

DINÁMICA DE LA GESTIÓN DE ACTIVOS DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN FUNCIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO

EDGAR ANDRES ZÚÑIGA MEDINA
E.mail: ezuniga@intercolombia.com
Medellín – Colombia

Resumen

El cambio climático, aparte de ser un gran desafío para la humanidad, demanda de ajustes en la forma de gestionar los activos de las empresas de transmisión de energía eléctrica. En ISA INTERCOLOMBIA se adaptan dinámicamente las estrategias de operación y mantenimiento de sus equipos, para afrontar los diferentes fenómenos climáticos, como sequías o inviernos, y asegurar un servicio de energía eléctrica seguro y confiable a los colombianos.

Dinámica de la gestión de activos de transmisión en función del cambio climático

El cambio climático es un gran desafío para la humanidad, y como tal la gestión de los activos de una empresa de transmisión de energía no es ajena a este fenómeno global.

El aumento de temperatura, la escasez de agua o el aumento de lluvias son consecuencias del cambio climático que afectan el entorno de las instalaciones eléctricas y de las líneas de transmisión, y demandan de los transportadores de energía ajustes eficaces y oportunos en las estrategias de operación y mantenimiento. Si adicionamos el impacto del calentamiento global en la matriz energética de cada país, encontramos que el reto es mayor, ya que la criticidad de los activos es estacional y cambia constantemente las matrices de riesgos de las empresas.

El cambio climático ya se evidencia en Colombia. En la figura 1 se observa el comportamiento de las lluvias en enero del 2025, época que históricamente ha sido de sequía y cuando el mapa de precipitaciones ha sido continuamente a través de los años como el mostrado en la figura 2.

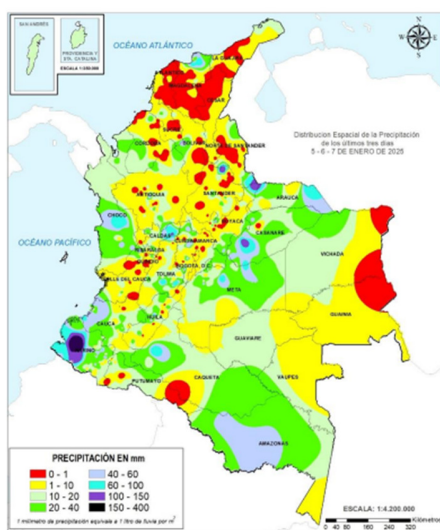


Fig. (1). Precipitación durante 72 horas desde las 7 am del 5 enero de 2025. Fuente: IDEAM [1]

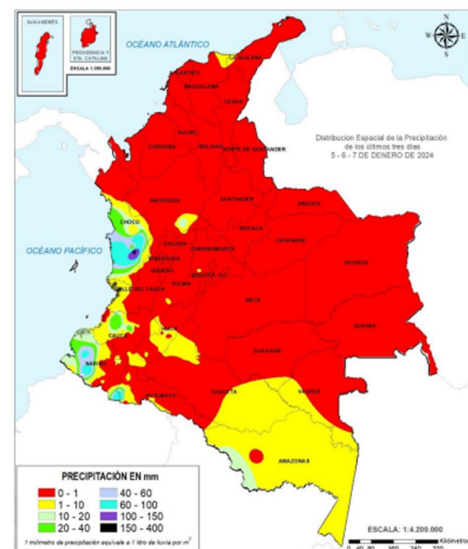


Fig. (2). Precipitación durante 72 horas desde las 7 am del 5 enero de 2024. Fuente: IDEAM [2]

Por otro lado, las redes de transmisión tienen un papel esencial en la transición energética y por esta razón se requiere su máxima disponibilidad, haciendo necesario validar en todos los escenarios climáticos que la gestión de los activos permita asegurar la confiabilidad del sistema y evite restricciones operativas.

La falla de un equipo puede tener diferentes impactos en el sistema eléctrico dependiendo de la época. Por ejemplo, si durante el fenómeno del niño, en el sistema de la figura 3 (donde el generador conectado al nodo 6 es hidráulico y el generador conectado al nodo 5 es térmico) se presenta una falla de la línea 3-5, esta tendrá un impacto más negativo sobre la confiabilidad del servicio de energía, que si esta misma falla se presentara en un escenario de estabilidad climática o durante la niña. Dicha falla provocará una restricción al sistema dada por el límite térmico del tipo de conductor de las líneas 1-2 y 2-5; esto llevará a restringir (techar) la generación térmica en plena época de sequía donde, al no haber agua, la generación hidráulica es menos probable.

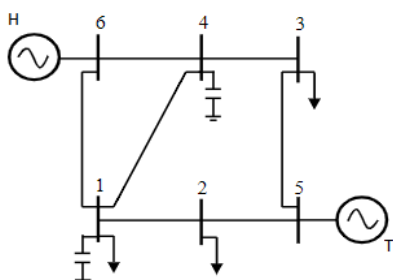


Fig. (3). Unifilar de sistema de transmisión [3]

ISA INTERCOLOMBIA se adapta en función del cambio climático para asegurar que el servicio de energía eléctrica se preste de manera segura, confiable y eficiente a todos los colombianos.

1. El cambio climático y su impacto en la gestión de activos

Hay muchos factores que son cambiantes dependiendo del escenario climático, y que son

considerados al definir planes de gestión de riesgo de falla de activos. El backlog de mantenimiento, la corrosión, la contaminación en aisladores, la evolución de incendios forestales en servidumbres de líneas de transmisión, el comportamiento de descargas atmosféricas y el monitoreo de deslizamientos de tierra adyacentes a torres de energía durante la niña, son algunos de ellos.

Sumado a lo anterior, y que afecta también a los planes estratégicos, tácticos y operativos de las empresas, está el cambio de criticidad de los activos, la cual depende mucho de las condiciones climáticas. En la figura 3 por ejemplo, la línea de transmisión 3-5 tiene una criticidad alta durante el fenómeno del niño, ya que el servicio de energía de todo ese sistema eléctrico, ante la escasez de agua, depende en gran parte del generador térmico; sin embargo, durante el fenómeno de la niña, su criticidad disminuirá a media – alta ya que el nodo 5 se convierte en sólo carga y seguramente este generador no será despachado.

A continuación, se presenta el balance entre costo, riesgo y desempeño para diferentes escenarios climáticos. Se debe asegurar un punto óptimo donde la gestión de activos permita asegurar la confiabilidad del servicio de energía eléctrica.

1.1 Análisis de costo, riesgo y desempeño en escenario climático estable o predecible

En la figura (4) se presenta el punto óptimo de operación de un sistema de transmisión para épocas de estabilidad climática, el cual está dado mayormente por los requisitos regulatorios que demandan ciertas características de calidad de la energía (confiabilidad, disponibilidad, energía no suministrada, demanda no atendida, restricciones, etc.). El eje de abscisas representa el costo, mientras que el eje de las ordenadas es el porcentaje de riesgo de falla y/o la calidad del servicio. Se busca el máximo desempeño de los activos, el mínimo riesgo de falla de estos y unos

costos eficientes de operación y mantenimiento; se pretende siempre entonces optimizar esta triada en un punto de operación donde se pueda asegurar la confiabilidad del servicio público, la generación de valor para los accionistas y públicos de interés y la sostenibilidad empresarial.

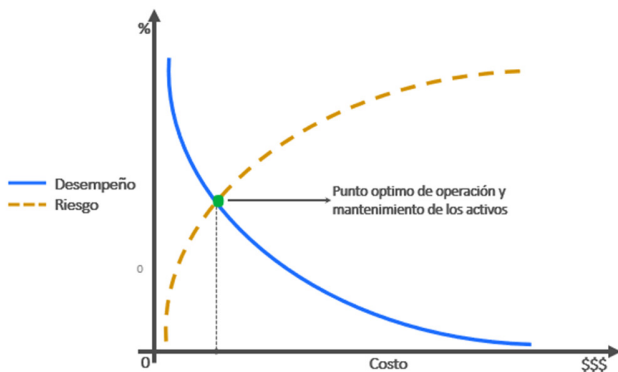


Fig. (4). Punto óptimo de operación para estabilidad climática

1.2 Análisis de costo, riesgo y desempeño en escenario climático inestable

Durante fenómenos de la niña o niño, las condiciones climáticas implican un aumento en el riesgo de fallas, lo que obliga a cambios en la forma de gestionar los activos. El reto es aún mayor cuando estos fenómenos se presentan de forma inesperada o cuando su duración o momento de inicio y fin no corresponde con los pronósticos de los institutos meteorológicos y del clima.

En invierno la estabilidad de las torres se ve amenazada por el agua que se acumula en las bases de estas, lo que aumenta la probabilidad de caída de la infraestructura por deslizamientos. Durante épocas de sequía lo que se presenta, entre otras cosas, es un aumento en los incendios forestales, los cuales con el humo que se desprende se incrementa la tasa de fallas de las líneas o se afectan los equipos por las llamas.

En la figura 5 se ve que este aumento en la probabilidad de falla implica un movimiento en el

punto de gestión u operación de los activos, el cual se desplaza en la curva naranja de riesgo hacia arriba, “automáticamente” se mueve hacia la derecha en el costo (lo aumenta) y el desempeño se mueve hacia abajo (curva azul), ya que en caso de materializarse una falla, se afectarían las variables asociadas a la calidad de la energía.

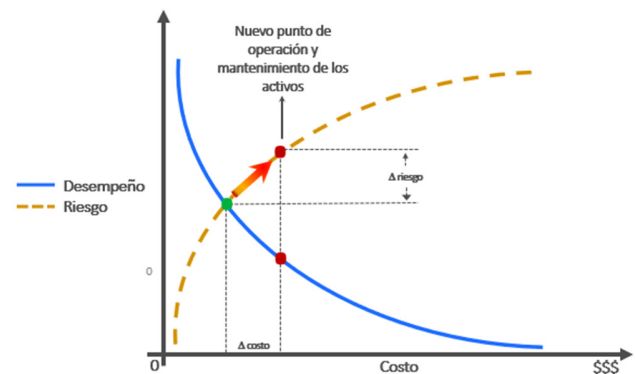


Fig. (5). Movimiento del punto de operación en cambio climático

Estos movimientos ocasionan disminución de la confiabilidad, pérdida de valor al accionista y, si la falla implica por ejemplo desatención de demanda, deteriora la calidad de vida de los usuarios finales.

Se debe entonces entender la dinámica de la gestión de activos ante cambios climáticos, con el fin de identificar señales oportunas y poder así tomar medidas de manera ágil para que el punto de operación este controlado y se pueda asegurar la confiabilidad para cualquier condición.

2. Monitoreo de la confiabilidad durante cambios climáticos

Para simplificar el análisis vamos a referirnos como fenómenos de cambio climático a la niña (invierno) y al niño (sequía). Algunos eventos de riesgo de falla de activos se presentan en la tabla 1, clasificados por tipo de fenómeno. El reto es cómo anticiparse a estos fenómenos, sobre todo cuando son inesperados, a partir de las señales oportunas del sistema de gestión de activos.

Evento de riesgo	Fenómeno	
	Niño	Niña
Deshidratación de personas o golpes de calor	X	
Indisponibilidad de líneas por caída de torres debido a problemas de inestabilidad de terrenos		X
Ruptura de herrajes y conectores por corrosión en ambientes salinos	X	X
Afectación de sistemas de control, protección y servicios auxiliares por alta temperatura	X	
Indisponibilidad de transformadores de potencia por falla de sistemas de refrigeración forzada	X	
Avalanchas en sectores aledaños a subestaciones eléctricas con posibilidad de afectación a equipos		X
Disparos indeseados de líneas de transmisión por efecto de incendios forestales en sectores aledaños	X	
Indisponibilidad de transformadores por mal aislamiento en protecciones mecánicas		X
Indisponibilidad de equipos y barrajes de subestaciones por aumento de temperatura	X	
Indisponibilidad de equipos de compensación	X	X

Tabla 1. Riesgos probables en fenómenos climáticos

El monitorear las diferentes variables con el cual se diagnostica la “salud” de los equipos se vuelve fundamental, ya que estas son las que dan indicios de los ajustes que deben hacerse a las estrategias de operación y mantenimiento en el marco de la gestión de activos. A continuación, se mencionan algunas de estas variables o indicadores que se desarrollaran más adelante en el artículo.

El cuidado de las personas es lo más importante, por lo que el índice de absentismo y el de accidentalidad permiten monitorear la salud de los trabajadores durante cambios climáticos.

Los **indicadores de mantenimiento** muestran el estado de los equipos y permiten hacer seguimiento a las acciones programadas para mantenerlos en buen estado, por lo que se hace necesario hacer seguimiento a la ejecución del plan de mantenimiento, medir la tasa de fallas, gestionar la corrosión, identificar torres en riesgo de deslizamiento, monitorear activos cuestionados (índices de salud y criticidad), medir el nivel de contaminación de aisladores, hacer termografías, conocer el estado de las protecciones mecánicas de equipos inductivos y sus sistemas de refrigeración y vigilar la ventilación de tableros de control y protección a intemperie y en salas de control, etc.

Como indicadores de operación se cuenta con los mínimos tiempos de respuesta para la atención de eventos en subestaciones, la gestión de intervenciones que impliquen desconexión de activos y las horas regulatorias máximas permitidas para realizar mantenimiento.

Las comunidades son esenciales y la reputación se monitorea con indicadores de gestión y supervisando el perfil de riesgo reputacional.

Los indicadores financieros son por ejemplo el cumplimiento de Presupuesto anual y el EBITDA.

3. Estrategias y planes tácticos en diferentes escenarios climáticos

3.1 Estabilidad climática

En la tabla 2 se presentan las variables de mantenimiento que se deben vigilar para gestionar activos en condiciones estables de clima.

Variable	Condiciones Estables
Cumplimiento Plan Anual de Mantenimiento (PAM)	Mínimo 95%, con desviación 20% y correctivos 15%
Manejo de la corrosión	Gestión del riesgo para condiciones grado 1, 2 y 3.
Torres en riesgo de deslizamiento	Seguimiento a torres identificadas con problemas
Contaminación de aisladores	Según estrategia de lavado de aisladores y equipos
Gestión de repuestos	Centralizada, según MCC
Termografía	De acuerdo con MCC
Frecuencia de inspecciones	
Activos cuestionados	
Priorización de actividades	
Tasa de fallas en líneas	
Gestión del Backlog	
Protecciones mecánicas de equipos inductivos	
Sistemas de refrigeración de equipos inductivos	
Ventilación tableros de control y protección (en salas a intemperie)	
Torres en riesgo de colapso	
Incendios forestales	

Tabla 2. Variables para mantenimiento

Todas estas variables están definidas por el MCC o estudio de mantenimiento centrado en confiabilidad, el cual da las pautas para gestionar correctamente el riesgo de falla de los activos.

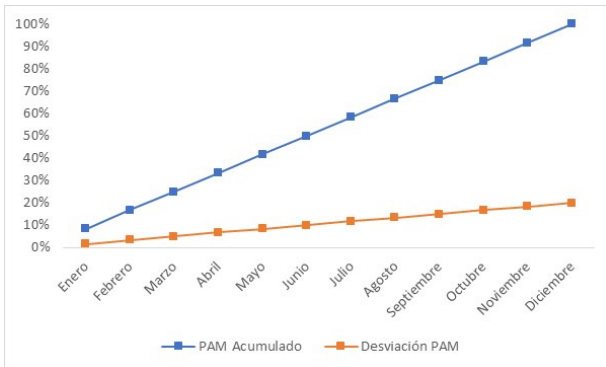


Fig. (6). PAM en condiciones climáticas estables

Según la figura 6, se espera es que el porcentaje de correctivos y la desviación del mantenimiento sean máximo del 10 y del 20% respectivamente.

Con respecto a las estrategias para gestionar el riesgo de accidente y de enfermedad de las personas, éstas son de acuerdo a las matrices de riesgo ocupacionales y de cada instalación y son definidas por las áreas de salud ocupacional. Se centran en el uso de los equipos de protección personal (EPPs) y a las capacitaciones y seguimiento de condiciones físicas y psicológicas.

Finalmente, en operación, se considera el cumplimiento de la regulación eléctrica para tiempos de atención de subestaciones, el tipo de trabajos a realizar en función del riesgo para las personas y las horas de indisponibilidad de los activos para mantenimiento (véase la tabla 3).

Variable	Condiciones climáticas Estables
Tiempo de atención de subestaciones	De acuerdo a la estrategia de operación
Intervenciones de activos	Según estrategia de mantenimiento (activos desenergizados)
Disponibilidad	Sin activos superando máximas horas anuales de indisponibilidad según resolución CREG 011 del 2009

Tabla 3. Variables para la operación

3.2 Fenómeno del niño

En la tabla 4 se presentan los ajustes que aplican a la estrategia para este tipo de fenómeno en el que la variable clave es la temperatura.

3.2.1 Ajuste de plan de mantenimiento durante el niño. Bajo esta condición la desviación esperada puede ser 30% y el nivel de correctivos subir al 20 o 25%, teniendo en cuenta que se atenderán de manera inmediata las fallas que se hayan identificado el mismo año.

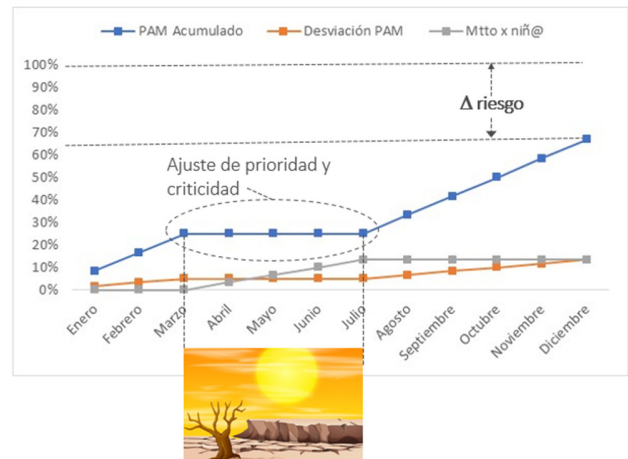


Fig. (7). PAM durante fenómeno del niño

Como se muestra en la figura 7, durante la duración del niño entre los meses de marzo y julio, se deben ajustar las prioridades de las actividades de mantenimiento de acuerdo con la criticidad estacionaria de cada activo.

Las intervenciones durante épocas de estabilidad climática, donde es posible cumplir con las actividades planeadas y el sistema de potencia no está “estresado” por la indisponibilidad de generación o de activos, se hacen con equipos desenergizados para gestionar el riesgo eléctrico. Sin embargo, durante fenómenos climáticos, donde la generación se restringe dependiendo del agua disponible y del calor, es necesario implementar otras metodologías de trabajo, donde la indisponibilidad de los activos se minimice.

Variable	Fenómeno del Niño
Cuidado de las personas	Según matrices de riesgo ocupacionales y de cada instalación, reforzado con hidratación y protección solar
PAM	100% para zonas de generación térmica. En zonas de generación hidráulica hacer actividades por oportunidad. La desviación esperada ser 30% y los correctivos 20 al 25%.
Manejo corrosión	Gestión del riesgo para condiciones grado 1, 2 y 3 y condición peligrosa por la criticidad del activo.
Torres en riesgo de deslizamiento	Monitoreo y seguimiento a condiciones de riesgo
Frecuencia de inspecciones	MCC + Inspecciones con dron a condiciones de falla identificadas
Activos cuestionados	Eliminar condiciones de riesgo en zonas de generación térmica. Implica desviación del PAM.
Priorización de actividades	Anticipación en la ejecución de acuerdo a la criticidad del activo
Tasa de fallas en líneas	De acuerdo al MCC
Protecciones mecánicas de equipos inductivos	
Torres en riesgo de colapso	
Contaminación de aisladores	Intensificación de lavado en caliente (medición de corrientes de fuga)
Gestión del Backlog	Anticipación de las actividades de acuerdo a la criticidad del activo
Gestión de repuestos	Distribuida en áreas de riesgo operativo
Termografía	Incrementar frecuencia en equipos críticos cuestionados
Sistemas de refrigeración de equipos inductivos	Atención inmediata de fallas en ventiladores y radiadores
Ventilación tableros de control y protección (en salas a intemperie)	Atención inmediata de fallas en ventiladores y ubicación estratégica de repuestos críticos
Incendios forestales	Activación de planes de contingencia y campañas de concientización a comunidades
Tiempo de atención de subestaciones	Refuerzo en esquemas de disponibilidad en zonas de alto riesgo operativo (generación térmica)
Disponibilidad	Análisis de costo, riesgo y desempeño de las máximas horas anuales de indisponibilidad por activo
Intervenciones correctivas con desconexión de activos	Implementación de trabajos con tensión (TCT) e incremento de trabajos con riesgo de disparo. Intervenciones en áreas con generación hidráulica

Tabla 4. Ajustes a la estrategia en fenómeno del niño

3.2.2 Horas de indisponibilidad para mantenimiento. Durante estabilidad climática, la estrategia considera el límite de horas que la resolución CREG 011 del 2009 impone para realizar mantenimiento a los activos. Este límite se presenta en la tabla 5.

Activos	Máximas Horas Anuales de Indisponibilidad (MHAI)
Bahía de Línea	15
Bahía de Transformación	15
Bahía de Compensación	16
Módulo de Barraje	15
Módulo de Compensación	15
Autotransformador	28
Línea de 220 o 230 kV	20
Línea de 500 kV	37
VQC	5
Otros Activo	10

Tabla 5. Máximas Horas Anuales de indisponibilidad por activo [4]

Durante sequías prolongadas, donde la generación hidráulica es poco probable y se requiere eliminar restricciones para garantizar la máxima disponibilidad de la energía térmica, y luego de un riguroso análisis de costo, riesgo y desempeño, puede pasar que se superen las metas regulatorias de los activos intervenidos. Es el caso de incendios, donde es necesario desenergizar el activo para el cuidado de las personas y bomberos que participan en su extinción. Este análisis debe considerar que no haya detrimento patrimonial ni afectación del servicio de energía eléctrica.

3.3 Fenómeno de la niña

En invierno las variables que demarcan la forma de la gestión de activos son la humedad y el nivel de precipitaciones, y todas las estrategias se deben ajustar en función de estas. Véase tabla 6.

De manera análoga al fenómeno del niño, se debe eliminar el riesgo de falla en zonas de generación hidráulica (térmica para el niño), pero sin que esto implique indisponibilidad de activos. El reto es intensificar trabajos con tensión (TCT) en los cuales se corrijan las fallas pero sin desenergizar los activos y asegurando la salud de las personas.

Variable	Fenómeno de la Niña
Cuidado de las personas	De acuerdo a las matrices de riesgo ocupacionales y de cada instalación reforzado con EPPs para lluvia y frío.
Plan de Mantenimiento	100% en zonas de generación hidráulica sin afectar disponibilidad . En zonas de generación térmica hacer actividades por oportunidad.
Manejo corrosión	Gestión del riesgo para condiciones grado 1, 2 y 3 y condición peligrosa por la criticidad del activo.
Torres en riesgo de deslizamiento	Eliminación de condiciones de riesgo (activación de amparos policivos)
Frecuencia de inspecciones	MCC + Inspecciones con dron a riesgos identificados. Intensificación de inspecciones desde helicóptero
Activos cuestionados	Eliminación de condiciones de riesgo para zonas con mayor porcentaje de generación hidráulica
Priorización de actividades	Anticipación en la ejecución de actividades según criticidad del activo
Tasa de fallas en líneas de transmisión	De acuerdo al MCC + incremento de frecuencia de inspecciones por aumento de descargas atmosféricas
Contaminación de aisladores	No se lava por aumento de precipitaciones (medición de corrientes de fuga)
Gestión del Backlog	Anticipación de las actividades de acuerdo a la criticidad del activo
Gestión de repuestos	Distribuida en áreas de mayor riesgo operativo
Termografía	De acuerdo a MCC
Sistemas de refrigeración de equipos inductivos	
Ventilación tableros de control y protección (en salas a intemperie)	
Incendios forestales	
Protecciones mecánicas de equipos inductivos	Incrementar pruebas de aislamiento (implementación de relés de sello)
Torres en riesgo de colapso	Intensificación de contratación de proveedores de diseños y negociadores de predios (licencias ambientales). Validación de stock de torres de emergencias
Tiempos de atención de subestaciones	Refuerzo esquemas de disponibilidad en zonas de riesgo operativo
Disponibilidad	Análisis de costo, riesgo y desempeño de las máximas horas anuales de indisponibilidad
Intervenciones correctivas con desconexión de activos	Incremento de consignaciones con riesgo de disparo. Se aplica TCT en la medida que las condiciones de humedad lo permitan.

Tabla 6. Ajustes estrategia en fenómeno de la niña

3.3.1 Efecto de la humedad en la confiabilidad de las protecciones mecánicas. En invierno, la humedad es causante de los disparos indeseados en equipos inductivos, ya que en gabinetes que se encuentran a intemperie, y por la condensación del agua, esta puede ingresar a los componentes eléctricos y electrónicos y puede generar cortocircuitos en los contactos normalmente abiertos de las protecciones mecánicas, los cuales solo deben cerrarse en caso de falla real.

En la figura 6, la bobina T debe energizarse únicamente cuando se detecta una sobrepresión por presencia de gases en el aceite del transformador, con lo cual debe cerrar los contactos 1 y 2 y así abrir el interruptor de potencia del equipo, protegiendo el transformador.

Sin embargo, en invierno, el ingreso de agua en los gabinetes de control y protección a intemperie (por efecto de las intensas lluvias), pueden generar un camino eléctrico y ocasionar el cierre “accidental” de los contactos 1 y 2, ocasionando disparos indeseados sobre el transformador.

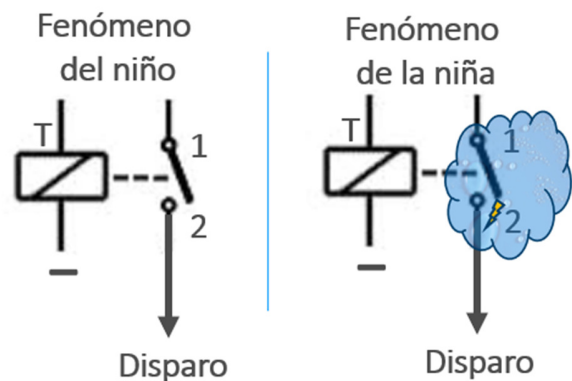


Fig. (8). Pérdida de aislamiento en protecciones mecánicas de equipos inductivos [5].

Normalmente el aislamiento entre los contactos 1 y 2 debe ser mínimo de 1 megohmio por cada kilovoltio nominal, por lo que en invierno deben realizarse pruebas adicionales (implican desviación del PAM) para asegurar que el aislamiento está en el rango, que no hay humedad

en los gabinetes y que por lo tanto la operación de las protecciones mecánicas es confiable.

3.3.2 Priorización de condiciones de riesgo por corrosión. Según la tabla 7, para estructuras de torres de transmisión y de herrajes, la corrosión se clasifica en grados 1, 2 y 3.

Grado Corrosión	Característica	Priorización o acción
1	No hay pérdida de material (cambio de color)	Sólo hacer seguimiento
2	Perdida de material hasta 20%.	Se puede intervenir después de 6 meses
3	Perdida de material desde el 20%.	Intervenir antes de 6 meses

Tabla 7. Gestión de corrosión sin cambio climático

Durante fenómenos climáticos o cuando el sistema está muy exigido y las restricciones deben ser mínimas, se crea una categoría adicional para la clasificación de la corrosión que es “condición peligrosa”, la cual tiene en cuenta la criticidad del activo ajustada al fenómeno y su atención deber ser siempre inmediata.

4. Conclusiones y recomendaciones

Uno de los factores claves de éxito para asegurar la confiabilidad de un sistema de transmisión de energía es la excelencia en la gestión de sus activos, y para ello es necesario contar con sistemas flexibles y adaptables que permitan de manera ágil y oportuna el ajuste de sus estrategias para afrontar de manera eficiente los cambios climáticos inesperados o por fuera del tiempo estimado, los cuales son cada vez más frecuentes en la actualidad.

REFERENCIAS

[1] IDEAM, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, "Informe Técnico Diario de Condiciones Hidrometeorológicas, Alertas y Pronósticos (ITD)", Enero, 2025.

[2] IDEAM, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, "Informe Técnico Diario de Condiciones Hidrometeorológicas, Alertas y Pronósticos (ITD)", Enero, 2024.

[3] ITM, Instituto Tecnológico Metropolitano, "Flujo de potencia óptimo para redes radiales y enmalladas empleando programación semidefinida", Artículos de investigación. Medellín, Colombia. 2017.

[4] Comisión de Regulación de Energía y Gas. Resolución CREG 011. Colombia. 2009.

[5] Ingeniero Marino, Plataforma Especializada en la Promoción de Empresas del Sector Naval y Servicios para Profesionales del Mar., "Electricidad(II). Elementos de Control y Maniobra. España. 2019.

Edgar Andres Zúñiga Medina

Ingeniero electricista de la Universidad de Antioquia, maestría en administración de negocios de la Universidad Politécnica de Madrid y certificado en gestión de activos del Institute of Assest Management. Desde el año 2012 trabaja en el grupo ISA y actualmente como director del Centro de Transmisión de Energía Noroccidente de ISA INTERCOLOMBIA, es responsable de asegurar la prestación del servicio de energía confiable en esa parte del sistema de transmisión colombiano. Con 23 años de experiencia en el sector eléctrico, también ha trabajado en gestión de proyectos, consultoría e ingeniería en ABB, Siemens e IEB SA.

NOTA:

1. Nombre del autor. Edgar Andrés Zúñiga Medina
2. Teléfono. 311 6351665
3. Dirección del autor. Carrera 38 No 6BSur 33 Apto 402, Medellín, Colombia.
4. Email. ezuniga@intercolombia.com