen la base para el análisis experimental y la discusión desarrollados en los capítulos posteriores de la investigación.

3.3. Análisis estadístico aplicado

Con el propósito de complementar la interpretación de los resultados, se realizó un análisis estadístico descriptivo de las series temporales obtenidas durante la campaña de monitoreo. Este procedimiento permitió cuantificar la variabilidad observada y caracterizar el comportamiento general de los sistemas estudiados.

Asimismo, se efectuó una comparación entre las mediciones correspondientes a TEKNIKA y BioMech, considerando la evolución temporal de los registros y los indicadores estadísticos obtenidos. Este enfoque permitió identificar diferencias de comportamiento entre ambos sistemas y evaluar la magnitud de las variaciones observadas durante el período de monitoreo.

Los resultados derivados de este análisis constituyen la base para la interpretación experimental presentada posteriormente y para la contrastación de las hipótesis planteadas en la investigación.

3.4. Consideraciones éticas y confidencialidad

La presente investigación fue desarrollada respetando criterios de confidencialidad y uso responsable de la información obtenida durante las actividades de relevamiento y monitoreo. Los datos recopilados fueron utilizados exclusivamente con fines académicos, científicos y de investigación, sin generar interferencias en los procesos productivos ni en la operación normal de las instalaciones analizadas.

Con el propósito de preservar la identidad de las organizaciones participantes y resguardar información técnica considerada sensible, los establecimientos incluidos en el estudio fueron identificados mediante las denominaciones de fantasía TEKNIKA y BioMech. Esta medida permite exponer los resultados obtenidos sin comprometer la confidencialidad institucional ni la información estratégica de las empresas involucradas.

Asimismo, la investigación fue concebida bajo un enfoque de observación no invasiva, evitando cualquier intervención que pudiera alterar el funcionamiento de los sistemas de puesta a tierra o modificar las condiciones habituales de operación de las instalaciones estudiadas. Las mediciones y observaciones fueron realizadas

respetando los procedimientos de seguridad industrial vigentes en cada establecimiento.

Por otra parte, los resultados presentados se exponen de manera agregada y comparativa, con fines exclusivamente analíticos, procurando que las conclusiones obtenidas contribuyan al avance del conocimiento técnico y científico en materia de evaluación y diagnóstico de sistemas de puesta a tierra en entornos industriales.

Finalmente, se entiende que las conclusiones derivadas del presente estudio corresponden a los casos analizados y al período considerado, por lo que cualquier extrapolación a otras instalaciones deberá realizarse teniendo en cuenta las particularidades constructivas, operativas y ambientales propias de cada situación.

4. Marco teórico

4.1. Influencia de las condiciones ambientales

El comportamiento eléctrico de los sistemas de puesta a tierra depende no solamente de sus características constructivas sino también de las propiedades físicas del terreno que los rodea. Entre las variables más relevantes se encuentran la humedad, la temperatura, la composición química del suelo, su granulometría y el grado de compactación.

La presencia de agua en los poros del terreno favorece el transporte de cargas eléctricas mediante mecanismos iónicos, disminuyendo la resistencia eléctrica del medio. Por el contrario, durante períodos secos puede observarse un incremento significativo de los valores de resistencia de puesta a tierra.

Asimismo, las variaciones estacionales y meteorológicas producen modificaciones continuas sobre las condiciones eléctricas del suelo, generando fluctuaciones que muchas veces no son detectadas mediante mediciones aisladas realizadas en intervalos prolongados.

4.2. Limitaciones de las metodologías tradicionales

En numerosas instalaciones industriales la evaluación de los sistemas de puesta a tierra se realiza mediante campañas periódicas utilizando telurímetros portátiles. Si bien este procedimiento constituye una herramienta ampliamente aceptada, presenta ciertas limitaciones cuando se pretende analizar el comportamiento dinámico del sistema.

Una medición efectuada en un momento determinado representa únicamente el estado instantáneo del terreno y del electrodo bajo las condiciones existentes en ese instante. Como consecuencia, variaciones producidas por fenómenos ambientales o condiciones operativas transitorias pueden permanecer sin ser detectadas.

Esta situación adquiere especial relevancia en instalaciones críticas donde la continuidad operativa y la seguridad eléctrica constituyen aspectos prioritarios.

4.3. Función de los sistemas de puesta a tierra

Los sistemas de puesta a tierra permiten disipar corrientes de falla, sobretensiones y descargas atmosféricas, contribuyendo a la protección de personas, equipos e instalaciones mediante la reducción de tensiones peligrosas.

- Resistencia y resistividad del terreno

La resistencia de puesta a tierra depende de la geometría del electrodo y de la resistividad del suelo. Esta última está determinada por las características físicas y químicas del terreno, condicionando la capacidad de disipación de corriente.

- Influencia de la humedad

La humedad reduce la resistividad del suelo al favorecer la conducción iónica. Como consecuencia, la resistencia de puesta a tierra suele disminuir durante períodos lluviosos y aumentar en épocas secas.

- Influencia de la temperatura

La temperatura modifica la resistividad del terreno, principalmente a través de su efecto sobre el contenido de agua. Variaciones térmicas significativas pueden producir cambios apreciables en el comportamiento eléctrico del sistema.

- Corrosión de electrodos

Los electrodos enterrados están sujetos a procesos de corrosión que pueden reducir su sección efectiva y deteriorar gradualmente el desempeño del sistema de puesta a tierra.

- Limitaciones de las mediciones periódicas tradicionales

Las mediciones periódicas reflejan únicamente las condiciones existentes al momento del ensayo y pueden no representar el comportamiento real del sistema a lo largo del tiempo debido a las variaciones ambientales y al envejecimiento de los componentes.

La variabilidad de las condiciones ambientales y las limitaciones de las verificaciones periódicas justifican el desarrollo de metodologías alternativas de evaluación que permitan estimar el estado de los sistemas de puesta a tierra mediante procedimientos de menor costo y mayor frecuencia de análisis.

4.4. Campaña de medición

Con el objeto de verificar experimentalmente la hipótesis planteada, se desarrolló una campaña de adquisición continua de datos sobre dos sistemas de puesta a tierra pertenecientes a establecimientos industriales localizados en el partido de Pilar, provincia de Buenos Aires.

Ambos sistemas se encuentran separados aproximadamente 120 m entre sí y están sometidos a condiciones meteorológicas similares.

Se implementó un sistema de adquisición automática de bajo costo capaz de registrar información con una frecuencia de una medición por minuto.

El período analizado comprendió los días 3 y 4 de agosto de 2020, obteniéndose un total de 2778 registros válidos.

4.5. Tendencias actuales en la evaluación de sistemas de puesta a tierra

La evaluación de los sistemas de puesta a tierra ha experimentado una evolución significativa durante las últimas décadas, impulsada tanto por el incremento de los requisitos de seguridad eléctrica como por la creciente complejidad de las instalaciones industriales modernas. Tradicionalmente, el diagnóstico de estos sistemas se ha basado en mediciones periódicas de resistencia de puesta a tierra realizadas mediante instrumentos portátiles y procedimientos normalizados, ampliamente aceptados por la normativa técnica internacional (IEEE, 2012; IEEE, 2013).

Sin embargo, diversos estudios han señalado que las características eléctricas de los sistemas de puesta a tierra pueden variar a lo largo del tiempo debido a factores vinculados con las condiciones ambientales, las propiedades del terreno y el estado físico de los componentes que integran el sistema (Tagg, 1964; Dawalibi & Mukhedkar, 1979). Estas circunstancias han motivado la búsqueda de metodologías complementarias capaces de proporcionar una representación más completa del comportamiento real de las instalaciones.

En este contexto, el avance de las tecnologías de adquisición de datos, la reducción de costos de los sistemas electrónicos y el desarrollo de herramientas de monitoreo remoto han favorecido la incorporación de esquemas de seguimiento continuo orientados a la supervisión del desempeño de los sistemas eléctricos. Estas estrategias permiten disponer de información temporalmente distribuida, facilitando la detección de tendencias, variaciones operativas y comportamientos que difícilmente pueden ser observados mediante mediciones realizadas de forma aislada.

Paralelamente, la industria ha comenzado a incorporar enfoques asociados al mantenimiento predictivo y a la gestión basada en condición, procurando que las decisiones de intervención se fundamenten en información obtenida durante el funcionamiento real de los activos. Dentro de este escenario, el monitoreo continuo de parámetros asociados a los sistemas de puesta a tierra surge como una herramienta con potencial para complementar las metodologías tradicionales de evaluación y mejorar la calidad de los diagnósticos obtenidos.

La presente investigación se enmarca en esta tendencia, proponiendo una estrategia de evaluación de bajo costo que integra técnicas convencionales de inspección y medición con herramientas de monitoreo continuo aplicadas a sistemas de puesta a tierra instalados en entornos industriales reales.

4.6. Estado del arte de las metodologías de evaluación

Los sistemas de puesta a tierra han sido objeto de estudio durante décadas debido a su importancia en la seguridad eléctrica, la protección de los equipos y la continuidad operativa de las instalaciones industriales. La mayor parte de los desarrollos técnicos y normativos se han concentrado en el diseño, dimensionamiento y verificación de estos sistemas, estableciendo criterios para la determinación de resistencias admisibles, tensiones de paso y tensiones de contacto bajo distintas condiciones de servicio (IEEE, 2013; IEEE, 2012).

Tradicionalmente, la evaluación del desempeño de los sistemas de puesta a tierra se realiza mediante campañas periódicas de medición utilizando telurímetros y

procedimientos normalizados. Estas metodologías continúan siendo ampliamente aceptadas debido a su simplicidad operativa y su adecuación a los requisitos establecidos por normas técnicas nacionales e internacionales. Sin embargo, diversos autores han señalado que dichas mediciones representan únicamente las condiciones existentes durante el momento del ensayo, pudiendo no reflejar la evolución temporal del sistema ni las variaciones producidas por factores ambientales o constructivos, (Tagg, 1964; IEEE, 2012).

Por otra parte, numerosos trabajos han demostrado que parámetros tales como la resistividad del suelo, el contenido de humedad, la estratificación geológica y las características de los electrodos ejercen una influencia significativa sobre el comportamiento de los sistemas de puesta a tierra. Estas investigaciones evidencian que instalaciones ubicadas en entornos geográficos próximos pueden presentar respuestas eléctricas diferentes debido a variaciones locales del terreno y de las condiciones de implantación de los electrodos (Dawalibi & Mukhedkar, 1979; Tagg, 1964).

Durante los últimos años, la disponibilidad de sistemas electrónicos de bajo costo, dispositivos de adquisición de datos y herramientas de monitoreo remoto ha impulsado nuevas líneas de investigación orientadas al seguimiento continuo del comportamiento de los sistemas eléctricos. En este contexto, diversos autores han comenzado a explorar metodologías basadas en la recopilación sistemática de datos en tiempo real con el objetivo de mejorar los procesos de diagnóstico, mantenimiento predictivo y gestión basada en condición.

No obstante, la literatura especializada muestra que gran parte de estas soluciones se orientan a aplicaciones de gran escala o requieren equipamiento específico de costo relativamente elevado, lo que limita su aplicación en pequeñas y medianas industrias. Asimismo, existe una menor cantidad de estudios enfocados en la utilización de metodologías simples y económicamente accesibles que permitan monitorear el comportamiento temporal de sistemas de puesta a tierra instalados en entornos industriales reales.

En este escenario se inserta la presente investigación, que propone una metodología de evaluación de bajo costo basada en la integración de mediciones convencionales, inspección visual y monitoreo continuo sincronizado. El trabajo busca aportar evidencia experimental obtenida en condiciones reales de operación industrial, contribuyendo al desarrollo de herramientas de diagnóstico más representativas y accesibles para la gestión de sistemas de puesta a tierra.

Diversos fabricantes de instrumentación especializada para sistemas de puesta a tierra reconocen que las mediciones periódicas tradicionales constituyen una representación instantánea de las condiciones existentes al momento del ensayo. En consecuencia, se observa un creciente interés por metodologías complementarias de seguimiento temporal que permitan identificar variaciones y tendencias que podrían no ser detectadas mediante evaluaciones aisladas. Asimismo, se destaca que factores tales como las condiciones ambientales, la corrosión progresiva de los electrodos, modificaciones en las instalaciones y cambios en las condiciones de operación pueden influir sobre el comportamiento del sistema entre campañas de medición sucesivas. (O. Cardozo, comunicación personal, julio de 2026).

Esta tendencia resulta consistente con los objetivos de la presente investigación, orientada al desarrollo de una metodología de monitoreo continuo de bajo costo

capaz de complementar los procedimientos convencionales de evaluación y aportar información adicional sobre el comportamiento temporal de los sistemas de puesta a tierra bajo condiciones reales de operación industrial.

5. Trabajo de campo

El trabajo de campo constituye la instancia en la cual la metodología propuesta fue aplicada en condiciones reales de operación industrial, permitiendo obtener evidencia empírica para contrastar las hipótesis planteadas y evaluar la factibilidad de la estrategia de diagnóstico desarrollada.

Con este propósito, se seleccionaron dos establecimientos industriales ubicados en el corredor productivo del partido de Pilar, provincia de Buenos Aires, identificados en la presente investigación como TEKNIKA y BioMech. La elección de ambos casos de estudio permitió analizar el comportamiento de sistemas de puesta a tierra independientes emplazados en una misma región geográfica y sometidos a condiciones ambientales comparables.

Durante esta etapa se llevaron a cabo actividades de relevamiento, inspección, medición y monitoreo continuo, utilizando procedimientos estandarizados y herramientas de adquisición de datos de bajo costo. La información obtenida constituyó la base para el análisis experimental desarrollado en las secciones siguientes, orientado a caracterizar el comportamiento temporal de los sistemas estudiados y evaluar las posibilidades de aplicación de la metodología propuesta en entornos industriales reales.

A continuación, se presentan las principales características de los establecimientos considerados, los procedimientos de medición empleados, el sistema de adquisición implementado y los resultados obtenidos durante la campaña de monitoreo.

5.1. Descripción del establecimiento TEKNIKA

El establecimiento industrial identificado en esta investigación como TEKNIKA se encuentra localizado en el corredor industrial del partido de Pilar, provincia de Buenos Aires. Su actividad se desarrolla en un entorno caracterizado por la presencia de diversas instalaciones productivas y de servicios vinculadas al sector industrial.

A los efectos de la presente investigación, el interés principal se centró en el sistema de puesta a tierra asociado a la instalación eléctrica del establecimiento, particularmente en aquellos elementos destinados a garantizar la protección de personas, equipos y estructuras metálicas frente a condiciones anormales de funcionamiento.

El sistema analizado se encuentra sometido a condiciones reales de operación industrial y forma parte de la infraestructura eléctrica permanente de la instalación. Debido a las características propias del entorno, la evaluación de su comportamiento resulta de interés para analizar la influencia de factores constructivos, operativos y ambientales sobre su desempeño a lo largo del tiempo.

Por razones de confidencialidad y protección de la información técnica de la organización, se emplea la denominación de fantasía TEKNIKA para referirse al establecimiento durante todo el desarrollo de la investigación.

5.2. Descripción del establecimiento BioMech

El establecimiento identificado como BioMech se encuentra emplazado en la misma área industrial general que TEKNIKA, compartiendo características regionales y condiciones ambientales comparables. Ambos establecimientos se encuentran separados aproximadamente 120 m entre sí y poseen sistemas de puesta a tierra independientes.

Al igual que en el caso anterior, el estudio se concentró en el análisis del comportamiento del sistema de puesta a tierra asociado a la instalación eléctrica de la planta, considerándolo como un elemento esencial para la seguridad eléctrica y la continuidad operativa de los procesos desarrollados.

La proximidad geográfica existente entre ambos establecimientos constituye un aspecto particularmente relevante para esta investigación, ya que permite analizar el comportamiento de dos sistemas independientes sometidos a condiciones climáticas similares, facilitando la comparación de las respuestas observadas durante el período de monitoreo.

Con el fin de preservar la confidencialidad de la información técnica y operativa de la organización, se utiliza la denominación de fantasía BioMech en todas las referencias realizadas a lo largo del presente trabajo. Con el propósito de contextualizar las condiciones generales bajo las cuales se desarrolló la investigación, se presentan las principales características de los establecimientos seleccionados y de los sistemas de puesta a tierra considerados como unidades de análisis.

La información resumida en la Tabla 3 permite identificar los aspectos comunes y las diferencias relevantes entre ambos casos de estudio, facilitando la posterior interpretación de los resultados experimentales obtenidos durante la campaña de monitoreo.

Tabla 3 – Caracterización técnica y contextual de los sistemas de puesta a tierra objeto de estudio. Fuente: Propia.

Característica	TEKNIKA	BioMech
Ubicación general	Pilar, Buenos Aires	Pilar, Buenos Aires
Tipo de establecimiento	Industrial	Industrial
Sistema de puesta a tierra	Independiente	Independiente
Distancia entre sitios	-	Aproximadamente 120 m
Condiciones climáticas generales	Similares	Similares
Monitoreo continuo	Sí	Sí

5.3. Protocolo de medición utilizado

Con el propósito de garantizar la uniformidad de los procedimientos de inspección, medición y registro de información, durante el desarrollo de la investigación se empleó un protocolo técnico normalizado para la evaluación de sistemas de puesta a tierra en instalaciones industriales. Dicho instrumento fue adaptado a las

necesidades específicas del estudio y aplicado en el establecimiento identificado como TEKNIKA, permitiendo la recopilación sistemática de información relevante para el análisis de los sistemas evaluados, según se observa en la Figura 3.

El protocolo contempla aspectos relacionados con la identificación de los puntos de medición, características generales de la instalación, estado del terreno al momento del ensayo, metodología utilizada, instrumentación empleada y resultados obtenidos durante las verificaciones realizadas. Asimismo, incorpora procedimientos destinados a evaluar la continuidad de masas, la condición general del sistema de puesta a tierra y la adecuación de las medidas de protección frente a contactos indirectos.

Entre los datos registrados se incluyen la identificación y calibración de los instrumentos utilizados, la metodología de medición aplicada, las características observadas del terreno, el esquema de conexión a tierra existente, los valores medidos de resistencia de puesta a tierra y las verificaciones asociadas a la continuidad eléctrica de los elementos conductores vinculados al sistema.

Análisis de los Datos y Mejoras a Realizar	
Conclusiones	Recomendaciones para adecuar el nivel de puesta a tierra a la legislación vigente.
Las determinaciones se encuentran dentro de los indicado en la NORMA IRAM 3381/ III.	No se emiten recomendaciones

Datos de la Medición

Numero de toma de tierra	Sector	Descripción de la condición del terreno al momento de la medición. Lecho seco / Arcilloso / Pantanoso / Lluvias recientes / Arenoso seco o húmedo / Otros	Uso de la puesta a tierra Toma de tierra del neutro del transformador / Toma de tierra de seguridad de las masas / De Protección de Equipos Electrónicos / De Informática / De Iluminación / De Pararrayos / Otros.	Esquema de conexión a tierra utilizado: TT / TN-S / TN-C / TN-C-S / IT	Medición de la puesta a tierra		Continuidad de masas		Para la protección contra contactos indirectos se utiliza: Dispositivo diferencial (DD) interruptor automático (IA) Fusible (Fus)	El dispositivo de protección empleado ¿Puede desconectar en forma automática la alimentación para lograr la protección contra contactos indirectos? SI / NO
					Valor obtenido en la medición expresado en Ohm (Ω)	Cumple SI / NO	El circuito de puesta tierra es continuo y permanente SI / NO	El circuito de puesta a tierra tiene la capacidad de carga para conducir la corriente de falla y una resistencia apropiada. SI / NO		
1	PATIO SEMICUBIERTO	LECHO SECO	TOMA DE TIERRA DE SEGURIDAD DE LAS MASAS	TT	1,55	SI	SI	SI	DD	SI
2	LLAVES	LECHO SECO	TOMA DE TIERRA DE SEGURIDAD DE LAS MASAS	TT	5,41	SI	SI	SI	DD	SI

Observaciones: *Verificaciones de continuidad*
Fresa 117: 1,96 Ω
Fresa 114: 4,63 Ω
Fresa 110: 1,78 Ω
Fresa 119: 2,16 Ω
Fresa 111: 1,93 Ω

Datos para medición
Marca, modelo y número de serie del instrumento utilizado: **Marca:** DUOYI **Modelo:** DY4100 **Número de Serie**: 0691300
Fecha de Calibración del Instrumento utilizado en la medición: 31/10/2024
Metodología Utilizada en la Medición: Caída de tensión (triangulación)

Figura 3 – Protocolo de puesta a tierra de TEKNIKA, Enero de 2025. Fuente: Propia.

La utilización de un protocolo estandarizado permitió asegurar la trazabilidad de los datos recopilados, facilitar la comparación entre mediciones realizadas en distintos momentos y proporcionar una base documental consistente para el análisis posterior de los resultados obtenidos durante el trabajo de campo. Adicionalmente, el protocolo contribuyó a reducir la influencia de criterios subjetivos durante las actividades de inspección y medición, fortaleciendo la confiabilidad del proceso de recolección de datos.

Con fines exclusivamente académicos y de investigación, la información obtenida mediante este instrumento fue incorporada al análisis general del estudio, preservando la confidencialidad de las organizaciones participantes mediante la utilización de denominaciones de fantasía para la identificación de los establecimientos analizados.

Con el fin de sistematizar la información obtenida durante las actividades de inspección y medición, el protocolo empleado incorpora diferentes elementos de relevamiento técnico y operativo. La Tabla 4 resume los principales componentes considerados durante el proceso de adquisición de datos.

Tabla 4 – Estructura y componentes del protocolo de medición utilizado. Fuente: Propia

Elemento relevado	Información registrada
Identificación de la instalación	Datos generales del establecimiento
Instrumentación utilizada	Marca, modelo, número de serie y calibración
Metodología de medición	Método de caída de potencial
Condiciones del terreno	Estado observado al momento del ensayo
Sistema de puesta a tierra	Tipo de uso y esquema de conexión
Medición eléctrica	Valor de resistencia de puesta a tierra
Continuidad de masas	Verificación de conductividad eléctrica
Sistema de protección	Verificación de dispositivos diferenciales y protección contra contactos indirectos
Observaciones técnicas	Comentarios y recomendaciones del profesional actuante

5.4. Sistema de adquisición de datos

Con el propósito de complementar las mediciones convencionales realizadas mediante telurímetro y las verificaciones efectuadas mediante el protocolo de inspección adoptado, se implementó un sistema de adquisición automática de datos destinado al monitoreo continuo de los sistemas de puesta a tierra correspondientes a los establecimientos identificados como TEKNIKA y BioMech.

El sistema fue concebido bajo criterios de simplicidad operativa y bajo costo de implementación, buscando generar una alternativa técnicamente viable para el seguimiento temporal de parámetros asociados al comportamiento de los sistemas de puesta a tierra en entornos industriales reales.

La arquitectura de adquisición permitió registrar de forma sincronizada los valores obtenidos en ambos establecimientos durante el período de observación, posibilitando la comparación directa de las respuestas registradas bajo condiciones ambientales similares. Esta característica resultó particularmente relevante para la investigación, ya que permitió analizar la evolución temporal de dos sistemas independientes emplazados en una misma región geográfica.

Los datos obtenidos fueron almacenados en formato digital, organizados cronológicamente y posteriormente incorporados al proceso de depuración, procesamiento y análisis estadístico descrito en la metodología de investigación. La adquisición continua facilitó la identificación de tendencias, fluctuaciones temporales y comportamientos que difícilmente hubieran podido detectarse mediante mediciones convencionales realizadas en intervalos periódicos.

Con el fin de resumir las principales características de la campaña de adquisición implementada, la Tabla 5 presenta los parámetros generales considerados durante el monitoreo.

Característica	Descripción
Establecimientos monitoreados	TEKNIKA y BioMech
Ubicación general	Partido de Pilar, Provincia de Buenos Aires
Tipo de monitoreo	Continuo y sincronizado
Modalidad de adquisición	Automática
Sistema evaluado	Puesta a tierra industrial
Método de almacenamiento	Registro digital cronológico
Objetivo principal	Evaluación comparativa del comportamiento temporal de los sistemas
Aplicación	Diagnóstico y análisis experimental

Table 5: Características generales del sistema de adquisición de datos. Fuente: Propia.

5.5. Desarrollo e implementación del sistema de monitoreo

Con el propósito de realizar un seguimiento continuo del comportamiento de los sistemas de puesta a tierra analizados, se desarrolló un sistema de adquisición de datos basado en una plataforma Arduino, seleccionada por su versatilidad, disponibilidad y bajo costo de implementación.

El sistema fue diseñado específicamente para esta investigación y programado para efectuar mediciones automáticas de parámetros eléctricos asociados a los sistemas de puesta a tierra bajo estudio. La arquitectura de adquisición permitió registrar de forma periódica y sincronizada la evolución temporal de los valores monitoreados en los establecimientos identificados como TEKNIKA y BioMech, posibilitando la generación de series temporales para su posterior procesamiento y análisis.

La selección de una plataforma abierta respondió a los objetivos generales de la investigación, orientados a desarrollar una metodología accesible para entornos industriales que no requiriera inversiones significativas en instrumentación especializada. En este sentido, el sistema implementado buscó demostrar la viabilidad de utilizar tecnologías electrónicas de bajo costo como complemento de las técnicas convencionales de evaluación de sistemas de puesta a tierra.

Para verificar la confiabilidad de las mediciones obtenidas, el sistema de adquisición fue complementado con instrumentos de uso industrial y de laboratorio empleados durante las tareas de relevamiento y validación experimental. Entre ellos se utilizaron multímetros digitales para la comprobación de tensiones y continuidad eléctrica, instrumentos destinados a la medición de corriente y sensores electrónicos específicamente seleccionados para la adquisición de variables eléctricas relevantes para la investigación.

La integración entre sensores, dispositivos de medición y sistema de adquisición permitió disponer de una plataforma de monitoreo capaz de registrar información en forma continua, generar bases de datos históricas y facilitar el análisis de tendencias de comportamiento de los sistemas de puesta a tierra bajo condiciones reales de operación industrial.

Los resultados obtenidos mediante este esquema de adquisición constituyen la base experimental sobre la cual se desarrollan los análisis presentados en las secciones siguientes del trabajo.

- Variable monitoreada y principio de funcionamiento

El sistema de monitoreo desarrollado se basa en la generación controlada de una diferencia de potencial eléctrica aplicada al circuito de medición asociado al sistema de puesta a tierra y en la medición simultánea de la tensión aplicada y de la corriente resultante mediante sensores electrónicos conectados a una plataforma Arduino Uno.

A partir de ambas magnitudes eléctricas, el sistema calcula automáticamente la resistencia eléctrica equivalente utilizando la Ley de Ohm:

$$R = V / I$$

donde R representa la resistencia eléctrica equivalente, V la tensión medida e I la corriente registrada durante cada ciclo de adquisición.

Las mediciones fueron realizadas de forma automática y almacenadas cronológicamente, permitiendo construir series temporales destinadas al análisis de tendencias, variaciones y comportamientos observados durante el período de monitoreo.

Debido a las características de la metodología empleada, el sistema desarrollado constituye una herramienta complementaria a las mediciones convencionales realizadas mediante telurímetro. Su finalidad principal consiste en proporcionar información continua sobre la evolución temporal del comportamiento eléctrico del sistema de puesta a tierra bajo condiciones reales de operación.

Tabla 6 – Componentes principales del sistema de adquisición implementado. Fuente: Propia.

Componente	Función
Plataforma Arduino	Adquisición y procesamiento de datos
Sensores de corriente	Detección y registro de magnitudes eléctricas

Sensores de tensión	Monitoreo de variables eléctricas asociadas al sistema
Multímetro digital	Verificación y contraste de mediciones
Sistema de almacenamiento	Registro cronológico de datos
Software de adquisición	Control y almacenamiento de la información

La configuración presentada en la Tabla 6 corresponde al esquema general utilizado durante la investigación. Los componentes específicos fueron seleccionados en función de los objetivos de monitoreo y de los requerimientos experimentales de cada etapa del trabajo.

El sistema de monitoreo desarrollado no realiza una medición directa de la resistencia de puesta a tierra mediante el método convencional de caída de potencial utilizado por los telurímetros. En su lugar, registra de forma continua magnitudes eléctricas asociadas al comportamiento del sistema de puesta a tierra utilizando sensores de tensión y corriente conectados a una plataforma Arduino Uno.

Las señales adquiridas son procesadas digitalmente y almacenadas de forma cronológica, permitiendo construir series temporales representativas de la evolución del sistema durante el período de observación.

Debido a que la resistencia de puesta a tierra no puede determinarse de manera continua mediante técnicas convencionales sin alterar las condiciones normales de operación de la instalación, los registros obtenidos deben interpretarse como indicadores relativos del comportamiento eléctrico del sistema.

Con el fin de facilitar la comparación temporal entre mediciones y entre instalaciones, los valores registrados fueron normalizados mediante una escala de referencia asociada a mediciones realizadas con instrumentación convencional.

En consecuencia, la metodología propuesta no reemplaza las mediciones normalizadas de resistencia de puesta a tierra realizadas mediante telurímetro, sino que constituye una herramienta complementaria orientada a detectar variaciones, tendencias y cambios de comportamiento que podrían pasar inadvertidos mediante evaluaciones periódicas aisladas.

- *Escala de referencia utilizada*

Con el propósito de facilitar el almacenamiento, procesamiento y comparación temporal de las mediciones obtenidas durante la campaña de monitoreo, los datos fueron registrados mediante una escala relativa de referencia definida para el sistema de adquisición implementado. Esta estrategia permitió trabajar con una representación uniforme de los registros obtenidos, simplificando el análisis de tendencias y la comparación entre los sistemas monitoreados.

La escala fue calibrada tomando como referencia una resistencia máxima de puesta a tierra de 17 Ω, asociada al valor máximo de la escala de adquisición utilizada durante el estudio. A partir de esta referencia se estableció una relación de equivalencia que permite convertir los valores registrados por el sistema en resistencias eléctricas equivalentes expresados en Ohm. Los valores de resistencia equivalente obtenidos mediante el sistema de monitoreo fueron utilizados principalmente para el análisis comparativo y temporal de los sistemas estudiados, permitiendo identificar tendencias y variaciones relativas durante la campaña experimental.

La utilización de esta metodología permitió conservar la sensibilidad del sistema de monitoreo, mantener la proporcionalidad entre los datos registrados y facilitar la interpretación de los resultados obtenidos durante el análisis experimental.

- *Ecuación de equivalencia* $\Rightarrow R = \frac{17}{435} \times M$

  donde:

  R= resistencia equivalente expresada en Ω.

  M= valor registrado por el sistema de monitoreo.

La constante de conversión adoptada surge de la calibración realizada entre la escala digital utilizada por el sistema de adquisición y el valor de referencia máximo considerado durante la etapa experimental. Esta transformación permite expresar los registros obtenidos en unidades equivalentes de resistencia eléctrica (Ω) y facilitar su interpretación durante el análisis de los resultados.

5.6. Campaña de monitoreo

Con el propósito de obtener información representativa sobre el comportamiento temporal de los sistemas de puesta a tierra analizados, se desarrolló una campaña de monitoreo continuo en los establecimientos identificados como TEKNIKA y BioMech, ambos ubicados en el corredor industrial del partido de Pilar, provincia de Buenos Aires.

La campaña fue diseñada para registrar de manera simultánea y sincronizada la evolución de los parámetros eléctricos asociados a los sistemas de puesta a tierra de ambos establecimientos, permitiendo comparar las respuestas observadas bajo condiciones ambientales similares y durante un mismo período de análisis.

Las mediciones fueron realizadas bajo condiciones normales de operación industrial, sin efectuar modificaciones sobre los sistemas existentes ni interferir en las actividades productivas habituales. Esta condición permitió obtener información representativa del comportamiento real de los sistemas en servicio, evitando alterar las condiciones naturales de funcionamiento.

El monitoreo se llevó a cabo durante un período caracterizado por condiciones ambientales propias de la estación invernal de la región, con variaciones normales de temperatura, humedad y estado superficial del terreno asociadas a las condiciones meteorológicas locales.

La información obtenida fue registrada de manera automática y almacenada cronológicamente para su posterior procesamiento y análisis.

La simultaneidad de las mediciones constituyó un aspecto particularmente relevante de la campaña experimental, ya que permitió evaluar el comportamiento de dos sistemas independientes emplazados a una distancia aproximada de 120 m y sometidos a un mismo contexto climático regional. Esta condición facilitó la comparación directa de las respuestas observadas y permitió identificar diferencias de comportamiento potencialmente asociadas a características propias de cada sistema y de su entorno inmediato.

Los registros obtenidos durante esta campaña constituyen la base experimental utilizada para evaluar la metodología propuesta y analizar la variabilidad temporal observada en los sistemas de puesta a tierra objeto de estudio.

La validez de los resultados obtenidos depende, en gran medida, de las condiciones bajo las cuales se desarrolló la campaña de monitoreo.

Por tal motivo, resulta conveniente identificar los principales parámetros asociados al proceso de adquisición de datos, las características generales de los sistemas estudiados y las condiciones de operación consideradas durante la investigación.

La Tabla 7 resume los aspectos más relevantes de la campaña experimental desarrollada en los establecimientos TEKNIKA y BioMech.

Tabla 7 – Características generales de la campaña de monitoreo. Fuente: Propia

Parámetro	Descripción
Establecimientos monitoreados	TEKNIKA y BioMech
Ubicación general	Pilar, Provincia de Buenos Aires
Distancia aproximada entre sistemas	120 m
Tipo de monitoreo	Continuo y sincronizado
Modalidad de adquisición	Automática
Condiciones de operación	Operación industrial normal
Contexto ambiental	Condiciones estacionales propias de la región durante el período de monitoreo
Tipo de registro	Serie temporal cronológica
Finalidad	Evaluación comparativa del comportamiento de los sistemas de puesta a tierra

5.7. Resultados experimentales

Los datos obtenidos durante la campaña de monitoreo permitieron analizar el comportamiento temporal de los sistemas de puesta a tierra correspondientes a los establecimientos TEKNIKA y BioMech bajo condiciones reales de operación industrial.

La adquisición continua y sincronizada de la información hizo posible observar la evolución de ambos sistemas durante el período de estudio, facilitando la identificación de variaciones temporales, tendencias de comportamiento y diferencias entre instalaciones sometidas a un contexto ambiental regional comparable.

Los registros obtenidos constituyen una fuente de información particularmente relevante para la presente investigación, ya que permiten complementar las evaluaciones convencionales realizadas mediante mediciones puntuales y aportar evidencia sobre la dinámica de funcionamiento de los sistemas de puesta a tierra en condiciones reales de servicio.

Con el objeto de facilitar la presentación y análisis de los resultados, la información obtenida se organizó mediante herramientas gráficas y estadísticas descriptivas que permiten visualizar las principales características observadas durante la campaña experimental.

5.8. Comportamiento temporal de los sistemas monitoreados

La Tabla 8 presenta la evolución temporal de los registros obtenidos para los sistemas de puesta a tierra de TEKNIKA y BioMech durante el período de monitoreo considerado.

Tabla 8 – Evolución temporal de las mediciones registradas en los sistemas de puesta a tierra. Fuente: Propia.

	TEKNIKA	BioMech
Registros	2778	2778
Promedio	50,58312095	112,9948488
Mínimo	4,89	4,89
Máximo	151,52	435
Desvío Estándar	34,42157717	45,60125335

Una primera observación de la Tabla 8 permite advertir que ambos sistemas presentan comportamientos temporales diferenciados a pesar de encontrarse sometidos a condiciones ambientales similares y hallarse ubicados a escasa distancia geográfica.

Si bien las mediciones correspondientes a ambos establecimientos muestran variaciones a lo largo del tiempo, la amplitud y frecuencia de dichas variaciones no resultan equivalentes. Este comportamiento sugiere la influencia de factores locales asociados a las características particulares de cada sistema de puesta a tierra y de su entorno inmediato.

Asimismo, pueden identificarse períodos de relativa estabilidad alternados con episodios de mayor variabilidad, situación que pone de manifiesto la conveniencia de utilizar metodologías de monitoreo continuo para complementar las técnicas tradicionales de evaluación.

5.9. Análisis descriptivo de las mediciones

Con el propósito de caracterizar cuantitativamente el comportamiento observado durante la campaña experimental, se realizó un análisis descriptivo de las mediciones obtenidas.

Para ello se calcularon indicadores básicos de tendencia central y dispersión que permiten resumir las principales características de las series temporales registradas.

La campaña de monitoreo continuo generó una cantidad significativa de información, obteniéndose una serie temporal compuesta por registros sincronizados correspondientes a los sistemas de puesta a tierra de TEKNIKA y BioMech.

Dado que la presentación íntegra de los datos excedería los objetivos y dimensiones del presente trabajo, se seleccionó una muestra representativa distribuida a lo largo del período de observación. Esta selección permite ilustrar la naturaleza de los registros obtenidos y visualizar las variaciones observadas en ambos sistemas, manteniendo la secuencia temporal del monitoreo realizado.

Tabla 9 – Muestra representativa de registros obtenidos durante la campaña de monitoreo. Fuente: Propia

Fecha y hora	TEKNIKA	BioMech
03/08 16:24	29,33	117,30
03/08 19:42	39,10	87,98
03/08 23:01	92,86	53,76
04/08 02:19	102,64	39,10
04/08 05:38	122,19	24,44
04/08 08:57	43,99	254,15
04/08 12:15	73,31	48,88
04/08 15:34	9,78	83,09
04/08 18:53	34,21	97,75
04/08 22:11	53,76	107,53

05/08 01:30	92,86	78,20
05/08 04:49	112,41	156,40
05/08 08:07	73,31	117,30
05/08 11:26	68,43	136,85
05/08 14:45	34,21	117,30

Los registros presentados en la Tabla 9 permiten apreciar la variabilidad temporal observada en ambos sistemas de puesta a tierra durante el período analizado.

Si bien los establecimientos se encuentran sometidos a condiciones ambientales regionales comparables, pueden observarse diferencias en la magnitud y comportamiento de las mediciones registradas. Estas observaciones preliminares justifican la aplicación de herramientas gráficas y estadísticas que permitan analizar con mayor profundidad los patrones de comportamiento identificados en las series temporales obtenidas.

El análisis gráfico constituye una herramienta fundamental para la interpretación de series temporales, ya que permite identificar tendencias, fluctuaciones y diferencias de comportamiento entre conjuntos de datos observados bajo condiciones comparables.

En este contexto, la Figura 4 presenta la evolución temporal completa de las mediciones obtenidas en los sistemas de puesta a tierra de TEKNIKA y BioMech, constituyendo la base para el análisis comparativo desarrollado en las secciones posteriores.

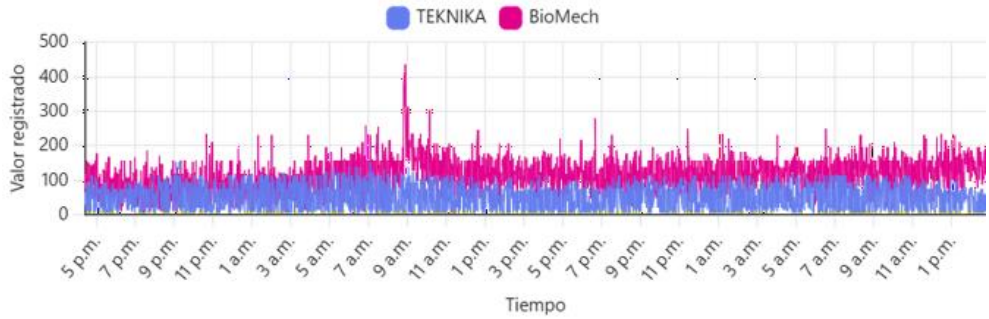


Figura 4 – Evolución temporal de las mediciones registradas en los sistemas de puesta a tierra de TEKNIKA y BioMech durante la campaña de monitoreo. Fuente: Propia.

Si bien la Figura 4 permite visualizar la totalidad de las fluctuaciones registradas durante la campaña de monitoreo, la elevada cantidad de datos puede dificultar la identificación de tendencias generales de comportamiento. Con el propósito de reducir el efecto de las variaciones instantáneas y resaltar los patrones predominantes observados en cada sistema, se aplicó un procedimiento de suavizado mediante media móvil sobre las series temporales obtenidas. La representación resultante permite apreciar con mayor claridad la evolución general de los sistemas de puesta a tierra monitoreados.

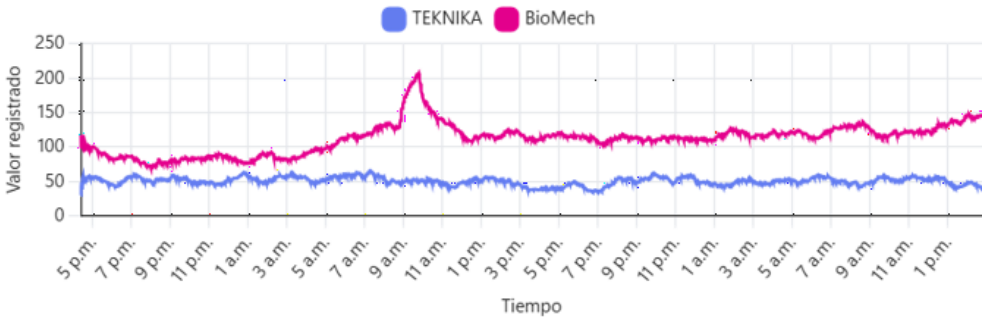


Figura 5 – Tendencia temporal suavizada de las mediciones registradas en TEKNIKA y BioMech mediante aplicación de media móvil. Fuente: Propia

La aplicación de técnicas de suavizado permitió identificar con mayor claridad las tendencias generales presentes en las mediciones registradas durante la campaña experimental. A diferencia de la representación original, donde las fluctuaciones instantáneas pueden dificultar la interpretación de los resultados, la Figura 5 evidencia los comportamientos predominantes observados en cada sistema a lo largo del período analizado.

Puede apreciarse que TEKNIKA y BioMech presentan patrones de evolución temporal diferenciados, aun cuando ambos sistemas se encuentran emplazados en una misma región geográfica y fueron monitoreados de manera simultánea. Esta situación sugiere que factores locales asociados a las características particulares del terreno, la configuración de los electrodos, las condiciones de instalación y el entorno operativo podrían influir en la respuesta observada.

Los resultados obtenidos respaldan la conveniencia de complementar las metodologías tradicionales de evaluación mediante técnicas de monitoreo continuo, ya que permiten detectar variaciones y tendencias que difícilmente podrían ser identificadas a partir de mediciones aisladas realizadas en intervalos periódicos. En consecuencia, el monitoreo temporal se presenta como una herramienta potencialmente útil para mejorar los procesos de diagnóstico y seguimiento del estado de los sistemas de puesta a tierra en entornos industriales.

Con el fin de complementar el análisis gráfico presentado, en la sección siguiente se desarrollan herramientas de análisis descriptivo que permiten caracterizar cuantitativamente las variaciones observadas en las mediciones correspondientes a TEKNIKA y BioMech.

5.10. Resultados experimentales

La campaña de monitoreo continuo generó una cantidad significativa de información, obteniéndose una serie temporal compuesta por registros sincronizados correspondientes a los sistemas de puesta a tierra de TEKNIKA y BioMech. Debido al volumen de datos recopilado durante el período de observación, se seleccionó una muestra representativa distribuida a lo largo de la campaña con el fin de ilustrar la naturaleza de la información obtenida conservando su secuencia temporal.

Los registros presentados permiten apreciar que ambos sistemas de puesta a tierra exhibieron variaciones a lo largo del período monitoreado. Sin embargo, la magnitud y comportamiento de dichas variaciones no resultaron equivalentes entre los establecimientos evaluados.

Mientras que las mediciones correspondientes a TEKNIKA se mantuvieron dentro de un rango relativamente acotado, BioMech presentó oscilaciones de mayor amplitud, observándose registros considerablemente superiores en determinados momentos de la campaña. Esta situación puede apreciarse particularmente en algunas observaciones intermedias, donde los valores registrados por BioMech superan ampliamente a los observados en TEKNIKA.

Estas diferencias preliminares sugieren que, aun encontrándose emplazados bajo condiciones ambientales regionales comparables y separados por una distancia relativamente reducida, ambos sistemas de puesta a tierra responden de manera diferente durante su operación normal.

Con el objeto de analizar la totalidad de las mediciones obtenidas y no solamente los registros representativos presentados en la Tabla 9, en la sección siguiente se desarrolla un análisis gráfico de las series temporales completas correspondientes a ambos sistemas monitoreados.

5.11. Comportamiento temporal de los sistemas monitoreados

Con el fin de analizar la evolución de los sistemas de puesta a tierra durante el período de observación, se realizó una representación gráfica de la totalidad de los registros obtenidos durante la campaña de monitoreo continuo. Esta herramienta permite visualizar la dinámica de comportamiento de los sistemas estudiados y detectar variaciones que difícilmente podrían identificarse a partir de observaciones aisladas o mediante el análisis individual de los registros.

La representación temporal permite observar que ambos sistemas presentan variaciones a lo largo del período analizado, evidenciando que el comportamiento de una puesta a tierra constituye un fenómeno dinámico que puede modificarse incluso bajo condiciones normales de operación industrial.

A pesar de encontrarse emplazados en una misma región geográfica y de haber sido monitoreados simultáneamente, los sistemas correspondientes a TEKNIKA y BioMech no exhiben respuestas equivalentes. Mientras algunas variaciones parecen ocurrir en intervalos temporalmente próximos, la magnitud y amplitud de las fluctuaciones observadas difieren entre ambos establecimientos.

Asimismo, pueden identificarse períodos de estabilidad relativa alternados con intervalos de mayor dispersión, situación que sugiere la influencia de factores que evolucionan a lo largo del tiempo y que no podrían ser adecuadamente caracterizados mediante una única medición puntual.

Las diferencias observadas constituyen una primera evidencia de que sistemas de puesta a tierra sometidos a condiciones ambientales regionales comparables pueden presentar comportamientos particulares asociados a características propias del terreno, de la instalación y del estado general del sistema.

Con el propósito de facilitar la identificación de tendencias generales y minimizar la influencia de las fluctuaciones instantáneas, se presenta a continuación una representación suavizada de las series temporales obtenidas.

5.12. Análisis descriptivo de las mediciones

Con el propósito de complementar el análisis gráfico desarrollado en las secciones anteriores, se realizó un análisis estadístico descriptivo de los registros obtenidos durante la campaña de monitoreo. Este procedimiento permitió caracterizar cuantitativamente el comportamiento de los sistemas de puesta a tierra estudiados mediante la utilización de indicadores de tendencia central y dispersión, facilitando la comparación objetiva entre los resultados correspondientes a TEKNIKA y BioMech.

La aplicación de herramientas estadísticas descriptivas resulta particularmente útil cuando se analizan series temporales extensas, ya que permite resumir grandes volúmenes de información y establecer parámetros representativos del comportamiento general de las variables observadas. En este caso, se consideraron indicadores tales como cantidad de registros, promedio, mediana, valores mínimos y máximos, desviación estándar, rango y coeficiente de variación.

A continuación, se presentan los principales resultados obtenidos.

Tabla 10 – Estadísticos descriptivos de las mediciones obtenidas. Fuente: Propia.

Indicador	TEKNIKA	BioMech
Cantidad de registros	2778	2778
Promedio	50,58	112,99
Mediana	53,76	112,41
Mínimo	4,89	4,89
Máximo	151,52	435,00
Desviación estándar	34,42	45,60
Rango	146,63	430,11
Coeficiente de variación (%)	68,05	40,36

- *Interpretación de los resultados*

Los resultados indicados en la Tabla 10 muestran diferencias significativas entre los sistemas monitoreados. En primer lugar, puede observarse que BioMech presenta valores medios considerablemente superiores a los registrados en TEKNIKA, situación que se refleja tanto en el promedio como en la mediana de las mediciones obtenidas.

Asimismo, se observa una marcada diferencia en la amplitud de los registros. Mientras que TEKNIKA presenta un rango de variación de 146,63 unidades, BioMech alcanza un rango de 430,11 unidades, evidenciando la presencia de fluctuaciones de mayor magnitud durante el período de observación.

Por otra parte, ambos sistemas exhiben dispersión en sus mediciones, aunque con características distintas. El coeficiente de variación obtenido para TEKNIKA resulta superior al de BioMech, indicando una mayor variabilidad relativa respecto de su valor medio. Este comportamiento coincide con las oscilaciones observadas previamente en las Figuras 4 y 5.

Los valores máximos registrados constituyen otro aspecto de interés. Mientras TEKNIKA alcanzó un valor máximo de 151,52 unidades, BioMech registró picos de hasta 435,00 unidades, lo que evidencia respuestas significativamente diferentes entre ambos sistemas pese a encontrarse emplazados bajo condiciones ambientales regionales comparables.

En conjunto, los resultados estadísticos refuerzan las observaciones realizadas a partir del análisis gráfico y ponen de manifiesto que sistemas de puesta a tierra instalados en una misma región y sometidos a condiciones climáticas similares pueden presentar comportamientos diferenciados. Esta situación sugiere la influencia de factores locales asociados al terreno, a la configuración de los electrodos, a las condiciones constructivas de la instalación y a otros aspectos particulares del entorno de cada establecimiento.

Los hallazgos obtenidos constituyen un elemento relevante para la validación de la metodología propuesta, ya que demuestran la utilidad del monitoreo continuo como complemento de las evaluaciones convencionales efectuadas mediante mediciones puntuales. La disponibilidad de información temporal permitió identificar comportamientos y variaciones que difícilmente podrían haber sido detectados mediante procedimientos tradicionales de inspección y medición aislada.

- *Análisis subjetivo del autor*

Una vez caracterizados gráficamente y mediante técnicas estadísticas descriptivas los datos obtenidos durante la campaña de monitoreo, resulta posible analizar estos resultados a la luz de las hipótesis planteadas y de los antecedentes presentados en el marco teórico. En la sección siguiente se desarrolla una discusión de los hallazgos observados y de su relación con la metodología propuesta para la evaluación de sistemas de puesta a tierra en entornos industriales.

6. Discusión de resultados

Los resultados obtenidos durante la campaña de monitoreo permitieron identificar diferencias significativas en el comportamiento temporal de los sistemas de puesta a tierra correspondientes a TEKNIKA y BioMech. A pesar de encontrarse emplazados en una misma región geográfica y de haber sido sometidos a condiciones ambientales comparables, ambos sistemas exhibieron respuestas diferenciadas durante el período de observación.

Los análisis gráficos y estadísticos realizados evidenciaron que la evolución temporal de las mediciones no puede ser explicada únicamente a partir de la proximidad geográfica entre las instalaciones. Las diferencias observadas sugieren la existencia de factores locales capaces de influir sobre el comportamiento eléctrico de los sistemas de puesta a tierra, entre los que pueden mencionarse las características particulares del terreno, la compactación del suelo, el drenaje, la humedad efectiva disponible y los aspectos constructivos específicos de cada instalación.

Los resultados obtenidos respaldan la hipótesis de que las mediciones puntuales realizadas mediante procedimientos convencionales resultan insuficientes para describir de manera integral el comportamiento dinámico de los sistemas de puesta a tierra. Si bien los ensayos tradicionales continúan siendo herramientas válidas para la verificación de condiciones específicas, el monitoreo continuo permite incorporar una dimensión temporal que aporta información adicional para la interpretación de los fenómenos observados.

Asimismo, el estudio pone de manifiesto la viabilidad técnica de implementar estrategias de monitoreo continuo utilizando recursos de bajo costo. La metodología desarrollada permitió registrar, almacenar y analizar información de manera sistemática sin generar interferencias en las condiciones normales de operación industrial, constituyendo una alternativa accesible para tareas de diagnóstico y seguimiento.

Desde una perspectiva práctica, los resultados obtenidos sugieren que la incorporación de sistemas de monitoreo continuo podría contribuir al desarrollo de estrategias de mantenimiento predictivo aplicadas a sistemas de puesta a tierra, mejorando la capacidad de detección temprana de variaciones de comportamiento y facilitando la toma de decisiones basada en evidencia objetiva.

Finalmente, la experiencia desarrollada permitió generar una base experimental que servirá como punto de partida para investigaciones futuras orientadas al estudio de la influencia de variables ambientales específicas, como temperatura, precipitaciones y humedad del suelo, sobre la evolución temporal de los sistemas de puesta a tierra en entornos industriales.

- Validación de H1: aceptada.
- Validación de H2: aceptada.
- Validación de H3: aceptada parcialmente.

7. Proyección tecnológica de la investigación

La evolución reciente de la instrumentación para sistemas de puesta a tierra evidencia una tendencia hacia métodos de medición capaces de proporcionar información más representativa del comportamiento de las instalaciones en servicio. Sin embargo, el costo de implementación de gran parte de estas soluciones continúa constituyendo una limitación para numerosas aplicaciones industriales.

En este contexto, la investigación desarrollada busca explorar alternativas técnicamente viables basadas en tecnologías abiertas y sistemas de adquisición de bajo costo, capaces de complementar las metodologías convencionales de evaluación y ampliar las posibilidades de monitoreo de sistemas de puesta a tierra bajo condiciones reales de operación.

8. Conclusiones

La presente investigación permitió analizar el comportamiento de sistemas de puesta a tierra en instalaciones industriales mediante la aplicación de una metodología de evaluación de bajo costo basada en mediciones convencionales, inspección visual estructurada y monitoreo continuo.

Los resultados obtenidos permitieron verificar experimentalmente que dos sistemas de puesta a tierra ubicados en establecimientos industriales independientes, separados aproximadamente 120 m y sometidos a condiciones ambientales regionales similares, pueden presentar respuestas temporales significativamente diferentes. Este comportamiento evidencia que factores locales asociados a las características del terreno, las condiciones constructivas de la instalación y el estado particular de cada sistema pueden influir de manera relevante en su desempeño.

Asimismo, la información obtenida durante la campaña de monitoreo demostró que las mediciones aisladas realizadas mediante procedimientos convencionales representan únicamente el estado instantáneo del sistema y pueden no reflejar adecuadamente su comportamiento dinámico a lo largo del tiempo. En consecuencia, los resultados sugieren que la evaluación periódica tradicional debería complementarse con estrategias de seguimiento continuo que permitan mejorar la representatividad de los diagnósticos y la comprensión de los fenómenos observados.

La metodología desarrollada demostró ser técnicamente viable, operativamente sencilla y económicamente accesible para su aplicación en entornos industriales reales. Su implementación permitió identificar variaciones relativas, tendencias y diferencias de comportamiento que difícilmente podrían haberse detectado mediante campañas periódicas aisladas de medición.

El método implementado se basa en la medición de tensión e intensidad de corriente y en la estimación de una resistencia eléctrica equivalente mediante la aplicación de la Ley de Ohm. Debido a que el sistema empleado no incorpora técnicas de inyección de señal a una frecuencia específica que permitan discriminar completamente las perturbaciones presentes en la instalación eléctrica, los valores obtenidos deben interpretarse como indicadores representativos del comportamiento resistivo del sistema bajo condiciones reales de operación. En consecuencia, la presente investigación se limita al análisis de la componente resistiva del sistema, sin considerar los efectos reactivos asociados a fenómenos capacitivos o inductivos.

Desde una perspectiva práctica, el monitoreo continuo se presenta como una herramienta de interés para la supervisión, diagnóstico y mantenimiento de sistemas de puesta a tierra, contribuyendo a la generación de información objetiva para la toma de decisiones técnicas y al fortalecimiento de estrategias orientadas al mantenimiento basado en condición.

La investigación permitió demostrar que tecnologías abiertas y de bajo costo pueden emplearse para desarrollar herramientas de monitoreo aplicadas a sistemas de puesta a tierra industriales, generando información complementaria respecto de las metodologías convencionales y ampliando las posibilidades de análisis bajo condiciones reales de operación.

Finalmente, los resultados obtenidos abren nuevas oportunidades de investigación orientadas a profundizar el estudio de los factores que influyen sobre la evolución temporal de los sistemas de puesta a tierra, la integración de información proveniente de distintas fuentes de monitoreo, la incorporación de técnicas de inyección de señal que permitan mejorar la discriminación de la resistencia efectiva del sistema y el desarrollo de herramientas avanzadas para la evaluación y gestión de instalaciones eléctricas en entornos industriales.

9. Líneas futuras de investigación

Los resultados obtenidos durante el desarrollo de esta investigación permiten identificar nuevas oportunidades de estudio orientadas a profundizar la comprensión del comportamiento de los sistemas de puesta a tierra en entornos industriales reales.

En particular, se considera de interés avanzar en el análisis de variables capaces de influir sobre la evolución temporal observada en los sistemas estudiados, así como en el desarrollo de metodologías que permitan mejorar la interpretación de los fenómenos detectados durante los procesos de monitoreo y evaluación.

Asimismo, la información generada abre la posibilidad de desarrollar herramientas complementarias destinadas a ampliar las capacidades de diagnóstico, seguimiento y gestión de sistemas de puesta a tierra bajo condiciones operativas variables, incorporando nuevas fuentes de información y criterios de análisis.

Por otra parte, los resultados obtenidos sugieren la conveniencia de continuar investigando estrategias orientadas a la integración de datos provenientes de distintas tecnologías de medición, con el objetivo de obtener modelos más representativos del comportamiento real de las instalaciones y mejorar la comprensión de los procesos que afectan su desempeño a lo largo del tiempo.

Como línea de desarrollo futuro se propone la incorporación de señales de excitación en corriente alterna y técnicas de análisis de fase que permitan determinar la impedancia compleja de los sistemas de puesta a tierra, evaluando no solamente la componente resistiva sino también los efectos reactivos asociados al comportamiento eléctrico del sistema.

Finalmente, el avance de las tecnologías de adquisición, procesamiento y análisis de información ofrece nuevas oportunidades para el desarrollo de metodologías que contribuyan a optimizar la evaluación, supervisión y mantenimiento de sistemas eléctricos de protección en aplicaciones industriales.

10. Referencias bibliográficas

ASOCIACIÓN ELECTROTÉCNICA ARGENTINA (AEA). *Reglamentación para la ejecución de instalaciones eléctricas en inmuebles*. AEA 90364. Edición vigente.

DAWALIBI, F. y MUKHEDKAR, D. Influence of ground rods on grounding systems. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1979.

DWIGHT, H. B. Calculation of resistances to ground. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 1918.

HERNÁNDEZ Sampieri, R., FERNÁNDEZ Collado, C. y BAPTISTA Lucio, P. *Metodología de la investigación*. 6a. ed. México: McGraw-Hill Education, 2014.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). *IEEE Std 81-2012: IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System* [en línea]. IEEE, 2012. Disponible en: https://ieeexplore.ieee.org/document/6392181

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). *IEEE Std 80-2013: IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding* [en línea]. IEEE, 2013. Disponible en: https://ieeexplore.ieee.org/document/7109078

INSTITUTO ARGENTINO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (IRAM). *Normas aplicables a puesta a tierra y seguridad eléctrica*.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). *IEC 60364: Low-Voltage Electrical Installations*.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION (NFPA). *NFPA 70: National Electrical Code (NEC)*.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION (NFPA). *NFPA 70E: Standard for Electrical Safety in the Workplace*.

TAGG, G. F. *Earth Resistances*. Londres: George Newnes, 1964.

TRIOLA, M. F. *Estadística*. 12a. ed. México: Pearson Educación, 2018.