

Empalmes: compresión o preformados, un análisis de caso en la toma de decisión para líneas de 230 kV

F. ROJAS Y J. VALENCIA

Carrera 9 # 73-44

frojas@geb.com.co - jvalencia@geb.com.co

300 5653341- 322 9063189

Resumen

Este trabajo presenta un análisis de decisión de mantenimiento con base en la selección de dos tipos de empalmes con tecnologías distintas: compresión y preformados, presentando los parámetros técnicos de cada uno, las diferencias operativas para su instalación y su respectiva variación en costos, además una breve evaluación de riesgos de Seguridad y Salud en el Trabajo de acuerdo con la diferencia de exposición.

Palabras clave: empalmes de compresión, empalmes preformados

Introducción

Uno de los factores claves en el adecuado funcionamiento de las líneas de transmisión tiene que ver con la confiabilidad mecánica y eléctrica de los conductores. Típicamente las inspecciones rutinarias identifican condiciones de degradación que pueden llevar a la pérdida de la función del elemento, en búsqueda de implementar acciones de mantenimiento para llevar el activo de nuevo a su condición operativa óptima.

Uno de los elementos que genera mayor interés en las líneas de transmisión y en el que se invierten recursos para predecir su estado son los empalmes, agrupación que incluye los

manguitos de anclaje. Estos elementos en general pueden ser de dos tipos, los de compresión y los preformados. Los primeros son elementos mecánicos que son ponchados sobre cada uno de los materiales de acuerdo al tipo de conductor, por ejemplo, en conductores ACSR existe un elemento que permite unir los hilos internos de acero y otro que permite la unión de los hilos externos de aleación de aluminio. Los segundos son elementos preformados constituidos por grupos de varillas de condición y material similar al del conductor, que se arrollan (tejen) sobre cada tipo de material del conductor, con una terminación mecánica similar al trenzado de cada conductor.

Empalmes de compresión

Los empalmes de compresión tienen una técnica de instalación que debe ser asegurada cuidadosamente para garantizar los parámetros mecánicos de ruptura y su vida útil [1]. Para su correcta instalación se debe garantizar el uso de los dados de compresión adecuados, que son relevantes para asegurar las condiciones mecánicas de compresión final del empalme, de acuerdo con el tipo de conductor, marca del empalme y tipo de material. El aseguramiento de las propiedades mecánicas de los dados no es algo trivial, se evidencian varios casos en los cuales los dados han perdido sus medidas originales, generando una compresión con

tolerancias más elevadas que las recomendadas, lo que afecta la capacidad mecánica del empalme y puede llegar a afectar su vida útil.

Un aspecto adicional que debe ser expuesto tiene que ver con la fabricación de dados en el mercado local, la diferencia de precios es importante en relación con los dados suministrados por los fabricantes, sin embargo, se debe tener en cuenta que algunos fabricantes en el país no pueden garantizar los parámetros de dureza y tolerancia de los materiales, lo cual se evidencia en campo cuando al hacer los controles de calidad respectivos se encuentra que las medidas finales del empalme no se cumplen, por los parámetros iniciales de los dados o por su rápido desgaste. Al tratarse de elementos costosos los contratistas en diversas ocasiones usan elementos complementarios para “calzar” los dados y acercarse a las medidas recomendadas por el fabricante, esta práctica es sumamente riesgosa, ya que puede afectarse de manera importante la capacidad mecánica del mismo.

También se deben asegurar los aspectos relacionados con el equipo de empalme, las empalmadoras en general son equipos importados de alto costo, los operarios no son suficientemente capacitados para su uso y esto puede incidir directamente en la calidad de ejecución, por ejemplo, en el nivel operativo típicamente se tiene un control operativo relacionado con la presión que ejerce la empalmadora, sin embargo, los fabricantes no asocian sus variables de control con este parámetro, solamente con la distancia efectiva entre las caras del empalme, este tipo de prácticas podría generar un empalme ejecutado con parámetros distintos a los recomendados por el fabricante y nuevamente afectar su carga de ruptura o su vida útil.

En general las fallas operativas en la ejecución de empalmes son por mucho originadas en

ejecución defectuosa por parte de los operarios [2], los problemas derivados se pueden agrupar en fallas en la remoción de óxido de la superficie del conductor, falta de aplicación de grasas conductoras, fallas en la inserción del conductor en el empalme (no se inserta una porción suficiente), dados distintos a los definidos por el fabricante y herramientas desgastadas, los defectos de fabricación son muy raros [2]. Se debe tener en cuenta que la detección de este tipo de fallas en la etapa de operación es un proceso complejo y requiere una alta inversión, por tanto, es deseable que se implementen controles adecuados para asegurar una buena práctica de ejecución en las etapas de instalación.

Técnicas de diagnóstico de estado de empalmes de compresión

Un buen diagnóstico de empalmes es importante para garantizar la confiabilidad de las líneas de transmisión. No es fácil encontrar estadísticas de fallas de estos elementos, sin embargo, en un estudio en una gran empresa de servicios de electricidad se encontró que en un periodo de 10 años se presentaron 15 fallas de estos elementos en una red equivalente de 9600 km [3]. A partir de esta información se tendría una tasa de falla de 1 empalme por cada 640 km en un horizonte de 10 años.

Sin pretender una conclusión a partir de solamente una fuente de información se puede denotar que la falla en este tipo de elementos puede llegar a tener una probabilidad importante de materialización, además, tan solo una falla en este tipo de elementos puede generar impactos catastróficos entre los que se podrían denotar [3]:

- Lesiones importantes a pobladores cercanos a la línea
- Pérdida de continuidad en el servicio y penalizaciones asociadas

- Costos de reparaciones de infraestructura
- Pérdida de confiabilidad en la estructura de gestión del mantenimiento

Una estimación sencilla de costos puede dar luces de la importancia de evitar fallas en estos elementos, en general es muy importante tener una técnica complementaria a la inspección visual que permita estimar daños en los empalmes en las etapas iniciales para permitir una adecuada gestión. Las fallas en los empalmes en general están ocultas ya que en su mayoría se gestan en el interior, en las uniones de los materiales [3].

Bajo este panorama existe una importante preocupación para predecir el estado de estos elementos, las técnicas de predicción de fallas y vida remanente de empalmes son típicamente cuatro, la termografía: que busca parámetros de temperatura fuera de rangos que se relacionan con desgastes por corrosión y aumento de resistencia eléctrica, la inspección ultravioleta: que busca estimar las descargas parciales que se generan en las juntas del elemento, la medición de micro resistencia eléctrica: que busca correlacionar la resistencia eléctrica del elemento con la corrosión y las malas prácticas de instalación, finalmente los ensayos de tensión mecánica de ruptura que miden con pruebas destructivas la disminución de la carga mecánica máxima de ruptura del elemento. La termografía debe ser aplicada durante la condición operativa normal del elemento, así mismo la inspección ultravioleta, la medición de resistencia presenta mejores resultados cuando se implementa en un laboratorio, aunque puede ejecutarse en condición operativa, pero a costos muy altos. En relación con los ensayos de tensión de ruptura por su característica solo pueden aplicarse en laboratorios.

En marco de la inspección y detección temprana, las técnicas de termografía y cronografía son las más usadas, la termografía es por mucho más económica que cualquiera de las otras técnicas, pero tiene varios aspectos externos que inciden en su impacto y en muchas ocasiones impiden una adecuada interpretación de las variables o generan errores en la medición, con lo cual las fallas en los elementos de compresión son detectadas en un estado muy avanzado de deterioro, incluso se puede presentar una falla en el elemento sin que se haya detectado señal de alarma durante las inspecciones termográficas.

Los principales aspectos que afectan este tipo de medición son en general:

- Enfriamiento por viento convectivo: los primeros indicios de falla generan calentamientos tenues en el elemento, con la interacción del viento convectivo este calentamiento puede resultar imperceptible para el equipo de termografía [3]
- Típicamente los termógrafos usan reglas de estimación de la velocidad del viento y corrección del mismo mediante escalas cualitativas, en muchas ocasiones estas reglas hacen que las mediciones se realicen en momentos donde el viento convectivo enfría los puntos calientes del elemento, aun cuando en condiciones óptimas podría ser perfectamente detectado por el equipo termográfico
- Los niveles pico de corriente de la línea se asocia a una mayor elevación de su temperatura, en general las inspecciones termográficas no se realizan coincidentes con los periodos de alta carga (donde se espera un mayor calentamiento) y se omite un análisis posterior con un modelo teórico que

podría evidenciar calentamientos tenues [3]

- La emisividad de los conductores y empalmes no es homogénea como algunos termógrafos interpretan, en conductores nuevos puede estar entre 0.1 y 0.3, mientras que para conductores envejecidos puede llegar a valores de 0.9, esta emisividad no puede ser fácilmente evaluada a la distancia del suelo, además, el delta de temperatura no es independiente de la emisividad, así, la selección errónea de la emisividad afectará directamente la medición del delta de temperatura [3]
- En la mayoría de los casos el calentamiento de los elementos se da en su interior, específicamente en las juntas de los elementos, el gradiente térmico entre este punto y la superficie que “ve” la termografía es en general muy alto, incluso de cientos de grados, en estos casos la cámara termográfica no puede censar adecuadamente este tipo de calentamiento [3]

Empalmes preformados

En general los aspectos expuestos hacen que sea necesario encontrar nuevas estrategias de estimación del estado de los empalmes o verificar la aplicación de empalmes con otras tecnologías que permitan solucionar los inconvenientes expuestos.

En ese sentido la industria ofrece una alternativa a los empalmes de compresión, los empalmes preformados, estos elementos tienen una técnica de instalación distinta que consiste en trenzar los hilos de acero o aluminio del empalme o maguito sobre los hilos del conductor lo más estrechamente posible, asegurando la inclusión de elementos de relleno cuando es necesario, y aplicando cuidadosamente pasta antióxido entre cada una

de las capas. Contrario a lo que podría pensarse la instalación no requiere herramientas y típicamente puede realizarse directamente con la mano, la capacitación para su instalación tiene una corta duración y de acuerdo con las especificaciones de los fabricantes luego de una instalación adecuada se pueden obtener tensiones de ruptura del 100% de la capacidad del conductor.

Técnicamente los empalmes preformados se componen de un conjunto de varillas de alambre de sección circular conformadas helicoidalmente que al colocarse sobre el conductor ofrecen protección eléctrica y mecánica para el mismo. Poseen buena conducción de corriente por ser fabricados con los mismos materiales básicos del cable.

Una variación de este tipo de elementos son las varillas de protección que comúnmente se utilizan con el fin de proteger el conductor de los efectos ocasionados por el aprieta de grapas de suspensión. Estas atenúan los efectos de las vibraciones eólicas en los conductores, que ocasionan fatiga en ellos y que contribuyen a la reducción de la vida útil del conductor.

Existen muchas soluciones con elementos preformados que son flexibles y se ajustan a las necesidades particulares de las actividades de mantenimiento, esta versatilidad que no se asocia a los elementos de compresión, permite destacar entre otras las siguientes ventajas:

- El agarre al sistema de conductores no es afectado por flexiones o vibraciones.
- Se eliminan esfuerzos concentrados
- Montaje rápido y en general con menores riesgos
- No se requiere el uso de elementos de fijación
- El montaje es manual por esta razón no se requiere el uso de equipos especializados para su instalación

- Restauración del 100% de las características eléctricas y mecánicas del conductor
- Elevada conducción de corriente
- Resistencia a la corrosión
- Resistencia a la fatiga
- Resistencia a la vibración
- Entrenamiento sencillo para su implementación
- Área de contacto bastante grande con baja compresión
- Bajo los criterios de seguridad adecuados pueden instalarse con técnicas de trabajo a potencial

Los elementos preformados podrían agruparse de manera general en las siguientes categorías:

Empalme de tracción total para cables ACSR: sirven para unir este tipo de cables en los que su seccionamiento es total o en donde requiera unirse dos extremos de conductor. El diseño del empalme asegura las tres capas de formación del conductor, una capa para el alma de acero, una capa de relleno de la misma que al sobreponerla logra el diámetro primitivo del conductor y la capa exterior que garantiza la capacidad de ruptura. Todos los empalmes están cubiertos de material antideslizante conductivo en su interior la cual entra en contacto con el conductor.

Empalme de reparación para tipos de cable ACSR Y AL-AL hasta un 25% de daño: estos empalmes restablecen el 100% de la conductividad eléctrica del conductor y garantizan la continuidad mecánica del mismo. Se utilizan para restaurar daños hasta el 25% de la capa exterior del conductor. El sentido de abrazamiento de los empalmes es en el mismo sentido de giro de la capa del conductor. Al igual que los empalmes para reparación del 100% de la sección del conductor, vienen con una capa antideslizante conductiva que

garantiza la entrada en contacto con el conductor.

Empalme de reparación cable para cables AL-AL (Daño hasta un 100%): se usan para reparaciones del 100% de daño de la capa exterior, al igual que en las recomendaciones anteriores el giro del enrodamiento del preformado debe ser en el mismo sentido que el giro de la capa del conductor, además, incluye la capa antideslizante conductiva para garantizar mejor agarre y sujeción a la capa exterior del cable conductor.

Retenciones preformadas: esta solución consiste en una serie de varillas helicoidales con lazo cableado en su centro con el fin de poder dar el giro necesario para cubrir la grapa o pieza donde realizara el soporte y material antideslizante en la zona de contacto con el cable. Estas soluciones garantizan capacidades de ruptura muy cercana a la capacidad de ruptura original del conductor.

Las recomendaciones de instalación son en extremo simples y pueden resumirse en:

- No deformar el material.
- No forzar la aplicación.
- No sobreponer las varillas.
- Nunca cortar el preformado
- No dejar el preformado suelto antes de su uso.
- Las características del cable y del preformado deben ser siempre compatibles y tener el mismo sentido de encordado.
- No reutilizar empalmes preformados, en caso de error en la aplicación se debe descartar el empalme y usar uno nuevo.
- Colocar preformados únicamente sobre los cables para los cuales fueron proyectados.

- No hacer empalmes en un cable a menos de 10m uno del otro.

En relación a la vida útil de este tipo de empalmes pruebas documentadas reportan ensayos en laboratorio con empalmes en condición operativa de más de cuarenta (40) años cuyos resultados muestran una mínima corrosión y ninguna pérdida en la máxima capacidad mecánica de ruptura [4]. Por otra parte, la junta entre los materiales del empalme y el conductor está mucho más cerca de la superficie por lo cual la técnica de termografía podría detectar problemas en etapas tempranas con mayor precisión.

Dos ventajas adicionales deben analizarse, la tecnología de tipo preformada tiene tiempos de instalación mucho menores que las asociadas a la de compresión, esto incide de manera directa en los costos y además en el tiempo de exposición de los trabajadores que ejecutan la actividad. Una comparación sencilla puede mostrar que para la implementación de un elemento preformado se invierte entre el 30 y 40% del tiempo requerido para la instalación de un elemento de compresión, esto implica que la exposición de los trabajadores al alto riesgo de trabajo en alturas se reduce ostensiblemente. En ese mismo sentido los empalmes preformados no requieren el seccionamiento del conductor, con lo cual uno de los mayores riesgos de este tipo de mantenimientos sería mitigado.

La otra es la reducción de costos al implementar una solución preformada, de acuerdo con la baja complejidad de la técnica de instalación y sus tiempos de implementación menores, la reducción de costos puede llegar a ser de más del 35%, cifra que puede aumentar de acuerdo con la magnitud de los trabajos, esto sumado a la reducción de riesgos operativos durante la instalación hace que esta tecnología pueda ser

considerada como una opción viable a la de compresión.

Se debe aclarar que los empalmes preformados son aproximadamente un 13% más costosos que los de compresión, sin embargo, en trabajos de gran envergadura este sobre costo en materiales resulta marginal con relación a los costos operativos de instalación, logística, transporte, herramientas, entre otros.

Análisis de caso de costos reales

Como parte final se presentará una comparación de costos reales en un trabajo de líneas de transmisión relacionado con la instalación de 236 elementos preformados en una línea a 230 kV, en vanos que suman una longitud de 15 km, comparado con el mismo trabajo usando elementos de compresión.

Tabla 1: Costos asociados a elementos de compresión

Item	Unidad	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
Costos de mano de obra para instalación	Gb	1,00	\$ 1.120.521.708	\$ 1.120.521.708
Materiales y herramientas para apoyos mecánicos adicionales	Gb	1,00	\$ 5.000.000	\$ 5.000.000
Transporte de materiales y herramientas	Gb	3,00	\$ 3.000.000	\$ 9.000.000
Elementos de compresión	Gb	1,00	\$ 102.967.309	\$ 102.967.309
			Total	\$ 1.237.489.018

Tabla 2: Costos asociados a elementos preformados

Item	Unidad	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
Costos de mano de obra para instalación	Gb	1,00	\$ 617.256.951	\$ 617.256.951
Materiales y herramientas para apoyos mecánicos adicionales	Gb	0,00	\$ 5.000.000	\$ 0
Transporte de materiales y herramientas	Gb	3,00	\$ 3.000.000	\$ 9.000.000
Elementos prefabricados	Gb	1,00	\$ 153.131.404	\$ 153.131.404
			Total	\$ 779.388.355

Con el análisis de costos resumido anterior se puede mostrar que en trabajos de gran magnitud se pueden llegar a ahorros cercanos al 40%.

Conclusiones

Dentro del mercado existen dos tecnologías preponderantes para ejecución de empalmes de compresión en líneas de transmisión, la relacionada con empalmes de compresión y la asociada a empalmes prefabricados, ambas tienen desempeño mecánico y eléctrico similar. Los primeros tienen condiciones de instalación complejas que deben ser aseguradas para cumplir con sus parámetros de resistencia mecánica y de vida útil, los segundos tienen métodos de instalación simples y las condiciones de calidad son más fáciles de asegurar.

Los empalmes de compresión han sido ampliamente estudiados por muchos años y se tienen pruebas precisas para estimar sus características mecánicas y vida útil remanente, su confiabilidad es muy alta si se garantizan sus parámetros de instalación y pruebas predictiva periódicas. Los empalmes prefabricados no han sido tan profundamente estudiados, los estudios disponibles reportan condiciones de vida útil muy largas y una alta confiabilidad electromecánica, no obstante, es

necesario consultar más fuentes de información y realizar pruebas en laboratorio y campo que permitan evaluar de manera precisa este tipo de implementación.

La diferencia en costos, la reducción de la exposición a trabajos de alto riesgo y los parámetros simples de instalación hacen que la tecnología de prefabricados sea considerada como una alternativa eficiente, sin embargo, es necesario que se haga un estudio a profundidad para definir la implementación específica de acuerdo con la infraestructura de cada compañía, sus requerimientos y su apetito de riesgo.

Referencias

- [1] CIGRÉ, «JOINTS ON TRANSMISSION LINE CONDUCTORS: FIELD TESTING AND REPLACEMENT CRITERIA,» CIGRÉ, Paris, Francia, 2002.
- [2] P. Springer, «Techniques for in-service and laboratory assessment of splices and conductors from overhead lines,» de *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, Chicago, IL, USA, 2002.
- [3] J. Snell y J. Renowden, «Improving results of thermographic inspections of electrical transmission and distribution lines,» de *IEEE 9th International Conference on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance Proceedings*, Montreal, Quebec, Canada, 2000.
- [4] F. R. Möllhoff, I. Da Silva Moreira, A. De Oliveira Antunes y P. C. Ivo, «AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE EMENDAS PREFABRICADAS INSTALADAS HÁ MAIS DE

40 ANOS EM UMA LINHA DE
TRANSMISSÃO,» de *Seminário Nacional
de Producao e Transmissao de Energia
Elétrica*, Curitiba . Brasil, 2017.

jvalencia@geb.com.co

Bogotá
Colombia

Fabián Ricardo Rojas Leal: Ingeniero Electricista de la Universidad Nacional de Colombia, con Maestría en Ingeniería Eléctrica y Maestría en Salud y Seguridad en el Trabajo de la misma universidad. Experiencia profesional en Gestión Integral de la Seguridad y Salud en el Trabajo (SST) para el sector de Transmisión de energía eléctrica. Además, experiencia en dirección y diseño de proyectos de distribución de energía eléctrica en media tensión, y proyectos de iluminación y alumbrado exterior, para los sectores industrial y de hidrocarburos.

Juan José Valencia: Ingeniero electricista de la Universidad Pontificia Bolivariana, con Especialización en Gerencia de Proyectos de la misma universidad. Con más de 13 años de Experiencia en Dirección y ejecución de proyectos de construcción de líneas de 230 kV para el sector de transmisión de energía eléctrica. Además, con experiencia en gestión y ejecución de mantenimiento en líneas de transmisión a 230 kV.

Fabián Ricardo Rojas
3268000
3005653341
Carrera 9 # 73-44
frojas@geb.com.co
Bogotá
Colombia

Juan José Valencia
3268000
322 9063189
Carrera 9 # 73-44