



**XXIV SNPTEE  
SEMINARIO NACIONAL DE PRODUCCIÓN  
Y TRANSMISIÓN DE ENERGÍA  
ELÉCTRICA**

CB/GTM/27

22 a 25 de octubre de 2017  
Curitiba - PR

**GRUPO - XIII  
GRUPO DE ESTUDIO TRANSFORMADORES, REACTORES, MATERIALES Y TECNOLOGÍAS EMERGENTES-  
GTM**

**Integración de Monitoreo en Línea en las Rutinas de la Ingeniería de  
Mantenimiento**

**Augustinho J. M. Simões**  
Celeo Redes

**Marcos E. G. Alves (\*)**  
Radice Tecnologia

**Maria Rita V. C. Alves**  
Celeo Redes

**Marcio da Costa**  
Treetech Sistemas Digitais

**José B. F. Neto**  
Celeo Redes

**RESUMEN**

Desde el año 2000, Celeo Redes actúa en el mercado de transmisión de energía eléctrica y hoy posee 12 concesionarias – una en construcción –, distribuidas por 11 estados y totalizando más de 3.900 kilómetros de líneas de transmisión en 500 kV y 230 kV y 12 subestaciones con capacidad instalada de transformación de 4.875 MVA.

Buscando constantemente la excelencia en las prácticas de mantenimiento y aumento de la confiabilidad, simultáneamente a la reducción de las indisponibilidades en el sistema de transmisión y reducción de los costos de mantenimiento, Celeo busca aplicar en su ingeniería de mantenimiento las herramientas y tecnologías más modernas y efectivas disponibles. Siguiendo este lema, en 2011 fue iniciada la implantación del monitoreo en línea de los autotransformadores y reactores de las concesiones del grupo, que actualmente abarca prácticamente todos los activos de estas familias, en un total de 38 equipos, además de algunos equipos de menor porte, pero de gran importancia para las funciones de transmisión, como transformadores de conexión a tierra.

El artículo presentará la solución de sistema corporativo adoptada para alcanzar dicho objetivo, utilizando la estructura de Tecnología de Información de la empresa para garantizar el correcto mantenimiento del sistema y así asegurar su continuidad, con excelentes resultados, de manera similar al que ya es efectuado como de costumbre para otros sistemas corporativos como el ERP y el SAGE.

Será presentada también la selección de subsistemas a monitorear y, consecuentemente, los sensores adoptados, la arquitectura de red de comunicación que permitió la integración de subestaciones localizadas en cinco estados de cuatro regiones del país.

Por fin, el artículo contará como el sistema de monitoreo corporativo fue integrado a las rutinas de la ingeniería de mantenimiento de Celeo, contribuyendo para que fueran alcanzados importantes resultados para la reducción del riesgo de fallas de equipos, reducción de desconexiones para mantenimientos, reducción de costos de mantenimiento y, consecuentemente, mejora de los resultados operacionales. Para ello, serán presentados casos reales de detección de condiciones de riesgo para los reactores, que operan en regiones de elevadas temperaturas ambientes, y las medidas de mitigación en curso.

Por lo tanto, el artículo demostrará la utilidad de las informaciones habilitadas por el sistema de monitoreo y la viabilidad de usarlas para influenciar positivamente las rutinas de mantenimiento en concesionarias de transmisión.

(\*) Praça Claudino Alves, n° 141 – CEP 12940-800 – Atibaia, SP – Brasil  
Tel.: (+55 11) 2410-1199 – Fax: (+55 11) 2410-1199 – Correo electrónico: marcos.alves@radicetech.com

## PALABRAS CLAVE

Transformadores de potencia, Reactores *shunt*, Gestión de mantenimiento, Gestión de activos, Monitoreo en línea, Diagnóstico de estado, Pronóstico de estado, Sensores inteligentes, *Smart sensors*, Dispositivos electrónicos inteligentes.

### 1.0 - INTRODUCCIÓN

Desde el año 2000, Celeo Redes actúa en el mercado de transmisión de energía eléctrica y hoy posee 12 concesionarias – una en construcción –, distribuidas por 11 estados y totalizando más de 3.900 kilómetros de líneas de transmisión en 500 kV y 230 kV y 12 subestaciones con capacidad instalada de transformación de 4.875 MVA.

Buscando constantemente la excelencia en las prácticas de mantenimiento y aumento de la confiabilidad, simultáneamente a la reducción de las indisponibilidades en el sistema de transmisión y reducción de los costos de mantenimiento, Celeo busca aplicar en su ingeniería de mantenimiento las herramientas y tecnologías más modernas y efectivas disponibles. Siguiendo este lema, en 2011 fue iniciada la implantación del monitoreo en línea de los autotransformadores y reactores de las concesiones del grupo, que actualmente abarca prácticamente todos los activos de estas familias, en un total de 38 equipos, además de algunos equipos de menor porte, pero de gran importancia para las funciones de transmisión, como transformadores de conexión a tierra.

Los objetivos que se busca alcanzar en ese proceso son:

- Migración del mantenimiento preventivo para el predictivo
- Aumento de confiabilidad y reducción de riesgos de fallas
- Reducción de paradas para mantenimiento y de Parcelas Variables
- Gestión de mantenimiento adherente a la filosofía de mantenimiento predictivo
- Sistema de gestión adherente a las normas del sector (ANEEL/ONS)
- Sistema de gestión de mantenimiento adherente a las prácticas del sector eléctrico
- Arquitectura modular y expansible
- Plataforma preparada para crecimiento gradual de funciones (Apps)

Dichos objetivos se muestran adherentes a las evoluciones de las técnicas de mantenimiento y expectativas correspondientes señaladas por Moubray<sup>1</sup>, como ilustran las Figuras 1 y 2.

#### (txt figura 1)

1940 – 1950

Primera Generación

- Reparación luego de una avería

1960 – 1970

Segunda Generación

- Revisiones generales programadas

- Sistema de planificación y control de trabajo

- Introducción de la computación

1980 – 1990 – 2000

Tercera Generación

- Monitoreo de las condiciones

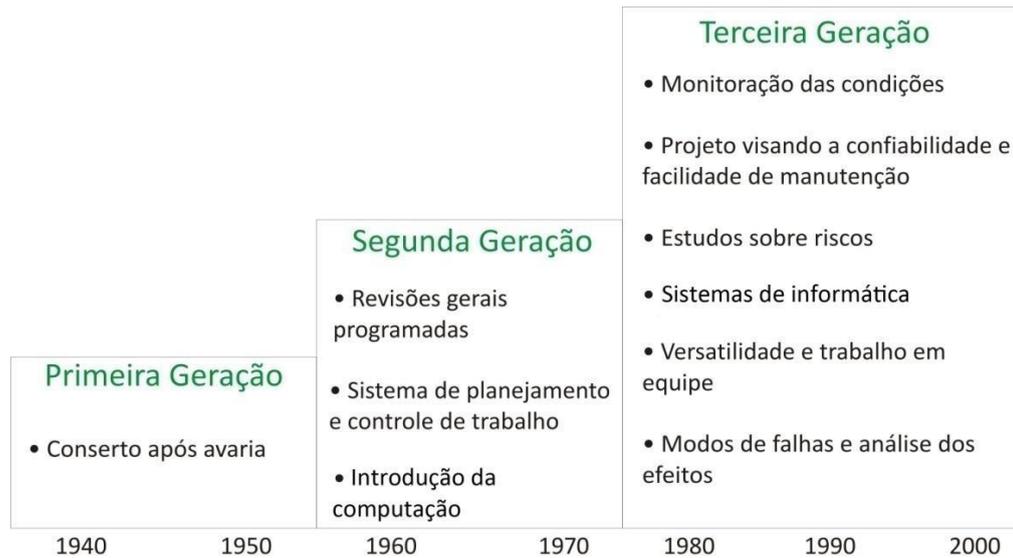
- Proyecto visando la confiabilidad y facilidad de mantenimiento

- Estudios sobre riesgos

- Sistemas de informática

- Versatilidad y trabajo en equipo

- Modos de fallas y análisis de los efectos

FIGURA 1 - Evolución de las técnicas de mantenimiento<sup>1</sup>**(txt figura 2)**

1940 – 1950

Primera Generación

- Reparación luego de una avería

1960 – 1970

Segunda Generación

- Mayor disponibilidad de los equipos

- Mayor vida útil de los activos

- Costos reducidos

1980 – 1990 – 2000

Tercera Generación

- Mayor disponibilidad y confiabilidad de los equipos

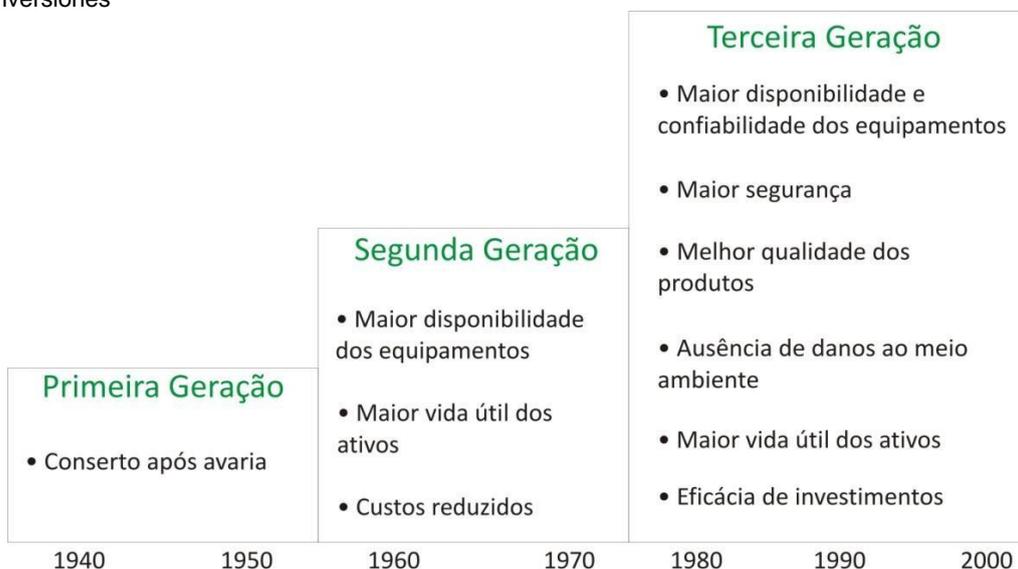
- Mayor seguridad

- Mejor calidad de los productos

- Ausencia de daños al medio ambiente

- Mayor vida útil de los activos

- Eficacia de inversiones

FIGURA 2 - Crecimiento de las expectativas de mantenimiento<sup>1</sup>**2.0 - IMPLANTACIÓN DE LA SOLUCIÓN**

La implantación del monitoreo en línea y la modernización de los procesos de mantenimiento en Celeo fueron efectuadas en una secuencia jerárquica de etapas, siguiendo la arquitectura ilustrada en la Figura 3. La pirámide

mostrada en esta figura permite intuir que el proceso de implantación buscó construir una arquitectura sólida, en la cual la correcta implantación de una etapa lanza las bases que permiten avanzar a la próxima fase de forma consistente, garantizando, así, la obtención de los resultados finales deseados.

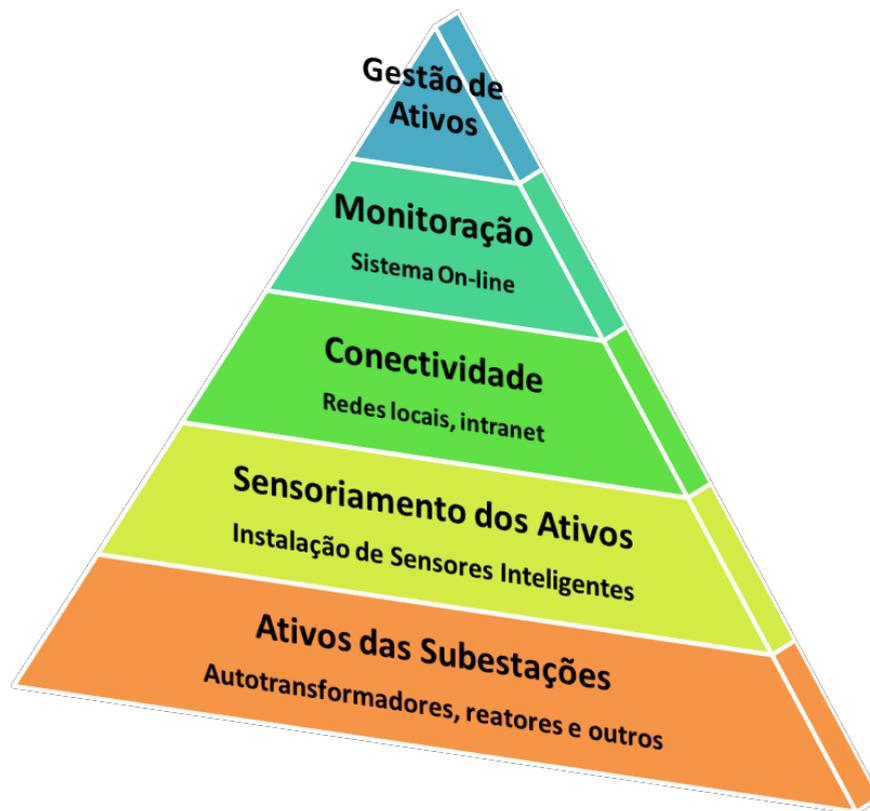


FIGURA 3 – Arquitectura de implantación del monitoreo en línea en Celeo Redes

(txt figura 3)

Gestión de Activos

Monitoreo

Sistema en línea

Conectividad

Redes locales, intranet

Detección de los Activos

Instalación de Sensores Inteligentes

Activos de las Subestaciones

Autotransformadores, reactores y otros

Las etapas cumplidas para la implantación del monitoreo en línea en Celeo Redes son detalladas en los tópicos a continuación.

## 2.1 - Etapa 1 - Detección de los Activos

La detección de los activos es considerada una etapa fundamental para la construcción de un sistema de monitoreo en línea funcional y confiable. Por ese motivo, esta fue la primera etapa realizada en el proceso de implantación de este sistema en Celeo.

La Figura 4 ilustra los principales módulos de detección disponibles para transformadores de potencia, autotransformadores y reactores, que fueron los equipos elegidos para la implantación inicial del sistema, por ser los de mayor valor en las subestaciones de Celeo.

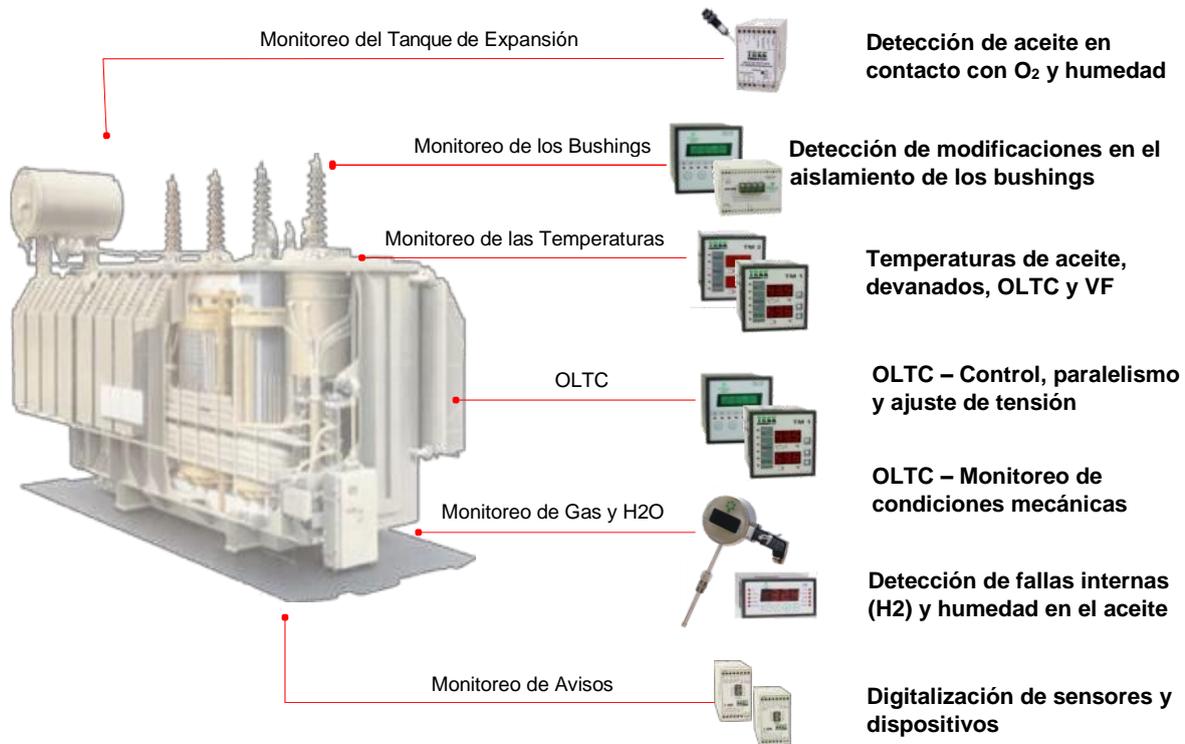


FIGURA 4 – Detección de autotransformadores de potencia y reactores, conforme aplicable

La arquitectura descentralizada y modular<sup>2</sup> adoptada por Celeo para la detección de los activos permitió que, en un primer momento, fueran seleccionados los sensores considerados prioritarios para la empresa, permitiendo así que todos los activos de estas familias fueran monitoreados, totalizando 38 equipos, además de algunos equipos de menor porte, pero de gran importancia para las funciones de transmisión, como transformadores de conexión a tierra.

La Tabla 1 lista los Sensores Inteligentes seleccionados para instalación en esta etapa de la implantación, además de las variables medidas y calculadas por cada uno de estos módulos.

Conforme mencionado, la arquitectura descentralizada y modular utilizada permitirá que, en futuras etapas de expansión del sistema, la base de sensores instalados en los autotransformadores y reactores sea ampliada con otros tipos de sensores, como los mostrados en la Figura 4.

Dicha arquitectura permitirá también que la cobertura del sistema de monitoreo en línea sea ampliada para otros activos de las subestaciones, como disyuntores, llaves seccionadoras y otros.

Tabla 1 – Sensores Inteligentes instalados en la primera etapa de implantación del monitoreo en línea

Sensor inteligente	Variables obtenidas y procesadas
Monitor de Temperaturas	Temperatura del tope del aceite
	Temperaturas de los devanados (punto más caliente)
	Temperatura ambiente
	Corrientes de carga
	Porcentuales de carga
	Gradientes finales de temperatura entre devanado y aceite
	Temperaturas máximas alcanzadas
	Estado de los grupos de refrigeración forzada
	Estado de alarmas y trips por temperaturas de aceite y devanados
Monitor de Bushings	Capacitancia del aislamiento
	Tangente delta (FP) del aislamiento
	Tendencia de evolución de la Capacitancia
	Tendencia de evolución de la Tangente Delta
	Tiempos previstos para alcanzar valores críticos de Capacitancia
	Tiempos previstos para alcanzar valores críticos de Tangente Delta
	Corrientes de fuga de los bushings

## 2.2 - Etapa 2 - Conectividad de Sensores

En la etapa de detección de los activos fue adoptada una arquitectura modular descentralizada, utilizando Sensores Inteligentes del tipo IED (*Intelligent Electronic Device*) dotados de conectividad nativa, es decir, con puertos de comunicación y protocolos de comunicación abiertos.

Esta arquitectura permitió que los sensores fueran fácilmente integrados a una red de comunicación local, que lleva las variables obtenidas y procesadas a la red intranet corporativa de la empresa, ya disponible en la sala de control de todas las subestaciones.

Con ello, los datos de los sensores inteligentes fueron habilitados para la próxima etapa de implantación del sistema de monitoreo en línea, descrita a continuación.

Es importante resaltar que la arquitectura utilizada permite la expansión de la detección de los activos de forma sencilla, visto que nuevos sensores inteligentes que vengan a ser instalados puedan ser fácilmente conectados a la red de comunicación ya existente.

## 2.3 - Etapa 3 - Software de Monitoreo en Línea

Una vez que los Sensores Inteligentes instalados en los autotransformadores y reactores están conectados a la red intranet corporativa, un único *software* de monitoreo en línea fue implantado en Celeo Redes para el diagnóstico y pronóstico de estado de todos sus activos, constituyendo así un sistema corporativo, como ilustrado en la Figura 5.

Haber escogido la filosofía de adopción de un único sistema de monitoreo corporativo proporcionó diversos beneficios, entre los cuales los principales son:

- Definición clara de responsabilidad por el mantenimiento del *software* de monitoreo por el sector de TI de la empresa, que garantiza la integridad de los datos y la disponibilidad del ambiente computacional y del sistema.
- Evitar la instalación de un gran número de computadoras en las diversas subestaciones.
- Reducción de costos de implantación y de mantenimiento.
- Impedir la proliferación de múltiples versiones y modelos de *softwares* de monitoreo en línea.
- Facilidad de entrenamiento de usuarios y administradores del sistema.
- Consolidación de los datos de todos los activos en un banco de datos y plataforma únicos, facilitando la correlación de informaciones y la generación de informes.

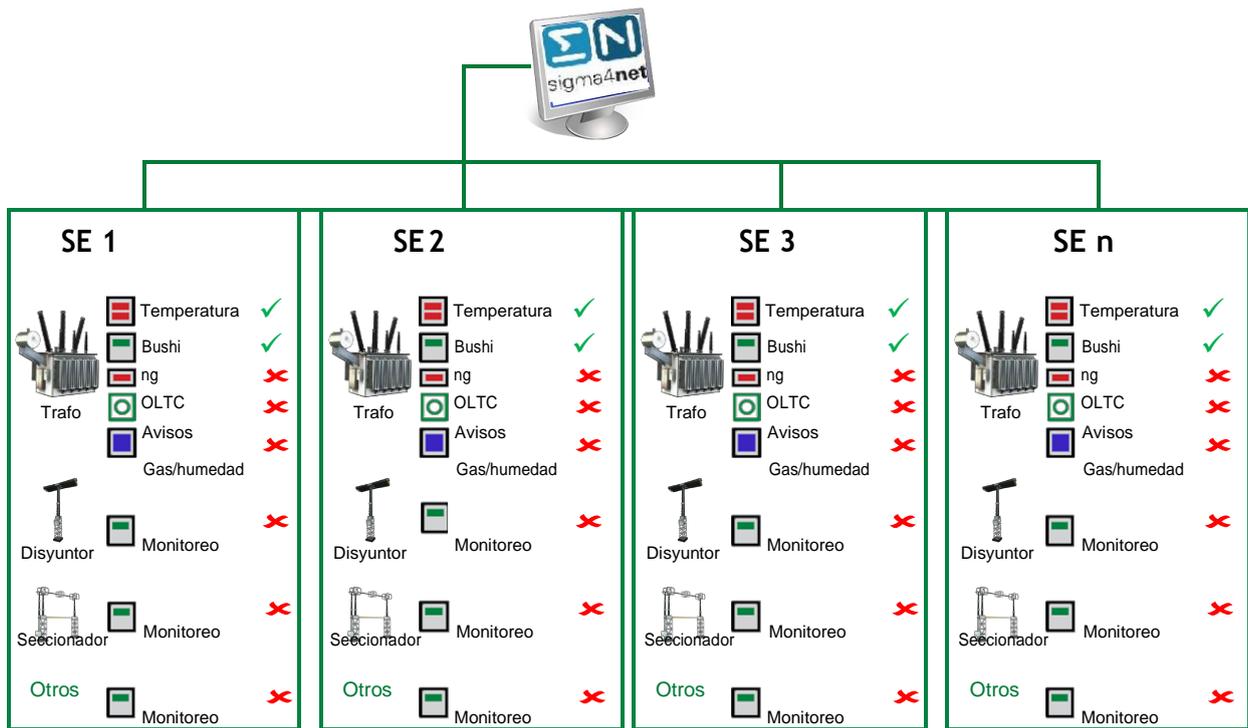


FIGURA 5 – Conexión de los Sensores Inteligentes en las subestaciones al *software* corporativo de Monitoreo en Línea

Para que los objetivos finales del sistema de monitoreo en línea sean alcanzados respecto a la efectiva gestión de los activos de Celeo Redes, el *software* corporativo implantado posee algoritmos de diagnóstico y pronóstico, denominados Módulos de Ingeniería, que pueden también ser expandidas desde que nuevos Sensores Inteligentes sean instalados<sup>3,4</sup>. Basado en los sensores inteligentes actualmente implantados en los autotransformadores y reactores de Celeo, el sistema de monitoreo fue inicialmente dotado de los Módulos de Ingeniería listados en la Tabla 2.

Tabla 2 – Módulos de Ingeniería inicialmente implantados en el sistema corporativo de Monitoreo en Línea

Módulo de Ingeniería	Funciones de Diagnóstico y Pronóstico
Envejecimiento del aislamiento	Envejecimiento del aislamiento
	Tiempo de vida restante del aislamiento
	Tasa de pérdida de vida
Previsión de temperaturas	Previsión de temperaturas futuras
	Tiempo restante para alcanzar temperaturas de alarma y <i>trip</i>
Eficiencia de la refrigeración	Temperatura teórica calculada
	Diferencia entre temperatura real y calculada
Asistente de mantenimiento de la refrigeración	Tiempo de operación de grupos de refrigeración
	Tiempo promedio diario de operación
	Tiempo restante hasta el próximo mantenimiento
	Avisos de mantenimiento con antecedencia
Diagnóstico de bushings	Capacitancia de los bushings
	Tangente delta de los bushings
	Tendencias de evolución de capacitancia y tangente delta
	Evolución rápida de defecto en los bushings
Simulaciones de carga	Simulación con base en las condiciones de carga y temperatura actuales
	Simulación de ciclo de carga hipotético
Cromatografía de gas (fuera de línea)	Tasas de evolución de gases en el aceite
	Relaciones entre gases
	Diagnóstico con base en la IEC 60599
	Diagnóstico con base en el triángulo de Duval de la IEC 60599
Físico-químico (fuera de línea)	Diagnósticos con base en la NBR 10576

### 3.0 - INTEGRACIÓN A LAS RUTINAS DE LA INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO

La integración del sistema de monitoreo en línea corporativo a las rutinas de la ingeniería de mantenimiento de Celeo contribuyó para que fueran alcanzados importantes resultados para la reducción del riesgo de fallas de equipos, reducción de desconexiones para mantenimientos, reducción de costos de mantenimiento y, consecuentemente, mejora de los resultados operacionales.

Entre los procedimientos adoptados para la implementación de esta integración está la generación mensual de un informe de anomalías en los equipos monitoreados, que es presentado al directorio técnico de la empresa en reunión mensual de discusión de la ingeniería de mantenimiento.

Un ejemplo real de resultados obtenidos a partir de dicha integración fue la detección de condiciones de riesgo para los reactores de derivación, que operan en regiones de elevadas temperaturas ambientes, permitiendo la adopción de medidas de mitigación de riesgos.

Siendo así, la implementación del monitoreo en línea de los autotransformadores y reactores de las concesiones de Celeo Redes ha alcanzado los objetivos inicialmente propuestos, lo que llevó a la empresa a avanzar a la próxima etapa ilustrada en la Figura 3, que es la implantación de un sistema corporativo de gestión de activos y gestión del mantenimiento, descrita a continuación como la evolución vertical de la solución.

Paralelamente a esta evolución vertical, se encuentra también en curso en la empresa la evolución orgánica y natural de la solución ya implementada, que consiste en la adición de nuevos sensores y nuevos módulos de ingeniería para los autotransformadores y reactores, así como la extensión del sistema para otros activos estratégicos de las subestaciones.

### 4.0 - EVOLUCIÓN VERTICAL DE LA SOLUCIÓN

Las etapas de implementación del monitoreo en línea de activos citadas en este artículo ya se encuentran implementadas y consolidadas en Celeo Redes, e incluso ya se cosechan los beneficios esperados.

Con ello, ya se encuentran en curso las etapas subsecuentes de evolución de la solución, que incluyen la implementación de un sistema corporativo de gestión de activos y gestión del mantenimiento con integración nativa al sistema de monitoreo en línea, de forma a consolidar el camino rumbo a la adopción definitiva del mantenimiento predictivo, y con herramientas tecnológicas de productividad, como aplicativos móviles para los equipos de campo.

Estas etapas de evolución del sistema serán oportunamente presentadas en trabajos posteriores.

### 5.0 - CONCLUSIÓN

El artículo demostró, con un caso práctico, la viabilidad de integración de los sistemas de monitoreo en línea de activos a las rutinas de la ingeniería de mantenimiento, así como los beneficios derivados de esta integración.

Fue demostrado también que el éxito de dicha integración depende fuertemente de la selección de una arquitectura de detección adecuada a la realidad de las concesionarias de energía eléctrica y del establecimiento de un proceso de construcción del sistema basado en etapas lógicas y secuenciales.

Fueron indicadas también las etapas siguientes de evolución de la solución, que ya se encuentran en implementación en la empresa, que potencializarán en gran escala los beneficios derivados de la evolución tecnológica del mantenimiento adoptado estratégicamente por Celeo Redes.

### 6.0 - REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) MOUBRAY, J., "Reliability-centered maintenance". 2 ed. New York: Industrial Press Inc., 1997.

(2) Lavieri Jr., A., Hering, R., "Novos Conceitos em Sistemas de Energia de Alta Confiabilidade", Encarte Especial Siemens Energia, [http:// mediaibox.siemens.com.br/upfiles/232.pdf](http://mediaibox.siemens.com.br/upfiles/232.pdf), Janeiro/2001.

(3) Peres, E., Duso, W., Latenek, J., Alves, M., "Monitoração On-Line de Transformadores Conversores do Sistema de Transmissão HVDC na SE Ibiúna", XIII ERIAC, Puerto Iguazu, Argentina, Maio/2009.

(4) Pinto, F., Alves, M., "Aplicação de Sistemas de Monitoração On-Line na Visão da Engenharia de Manutenção", XXII SNPTEE, Brasília, Outubro/2013.

## 7.0 - DATOS BIOGRÁFICOS



**Marcos E. G. Alves:** Doctor en Ciencias (2013) y Maestro en Ingeniería Eléctrica (2005) por la USP e Ingeniero Eléctrico por la USJT (2001). Director de P&D en Radice Consultoria, donde supervisa proyectos de PD&I, y Gestor Técnico en Treetech Sistemas Digitais, donde actúa desde 1992 y coordinó el departamento de PD&I. Especializado en sistemas de control, protección, monitoreo, diagnóstico y gestión de activos de alta tensión, como transformadores, reactores, disyuntores, seccionadores y TIs. Colaborador de COBEI/ABNT (Comité Brasileño de Electricidad, Electrónica, Iluminación y Telecomunicaciones), donde contribuye con la elaboración de las normas técnicas brasileñas, y miembro del IEEE/PES (*Power and Energy Society*) desde 2007 y de Cigré desde 2001, donde ha participado de diversos Grupos de Trabajo. Natural de Río de Janeiro, 1975.