

Análisis de deformaciones mecánicas en herrajes para la estimación de la confiabilidad en líneas de transmisión

RESUMEN: El presente análisis de estudio está ubicado en el campo de la ingeniería eléctrica, a través de los herrajes que soportan líneas de transmisión (LTs) con un papel fundamental en la distribución de la energía en el país, los herrajes y sus componentes, asimismo los aisladores en las LTs., aunque a menudo pasan desapercibidos, son componentes cruciales que garantizan la estabilidad y eficiencia del sistema, estos elementos incluyen aisladores, grapas y conductores, etc., no solo sostienen cables, sino que también protegen la infraestructura contra las inclemencias del tiempo, tales podrían ser descargas atmosféricas. En este estudio, se analizarán los diferentes tipos de herrajes utilizados en las LTs, los materiales, las propiedades mecánicas-eléctricas y el impacto de confiabilidad y durabilidad del sistema. Uno de los enfoques es el análisis de los mecanismos de amortiguamiento mecánicos de las LTs aérea, estos comprenden a los herrajes tipo calavera ojo corta, así como de aisladores tipo suspensión en tensión de 115 kV., En el recorrido a través de las LTs cuya consigna es detectar visualmente cuales elementos serían los más afectados para remplazar, además de reunir los herrajes que presentan depósitos blanquecinos, pérdida de su capa exterior conocida como recubrimiento galvanizado para proceder a su reemplazo.

PALABRAS CLAVE Línea de transmisión, herrajes (tipo calavera ojo corta y calavera ojo larga), pruebas mecánicas, análisis de laboratorio y confiabilidad.



Colaboración

Miguel Ángel Esquivel Sánchez; Julio Cesar Méndez Gutiérrez; Fernando Jurado Pérez; José Roberto Razo Hernández; Gerardo Daniel Pérez, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Irapuato

Fecha de recepción: 21 de febrero de 2025

Fecha de aceptación: 27 de mayo de 2025

ABSTRACT: This study analysis is located in the field of electrical engineering, through the hardware that supports transmission lines (LTs) with a fundamental role in the distribution of energy in the country, the hardware and its components, also the insulators in the LTs., although they often go unnoticed, are crucial components that guarantee the stability and efficiency of the system, these elements include insulators, staples and conductors, etc., not only support cables, but also protect the infrastructure against inclement weather, such as atmospheric discharges. In this study, the different types of hardware used in LTs, the materials, the mechanical-electrical properties and the impact on the reliability and durability of the system will be analyzed. One of the approaches is the analysis of the mechanical damping mechanisms of the overhead lines, these include the short eye-skull type hardware, as well as 115 kV tension suspension type insulators. In the tour through the lines, the objective is to visually detect which elements would be the most affected to replace, in addition to gathering the hardware that presents whitish deposits, loss of its outer layer known as galvanized coating to proceed with its replacement.

Keywords. Transmission line, ironwork (short eye skull and long eye skull type), mechanical testing, laboratory analysis and reliability.

INTRODUCCIÓN

En la industrialización actual ha surgido una creciente demanda de optimizar la confiabilidad y seguridad en la instalación de líneas de transmisión aéreas, impulsada por la necesidad de integración y precisión, características fundamentales de la innovación industrial y eléctrica. Este proceso es esencial no solo por su complejidad técnica, sino también por los altos costos asociados. El monitoreo continuo de los relés de protección, así como

de los sensores de corriente y voltaje, es crucial para detectar y mitigar posibles fallos. Asimismo, el análisis de datos para identificar patrones anómalos, junto con la capacidad del ingeniero liniero para detectar patrones mediante inspecciones visuales y pruebas periódicas, constituye un elemento vital para garantizar la seguridad operativa del sistema eléctrico nacional (SEN).

La importancia de la descripción mecánico-eléctrico, y dimensional a través de las normativas de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), tales como la especificación CFE 2C301-15 y CFE 52100-65, desempeñan un papel fundamental en este proceso, estableciendo directrices claras sobre los niveles de tensión y las medidas de seguridad a adoptar. Estas especificaciones abarcan un rango de tensiones desde 13.8 kV hasta 138 kV, siendo aplicables a diversas líneas de transmisión, incluyendo las líneas de 115 kV. Por otra parte, la especificación CFE 2C301-15 se centra en las aéreas con tensiones de 69 kV a 400 kV, asegurando que se cumplan los estándares de seguridad y eficiencia para estos rangos de tensión.

En el presente análisis de estudio se enfatiza la importancia de la inspección y el mantenimiento regular de los herrajes en las líneas de transmisión, así como aisladores, grapas y conductores, es de vital conocimiento saber que sin ellos sería prácticamente imposible existieran torres de transmisión, sin elementos de sujeción donde es de vital importancia para proteger la infraestructura contra las inclemencias del tiempo y asegurar la durabilidad y confiabilidad del SEN.

Aunado a las previas especificaciones, también se revisaron otras normativas y estándares que son aplicables a la estabilidad y confiabilidad de las LTs aéreas. A continuación, se mencionan las siguientes:

- NOM-008-SCFI-2002: Relativa a los sistemas de unidades.
- NMX-H-075-SCFI-1996: Enfocada en las especificaciones y métodos de prueba para ciertos componentes.
- NMX-H-076-SCFI-1994: Que aborda cuestiones mecánicas aplicables a la infraestructura de las líneas aéreas.

Estas normativas aseguran que todos los componentes, incluyendo los herrajes, cumplan con altos estándares de calidad y seguridad. Adicionalmente, existen especificaciones enfocadas en el empaque, embalaje, embarque, transporte y almacenamiento de los herrajes y sus accesorios. Dos de las normativas más relevantes en este ámbito son:

- CFE L 1000-11-2015: Establece los estándares para el empaque y transporte de los herrajes.
- CFE 21000-01-2015: Se centra en los conjuntos de herrajes para líneas de transmisión aéreas con tensiones de 69 kV a 400 kV.

El cumplimiento de las presentes normativas no solo asegura la estabilidad y confiabilidad de las líneas, sino

que también contribuye a la durabilidad y eficiencia del sistema general en su conjunto. Estas especificaciones y normativas son esenciales para el presente caso de estudio, ya que proporcionan un marco claro y detallado para la instalación y el mantenimiento de las líneas de transmisión, garantizando un funcionamiento seguro y eficiente. La problemática se analizará desde las perspectivas mecánica, eléctrica y química, de tal manera verificar la confiabilidad de las LTs a través de los herrajes. Se integrarán las características mecánicas, eléctricas y dimensionales, además del análisis químico el cual deben cumplir los mecanismos de amortiguamiento.

MATERIAL Y MÉTODOS

El proceso metodológico para evaluar la línea LTs TTA 73150 de 115 kV se basa en normativas comúnmente consultadas y aplicadas por la comisión, incluyendo el estándar de mediciones de vibraciones en conductores, el Informe del Comité IEEE, el Libro de referencia de líneas de transmisión del Instituto de Investigación de Energía Eléctrica (EPRI) y el manual del equipo electrónico analizador de vibraciones eólicas, SAVLE. En la Figura 1 se puede apreciar la línea bajo estudio.



Figura 1. Tramo de la Línea 73150 de 115 kV
Fuente: Elaboración propia.

Esto permite desarrollar pruebas típicas a líneas, junto con inspecciones visuales de los herrajes y ensayos de tensión mecánica, destacando la calavera de ojo corta y la calavera de ojo larga, así como los ensayos en los aisladores sintéticos tipo suspensión de 115 kV. Con el objetivo de abordar la evaluación del estado de operación en campo, el presente análisis de deformaciones

y estudio mecánico del estado de la LTs, basado en la metodología de pruebas consultadas por la CFE [1].

Se presenta un método de evaluación integral del estado de la línea aérea. En donde se detalla el análisis de la línea aérea mediante esquemas. A través de la inspección visual de los herrajes, y al seleccionar muestras para el reemplazo de todo el conjunto de aisladores sintéticos de suspensión, se determinó que los herrajes denominados calavera de ojo corta presentaba agentes blanquecinos, pérdida de su capa exterior de recubrimiento galvanizado y acumulación de depósitos en la parte de sujeción. Además, se detectaron fracturas en los faldones de algunos aisladores y en el material circundante del núcleo. En la Figura 1 puede ver una torre de transmisión típica con líneas de transmisión de 115 kV con sus complementos.



Figura 2 Torre de transmisión de 115kV.
Fuente: Elaboración propia.

En los ensayos de tensión mecánica, se destacaron los herrajes de calavera de ojo corta y calavera de ojo larga. Las pruebas realizadas a tres muestras de herrajes revelaron diferencias entre los fabricantes, denominados **M1**, **M2** y **M3**.

Del análisis mecánico **M1** alcanza una resistencia de 140.74 kN, **M2** 124.70 kN y **M3** 174 kN lo cual derivado de esto se determina que los valores están por encima del valor de diseño y de la propia especificación [2]. A continuación, se presenta las pruebas de resistencia a la tensión de herrajes de suspensión, y de aisladores sintéticos tipo suspensión destacando los resultados, los cuales se pueden verificar en la Tabla 1.

Tabla 1 Pruebas de resistencias a la tensión mecánica.

Espécimen No.	Carga de ruptura mínima requerida por la especificación (kN)	Carga de ruptura mínima según el fabricante (kN)	Carga máxima obtenida (kN)	Incertidumbre (kN)	Resultado
M1- CALAVERA OJO CORTA	111	13.6	140.74	± 1.40	INFORMATIVO. El herraje fue sometido a una carga progresiva hasta que el herraje utilizado para su acondicionamiento presento falla.
M2- CALAVERA OJO CORTA		140	124.70	± 1.24	
M3- CALAVERA OJO LARGA		SIN DATO	174.03	± 1.74	

En la Figura 3 se puede apreciar a uno de los linieros de CFE en el proceso de recolección y cambio de aisladores sintéticos. Dentro de las observaciones se indica que los especímenes con una referencia de 111 kN de tensión mecánica.



Figura 3 Cambio de Aisladores tipo sintético.
Fuente: Elaboración propia.

En estos ensayos las muestras presentan una resistencia mayor al rango mínimo del diseño de 140.7 kN, y la segunda de 124.7 kN, y la tercera de 174 kN Herrajes y conjunto de herrajes para líneas de transmisión aéreas con tensiones de 69 kV a 400 kV. 2C301-15, N. D.

En las Figuras 4 y 5 se puede apreciar y visualizar estos tipos de aisladores sintéticos los cuales son colocados en las torres de transmisión de hasta 400kV recordemos que estos están diseñados a 115kV en el presente caso de estudio. [3].

No se evalúa la conformidad entendiéndose esta por la satisfacción de los requisitos específicos viables aplicables, por lo tanto, debido a pruebas de comportamiento mecánico, registrándose únicamente los valores obtenidos, por lo cual, el resultado es de carácter informativo.



Figura 4 Perspectiva del Aislador.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 5 Perspectiva de los Herrajes y aislador.
Fuente: Elaboración propia.

En las Figuras 6 y 7 se puede observar el comportamiento de la prueba a la tensión al herraje calavera ojo corta y calavera ojo larga [4].

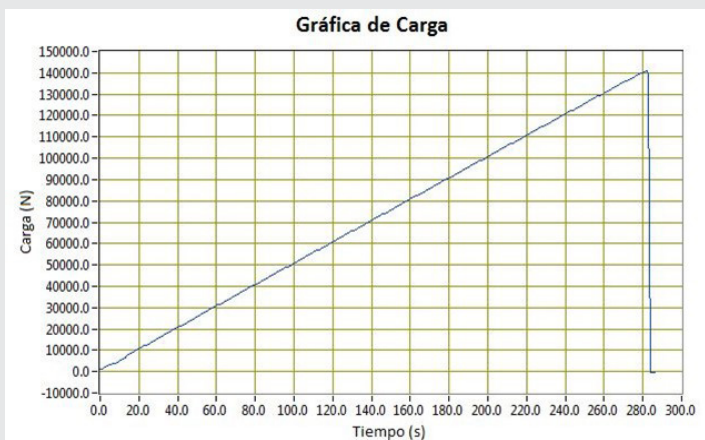


Figura 6 Gráficas de Comportamiento Prueba de Resistencia (PR) a la Tensión Herraje Calavera Ojo Corta y Calavera ojo Larga
Fuente: Elaboración propia.

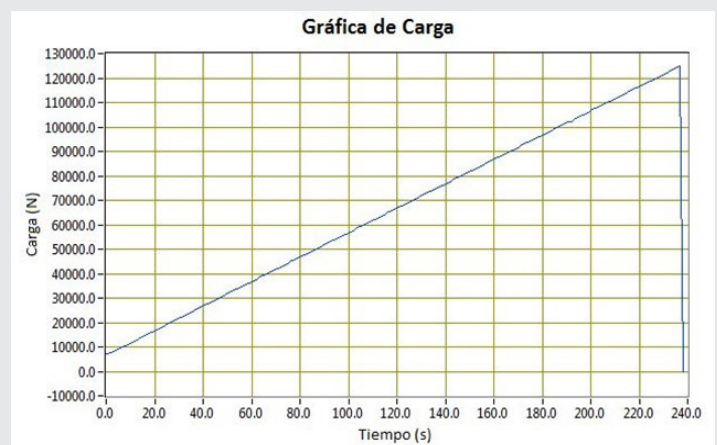


Figura 7 Gráficas de Comportamiento PR a la Tensión Herraje con una tensión superior a los 111kN por encima de la Normativa de CFE.

Dentro del set de pruebas en laboratorio mediante los elementos en preparación (Herrajes) al ejecutar las pruebas de resistencia a la tensión se puede apreciar en la siguiente Figura 8 algunas de las imágenes, tal como la máquina de tensión.



Máquina de tensión Horizontal donde se desarrolla la prueba de resistencia a la tensión.



Acondicionamiento de herraje M1 (Calavera ojo corta).



Acondicionamiento de M2 (Calavera ojo corta).

Figura 8 Desarrollo de pruebas en herrajes de línea de transmisión aérea.
Fuente: Elaboración propia.

El acondicionamiento del herraje calavera ojo corta, y calavera ojo larga. Demostrando que fusionado a su aspecto y envejecimiento producido o generado durante su tiempo instalado aún conservan sus propiedades mecánicas.

De los ensayos de tensión mecánica a los aisladores sintéticos tipo suspensión (115kV) y del mecanismo de prueba a los siguientes aisladores se obtuvieron algunos valores. Destacando una vez más la diferencia de fabricantes donde su resistencia máxima en **M1** 140.57 kN, **M2** 142.41 kN, **M3** 152.63., por estar al aire libre (intemperie) lo cual recae en su deterioro en este no se encontró grabado en el su valor mínimo permitido.

Dentro de la inspección microscópica se determinó que tenía zonas con corrosión en la superficie del herraje, a su vez depósitos incrustados, se visualizan algunos defectos durante la fundición y pérdida de material en la capa superficial esto es el recubrimiento llegando hasta el metal base, así como las microgrietas causadas por el esfuerzo que se le aplicó al llevar la muestra a la falla [5].

En la referencia se observa un valor de 120 kN, lo que demuestra que, a pesar del desgaste y envejecimiento acumulado durante su tiempo de instalación, los herrajes aún conservaban sus propiedades mecánicas para soportar cargas. La Figura 9 muestra imágenes de herrajes que presentaron fracturas (fallo) después de ser sometidos al ensayo de resistencia, tal como se describe [6].

En la Figura 10 se observan algunas imágenes del herraje (calavera ojo corta) en la zona de falla donde se perciben las grietas (rojo) en la zona superficial debidos a los ensayos de resistencia a la tensión, y se muestran los nódulos o bultos del granulado (azul).



Muestra al término del ensayo de resistencia a la tensión debido al fallo del elemento (M1).



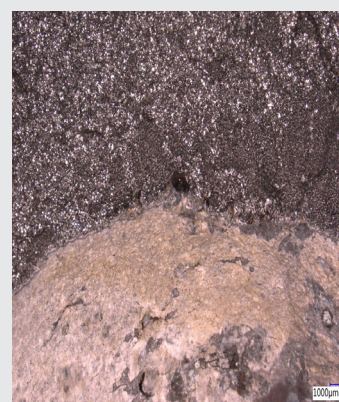
Muestra M1 fallado



Muestra M2 fallado

Figura 9 Análisis de herrajes mediante los ensayos de resistencia a la tensión

Fuente: Elaboración propia.



Máquina de tensión Horizontal donde se desarrolla la prueba de resistencia a la tensión.



Acondicionamiento de herraje M1 (Calavera ojo corta).



Figura 10 Evidencia de la inspección microscópica del herraje en cuestión.

Fuente: Elaboración propia.

A demás de visualizar algunos defectos en la fundición debido a burbujas causadas por gases (rojo), grietas transversales en la capa superficial (azul), presencia de depósitos blanquecinos en la capa superficial del herraje (verde).

Por otro lado, del análisis químico implementado mediante energía dispersiva de rayos X, en dos de las muestras de herrajes calavera ojo corta, validando la aleación metálica de su material base y el material de su recubrimiento, así como los depósitos adheridos en

la superficie del herraje conteniendo elementos corrosivos como es, azufre y sodio, pérdida progresiva del material, presentando corrosión incipiente, donde en estos elementos en particular se aprecia la pérdida de su capa de recubrimiento, así como donde el deterioro ocasionado por algunos contaminantes típicos tales puede ser provenientes de la industria local y del medio ambiente.

En la Figura 11 se aprecian dos imágenes del barrido aplicado a los herrajes en sus zonas de mayor concentración de depósitos donde se determina la composición de la sanidad del material, verificando su aleación.

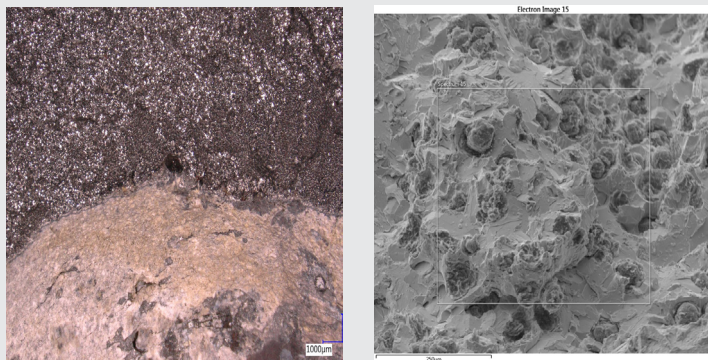


Figura 11 Evidencia de la inspección microscópica del herraje en cuestión.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 12 se puede apreciar de la inspección química desglosando los porcentajes de los elementos presentes en dos imágenes como se muestra.

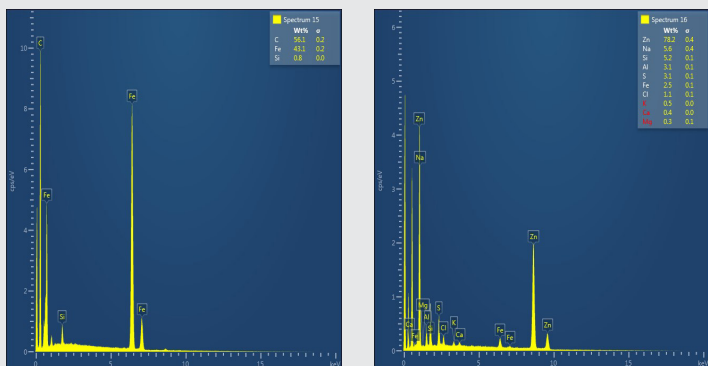


Figura 12 Evidencia de la inspección del análisis químico.

Fuente: Elaboración propia.

Los herrajes seleccionados y extraídos para su análisis en laboratorio mostraron características mecánicas superiores a las exigidas por el documento de referencia. Es decir, presentan una resistencia a la tensión que varía entre un 12% y un 57% por encima del valor mínimo requerido, dependiendo de la marca o el fabricante de los herrajes. Sin embargo, los especímenes también mostraron deterioro en diversas zonas de la capa de galvanizado, evidenciando una corrosión incipiente en el material base. Esta corrosión es resultado del depósito de agentes corrosivos, como se detalla en el análisis químico, los cuales se originan tanto por

medios naturales como por contaminantes industriales. La humedad de ambiente favorece la formación de ácidos e hidróxidos, actuando como agentes corrosivos, acelerando la degradación del material [7]. Muy a pesar de las condiciones, los herrajes mantienen sus propiedades mecánicas. No obstante, es evidente que, con el tiempo, estas propiedades se verán afectadas.

CONCLUSIONES

En el análisis llevado a cabo en el campo y en el laboratorio durante la inspección de la línea LTs TTA 73150 de 115 kV, así como las pruebas de las muestras en el laboratorio, se concluye que de manera factible el estado del herraje y del aislamiento de la LT aérea.

En relación a los herrajes, se determinaron signos de envejecimiento y corrosión incipiente, atribuibles al depósito de agentes corrosivos descritos en el análisis químico, originados tanto de manera natural como por contaminantes industriales, al combinarse con el oxígeno y la humedad del ambiente, generan la formación de ácidos e hidróxidos que actúan corrosivamente, acelerando la degradación del material. El fenómeno es evidente en las picaduras observadas en las superficies de los herrajes.

Y asimismo el aislamiento, se detectaron fracturas en la capa superficial de dos de las muestras, y desprendimientos de algunos faldones aislantes, lo que resulta en una pérdida de propiedades dieléctricas. En una sección del aislamiento, se observaron cúmulos blanquecinos que actúan como contaminantes del material. En otras palabras, aunque los herrajes y el aislamiento de la LTs aún mantienen sus propiedades mecánicas y dieléctricas, la evidencia de corrosión y desgaste sugiere que, con el tiempo, estas propiedades podrían verse comprometidas, activando mecanismos de falla que pondrían en riesgo la integridad de las líneas de transmisión.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] "Especificación CFE 2C-301-15, Editada en Nov 2020".
- [2] "MÉXICO HERRAJES, CONJUNTOS DE HERRAJES Y ACCESORIOS PARA CABLE DE GUARDA CON FIBRAS ÓPTICAS REVISY Y SUSTITUYE A LA EDICIÓN DE DICIEMBRE DE 2015."
- [3] "Especificación del cable de aluminio con cableado concéntrico y núcleo de acero (ACSR) CFE E1000-12," Normativa CFE, Cable de aluminio de cableado concéntrico, vol. 3, no. 3, pp. 1-51, Dec. 2020.
- [4] R. Fernández Vásquez, "Desempeño mecánico de montajes de líneas de distribución de energía eléctrica Mechanical Performance of Electric Power Distribution Line Mounting."
- [5] A. Ghavamian, M. R. Maghami, S. Dehghan, and C. Gomes, "Concerns of corrosive effects with respect

to lightning protection systems," 2015. doi: 10.1016/j.engfailanal.2015.08.019.

[6] E. Hakansson, P. Predecki, and M. S. Kumosa, "Galvanic Corrosion of High Temperature Low Sag Aluminum Conductor Composite Core and Conventional Aluminum Conductor Steel Reinforced Overhead High Voltage Conductors," IEEE Trans Reliab, vol. 64, no. 3, 2015, doi: 10.1109/TR.2015.2427894.

[7] N. Jaffrey and S. Hettiwatte, "Corrosion Detection in ACSR Cables."

