

Soluciones inteligentes de monitoreo remoto: combinando registro de datos de alta frecuencia con edge-computing para un análisis de protección catódica avanzado

I. Magnifico, Automa Srl (Italia), ivano.magnifico@byautoma.com

Synopsis

La evolución de los sistemas de monitoreo remoto de protección catódica ha alcanzado un punto crítico donde las “Remote Monitoring Units” (RMUs) tradicionales y los dataloggers están siendo reemplazados por soluciones integradas de nueva generación. Este trabajo presenta un enfoque innovador que fusiona capacidades de adquisición de datos de alta frecuencia con tecnologías de edge-computing para crear “Remote Datalogger Units” (RDUs) capaces de realizar análisis integral de protección catódica.

La integración de edge-computing transforma el paradigma desde una simple recolección de datos hacia un procesamiento local inteligente, permitiendo el análisis en tiempo real de mediciones de alta frecuencia mientras se optimizan los requisitos de transmisión de datos. Mediante muestreo continuo cada segundo y procesamiento estadístico local, el sistema genera informes diarios exhaustivos que destacan parámetros críticos incluyendo valores mínimos, promedio y máximos, distribuciones estadísticas, violaciones de umbrales y condiciones de alarma.

El trabajo demuestra cómo esta tecnología permite un monitoreo mejorado de equipos de protección catódica incluyendo trafo-rectificadores, sistemas de drenaje unidireccional y dispositivos de mitigación de CA. La detección en tiempo real de fallas en equipos, como la degradación de diodos en sistemas de drenaje y mal funcionamiento de desacopladores, se logra mediante el monitoreo continuo de parámetros y la generación inteligente de alarmas.

Además, el sistema proporciona evaluación avanzada de la efectividad de la protección catódica mediante el monitoreo continuo de potenciales de estructura, mediciones de instant-off en coupons y detección de interferencias. La capacidad de capturar efectos transitorios y comportamientos detallados variantes en el tiempo permite una evaluación más precisa del cumplimiento de criterios de protección y patrones de interferencia.

Este enfoque integral de monitoreo contribuye a mejorar la confiabilidad del sistema, reducir costos de mantenimiento y mejorar la seguridad mediante la detección temprana de anomalías del sistema y deficiencias de protección.

Introducción

El panorama del monitoreo de protección catódica ha experimentado una transformación significativa a medida que la industria avanza más allá de los enfoques tradicionales hacia soluciones más sofisticadas basadas en datos. La creciente complejidad de las redes de ductos, junto con los estrictos requisitos normativos y la necesidad de eficiencia operativa, demanda sistemas de monitoreo que puedan proporcionar tanto capacidades integrales de adquisición de datos como procesamiento local inteligente.

Los enfoques tradicionales de monitoreo remoto han presentado históricamente a los operadores un dilema fundamental: las Unidades de Monitoreo Remoto (RMUs) ofrecen vigilancia continua con bajos requisitos de transmisión de datos pero carecen del muestreo de alta frecuencia necesario para el análisis detallado de fenómenos transitorios. Por el contrario, los dataloggers proporcionan mediciones de alta resolución capaces de capturar variaciones rápidas y patrones de interferencia, pero típicamente requieren recuperación manual de datos y carecen de accesibilidad remota en tiempo real.

Esta dicotomía ha creado desafíos operativos en la gestión moderna de protección catódica, donde tanto la supervisión continua como las capacidades analíticas detalladas son esenciales para un rendimiento óptimo del sistema. La aparición de interferencias por corrientes vagabundas provenientes de sistemas

ferroviarios, inducción de CA desde líneas eléctricas e interferencia mutua entre sistemas de protección catódica adyacentes requiere soluciones de monitoreo capaces de capturar y analizar variaciones de alta frecuencia mientras se mantiene la conectividad remota continua.

La convergencia de la tecnología de Edge-Computing con sistemas avanzados de adquisición de datos ahora permite un nuevo paradigma en el monitoreo de protección catódica. El Edge-Computing, caracterizado por capacidades de procesamiento local de datos en el punto de medición, transforma datos crudos de alta frecuencia en estadísticas significativas sin saturar las redes de comunicación. Este enfoque permite el despliegue de Remote Datalogger Units (RDUs) que combinan las capacidades de vigilancia continua de las RMUs tradicionales con la profundidad analítica de los dataloggers de alta resolución.

La integración de Edge-Computing en los sistemas de monitoreo de protección catódica aborda varios desafíos críticos:

- **Gestión del Volumen de Datos:** El muestreo de alta frecuencia genera volúmenes sustanciales de datos que saturarían las redes de comunicación tradicionales y los sistemas de almacenamiento. El procesamiento local reduce los requisitos de transmisión mientras preserva el valor analítico.
- **Análisis en Tiempo Real:** El Edge-Computing permite el procesamiento inmediato de datos adquiridos, posibilitando la detección en tiempo real de anomalías y la generación de alarmas inteligentes basadas en análisis local en lugar de simples comparaciones de umbrales.
- **Confiabilidad de Comunicación:** Al procesar datos localmente y transmitir únicamente información esencial, el sistema mantiene efectividad operativa incluso con conectividad de comunicación intermitente.
- **Optimización de Vida de Batería:** Los requisitos reducidos de transmisión de datos y la gestión inteligente de energía extienden la vida operativa en dispositivos alimentados por batería.

Este trabajo presenta un análisis exhaustivo de soluciones avanzadas de monitoreo remoto que integran adquisición de datos de alta frecuencia con capacidades de Edge-Computing, demostrando su aplicación en la evaluación integral de sistemas de protección catódica.

Arquitectura de Edge-Computing para monitoreo de protección catódica

La implementación de Edge-Computing en el monitoreo de protección catódica representa un cambio de paradigma desde el procesamiento centralizado de datos hacia el trabajo distribuido en el punto de medición. Esta arquitectura permite el procesamiento local en tiempo real de mediciones de alta frecuencia, transformando grandes conjuntos de datos en informes concisos y accionables que optimizan tanto la profundidad analítica como la eficiencia de comunicación.

Arquitectura del Sistema

La Unidad Registradora de Datos Remota (RDU) incorpora varios componentes clave:

- **Sistema de adquisición de alta frecuencia** capaz de muestrear parámetros de protección catódica a tasas de hasta 1 Hz continuamente
- **Unidad de procesamiento local** equipada con suficiente potencia computacional para realizar análisis estadístico
- **Algoritmos de Edge-Computing** diseñados para extraer patrones significativos y detectar anomalías de conjuntos de datos de alta frecuencia
- **Interfaz de comunicación** optimizada para transmisión de resultados analíticos procesados en lugar de datos crudos
- **Sistema de gestión de energía** diseñado para soportar operación continua en ubicaciones remotas

Metodología de Procesamiento de Datos

El sistema de Edge-Computing procesa mediciones continuas de alta frecuencia a través de un marco analítico estructurado. Para un período típico de adquisición de 24 horas con intervalos de muestreo de 1 segundo, el sistema procesa 86,400 mediciones individuales para cada parámetro monitoreado. Este conjunto masivo de datos se somete a análisis estadístico local para extraer indicadores clave de rendimiento:

- Valores diarios mínimos, promedio y máximos proporcionando evaluación de rendimiento base
- Moda estadística representando el valor de medición más frecuente
- Desviación estándar cuantificando la variabilidad de medición
- Coeficiente de variación expresando variabilidad relativa
- Duración total de tiempo por debajo de umbrales mínimos de protección
- Duración total de tiempo por encima de umbrales máximos de protección
- Número de violaciones de umbrales durante el período de monitoreo
- Análisis de patrones de ocurrencia de violaciones

Además, el análisis de tendencias permite:

- Identificación de variaciones sistemáticas y patrones
- Detección de deriva gradual de parámetros indicando degradación de equipos
- Reconocimiento de variaciones periódicas relacionadas con ciclos operacionales

Este procesamiento local exhaustivo permite la generación de informes diarios que proporcionan perspectiva analítica completa mientras requieren un ancho de banda mínimo de transmisión de datos.

Optimización de Comunicación

El enfoque de Edge-Computing transforma fundamentalmente los requisitos de comunicación de los sistemas de monitoreo remoto. En lugar de transmitir grandes volúmenes de datos crudos de alta frecuencia, el sistema comunica resultados analíticos procesados que proporcionan valor analítico equivalente o superior con requisitos de ancho de banda dramáticamente reducidos.

Un informe diario típico, conteniendo análisis estadístico exhaustivo de 86,400 mediciones, requiere solo unos pocos kilobytes de transmisión de datos comparado con megabytes de datos de medición crudos. Esta optimización permite el despliegue práctico de monitoreo de alta frecuencia en ubicaciones con infraestructura de comunicación limitada mientras se mantiene la integridad analítica.

Monitoreo integral de equipos

El sistema de monitoreo avanzado proporciona vigilancia detallada de todos los equipos críticos de protección catódica, permitiendo la detección temprana de fallas y la optimización del rendimiento del sistema. Este enfoque integral monitorea tanto el estado operacional como las tendencias de rendimiento de los componentes clave del sistema.

Monitoreo de Transformadores Rectificadores

Los transformadores rectificadores representan el corazón de los sistemas de protección catódica por corriente impresa, y su monitoreo continuo es esencial para la confiabilidad del sistema. La RDU monitorea múltiples parámetros para evaluar el rendimiento del rectificador y detectar fallas potenciales: el monitoreo continuo de corriente y voltaje de salida DC permite la evaluación del rendimiento del rectificador y la condición del lecho anódico.

El sistema rastrea tanto valores instantáneos como tendencias estadísticas para identificar patrones de degradación gradual que pueden indicar deterioro del lecho anódico o envejecimiento de componentes del rectificador. Un ejemplo se muestra en la Figura 1.

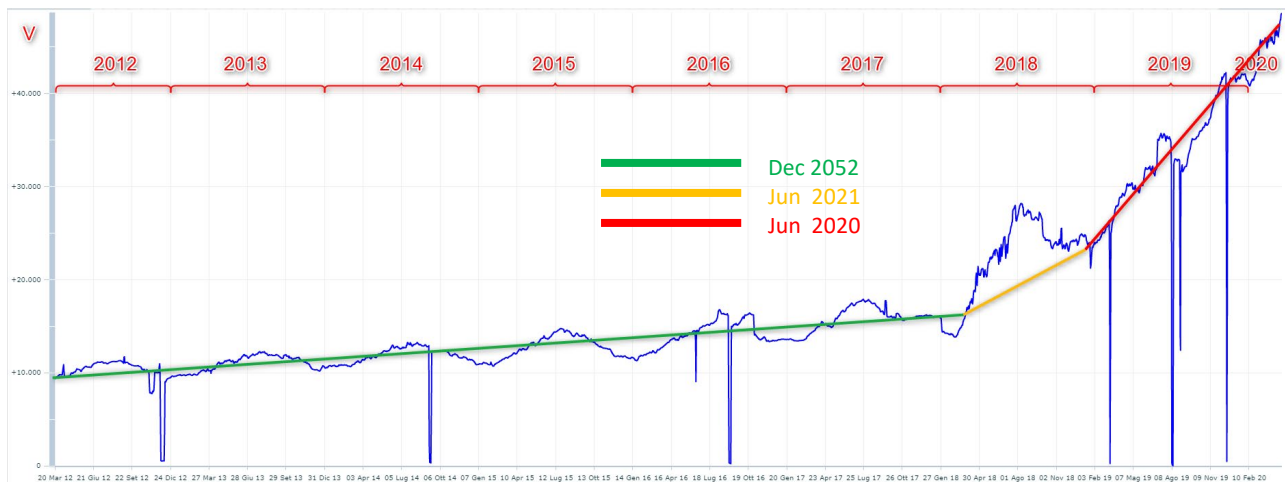


Figura 1: Tendencia del comportamiento del lecho anodico durante 8 años

Otra actividad importante es el monitoreo del voltaje de salida CA con alarmas inteligentes cuando los valores promedio exceden umbrales definidos, permitiendo la detección temprana de problemas al filtro de salida del transformador rectificador o problemas de calidad de energía de entrada.

El monitoreo de T/Rs permite detectar la presencia de alimentación principal, habilitando la detección inmediata de fallas de energía y el cambio automático a sistemas de energía de respaldo donde estén disponibles.

Monitoreo de Sistemas de Drenaje Unidireccional

Los sistemas de drenaje unidireccional protegen los ductos de interferencias por corrientes vagabundas mientras previenen el flujo de corriente reversa. El sistema de monitoreo proporciona vigilancia exhaustiva del rendimiento del sistema de drenaje con enfoque específico en la evaluación de integridad de diodos. Los parámetros a monitorear son:

- **Corriente drenada DC:** El monitoreo continuo de corriente drenada permite la detección de operación normal ($I_r \geq 0$) y alarmas inmediatas cuando el flujo de corriente reversa indica falla del diodo ($I_r < 0$).
- **Potencial entre tubo y via:** El sistema monitorea el potencial entre tubo y via con evaluación inteligente de rangos de operación normales considerando tanto los límites teóricos como las condiciones operacionales reales incluyendo efectos de resistencia parásita del diodo.
- **Potencial On DC del ducto y voltaje CA.**
- **Instant-off en coupon para medición de potencial IR-free** con medida de densidades de corriente DC y CA en coupon.

Monitoreo de Dispositivos de Mitigación de CA

Los dispositivos de mitigación de interferencia CA requieren monitoreo especializado para asegurar drenaje efectivo de CA mientras se previene el flujo de corriente DC que podría comprometer los sistemas de protección catódica.

- **Monitoreo de Corriente:** El sistema monitorea tanto la corriente drenada CA como la corriente de fuga DC, con alarmas específicas cuando la corriente DC promedio se desvía de cero, indicando daño en el desacoplador o la presencia de caminos resistivos no deseados.
- **Evaluación de Potencial:** El monitoreo del potencial de la tierra permite la detección de cambios en el rendimiento del sistema, con alarmas cuando el potencial de la tierra se desplaza hacia valores más negativos indicando potencial compromiso del sistema.
- **Potencial On DC del ducto y voltaje CA.**
- **Instant-off en coupon para medición de potencial polarizado** con medida de densidades de corriente DC y CA en coupon.

El sistema de monitoreo nos permite reconocer patrones característicos de falla en dispositivos de mitigación de CA, incluyendo correlación entre cambios de parámetros que indican modos de falla específicos. Por ejemplo, cambios simultáneos en corriente drenada y potencial a tierra pueden indicar falla del desacoplador requiriendo atención inmediata, como se muestra en la Figura 2.

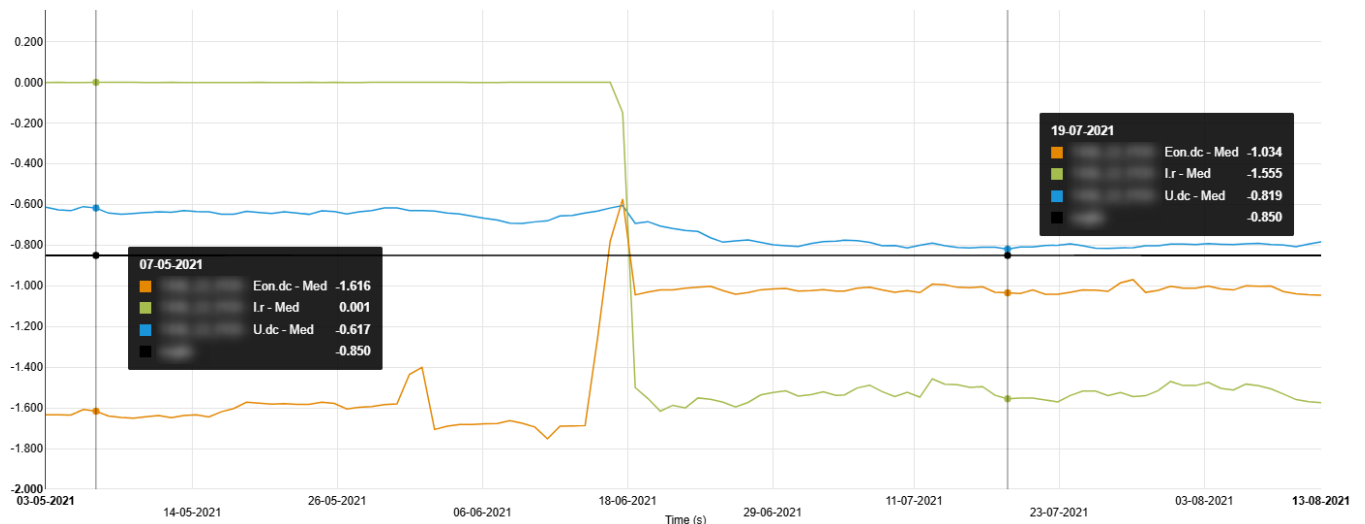


Figura 2: Detección de fallo del desacoplador de CA, con corriente continua cambiando de 0A a -1,5A, potencial de tierra de -0,6V a -0,8V y potencial de estructura de -1,6V a -1,0V.

Evaluación de efectividad de protección catódica

Según la norma NACE SP0169 (acero al carbono) sabemos que para una PC efectiva necesitamos un mínimo de 100 mV de polarización catódica o un potencial estructura-a-electrolito de -850 mV o más negativo medido con respecto a un electrodo de referencia de cobre/sulfato de cobre saturado (CSE). Este potencial puede ser una medición directa del potencial polarizado o un potencial con corriente aplicada, y es importante usar coupons de protección catódica para establecer niveles de densidad de corriente, potencial de corrosión y niveles de polarización.

Más allá del monitoreo de equipos, el sistema avanzado proporciona evaluación exhaustiva y continua de la efectividad de la protección catódica mediante evaluación detallada del cumplimiento de criterios de protección, detección de interferencias y análisis de fenómenos electroquímicos complejos que afectan el rendimiento del sistema. Esta capacidad representa un avance significativo sobre los enfoques tradicionales de inspección periódica, proporcionando perspectiva continua sobre niveles de protección y estado de cumplimiento.

Potencial On de Estructura

El monitoreo continuo del potencial On de estructura permite la evaluación en tiempo real de tendencias de nivel de protección e identificación inmediata de períodos cuando los criterios de protección pueden no cumplirse adecuadamente. El sistema procesa estas mediciones continuas a través de sofisticados algoritmos de análisis estadístico que generan resúmenes diarios exhaustivos incluyendo valores de potencial mínimo, promedio y máximo. Este enfoque estadístico permite la identificación de variaciones de nivel de protección a lo largo de ciclos operacionales diarios y proporciona evaluación cuantitativa del cumplimiento con criterios de protección establecidos durante períodos de tiempo extendidos.

La capacidad de evaluación automatizada de cumplimiento de umbrales representa un avance particularmente valioso en el monitoreo de efectividad de protección. El sistema evalúa continuamente potenciales medidos contra umbrales de criterios de protección establecidos, cuantificando automáticamente períodos de tiempo cuando los potenciales caen fuera de rangos de protección aceptables y el número de veces fuera de protección. Esta capacidad permite la cuantificación precisa

de duración y frecuencia de deficiencia de protección, proporcionando información esencial para documentación de cumplimiento normativo y actividades de planificación de mantenimiento. Un ejemplo se muestra en la Figura 3.

Date	C...	UM	Min	Avg	Max	Mode ...	SQM	V...	TFSMi...	TFSM...	NFSMi...	NFSM...
30/10/2023		Eon.dc	-1.332	-1.176	-1.036	-1.180	0.019		0	0	0	0
29/10/2023		Eon.dc	-1.279	-1.181	-1.051	-1.190	0.014		0	0	0	0
28/10/2023		Eon.dc	-1.280	-1.178	-1.032	-1.180	0.016		0	0	0	0
27/10/2023		Eon.dc	-1.372	-1.149	-0.813	-1.190	0.070		0	4671	0	1631
26/10/2023		Eon.dc	-1.384	-1.168	-0.822	-1.200	0.071		0	3183	0	1316
25/10/2023		Eon.dc	-1.370	-1.140	-0.772	-1.160	0.068		0	5792	0	1773
24/10/2023		Eon.dc	-1.323	-1.151	-1.011	-1.160	0.025		0	0	0	0
23/10/2023		Eon.dc	-1.298	-1.074	-0.747	-1.100	0.068		0	7835	0	1630
22/10/2023		Eon.dc	-1.219	-1.096	-0.913	-1.090	0.011		0	1	0	1
21/10/2023		Eon.dc	-1.198	-1.093	-0.964	-1.090	0.013		0	0	0	0
20/10/2023		Eon.dc	-1.354	-1.087	-0.718	-1.090	0.039		0	2021	0	421
19/10/2023		Eon.dc	-1.217	-1.087	-0.802	-1.090	0.029		0	1176	0	244
18/10/2023		Eon.dc	-1.337	-1.064	-0.643	-1.090	0.066		0	7497	0	1577
17/10/2023		Eon.dc	-1.289	-1.052	-0.691	-1.070	0.071		0	7579	0	1573
16/10/2023		Eon.dc	-1.284	-1.053	-0.705	-1.080	0.064		0	7095	0	1456
15/10/2023		Eon.dc	-1.188	-1.084	-0.967	-1.080	0.014		0	0	0	0
14/10/2023		Eon.dc	-1.173	-1.065	-0.934	-1.060	0.016		0	1	0	1
13/10/2023		Eon.dc	-1.207	-1.079	-0.855	-1.070	0.027		0	22	0	9
12/10/2023		Eon.dc	-1.250	-1.091	-0.941	-1.090	0.020		0	5	0	5
11/10/2023		Eon.dc	-1.447	-1.106	-0.974	-1.100	0.016		0	0	0	0
10/10/2023		Eon.dc	-1.263	-1.138	-0.996	-1.150	0.023		0	0	0	0

Figura 3: Informes diarios de potencial sobre estructura en una toma de potencial, destacando el número de segundos fuera de protección durante 24 horas.

Potencial Off en Coupon

La incorporación de capacidades sofisticadas de medición de potencial de instant-off permite la evaluación precisa de potenciales polarizados verdaderos libres de efectos de caída IR que pueden enmascarar condiciones reales de protección. El sistema emplea parámetros de medición configurables incluyendo tiempos de retardo precisos desde la interrupción de corriente hasta el inicio de medición y duración de muestreo cuidadosamente controlada para capturar valores precisos de potencial polarizado. Esta técnica de medición es esencial para la evaluación confiable del cumplimiento de criterios de protección, particularmente en ambientes con patrones complejos de distribución de corriente.

Las capacidades de evaluación de interferencia proporcionan análisis detallado de efectos de interferencia mediante comparación continua de mediciones de potencial On y Off. Diferencias significativas entre estas mediciones indican la presencia de corrientes vagabundas u otras fuentes de interferencia que requieren investigación detallada y potenciales medidas de mitigación. La capacidad del sistema para capturar y analizar estas diferencias continuamente proporciona perspectiva sin precedentes sobre patrones de interferencia y sus efectos en el rendimiento del sistema de protección.

Interferencia DC

Las capacidades exhaustivas de detección y análisis de interferencias abordan los desafíos complejos de los sistemas modernos de protección catódica operando en ambientes con múltiples fuentes potenciales de interferencia. Mediante comparación detallada de potenciales On de estructura con mediciones de instant-off de coupon, el sistema identifica y cuantifica efectos de interferencia DC con precisión notable.

La naturaleza continua de estas mediciones permite la detección tanto de condiciones de interferencia en estado estacionario como de eventos de interferencia transitorios que pueden perderse con enfoques de inspección periódica. Un ejemplo se muestra en la Figura 4.

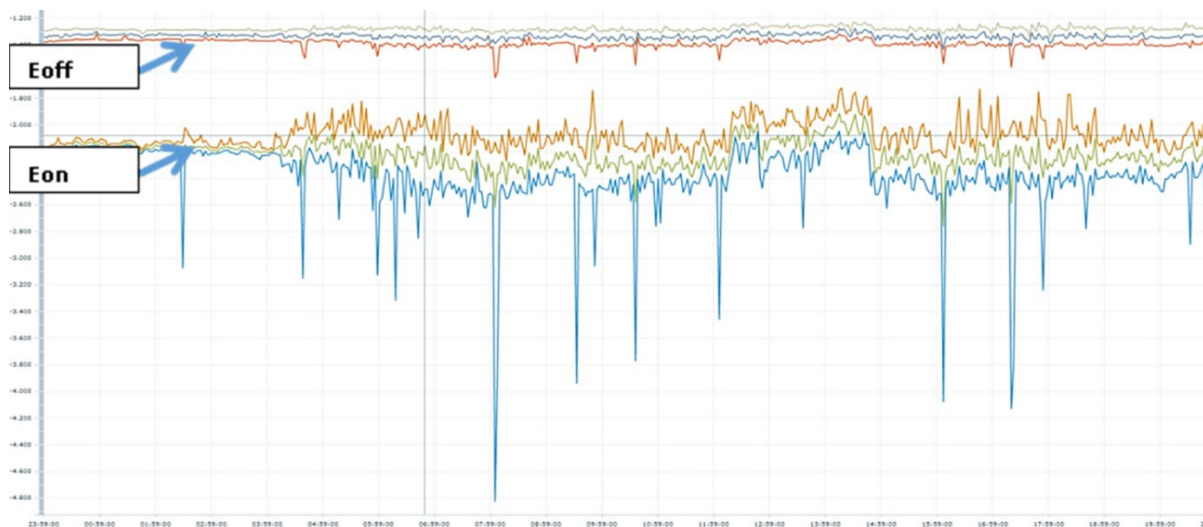


Figura 4: Medidas descargadas de forma remota, segundo a segundo sobre 24 horas, de potencial ON sobre estructura y de instant-off sobre coupon en un cruce con ferrocarril.

Interferencia CA

Las capacidades de monitoreo de interferencia CA proporcionan tanto mediciones detalladas de corto plazo como análisis de tendencias de largo plazo, permitiendo la detección de eventos transitorios de CA y cambios graduales en niveles de interferencia CA que pueden requerir modificaciones del sistema o medidas de mitigación adicionales.

El sistema monitorea continuamente niveles de voltaje CA y aplica criterios de umbral establecidos para evaluar el cumplimiento con estándares de interferencia CA, proporcionando documentación automática del estado de cumplimiento y notificación inmediata cuando puede requerirse intervención. En la Figura 5 se muestran ejemplos de monitorización de voltaje de CA.

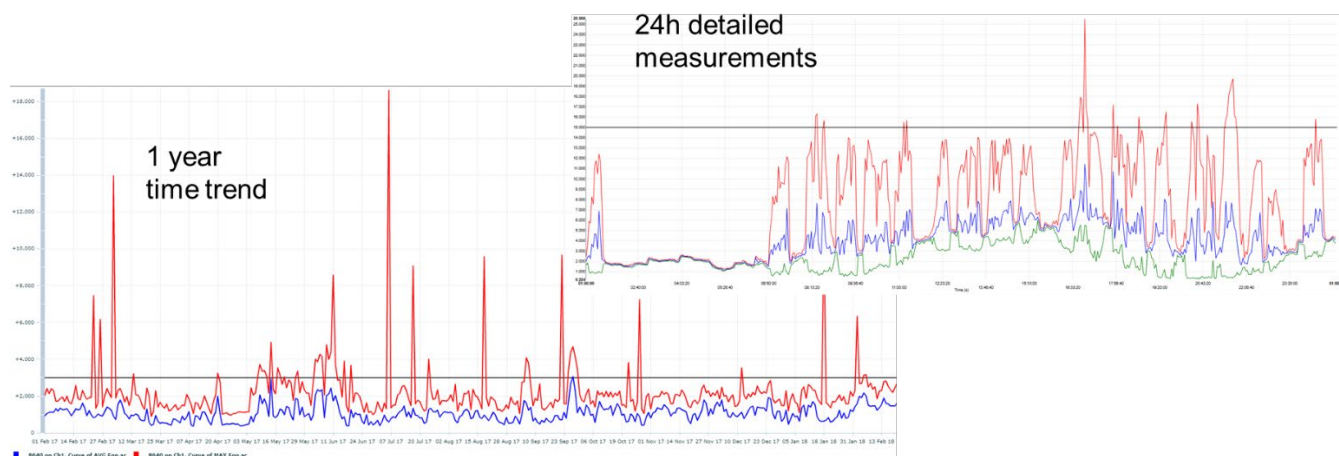


Figura 5: Monitorización de voltaje de CA, tanto en un intervalo de 24 horas como en un periodo de 1 año.

El monitoreo de densidades de corriente tanto DC como CA en coupons de polarización permite la evaluación continua del riesgo de corrosión y cumplimiento con criterios establecidos de interferencia CA. El sistema aplica automáticamente valores de umbral apropiados basados en estándares internacionales reconocidos incluyendo requisitos de ISO 18086 y SP21424, proporcionando

notificación inmediata cuando los valores medidos exceden límites aceptables y requieren acción correctiva. Los siguientes criterios deben respetarse:

- $-1,2V \text{ CSE} < \text{Potencial de instant-off de coupon} < -0,850V$ (según ISO 15589-1 y SP0169)
- Voltaje CA promedio diario $< 15 \text{ Vca}$ (según ISO 18086 y SP0177)
- Jca promedio diario $< 30 \text{ A/m}^2$ (o Jca $< 100 \text{ A/m}^2$ si Jdc promedio diario $< 1 \text{ A/m}^2$) (según ISO 18086 y SP21424).

Conclusiones

La integración de adquisición de datos de alta frecuencia con tecnología de Edge-Computing representa un avance transformador en las capacidades de monitoreo de protección catódica, abordando exitosamente las limitaciones históricas que han restringido la optimización y efectividad del sistema. Esta evolución tecnológica demuestra cómo el procesamiento local inteligente puede resolver el dilema tradicional entre monitoreo remoto continuo y capacidad analítica detallada, proporcionando vigilancia exhaustiva y perspectiva analítica profunda dentro de una única solución integrada.

La arquitectura de Unidad Registradora de Datos Remota ejemplifica cómo la Edge-Computing puede transformar volúmenes masivos de datos de medición de alta frecuencia en inteligencia concisa y accionable mientras simultáneamente optimiza requisitos de comunicación y consumo de energía. Esta capacidad resulta particularmente valiosa en instalaciones remotas donde las limitaciones de ancho de banda de comunicación y restricciones de energía han restringido históricamente las capacidades de monitoreo, permitiendo el despliegue de monitoreo analítico sofisticado en ubicaciones previamente desafiantes.

Las capacidades integrales de equipos de monitoreo permiten la detección temprana de fallas en componentes críticos de protección catódica mediante análisis inteligente de múltiples parámetros correlacionados, proporcionando ventajas significativas sobre los enfoques tradicionales de alarmas basadas en umbrales. La capacidad de reconocer patrones característicos de falla y predecir problemas en desarrollo permite la transición desde enfoques de mantenimiento reactivo hacia estrategias de intervención proactiva que previenen fallas y optimizan el rendimiento del ciclo de vida del sistema.

La evaluación avanzada de efectividad de protección catódica mediante mediciones continuas de instant-off y análisis sofisticado de interferencias proporciona perspectiva sin precedentes sobre el rendimiento del sistema y el cumplimiento con criterios de protección. La capacidad de capturar y analizar efectos transitorios permite la detección de patrones de interferencia e interacciones del sistema que permanecen invisibles para los enfoques tradicionales de monitoreo periódico, soportando optimización del sistema y resolución de problemas más efectiva.

La implementación de estas soluciones avanzadas de monitoreo contribuye a mejorar la confiabilidad del sistema, reducir costos de mantenimiento, mejorar la seguridad operacional y gestionar más efectivamente el cumplimiento normativo. A medida que los sistemas de protección catódica continúan aumentando en complejidad y los requisitos normativos evolucionan hacia estándares más estrictos, estas capacidades avanzadas de monitoreo se convertirán en herramientas esenciales para la gestión y optimización efectiva del sistema.

La evolución futura del monitoreo de protección catódica reside en la integración continua de tecnologías avanzadas de adquisición de datos, capacidades sofisticadas de Edge-Computing y sistemas inteligentes de análisis predictivo. Esta progresión tecnológica permitirá enfoques de mantenimiento predictivo aún más sofisticados, estrategias automatizadas de optimización del sistema y coordinación inteligente entre múltiples sistemas de protección, mejorando aún más la confiabilidad, eficiencia y costo-efectividad de la protección de infraestructura crítica de ductos.