

1. Resumen

Los equipos inductivos son parte fundamental de cualquier sistema eléctrico. El alto costo de compra, reparación y mantenimiento han llevado buscar optimizaciones que permitan garantizar el adecuado ciclo de vida de estos activos. A continuación, se presenta una metodología para el mejoramiento en dicho ciclo de los equipos inductivos de ISA-INTERCOLOMBIA, mediante la gestión integral al proceso durante la etapa de creación, mostrando los beneficios en la calidad y oportunidad de instalación, aumento de vida útil y reducción de costes de mantenimiento, todo a través de un enfoque basado en costo, riesgo, desempeño.

Palabras Clave— Gestión activos, equipos inductivos, montaje, ciclo de vida.

2. Introducción

El sistema de transmisión asociado al proyecto de generación Hidroituango [1] incluye la instalación de 7 Autotransformadores (500/230/34.5 kV) y 38 reactores de línea (500 kV) para compensar los efectos capacitivos que se presentan en las líneas de transmisión [2].

Para cumplir este propósito ISA e INTERCOLOMBIA, desde hace varios años, han confiado todo el proceso asociado a los equipos inductivos, al personal propio de las áreas de operación y mantenimiento, construcción de proyectos e ingeniería, cambiando esquemas anteriores donde por lo general, todas las obras se ejecutan a través de contratistas. Para el caso de este proyecto, se estructuró al interior de la organización equipos de trabajo y metodología que permitieran ejecutar la instalación de todos los equipos

requeridos, con la calidad, rigurosidad y seguridad requeridas y en los tiempos estipulados para los diferentes proyectos y subestaciones.

La gestión se realiza de manera integral durante todo el proceso, desde la etapa de construcción, comprendiendo las especificaciones técnicas, desarrollo de proveedores y aliados estratégicos, revisiones de diseño, pruebas en fabrica, transporte, ubicación en sitio, instalación y puesta en servicio, hasta el acompañamiento y seguimiento en las etapas de operación y mantenimiento

Los logros van desde una mayor calidad en la instalación de equipos, aseguramiento del conocimiento de los equipos instalados. menor tiempo de instalación sin afectar la seguridad ni la calidad, reducción en los costos de instalación, reducción en el índice de mantenimiento de los equipos, mejores índices en gestión ambiental y de seguridad, y transferencia de conocimiento al personal encargado de la operación y mantenimiento de los equipos.



Figura 1. Reactor de línea monofásico.

3. Características De Los Equipos Inductivos

- Descripción: Reactor de línea monofásico, Autotransformador monofásico
- Capacidad Nominal: 20, 16.7, 13.3, 150 MVAr

- Tensión Nominal: $\frac{500}{\sqrt{3}} \text{ kV}$
- Corriente Nominal: 69.3, 57.9, 45.1, 520 A
- Frecuencia: 60 Hz
- Sistema de Refrigeración: ONAN, ONAF1, ONAF2.

4. ISA-INTERCOLOMBIA Grupo De Equipos Inductivos

Equipo multidisciplinario conformado de la siguiente manera:

- Área de ingeniería
- Gestor de proyecto
- Director CTE Noroccidente
- Analista de mantenimiento
- Ingeniero de Mantenimiento de Subestaciones
- Ejecutores de mantenimiento
- Contratista líneas

ISA-INTERCOLOMBIA cuenta con más de 40 años de experiencia en instalación, operación y mantenimiento de equipos inductivos.

El ingeniero encargado actualmente del grupo cuenta con más de 20 años en el área de equipos inductivos, y ha sido responsable del montaje de más de 100 equipos.

Los ejecutores de mantenimiento y el grupo de apoyo del contratista de líneas cuentan con años de formación en los procesos asociados a los equipos inductivos, lo que ha permitido que actualmente se cuente con un grupo que combina competencias académicas, técnicas y experiencia en la intervención de equipos inductivos.

Hasta el momento, este grupo ha liderado y llevado a cabo el ensamble, montaje y puesta en servicio de alrededor de 120 equipos inductivos. La relación de estos equipos se lista a continuación:

- Autotransformadores 500 y 230 kV 59
- Reactores de línea 500 y 34,5 kV 60



Figura 2. 15 reactores de línea, S/E Antioquia, Colombia.

Desde un enfoque costo, riesgo, desempeño, se observa lo siguiente:

Costos:

- Costo de capacitación del personal.
- Costo de entrenamiento en campo.
- Costo de conservar el grupo inicial en todas las instalaciones.

Beneficios:

- Tiempos de instalación de equipos mínimos, garantizando la calidad técnica, seguridad y rigurosidad en la ejecución de trabajos
- Capacidad de interpretar fallas e identificar anomalías.
- Interiorización y homologación de procesos y procedimientos
- Métodos alternativos de instalación de equipos.
- Mayor oportunidad en la solución de anomalías y propuestas hacia los mismos fabricantes.
- Mayor competencia técnico para el personal que participa en el proceso con la transferencia de conocimiento
- Capacidad y competencia para realizar montajes de volúmenes considerables de equipos y de manera simultánea.

Metodología: Con la experiencia adquirida a través de los años, la formación técnica y buscando optimizar los tiempos y costos de montajes sin perder calidad y confiabilidad, el grupo de equipos inductivos tiene identificada una serie de acciones que permiten alcanzar el objetivo propuesto:

Planeación efectiva: Se reducen los tiempos de instalación al coordinar la llegada de equipos al sitio, ubicación en nichos y ubicación de accesorios cerca a los sitios finales de montaje antes de que llegue el grupo de trabajo.

Redundancia de equipos: El grupo de trabajo cuenta con plantas de tratamiento de aceite con termovació, plantas y bombas de vacío, plantas de aire seco, grúas, carrotanques cisterna, entre otros, para realizar actividades simultaneas en varios frentes de trabajo, con la calidad requerida que permiten contar con la capacidad de ensamblar gran cantidad de equipos en tiempos mínimos y reducidos comparados con los montajes convencionales.

Así mismo, durante la ejecución de los procesos se han implementado herramientas y equipos para hacer los trabajos de manera más efectiva, como el desarrollo de sistemas portátiles conformados por bombas y reforzadores mecánicos instalados sobre ruedas, para el proceso de vacío en equipos inductivos, que garantizan un mejor desempeño que el logrado con equipos convencionales.

Grupos de trabajo: El personal que conforma el grupo está capacitado para realizar diferentes actividades del proceso, lo que permite tener flexibilidad con el personal para reducir o incrementar el recurso requerido para ejecutar una tarea.

Procesos simultáneos: Varios procesos se aplican de manera simultánea en varios equipos, por ejemplo, el proceso de vacío se ha optimizado cumpliendo los requerimientos de fabricantes, llegando a aplicar vacío a 6 unidades simultáneamente. La reducción del tiempo efectivo supera el 50%. En la figura 3 se observa un proceso de vacío simultaneo a 6 reactores.

Definición de secuencias de actividades: Se define la secuencia más óptima para ejecutar los procesos, teniendo en cuenta cuales recursos son compartidos por varis equipos, cuáles individuales, etc. Por ejemplo, en la etapa de

ensamble, es más eficiente realizar el montaje de tanques conservadores y radiadores individualmente, mientras que el proceso de vacío y llenado se puede realizar de manera simultánea a varias unidades.

5. Acompañamiento Durante Ciclo De Vida Del Activo

A continuación, se presentan todas las etapas en la creación de un activo y como desde ISA-INTERCOLOMBIA se realiza una gestión integra, garantizando que anomalías iniciales, que puedan conllevar fallas infantiles del equipo, sean solucionadas.

Especificaciones del equipo: Según las necesidades del proyecto, las áreas necesarias de la empresa y el personal del grupo de equipos inductivos realiza revisión y elaboración de una Especificación Técnica Normalizada (ETN) que se envía al fabricante, en ella se solicita que el equipo a fabricar cumpla con una serie de características técnicas requeridas. El fabricante del equipo debe igualar o mejorar estas características garantizadas.

Una correcta especificación del equipo, es el primer paso para garantizar que en sitio se cuente con un equipo que suple las necesidades y requerimientos del proyecto, y no se identifiquen de manera tardía anomalías que solo se pueden solucionar al momento de diseño y construcción del equipo.

Las características garantizadas de un equipo inductivo van desde el nivel de tensión, soportabilidad ante diferentes tipos de impulso, capacidad, hasta accesorios y nivel de contaminación del sitio de instalación.

Revisión de diseño: Despues de entregar al proveedor las especificaciones y características garantizadas del equipo, este debe enviar para

aprobación un diseño que cumpla con lo solicitado.

Se considera la oportunidad para el fabricante de demostrar a ISA-INTERCOLOMBIA que el equipo que fabricará cumple las especificaciones solicitadas.

El área de ingeniería de ISA-INTERCOLOMBIA realiza un análisis, para garantizar que cumplen las necesidades del proyecto y solicitar las correcciones necesarias en caso de que exista alguna desviación

Aspectos a tener en cuenta:

- La revisión de diseño se debe realizar antes de iniciar el proceso de fabricación.
- Deben estar claros todos los puntos que pretende verificar.
- El fabricante debe enseñar todos los cálculos y diseños del proyecto.
- La revisión de diseño se debe realizar en la fábrica
- Suministro del fabricante de un cronograma detallado de la fabricación incluyendo todas las etapas del proyecto, adquisición de materia prima, accesorios y componentes, montaje, pruebas y embalaje para despacho.
- Elaborar plan de inspección,
- Suministrar circuitos de ensayo que serán utilizados durante las pruebas.

Aspectos a tener en cuenta diseño eléctrico:

- Características y dimensiones del núcleo
- Características del aislamiento de devanados
- Diseño de aislamiento
- Diseño térmico
- Diseño de cortocircuito
- Calculo de nivel de ruido
- Accesorios principales

Aspectos a tener en cuenta diseño mecánico:

- Fabricación y sistema sujeción del núcleo
- Sistema de aislamiento del núcleo
- Prensado de devanados
- Conexiones entre devanados

- Área de los cables
- Capacidad de corriente

Inspección en fábrica: Se realiza con el objetivo de verificar la calidad de la fabricación del equipo que se solicitó y que sus características constructivas coincidan con el diseño presentado.

Un control en la etapa de fabricación permite reducir fallas en la interpretación de los diseños y evitar que algún equipo salga de fábrica con anomalías.

Aspectos a tener en cuenta:

- Recepción, almacenamiento e inspección de materias primas, componentes y accesorios.
- Proceso y control de fabricación.
- Ensayos intermedios
- GP del aislamiento sólido sea el requerido.
- Medida de humedad en celulosa que garantice un bajo porcentaje.
- Garantizar que el diseño eléctrico y mecánico permita tener una operación adecuada durante todo su ciclo de vida.

Pruebas en fábrica: Se realizan con el objetivo de garantizar que el equipo opere de acuerdo a los valores establecidos en el diseño, verificar que no haya defectos de fabricación y garantizar la soportabilidad ante fallas simulando condiciones críticas dentro del laboratorio.

Tipos de pruebas:

- Elevación de temperatura
- Medición del nivel de ruido
- Medida de resistencia de devanados
- Medida relación de transformación y polaridad
- Medida de impedancia de cortocircuito y perdidas bajo carga
- Medida de pérdidas en vacío y corriente de excitación
- Medida de resistencia de aislamiento de devanados
- Medida de resistencia de aislamiento del núcleo

- Medida de factor de potencia del aislamiento de devanados
- Prueba de impulso atmosférico
- Prueba de impulso de maniobra
- Prueba de tensión inducida AC de larga duración con medición de descargas parciales
- Prueba de soporte de tensión de fuente separada AC
- Prueba de soporte de tensión inducida AC de corta duración
- Medición de contenido de armónicos en la corriente de excitación
- Prueba de análisis de barrido de frecuencia de devanados (SFRA)



Figura 3. Pruebas en fábrica de equipos

Recepción y pruebas en puerto: Los equipos se transportan por vía marítima. Con el objetivo de garantizar que lleguen en buenas condiciones se prueban en puerto de destino por funcionarios de ISA-INTERCOLOMBIA.

Con el fin de garantizar las condiciones del equipo es necesario ejecutar:

- Pruebas SFRA para garantizar que la estructura interna del equipo no ha sufrido alteraciones. Se debe contar con las pruebas realizadas en fabrica bajo los mismos parámetros, con el fin de realizar los análisis y comparaciones para determinar anomalías.
- Medidas de porcentaje de humedad en parte activa del equipo para verificar con respecto a la medida de fábrica. ISA-INTERCOLOMBIA tiene un límite de aceptación del 0.5% en contenido de humedad. Un equipo que se identifique con un valor de humedad por encima de lo especificado, debe

ser sometido a un proceso de secado antes de iniciar su ensamblaje.

Recepción en subestación: Una vez los equipos se encuentren en sitio, se debe realizar una verificación para determinar el estado en el que llegaron posterior al transporte y confirmar que no se tenga afectación sobre los mismos. Se realiza:

- Inspección al registrador de impactos para confirmar que no se presentaron movimientos que puedan dañar componentes de la parte interna.
- Inspección de la presión de gas en cilindro de transporte y en la cuba del equipo inductivo.
- Prueba de aislamiento entre núcleo, viga y tierra.

Proceso de montaje: La metodología y secuencia para el montaje de equipos inductivos consiste en:

- Instalación de radiadores y tanque conservador
- Preparación de bujes y porta CTs
- Inyección de aire seco para mantener presión positiva y evitar ingreso de humedad y partículas a equipo.
- Conexión de los bujes.
- Instalación de tornillería y sellado entre bujes y el reactor
- Proceso de vacío, una vez se encuentre hermético el equipo para garantizar niveles de humedad mínimos dentro del mismo. El proceso requiere llegar a valores inferiores a 1 torr en el equipo, mantener el proceso durante 1 hora y parar.
- Despues de ensamblado, se realiza inyección de aire seco para que los equipos queden con una presión positiva de 3 PSI para posteriormente realizar prueba de estanqueidad a las 12 horas.
- Se continúa con un proceso de termo vacío al aceite, que consiste en hacer circular el aceite dieléctrico por una planta de tratamiento que por medio de resistencias aumenta la temperatura del aceite hasta

- alcanzar 60°C para aumentar la rigidez dieléctrica, y simultáneamente aplica un proceso de vacío para retirar humedad y desgasificar el aceite, garantizando las condiciones óptimas para realizar el llenado
- Posteriormente, se realiza el llenado de aceite, que debe estar a una temperatura de 60 °C y una rigidez dieléctrica igual o superior a 60kV. El vacío durante el proceso de llenado se mantiene a una presión igual o inferior a 1 torr.
 - Despues del llenado, se realiza recirculación, del aceite con el objetivo de impregnar parte activa, desgasificar, aumentar rigidez dieléctrica, retirar humedad y disminuir el contenido de partículas [3].



Figura 4. Montaje de reactor de línea.

Equipos

- Planta de vacío. Capacidad: $5400\ m^3$
- Planta tratamiento de aceite. Capacidad: $6000\frac{L}{H}$
- Planta de aire seco
- Bomba de vacío y reforzador mecánico (Booster) portátil. Capacidad: $1800\ m^3$
- Tanque cisterna. Capacidad 33000 L
- Planta diésel (Donde no se cuente con red comercial). Potencia: 250 kVA.
- Transformador seco. Potencia: 250 kVA.

Acompañamiento del fabricante: Para asegurar contar en sitio con oportunidad de respuesta del fabricante y cumplir con sus procesos de manera que no se afecte la garantía, se exige al fabricante que en sitio se cuente con un

supervisor de fábrica durante el proceso de montaje.

Pruebas finales: Para garantizar el estado final de los equipos y la trazabilidad para la vida útil del equipo, se realizan pruebas eléctricas:

- Factor de potencia
- Corriente de excitación
- Resistencia de aislamiento del devanado
- Resistencia de aislamiento de CTs
- Curva de saturación de CTs
- Relación de transformación y polaridad de CTs
- Prueba de aislamiento protecciones electromecánicas
- Resistencia de aislamiento núcleo-viga
- Resistencia de devanados
- Prueba SFRA
- Pruebas aceite dieléctrico

Si alguna de estas actividades se desvía de los rangos aceptados, es necesario revisar y tomar los correctivos que sean necesarios.

Puesta en servicio: Antes de energizar los equipos se debe de verificar lo siguiente:

- Nivel de aceite y gel silica.
- Válvulas en posición correcta.
- Correcta conexión equipo-puesta a tierra.
- Correcta conexión de circuitos de protección y alarma
- Circuito secundario de CTs cerrado
- Energizar de forma gradual monitoreando temperatura, aceite y devanado.

Mantenimiento: El primer mantenimiento que recibe el equipo es el preventivo de 12 años, al contar con un equipo propio de la empresa con experiencia, se garantiza una mayor calidad en el montaje y una atención completa a las anomalías que se presentaron, permitiendo pasar de un mantenimiento inicial de 3 años a 12 años.

6. Beneficios Desde Enfoque: Costo, Riesgo, Desempeño

El objetivo es gestionar el activo, de manera que se genere un valor agregado, disminuyendo y controlando los riesgos, optimizando los costos y en beneficio de su desempeño.

Tener el grupo de equipos inductivos involucrado durante toda la etapa de creación del activo, ha generado:

- Reducción en el costo de montaje de los equipos, al realizar los trabajos liderados con personal propio y no a través de una compañía contratista.
- Fortalecimiento del conocimiento y generar experiencia de todos los involucrados en las diferentes etapas del proceso, dejando como resultado un grupo de trabajo con competencias especializadas y fortalezas muy especiales y particulares para montajes de equipos inductivos
- Mayor competencia en los ejecutores de mantenimiento que participan en el proceso generando más conocimiento de los equipos, y procesos, permitiendo una mayor oportunidad y calidad para tomar decisiones en un mantenimiento o durante la atención una falla.
- Menor tiempo de entrega. Se ha logrado evidenciar que el montaje de los equipos se realiza en un tiempo muy inferior a las referencias que se tienen en el mercado.
- Mayor calidad en la instalación de equipos. Al contar con un grupo con experiencia, se garantiza que las anomalías encontradas se resuelvan de manera oportuna, y que los equipos se instalen de forma correcta, cumpliendo tanto los estándares y requerimientos de calidad propios de la empresa y de los fabricantes.
- Reducción en costos por mantenimiento. Dado que el acompañamiento a los reactores se realiza de manera integral, se garantiza la calidad desde el montaje, repercutiendo directamente en la

disminución de fallas y aparición de anomalías mayores y menores en la vida inicial del activo con lo que se puede aumentar el periodo que permanece el equipo antes de su primer mantenimiento y se disminuye la aparición de modos de falla asociados a correctivos, por lo que el tipo de mantenimiento a realizar será preventivo.

- Cumplimiento de cronogramas y entrega de equipos en los tiempos establecidos por ISA INTERCOLOMBIA
- Solución oportuna de anomalías presentadas durante montaje, cuya fuente son inconvenientes en los equipos y accesorios suministrados por el fabricante y en la mayoría de casos, sin incurrir en costos adicionales de montaje
- Identificar anomalías en equipos suministrados, que de otra manera serían difíciles que un contratista externo observara.
- Cuestionamiento técnico oportuno a los proveedores y fabricantes por posibles desviaciones de lo especificado y requerido.

7. Balance Ambiental, Seguridad y Salud en el Trabajo

Como herramienta de administración y control de para evitar impactos ambientales negativos, se coordina que siempre permanezca una persona encargada de seguridad, salud y manejo ambiental. Antes de iniciar cualquier tarea, se elabora un panorama de riesgos y un plan de manejo ambiental, documentos y procesos con los que se administran los riesgos y gracias a los cuales se han obtenido excelentes resultados y cero impactos negativos al medio ambiente y la seguridad y salud de las personas.

8. Conclusiones

- El conocimiento y experiencia del grupo de equipos inductivos de ISA-

INTERCOLOMBIA ha permitido instalar equipos inductivos con una mayor calidad, menor tiempo y menor costo, comparado con las referencias que se logran obtener en el mercado.

- La gestión del grupo de equipos inductivos de manera integral durante todas las etapas del proceso de creación, permite garantizar que los equipos inicien su vida útil en condiciones óptimas de calidad.
- Se ha realizado el montaje de 15 equipos inductivos (reactores de 500kV) en un tiempo real de 38 días, lo cual es considerablemente menor que la referencia que tiene del mercado, donde los cronogramas propuestos son alrededor de 75 días
- Se genera una reducción en los costos de montaje al utilizar personal propio para liderar el proceso y disminuir los tiempos de montaje.
- Con cada ejecución de montaje, las fortalezas técnicas y teóricas del grupo de amplían, capitalizando experiencias y generando acciones de mejora continua que se implementan en los trabajos de montaje siguientes.
- Se garantiza que la vida útil del equipo no se afecte por una anomalía que se puede gestionar en la etapa de creación, generando valor agregado con la oportunidad de intervención y las señales prematuras dadas por el grupo técnico que interviene en el proceso, gracias a su conocimiento y experiencia.
- El ciclo de vida se ve impactado muy significativamente con la gestión integral del grupo de equipos inductivos en la etapa de creación del activo, teniendo un enfoque de costo, riesgo y desempeño para determinar las tareas, acciones, secuencias y procedimiento a implementar en las diferentes etapas del proceso, disminuyendo considerablemente la aparición de modos de falla en la etapa inicial y

de operación del equipo. Generando así un valor agregado a las etapas siguientes de la vida útil del equipo, reduciendo las necesidades de intervención de mantenimiento y limitándolas a pruebas, monitoreo preventivos y predictivos, reduciendo costos y recursos necesarios. Así mismo, existe una alta probabilidad que se permita extender su vida útil y disposición final, agregando valor a la compañía.

Jorge Arturo Montoya Osorio: Ingeniero Electricista de la Universidad Cooperativa de Colombia, especialista en equipos inductivos, primer equipo inductivo ensamblado en 1997. 34 años de servicio en INTERCOLOMBIA.

David Nereo Ballesteros Lopez: Ingeniero Electricista de la Universidad Tecnológica de Pereira, 10 años de experiencia en el área de operación y mantenimiento de subestaciones en INTERCOLOMBIA.

Referencias

[1] The Report Colombia 2014, Nueva York, Oxford Business Group, pp 113, 2014

[2] Gilberto Enríquez Harper, Elementos De Diseño En Subestaciones Eléctricas, Ciudad de México, Editorial Limusa, 2005

[3] M. Horning, J. Kelly, S. Myers, R Stebbins, Guía Para El Mantenimiento Del Transformador, Transformer Maintenance Institute, 2005

Jorge Arturo Montoya Osorio

(4) 3157182 - 3126055589

Calle 12 Sur 18-168 Bloque 1 piso 2 y 3

jamontoya@intercolombia.com

Medellín, Antioquia, Colombia

David Nereo Ballesteros Lopez

(2) 2801300 - 3117488562

Vía Aeropuerto Yumbo, Km 1

dnballesteros@intercolombia.com

Cali, Valle del Cauca, Colombia