

Modelo de monitoreo y gestión en tiempo real de la condición de salud de sistemas SCADA/EMS de centros de control

Model for real-time health condition monitoring and management of SCADA/EMS systems of power control centers

Jaime Dwaigh Pinzón Casallas ¹ y Alexandra Valencia Castaño²

Fecha de Recepción: 28 de febrero de 2023

Fecha de Aceptación: 19 de agosto de 2025

Cómo citar: Pinzón Casallas., J.D. y Valencia Castaño., A. (2025). Modelo de monitoreo y gestión en tiempo real de la condición de salud de sistemas SCADA/EMS de centros de control. *Tecnura*, 29(85), 12-33. <https://doi.org/10.14483/22487638.20557>

Resumen

Objetivo: desarrollar un modelo de monitoreo y procesamiento de datos en tiempo real, orientado a la gestión temprana de alertas sobre el estado de salud de los sistemas SCADA/EMS implementados en centros de control de redes de transmisión de energía, atendiendo sus exigencias de alta disponibilidad.

Metodología: se presenta una metodología compuesta por dos modelos complementarios: uno, para el monitoreo y procesamiento de datos en tiempo real de la infraestructura y funciones críticas de *software*, estructurado en tres capas (obtención de datos, procesamiento y aplicaciones); y otro, para la gestión de acciones correctivas y preventivas, activadas por las alertas generadas en tiempo real, que permiten una respuesta oportuna ante eventos que comprometan la disponibilidad del sistema.

Resultados: el modelo de monitoreo y gestión se implementó en cuatro centros de control ubicados en Colombia y Perú. Durante la integración, se configuraron más de 1600 señales para monitorear variables críticas y se desarrollaron más de doscientos cálculos en tiempo real. Esta implementación redujo los tiempos de diagnóstico de fallas de quince minutos a menos de un minuto, mejoró la supervisión de procesos y optimizó el uso de recursos como CPU, memoria y almacenamiento.

Conclusiones: las alertas tempranas generadas por el modelo han contribuido al aumento de la disponibilidad operativa, la reducción de tiempos de diagnóstico ante fallas y mejoramiento de la gestión preventiva de los activos de la infraestructura y *software* crítico en sistemas SCADA/EMS.

Palabras clave: sistemas de tiempo real, sistemas de potencia, centros de control, SCADA, monitoreo en tiempo real.

¹Posdoctorado en Ingeniería, doctor en Ingeniería Eléctrica, especialista en Eficiencia Energética, ingeniero eléctrico. Especialista Operaciones Corporativas en ISA Interconexión Eléctrica S. A. E. S. P., Medellín, Colombia. Email: jpinzon@isa.com.co

²Especialista en Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica, ingeniera electricista. Analista Tecnologías de Operación en ISA Intercolombia S. A. E. S. P. Medellín. Email: avalenciac@intercolombia.com

Abstract

Objective: To develop a real-time monitoring and data processing model aimed at the early management of alerts regarding the health status of SCADA/EMS systems implemented in energy transmission network control centers, addressing their high availability requirements.

Methodology: A methodology is presented comprising two complementary models: one for real-time monitoring and data processing of infrastructure and critical software functions, structured in three layers (data acquisition, processing, and applications); and another for managing corrective and preventive actions triggered by real-time alerts, enabling timely responses to events that compromise system availability.

Results: The monitoring and management model was implemented in four control centers located in Colombia and Peru. During integration, over 1,600 signals were configured to monitor critical variables, and more than 200 real-time calculations were developed. This implementation reduced fault diagnosis times from 15 minutes to less than 1 minute, improved process supervision, and optimized the use of resources such as CPU, memory, and storage.

Conclusions: The early alerts generated by the model have contributed to increased operational availability, reduced fault diagnosis times, and improved preventive management of infrastructure and critical software assets in SCADA/EMS systems.

Keywords: real-time systems, power systems, control centers, real-time monitoring, SCADA.

Introduction

Los sistemas de transmisión de energía eléctrica son operados en centros de control (CC), donde se emplean herramientas de *software* y *hardware* para supervisar el funcionamiento de la red. Estas herramientas están integradas en dos sistemas principales: el de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA, por su sigla en inglés), encargado de administrar en tiempo real la información intercambiada con las subestaciones; y el de gestión de energía (EMS, por su sigla en inglés), que incluye un conjunto de aplicaciones para el análisis del funcionamiento de la red (1,2).

Actualmente, la operación en tiempo real se vuelve cada vez más crítica, debido a la expansión constante de la infraestructura eléctrica, lo cual aumenta el número de equipos involucrados en garantizar la supervisión (3). En este contexto, mantener una alta disponibilidad de los SCADA/EMS se convierte en un requisito indispensable para garantizar la seguridad operativa de los centros de control de transmisión (4,5).

Si bien el diseño de equipos para cada una de las aplicaciones de un CC con un SCADA/EMS es muy riguroso, existen diferentes problemas que afectan la cadena de supervisión, como fallas en procesos críticos y de equipos remotos, limitaciones en almacenamiento, problemas de red, y errores en módulos de *software*. Estas fallas reducen el seguimiento y controlabilidad de los activos que componen una red eléctrica, comprometiendo la seguridad de la operación (6).

Ante esta problemática, en este artículo se propone un modelo de monitoreo en tiempo real y gestión del estado de salud de la infraestructura SCADA/EMS de CC que supervisan y controlan redes de transmisión. El modelo contempla el monitoreo de los equipos que componen el SCADA del CC, y funciones críticas de la plataforma. El monitoreo de hardware verifica el estado y el rendimiento de los equipos. Toda esta información, tanto de los dispositivos como de la plataforma SCADA, se procesa para generar alertas. Estas se manifiestan como alarmas sonoras, cambios en los gráficos de supervisión y mensajes de correo electrónico; esto permite el diagnóstico y gestión oportuna de los cambios de equipos del sistema por eventos y fallas.

Las principales contribuciones de este artículo son:

- Un esquema de monitoreo de *hardware* y *software* de SCADA de CC, utilizando protocolo SNMP y consultas a las bases de datos de tiempo real.
- Un enfoque de procesamiento de datos sobre las plataformas basado en cálculos en tiempo real, generación de alarmas unificadas y tendencias de señales.
- Un modelo de aplicaciones para el monitoreo y supervisión del comportamiento en tiempo real de la infraestructura de CC.
- Un modelo de gestión basado en el estado de salud del SCADA/EMS.

El artículo está organizado de la siguiente manera. En “Arquitectura de SCADA/EMS” se describe la cadena de supervisión y la infraestructura que compone un sistema SCADA/EMS. A continuación, se presenta el modelo de monitoreo y gestión. Por último, se muestran los resultados de la implementación del modelo en cuatro CC del sistema de transmisión de energía que operan redes eléctricas de hasta 500 kV. Por último, se presentan las conclusiones.

Arquitectura de SCADA/EMS

Cadena de supervisión y control

Los sistemas de tiempo real para la operación de sistemas de transmisión de energía eléctrica se basan en SCADA, con los cuales se recopilan los datos del comportamiento de los equipos en las subestaciones y se envían a los CC.

En la cadena de supervisión (figura 1) las medidas de los activos del sistema eléctrico ubicados en el patio de subestación (nivel 0) son recopiladas a través de transformadores de instrumentos y enviados a los IED (nivel 1). Cada IED de la subestación envía los datos al equipo terminal remoto (nivel 2). Los equipos remotos RTU y SAS son los equipos que reciben y envían



Figura 1. Cadena de supervisión de activos del sistema de potencia

Fuente: Autores.

todas las señales, en un protocolo de comunicaciones IEC-60870-5-101 (serial) e IEC-60870-6-104 (IP) al CC regional (nivel 3 de supervisión), a cargo de la operación y control remoto de los equipos de todas las subestaciones a su cargo. Desde nivel 3 se envían los datos de la operación en tiempo real a otros CC, incluyendo el CC nacional, por medio del protocolo de comunicación entre CC TASE.2/ICCP-IEC 60870-6.

Infraestructura de un centro de control

La infraestructura de los SCADA/EMS de CC requiere una disponibilidad del 99,9% que normalmente se alcanza mediante redundancia de equipos locales, equipos en CC de respaldo, equipos remotos y redundancia de sistemas de comunicación (7,8). La infraestructura de CC incluye un gran conjunto de equipos como (figura 2).

- Dispositivos de comunicaciones conectados a los equipos en las subestaciones remotas a través de enlaces de comunicación por fibra óptica, PLC, CHF, UHF, entre otras. Equipos de comunicación requeridos en los CC incluyen conmutadores de red, enrutadores y servidores terminales.
- Sistemas de cómputo de alto desempeño que permitan la ejecución de las diferentes funcionalidades del SCADA/EMS; entre ellos, el servidor de recepción de datos FEP, servidor de funciones SCADA, servidor de aplicaciones de red EMS y servidor de comunicación con otros CC - ICCP.
- Infraestructura de seguridad como *firewalls* y servidor de ciberseguridad.

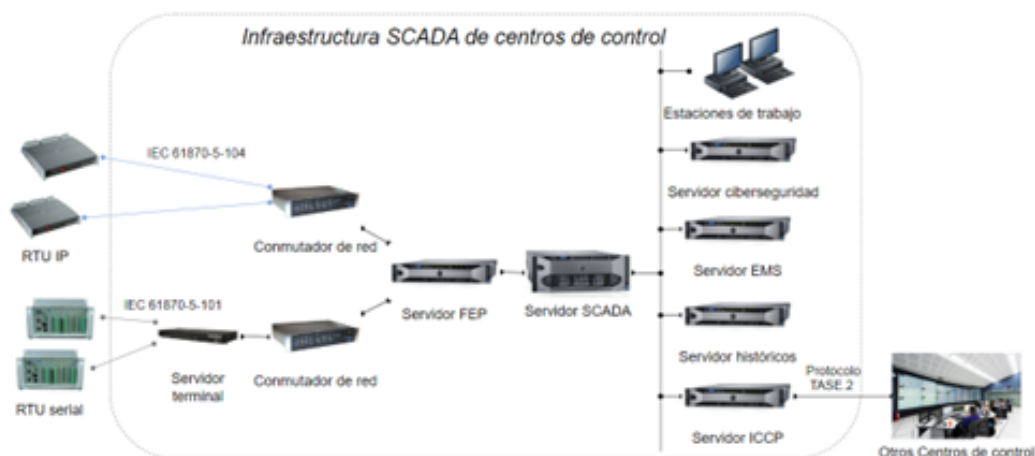


Figura 2. Infraestructura de centros de control

Fuente: Autores.

- Sistemas de cómputo para almacenamiento de largo plazo (servidor de históricos).
- Estaciones de trabajo de operadores y de ingeniería para desarrollos y pruebas.
- Plataforma tecnológica de *software* con las funcionalidades del SCADA/EMS en tiempo real para su acceso por los operadores y equipos de ingeniería.

Revisión de literatura y contribuciones

La literatura internacional ha documentado diversas soluciones para el monitoreo y gestión de infraestructura crítica, principalmente en centros de cómputo. Por ejemplo, (9) proponen una herramienta para el monitoreo de recursos de CPU, memoria y *jobs* de usuarios de un centro de cómputo. En (10), se expone un portal de monitoreo de centros de cómputo incluyendo, monitoreo de *logs* de servidores, aplicaciones y desempeño de sitios web. En (11), se presenta un sistema de monitoreo de una sala de servidores basada en una red RS-485 y una plataforma web; se monitorean las condiciones de la sala como humedad, temperatura, potencia y humo. En (12), se describe un sistema de monitoreo del estado, recursos y disponibilidad de servidores SNMP y la base de datos gestionada (MIB). En (13), muestran un método de mejora del rendimiento de centros de datos basado en el monitoreo y optimización de su consumo de energía. En (14, 15), se proponen métodos de gestión de centros de datos para mejorar la calidad del servicio.

Aunque la literatura evidencia soluciones para el monitoreo de infraestructura crítica en centros de cómputo, hasta el momento no se ha documentado un esquema específico para la supervisión y gestión de la infraestructura SCADA/EMS en centros de control, compuesta por

un gran número de equipos y funciones críticas. Además, se detectó que la tecnología SNMP, aunque es muy reconocida y ampliamente desarrollada, es poco utilizada para dispositivos de red y raramente para la administración de sistemas de cómputo de alto desempeño, como los SCADA.

Ante esta brecha, se detectó la necesidad de realizar un monitoreo continuo y detallado de su funcionamiento y desempeño, el cual debe estar en la capacidad de supervisar los aspectos más relevantes del sistema y de generar alertas tempranas para tomar acciones oportunas de carácter preventivo y correctivo para la mejora de la infraestructura y plataforma.

Este artículo aporta significativamente al desarrollo de un esquema específico para el monitoreo y gestión de la infraestructura SCADA/EMS en CC, superando una importante brecha en la literatura internacional. Se presenta un modelo integrado que permite el monitoreo continuo y detallado del funcionamiento y desempeño de sistemas críticos, así como la generación de alertas tempranas para facilitar la toma de decisiones oportunas. El modelo sobresale por su arquitectura de tres capas que optimiza la adquisición, el procesamiento y la visualización de la información relevante. Además, integra un esquema de gestión que contribuye a determinar y ejecutar acciones directamente sobre el sistema en tiempo real, reforzando la seguridad y la operatividad de los centros de control de manera eficiente y dinámica.

Modelo de monitoreo y gestión

La figura 3 corresponde a un esquema la estructura general del sistema de monitoreo y gestión, propuesto para la infraestructura SCADA/EMS en centros de control. Se observan los principales componentes involucrados, así como el flujo de información entre las distintas capas funcionales del sistema, y la integración de los procesos de supervisión y gestión necesarios para la operación en tiempo real.

El modelo de monitoreo y gestión de la infraestructura y plataforma SCADA/EMS que opera en tiempo real se ilustra en la figura 4. Incluye dos esquemas: uno de monitoreo, para obtener, procesar y visualizar la información del estado de salud de los CC; y otro de gestión, para determinar y ejecutar acciones sobre el sistema de tiempo real.

Modelo de monitoreo en tiempo real

El esquema de monitoreo en tiempo real de CC de sistemas de transmisión propuesto (figura 5) se compone de tres capas: (i) de datos, (ii) de procesamiento y (iii) de aplicaciones. La primera es responsable de la comunicación y transferencia de datos entre la estación de gestión

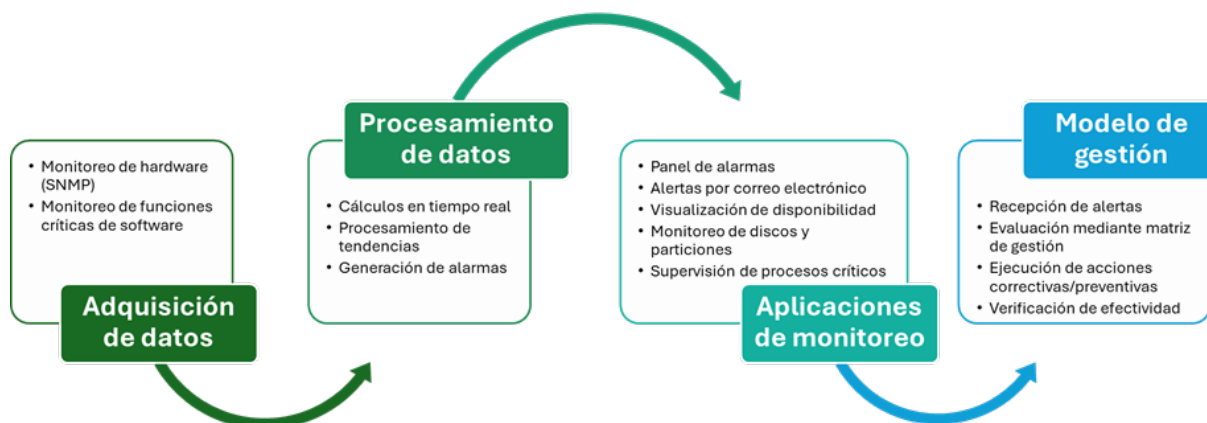


Figura 3. Esquema del modelo integrado de adquisición, procesamiento y gestión de alertas en infraestructura SCADA

Fuente: Autores.

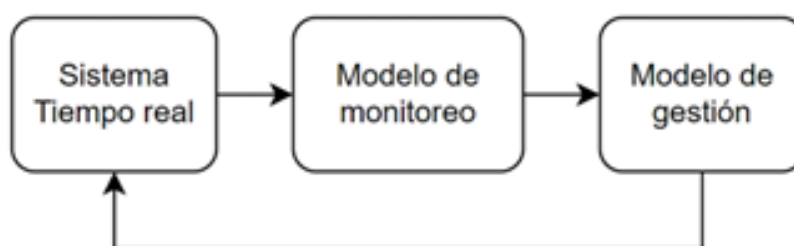


Figura 4. Modelo de monitoreo y gestión

Fuente: Autores.

y el agente de gestión. Los datos son recopilados vía SNMP en el monitoreo de *hardware* y por medio de la consulta en tiempo real de bases de datos relacionales (RDBMS) para el monitoreo de funciones de *software* críticas de la plataforma.

La capa de procesamiento de datos incluye la transformación de datos; cálculos en tiempo real para la extracción de información relevante; procesamiento de alarmas basadas en estados anormales y violación de límites de gestión y de emergencia; procesamiento de tendencias de señales análogas importantes; y almacenamiento en históricos.

Por último, la capa de aplicaciones incluye los módulos de la interfaz de usuario administrador de la plataforma y módulo de alarmas vía correo electrónico. Cada una de las capas se explica en detalle a continuación.

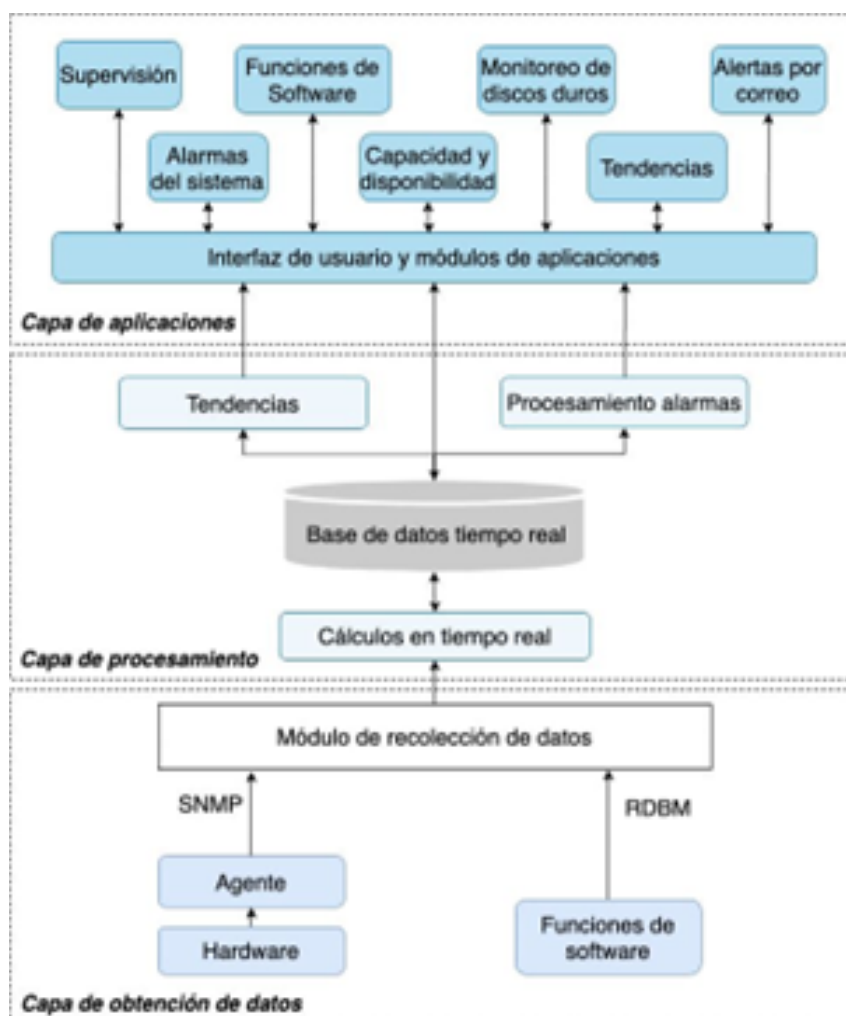


Figura 5. Esquema de monitoreo en tiempo real de SCADA

Fuente: Autores.

Capa de datos

Monitoreo del hardware de infraestructura SCADA

Con el fin de conocer en detalle el estado de salud de los CC y establecer acciones preventivas o correctivas en caso de falla, se monitorea el *hardware* (figura 6) con el protocolo SNMP (16) que incluye los diferentes servidores físicos y virtuales, conmutadores de red, enrutadores, *firewall*, servidores terminales, estaciones de trabajo de operación y de ingeniería. Se monitorean las variables que se indican a continuación:

- *Espacio libre en disco.* Adquisición en tiempo real del espacio libre en las principales particiones de los servidores y estaciones de trabajo del sistema, información a partir de la cual se calcula el porcentaje de ocupación de estas.
- *Disponibilidad.* Monitoreo del estado en línea/fuera de línea, de todos los equipos que integran la red de datos del sistema.
- *Monitoreo de desempeño.* Monitoreo del porcentaje de ocupación de la memoria RAM y del porcentaje del procesamiento en CPU de las estaciones de trabajo y servidores.
- *Monitoreo de procesos.* Supervisión de los procesos y servicios críticos de los servidores de la infraestructura SCADA.



Figura 6. Esquema de monitoreo de hardware

Fuente: Autores.

Monitoreo de funciones críticas del software

El esquema de monitoreo de *software* clasifica funciones de tiempo real y el estado de la supervisión de la red como se muestra a continuación:

- *Estado de almacenamiento en históricos.* El historiador de los SCADA se encarga de archivar datos de tiempo real.

- *Ejecución de funciones de front-end processor (FEP)*. Consiste en un conjunto de aplicaciones encargadas de recibir los datos desde los equipos remotos a través de los requerimientos específicos de *hardware*.
- *Convergencia de aplicaciones de análisis de red (EMS)*. Las herramientas para ejecutar análisis de seguridad, estimación de estados y creación de casos de estudios que son útiles para la operación deben ser verificadas constantemente para solventar de manera expedita cualquier problema que impida su correcta ejecución.
- *Supervisión de la red*. Estados de comunicaciones entre CC (ICCP), de comunicación con equipos RTU/SAS, y de sincronización de centros de control principal y respaldo.

Capa de procesamiento de datos

Cálculos en tiempo real

Algunos de los datos provenientes del monitoreo de *hardware* y *software* requieren ser procesados en conjunto con otras señales, para analizar el estado de los equipos. Los cálculos en tiempo real permiten procesar los datos recolectados a través de algoritmos de cómputo aritméticos, lógicos o una combinación de ambos con el fin de determinar el estado de un equipo, una funcionalidad o la posible falla de su combinación.

Los cálculos embebidos en una plataforma de tiempo real deben ser estrictos en la periodicidad de ejecución y jerarquías, lo cual requiere algoritmos correctamente diseñados.

Tendencias

La dinámica del comportamiento de las señales de monitoreo de la plataforma se visualiza en una aplicación de tendencias, en la cual se definen las señales requeridas para seguir su comportamiento en tiempo real gráficamente, e interactuar con datos previos para determinar cambios de la señal en series de tiempo.

Alarmas

Las alarmas para el procesamiento de datos de la infraestructura SCADA incluyen:

- *Estados anormales de equipos*. Cambios a estados en falla, fuera de línea o apagado de los equipos son procesados para generar una alarma. Estos equipos incluyen: servidores, conmutadores, firewall, servidores terminales, estaciones de trabajo de operación y de ingeniería y máquinas virtuales.

- *Estados anormales de la red.* Cambios de estados de equipos de red, y puertos específicos de equipos conectados a las diferentes redes del sistema SCADA como red SCADA, de recepción de datos, desmilitarizada (DMZ), y red de desarrollo de ingeniería.
- *Estados anormales de procesos críticos.* Si algún proceso crítico monitoreado del sistema cambia su estado se genera una alarma para su gestión inmediata.
- *Estados anormales de funciones de software.* Los cambios en aplicaciones y funciones críticas del SCADA/EMS son monitoreados y, en caso de cambios a estados anormales, se genera una alarma para su gestión.
- *Violación de límites de recursos y capacidad del sistema.* Se configuran diferentes límites en las señales análogas del monitoreo de los recursos del sistema como CPU y RAM, y en señales del monitoreo de capacidad de discos duros.

Capa de aplicaciones

A partir de los datos procesados, se propone en el esquema de monitoreo un conjunto de aplicaciones y herramientas gráficas. Las aplicaciones son:

- *Alarmas del sistema.* Panel de alarmas en tiempo real que muestra los cambios de estado anormales de señales configuradas para el monitoreo de los equipos y señales con límites violados. Este panel tiene interacción de colores y sonidos, de acuerdo con el tipo de señal.
- *Alertas por correo electrónico.* Está funcionalidad permite enviar por correo electrónico, a través del servidor de correos (ubicado normalmente en la red DMZ), los cambios de estado de equipos, procesos y violación de límites.
- *Capacidad y disponibilidad.* Aplicación que presenta la disponibilidad de equipos y capacidad de discos por medio de un panel de visualización condensada de esta información en la que el cambio de estado de cualquier equipo mostrará un cambio de color y parpadeo.
- *Monitoreo de discos.* Aplicación de monitoreo y visualización en tiempo real del valor actual de uso de disco de las particiones críticas de los equipos administrados.
- *Tendencias.* Aplicación para visualización del comportamiento de las variables monitoreadas a través del tiempo, lo cual permite verificar cambios y gestionar acciones preventivas o correctivas, de acuerdo con patrones de comportamiento.
- *Funciones de tiempo real.* Aplicación para monitorear el estado de las funcionalidades críticas de software.
- *Supervisión.* Aplicación para visualización del estado de la supervisión: RTU, canales de comunicación, canales ICCP y áreas compartidas con el CC de respaldo.

Modelo de gestión

El modelo de monitoreo permite obtener información en tiempo real del estado de salud del sistema SCADA, con esta información el equipo de administración debe realizar acciones sobre el sistema de tiempo real de forma oportuna, con el fin de prevenir fallas, mal desempeño de equipos o disminuir la posibilidad de fallas en cadena de procesos o equipos con el deterioro final de la supervisión y control de la red eléctrica.

El diagrama de flujo para la gestión de la condición de salud del sistema SCADA/EMS, a partir del modelo de monitoreo, se ilustra en la figura 7. Con el modelo de gestión se evalúa si estas alertas requieren gestión por parte del equipo de administración de la plataforma, y en caso de requerirse, ejecutar acciones que permitan restablecer al estado normal de operación de los equipos o funcionalidades y detener la propagación de una falla sobre el sistema. Por último, se evalúa si las acciones ejecutadas tuvieron el efecto deseado para restablecer la operatividad del sistema.

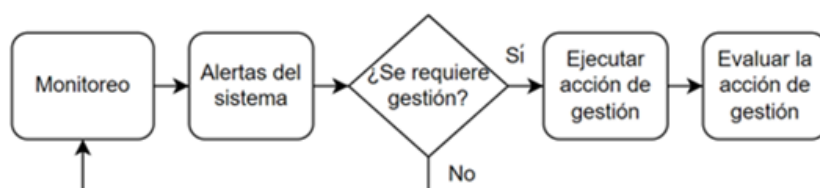


Figura 7. Diagrama de flujo para la gestión del monitoreo

Fuente: Autores.

A partir de una matriz de gestión que se muestra en la tabla 1, se evalúan las alertas del sistema. En la misma tabla se detallan las acciones de gestión que se realizan debido a alertas del sistema mostradas en el panel de alarmas, por correo o cambios en las herramientas de visualización en tiempo real. Luego de ejecutadas las acciones de gestión de forma oportuna, se requiere evaluar el efecto de la acción sobre el sistema real. La evaluación se realiza a través del mismo sistema de monitoreo, en el cual se verifica que las señales hayan vuelto al estado normal de operación y no se tengan alarmas activas del sistema.

Implementación del modelo y resultados

El modelo de monitoreo y gestión se implementó en cuatro CC de sistemas de transmisión que operan y controlan los activos de más de 12 000 km de líneas de transmisión y 105 subestaciones en Colombia; y más de 11 000 km de líneas de transmisión y 77 subestaciones en 21

Tabla 1. Matriz de gestión

Descripción	Monitoreo	Alerta gestión	Acciones de gestión
Gestión de la disponibilidad de equipos.	Señales de estado de equipos.	Cambio a un estado anormal.	<ul style="list-style-type: none"> - Verificar operatividad de los servicios. - Verificar estado del hardware.
Gestión del desempeño de equipos.	Señales de uso de CPU y memoria.	Uso de CPU o memoria igual o mayor a 80 %.	<ul style="list-style-type: none"> - Verificar procesos con alto consumo de recursos. - Detener aplicaciones y procesos no esenciales. - Reiniciar equipo.
Gestión del llenado de particiones.	Señales y cálculos en tiempo real del uso de discos duros.	Uso de disco duro igual o mayor a 80 %.	<ul style="list-style-type: none"> - Evaluar uso cada partición del disco duro. - Evaluar archivos almacenados. - Eliminar o transferir archivos.
Gestión de procesos críticos.	Señales de estados de procesos.	Cambio de estado a proceso en falla.	<ul style="list-style-type: none"> - Reiniciar proceso. - Matar proceso e iniciarlo. - Verificar servicios relacionados al proceso.
Gestión de la supervisión.	Señales y cálculos en tiempo real de estado de la supervisión.	Cambio a un estado anormal.	<ul style="list-style-type: none"> - Verificar operatividad de supervisión (canales de comunicación principal y respaldo, RTU, instancia ICCP o áreas compartidas con sitio de respaldo). - Verificar respuesta de equipos a peticiones desde CC. - Reportar a encargado en sitio (proveedor de canal de comunicación, operador de subestación o CC remoto).
Gestión de funciones de tiempo real	Señales y cálculos en tiempo real de las funciones de software.	Cambio a un estado anormal.	<ul style="list-style-type: none"> - Verificar los servicios y procesos relacionados a la función. - Realizar cambios en configuración y modos de operación.

Fuente: Autores.

regiones de Perú. Estos activos de transmisión a niveles de tensión de 34,5, 66, 110 kV, 138 kV, 220 kV y hasta 500 kV. Debido a la gran cantidad de activos de los sistemas eléctricos que se operan en estos CC, son considerados infraestructura crítica de interés nacional con requerimientos muy altos de disponibilidad.

El esquema se integró en las plataformas de operación de los CC. En la figura 8 se ilustra la cantidad y tipo de equipos de *hardware* monitoreados en cada CC.

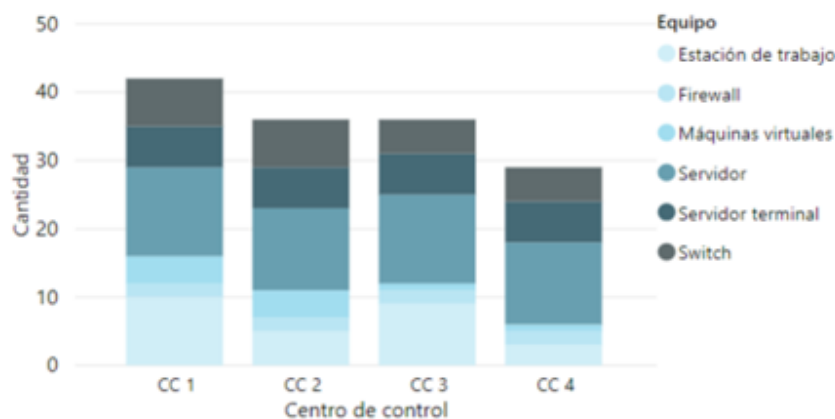


Figura 8. Equipos de *hardware* monitoreados por centro de control

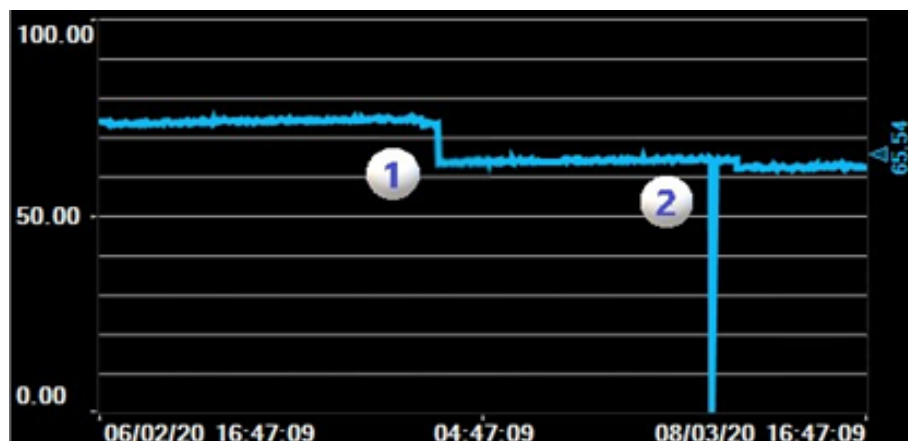
Fuente: Autores.

En la integración se implementaron y configuraron más de 1000 señales análogas y 600 señales digitales para el monitoreo de las variables del sistema, y se desarrollaron más de 200 cálculos en tiempo real con la programación de los algoritmos en lenguaje C para el procesamiento de datos de las señales de monitoreo.

A continuación, se describen los resultados del monitoreo de los equipos y las herramientas visuales implementadas.

Monitoreo en tiempo real de capacidad de discos

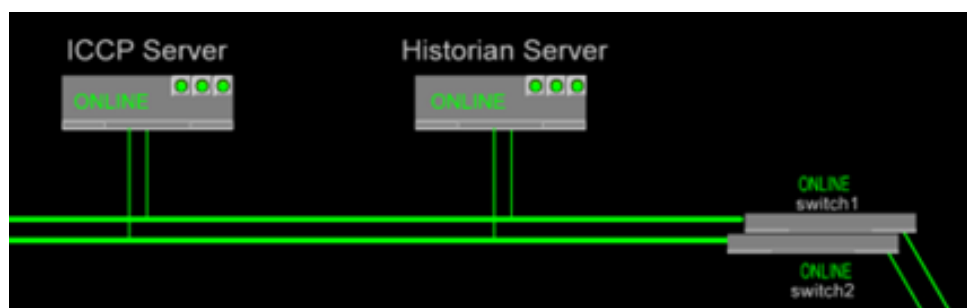
Con la implementación del esquema es posible monitorear en tiempo real el uso de discos para su gestión preventiva, lo cual minimiza el riesgo asociado a problemas de capacidad o malfuncionamiento. Este tipo de situaciones suelen ser muy severas para la infraestructura SCADA, ya que una vez un disco duro falla este necesita ser remplazado o reconstruido y durante estos periodos los operadores estarían un tiempo sin redundancia. En ciertas situaciones, estos eventos pueden resultar en la pérdida de datos o incluso en el mal funcionamiento de un servidor relevante del sistema. La figura 9 indica la tendencia del uso de un disco del servidor EMS durante un mes. Con el monitoreo en tiempo real fue posible detectar la tendencia de llenado de este disco duro, e implementar acciones de gestión en el tiempo (1) para disminuir el uso del disco. Además, por medio del monitoreo en tiempo es posible observar otros comportamientos del servidor como la disminución del valor del uso del disco en el tiempo (2) debido al mantenimiento del CC, en el cual durante ese corto tiempo el servidor estuvo indisponible.



Fuente: Autores.

Monitoreo de disponibilidad de equipos

La supervisión del estado de los equipos se implementó en un esquema por medio de herramientas gráficas que permiten identificar el punto del sistema donde se presenta una falla. En esta herramienta se muestra el estado *online/offline* de los equipos supervisados, la conectividad y, por medio de cambios dinámicos de colores, el estado de las comunicaciones y la visualización temprana de llenados de las particiones de disco mediante los círculos indicativos en cada equipo. Una vez disponibles las variables descritas, se configuró el procesamiento de alarmas para dar indicaciones en el panel de alarmas y también vía correo electrónico para mejorar la efectividad de la alerta. En la figura 10 se observa un ejemplo de cómo se esquematizó el monitoreo de los servidores ICCP y de históricos, y dos conmutadores de red.



Fuente: Autores.

Monitoreo de procesos críticos

Se implementó el monitoreo de procesos críticos de cada servidor en línea y en respaldo. En la figura 11 se ilustra el modelo de cómo se representa el monitoreo en el servidor FEP a cargo de sobrescribir los valores de señales provenientes de equipos remotos sobre las bases de datos SCADA en tiempo real. En la misma figura (a) se registra la visualización en tiempo real con el proceso ejecutándose tanto en el servidor en línea como en el servidor de respaldo; y también, (b) cuando el proceso crítico en el servidor en línea falla. Cuando un proceso cambia de estado, su indicador de vida pasa de verde a rojo y modifica su animación para alertar sobre la falla que puede afectar el rendimiento del servidor y los servicios de la plataforma SCADA/EMS. La incidencia también se registra en el panel de alarmas del sistema y se notifica por correo a los administradores.

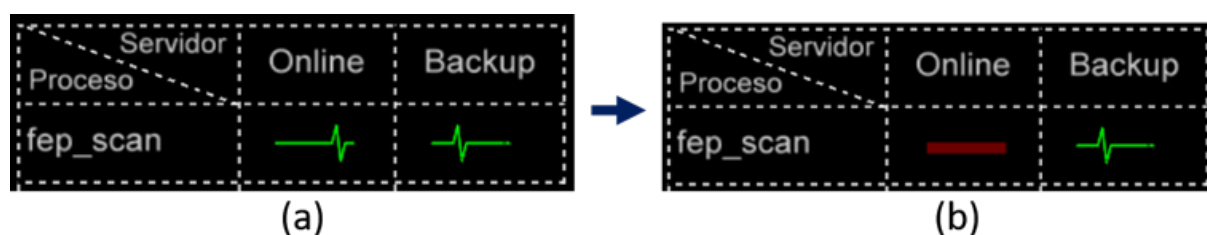


Figura 11. Monitoreo de procesos críticos

Fuente: Autores.

Monitoreo de desempeño de equipos

El desempeño de los equipos es monitoreado a partir del esquema propuesto, con lo cual es posible supervisar el comportamiento de cada uno de los nodos físicos y virtuales del SCADA. Algunas variables monitoreadas de desempeño del sistema son el uso de CPU y el uso de memoria. La figura 12 muestra la tendencia en el uso de CPU de un servidor de históricos; mientras que la figura 13, la tendencia del uso de memoria por varias horas. El esquema de monitoreo es capaz de actualizar en tiempo real las variables con una tasa de 2 s, y permite ajustar la escala temporal de monitoreo y observar el comportamiento en diferentes periodos: durante horas, días y meses.

Diagnóstico de fallas

La solución propuesta ha sido configurada en un tablero (o *dashboard*) único en el que se presentan, de manera organizada y sin saturaciones, las soluciones gráficas descritas anteriormente. Este monitoreo en tiempo real de la infraestructura y la plataforma SCADA/EMS ha

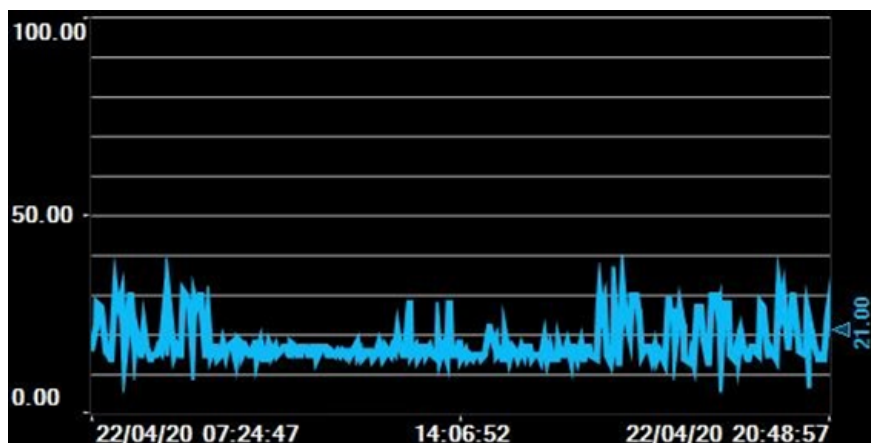


Figura 12. Tendencia de uso de CPU en servidor de históricos

Fuente: Autores.

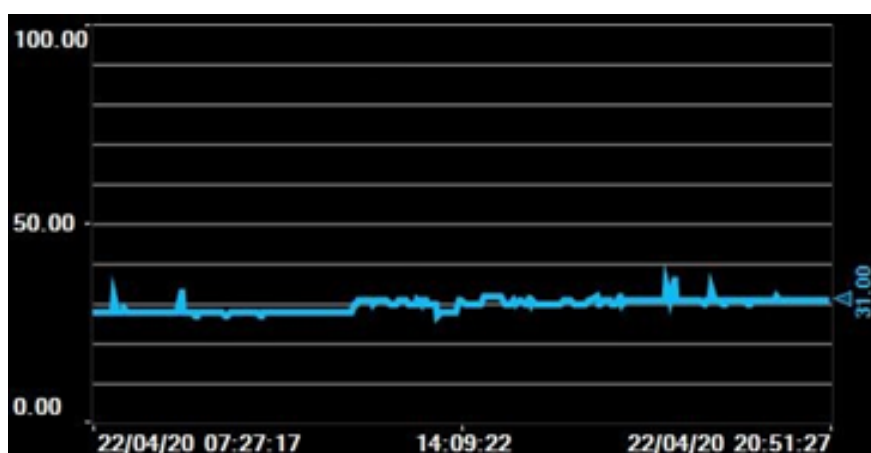


Figura 13. Tendencia de uso de memoria en servidor de históricos

Fuente: Autores.

permitido disminuir los tiempos de detección, diagnóstico de eventos y corrección de fallas de equipos o funciones. Algunos de estos eventos se mencionan a continuación:

- El tablero de monitoreo ha permitido obtener datos precisos de las diferentes fuentes de información para determinar las posibles causas de pérdidas de supervisión, lo cual ha vuelto más ágil la ocurrencia de un problema en el sistema, incluso antes de que este sea reportado por parte de operadores de los CC.
- Se redujo la posibilidad de fallas por mal funcionamiento de aplicaciones que hubieran llevado finalmente a la pérdida de supervisión parcial o total de los equipos remotos.
- El mantenimiento periódico de bases de datos y puesta en producción requiere verificar

la ejecución correcta de funciones en servidores SCADA, FEP, ICCP, históricos y aplicaciones de análisis de red; luego de la implementación del modelo se redujo el tiempo requerido para comprobar el estado de estas funciones y ajustar en caso de errores.

Además, la gestión preventiva ha permitido reducir la posibilidad de fallas por mal funcionamiento de aplicaciones, llenado de particiones, cambio de estado de equipos, bajo rendimiento de dispositivos, entre otros. Un ejemplo es la falla de un proceso crítico en el cual el diagnóstico requería realizar una revisión exhaustiva del funcionamiento de todas las aplicaciones SCADA por un gran número de tabulares; actualmente, con el esquema de monitoreo implementado fue posible reducir los tiempos de diagnóstico de aproximadamente quince minutos a menos de un minuto.

Gestión del monitoreo

Las aplicaciones del modelo de monitoreo entregan alarmas para la gestión de los equipos y diagnóstico rápido de cambios y fallas en el sistema. A partir del análisis histórico de las alarmas, en las figuras 14 y 15 se presenta la cantidad de alarmas por equipo y por tipo de alarma, respectivamente, recibidas en un periodo de dos meses en los cuatro CC en los cuales se implementó el modelo de monitoreo y gestión. En la figura 14 se observa que la mayor cantidad de alarmas que se generaron pertenecen a servidores, debido a mantenimientos programados, cambios de configuración o fallas en los equipos.

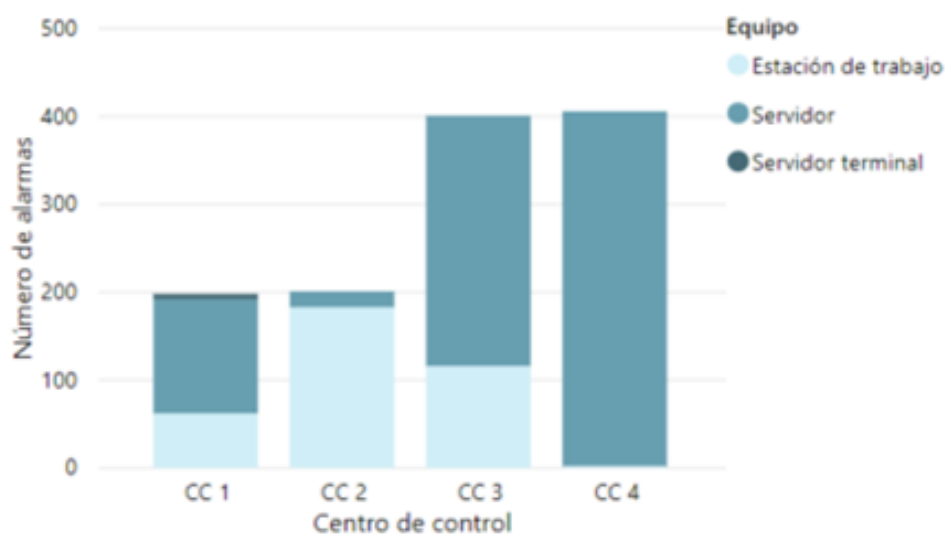


Figura 14. Alarmas en cada centro de control por tipo de equipo

Fuente: Autores.

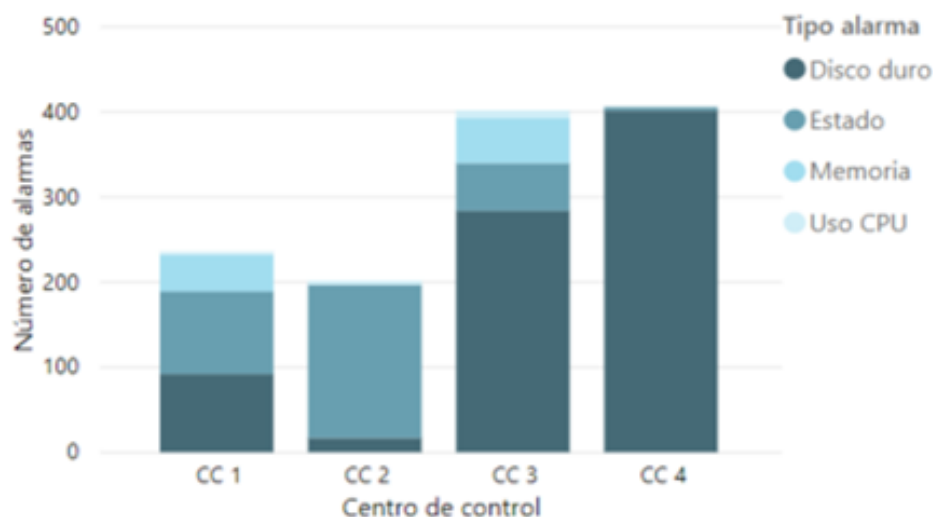


Figura 15. Alarmas en cada centro de control por tipo de alarma

Fuente: Autores.

Dada la criticidad de los CC, es vital monitorear las alarmas para garantizar la operación continua. Cabe señalar que algunas alarmas son consecuencia de acciones de mantenimiento; por ejemplo, al gestionar el uso de CPU y memoria, a veces es necesario reiniciar estaciones de trabajo, lo que a su vez genera alarmas por estado anormal.

En cuanto a acciones de gestión, estas se dividen en dos tipos: preventivas y correctivas. Por un lado, las preventivas se determinan al momento de identificar y gestionar alarmas en tiempo real, y de no contar con ellas, puede producirse la falla de un equipo e indisponibilidad parcial o total del sistema. Por otro lado, se hace una gestión correctiva cuando se realizan acciones posteriores a las fallas de un equipo o funcionalidad debido a un evento o conjunto de eventos simultáneos.

Condiciones como las evidenciadas cuentan con acciones que se han ejecutado para gestionar las alarmas, como se describe en la tabla 1. Particularmente, la administración de infraestructuras de CC requiere un alto nivel de gestión, ya que muchas de las acciones se ejecutan en tiempo real, durante la resolución de fallas ocasionadas por eventos.

A partir de la información histórica, se evidencia la necesidad de establecer acciones periódicas sobre el sistema, como el reinicio de equipos, y determinar la periodicidad requerida para mantener la operatividad. Además, se requiere expandir o reconfigurar el almacenamiento en discos duros, ya que se observó el llenado continuo de algunas particiones debido a la misma operación.

Beneficios del monitoreo y gestión de la salud de la infraestructura SCADA/EMS

Con la implementación del modelo de monitoreo y gestión se han evidenciado los siguientes beneficios:

- Mitigar los riesgos que supone el llenado de las particiones.
- Alertas tempranas de estado de equipos, desempeño y violación de límites.
- Disponer de datos que en el futuro permitan un análisis predictivo.
- Reducir tiempos de diagnóstico de eventos que producen fallas o mal funcionamiento.
- Aprovechando las redundancias existentes de los sistemas SCADA, tanto en servidores como en redes de datos, el modelo permite una evaluación y gestión permanente para aumentar la disponibilidad y confiabilidad de los equipos que lo componen y disminuir los costos operacionales por penalizaciones.

Conclusiones

Se desarrolló e implementó un modelo innovador para el monitoreo y gestión en tiempo real del estado de salud de los SCADA/EMS de transmisión de energía eléctrica. El modelo permite el monitoreo de *hardware* de la infraestructura a través del protocolo SNMP y funcionalidades críticas de *software*, a través de una arquitectura de tres capas: obtención de datos, procesamiento de datos y aplicaciones.

La implementación en cuatro centros de control que operan más de 22 000 km de líneas de transmisión demostró la capacidad para supervisar la disponibilidad y el desempeño de los equipos y funciones críticas del SCADA/EMS.

Las aplicaciones desarrolladas del esquema han permitido, primero, obtener información en tiempo real por medio de visualizaciones, tendencias y alarmas, dentro de la herramienta de monitoreo, y, segundo, enviar alertas por correo electrónico, lo que contribuye a una gestión más eficiente de los equipos del centro de control y la plataforma de operación.

Las alertas tempranas han permitido aumentar la disponibilidad, disminuir los tiempos de diagnóstico en caso de fallas y mejorar la gestión preventiva de los activos de la infraestructura SCADA.

Con el uso del esquema de monitoreo se ha mejorado la conciencia situacional de los administradores de la plataforma, pues así se dispone de herramientas visuales con la información

en tiempo real de los equipos de la infraestructura SCADA y el seguimiento al estado de salud del sistema.

No obstante, se identifican oportunidades significativas para potenciar sus capacidades, particularmente en el ámbito predictivo. Como línea futura de trabajo, se propone la incorporación de técnicas de aprendizaje automático (*machine learning*) que promuevan la construcción de modelos de comportamiento basados en datos históricos y en tiempo real. Esta integración ayudaría a detectar patrones de deterioro, anticipar fallas incipientes y optimizar la gestión preventiva de los activos, así, se contribuiría a una operación más confiable, eficiente y proactiva de los centros de control.

Referencias

- [1] J. D. Pinzón y D. G. Colomé, "Real-time multi-state classification of short-term voltage stability based on multivariate time series machine learning", *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 108, pp. 402-414, jun. 2019, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.01.022>
- [2] A. Rendón Salgado, C. R. Fuerte Esquivel, y J. G. Calderón Guizar, "SCADA and PMU measurements for improving power system state estimation", *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 13, n.º 7, pp. 2245-2251, jul. 2015, DOI: <https://doi.org/10.1109/TLA.2015.7273784>
- [3] M. Power y N. Sing, *Challenge in the control centre (EMS) due to distributed generation and renewables*, CIGRE París, 2017.
- [4] J. D. Pinzón y D. G. Colomé, "PMU-based Online Monitoring of Short-term Voltage Stability using Lyapunov Exponents", *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 17, n.º 10, pp. 1578- 1587, 2019, DOI: <https://doi.org/10.1109/TLA.2019.8986435>
- [5] W. Alves, D. Martins, U. Bezerra, y A. Klautau, "A hybrid approach for big data outlier detection from electric power SCADA system", *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 15, n.º 1, pp. 57-64, 2017, DOI: <https://doi.org/10.1109/TLA.2017.7827888>
- [6] J.-Y. Astic, G. Bareux, T. Buhagiar *et al.*, "Control center designs: new functions and challenges for the transmission system operator", *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 16, n.º 2, pp. 57-66, 2018.
- [7] S. Virmani y S. C. Savulescu, "The real-time and study-mode data environment in modern SCADA/EMS", en. 2009, DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470423912.ch1>
- [8] J. D. Pinzón y L. C. Arrieta, "Data analytics for power grid control centers management", en *2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT La-*

- tin America*), 2021, pp. 1-5, DOI: <https://doi.org/10.1109/ISGTLatinAmerica52371.2021.9543087>
- [9] N. Nguyen, T. Dang, J. Hass *et al.*, “HiperJobViz: visualizing resource allocations in high-performance computing center via multivariate health-status data”, en *2019 IEEE/ACM Industry/University Joint International Workshop on Data-center Automation, Analytics, and Control (DAAC)*, 2019, pp. 19-24, DOI: <https://doi.org/10.1109/DAAC49578.2019.00009>
- [10] X. Zhang y Z. Zhang, “Data center integrated monitoring based on performance monitoring of server and application system”, en *2010 International Conference on Computer and Communication Technologies in Agriculture Engineering*, 2010, pp. 491-493, DOI: <https://doi.org/10.1109/CCTAE.2010.5544335>
- [11] C. Chen, L. Sun, Y. Shao *et al.*, “IEMS: an intelligent environment monitoring system of server room”, en *2012 Fifth International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, 2012, pp. 189-192, DOI: <https://doi.org/10.1109/ICICTA.2012.54>
- [12] Z. Wang, Y. Wang, G. Shao *et al.*, “Research and development of monitoring system for network servers”, en *2008 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, 2008, pp. 1-3, DOI: <https://doi.org/10.1109/WiCom.2008.801>
- [13] Q. Fang, J. Wang, y Q. Gong, “QoS-driven power management of data centers via model predictive control”, *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 13, n.º 4, pp. 1557-1566, 2016, DOI: <https://doi.org/10.1109/TASE.2016.2582501>
- [14] R. Milocco, P. Minet, É. Renault *et al.*, “Proactive data center management using predictive approaches”, *IEEE Access*, vol. 8, pp. 161776-161786, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3020940>
- [15] R. Milocco, P. Minet, É. Renault *et al.*, “Evaluating the upper bound of energy cost saving by proactive data center management”, *IEEE Trans. Netw. Serv. Manag.*, vol. 17, n.º 3, pp. 1527-1541, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1109/TNSM.2020.2988346>
- [16] M. Savić, M. Ljubojević, y S. Gajin, “A novel approach to client-side monitoring of shared infrastructures”, *IEEE Access*, vol. 8, pp. 44175-44189, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2978172>

