

INNOVACIÓN APLICADO AL MANTENIMIENTO: TECNOLOGÍAS DE MONITOREO, ANÁLISIS DE DATOS Y TOMA DE DECISIONES EN ACTIVOS DE SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

Autor: Mauricio Hernández Ossa
Calle 12 Sur No. 18 - 168., (4) 3157590
E. Mail: mahernandez@intercolombia.com
Medellín – Colombia

Coautor: Germán Antonio Cárdenas Gómez
Calle 12 Sur No. 18 - 168., (4) 3157590
E. Mail: gacardenas @intercolombia.com
Medellín – Colombia

Resumen

La subestación BACATÁ es un ejemplo innovador en el uso de tecnologías para la gestión de activos críticos. Este trabajo destaca cómo la implementación de sensores en los bancos de baterías permite el monitoreo en tiempo real de variables principales como voltaje, corriente y temperatura. La segmentación de la red, junto con el estándar IEC 61850, facilita la integración de datos al SCADA y al software histórico, optimizando la toma de decisiones en el mantenimiento. Estos avances han permitido proyectar la renovación de los activos en 2023, demostrando cómo la transformación digital mejora la eficiencia, la confiabilidad y la vida útil de activos como los bancos de baterías.

1. Introducción

En el contexto actual de modernización del sector eléctrico, la gestión eficiente de activos críticos se ha convertido en un desafío importante para garantizar la continuidad del servicio y la optimización de recursos. Las subestaciones eléctricas desempeñan un papel significativo en la red de transmisión, y los bancos de baterías, como componentes fundamentales de los sistemas de respaldo, requieren un enfoque de mantenimiento que combine tecnología avanzada y metodologías

proactivas que combinen la información con la toma de decisión.

El presente trabajo presenta y analiza el impacto de la transformación digital en la subestación BACATÁ mediante la implementación de sensores, la segmentación de redes y el estándar IEC 61850. Este enfoque permite monitorear en tiempo real variables críticas de los bancos de baterías, integrar información al sistema SCADA e HISTORICO y generar alarmas y eventos que permiten la toma de decisiones en el mantenimiento. La combinación de tecnologías aplicadas y el análisis de datos promueve una gestión más eficiente y confiable, aumentando la vida útil de los activos y mejorando la seguridad operativa.

Esta implementación en la subestación BACATÁ da muestra de cómo estas innovaciones tecnológicas han transformado la manera en que se planifican y ejecutan las actividades de mantenimiento. A través de la integración de sensores en los bancos de baterías, se ha logrado monitorear continuamente variables como voltaje, corriente y temperatura, proporcionando datos en tiempo real para tomar decisiones informadas. Además, la segmentación de la red y el uso del estándar IEC 61850 garantizan la disponibilidad

de información crítica sin comprometer la operación principal de la subestación.

En este documento se presentan los resultados de estas implementaciones tecnológicas, incluyendo la proyección de renovación de los bancos de baterías para 2023-2024 y los beneficios observados en la eficiencia y confiabilidad del mantenimiento. Finalmente, se destacan las lecciones aprendidas y las futuras aplicaciones de estas tecnologías emergentes en el mantenimiento de infraestructuras eléctricas.

2. Tecnologías de Monitoreo en Bancos de Baterías

La transformación digital en el sector eléctrico ha impulsado el desarrollo de tecnologías para el monitoreo de activos críticos como los bancos de baterías que permitan una supervisión constante de las variables, lo que garantiza un funcionamiento seguro, eficiente y con una vida útil optimizada. En este contexto, los sensores y las soluciones de monitoreo en tiempo real desempeñan un papel fundamental para detectar anomalías, prevenir fallas y optimizar el mantenimiento.

2.1. Sensores aplicados al monitoreo de variables críticas

La implementación de sensores para el monitoreo de variables críticas, en conjunto con el estándar IEC 61850, cambia las metodologías tradicionales de mantenimiento en las subestaciones eléctricas. Este desarrollo incorpora sensores instalados en los polos positivos y negativos de cada monobloque de batería, configurados para formar una solución interconectada.

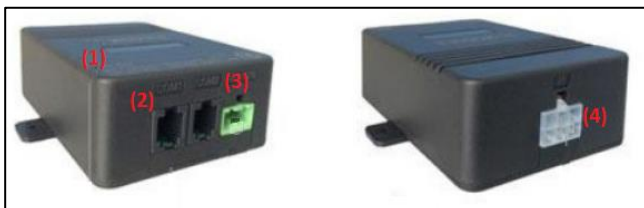


Fig. 1. Sensor usado en cada monobloque

Donde:

1. Indicador de Estado LED:
2. Puertos de Comunicación (COM1/COM2) que permiten la interconexión entre módulos.
3. Entrada de Alimentación
4. Conexión directa hacia los terminales de alimentación del banco de baterías.

Estos sensores utilizan el protocolo MODBUS TCP para recopilar mediciones de variables, como la corriente, y trabajan en conjunto con un gateway de conversión de protocolos. Este gateway transforma los datos obtenidos en MODBUS al estándar IEC 61850, permitiendo su integración eficiente en las redes redundantes PRP (Parallel Redundancy Protocol) de la subestación. Además, el sistema organiza una VLAN dedicada al monitoreo, utilizando switches gestionables operativos que garantizan una transmisión de datos segura, confiable y optimizada para la supervisión en tiempo real. Esta solución no solo mejora la capacidad de análisis y respuesta, sino que también sienta las bases para un mantenimiento basado en condición más preciso y eficiente.



Fig. 2. Sensor de corriente usado en la solución por banco de baterías.

2.2. Monitoreo en tiempo real: voltaje, corriente y temperatura

El monitoreo en tiempo real de las variables más importantes para el sistema de baterías como son

el voltaje, corriente y temperatura proporciona datos relevantes para la toma de decisiones informadas en la gestión de bancos de baterías. Por ejemplo, detectar caídas de voltaje permite anticipar problemas de descarga profunda, mientras que la medición de corriente ayuda a identificar desequilibrios en la carga. El monitoreo de temperatura previene el sobrecalentamiento, mitigando riesgos de deterioro acelerado. Estos casos de uso son clave para optimizar los ciclos de mantenimiento, programar renovaciones de componentes y garantizar la estabilidad operativa.



Fig. 3. instalación de sensores en serie.

3. Optimización de la Planeación y Programación de Mantenimiento.

3.1. Recolección de datos y análisis histórico

La implementación de sensores en los bancos de baterías permite una recolección continua de datos críticos, como voltaje, corriente y temperatura, a través de una red interconectada mediante el protocolo Modbus. Esta información es convertida al estándar IEC 61850, garantizando compatibilidad con los sistemas de supervisión de las subestaciones eléctricas. Los datos recopilados se integran al SCADA y posteriormente al software HISTÓRICO, donde se generan análisis detallados, tendencias y alertas. Este enfoque asegura que los ingenieros de operación cuenten con herramientas para tomar decisiones oportunas,

anticipar fallas y mejorar la eficiencia operativa al basarse en patrones históricos y comportamientos de las variables monitoreadas.

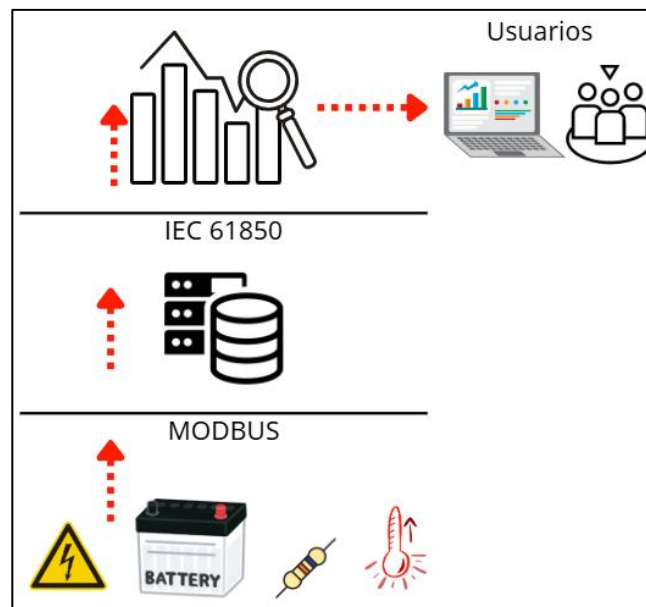


Fig. 4. Esquemático de la topología.

3.2. Planificación basada en datos en tiempo real

El acceso a datos en tiempo real puede transformar la planificación y programación del mantenimiento. Las tendencias observadas a través del monitoreo permiten programar actividades de mantenimiento basadas en la condición actual de los activos, en lugar de depender únicamente de calendarios predefinidos. Esto puede reducir la frecuencia de intervenciones y optimiza recursos. La interfaz del sistema de monitoreo permite a los usuarios gestionar y visualizar datos fácilmente, promoviendo la autonomía en la configuración y el manejo de información. Además, la integración de alertas automáticas facilita la priorización de tareas críticas y mejora la respuesta ante señales de deterioro, garantizando un enfoque proactivo y eficiente.

3.3. Impacto en la toma de decisiones estratégicas

La capacidad de realizar análisis avanzados sobre las medidas de los bancos impacta directamente en la toma de decisiones estratégicas. A partir de los datos recopilados, se pueden aplicar modelos matemáticos y alertas para detectar anomalías, generar indicadores y predecir comportamientos. Esto permite priorizar actividades de mantenimiento basado en condición, identificar patrones de consumo o desgaste y optimizar la gestión de activos. La digitalización de la infraestructura, junto con herramientas de análisis, facilita la evaluación del estado de los activos, su renovación y la planificación estratégica. Estas capacidades aseguran decisiones más informadas, como lo fue el caso de éxito en la S/E BACATA en donde se renovaron 8 bancos de baterías, con la información del monitoreo, como lo presenta la información entregada por la interfaz de monitoreo, tanto por medio del software HISTÓRICO como por medio de alertas configuradas que llegan a los especialistas del tema al correo electrónico, indicando el activo con la anomalía presentada.



Fig. 5. Interfaz de información del software HISTÓRICO.

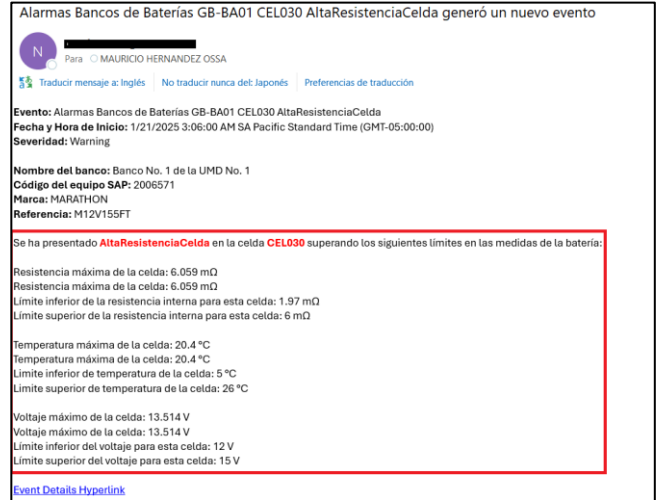


Fig. 6. Alerta enviada vía correo electrónica.

4. Segmentación de Redes y Estándar IEC 61850

4.1. Segmentación de la red para optimizar la gestión de datos

La segmentación de redes en Tecnologías de la Operación (OT) es una estrategia importante para garantizar una gestión eficiente y segura de los datos en sistemas críticos como los de las subestaciones eléctricas. En este contexto, se pueden aplicar metodologías de segmentación basadas en "pooling", lo que permite agrupar dispositivos y definir intervalos de interrogación específicos para evitar la sobrecarga del sistema. Esta técnica, combinada con tiempos de muestreo adecuados, asegura que los datos de los sensores lleguen a los sistemas de supervisión y control sin saturar la capacidad de la red. Asimismo, la segmentación mejora la seguridad, ya que separa segmentos de red críticos de los menos sensibles, reduciendo riesgos de ciberataques y fallos de comunicación.

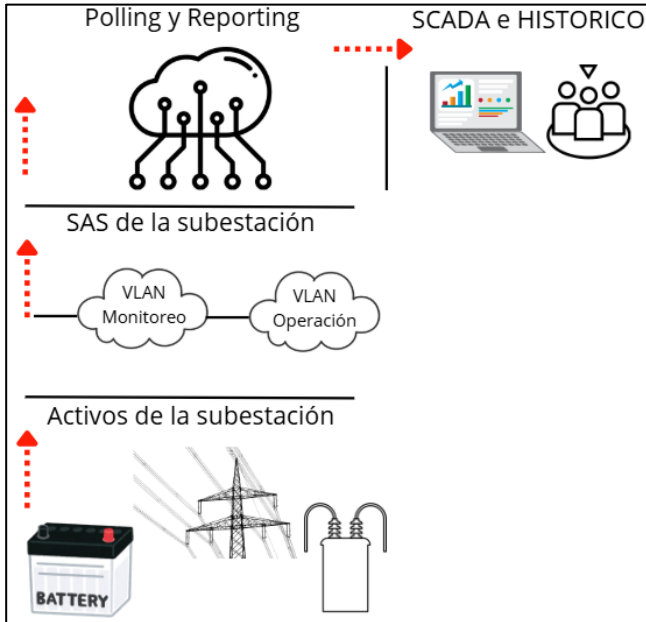


Fig. 7. Bosquejo de segmentación.

4.2. Uso del estándar IEC 61850 en la subestación BACATÁ

El estándar IEC 61850 es ampliamente reconocido como la base para la automatización y comunicación en subestaciones eléctricas. Este estándar facilita la interoperabilidad entre dispositivos de diferentes fabricantes al definir estructuras de datos estandarizadas y nodos lógicos que permiten identificar y procesar información de forma coherente. En la subestación BACATÁ, la implementación de IEC 61850 incluyó nodos lógicos estándar para variables críticas, como los bancos de baterías, garantizando la uniformidad en la comunicación y la integración con otros sistemas.

Por ejemplo, para el monitoreo de los bancos de baterías, se utilizó el nodo lógico de medidas MMXU (Measurement Unit).

4.3. Integración con SCADA y software histórico

La arquitectura de integración en la subestación BACATÁ comienza con la recopilación de datos

de los sensores, los cuales son procesados a través del estándar IEC 61850 y enviados al sistema SCADA. Desde este punto, los datos se integran al software histórico, utilizando soluciones avanzadas como PI System. Este sistema permite recopilar, limpiar, almacenar y enriquecer datos operativos en tiempo real, asegurando conformidad total con los estándares de TI. PI System ofrece una plataforma robusta que habilita análisis profundos, generación de tendencias y visualización de datos, proporcionando información crítica para la optimización operativa. Los operadores, gerentes y analistas pueden usar esta información para mejorar la eficiencia, fortalecer la resiliencia del sistema y promover la sostenibilidad de las operaciones.

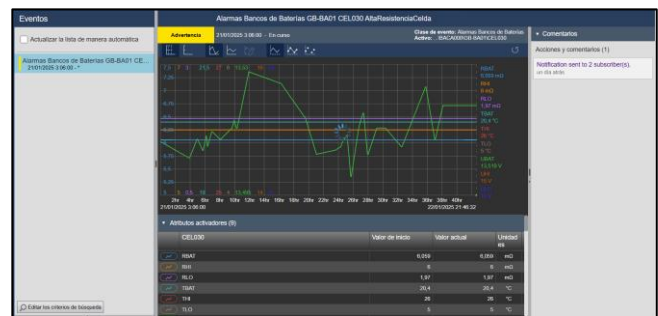


Fig. 8. Interfaz gráfica de información histórica.

5. Automatización y Alertas en el Mantenimiento

5.1. Configuración de alertas automáticas

La implementación de sensores y sistemas de monitoreo en tiempo real ha permitido configurar alertas automáticas personalizadas en la subestación BACATÁ. Estas alertas son programadas para activarse cuando las variables críticas, como voltaje, corriente y temperatura, exceden los rangos definidos o muestran tendencias inusuales. La configuración de estas alarmas utiliza límites dinámicos basados en análisis históricos, garantizando una mayor precisión y reduciendo las falsas alarmas. Además,

el uso del estándar IEC 61850 asegura que las alertas se transmitan de forma rápida y eficiente al sistema SCADA y al software histórico, facilitando la intervención oportuna por parte del personal especializado.

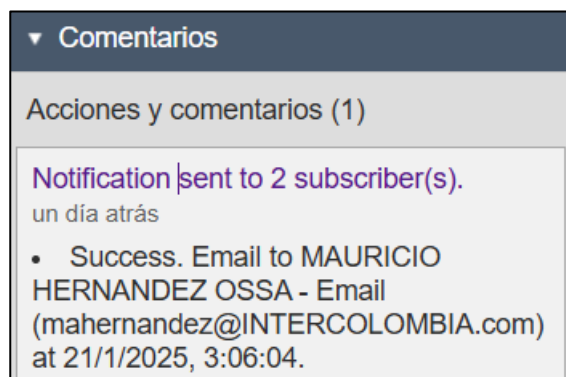


Fig. 9. confirmación de Notificaciones a usuarios.

5.2. Notificaciones proactivas para especialistas

Las notificaciones proactivas representan un cambio significativo en la gestión del mantenimiento, permitiendo que los especialistas reciban alertas tempranas antes de que ocurra una falla crítica. Estas notificaciones incluyen detalles específicos sobre el estado del activo, patrones de comportamiento anómalo y posibles recomendaciones de acción. A través de plataformas móviles y sistemas integrados, los ingenieros de mantenimiento reciben alertas directamente en sus dispositivos, lo que mejora la capacidad de respuesta. Esta proactividad no solo optimiza la planificación del mantenimiento, sino que también reduce el riesgo de interrupciones en el sistema y aumenta la vida útil de los activos.



Fig. 10. Notificaciones oportunas al usuario.

6. Resultados Tangibles de la Implementación Tecnológica

6.1. Proyección de renovación de bancos de baterías

Gracias al monitoreo en tiempo real y al análisis basado en datos, se ha logrado proyectar con mayor precisión la renovación de bancos de baterías en la subestación BACATÁ. Las señales de pérdida de autonomía, identificadas por las tendencias de las variables críticas, han permitido determinar el momento óptimo para el reemplazo de los activos, evitando tanto renovaciones prematuras como fallas catastróficas. Este enfoque ha reducido los costos asociados al reemplazo innecesario y mejorado la confiabilidad del sistema de respaldo.

6.2. Beneficios en la eficiencia y confiabilidad del mantenimiento

La implementación de sensores y herramientas de análisis ha generado mejoras significativas en la eficiencia del mantenimiento. Los tiempos de respuesta ante fallas se han reducido debido a la detección temprana de anomalías, y la planificación basada en la condición de los activos ha permitido priorizar intervenciones de mayor relevancia. Esto se traduce en una mayor disponibilidad operativa de los sistemas críticos y una optimización de los recursos humanos y financieros dedicados al mantenimiento.

6.3. Casos de éxito y lecciones aprendidas

Entre los casos de éxito destaca la identificación temprana de anomalías en bancos de baterías que, de no haber sido detectadas, habrían resultado en fallas significativas del sistema. Además, la segmentación de la red y el uso del estándar IEC 61850 han demostrado ser esenciales para

garantizar la integridad de los datos y la interoperabilidad entre sistemas. Entre las lecciones aprendidas, se resalta la importancia de capacitar al personal en el uso de estas tecnologías y de realizar ajustes continuos en los parámetros de monitoreo para adaptarse a las condiciones cambiantes del entorno operativo.

7. Conclusiones

7.1. Impacto de las tecnologías en la transformación digital del mantenimiento

La transformación digital ha redefinido la manera en que se gestionan los activos una muestra es lo expuesto en este documento, convirtiendo el mantenimiento en un proceso proactivo basado en datos. La integración de sensores, segmentación de redes y uso del estándar IEC 61850 ha demostrado cómo la tecnología puede mejorar la confiabilidad, la eficiencia y la seguridad de los sistemas eléctricos.

7.2. Mejoras en la toma de decisiones a largo plazo

El análisis continuo de datos históricos y en tiempo real ha mejorado la calidad de las decisiones en el mantenimiento. Los responsables ahora pueden prever con mayor precisión los ciclos de vida de los activos, optimizar los recursos y priorizar inversiones de manera informada. Esta orientación basada en datos ha reducido los costos operativos y mejorado la sostenibilidad de las operaciones.

7.3. Futuras aplicaciones de tecnologías emergentes en subestaciones

El éxito de la implementación abre la puerta a tecnologías emergentes como la inteligencia artificial, la analítica avanzada y el aprendizaje automático en subestaciones. Estas tecnologías tienen el potencial de automatizar aún más los

procesos, mejorar la detección de anomalías y optimizar la gestión de activos. Además, la integración con tecnologías como IoT y la ciberseguridad reforzada garantizarán que las operaciones sean resilientes y estén preparadas para los desafíos del futuro.

Bibliografía

- [1] M.R. Barrionuevo Portero y M.H. Pambi Sinchi, Diseño e implementación de un banco semiautomático de monitoreo de voltaje y control de temperatura para baterías níquel-cadmio. Tesis de grado, 2024.
- [2] N. Chimborazo, M. Agila, K. Noquez y M. Silva, "Monitoreo en tiempo real del funcionamiento y fallas de un sistema automático de paneles solares", Revista Odigos, vol. 5, no. 3, pp. 81-96, 2024.
- [3] D.Y. Bautista-Vivanco, L.N. Oliva-Moreno y I. Ilizaliturri-Flores, "Monitoreo remoto de variables ambientales a larga distancia con sistemas embebidos", Pádi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI, vol. 12, pp. 40-48, 2024.
- [4] J. Alcalá-Rodríguez, J. Gudiño-Lau, S. Charre-Ibarra, J.A. Ruíz-Vanoye y A.F.P. Fuentes-Penna, "Sistema de Monitoreo para un cargador de baterías", XIKUA Boletín Científico de la Escuela Superior de Tlahuelilpan, vol. 6, no. 11, 2018.

Hojas de Vida

Germán Antonio Cárdenas Gómez

Mauricio Hernández Ossa

- Licenciado en Electrónica - Universidad Pedagógica Nacional. 2009.
- Ingeniero Electrónico - Universidad Central, Bogotá. 2015.
- Especialista en Informática y Automática Industrial - Universidad Distrital Francisco José de Caldas. 2011.
- Magister en ingeniería administrativa – Universidad Nacional de Colombia. 2022.
- Cargo actual: Analista Gestión Equipo protecciones, Dirección Mantenimiento, ISA INTERCOLOMBIA S.A. E.S.P. - Colombia.
- Teléfonos: Residencia: (4) 5816367, Oficina: (4) 3157972 y Celular: 3204181858
- Dirección: Residencia: Calle 16 A Sur No. 29B20, Oficina: Calle 12 Sur No. 18 – 168, E. mail: mahernandez@INTERCOLOMBIA.com, Ciudad: Medellín, País: Colombia.

- Ingeniero de Sistemas - Universidad de Antioquia. 1993.
- Ingeniero Electricista - Universidad Nacional de Colombia, Seccional Medellín. 1997.
- Magister en Gestión de Tecnología - Universidad Pontificia Bolivariana. 2007.
- Cargo actual: Analista Tecnologías de la Operación, Dirección Tecnologías de la operación, ISA INTERCOLOMBIA S.A. E.S.P. - Colombia.
- Teléfonos: Residencia: (4) 5816367, Oficina: (4) 3157590 y Celular: 3226545571
- Dirección: Residencia: Calle 16 A Sur No. 29B20, Oficina: Calle 12 Sur No. 18 – 168, E. mail: gacardenas@intercolombia.com, Ciudad: Medellín, País: Colombia.