

**Guía de apoyo para la inspección y determinación del estado corrosivo de los componentes  
en las líneas de transmisión de Electrificadora de Santander S.A E.S.P.**

**Maria Fernanda Mayorga Castañeda**



**Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de:  
Ingeniera Mecánica**

**Universidad Pontificia Bolivariana  
Escuela de Ingenierías  
Ingeniería Mecánica  
Bucaramanga  
2025**

**Guía de apoyo para la inspección y determinación del estado corrosivo de los componentes  
en las líneas de transmisión de Electrificadora de Santander S.A E.S.P.**

**Maria Fernanda Mayorga Castañeda**

**Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de:  
Ingeniera Mecánica**

**Director**

**Mayerly Jhojana Fernández Torres  
Magister en Ingeniería de Materiales**

**Universidad Pontificia Bolivariana**

**Escuela de Ingenierías**

**Ingeniería Mecánica**

**Bucaramanga**

**2025**

### **Dedicatoria**

Todos mis esfuerzos y la terminación de mi pregrado universitario con este proyecto se lo dedico a mi familia, son los responsables de la persona que soy, su apoyo incondicional ha hecho que sea posible superar todos los obstáculos del camino y me han ayudado en momentos en los que no veía soluciones para avanzar.

En especial todo se lo dedico a mi madre, que con sus sacrificios me ha permitido estar en donde estoy, es mi fuente de motivación, su ejemplo me ha ayudado a ser una mujer más fuerte y cuando lo he necesitado ha sido mi mayor consuelo.

A mi hermanito que se encuentra lejos, pues durante tantos años fue mi mayor compañía y le debo mucho de lo que soy, espero que ambos sigamos creciendo juntos.

A mi padre, que siempre tiene palabras de ánimo y durante mi pregrado estuvo pendiente de todo lo que necesitara para cumplir mis logros.

Por último, a Dios, que sin él nada sería posible.

## **Agradecimientos**

Quiero agradecer en primer momento a todas aquellas personas que de manera desinteresada siempre me han ayudado, que han sido mi red de apoyo cuando lo he necesitado, que han visto mi potencial cuando yo no lo reconocía, que me han brindado palabras de consuelo o calma, a las personas que ahorita no están en mi vida pero que fueron importantes durante el desarrollo de mi pregrado y de mi persona, a todos gracias, porque todos me han enseñado mucho.

A la Universidad Pontificia Bolivariana y a su planta docente, que no solo se limitaron a hacer su trabajo, sino que me apoyaron de manera activa a ser una mejor ingeniera y persona. A todos los que siempre estaban dispuestos a ayudarme o brindarme soluciones, como el ingeniero Edwin Tuta y la auxiliar Luz Dary. También agradezco a todo el personal que me ayudó en los ensayos que se requirieron para la elaboración de esta investigación, pues tuvieron toda la paciencia conmigo, sin importar las veces que los molestara.

A mi directora Mayerly Jhojana, que gracias a ella esta práctica fue posible, ya que me dio la guía necesaria y el enfoque para centrar mis ideas, además, fue imprescindible en la consolidación de este documento y siempre estuvo abierta a mis consultas, brindándome de su tiempo.

Agradezco a la ESSA, por darme la oportunidad de realizar mis prácticas empresariales y ofrecerme su colaboración y respaldo, especialmente a mi equipo de líneas y a mi supervisor, Juan Camilo González Castillo, de los cuales he aprendido mucho y me acogieron gratamente, apoyándome en todo lo que requiriera.

## Contenido

Introducción .....	11
Capítulo 1. Generalidades de la empresa.....	12
Reseña Histórica.....	12
Direccionamiento Estratégico .....	13
Propósito.....	13
Identidad .....	14
Modelo de operación.....	14
Estructura Organizacional .....	15
Ubicación.....	16
Capítulo 2. Planteamiento del problema.....	17
Delimitación del problema .....	18
Antecedentes .....	19
Objetivos.....	22
Objetivo general .....	22
Objetivos específicos.....	22
Capítulo 3. Diagnóstico de la empresa.....	23
Capítulo 4. Marco referencia .....	28
Marco Teórico.....	28
Marco Normativo .....	37
Capítulo 5. Metodología .....	42
Capítulo 6. Resultados y discusiones.....	45
Capítulo 7. Recomendaciones.....	66
Conclusiones.....	68
Referencias.....	69
Apéndices.....	72

## Listado de tablas

Tabla 1. Normas usadas de referencia. ....	37
Tabla 2. Materiales de los diferentes componentes de las estructuras de transmisión. ....	45
Tabla 3. Clasificación de ambientes según agresividad corrosiva de la ESSA. ....	49
Tabla 4. Criterios de calificación por recubrimientos.....	51
Tabla 5. Criterios de calificación por pérdida de espesor.....	51
Tabla 6. Equipos y herramientas para la metodología planteada.....	54
Tabla 7. Espesores aproximados según la ISO 12944-5 para la durabilidad de recubrimientos por atmósferas. ....	63
Tabla 8. Materiales y equipos para realizar la aplicación de la pintura. ....	64

## Listado de figuras

Figura 1. Estructura organizacional de la ESSA.....	15
Figura 2. Primer informe de inspección sin información de corrosión.....	24
Figura 3. Segundo informe de inspección con intención de informar sobre corrosión. ....	25
Figura 4. Tercer informe de inspección tratando de comunicar sobre corrosión.....	26
Figura 5. Representación de una celda electroquímica.....	29
Figura 6. Serie galvánica para metales y aleaciones comunes.....	30
Figura 7. Diferencia en los tipos de corrosión generalizada.....	33
Figura 8. Ejemplos de los tipos de corrosión localizada.....	35
Figura 9. Montaje para los ensayos de tracción a cables conductores ACSR. ....	43
Figura 10. Capas de cable conductor ACSR.....	43
Figura 11. Formato para los informes de inspección.....	55
Figura 12. Formato digital.....	57

### **Listado de apéndice**

Apéndice A. Ensayos de tensión al cable conductor de la Línea 308..... 72

Apéndice B. Ensayos de tensión al cable conductor de la Línea 307..... 73



## RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

<b>TITULO:</b>	Guía de apoyo para la inspección y determinación del estado corrosivo de los componentes en las líneas de transmisión de Electrificadora de Santander S.A.E.S.P.
<b>AUTOR(ES):</b>	Maria Fernanda Mayorga Castañeda
<b>PROGRAMA:</b>	Facultad de Ingeniería Mecánica
<b>DIRECTOR(A):</b>	MSc. Mayerly Jhojana Fernández Torres

### RESUMEN

El control de la corrosión en infraestructuras eléctricas se ha vuelto una necesidad dado que genera grandes pérdidas anuales en la industria energética. Es por ello que esta investigación se centra en la elaboración de una guía para la inspección de la corrosión en estructuras de transmisión, para líneas de 115kV y 230kV de la Electrificadora de Santander S.A. E.S.P., y con ello iniciar un control del estado actual de cada uno de sus componentes, de modo que se puedan establecer y programar acciones de mantenimiento. Para ello fue necesario realizar visitas in situ de algunas líneas eléctricas del área metropolitana de Bucaramanga, la realización de pruebas de tensión a algunos cables conductores, apoyo del equipo de mantenimiento de la empresa, y consulta de normatividad vigente. Se encontró que actualmente no se cuenta con procedimientos para el manejo de la corrosión en el plan de mantenimiento, por lo que la guía busca ser la respuesta a esta problemática; planteando una metodología de inspección, estableciendo criterios de calificación, proponiendo acciones preventivas y sugiriendo equipos y herramientas.

### PALABRAS CLAVE:

Corrosión, Líneas de transmisión, Ensayos de tracción, Inspección, Acciones preventivas

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO



## GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

**TITLE:** Support guide for the inspection and determination of the corrosive state of the components in the transmission lines of Electrificadora de Santander S.A. E.S.P.

**AUTHOR(S):** Maria Fernanda Mayorga Castañeda

**FACULTY:** Facultad de Ingeniería Mecánica

**DIRECTOR:** Msc. Mayerly Jhojana Fernández Torres

### ABSTRACT

The control of corrosion in electrical infrastructures has become a necessity due to the high annual losses in the energy sector. Therefore, the objective of this research is to develop a guide for the inspection of corrosion in transmission structures for the 115kV and 230kV lines of Electrificadora de Santander S.A. E.S.P., in order to initiate a control of the current state of each of its components, so that maintenance actions can be determined and programmed. To this end, it was necessary to visit some of the power lines in the metropolitan area of Bucaramanga, to carry out tensile tests on some of the conductor cables, to support from the company's maintenance team, and to consult the regulations in force. It was found that there are currently no corrosion management procedures in the maintenance plan, so the guide seeks to be the answer to this problem; it proposes an inspection methodology, establishes qualification criteria, recommends preventive actions, and suggests equipment and tools.

### KEYWORDS:

Corrosion, Transmission Lines, Tensile Testing, Inspection, Preventive Actions

Vº Bº DIRECTOR OF GRADUATE WORK

## Introducción

Las empresas del sector eléctrico poseen diferentes tipos de estructuras de transmisión, que son de gran importancia para llevar a cabo la comercialización de la energía. En el caso de empresas como la Electrificadora de Santander, se utilizan torres de celosía metálica mayormente, que por su naturaleza y ubicación son sensibles a sufrir daños por corrosión. Este es un fenómeno que afecta a todos los materiales que se exponen a un electrolito como la humedad, y dependiendo de diferentes factores puede generar mayor o menor grado de desgaste, siendo los materiales metálicos los más afectados. El deterioro resultado de este fenómeno posibilita el fallo de elementos y componentes, que lo convierte en un foco de atención y una variable que debe ser controlada.

Como etapa inicial, fue necesario realizar un diagnóstico de la empresa, donde se evidenció que no cuentan con procedimientos claros para su manejo, es decir, que no poseen protocolos para realizar inspecciones periódicas y enfocadas en corrosión, y con ello minimizar los daños. Como consecuencia, en la mayoría de los casos se han realizado acciones correctivas, que pueden derivar en pérdidas importantes de dinero. Es por esto, que se plantea la elaboración de una guía que propone un plan de inspección centradas en la determinación del posible tipo de corrosión encontrada en las estructuras de transmisión.

La investigación realizada, plantea un posible procedimiento que permita a la persona que se encuentra en campo, poder identificar algunos tipos de corrosión, en este caso, los más comunes para las estructuras eléctricas. Dicho procedimiento contiene los pasos a seguir, así como los equipos y herramientas que se sugieren, de modo que la empresa cuente con la base para la mejora en el plan de mantenimiento de las líneas de transmisión, ya sea en la frecuencia de inspección, así como en el planteamiento de acciones preventivas, entre otros.

## **Capítulo 1. Generalidades de la empresa**

La Electrificadora de Santander S.A. E.S.P. es una empresa regional de servicios públicos dedicada a la transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica, que crece con Responsabilidad Social Empresarial, comprometida con la satisfacción de las necesidades de sus clientes y demás grupos de interés, mediante la mejora continua de los procesos del Sistema Integrado de Gestión y el cumplimiento de la normativa vigente, además desde 2009 se establece como filial del Grupo EPM (ESSA).

### **Reseña Histórica**

En el año 1891 llega la energía eléctrica a Santander gracias a Julio Jones y Rinaldo Goelkel construyendo la primera planta hidroeléctrica de Santander que se ubicaba en Chitota, de este modo Bucaramanga se convirtió en la segunda ciudad de Colombia en tener el servicio de energía y la primera en suministrarla.

En las décadas de 1920 y 1930 empezaron a funcionar de manera aislada y por iniciativa privada diversas hidroeléctricas que le brindaban el servicio a gran cantidad de municipios del departamento, sin mencionar que en 1927 por el funcionamiento de la planta de Zaragoza muchas de las necesidades de energía eléctrica en Bucaramanga son suplidas.

En 1941 la central hidroeléctrica del río Lebrija S.A. se constituye como la primera empresa en Colombia del sector eléctrico creada por asocio de la nación, el departamento y el municipio.

Se inaugura en 1954 la primera etapa de la central hidroeléctrica del río Lebrija, además de las centrales de Güepsa y la Cascada de San Gil, entre otros proyectos.

Finalmente, en 1975 se consolida la ESSA como se conoce hoy en día incorporando diferentes infraestructuras en Socorro y San Gil, desde ese momento la compañía avanzó de manera significativa ampliando su cobertura e infraestructuras, además ayudó al desarrollo de la hidroeléctrica de Sogamoso hasta que ISAGEN adquiere los diseños. En 2009 vende sus acciones a EPM formando parte de un grupo empresarial de servicios públicos que hace presencia en Panamá, Guatemala, El Salvador y Colombia (ESSA).

### **Direccionamiento Estratégico**

El direccionamiento estratégico busca crear un enfoque claro, para que la alta gerencia determine el rumbo que se desea manejar y que toda la organización trabaje en conjunto y en la misma dirección (Aguilera, 2010).

En la Electrificadora de Santander dicho direccionamiento busca orientar la gestión corporativa y competitiva del grupo empresarial hacia el logro de sus proyecciones de largo, mediano y corto plazo y su posicionamiento en el sector, unificando las directrices y lineamientos como elementos direccionadores de la organización (ESSA, 2024), a continuación, se presentan distintos elementos que componen el plan empresarial 2024-2027.

### ***Propósito***

La Electrificadora de Santander junto con el grupo EPM se rige bajo un propósito el cual es ***“Contribuir a la armonía de la vida para un mundo mejor”***, que acoge la Arquitectura para un mundo mejor, por lo que convoca liderazgos corporativos capaces de conciliar los objetivos de negocio con prioridades del desarrollo humano sostenible, reconociendo la interdependencia entre los grupos de interés y la sostenibilidad, la relevancia de las alianzas y las acciones colectivas, apoyados en los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2030 y en el respeto a los

principios universales en derechos humanos, medio ambiente, derechos laborales y anticorrupción (ESSA, 2024).

### ***Identidad***

El grupo EPM se rige bajo tres (3) valores y cinco (5) principios de acción en donde se reconoce como parte de la sociedad y un sujeto ético, por lo que pretende alinear sus propósitos al beneficio de la comunidad y el desarrollo humano.

Los valores son la responsabilidad, transparencia y calidez, por otro lado, los principios de acción son; cumplir nuestros compromisos, nuestro interés primordial es la sociedad, brindar un trato justo, cuidar el entorno y los recurso, buscar fundamentalmente servir.

### ***Modelo de operación***

El Grupo EPM ha configurado su modelo de operación en tres entidades fundamentales: Núcleo corporativo, negocios y servicios.

El núcleo corporativo es el encargado de ejercer el gobierno en el grupo empresarial para conservar la unidad de propósito y dirección tanto en los negocios como en los servicios que se prestan a través del conglomerado de empresas.

Los negocios se enfocan en las actividades mediante las cuales la organización o la empresa se conecta con sus clientes y/o usuarios. En el caso del Grupo EPM, dada su naturaleza pública y el sector industrial en el que compete.

Los Servicios son el conjunto de funcionalidades que soportan o complementan las labores misionales de los negocios. Estos servicios pueden ser configurados para ser prestados a través de una filial especializada, a través de las áreas dentro de cada filial o centralizadamente

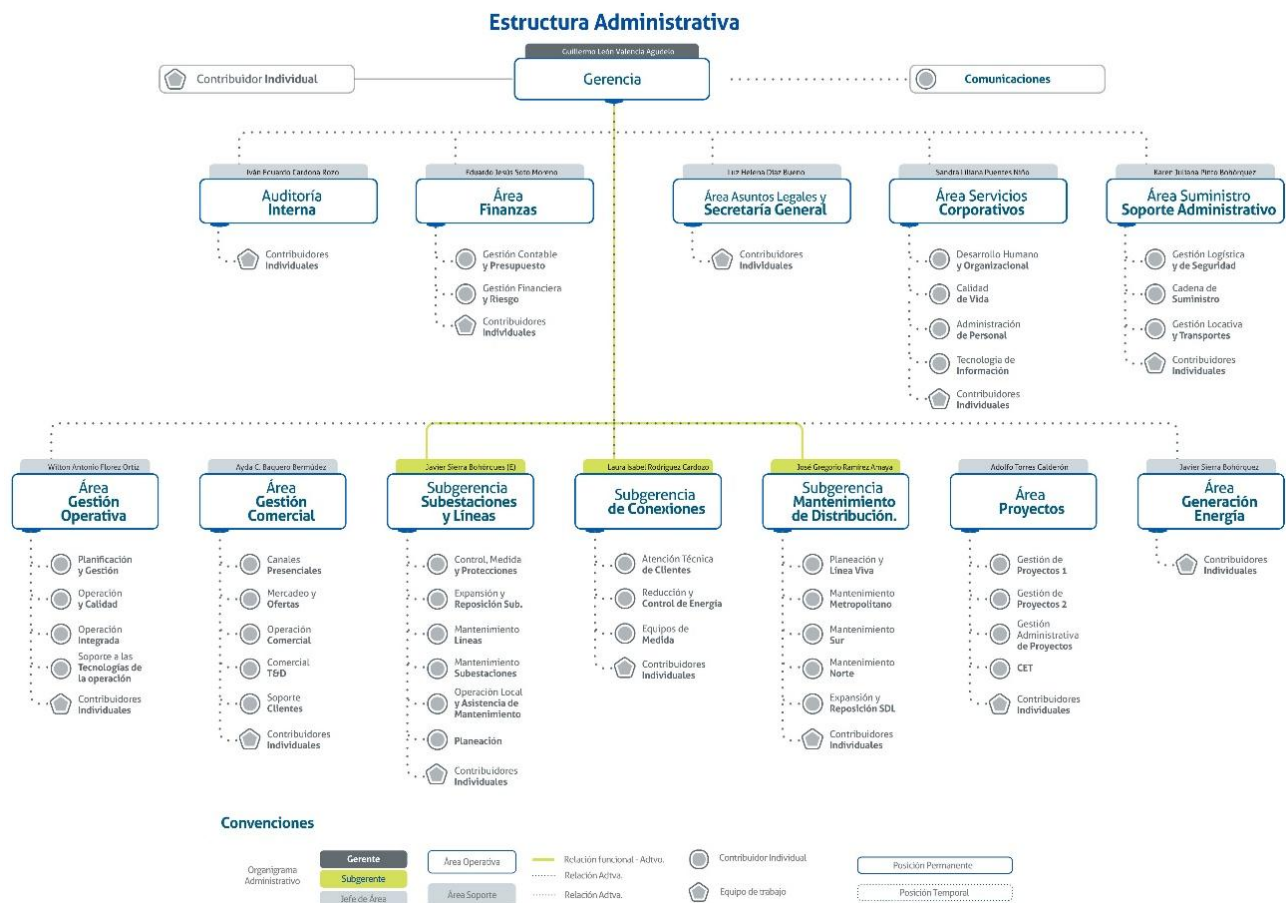
en EPM a través de vicepresidencias creadas con propósitos de orientación y gestión para todo el Grupo EPM.

### Estructura Organizacional

La estructura organizacional que presenta actualmente la electrificadora de Santander se evidencia en la **Figura 1**, además, al 30 de junio de 2019 la ESSA contaba con 998 trabajadores.

**Figura 1.**

*Estructura organizacional de la ESSA.*



Nota. Tomado de <https://www.essa.com.co/site/informacion-corporativa/quienes-somos>

**Ubicación**

La sede administrativa se encuentra en Bucaramanga Carrera 19 No. 24 - 56  
Bucaramanga, Santander con código postal: 680011.

Conmutador: 6339767 - Pbx: 6303333.

Cabe mencionar que la empresa cuenta con diferentes subestaciones, en su mayoría en Santander, en el caso del lugar donde el estudiante realiza la práctica es la Subestación Sur, que se ubica en Calle 46 #19-122, Bucaramanga.

## Capítulo 2. Planteamiento del problema

La transmisión de energía eléctrica es una de las partes claves para que exista un abastecimiento de electricidad en la sociedad. A través de esta etapa es que la energía producida en las centrales eléctricas se transporta a las subestaciones donde se transforma a tensiones adecuadas para su distribución y comercialización.

Para realizar el transporte de energía es necesario que esté en niveles altos de tensión, para que la corriente sea lo menor posible, por tal motivo, la transmisión de energía fundamentalmente se da en 115kV y 230 kV, además, se realiza por vías elevadas, que son compuestas de grandes estructuras, tales como las torres de transmisión y cables conductores (Conecta, 2022). Dichas estructuras se encuentran situadas en diferentes zonas geográficas y a la intemperie, lo que las expone de manera más acelerada a la corrosión y a un deterioro en su integridad. De ahí que, el no controlarla podría traer como consecuencia el fallo de componentes y a su vez los riesgos asociados a que una estructura salga de línea, sin mencionar el impacto económico.

Por otra parte, dentro de la empresa no hay una prevención de este fenómeno, ya que no hay procedimientos para su manejo y no se monitorea el estado de la corrosión en las torres con el transcurso del tiempo. Por lo anterior, el plan de mantenimiento actual en situaciones resultantes por corrosión se basa en tomar acciones correctivas, o en otros casos, medidas preventivas que han quedado mal ejecutadas por desconocimiento.

Es por ello que, si se realizaran mantenimientos para evaluar el grado de corrosión de cada torre, se evitaría la generación de situaciones más complejas a posteriori, y para esto es vital la realización de inspecciones adecuadas y centradas en el estado corrosivo de los componentes,

es por este motivo que nace el planteamiento de una metodología para llevarlas a cabo, que permita extraer información útil para la planeación del mantenimiento.

### **Delimitación del problema**

La práctica empresarial se desarrolla en la subgerencia de subestaciones y líneas, en el equipo de trabajo de mantenimiento de líneas, que tiene por lugar la subestación sur. El propósito es generar un producto que permita realizar inspecciones centradas en la corrosión de la estructura, ya que las inspecciones actuales se limitan a evaluar el estado general de la torre, con actividades como; revisión de la servidumbre, identificación de aisladores flameados, verificación de elementos faltantes, entre otros.

Dicho producto es una guía para el personal técnico, que esclarezca conceptos básicos de corrosión, explicando los tipos más comunes en estructuras eléctricas, además, propone una metodología para la inspección con el objeto de clasificar el estado o grado corrosivo de los componentes, brindando una pauta para el posterior actuar, como acciones de mantenimiento preventivo, igualmente, se espera que con lo observado en la inspección se elaboren informes que resulten útiles para que la alta gerencia tenga un panorama más completo del estado del activo, con el fin de programar y planificar acciones de mantenimiento según la situación particular.

Para esto se van a realizar múltiples acciones, tales como; visitar diferentes torres de transmisión del área metropolitana de Bucaramanga; investigación de conceptos relacionados con la corrosión; discusión con docentes que tengan conocimientos en el tema y relacionamiento con el personal que ejecuta dichas inspecciones.

### **Justificación**

La práctica empresarial se da como respuesta a la ausencia de procedimientos para el manejo de la corrosión en las líneas de transmisión. La organización y el equipo de líneas ven una

oportunidad de mejora en sus procesos, porque no se le está dando el adecuado control y seguimiento, lo que aumenta la posibilidad de fallas no planeadas, y esto es un factor que afecta la integridad de los activos. Es por este motivo, que se presenta como solución al problema la elaboración de una guía con conceptos básicos de corrosión y la formulación de una posible metodología de inspección con enfoque en dicho fenómeno, que permita la recolección de información valiosa para la gestión del mantenimiento y la toma de decisiones.

### **Antecedentes**

Las líneas de transmisión son aquellas estructuras metálicas que transportan la energía eléctrica desde las centrales generadoras hacia las subestaciones asociadas, por lo que son de gran extensión. Estas, contienen largos trayectos de cables conductores, los cuales son soportados por medio de estructuras de transmisión que en su mayoría son torres, y van a estar distribuidas a lo largo del territorio, por lo que según el terreno y las condiciones climáticas de cada zona del país van a estar expuestas a diferentes factores que promuevan su deterioro por el fenómeno de corrosión de las estructuras.

En la investigación que tiene por título *“La corrosión atmosférica en sistemas de transporte de energía eléctrica: modelo de vida útil y su remuneración en Colombia”* se hace énfasis en la corrosión atmosférica de las estructuras de transmisión en Colombia y que se incurre en sobrecostos para llevar al activo a su vida útil regulatoria debido a la corrosión atmosférica. En un primer momento hacen un análisis para caracterizar las zonas, esto se hace con la exposición de probetas al entorno y siguiendo lineamientos de pérdida de espesor, posteriormente con modelos matemáticos se establece una aproximación de la vida útil de los materiales según cada zona y predecir su comportamiento con diferentes recubrimientos. Se menciona que en Colombia lo presupuestado para el manejo de la corrosión por parte de cada

empresa es un porcentaje adicional de los gastos AOM (gastos de Administración, Operativos y de Mantenimiento), esta investigación demuestra que el tema es de interés, sobre todo porque el servicio de energía es vital importancia para la sociedad, y son las empresas de servicios públicos las que deben tener una gestión efectiva del mantenimiento.

Los autores Fernando Villada, Juan D. Molina y Esteban Velilla realizan un modelo de Vida Útil para Estructuras Acero-Zinc Utilizadas en la Transmisión de Energía Eléctrica en Colombia, para esto aparece un término fundamental, la *Tasa de Corrosión*, y deben considerar otros aspectos a considerar como la función de distribución y aquellas actividades de mantenimiento que se realizan en función de alargar la vida útil del activo. Ellos realizaron estudios en muestras que se ubicaban en dos puntos por cada zona que previamente habían determinado por análisis de clúster, como en la investigación mencionada anteriormente. Todas las pruebas se realizaron en piezas de grosor de 3/16 pulgadas siendo la condición crítica, debido a que es el menor valor de espesor en las estructuras de transmisión (Molina, 2008), con esto ya podían hacer las proyecciones de la vida útil con consideraciones de capas de recubrimiento, en donde se concluye que hay zonas donde la vida útil supera los 50 años y que la altura tiene gran influencia en ese valor, además de mencionar que es indispensable los sistemas de recubrimiento y protección, como lo son pinturas o el galvanizado.

También es importante mencionar a *Juan Maya* un especialista en corrosión en el sector eléctrico, que plantea unos criterios de clasificación de la corrosión por grados, centrándose en la pérdida de material. Adicionalmente, él genera una metodología integral para el manejo de la corrosión en las líneas de transmisión.

Existen diferentes investigaciones que se han enfocado en determinar el impacto de la corrosión en estructuras de transmisión de energía eléctrica, ya que estas estructuras son

sensibles a este fenómeno y su integridad es fundamental para que el servicio público de la electricidad pueda llegar de manera adecuada a toda la sociedad, otra de las razones por las que tener un manejo adecuado en el mantenimiento de estas es tan relevante.

## Objetivos

### Objetivo general

Desarrollar una guía sobre los tipos más comunes de corrosión presentes en estructuras eléctricas, destinada a los técnicos en campo para el reporte oportuno en los informes de inspección, de modo que se puedan planear acciones preventivas de mantenimiento.

### Objetivos específicos

- Investigar diferentes conceptos fundamentales para el entendimiento del fenómeno de corrosión presente en las estructuras.
- Caracterizar los diferentes ambientes en donde se encuentran las estructuras de transmisión para establecer diferentes zonas de estudio.
- Determinar los elementos necesarios para el diagnóstico de los efectos producidos por la corrosión en líneas de transmisión de energía.

### Capítulo 3. Diagnóstico de la empresa


El problema planteado sobre la inspección en temas corrosivos se va a centrar a las estructuras de transmisión o transporte de la energía, por esto, según la estructura organizacional la subgerencia de subestaciones y líneas es a quien le corresponde, pero el equipo de trabajo encargado de llevar a cabo la metodología que se propone en la guía es el de mantenimiento de líneas, que se divide en potencial y desenergizadas.

El equipo de mantenimiento de líneas tiene un manual constituido para la inspección de las estructuras de transmisión, tiene por nombre *“Manual de mantenimiento de las líneas de transmisión niveles 115 y 230 kV”* con código *MPSMT005*, este especifica las medidas de seguridad, elementos de protección, distancias mínimas y establece diferentes actividades, ya sean a realizar con las líneas energizadas o desenergizadas. En el apartado de la inspección se establece que es una revisión visual para verificar el estado de los componentes, pero no hay nada específico en el tema de la corrosión, ni parámetros para calificar la gravedad, por lo que hay un vacío en el que no hay nada formulado puntualmente para este tema, es por esta razón que en los informes de inspección no hay información sobre el estado de corrosión de los componentes y permite cierta ambigüedad en el reporte de los operarios.

Se van a presentar tres (3) ejemplos de informes de inspección que fueron suministrados por el jefe del equipo de trabajo de mantenimiento de líneas.

**Figura 2.**

*Primer informe de inspección sin información de corrosión.*

ESTRUCTURA 09. SUSPENSION.		
		
ACTIVO: 312 BARBOSA-CIMITARRA.		
No de estructura: 09	Disposición: suspensión.	Tipo de Estructura: torre tronco piramidal circuito sencillo.
Cable de Guarda: 5/16	No de amortiguadores de guarda: 1x2	
Conductor: Acsr 397.5	No de amortiguadores de línea: 1x2.	
Puentes: NA.	Templetes: NA.	
Tipo de Aislamiento		
F1: vidrio x 9 discos.	Jumper: NA.	DPS: NA.
F2: vidrio x 9 discos.	Jumper: NA.	DPS: NA.
F3: vidrio x 9 discos.	Jumper: NA.	DPS: NA.
Diagnostico Predictivo		
Efecto Corona: NA.	Termografía: NA.	Ultrasonido: NA.
Estructura		
Acceso: Bueno.	Terreno: Semiplano.	Obra civil: NA.
Spt: aterrizada las cuatro patas	Cimentación: zapata	Vegetación: potrero, bosque bajo.
Invasión de Servidumbre: NA.		
Cruces de Línea		
Vano: VP-VA.	Nivel: MT	Distancia: 130MTS-10MTS
Observaciones y Anomalías Detectadas		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• via terciaria VP, árbol lateral derecho por encima de la línea VP.</li> </ul>		




Nota. Tomado del equipo de mantenimiento de líneas de la ESSA, informes de inspección.

En la **Figura 2** se muestra el informe de la estructura 9 de la línea 312, en la que se observa en la fotografía inferior centrada que hay signos de corrosión, pero en ninguna parte del informe se menciona.

En otros informes, se evidencia que los operarios tienen la intención de informar o de hablar de oxidación, pero al no haber criterios claros, la información recogida no es útil para la comprensión del verdadero estado del elemento, tal como sucede en la **Figura 3 y 4**, haciendo que los profesionales encargados de la toma de decisiones y planificación del mantenimiento no tengan un panorama real de estado de la estructura en cuanto a corrosión.


### Figura 3.

*Segundo informe de inspección con intención de informar sobre corrosión.*

ESTRUCTURA 38. RETENCIÓN.		
		
		
ACTIVO: 312 BARBOSA-CIMITARRA		
No de estructura: 38.	Disposición: retención.	Tipo de Estructura: torre tronco piramidal circuito sencillo.
Cable de Guarda: 5/16	No de amortiguadores de guarda: 2x2.	
Conductor: Acsr 397.5	No de amortiguadores de línea: 2x2.	
Puentes: Cerrados F2 y F1-F3 abiertos con conector.	Templetes: NA.	
Tipo de Aislamiento		
F1: vidrio x 10 discos.	Jumper: NA.	DPS: NA.
F2: vidrio x 10 discos.	Jumper: NA.	DPS: NA.
F3: vidrio x 10 discos.	Jumper: NA.	DPS: NA.
Diagnostico Predictivo		
Efecto Corona: NA.	Termografía: NA.	Ultrasonido: NA.
Estructura		
Acceso: Bueno.	Terreno: plano.	Obra civil: NA.
Spt: las 4 patas aterrizadas de la torre, contrapeso en la pata C.	Cimentación: Zapata.	Vegetación: potrero, bosque bajo.
Invasión de Servidumbre: NA.		
Cruces de Línea		
Vano: NA.	Nivel: NA.	Distancia: NA.
Observaciones y Anomalías Detectadas		
<ul style="list-style-type: none"> <li>Cruce de vía terciaria VP, hay bastante <b>humedad</b> en la base de la torre.</li> </ul>		

**Figura 4.**

*Tercer informe de inspección tratando de comunicar sobre corrosión.*

ESTRUCTURA 16. SUSPENSION.		
		
ACTIVO: 312 BARBOSA-CIMITARRA		
No de estructura: 16	Disposición: suspensión.	Tipo de Estructura: torre tronco piramidal circuito sencillo.
Cable de Guarda: 5/16	No de amortiguadores de guarda: 1x1.	
Conductor: Acsr 397.5	No de amortiguadores de línea: 1x1.	
Puentes: NA.	Templetes: NA.	
Tipo de Aislamiento		
F1: vidrio x 9 discos.	Jumper: NA.	DPS: NA.
F2: vidrio x 9 discos.	Jumper: NA.	DPS: NA.
F3: vidrio x discos.	Jumper: NA.	DPS: NA.
Diagnostico Predictivo		
Efecto Corona: NA.	Termografía: NA.	Ultrasonido: NA.
Estructura		
Acceso: Bueno.	Terreno: Semiplano.	Obra civil: NA.
Spt: aterrizada las cuatro las patas, bajante en la pata C.	Cimentación: zapata.	Vegetación: potrero, bosque bajo.
Invasión de Servidumbre: NA.		
Cruces de Línea		
Vano: NA	Nivel: NA	Distancia: NA
Observaciones y Anomalías Detectadas		
<ul style="list-style-type: none"> <li>se requiere levantar la punta de diamante de las patas <b>C-D patas oxidadas</b>, realizar poda preventiva a 50 mts de la torre 16.</li> </ul>		

Nota. Tomado del equipo de mantenimiento de líneas de la ESSA, informes de inspección.

Por otro lado, también se puede observar en estas figuras (3 y 4) que se habla de conceptos como humedad u óxidos, pero normalmente los operarios solo lo mencionan en el caso de las patas de la torre, por lo que hay una falta de información bastante grande sobre el

estado integral del resto de la estructura para su reporte, esto puede deberse a que no se le ha dado al personal la capacitación necesaria tanto para el reporte correcto de la inspección, como para la identificación de corrosión en la estructura, por eso se hace imperativo que se genere un procedimiento claro y secuencial para la inspección de corrosión en estructuras de transmisión.

Adicional a lo anterior, el equipo de mantenimiento de líneas no tiene información puntual sobre los materiales constructivos de las estructuras, información que es importante para la identificación de ciertos tipos de corrosión, como es el caso de la corrosión galvánica.

Otro inconveniente, es que como algunas líneas de transmisión son muy antiguas (30 años aproximadamente) no se tienen planos de ellas, es decir, se desconoce cómo ha sido el histórico de su uso, con el fin de llevar un seguimiento del mismo, que en el caso de tenerlos sería ideal para las inspecciones, ya que se podría señalar cual es el componente afectado y cada uno tendría su nomenclatura.

Por otro lado, la organización de la información que tienen, en muchas ocasiones no se puede consultar fácilmente, porque no se encuentra organizada de una forma adecuada, que ayude a revisarla, con el fin de minimizar tiempos en la búsqueda y en la toma de decisiones.

## Capítulo 4. Marco referencia

### Marco Teórico

La corrosión es un fenómeno natural común que se define como el deterioro de un material, resultado de reacciones, ya sean químicas o electroquímicas con el entorno, es la definición que da la NACE, Asociación Nacional de Ingenieros de Corrosión, uno de los mayores entes para prevenir y controlar la corrosión.

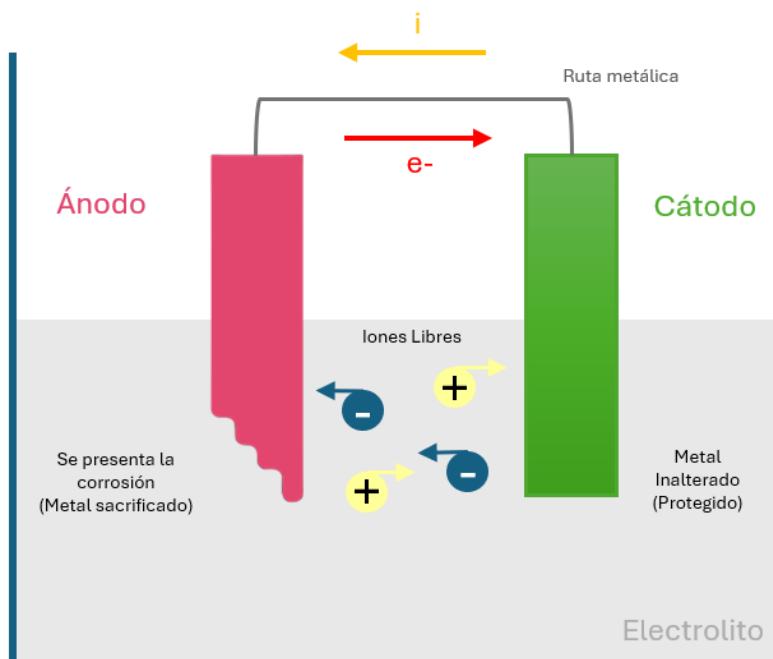
Para entender mejor como se produce la corrosión, se debe conocer sobre las celdas electroquímicas, en ellas se producen reacciones espontáneas de oxidación y reducción de manera simultánea en las que se liberan iones, que permite el flujo de electrones, y como consecuencia hay pérdida de masa del material que actúa como ánodo, pues de él se desprenden los electrones y va aumentar su número de oxidación (Reacción de oxidación), dichos electrones se dirigen al cátodo en donde son consumidos en una reacción de reducción, y como consecuencia este material es el que va a estar protegido.

Para que suceda deben estar presente cuatro elementos; ánodo, cátodo, electrolito y una ruta o paso metálico, si alguno de ellos no se encuentra presente el proceso de corrosión se inhibe, ya que funciona como un circuito cerrado (NACE, 1984).

En la **Figura 5**, se muestra la representación de una celda electroquímica, en donde se evidencia que el ánodo ha perdido material, que sus electrones fluyen hacia el cátodo y que hay iones libres en el medio acuoso o electrolito.

**Figura 5.**

*Representación de una celda electroquímica*



Nota. Adaptada de *Representación de una celda electroquímica*, J. Salazar Jiménez, 2015, tomada de <https://www.scielo.sa.cr/pdf/tem/v28n3/0379-3982-tem-28-03-00127.pdf>

El flujo de electrones se ve posibilitado y determinado por la serie galvánica, **Figura 6**, la cual es una representación de los potenciales electroquímicos de materiales comunes, permitiendo establecer cuáles de estos son los más nobles (catódicos) y los reactivos (anódicos). Los que se encuentran en la parte superior, los nobles, no tienen casi tendencia a corroerse debido a que son inertes químicamente (tienden a no reaccionar o hacerlo muy poco), de manera opuesta a los que están más abajo en la tabla, si se unen materiales que estén en los extremos de la serie son propensos a sufrir de corrosión galvánica, un tipo de corrosión que se menciona posteriormente.

**Figura 6.**

*Serie galvánica para metales y aleaciones comunes*

Metal	Clasificación	Potencial
Platino	Catódicos (Nobles)	+ ↑
Oro		
Plata		
Acero Inoxidable (pasivado)		
Aleaciones Níquel-Cobre		
Cobre		
Bronces	Anódicos (Reactivos)	- ↓
Níquel		
Estaño		
Acero		
Cadmio		
Aluminio		
Magnesio		
Zinc		

Nota. Adaptado de ECCA, 2011,

<https://prepaintedmetal.eu/repository/downloads/1.%20The%20Basics%20of%20Corrosion.pdf>

La corrosión puede verse afectada por diferentes variables que pueden acelerar su velocidad y por ende el deterioro de los materiales, según Charng, en su artículo *“Review of corrosion causes and corrosion control in a technical facility”* existen principalmente seis (6) factores de influencias, estos son; temperatura, humedad relativa, acidez de la solución, sales disueltas, capas protectoras y la concentración de oxígeno.

**Temperatura:** Es de gran influencia para la velocidad en el proceso de corrosión, se afirma que el aumento de ella tiene como consecuencia un incremento significativo en la tasa de corrosión, debido a que se acelera la difusión de oxígeno a través de las capas catódicas del recubrimiento de óxido protector. Incluso se ha manifestado que el aumento de 2 °C ha hecho que la tasa de corrosión se duplique (Charng y Lansing, 1982).

**Humedad relativa:** Es un valor que permite conocer el vapor de agua presente en relación con la capacidad que el aire puede soportar antes de llegar a estar saturado, por esto se da en valores porcentuales. Al condensarse sobre las superficies metálicas de las estructuras permite que exista un electrolito que posibilite la corrosión y con ello el flujo de electrones. Desde aproximadamente un 60% de humedad relativa ya se puede generar condensación, y valores más elevados con la combinación del factor de temperatura acelera la velocidad de corrosión. Se afirma que al medio día es la zona horaria en la que la velocidad de corrosión es menor, debido a la baja humedad y alta temperatura presente (Avila et al, 2005).

**Acidez de la solución:** Se conoce comúnmente como pH, esta medida se refiere a los iones de hidrógeno libres que se encuentran en una sustancia y nos permite establecer si es ácida o alcalina. Una sustancia es neutra cuando tiene como valor el número siete (7), valores inferiores nos diría que estamos en presencia de una sustancia ácida, y si es de ese modo hay más tendencia a la corrosión, ya que hay mayor concentración de iones libres de hidrógeno que buscan electrones con los cuales reaccionar, produciendo que se desprendan del ánodo, aumentando la degradación del material, por lo que se afirma que es mejor tener sustancias neutras o alcalinas, o en tal caso elevar el pH (Charng y Lansing, 1982).

**Sales disueltas:** Influyen en la corrosión debido a que las sales pueden ser ácidas o alcalinas, por lo que podría aumentar o disminuir el pH, relacionado con lo que se mencionó anteriormente según la sal que esté disuelta en el electrolito el proceso de corrosión se puede inhibir o acelerar, y en cierta parte, dicha sal va a ser determinada por el tipo de atmósfera en la que se encuentre, por lo que aquellas categorizadas como industriales son más riesgosas, por los productos que liberan y circulan allí (Charng y Lansing, 1982).

**Capas protectoras:** Las capas protectoras son todos aquellos recubrimientos que presenta el material, ya sean que se hallan depositado de manera natural; aceites y grasas; artificialmente, como pinturas o por *pasividad*, que es una reducción en la reactividad del material, se produce una delgada y muy adherida película de óxido por toda la superficie del elemento que ralentiza o impide la corrosión del material al ser estable, un ejemplo de esto es el aluminio. Las capas protectoras de manera general impiden la corrosión del material, ya que impiden la formación de la celda electroquímica (Charng y Lansing, 1982).

**Concentración de oxígeno:** El impacto de la concentración del oxígeno está determinado por la naturaleza del material, ya que, si es más propenso a la pasividad a mayor concentración el material va a tender a estar más protegido, por el contrario, si el material es más ferroso la concentración elevada de oxígeno va a acelerar el proceso de corrosión (Charng y Lansing, 1982).

En el caso de los tipos de corrosión, se investigaron aquellas más comunes y que se pudieran encontrar en las estructuras de transmisión, principalmente en las torres de celosía metálica, entre ellos están la corrosión uniforme, atmosférica, galvánica, por picadura, por rendijas y microbiológica. Los cuales se mencionan a continuación:

### **Corrosión Generalizada**

Son aquellas que se materializan en grandes áreas o por toda la estructura metálica, principalmente por la acción de la atmósfera en la que se sitúa, se presenta de dos modos.

**Corrosión Uniforme:** De manera visual es fácil de identificar, ya que se caracteriza porque toda la superficie está afectada de manera uniforme o una gran área de ella, las paredes del material se pueden adelgazar hasta llegar al fallo por eso es de relevancia este tipo de

corrosión, pero al ser de fácil detección y medición es muy poco probable que lleve a daños irreparables, también cabe señalar que principalmente se desarrolla en ambientes marinos (Roberge, 2000).

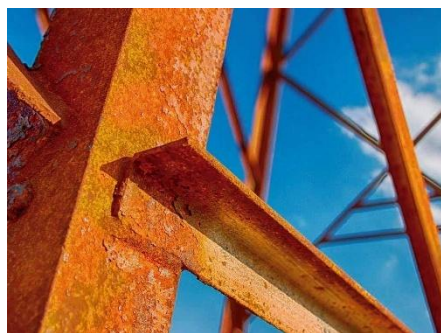
Normalmente se produce gracias a defectos y daños en el sistema del recubrimiento protector, por lo que es un indicador que posiblemente esté fallando y se deba prestar atención. Se puede evidenciar como opacidad en el brillo del metal, oxidación y demás grabados que se observen en la superficie. Si se deja avanzar sin control la superficie puede volverse áspera y derivar en tipos más graves de corrosión.

**Corrosión Atmosférica:** Es el fenómeno que se presenta por la reacción de metales y aleaciones con especies presentes en el ambiente, que da como resultados derivados de corrosión como óxidos e hidróxidos, que son consecuencia de la exposición directa e indirecta con la atmósfera (Santana et al, 2003)

La diferencia entre estos dos tipos se observa en la **Figura 7**, que radica en que en la atmosférica se pueden observar segmentos o partes que, aunque de tamaño considerable, no es toda la estructura la que se ve afectada, como lo es en el caso de la uniforme.

### **Figura 7.**

*Diferencia en los tipos de corrosión generalizada.*



Corrosión uniforme



Corrosión atmosférica

Nota. Adaptadas de [https://issuu.com/pereznikol84/docs/corrosion\\_general-nikol/s/10642884](https://issuu.com/pereznikol84/docs/corrosion_general-nikol/s/10642884) y <https://cmetal.com.pe/blog/post/corrosion>, respectivamente.

### **Corrosión Localizada**

La corrosión localizada representa un mayor riesgo, ya que se presenta en zonas específicas del material y suelen ser más difíciles de detectar. Es determinada por la composición del material, la geometría de piezas o contactos y el medio presente.

Algunos tipos de corrosión localizada que se pueden evidenciar en sistemas de transmisión de energía son:

***Corrosión Galvánica:*** Ocurre cuando metales distintos están en contacto o unión, ya sea física o eléctrica, en presencia de un electrolito, aunque el daño también puede producirse entre metales, aleaciones y otros conductores.

Sucede con las celdas de corrosión; ánodo, cátodo, electrolito y la ruta metálica del modo que se había explicado anteriormente, además, en este tipo de corrosión es de gran importancia la relación de las áreas en contacto, ya que esta va a influir en la tasa de corrosión, pérdida visible de espesor con el paso del tiempo, puesto que, si tenemos un cátodo de gran tamaño en comparación con un ánodo muy inferior, este va a tender a corroerse con mayor velocidad (Roberge, 2000).

Cabe mencionar que este tipo de corrosión no solo sucede a nivel macroscópico, sino que se pueda dar de igual forma en la microestructura del material.

***Corrosión por Picadura:*** Es otro tipo de corrosión localizada que se reconoce cuando se evidencian hoyos o cavidades en el material, el problema, es que pueden ser difíciles de visualizar porque a menudo los productos de la corrosión pueden cubrir estas picaduras.

Es posible decir que de las corrosiones localizadas es una de las más riesgosas debido a que una picadura que se ve pequeña a simple vista puede causar el fallo de toda la pieza o sistema y se presentan en múltiples formas, además suele ser común de encontrar y se da cuando pequeñas partes del material presentan rápidos ataques de corrosión y las zonas contiguas se ven inalteradas (Roberge, 2000).

Según diferentes investigaciones este tipo de corrosión se evidencia principalmente en los cables conductores.

***Corrosión por Rendijas o grietas:*** Para empezar a hablar de este tipo de corrosión, es importante aclarar que, al mencionar fisuras o grietas, también se refiere al espacio (mínimo) entre uniones o piezas, puede ser como aquel que queda entre arandelas y tornillos, roscas, recubrimientos no adheridos correctamente, abrazaderas, etc. Puede presentarse entre materiales que no sean metálicos, como lo son polímeros, vidrio, tales como los aisladores.

Se relaciona con sustancias estancadas a nivel de la fisura, esto debido a que como la grieta o espacio es tan pequeño la solución no va a irse a ningún lado a menos que sea removida, y es lo que facilita el posterior ataque corrosivo (Roberge, 2000).

Va a existir en el espacio una falta de oxígeno por la estrechez en comparación con el resto del sistema, llevando a que esas pequeñas zonas actúen como ánodos (Salazar-Jiménez, 2015).

En la ***Figura 8*** se presentan ejemplos de cómo se visualizan los tres tipos de corrosión localizada en estructuras.

### **Figura 8.**

*Ejemplos de los tipos de corrosión localizada.*



Corrosión Galvánica



Corrosión por rendijas



Corrosión por picadura

Nota. Adaptada de <https://f4.com.ar/corrosion-galvanica/> y de

<https://labtesa.com.ar/site/analisis-de-causa-de-falla/https://labtesa.com.ar/site/analisis-de-causa-de-falla/>

### **Corrosión Microbiológica o Bacteriana**

Es un proceso electroquímico donde la participación de los microorganismos es capaz de iniciar, facilitar o acelerar una reacción de corrosión sin modificar su naturaleza electroquímica (Borenstein, 1994). Como tal no es un tipo de corrosión, pero si es un fenómeno que hace posible el desarrollo de otros tipos de corrosión, mayormente por la presencia de bacterias, pero también se incluyen los hongos y algas.

### **Corrosión por erosión**

Se entiende como una aceleración en el proceso corrosivo de un metal por la acción de un fluido en movimiento contra la superficie del material, que se agrava si en dicho fluido hay partículas sólidas en suspensión (Aperador et al., 2010).

Además, la erosión se asocia a la remoción de las películas o recubrimientos protectores de los elementos, por lo que hace un ambiente propicio para el desarrollo del fenómeno corrosivo.

## Marco Normativo

Se usaron diferentes normas y documentos de diversas instituciones y organizaciones para el establecimiento de parámetros, definiciones y demás factores para la inspección de estructuras de transmisión y la verificación de las acciones preventivas. Cabe mencionar que se tuvo acceso a ellas por medio de bases de datos de la universidad, y/o de la empresa. Estas se presentan en la **Tabla 1**, en donde en la primera columna se encuentra el ítem, en el cual va a referir de donde proviene o para qué se consultaron. En la segunda columna se encuentra la norma específica que se consultó. En la tercera columna se encuentran la aplicación de la norma y finalmente, en la columna cuatro, se puede encontrar información adicional.

**Tabla 1.**

*Normas usadas de referencia.*

Ítem	Norma	Especificación	Información adicional
<b>ET-AT-027 Torres metálicas en celosía (Documento ESSA)</b>	IEC 60815	Selección y dimensionamiento de aisladores de alta tensión destinados a ser utilizados en condiciones de contaminación. Parte 1: Definiciones, información y principios generales	Selección de aisladores y determinación de sus dimensiones pertinentes para su uso en sistemas de alta tensión en relación con la contaminación. Caracterización de lugares por contaminación.
	ASTM A394	Especificación estándar para pernos de torres de transmisión de acero, galvanizados y desnudos	Cubre los requisitos químicos y mecánicos de los pernos de acero revestidos de zinc de cabeza hexagonal y cuadrada y los pernos resistentes a la corrosión atmosférica para su uso en la construcción de torres de transmisión, subestaciones y estructuras de acero similares.
	ASTM A563	Especificación estándar para tuercas de acero al carbono y de aleación (pulgadas y métricas)	Se encuentran los requisitos químicos y mecánicos para ocho clases de propiedades de tuercas de acero al

Ítem	Norma	Especificación	Información adicional
			carbono y de aleación hexagonales y con brida hexagonal para usos estructurales y mecánicos generales en pernos, espárragos y otras piezas con rosca externa.
	ASTM A153	Especificación estándar para recubrimiento de zinc (inmersión en caliente) en herrajes de hierro y acero	Es aplicable a los artículos de herrajes de acero de las clases A, B, C y D. El espesor o peso/masa del recubrimiento de zinc debe cumplir con los valores especificados para varias clases de materiales.
	ASTM A143	Práctica estándar para la protección contra la fragilización de productos de acero estructural galvanizados por inmersión en caliente y procedimiento para detectar la fragilización	Contiene los procedimientos que se pueden seguir para protegerse contra la posible fragilización del acero galvanizado por inmersión en caliente después de la fabricación, y describe los procedimientos de prueba para detectar la fragilización.
	ASTM A123	Especificación estándar para recubrimientos de zinc (galvanizado por inmersión en caliente) en productos de hierro y acero	Requisitos estándar para recubrimientos de zinc galvanizados por inmersión en caliente en productos de hierro y acero hechos de formas laminadas, prensadas y forjadas, fundiciones, placas, barras y tiras.
	ASTM A572 grado 50	Especificación estándar para acero estructural de columbio-vanadio de baja aleación y alta resistencia	Los materiales no deben ser inferiores en propiedades mecánicas a este material, cumplir como mínimo estas especificaciones.
	ASTM A6	Especificación estándar para requisitos generales para barras, placas, perfiles y tablestacas de acero estructural laminado	Requisitos generales que se aplican a las barras, placas, perfiles y tablestacas de acero estructural laminado.
	ASTM B6	Especificación estándar para zinc	Esta especificación cubre el metal de zinc elaborado a partir de mineral u otro material mediante un proceso de destilación o por electrólisis en cinco grados.
<b>ET-AT305 Herrajes para líneas aéreas de alta tensión (Documento ESSA)</b>	IEC 61284/ NTC 3735	Líneas aéreas - Requisitos y pruebas para accesorios	Requerimientos y ensayos para accesorios (inspecciones, pruebas de muestreo, ensayo efecto corona, calentamiento)
	ASTM A239	Práctica estándar para localizar el punto más delgado en un revestimiento de zinc (galvanizado) en artículos de hierro o acero	Proporciona el procedimiento para localizar las porciones más delgadas del recubrimiento de zinc en artículos recién recubiertos
<b>Normas (usadas para el protocolo de inspección)</b>	ISO 12944 (de la 1 a la 9)	Protección anticorrosión para estructuras de acero mediante sistemas de revestimientos protectores, pinturas.	Sirve de guía a los profesionales a la hora de especificar y aplicar sistemas de recubrimiento, y ayuda a asegurar una protección adecuada contra la corrosión en equipamientos y estructuras de acero en diferentes localizaciones.

Ítem	Norma	Especificación	Información adicional
	ISO 9223	Corrosión de los metales y aleaciones. Corrosividad de atmósferas. (Clasificación, determinación y estimación.)	Establece un sistema de clasificación para la corrosividad de las atmósferas, con sus definiciones.
	IEC 61089	Conductores eléctricos trenzados aéreos con tendido concéntrico de cables redondos.	Especifica las características eléctricas y mecánicas de conductores eléctricos trenzados aéreos con cableado concéntrico de alambre redondo.
	UNE-EN ISO 8501	Preparación de sustratos de acero previa a la aplicación de pinturas y productos relacionados. Evaluación visual de la limpieza de las superficies. Parte 1: Grados de óxido y de preparación de sustratos de acero no pintados después de eliminar totalmente los recubrimientos anteriores. (ISO 8501-1:2007)	Explica grados de óxido A, B, C y D. En esta norma se pueden visualizar algunos ejemplos de óxidos para su identificación.
<b>Normas para la realización de las pruebas mecánicas</b>	NTC 309	Conductores de aluminio cableado concéntrico reforzado con núcleo de acero recubierto (ACSR).	Equivalente ASTM B232.
	NTC 360	Alambre de aluminio 1350-H19 para usos eléctricos	Equivalente ASTM B230.
	NTC 461	Núcleo de alambre de acero recubierto con zinc para uso en conductores eléctricos aéreos.	Equivalente ASTM B498.
	NTC 3353	Definiciones y métodos para los ensayos mecánicos de productos de acero.	Equivalente ASTM A370.
<b>Reparación del galvanizado</b>	ASTM A780	Práctica estándar para la reparación de áreas dañadas y sin revestimiento de recubrimientos galvanizados por inmersión en caliente.	Describe los métodos que se pueden utilizar para reparar los recubrimientos galvanizados por inmersión en caliente dañados en herrajes, formas estructurales y otros productos fabricados antes de la galvanización por inmersión en caliente, y las áreas sin recubrimiento que quedan después de la galvanización por inmersión en caliente inicial.
<b>Materiales (Doc 05254 de la ESSA) (Celosía, perfiles en alma llena y tubería estructural)</b>	ASTM A36	Especificación estándar para acero estructural al carbono.	Esta especificación cubre perfiles, placas y barras de acero estructural de carbono de calidad estructural para su uso en la construcción remachada, atornillada o soldada de puentes y edificios, y para fines estructurales generales.
	ASTM A500	Especificación estándar para tubos estructurales de acero al carbono soldados y sin costura	Menciona los tubos estructurales de acero al carbono, soldados y sin costura, formados en frío, redondos, cuadrados, rectangulares o de formas especiales,

Ítem	Norma	Especificación	Información adicional
		conformados en frío en formas redondas y perfiladas	para la construcción soldada, remachada o atornillada de puentes y edificios, y para fines estructurales generales.
	ASTM A370	Métodos de prueba estándar y definiciones para pruebas mecánicas de productos de acero.	El uso principal de estos métodos es realizar pruebas para determinar las propiedades mecánicas especificadas de acero, acero inoxidable y productos de aleación relacionados para la evaluación de la conformidad de dichos productos.
	ASTM F3125	Especificación estándar para pernos estructurales de alta resistencia, acero y acero aleado, con tratamiento térmico, resistencia mínima a la tracción de 120 ksi (830 MPa) y 150 ksi (1040 MPa), dimensiones en pulgadas y métricas.	La especificación F3125 es una consolidación y reemplazo de seis estándares ASTM, que incluyen: A325, A325M, A490, A490M, F1852, F2280.
<b>Inspección</b>	NACE SP0315-2015	Norma para el control de la corrosión atmosférica (por encima del nivel del suelo) de estructuras de transmisión, distribución y subestaciones eléctricas existentes mediante sistemas de recubrimiento.	Proporciona orientación general para la evaluación de las condiciones de recubrimiento y corrosión existentes en estructuras por encima del nivel del suelo, recomendaciones para la remediación de condiciones perjudiciales y ayudar a proteger las estructuras de la corrosión futura. La norma también establece un sistema de clasificación recomendado para abordar los problemas de corrosión por encima del nivel del suelo de forma estructurada.
	NACE SP0215-2015	Control de la corrosión de bajo grado mediante sistemas de recubrimiento	Presenta orientación general para la evaluación de las condiciones de recubrimiento y corrosión existentes en estructuras por debajo del nivel del suelo, también, recomendaciones para la remediación de condiciones perjudiciales y ayudar a proteger las estructuras de la corrosión futura. La norma también ayuda a las empresas de servicios públicos a priorizar las estructuras mediante un sistema de clasificación recomendado para que el tratamiento de los problemas de corrosión por debajo del nivel del suelo sea un proceso más manejable.
	NACE SP0415-2015	Prácticas de Inspección y Evaluación	Proporciona orientación para implementar un proceso de inspección para identificar problemas de corrosión por debajo del nivel del suelo y también proporciona un sistema de clasificación para ayudar a priorizar las estructuras para un seguimiento adicional, ya sea para mantenimiento, mitigación o

Ítem	Norma	Especificación	Información adicional
			restauración. Estos son pasos críticos incluidos como parte de un programa de gestión para mejorar la confiabilidad estructural.
<b>Selección y aplicación de recubrimientos</b>	ISO 14713	Recubrimientos de cinc. Directrices y recomendaciones para la protección frente a la corrosión de las estructuras de hierro y acero (parte 1 a 3)	Se refiere a todo el proceso de galvanizado en caliente, desde el diseño, espesores y demás factores.
	ISO 2081	Recubrimientos metálicos y otros recubrimientos inorgánicos. Recubrimientos electrolíticos de cinc con tratamientos suplementarios sobre hierro o acero.	Especifica los requisitos para los recubrimientos electrolíticos de zinc con tratamientos complementarios sobre hierro o acero. Incluye información que debe proporcionar el comprador al electrolítico y los requisitos para el tratamiento térmico antes y después del electrolítico.
	ASTM D610-08 (2019)	Práctica estándar para evaluar el grado de oxidación en superficies de acero pintadas	Se presentan grados de oxidación del 0 al 10, siendo 0 el peor. Los ejemplos visuales que representan el porcentaje de oxidación indicado en las especificaciones escritas forman parte de la norma.
	ISO 4628-3:2024	Pinturas y barnices. Evaluación de la degradación de los recubrimientos. Designación de la intensidad, cantidad y tamaño de los tipos más comunes de defectos. Parte 3: Evaluación del grado de oxidación. (ISO 4628-3:2016).	Especifica métodos para evaluar el grado de oxidación de superficies recubiertas con pinturas y barnices (recubrimientos orgánicos), y recubrimiento metálico más un recubrimiento orgánico (sistema dúplex), por comparación con estándares pictóricos.

## Capítulo 5. Metodología

La metodología fue realizada en función de elaborar la guía de inspección de estructuras de transmisión de 115kV y 230kV, en la cual se describen conceptos básicos de corrosión, procedimientos, equipos y/o herramientas necesarias. De igual modo, las medidas preventivas que se pueden optar y su ejecución. Con el propósito de desarrollarla se plantearon los siguientes pasos:

**1. Consulta bibliográfica:** se llevó a cabo durante toda la práctica, en donde se revisaron normas, diferentes artículos del sistema de transmisión de energía en Colombia, procedimientos de empresas de sector eléctrico, tanto en Colombia como de otros países, además de diferentes certificados y especificaciones contractuales.

**2. Identificación de materiales que componen las torres de transmisión:** fue necesario organizar la información acerca de los materiales que componen las torres, por lo que se hizo una revisión considerando los requisitos que deben cumplir según el RETIE, Reglamento técnico de instalaciones eléctricas. Además, se tuvo en cuenta certificaciones que envía el contratista, quien es el encargado de la instalación de las torres. Por otro lado, con el fin de tener conocimiento acerca de las torres más antiguas y que están en servicio, se realizaron algunas pruebas mecánicas de tensión a los cables conductores ACSR, Conductor de Aluminio con Refuerzo de Acero, con el fin de evaluar su resistencia y con ello estimar si pueden continuar su uso.

Para ello se hicieron pruebas del conductor completo y por hebras, siendo el de hebras el escogido por sus resultados, para esto se utilizó la máquina universal de ensayos mecánicos *MTS*, modelo *FXSC104B*, de carga máxima 10kN, a una velocidad de 3mm/min, considerando la norma NTC 309.

**Figura 9.**

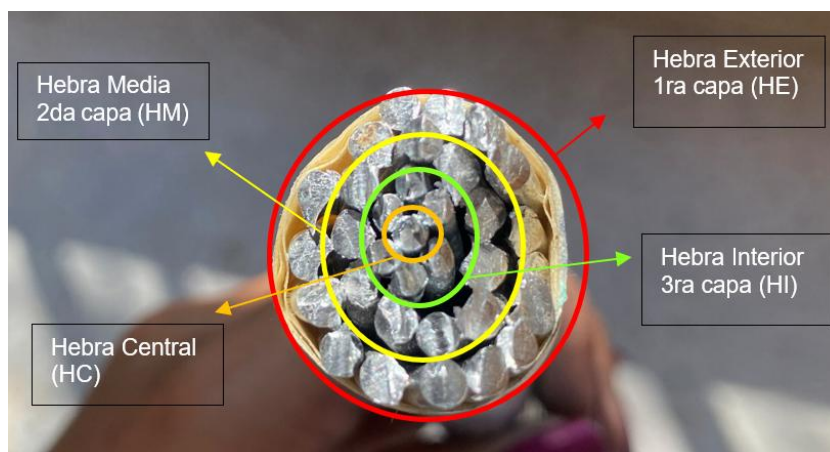
*Montaje para los ensayos de tracción a cables conductores ACSR.*



En la **Figura 9**, se puede visualizar un montaje para las pruebas de tracción a los cables conductores por hebras, para ello fue necesario identificar y clasificar por capas las hebras del cable conductor, tal como se observa en la **Figura 10**. Estos ensayos se realizaron a tramos de dos líneas de transmisión diferentes, la línea 308 (LN 308) y la línea 307 (LN 307). Además, se testearon algunas hebras de cable nuevo para verificación de propiedades.

**Figura 10.**

Capas de cable conductor ACSR



**3. Clasificación de las atmósferas:** según las normas *ISO 9223* y la *ISO 12944-2* se presentan unas clasificaciones de atmósferas según su agresividad corrosiva, en este caso se hicieron adaptaciones en el orden contextual de la empresa, junto con la estipulación de la frecuencia de inspección.

**4. Clasificación de criterios de evaluación para la corrosión:** Se establecen dos formas de calificación, por recubrimiento y por pérdida de espesor, que se basan en las normas, pero con adaptaciones para estar alineados con los requerimientos de la empresa.

**5. Planteamiento metodología de inspección:** Se definen los pasos que el personal técnico debe seguir para la inspección de las torres de transmisión, para esto se utilizó la información establecida en los pasos anteriores, además, se propusieron acciones preventivas y equipos sugeridos. En este paso, como complemento para el desarrollo de la inspección se realizó un formato para diligenciar los hallazgos en las torres y la elaboración de una base de datos dinámica para su trazabilidad, esto con Softwares de los cuales se tiene licencia por parte de la universidad o la empresa, tal como Excel.

## Capítulo 6. Resultados y discusiones

### Materiales

Con base en la información recopilada, se pudo clasificar los materiales que componen las torres de transmisión, teniendo en cuenta su aplicación y se mencionó su constitución, la cual se puede observar en la **Tabla 2**. En esta, la primera columna se refiere a materiales según su tipo, en el que principalmente están; los herrajes y accesorios, perfiles, empalmes, cables y otros. En la segunda columna se visualizan los componentes, quienes, en su mayoría son conformados por más de un elemento. La tercera columna se llama elemento, en donde se describen cada una de las piezas que integran al componente. La última columna se denomina materiales, donde se enuncia qué material es.

Se puede evidenciar que la mayor parte de elementos son de acero galvanizado, por otra parte, los componentes que son de tipo herrajes o accesorios se observa que hay diferentes materiales implicados como el acero y el aluminio, en donde, podría ocurrir corrosión galvánica, siendo el aluminio el ánodo, por su bajo potencial electroquímico que es inferior al del material en contacto, por lo que tendería a corroerse. Sin embargo, es importante tener en cuenta otros factores como humedad, temperatura, pH entre otros.

### Tabla 2.

*Materiales de los diferentes componentes de las estructuras de transmisión.*

Tipo	Componente	Elementos	Materiales
Herrajes y accesorios	Cadena de suspensión simple	Horquilla-Bola en Y	
		Rótula-ojo	
		Grapa de suspensión	
		Varilla de Armado	Aluminio
	Horquilla-Bola en Y	Bulón	Acero Galvanizado en Caliente
		Tuerca	Acero Galvanizado en Caliente

	Cuerpo	Acero Forjado Galvanizado en Caliente
	Pasador de seguridad	Latón
Cadena de suspensión para cable de guarda	Grillete	Acero Galvanizado en Caliente
	Grapa de suspensión	Aleación de Aluminio
	Conector Bifilar/ (Grapa paralela)	Aluminio
	Conector Unifilar	Acero Galvanizado en Caliente
	Varilla de Armado	Aluminio
	Horquilla bola	Bulón
Tuerca		Acero Galvanizado en Caliente
Cuerpo		Acero Forjado Galvanizado en Caliente
Pasador de seguridad		Latón
Horquilla Ojo Revirado	Bulón	Acero Galvanizado en Caliente
	Tuerca	Acero Galvanizado en Caliente
	Cuerpo	Acero Forjado Galvanizado en Caliente
	Pasador de seguridad	Latón
Grillete Recto	Bulón	Acero Galvanizado en Caliente
	Tuerca	Acero Galvanizado en Caliente
	Cuerpo	Acero Forjado Galvanizado en Caliente
	Pasador de seguridad	Latón
Rótula Ojo	Cuerpo	Acero Forjado Galvanizado en Caliente
	Pasador de seguridad	Latón
Cadena de retención simple con grapa tipo Pistola	Horquilla-Bola en Y	
	Rótula-ojo	
	Grapa tipo pistola	
Rótula horquilla	Bulón	Acero Galvanizado en Caliente
	Tuerca	Acero Galvanizado en Caliente
	Cuerpo	Acero Forjado Galvanizado en Caliente
	Pasador de seguridad	Latón
Eslabón	Cuerpo	Acero Forjado Galvanizado en Caliente
Grapa de suspensión	Cuerpo	Aleación de Aluminio
	Zapata	Aleación de Aluminio
	Tornillo en U	Acero Galvanizado en Caliente
	Tuerca	Acero Galvanizado en Caliente
	Arandela	Acero Galvanizado en Caliente
	Bulón	Acero Galvanizado en Caliente
	Pasador de seguridad	Latón
Grapa de amarre (Tipo pistola)	Cuerpo	Aleación de Aluminio
	Zapata	Aleación de Aluminio

		Tornillo en U	Acero Galvanizado en Caliente
		Tuerca	Acero Galvanizado en Caliente
		Arandela presión	Acero Galvanizado en Caliente
		Pasador de seguridad	Acero Inoxidable o Latón
	Yugo triangular	Cuerpo	Acero Forjado Galvanizado en Caliente
	Cadena de retención (tipo compresión)	Horquilla-Bola en Y	
		Aislador	
		Rótula horquilla	
		Grapa de compresión	
	Cadena de retención simple para cable doble	Grillete Recto	
		Eslabón Cadena	
		Yugo triangular	
		Horquilla-Bola en Y	
		Grapa amarre	
		Rótula horquilla	
	Varilla de armado	Cuerpo	Aleación de Aluminio
	Empalmes de compresión	Cuerpo	Aleación de Aluminio
	Grapa de compresión para cable ACSR	Cuerpo	Aleación de Aluminio
		Émbolo	Acero Forjado Galvanizado en Caliente
		Derivación	Aleación de Aluminio
		Tornillería	Acero Galvanizado en Caliente
	Grapa de compresión para cable AAAC	Cuerpo	Aleación de Aluminio
		Émbolo	Acero Forjado Galvanizado en Caliente
		Derivación	Aleación de Aluminio
		Tornillería	Acero Galvanizado en Caliente
		Pasador	Acero Inoxidable
	Camisa de reparación cable de guarda	Cuerpo	Aleación de Aluminio 6201-T81
	Grapa de retención con derivación en T	Cuerpo	Aleación de Aluminio
		Conexión	Aleación de Aluminio
		Derivación	Aleación de Aluminio
		Perno	Acero
		Tuerca	Acero
		Arandela	Acero Inoxidable
		Arandela presión	Acero Inoxidable
	Perno de Ojo con tuerca	Cuerpo	Acero Galvanizado en Caliente
<b>Herrajes o Accesorios en cobre</b>	Conector flexible de cobre tipo trenza	Conector	Cobre estañado
		Terminal	Cobre electro-plateado
	Tubería cédula 80		Cobre
<b>Empalmes OPGW</b>	Empalmes OPGW	Cruceta empalme soporte montante	Acero Galvanizado en Caliente

		Empalme fibra óptica 24 hilos	Acero inoxidable
<b>Herrajes</b>	Concha ojal	Fijación a estructura de cadenas de aisladores y/o ferretería en líneas de trans y subestaciones.	Acero zincado forjado, Hierro fundido maleable, Hierro fundido nodular
	Abrazadera de suspensión articulada para aislador de pilar		Aleación de Aluminio
<b>Cables</b>	Cables Conductores	Alma de acero	Acero recubierto en zinc Clase A
		Cuerpo de Aluminio	Alambre de Aluminio 1350 H19
	Cables OPGW	Tubo Central	Aluminio Extruido
		Revestimiento de hilos	Acero revestido de Aluminio Acero Galvanizado en Caliente Aleación de Aluminio
<b>Celosía, perfiles en alma llena y tubería estructural</b>	Perfiles, placas y barras para construcción remachada o atornillada	ASTM A36	Acero estructural al carbono
	perfiles, placas, tablestacas y barras	ASTM A572	Acero estructural de columbio-vanadio de baja aleación y alta resistencia
	Barras, placas, perfiles y tablestacas	ASTM A6	Acero estructural laminado
	Tubos estructurales soldados y sin costura	ASTM A500	Acero estructural al carbono
	Pernos de torres de transmisión	ASTM A394	Acero Galvanizado en Caliente
	Pernos estructurales de alta resistencia	ASTM F3125	Acero y Acero aleado con tratamiento térmico.
	Arandelas	ASTM F436	Acero Endurecido.

Nota. Se muestran los materiales de los diferentes componentes según su tipo (herrajes, celosía, etc), esa información obtenida de normas de RETIE, anexos de contratos, certificados y demás.

Además, como se menciona en la metodología se realizaron ensayos de tracción a cables conductores ACSR, cuyos datos fueron tabulados y se presentan en el **Apéndice A y B**, igualmente se halló la carga de rotura, para esto se usó el procedimiento descrito en la

metodología y finalmente se calculó la ruptura remanente del cable a través de los valores de carga de rotura, que se presenta en la **ecuación 1**.

$$Ruptura\ remanente = \frac{Resistencia\ a\ la\ ruptura\ (experimental)}{Resistencia\ la\ ruptura\ (norma)} * 100 \quad (1)$$

En el caso de la LN 307 es el cable más afectado con una ruptura remanente de 84,77% viéndose disminuido su capacidad de soportar cargas casi un 16%, por otro lado, la LN 308 solo se ve disminuido aproximadamente un 7%, puesto que su ruptura remanente es de 92,81%.

Los cables conductores se pueden mantener mientras no tengan hebras rotas y las condiciones de operación se mantengan iguales, pero si tiene valores por debajo del 90% de ruptura remanente se aconseja que se realicen inspecciones anuales para comprobar su estado, si descendiende del 80% ya se deben programar actividades de restauración o el cambio de tramos.

Además, se demuestra que los alambres más significativos son los de acero por el valor de carga que soportan, esto al ver en las tablas las hebras que aprobaron los valores de carga establecidos en la norma. Es posible que el cable de la LN307 haya sufrido algún fenómeno que afectó de manera directa su alma de acero, mientras que el cable de la LN 308 tiene un desgaste normal, aunque se evidenció mucha contaminación en su interior.

### **Clasificación de atmósferas**

De acuerdo con las normas ISO consultadas se hizo una adaptación en la que se presenta la siguiente tabla que se va a tener de referencia.

#### **Tabla 3.**

*Clasificación de ambientes según agresividad corrosiva de la ESSA.*

<b>Clasificación</b>	<b>Agresividad</b>	<b>Zonas</b>
<b>C1</b>	Baja	Rurales
<b>C2</b>	Media	Urbanas
<b>C3</b>	Alta	Industriales y Urbanas muy contaminadas

Para identificar la zona en el que el personal se encuentra se establecieron características que permite la clasificación de manera más fácil.

***Clasificación en C1:***

- Área con abundante vegetación y muy pocas edificaciones o sin ellas.
- No hay carreteras cercanas, se llega por trocha, no hay tráfico vehicular constante.
- No hay mucha densidad poblacional o puede ser nula.

***Clasificación en C2:***

- Área totalmente urbanizada o suburbana, por lo que mayormente está llena de edificaciones, con algunas zonas que no lo están como lagos, parques y demás.
- Las estructuras que se encuentren dentro de las ciudades, como en el área metropolitana de Bucaramanga.
- Estructuras que estén a una distancia aproximada de 5 km o menos con vías de mucho tránsito vehicular.
- Presencia de mucha densidad poblacional.

***Clasificación C3:***

- Estructuras cercanas a plantas industriales (10 km o menos), sobre todo aquellas que emitan sulfatos y cloruros (tales como sulfato de azufre y cloruro de sodio), como los son las productoras de fertilizantes, pesticidas, refinerías, cementeras, entre otras.

## Criterios de evaluación

Se presentan la **Tabla 4** y **5**, en la que se evidencian los dos tipos de criterios que hay, por recubrimiento y espesores, respectivamente, que fueron adecuadas de la norma *NACE SP0315* y la experiencia del sector eléctrico.

**Tabla 4.**

*Criterios de calificación por recubrimientos.*

<b>Clasificación</b>	<b>Condición</b>	<b>Descripción</b>
<b>R1</b>	Levemente Deteriorado (1 a 10% óxido)	-Recubrimiento desgastado, se observan manchas, algunas ampollas de óxido, incrustaciones, o pintura algo suelta, casi no tiene picaduras.  -Evaluar en los próximos tres (3) años.
<b>R2</b>	Deteriorado (10 a 50% óxido)	- 10-50% de óxido en la superficie.  -Gran parte de la superficie es cubierta con óxido, tiene hoyos, ampollas y pintura no adherida. Picadura es visible.  -Atención dentro de un (1) año.
<b>R3</b>	Muy deteriorado (Más del 50%)	-Más del 50% de la superficie está oxidado.  -Necesita atención inmediata.

**Tabla 5.**

*Criterios de calificación por pérdida de espesor.*

<b>Criterio</b>	<b>Descripción</b>
<b>Grado 1</b>	- No hay pérdida de espesor. - Capa de óxido uniforme o puntos rojizos pequeños. - Cara opuesta a los vientos muy poca afectación. - Desgaste del recubrimiento parcial.
<b>Grado 2</b>	- Pérdida del espesor menor o igual al 20%. - Color café generalizado. - Aún se evidencia el recubrimiento de zinc.

<b>Criterio</b>	<b>Descripción</b>
<b>Grado 3</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pérdida de espesor superior al 20% del original.</li> <li>- Acero ya es afectado.</li> <li>- No debe haber recubrimiento o muy mínimo y desgastado.</li> </ul>

## **Metodología de inspección**

Se establecen ciertos pasos que van a ser mencionados a continuación, pero se presentan de manera profunda en la guía realizada:

1. ***Solicitud de permiso:*** En cuanto al ingreso de predios donde se encuentran las estructuras.
2. ***Establecimiento de roles:*** Con los técnicos que se dirijan a la inspección, se debe estipular que roles va a tomar cada uno, ya sea en el caso que se requiera subir a la torre, quien se queda en piso.
3. ***Punto de referencia:*** Las torres tienen caras que se identifican por las patas de esta, y con trayectoria de los cables conductores (subestación de origen a subestación destino).
4. ***Caracterización del ambiente:*** Se van a realizar mediciones de temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, con estos valores se pueden clasificar en ciertos criterios (H1, H2, H3) o priorizar ambientes, además, el inspector con las pautas de la guía debe clasificar el ambiente (C1, C2, C3).
5. ***Inspección interfase:*** Se realiza la inspección visual de la interfase de la torre, es donde se unen el bajante y el montante con la cimentación. Se debe verificar el estado de la cimentación y el grado de corrosión.

6. **Identificación de puntos críticos:** A través del dron se va hacer un barrido de la estructura con el fin de hallar elementos y componentes que se encuentren en estados críticos o deban ser observados con más detalle.

7. **Medición de espesor:** Se van a tomar medidas de espesores de los puntos críticos hallados previamente, para esto se pueden usar medidores de espesor por ultrasonido o un micrómetro.

8. **Criterios de calificación:** Se establecen los grados de corrosión y de recubrimientos, esto con ejemplos de como se observan en diferentes tipos de componentes, para que el técnico en campo pueda identificarlos con más facilidad para su reporte.

9. **Registro fotográfico:** Se va a realizar el registro fotográfico según los hallazgos establecidos, cada uno que se encuentre debe estar relacionado al menos con una fotografía, de modo que permita validar las observaciones realizadas y ayude en la programación del mantenimiento, esto va en el informe.

10. **Realización de informe:** Se debe realizar un informe en el que se distinga que partes son las que están en mal estado, para esto se plantea una plantilla de formato, que va en conjunto con el registro fotográfico.

Para realizar la metodología de inspección como se plantea en la guía se consultaron herramientas y equipos necesarios, además, se desarrollaron unos recursos para diligenciar en campo (plantillas) y para reportar al llegar a la subestación (formato de la base de datos digital), con esto se plantearon acciones preventivas que se van a realizar según la calificación dada por los técnicos con los criterios establecidos.

## *Herramientas y equipos*

En la **Tabla 6**, se mencionan las herramientas o equipos necesarios para realizar la metodología planteada en la guía con una breve descripción y la razón por la cual son necesarios.

**Tabla 6.**

*Equipos y herramientas para la metodología planteada.*

<b>Equipo/Herramienta</b>	<b>Imagen</b>	<b>Descripción</b>
<b>Termohigrómetro</b>		Es un instrumento que permite medir la temperatura y humedad relativa del entorno, importantes para caracterizar el lugar y necesario en la verificación de condiciones en el caso de algunas acciones preventivas.
<b>Anemómetro</b>		Medición de la velocidad del aire, que en algunas técnicas de mantenimiento predictivo y previo al pintado se deben verificar los valores apropiados. Por otra parte, es importante en la caracterización del ambiente, valores altos de velocidad serían focos de atención.
<b>Positector</b>		Permite medir el espesor de recubrimientos, se solicita que mida materiales orgánicos y ferrosos, de modo que pueda medir recubrimientos de pintura o el galvanizado de los elementos, ideal para la clasificación de los grados de corrosión por recubrimientos y para la verificación de medidas preventivas.

## *Formatos de inspección*

Se realizaron dos formatos relacionados con la inspección, uno para el reporte de hallazgos en los informes y otro que se maneja de forma digital para la trazabilidad del estado de las estructuras. El primero consta de una plantilla, que presenta de forma ordenada los aspectos

que deben tenerse en cuenta y casillas para su diligenciamiento, un ejemplo se presenta en la

### Figura 11.

Por otro lado, el formato digital realizado en Excel es interactivo, en el que se presentan opciones de respuesta y al ser completado se llena automáticamente la base de datos con la información diligenciada. Una vista del formato se presenta en la **Figura 12.**

### Figura 11.

*Formato para los informes de inspección.*

ACTIVO XXX									
Caracterización Ambiente									
Atmósfera:		Humedad Rel(%):		Vel. Viento(m/s):		Temperatura(°C):			
Estructura (Marcar con una X)									
Tipo de Cimentación:		Parilla		Zapata		¿Buen estado?		SI	NO
¿Concreto fracturado?		SI	NO	Levantar punta diamante:		A	B	C	D
Comentarios cimentación:									
Inspección Interfase (Escribir los grados)									
Pata A:		Pata B:		Pata C:		Pata D:			
¿Tiene pintura las patas?:		SI	NO	¿Está en buen estado?:		SI	NO		
Inspección Cuerpos (Marcar con una X)									
Elemento	Buen estado	Deformados	Faltantes	Grado 1	Grado 2	Grado 3			
Cuerpo 1									
Perfiles									
Elementos unión									
Tornillería									
Cuerpo 2									
Perfiles									
Elementos unión									
Tornillería									
Cuerpo 3									
Perfiles									
Elementos unión									
Tornillería									
Cuerpo 4									
Perfiles									

Elementos unión												
Tornillería												
Cuerpo Recto												
Perfiles												
Elementos unión												
Tornillería												
<b>Observaciones:</b>												
Inspección Fases (Poner G1, G2, G3 por grados de corrosión)												
<b>Herrajes</b>												
<b>Circuito</b>	<b>Izquierdo</b>						<b>Derecho</b>					
<b>Fase</b>	Fase A		Fase B		Fase C		Fase A		Fase B		Fase C	
<b>Vano</b>	VA	VP	VA	VP	VA	VP	VA	VP	VA	VP	VA	VP
<b>Corrosión</b>												
<b>Observaciones:</b>												
Amortiguadores												
<b>Circuito</b>	<b>Izquierdo</b>						<b>Derecho</b>					
<b>Fase</b>	Fase A		Fase B		Fase C		Fase A		Fase B		Fase C	
<b>Vano</b>	VA	VP	VA	VP	VA	VP	VA	VP	VA	VP	VA	VP
<b>Desplazados</b>												
<b>Corrosión</b>												
<b>Faltantes</b>												
<b>Observaciones:</b> Si hay amortiguadores de guarda acá se podrían especificar.												
Cables conductores												
<b>Circuito</b>	<b>Izquierdo</b>						<b>Derecho</b>					
<b>Fase</b>	Fase A		Fase B		Fase C		Fase A		Fase B		Fase C	
<b>Vano</b>	VA	VP	VA	VP	VA	VP	VA	VP	VA	VP	VA	VP
<b>Rotos</b>												
<b>Distancia del hilo roto</b>												
<b>Corrosión</b>												
<b>Observaciones:</b> Si hay cables de guarda acá se podrían especificar.												
Miembros principales de los brazos (perfiles, eclipsas, soportes, tornillería)												
<b>Circuito</b>	<b>Izquierdo</b>						<b>Derecho</b>					
<b>Fase</b>	Fase A		Fase B		Fase C		Fase A		Fase B		Fase C	
<b>Vano</b>	VA	VP	VA	VP	VA	VP	VA	VP	VA	VP	VA	VP
<b>Deformados</b>												
<b>Faltantes</b>												
<b>Corrosión</b>												
<b>Observaciones:</b>												
Placa Identificación												
<b>¿Hay placa?</b>		SI		NO	<b>Estado:</b>		Bien		Difícil leer		Imposible leer	
<b>Observaciones:</b>												

**Figura 12.**

*Formato digital.*

Registro

Datos de la orden

Fecha  #OT  #Consignación

Inspector Capacitado

Inspector

Datos del Activo

Línea  Tipo de estructura  #Cuerpos

#Torre  Subestación Origen  #Aisladores

Tensión  Subestación Destino

Caracterización ambiental

Humedad Relativa (%)  Temperatura (°C)  Velocidad Viento (mps)  Clasificación atmósfera

Inspección Interfase (Grados de Corrosión)

Pata A  Pata B  Pata C  Pata D

Inspección Elementos de Unión y Perfiles en cuerpos

Se va a dividir por grupos y cuerpos, por favor seleccionar si sugiere aplicación de Recubrimiento, si la pieza se encuentra en grado 3 de corrosión lo que significa que necesita cambio o si en el cuerpo se presentan ambas condiciones en los elementos, al finalizar adjuntar la imagen de la plantilla, indicando especialmente la ubicación de los elementos en Grado 3.

Tornillería

Cuerpo 1

Cuerpo 2

Cuerpo 3

Cuerpo 4

Cuerpo 5

Cuerpo 6

Cuerpo R

Eclipsas

Cuerpo 1

Cuerpo 2

Cuerpo 3

Cuerpo 4

Cuerpo 5

Cuerpo 6

Cuerpo R

Perfiles

Cuerpo 1

Cuerpo 2

Cuerpo 3

Cuerpo 4

Cuerpo 5

Cuerpo 6

Cuerpo R

Imagen

EXAMINAR

### ***Acciones Preventivas***

Se presentan dos acciones preventivas que se escogen según el grado de corrosión determinado posterior a la inspección, estas son el galvanizado en frío y la pintura de las torres.

**1. Galvanizado en frío:** es un recubrimiento de zinc que permite la reparación del galvanizado o su regeneración en superficies metálicas y protegerlas de la corrosión, también se

puede aplicar en superficies que no habían sido galvanizadas previamente. Para retocar zonas dañadas se debe cumplir con la norma ASTM A780. Se recomienda su uso cuando las áreas afectadas son mínimas, no hay pérdida de espesor y cuando se deba aplicar in situ por su sencillez.

Existen pinturas y aerosoles para la aplicación del galvanizado en frío, por lo que se pueden usar pistolas, brochas o rodillos. Si se desea que tenga una protección comparable con el galvanizado en caliente el producto debe tener un porcentaje mínimo del 95% de Zinc en su composición y tener un espesor de aproximadamente 75 micrómetros.

Para su aplicación se debe tener la superficie libre de óxidos, aceites, grasas y demás, esto mediante limpieza manual o mecánica, y si requiere limpieza con disolventes o productos químicos, además, si se desea después del galvanizado en frío se pueden utilizar pinturas como método posterior de protección.

**2. Pintura:** la norma de referencia para la aplicación de pinturas y barnices en estructuras de acero es la ISO 12944, la cual va a ser la guía para seguir ya que es un estándar universalmente aceptado, pero además se debe hacer uso de la ISO 8501, Preparación de substratos de acero previa a la aplicación de pinturas y productos relacionados.

La preparación de las superficies se puede realizar por diferentes métodos, cabe mencionar que el grado de limpieza no es comparable entre ellos, pero debe ser compatible con el sistema de repintado que se piensa usar, la información presentada aparte de considerar la norma se basa en lo postulado por SSPC, Steel Structures Painting Council.

**2.1. Requisitos ambientales:** debe haber un control de las condiciones medio ambientales para poder realizar la preparación de la superficie y el pintado de la estructura:

- Temperatura ambiente entre 8°C y 40°C.

- Humedad Relativa < 90%.
- Punto de rocío > 3°C (Diferencia entre la temperatura de la superficie y la de rocío).
- Velocidad de los vientos < 35 km/h (9,8 mps).
- Temperatura de la superficie del metal debe estar entre 8 a 40°C.

**2.2. Preparación superficie:** la preparación de la superficie se debe realizar por personal previamente capacitado, que se recomienda sea diferente a la cuadrilla de pintado, se busca retirar todos los contaminantes e impurezas presentes en las estructuras y generar cierta rugosidad que mejore la adherencia de la pintura.

- **Limpieza por Solventes (SP-1):** es aquella en la que se usan disolventes, emulsiones y demás compuestos para la eliminación de grasas, aceites, manchas y demás contaminantes. La aplicación suele ser manual o por equipos de presión y posteriormente necesita un aclarado con agua limpia, se puede utilizar en conjunto con otros métodos de limpieza para eliminar la cascarilla de laminación, óxido y demás.

- **Limpieza Manual (St/SP-2):** su propósito es eliminar impurezas, como los residuos de soldadura, oxidación, cascarilla, herrumbre, pintura desprendida y demás por medio de herramientas manuales no mecánicas. Se elige cuando no es posible por métodos abrasivos o cuando el recubrimiento y la pintura se encuentran aceptables y son pequeñas las zonas degradadas, puede no desprender todos los residuos. Las herramientas más usadas son los cepillos metálicos, espátulas, rascadores, paños de fibra sintética con abrasivos imbuidos, tela esmerilada, martillos de descascarillar.

- **Limpieza Mecánica (St/SP-3):** a diferencia de la anterior se usan equipos eléctricos o neumáticos, con el mismo propósito de eliminar impurezas, los equipos comunes son

cepillos metálicos rotativos, martillos de percusión, pistolas de agujas, normalmente el más usado es el esmeril angular, es importante recalcar que no debe causar daño ni deformación en los perfiles, evitando la creación de muescas y tratando de mantener el galvanizado. Verificar que los contaminantes junto con el óxido no se pulimenten, de modo que podrían crear una ilusión de lustre en el acero que lleve a conclusiones equivocadas y esto impide la adherencia del recubrimiento. Se recomienda que para llevarla a cabo haya una cuadrilla de aproximadamente cuatro a seis linieros, y finalmente, para áreas de difícil acceso como ángulos, pernos y demás se complementa con la limpieza SP-2.

Tanto en la SP-2 y SP-3 al finalizar las operaciones y antes del lavado se debe verificar que no hayan quedado restos de suciedad, corrosión e impurezas y se debe realizar una inspección en la que se corrobore que todos los perfiles se intervinieron.

#### Consideraciones:

- En aceros galvanizados, se recomienda primeramente una limpieza con solventes, para posteriormente realizar un lijado por la superficie sin que haya deterioro del material.
- Si se forma herrumbre después del chorreado es necesario volver a realizar la limpieza.
- Si se evidencian aceites, grasas y demás deben ser limpiados con disolventes.
- La limpieza y el pintado de la estructura se deberían realizar el mismo día, es por lo que se sugiere que se haga desde las primeras horas.
- El contratista debe especificar todos los productos que va a utilizar, anexando sus especificaciones técnicas, además de especificar el proceso de preparación de superficie.

- **Lavado de Estructura:** se hace un lavado de la torre a mano con un removedor de sales solubles que se debe diluir correctamente con agua tratada y se aplica mojando una tela o malla en la mezcla que se frota contra la superficie de la estructura.

Posterior al lavado se realiza un análisis químico, en el que se debe asegurar que no haya un valor más alto de 80mg por m<sup>2</sup> a través de un método de campo, método Bresle (ISO 8502-6), si no se obtiene el valor esperado se debe hacer la prueba de nuevo, si en la comprobación el resultado es negativo, debe volver a prepararse la superficie y lavarse hasta tener los resultados esperados.

Se puede usar el positector o parches especiales junto con reactivos químicos para llevar a cabo la medición de las sales.

**2.3. Aplicación Pintura:** antes de realizar la aplicación de la pintura es importante considerar los pasos previos:

- **Almacenamiento y transporte:** se menciona que el almacenamiento de la pintura no debe ser superior a un (1) año de su fabricación, posterior a este tiempo debe pasar por procesos de regeneración propios de cada fabricante, es importante que cada producto tenga su respectiva ficha técnica.

El transporte de la pintura debe realizarse con sumo cuidado, en donde no se exponga directamente a las condiciones ambientales, deben estar completamente sellados y no soportar temperaturas superiores a los 40°C, normalmente tienen una película protectora en el exterior.

Hay pinturas que después de abiertas pueden cerrarse para su reutilización según el fabricante, y es importante que estos sean marcados de manera clara.

- **Homogeneizado:** la pintura para usar es de tipo alquídico para estructuras metálicas, pero al tener muchos sólidos y pigmentos con el tiempo estos se sedimentan, por lo

que antes de iniciar el pintado se debe homogeneizar para esto se sumerge el taladro mezclador a una profundidad de 3/4, con velocidad moderada/constante durante unos tres a cinco minutos, se verifica insertando una varilla hasta el fondo para ver la consistencia, esto debe ser supervisado por una persona capacitada por el fabricante o personal autorizado.

- ***Aplicación para grados de corrosión 1:*** antes de proceder con la aplicación de la pintura se debe hacer una revisión de la indumentaria de seguridad y equipos necesarios, verificado lo anterior, los encargados de pintar suben la estructura, abajo habrá un liniero abastecedor que hará un último homogeneizado de pintura y por medio de poleas la provee a los demás linieros, el orden que se va a llevar es de arriba hacia abajo y se hace con un guante mitón para evitar derrames.

Para pintar las ménsulas se deben proteger las cadenas de aisladores con cobertores, los linieros están debidamente estrobados, guardando las distancias mínimas de seguridad, portando sus cinturones de seguridad y manteniendo la posición de trabajo previamente establecida, este es un trabajo que se realiza en caliente.

Durante todo el proceso de la aplicación de pintura el liniero debe estar evaluando el grosor de la película, esto con un calibrador de espesor húmedo (peine), por lo que todos los linieros de la cuadrilla deben tener uno personal, además, todo es supervisado por un interventor capacitado que se encuentra en el suelo, por eso es importante el uso de radios o intercomunicadores.

Espesor de película húmeda debe ser alrededor de los 10 mills para grado 1 de corrosión y para grado 2 de 12 mills.

- ***Aplicación para grados de corrosión 2:*** el proceso de aplicación es el mismo solo que se van a realizar dos capas de pintura, por lo que se lleva a cabo todos los pasos previos a la

aplicación, los cuales son la preparación de la superficie, lavado, verificación de las condiciones ambientales, homogeneizado y verificación de las medidas de seguridad, luego se sigue el mismo procedimiento con los linieros que se suben y lo que están de despacho, cubriendo ménsulas y demás, se recomienda que la primera capa sea de un color, por ejemplo, rojo, se seca, según el tiempo de secado del fabricante y no superior a 48 horas, se realiza una limpieza con agua desmineralizada y se aplica la segunda capa de pintura, de otro color, el designado por la empresa.

Espesor de película húmeda para la primera capa aproximadamente de 7 mills, y de la segunda capa de 10 a 12 mills.

- ***Espesores de película y durabilidad:*** La norma establece ciertos rangos de durabilidad, estos son:

- Bajo = 2 a 5 años
- Medio = 5 a 15 años
- Alto = > 15 años

Se van a tener unos espesores de película seca que según la durabilidad que se desea son los que se deben cumplir, como se observa en la ***Tabla 7.***

***Tabla 7.***

*Espesores aproximados según la ISO 12944-5 para la durabilidad de recubrimientos por atmósferas.*

<b>Clasificación Atmósfera</b>	<b>Durabilidad</b>	<b>Espesor Capa Seca</b>
<b>C1</b>	Bajo	80 µm
	Media	150 µm
	Alta	200 µm
<b>C2</b>	Bajo	120 µm
	Media	160 µm

Clasificación Atmósfera	Durabilidad	Espesor Capa Seca
C3	Alta	200 $\mu\text{m}$
	Bajo	160 $\mu\text{m}$
	Media	200 $\mu\text{m}$
	Alta	280 $\mu\text{m}$

- **Materiales y equipos:** algunos de los materiales, herramientas y consumibles, sin considerar la indumentaria y elementos de protección personal, se enuncian en la **Tabla 8**.

**Tabla 8.**

*Materiales y equipos para realizar la aplicación de la pintura.*

Consumibles	Herramientas y equipos
· Pintura alquídica para torres de transmisión	· Espátulas.
	· Taladros eléctricos.
	· Hélice para homogeneizar pinturas.
· Primer correspondiente a la pintura elegida.	· Binoculares.
	· Poleas y manilas.
· Removedor de sales solubles.	· Carpas plásticas
· Lija esmeril.	· Protectores para aisladores.
· Guantes mitones.	· Martillo escoriador.
· Brochas.	· Termohigrómetro.
· Cepillos de cerdas de acero.	· Anemómetro.
· Baldes o recipientes plásticos de 10L aprox.	· Medidor de espesor húmedo
	· Extensiones y planta eléctrica.
· Disolventes (si son necesarios).	· Tanques para almacenamiento de agua.
· Telas o malla para lavado.	· Esmeril angular.
· Parches Bresle.	· Positector.

**2.4. Control:** finalizada la pintura de las estructuras se debe verificar la correcta aplicación y secado de la pintura (tiempos de secado según el fabricante), además se identifican daños en los recubrimientos por agentes externos de la zona, se deben programar inspecciones para asegurar que el proceso quedó correcto junto con mediciones de la pintura seca, es

importante que durante el procedimiento se hayan tenido todas las precauciones en cuanto a recolección de residuos, derrames y demás acciones que impacten el ambiente.

## Capítulo 7. Recomendaciones

Con base en la búsqueda bibliográfica que se realizó durante la elaboración de la guía de inspección se encontraron diferentes estudios, investigaciones y recomendaciones de personas que se han dedicado a la corrosión y más específicamente en líneas de transmisión, tal como lo es Juan Maya en Colombia. Algunas de las recomendaciones que resaltan son las siguientes.

Los conductores son cables que permiten el transporte de energía eléctrica por las estructuras de transmisión, son relevantes para la operación de la empresa y el cambio de largos tramos podría resultar en gastos considerables, por lo que mantenerlos es de gran relevancia, el mayor inconveniente con estos es que su inspección solo se puede realizar mediante el dron lo que limita mucho lo que se puede hallar, además, son los elementos que más sufren de corrosión por picadura, lo que hace más difícil que se pueda deducir el estado en el que se encuentra, es por eso que se sugiere el uso de grasas anticorrosivas conductoras que más se adapten a las condiciones del cable y en lugares que consideren pertinentes, lo que podría evitar el cambio de conductores antes que cumplan su vida útil ahorrando costos.

Se mencionan otras acciones, tales como el cambio de las placas de identificación de las estructuras por materiales no metálicos, sino por la fibra de vidrio, que, si se viene manejando en las torres nuevas, pero sería importante que se pudiera seguir reemplazando en todas las estructuras hasta que en su totalidad las placas sean de ese material.

En el caso de tener atmósferas muy severas, o condiciones especiales, que deben ser evaluados por la empresa, se recomienda cambiar el material de ciertos herrajes críticos, que en su mayoría son de acero galvanizado, por unos de acero inoxidable, tal como el acero dúplex 2205, que es manejado por otras empresas del sector eléctrico y ha dado buenos resultados, pero con un previo estudio de costo-beneficio.

Otras recomendaciones que deberían ser consideradas por los encargados de la empresa junto con el personal, sería la definición de la protección para las cimentaciones, debido a que hay torres cuya cimentación es de parilla, que es una estructura metálica que se entierra pero no hace uso de concreto, por lo que las patas de las torres quedan expuestas a la humedad del terreno además del pH del mismo, se aconseja que en lo posible se deje de usar este tipo de cimentación y continúen con la de zapata o buscar formas más efectivas de proteger la interfase de la torre.

La verificación que el almacenamiento y disposición de los elementos y componentes se haga de la manera adecuada y, además, la mejora de los sistemas de puesta a tierra, en donde se ha encontrado el uso de cemento conductor para disminuir la resistencia del suelo, disminuir impedancias y la prevención de la corrosión.

Si se desean seguir realizando ensayos de tracción dentro de la empresa para evaluar la condición del cable conductor, se recomienda el método de hebra por hebra con la distinción de capas, ya que, según los resultados obtenidos el ensayo del conductor completo puede llevar a errores de interpretación, ya que al menos en las gráficas de esfuerzo – deformación este se va a comportar como un material compuesto de fibras, y no como una unidad, sin mencionar que la sujeción inadecuada imposibilita que el alma de acero falle y no se puedan obtener resultados confiables.

## Conclusiones

La corrosión es un fenómeno que afecta a empresas del sector eléctrico, en especial sus líneas aéreas, por esto se realizó una identificación de los tipos más comunes de corrosión que se presentan en las estructuras de transmisión, de igual forma, se evidencia que es necesario la clasificación de los ambientes según su agresividad, ya que da pauta para la toma de medidas preventivas y correctivas.

La guía planteada proporciona una base teórica acerca del fenómeno y su inspección, pero es fundamental que se realicen las capacitaciones necesarias al equipo de trabajo, además, si la empresa desea seguir manejando el fenómeno de corrosión sería ideal que haya una persona o departamento encargado y que se formen en el tema, esto con instituciones o entes que certifiquen en recubrimientos, tales como ASCOR.

Se propone una metodología de inspección para la detección de corrosión en las estructuras de transmisión, en donde se establecieron criterios propios para la calificación del estado de componentes, de modo que se pueda manejar mejor de manera interna para la planeación de los mantenimientos, ya que serían por condición. Además, se realizó la especificación de las actividades preventivas respectivas según el estado del activo, así como los equipos mínimos necesarios que facilitan una buena inspección.

Los resultados de la metodología planteada se van a evidenciar cuando el procedimiento tenga tiempo de estar implementándose, ya que va a ser visible lo que se puede ahorrar en términos económicos al tener un manejo de la corrosión adecuado al contexto operacional, aunque en un principio suponga una inversión de tiempo y dinero, que deben ser evaluados. Es por esta razón que llevar el histórico de las estructuras se hace vital, para entender como se comportan en el tiempo y evidenciar los cambios.

## Referencias

- Aguilera Castro, Adriana. (2010). Direccionamiento estratégico y crecimiento empresarial: algunas reflexiones en torno a su relación. *Pensamiento & Gestión*, (28), 85-106.  
Recuperado 15 de octubre de 2024, de [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1657-62762010000100005&lng=en&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1657-62762010000100005&lng=en&tlng=es).
- Aperador, W., Caicedo, J. C., España, C., Cabrera, G., & Amaya, C. (2010). Bilayer period effect on corrosion–erosion resistance for [TiN/AlTiN] n multilayered growth on AISI 1045 steel. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 71(12), 1754-1759.
- Avila Ayón, V., Rodríguez Quesada, A. L., & Lías Rodríguez, Y. (2005). Influencia de los parámetros medioambientales en la corrosión de elementos estructurales metálicos. *Ciencias Holguín*, XI (4), 1-11.
- Borenstein, S. W. (1994). *Microbiologically influenced corrosion handbook*. Woodhead Pub.
- Charng, T., & Lansing, F. (1982). *Review of corrosion causes and corrosion control in a technical facility* (p. 12).
- Conecta. (2022). *Conceptos de un sistema de transmisión de energía eléctrica*. Conecta con la energía. <https://conectagt.com/continuidad-del-negocio/conceptos-basicos-de-un-sistema-de-transmision-de-energia-electrica/>
- Delinder, L. S. V., & Brasunas, A. deS (Eds.). (1984). *Corrosion Basics: An Introduction*. National Association of Corrosion Engineers.
- ECCA (2011). The Basics of Corrosion. Technical Paper. Recuperado de <https://prepaintedmetal.eu/repository/downloads/1.%20The%20Basics%20of%20Corrosion.pdf>

- Maya, J. (2007). Metodología para el manejo integral de la corrosión en Líneas de transmisión de energía eléctrica; III Congreso CIER de la Energía CONCIER, Abastecimiento Energético Regional –Retos y Perspectivas-, Medellín Colombia, Nov 27-30.
- Molina, J. D. (2008). Impacto de la Corrosión Atmosférica sobre la Infraestructura de Líneas de Transmisión en Colombia.”. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Univ. de Antioquia, Medellín, Colombia.
- Molina, J. D., Villada, F., & Mesa, N. (2011). La corrosión atmosférica en sistemas de transporte de energía eléctrica: modelo de vida útil y su remuneración en Colombia. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (59), 257-266.
- Quiénes somos.* (s/f). Recuperado el 29 de noviembre de 2024, de <https://www.essa.com.co/site/informacion-corporativa/quienes-somos>
- Roberge, P. R. (2000). *Handbook of corrosion engineering*. McGraw-Hill.
- Salazar-Jiménez, José Alberto. (2015). Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales. *Revista Tecnología en Marcha*, 28(3), 127-136. Recuperado 3 de septiembre de 2024, de [http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0379-39822015000300127&lng=en&tlng=es](http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0379-39822015000300127&lng=en&tlng=es).
- Santana, J., Santana, F., & González, J. (2003). The effect of environmental and meteorological variables on atmospheric corrosion of carbon steel, copper, zinc and aluminium in a limited geographic zone with different types of environment. *Corrosion Science*, 45(4), 799–815. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(02\)00081-1](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(02)00081-1).

Villada, F., Molina, J. D., & Velilla, E. (2009). Modelo de vida útil para estructuras acero-zinc utilizadas en la transmisión de energía eléctrica en Colombia. *Información tecnológica*, 20(6), 57-66.

## Apéndices

### Apéndice A.

Ensayos de tensión al cable conductor de la Línea 308.

Muestra	Capa	Probeta	Diámetro (mm)	Longitud Inicial (mm)	Carga rotura (kN)	Resistencia la tracción (MPa)	Deform. Rot. (mm/mm)	Lim Elást. (MPa)	Carga Elást. (kN)	Área (mm <sup>2</sup> )
Tramo de cable de la LN 308 San Silvestre-Barranca. Fase 2. Torre 185-186.	1RA CAPA (Exterior) (Aluminio)	HE1	2,8	151	0,252	40,945	0,0072	12	0,074	6,1575216
		HE2	2,8	139	0,484	78,605	0,0203	14	0,086	6,1575216
		HE3	2,75	144	0,343	57,681	0,0093	13	0,077	5,93957361
		HE4	2,9	146	0,493	74,579	0,0167	13	0,086	6,60519855
		HE5	2,7	146	0,568	99,179	0,0171	15	0,086	5,72555261
		HE6	2,8	149	0,657	106,665	0,0183	26	0,160	6,1575216
		HE7	2,7	151	0,176	30,752	0,0046	10	0,057	5,72555261
		HE8	2,8	152	0,466	75,66	0,0144	16	0,099	6,1575216
		HE9	2,7	155	0,521	91,027	0,012	18	0,103	5,72555261
		HE10	2,8	156	0,67	108,864	0,013	30	0,185	6,1575216
		HE11	2,7	159	0,312	54,516	0,0075	13	0,074	5,72555261
		HE12	2,8	147	0,366	59,425	0,0111	5	0,031	6,1575216
		HE13	2,75	148	0,543	91,433	0,0134	17	0,101	5,93957361
		HE14	2,7	149	0,286	50,02	0,0076	12	0,069	5,72555261
		HE15	2,65	151,5	0,367	66,596	0,0076	13	0,072	5,5154586
		HE16	2,8	147	0,555	90,089	0,013	13	0,080	6,1575216
		HE17	2,75	150	0,619	104,26	0,0118	27	0,160	5,93957361
		HE18	2,7	151,6	0,765	133,545	0,0184	92	0,527	5,72555261
2DA CAPA (Media) (Aluminio)		HM1	2,6	150	0,592	111,441	0,0137	22	0,117	5,30929158
		HM2	2,65	148	0,133	24,186	0,0014	10	0,055	5,5154586
		HM3	2,7	149	0,757	132,245	0,0157	95	0,544	5,72555261
		HM4	2,7	150	0,149	25,952	0,0018	9	0,052	5,72555261
		HM5	2,75	149,5	0,985	165,883	0,0188	130	0,772	5,93957361
		HM6	2,75	151,4	0,874	147,198	0,018	115	0,683	5,93957361
		HM7	2,6	155	0,886	166,876	0,018	133	0,706	5,30929158
		HM8	2,8	150	0,848	137,698	0,0174	95	0,585	6,1575216
		HM9	2,7	151	0,859	150,103	0,0178	120	0,687	5,72555261
		HM10	2,65	151	0,907	164,399	0,0193	115	0,634	5,5154586
		HM11	2,7	152,4	0,922	161,06	0,0184	128	0,733	5,72555261
		HM12	2,8	153	0,955	155,094	0,0217	130	0,800	6,1575216
3RA CAPA (Interna) (Acero)		HI1	2,7	137	8,388	1465,042	0,1103	1200	6,871	5,72555261
		HI2	2,8	142	8,209	1333,165	0,098	1050	6,465	6,1575216
		HI3	2,8	139	8,603	1397,13	0,1052	1110	6,835	6,1575216
		HI4	2,75	147	8,687	1462,584	0,1048	950	5,643	5,93957361
		HI5	2,8	142	8,835	1434,802	0,0987	1115	6,866	6,1575216
		HI6	2,75	146	6,94	1168,358	0,0838	920	5,464	5,93957361
Hebra central	HC		2,8	146	8,346	1355,463	0,1043	1170	7,204	6,1575216

Nota. Lo sombreado es aquello que por la norma *ASTM B230* y la *ASTM B498* aprueba los requerimientos mecánicos.

## Apéndice B.

### Ensayos de tensión al cable conductor de la Línea 307.

Muestra	Capa	Probeta	Diámetro (mm)	Longitud Inicial (mm)	Carga rotura (kN)	Resistencia la tracción (MPa)	Deform. Rot. (mm/mm)	Lim Elást. (Mpa)	Carga Elást. (kN)	Área (mm <sup>2</sup> )
Tramo de cable de la LN 307 Palenque-San Silvestre. Fase 2. Torre 171-172.	1RA CAPA (Exterior) (Aluminio)	HE1	2,5	113	0,317	59,778	0,016	-	-	4,908738521
		HE2	2,55	106	0,981	192,026	0,023	50	0,255	5,107051557
		HE3	2,8	104	1,032	167,666	0,033	40	0,246	6,157521601
		HE4	2,8	101	0,958	155,552	0,031	65	0,400	6,157521601
		HE5	2,9	104	0,992	150,113	0,024	112	0,740	6,605198554
		HE6	2,8	105	1,047	170,017	0,032	145	0,893	6,157521601
		HE7	2,6	105	1,034	194,713	0,036	55	0,292	5,309291585
		HE8	2,8	110	1,032	167,68	0,03	150	0,924	6,157521601
		HE9	2,7	109	1,046	182,623	0,028	50	0,286	5,725552611
		HE10	2,75	101	1,013	170,555	0,032	143	0,849	5,939573611
		HE11	2,6	101	0,61	114,889	0,02	20	0,106	5,309291585
		HE12	2,6	106	0,623	117,322	0,018	23	0,122	5,309291585
		HE13	2,7	102	1,017	177,567	0,028	153	0,876	5,725552611
		HE14	2,6	101,6	0,758	142,836	0,024	114	0,605	5,309291585
		HE15	2,75	105,6	0,791	133,172	0,028	110	0,653	5,939573611
		HE16	2,8	104,4	0,866	140,698	0,029	108	0,665	6,157521601
		HE17	2,65	100	0,741	134,401	0,026	105	0,579	5,515458602
		HE18	2,7	108	0,803	140,206	0,022	112	0,641	5,725552611
2DA CAPA (Media) (Aluminio)		HM1	2,8	102	1,044	169,549	0,031	142	0,874	6,157521601
		HM2	2,8	100	0,316	51,339	0,0099	14	0,086	6,157521601
		HM3	2,7	107,5	0,564	98,534	0,015	20	0,115	5,725552611
		HM4	2,8	111	0,727	118,067	0,018	84	0,517	6,157521601
		HM5	2,8	116	0,533	86,489	0,015	18	0,111	6,157521601
		HM6	2,8	111,6	0,367	59,59	0,011	20	0,123	6,157521601
		HM7	2,6	113	0,721	135,872	0,021	108	0,573	5,309291585
		HM8	2,6	112,7	0,515	97,067	0,013	20	0,106	5,309291585
		HM9	2,8	105	0,419	67,991	0,012	18	0,111	6,157521601
		HM10	2,75	111	0,406	68,323	0,011	17	0,101	5,939573611
		HM11	2,65	106	1,031	187,015	0,026	148	0,816	5,515458602
		HM12	2,8	110	0,666	108,1	0,014	26	0,160	6,157521601
3RA CAPA (Interna) (Acero)		HI1	2,9	106	8,497	1286,487	0,115	1050	6,935	6,605198554
		HI2	2,7	110	7,63	1332,616	0,12	1100	6,298	5,725552611
		HI3	2,8	112	6,705	1088,876	0,119	850	5,234	6,157521601
		HI4	2,8	117	5,582	906,474	0,101	570	3,510	6,157521601
		HI5	2,75	115	6,402	1077,84	0,103	810	4,811	5,939573611
		HI6	2,7	112	2,26	394,646	0,058	120	0,687	5,725552611
Hebra central		HC	2,9	109	8,967	1357,626	0,106	1120	7,398	6,605198554

Nota. Lo sombreado es aquello que por la norma *ASTM B230* y la *ASTM B498* aprueba los requerimientos mecánicos.