



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento

**MONITOREO DE ESTADO DE CONDICIÓN DE TORNILLERÍA UTILIZADA  
EN UNIONES DE ESTRUCTURAS METÁLICAS DE TORRES DE SOPORTE  
DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA**

**Mtro. Ing. Carlos Alejandro Alegre Ordóñez**

Asesorado por el Mtro. Ing. Ludwyn Fernando Fuentes Ramos

Guatemala, abril de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**MONITOREO DE ESTADO DE CONDICIÓN DE TORNILLERÍA UTILIZADA  
EN UNIONES DE ESTRUCTURAS METÁLICAS DE TORRES DE SOPORTE  
DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**MTRO. ING. CARLOS ALEJANDRO ALEGRE ORDÓÑEZ**

ASESORADO POR EL MTRO. ING. LUDWYN FERNANDO FUENTES RAMOS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**MAESTRO EN ARTES EN INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO**

GUATEMALA, ABRIL DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

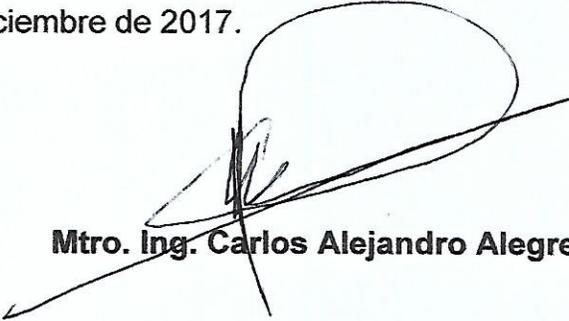
DECANO	Mtro. Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Mtra. Inga. Sandra Ninett Ramírez Flores
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez
SECRETARIA	Mtra. Inga. Lesbia Magalí Herrera López

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **MONITOREO DE ESTADO DE CONDICIÓN DE TORNILLERÍA UTILIZADA EN UNIONES DE ESTRUCTURAS METÁLICAS DE TORRES DE SOPORTE DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA**

Tema que me fuera aprobado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 02 de diciembre de 2017.



**Mtro. Ing. Carlos Alejandro Alegre Ordóñez**

## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Fuente de vida y conocimiento.
<b>Virgen María</b>	Por tomarme de la mano y ser la guía de mi camino.
<b>Mis padres</b>	Carlos Heberto y Marta Lidia, por darme todo, esperando un mejor futuro.
<b>Mi hermano</b>	Heberto José, por demostrarme qué, con esfuerzo y dedicación en la vida, las metas se pueden alcanzar.

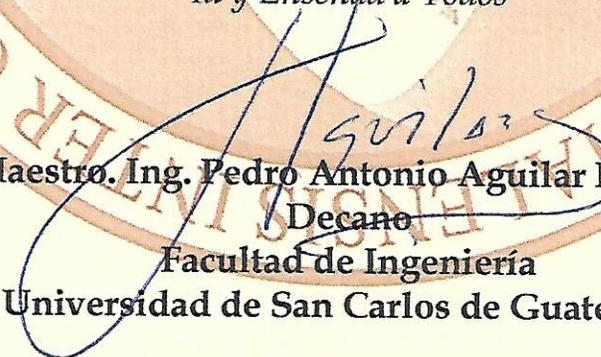
## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por haberme permitido obtener conocimientos.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Que en sus aulas he formado mi academia.
<b>Mis compañeros</b>	Por su amistad, apoyo y solidaridad incondicional en todo momento de la formación académica.
<b>Mi asesor</b>	MSc. Ing. Ludwyn Fernando Fuentes Ramos, por su amistad y colaboración en este trabajo.
<b>TRELEC</b>	Por abrir sus puertas a la investigación y a sus métodos de inspección y trabajo.

En mi calidad como Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, al Trabajo de Graduación de la Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento titulado: **“MONITOREO DE ESTADO DE CONDICIÓN DE TORNILLERÍA UTILIZADA EN UNIONES DE ESTRUCTURAS METÁLICAS DE TORRES DE SOPORTE DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA”** presentado por el Maestro en Artes en Energía y Ambiente Carlos Alejandro Alegre Ordóñez quien se identifica con Carné 200714758, procedo a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

*“Id y Enseñad a Todos”*

  
Maestro. Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala



Guatemala, abril de 2019.

Cc archivo/LZLA.

Ref.APT-2019-005

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y verificar la aprobación del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística al Trabajo de Graduación titulado **“MONITOREO DE ESTADO DE CONDICIÓN DE TORNILLERÍA UTILIZADA EN UNIONES DE ESTRUCTURAS METÁLICAS DE TORRES DE SOPORTE DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA”** presentado por el Maestro en Artes en Energía y Ambiente **Carlos Alejandro Alegre Ordóñez** quien se identifica con Carné **200714758**, correspondiente al programa de Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

*“Id y Enseñad a Todos”*

  
Maestro. Ing. **Edgar Darío Álvarez Cotí**  
Director

**Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala**



**Guatemala, abril de 2019.**

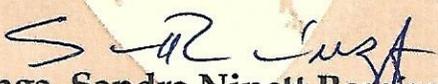
Cc archivo/L.Z.L.A.

Ref.APT-2019-005

Como Coordinadora de la Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado **“MONITOREO DE ESTADO DE CONDICIÓN DE TORNILLERÍA UTILIZADA EN UNIONES DE ESTRUCTURAS METÁLICAS DE TORRES DE SOPORTE DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA”** presentado por el Maestro en Artes en Energía y Ambiente Carlos Alejandro Alegre Ordóñez quien se identifica con Carné 200714758.

Atentamente,

*“Id y Enseñad a Todos”*

  
Maestra. Inga. Sandra Ninett Ramirez Flores  
Coordinador(a) de Maestría  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala



Guatemala, abril de 2019.

Cc archivo/L.Z.L.A.

Ref.APT-2019-005

En mi calidad como Asesor del Maestro en Artes en Energía y Ambiente **Carlos Alejandro Alegre Ordóñez** quien se identifica con carné No. 200714758 procedo a dar el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado "MONITOREO DE ESTADO DE CONDICIÓN DE TORNILLERÍA UTILIZADA EN UNIONES DE ESTRUCTURAS METÁLICAS DE TORRES DE SOPORTE DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA" quien se encuentra en el programa de Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento en la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Atentamente,

*"Id y Enseñad a Todos"*



**Maestro. Ing. Ludwyn Fernando Fuentes Ramos**  
**Asesor(a)**

**Maestría en Prevención y Protección de Riesgos Laborales**

**Guatemala, abril de 2019.**

Cc: archivo/LZLA.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	III
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN .....	XI
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y PREGUNTAS ORIENTADORAS .....	XIII
OBJETIVOS .....	XVII
RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO .....	XIX
INTRODUCCIÓN.....	XXI
1. MARCO TEÓRICO	
1.1. Torres de transmisión eléctrica.....	1
1.2. Sujeción de piezas de estructura metálica individuales .....	3
1.3. Unión de piezas individuales de estructura metálica .....	4
1.4. Características de materiales de uniones en estructuras metálicas .....	5
1.5. Normativa para tornillería para sujeción .....	8
1.6. Conexiones provisionales .....	9
1.7. Evaluación de diseño estructural de tornillería .....	10
1.8. Monitoreo de estado de condición.....	15
1.9. Evaluación de estado de condición de tornillería en uniones .....	16
1.9.1. Técnicas no destructivas .....	19
1.9.2. Técnicas destructivas .....	23
1.10. Factores climatológicos y ambientales influyentes en el deterioro de la tornillería .....	25

1.11.	Consideraciones de Salud y Seguridad Ocupacional .....	27
2.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	
2.1.	Visita de reconocimiento .....	31
2.2.	Toma de datos y muestras en campo.....	32
2.3.	Ensayos no destructivos .....	33
3.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	
3.1.	Ensayo de radiología X.....	35
3.2.	Ensayo de torque.....	41
3.2.1.	Diámetro 1,6 cm .....	42
3.2.2.	Diámetro 2,2 cm .....	45
3.3.	Riesgos .....	48
3.4.	Propuesta para monitoreo de estado de condición y sustitución de tornillería utilizada en uniones de torres de transmisión eléctrica .....	49
3.4.1.	Procedimiento.....	49
3.4.2.	Precio estimado.....	55
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	
4.1.	Fase de reconocimiento .....	57
4.2.	Medición de torque .....	58
4.2.1.	Diámetro 1,6 cm .....	59
4.2.2.	Diámetro 2,2 cm.....	60
4.3.	Radiología X .....	62
	CONCLUSIONES .....	63
	RECOMENDACIONES .....	65
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	67
	ANEXOS .....	71

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Torre de transmisión eléctrica 69 kV .....	1
2.	Uniones a traslape .....	11
3.	Uniones a tope .....	12
4.	Ruptura del conector por cortante .....	13
5.	Ruptura de la placa por tensión .....	14
6.	Deformación exagerada por presión de contacto .....	14
7.	Fallas por cercanía de unión al borde .....	14
8.	Partes del vernier .....	19
9.	Partes del micrómetro .....	20
10.	Diagrama esfuerzo-deformación .....	23
11.	Determinación del límite de proporcionalidad .....	24
12.	Deformación angular o distorsión .....	25
13.	Vista de ubicación de torre 601888 .....	31
14.	Primer ciclo de radiación de tornillos .....	36
15.	Tornillo 01 .....	37
16.	Tornillo 02 .....	38
17.	Tornillo 03 .....	39
18.	Tornillo 04 .....	40
19.	Gráfica circular 1,6 cm .....	43
20.	Gráfica de barras 1,6 cm .....	43
21.	Diagrama de cajas y bigotes 1,6 cm .....	44
22.	Diagrama de Pareto 1,6 cm .....	45
23.	Gráfica circular 2,2 cm .....	46

24.	Gráfica de barras 2,2 cm .....	46
25.	Diagrama de cajas y bigotes 2,2 cm .....	47
26.	Diagrama de Pareto 2,2 cm .....	48
27.	Comparativo 1,6 cm .....	59
28.	Comparativo 2,2 cm.....	61
29.	Localización de piezas evaluadas.....	81
30.	Diagrama de flujo de procedimiento .....	83
31.	Planos de torre 601888 .....	89

## TABLAS

I.	N5.6-1 Tareas de inspección previas al apernado .....	17
II.	N5.6-2 Tareas de inspección durante al apernado.....	18
III.	N5.6-3 Tareas de inspección después del apernado.....	18
IV.	Denominación de piezas para evaluación .....	35
V.	Radiación absorbida .....	36
VI.	Generalidades de piezas .....	41
VII.	Información de diámetros de pernos en torre 601888 .....	42
VIII.	Torque 1,6 cm .....	42
IX.	Estadísticos 1,6 cm .....	44
X.	Torque 2,2 cm .....	42
XI.	Estadísticos 2,2 cm .....	47
XII.	Procedimiento para monitoreo de estado de condición de tornillería .....	49
XIII.	Precio estimado.....	55
XIV.	Torque esperado en tornillería ASTM A307 colocada en estructura metálica de soporte .....	58

XV.	Reconocimiento de estructura .....	71
XVI.	Ficha técnica 601888.....	74
XVII.	Permiso de trabajo .....	75
XVIII.	Información de torque y evaluación visual de tornillería.....	78



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Å</b>	Angstrom. Medida de longitud. Un angstrom corresponde a $10^{-10}$ metros.
<b>A</b>	Área de sección en contacto
<b>ASTM</b>	<i>American Society for Testing and Materials</i> (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales)
<b>WED</b>	Disipación de energía de las olas
<b>END</b>	Ensayo no destructivo
<b><math>\sigma</math></b>	Esfuerzo al cual es sometido una pieza por acción de la fuerza axial aplicada en un área definida.
<b>P</b>	Fuerza axial aplicada. Variable de observación en inspección de pernos. Indica desarrollo de tarea en todas las juntas apernadas.
<b>Gy</b>	Gray. Medida de energía. Corresponde a Joule/kg.
<b>Hz</b>	Hertz. Medida de frecuencia. Aplica en notación de ingeniería.
<b>kV</b>	Kilo voltios. Medida de voltaje.
<b>MBC</b>	Mantenimiento basado en condición
<b>m</b>	Metro
<b>VM</b>	Modulación vibro acústica

<b>N-m</b>	Newton metro. Medida de torque.
<b>Fy</b>	Resistencia del acero a la tensión
<b>SSO</b>	Salud y Seguridad Ocupacional
<b>TRELEC</b>	Transportista Eléctrica Centroamericana, S.A.
<b>O</b>	Variable de observación en inspección de pernos. Indica observación en forma aleatoria no incluyendo todas las juntas apernadas.
<b>QA</b>	Variable de observación en inspección de pernos. Indica que el encargado de la actividad es el inspector de aseguramiento de la calidad.
<b>QC</b>	Variable de observación en inspección de pernos. Indica que el encargado de la actividad es el inspector de calidad.

## GLOSARIO

<b>Arandela</b>	Elemento circular fabricado de acero estructural que tiene una perforación en el centro y sirve para aporte de superficie endurecida no abrasiva en la unión perno – tuerca.
<b>Conector</b>	Térmico genérico utilizado para elementos de sujeción, tal como pernos o remaches.
<b>Deformímetro</b>	Denominación de cualquier instrumento que mida la deformación.
<b>Ensayo de tensión</b>	Ensayo destructivo en donde una probeta previamente preparada se ve sometida a una carga tipo monoaxial gradualmente creciente (estática) hasta que ocurre la falla.
<b>Ergonomía</b>	Técnica preventiva que consiste en adaptar la realización de un trabajo a la persona que lo realiza.
<b>Micrómetro</b>	Instrumento utilizado para medir longitud y diámetro. Constituye un tipo de deformímetro.
<b>Monitoreo</b>	Medición de variables físicas que constituyen los indicadores de la condición en que se encuentra la máquina y realizando un análisis, se efectúa la comparación contra valores normales, para con ello determinar si la pieza se encuentra en estado bueno o deteriorado.

<b>Radiología</b>	Especialidad que se ocupa de generar imágenes del componente interior de cualquier cuerpo mediante el uso de diferentes agentes físicos (ultrasonidos, rayo X, rayo gamma, campos magnéticos).
<b>Tornillo o perno</b>	Dispositivo de unión para elementos estructurales individuales.
<b>Torquímetro</b>	Instrumento utilizado para medir torque aplicado en una unión apernada entre perno y tuerca.
<b>Tuerca</b>	Elemento con rosca interna utilizado para unir dos o más piezas que previamente tienen agujeros pasantes mediante el uso de otros elementos con rosca externa.
<b>Unión o costura</b>	Combinación de piezas estructurales con elementos de unión para la transmisión de fuerzas entre dos o más miembros constituyentes.
<b>Vernier</b>	Instrumento utilizado para medir longitud y diámetro. Constituye un tipo de deformímetro.
<b>Washa</b>	Pieza mecánica con orificio central discontinua en un punto, utilizada para agregar presión en la zona de contacto entre la cabeza de tornillo y su respectiva pieza de sujeción.

## RESUMEN

El fin de la investigación es proponer un procedimiento para realizar el monitoreo de estado de condición de piezas de tornillería de unión en una torre de estructura metálica tipo celosía. Todo es susceptible de deterioro, y el nivel de deterioro está en función de las cargas, esfuerzos y propiedades del medio circundante al cual es sometido.

Realizar el monitoreo del estado de condición puede constituir un elemento clave para determinar si la estructura vista como un todo, tiene tendencias para continuar en operación o tendencias hacia fallo.

La metodología utilizada para investigación se constituye en tres fases: reconocimiento e inspección del sitio de ubicación; evaluación *in situ* de la condición de torque conjunto a sustitución de piezas para evaluación posterior; y evaluación no destructiva de pieza mediante análisis de condición superficial por medio de inspección visual y evaluación interna de piezas, mediante radiología X.

De la primera fase se evaluó que el medio ambiente circundante (torre ubicada en terreno de generadora de energía eléctrica a base de carbón), unido a las condiciones meteorológicas (periferia del lago de Amatitlán, Guatemala) y a la edad de la estructura (colocada entre 1959 y 1962) son factores que unidos a las cargas propias a las que es sometida la estructura que contribuyen a su deterioro evidenciado en corrosión y desgaste abrasivo superficial.

De la segunda fase se evidenció mediante medición de torque que los aprietes de las unidades ya no es adecuado. De la tercera fase, el ensayo no destructivo radiología evidenció que no hay fisuras internas en las piezas

tomadas por muestreo. La inspección visual de las piezas de tornillería evidenció relación entre los torques de menor valor con las piezas más deterioradas en superficie, especialmente en el paso de rosca; así como se evidenció deterioro por corrosión en la superficie.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y PREGUNTAS ORIENTADORAS**

La falta de monitoreo del estado de condición de los componentes de una estructura metálica de tipo celosía no permite determinar el nivel de deterioro de cada pieza, constituyendo de esta forma un riesgo para garantizar la continuidad del servicio de la edificación, pudiendo ser el causal de un fallo que puede llegar a ser fatal.

Cada edificación fue diseñada bajo condiciones de carga y esfuerzo, pudiéndose considerar que las mismas permanecieran durante un período de tiempo de vida útil. Al paso del tiempo, puede que las condiciones de carga hayan sido modificadas y que el medio ambiente circundante influya sobre la estructura, contribuyendo de esta forma a su deterioro.

### **Descripción del problema**

El deterioro de las piezas de unión (tornillos) en estructuras metálicas puede ser un causal de la falla de la estructura. En la construcción de torres de transmisión eléctrica, se utiliza la tipología de estructuras metálicas para la conformación de celosías unidas por medio del uso de tornillos o pernos. Las estructuras durante su vida útil son sometidas a cargas de origen variable (esfuerzos por movimientos mecánicos estáticos y dinámicos originados por peso propio de estructura y componentes externos, movimientos de fuerzas naturales, factores meteorológicos y de medio ambiente circundante) conforme al uso que tengan.

En las juntas atornilladas, durante su período de vida útil, existen varios factores que pueden incidir en el deterioro de los tornillos, evidenciándose entre ellos como crítico que los mismos pierdan su torque. El monitoreo de estado de la tornillería debe incluir los factores externos que puedan ser causales de su deterioro, tal como las condiciones climatológicas tales (temperatura, humedad relativa, precipitación y viento) que pueden generar un proceso de corrosión química en su reacción con los metales. Si existen zonas de producción industrial en las cercanías, la lluvia ácida puede ser un factor de deterioro en las uniones.

El análisis de estructuras indica que las piezas son sometidas a esfuerzos mecánicos: flexión, corte y deflexión. Los esfuerzos son transmitidos a las uniones. Los anclajes de las piezas en las uniones se realizan por medio de soldadura o tornillería, a los cuales es transmitido el esfuerzo generando fatiga, fricción y desgaste y consecuentemente fallas.

Al determinarse daños, deterioros o fracturas en la tornillería de las uniones en una estructura de soporte, se requiere de proceder a su sustitución. La metodología de evaluación de tornillería está regida por las normas ASTM A307, A325, A490 y A606. Para implementar un procedimiento de trabajo para la sustitución de la tornillería, consideraremos lo contenido en el Acuerdo Gubernativo 229-2014 y sus Reformas 33-2016. Para la sustitución debe de considerar en sus procedimientos la normativa de salud y seguridad ocupacional vigente en el país, técnica que en Guatemala no se ha empleado o contemplado como sistemas de control y seguimiento de los mantenimientos.

Tras colocar la estructura en servicio, permanece sometida a esfuerzos debido a las cargas aplicadas, lo cual implica un deterioro tanto en las piezas metálicas individuales componentes como en los componentes utilizados en las uniones. Los factores climatológicos y agentes externos pueden igual ser causales de deterioro en las uniones. Con las horas de servicio debe

implementarse un programa de mantenimiento tanto en las piezas metálicas individuales como en las uniones.

### **Pregunta central de investigación**

¿Cuál es el procedimiento para monitorear el estado de condición y procedimiento de sustitución de la tornillería en las uniones de una estructura metálica de torre de transmisión eléctrica en funcionamiento?

### **Pregunta de investigación1**

¿Cuáles son las técnicas sugeridas para determinar el deterioro de las piezas de tornillería para anclaje?

### **Pregunta de investigación2**

¿Cuáles peligros y riesgos son inherentes a las actividades de evaluación de estado de condición, montaje y sustitución de tornillería utilizada en las uniones de las piezas de anclaje?

### **Pregunta de investigación3**

¿Cuáles son las tendencias de inspección de torque, deterioro superficial e interno de las piezas de tornillería?



## **OBJETIVOS**

### **General**

Establecer un procedimiento para monitorear el estado de condición de tornillería utilizada en uniones de estructuras metálicas de torres de soporte de transmisión eléctrica.

### **Específicos**

1. Identificar la combinación de técnicas establecidas en el mercado para realizar la evaluación del estado de condición de la tornillería utilizada en uniones de estructuras metálicas de una torre de transmisión eléctrica.
2. Analizar peligros y riesgos de las actividades de evaluación de estado de condición, montaje y sustitución de tornillería deteriorada en uniones de estructuras metálicas de una torre de transmisión eléctrica.
3. Establecer tendencias de inspección de torque, deterioro superficial e interno de las piezas de tornillería.



## RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

La investigación realizada es de tipo descriptiva, realizada mediante la toma de datos en campo de piezas de tornillería; recolectando valores de torque, comparando los datos obtenidos contra los esperados en investigaciones previas y realizando ensayo radiología X para evaluación superficial e interna del estado de condición de las piezas de tornillería.

La estructura metálica utilizada como base para realizar la investigación, fue una torre tipo celosía constituida por piezas individuales unidas por medio de tornillería, cuya finalidad es la transmisión eléctrica en dos circuitos de 69 kV cada uno. Está ubicada en el municipio de Amatitlán, departamento de Guatemala, en el interior de una generadora de energía eléctrica a base de carbón (la planta ya cerró operaciones). Fue fabricada, montada y puesta en operación entre los años 1959 y 1962.

Evaluar el estado de condición de las piezas de tornillería es crucial para garantizar la funcionalidad de la torre. Basado en la investigación de Telecom sites, la medición de torque es un elemento de monitoreo empleado para garantizar la continuidad de servicio. Esta evaluación se realizó empleando herramientas para medición, procedimiento evaluado previo a la actividad y validado por un encargado de seguridad industrial, equipo de protección personal y personal con experiencia en montaje de estructura metálica.

Al ser de uso de transmisión eléctrica la torre, y estando en funcionamiento, continuando en línea primordial de minimizar cualquier tipo de riesgo, se delimitó la zona de trabajo detectando zonas con exposición a corriente eléctrica (descartando la evaluación de la zona) y colocando varilla para aterrizaje conectada al sistema de tierras de la edificación (previo al inicio

de labores de medición de torque). La toma de datos en campo se realizó por el investigador, así como su tabulación y ordenamiento para inferir tendencias, generar gráficos y sacar conclusiones estadísticas.

En la recolección de información de torque, se tomó muestras para realizar laboratorio en gabinete. Entre las piezas recolectadas, se tomaron las que tenían torques menores, las cuales prácticamente estaban sueltas y no estaban contribuyendo óptimamente a la edificación, por lo que su retiro y sustitución se realizó sin contratiempos. Con las piezas a disposición, se evidenció corrosión superficial, fisuras superficiales, deterioro por fricción (desgaste de paso), elongación y disminución de diámetro en las piezas.

Buscando relación para el desgaste superficial, se realizó un ensayo de radiología X en las piezas seleccionadas. El ensayo mostró el interior de piezas, no evidenciando en este caso fisuras internas.

La información de torque recopilada; aunada a los deterioros detectados por inspección visual y por radiología X, fue compilada para dar un formato de inicio de recolección de datos con la finalidad de reiterar el estudio para generar un historial de información.

Se generaron curvas de presentación de datos para nivel descriptivo, mostrando gráficos circulares, gráficos de barras, distribución de datos por medio de gráfico de cajas y bigotes y valor esperado por medio de diagrama de Pareto. Los datos fueron comparados contra los datos esperados aceptables para sacar parte de las conclusiones. Todas las secciones, particularmente los trabajos de campo, fueron validados con los requerimientos de la legislación vigente en el país a la fecha de investigación, Acuerdo Gubernativo 229-2014 y sus reformas 33-2016, Reglamento de Salud y Seguridad Ocupacional.

El estudio se complementa realizando un desglose estimado de costos de la evaluación en cada torre similar.

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo constituye una sistematización en el monitoreo del estado de condición de las uniones de tornillería en una torre de transmisión eléctrica.

Para la conformación de la estructura metálica de una torre de transmisión eléctrica, se utilizan como conectores en sus uniones tornillos, que pueden ser según Picazo (2007) de normal y/o alta resistencia. Debido a diversos agentes, se generan en la estructura esfuerzos mecánicos tales como flexión, corte y deflexión (Pytel; Singer, 1994), así como influyen agentes climáticos tales como temperatura, humedad relativa, precipitación y viento (Oliva, 2009) y factores propios de ambiente tal como la lluvia ácida (Garcés; Hernández, 2004).

Las cargas mecánicas que someten la estructura (incluso sobre esfuerzos), período de vida útil y acción de agentes externos van deteriorando las piezas de tornillería, pudiendo provocar su desapriete respecto de sus elementos de sujeción tuercas, arandelas y washas de presión o su fractura (Chapula, 2014).

Determinar un procedimiento para monitoreo del estado de condición de la tornillería constituye el paso inicial para minimizar el riesgo de fallas en las estructuras torres metálicas de soporte para líneas de transmisión eléctrica. Las torres se pueden encontrar en lugares aislados como habitados y constituyen una edificación que de encontrarse en malas condiciones representa un potencial riesgo para el entorno circundante y para la continuidad y eficiencia del servicio eléctrico.

Las condiciones de la tornillería de sujeción evaluadas en la estructura de la torre de transmisión eléctrica estudiada son parámetros para determinar su nivel de deterioro y/o posible fractura y fue comparada contra el ambiente circundante de su entorno, apriete de tornillería y edad. El procedimiento se constituirá en versión inicial para su posterior implementación y evaluación, pretendiendo ser de utilidad para tomar énfasis en la monitorización del estado de condición de pernos utilizados en uniones en edificaciones fabricadas de estructuras de piezas individuales.

En el capítulo uno, marco teórico, se definen los aspectos de tornillería, incluyendo las definiciones de unión o conexión en estructuras, la sujeción de las piezas en forma temporal y permanente (incluyendo sus elementos de sujeción) y las características propias del material constituyente de tornillería. Se enfatizará en su uso en estructuras de torres tipo celosía utilizadas en la transmisión de energía eléctrica.

La medición del estado de condición es esencial durante el desarrollo de vida útil de las edificaciones, pretendiendo de esta manera la prevención de fallas. Las fallas pueden darse por esfuerzos cíclicos o estáticos, induciendo las piezas a fallas por fatiga del material (Smith; Hashemi, 2006). Garantizar las propiedades de fábrica incluye la metodología de colocación (Aguirre, 2010).

Para evaluar el estado de condición, existen metodologías diversas. Realizarlo de forma manual mediante inspección visual y verificación de aprietes y medidas (Fuentes, 1982); o bien mediante el uso de tecnología ultrasonido, radiografía (Ospina; Hernando; Parra, 2011) o acústica (Zhag; *et. al.*, 2017). Validar las técnicas para implementar un historial puede ser esencial en para consolidar un mantenimiento en la edificación, que en el caso de investigación fue una torre de transmisión eléctrica.

Parte esencial de las verificaciones, evaluaciones y muestreo es la reglamentación de seguridad ocupacional vigente en la fecha de investigación en el país. El Acuerdo Gubernativo 229-2014 y sus Reformas 33-2016 (Reglamento de Salud y Seguridad Ocupacional) requieren implementar procedimientos de trabajo, como el uso de equipo de protección personal y colectivo, con fin de velar por la integridad física de los trabajadores; establecen pautas de procedimientos y uso de equipos de protección personal para realizar los trabajos.

En el capítulo dos, desarrollo de la investigación, se realizó el procedimiento de reconocimiento de torre, inspección visual, medición de piezas de tornillería y medición de torque utilizando ensayos con herramienta de uso manual; así como la sustitución *in situ* para sustracción de piezas para realizar ensayos no destructivos.

La tabulación de datos conforme al estado de condición a la fecha de investigación constituye el parámetro del inicio del historial de monitoreo de las uniones de tornillería, es el paso inicial para generar un procedimiento para el monitoreo del estado de condición en la tornillería de la estructura.

El capítulo tres, presentación de resultados, muestra la evaluación de los resultados del ensayo no destructivo de radiología, unido a la condición de apriete y la evaluación de las colindancias de la torre de transmisión eléctrica, presenta las tendencias y datos característicos. Esta gestión se muestra conjunto a la propuesta de procedimiento para monitoreo del estado de condición y sustitución de tornillería utilizada en uniones en torres de transmisión eléctrica, realizando una descripción de las fases claves a realizar durante el período de revisión de una estructura resumido en un diagrama de flujo del procedimiento; presentando una discusión de resultados en el capítulo cuatro.



# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1. Torres de transmisión eléctrica

Según López, Parnás y Rodríguez (2016), las torres de transmisión eléctrica, así como las de telecomunicaciones “suelen ser esbeltas y ligeras y se ubican en zonas de alta exposición al viento” (p. 1). Por ende, los elementos individuales constituyentes, tanto en su dimensión como distribución espacial deben de ser considerados en diseño para minimizar el impacto de este tipo de cargas.

Figura 1. Torre de transmisión eléctrica 69 kV



Fuente: ubicación torre 601888, Amatitlán, Guatemala.

Las torres utilizadas para la transmisión eléctrica y de telecomunicaciones son estructuras de acero tipo celosía, siendo constituidas por elementos

estructurales de piezas metálicas individuales y unidos en sus extremos mediante conectores de diferentes índoles. Para el caso de estudio, los conectores son constituidos por piezas de tornillería. La figura 1 muestra la estructura tipo celosía utilizada como base para investigación.

López; Parnás y Rodríguez (2016) indican:

“Las fuerzas generadas por las cargas de viento provocan movimientos verticales y horizontales en la estructura, los cuales, aun siendo pequeños, dan como resultado grandes tensiones en los elementos cercanos a la base cuando está unida rígidamente a la cimentación” (p. 2).

Bajo el estudio del estado de condición, los movimientos causados por la acción de agentes de viento pueden ser causales de fatiga en los miembros constituyentes de la estructura y de sus pernos de unión.

Para Rodríguez y Jaime (2011) “se entiende por fallo a todo cambio en el comportamiento de alguno de los componentes del sistema, o desviación no permitida de alguna de sus propiedades o parámetros característicos, de manera que no pueda satisfacer la función para la cual ha sido diseñado.” (p. 84).

El enunciado anterior indica que un sistema se considera fallado cuando alguno o varios de sus componentes no encuentren sus estados de condición entre los parámetros considerados como límites para trabajar adecuadamente.

En el caso de las torres tipo celosía, los constituyentes pueden ser las piezas metálicas de conformación, pero también se pueden incluir los cables tensores (López; Parnás; Rodríguez, 2016), los tornillos sin torque en rango (Zhang; *et. al.*, 2017) y el deterioro por causales naturales (Oliva, 2009).

La definición y pasos para evaluación de las piezas de tornillería se describen en los incisos posteriores.

## **1.2. Sujeción de piezas de estructura metálica individuales**

La sujeción es la forma en que se realiza una unión de piezas individuales en una estructura metálica.

Aguirre (2010), indica que la sujeción se realiza por medio de conectores. Un conector es el “término genérico para pernos, remaches u otros dispositivos de unión” (p. 50).

En construcción, para la conexión de dos piezas metálicas individuales se de los dos tipos de sujeción, se indica que mayormente las soldaduras se utilizan para trabajos en planta y los pernos para conexiones en obra. Los remaches o roblones son prácticamente obsoletos (Chapula, 2014).

Para el caso en estudio con sujeción por medio de tornillos, Chapula (2014) indica como elementos para sujeción tuercas, arandelas y pernos (ordinarios o de alta resistencia).

Las tuercas son elementos con rosca interna, que son utilizados para unir dos o más piezas que previamente tienen agujeros pasantes, mediante el uso de otros elementos con rosca externa.

Las arandelas son elementos circulares fabricados de acero estructural cuya elevación es de vista plana que tienen una perforación en el centro y sirven para aporte de superficie endurecida no abrasiva en la unión perno – tuerca.

Los pernos ordinarios son aquellos con carga baja relativa en su capacidad portante. Tienen como facilidad realizar conexiones utilizando únicamente una llave.

Los pernos de alta resistencia son aquellos con carga alta relativa en su capacidad portante. Los hay de dos tipos acorde a su conexión, siendo de deslizamiento o de aplastamiento.

### **1.3. Unión de piezas individuales de estructura metálica**

La unión entre dos piezas metálicas individuales puede ser denominada acorde al fin establecido, denominando “costuras de fuerza, a las que tienen por misión fundamental la transmisión de cargas de un perfil a otro” (Picazo, 2007, p.1); y otro tipo de uniones que son las denominadas costuras de simple acoplamiento, cuando su “misión principal es mantener unidos entre si los perfiles” (Picazo, 2007, p.1). Ambos tipos de uniones son referidas a la sujeción que hay entre dos piezas conformantes de una estructura.

Una unión o conexión se denomina también como la “combinación de elementos estructurales y elementos de unión para transmitir fuerzas entre dos o más miembros” (Aguirre, 2010, p. 50). Las uniones deben de ser las mínimas necesarias y su proceso de ejecución garantizado (Picazo, 2007).

La unión en una estructura metálica, no importando su contexto, se considera como un punto delicado en la estructura metálica, recomendando considerar preverlas durante todo el desarrollo de la fabricación y montaje, siendo consecuente con impedir que hayan más de las establecidas en el diseño original.

Por razones de diseño estructural, la metodología de análisis para evaluar la cantidad de pernos a colocar, su distribución, diámetro y distancias, debe de considerar el esfuerzo de corte al que es sometido cada perno, posteriormente la sumatoria de cada fila de pernos da un esfuerzo cortante total. Según Pytel y

Singer (1994), el resultado de las combinaciones de carga debe es el esfuerzo total a cortante de la unión.

Pytel y Singer (1994), indican dos tipos de uniones en estructuras metálicas: conectadas (realizadas por medio de remaches o pernos) y soldadura (realizadas por soldaduras de cualquier tipo). Para el caso particular de investigación, se utiliza la vía de uniones conectadas por medio de piezas de tornillería.

#### **1.4. Características de materiales de uniones en estructuras metálicas**

Tristancho, Higuera y Florez (2007), indican que el desgaste en las piezas y sus componentes puede ser disminuirse evaluando dos aspectos: características mecánicas del material y su comportamiento al estar en contacto con otro. “No solo basta con que un material cumpla con los requerimientos de resistencia, sino que pueda cumplir con su función durante un período de tiempo razonable” (p. 187).

Las características mecánicas de los materiales que Tristancho, Higuera y Florez (2007), indican son resistencia al desgaste, resistencia mecánica y resistencia a la fricción. Smith y Hashemi (2006), indican que las propiedades de los metales incluyen deformación elástica, deformación plástica, tensión y deformación convencional, coeficiente de Poisson, tensión y deformación de cizalladura, módulo de elasticidad, límite elástico, límite de estricción, tensión y deformación real, dureza y deformación plástica, maclado; y ligado a estas propiedades el ensayo de tracción y el diagrama tensión-deformación.

Las fallas pueden ser causadas por estar las piezas sometidas a esfuerzos cíclicos o repetitivos, denominadas cómo fallas por fatiga, que son

más comunes en piezas en movimiento constante, pero pueden inducir fallas en partes estáticas.

La resistencia a la fatiga en un metal o en una aleación metálica es afectada por la composición química propia, además de otros factores. Según Smith y Hashemi (2006) los cuatro factores son concentración de esfuerzos, aspereza superficial, estado de la superficie y medio ambiente.

La concentración de esfuerzos tiende a aparecer cuando “la resistencia a la fatiga queda reducida de forma muy importante por la presencia de puntos con concentración de esfuerzos tales como muescas, orificios, hendiduras o cambios bruscos en la sección transversal” (p. 287).

La aspereza superficial está relacionada cuando “en general, cuanto más liso sea el acabado superficial de la probeta metálica, mayor será su resistencia a la fatiga” (p. 287). En forma consecuente, una superficie áspera liga a una concentración de esfuerzos.

“Puesto que la mayoría de las fallas por fatiga se originan en la superficie del metal, cualquier cambio importante en las condiciones de la superficie afectará la resistencia a la fatiga del metal” (p. 288). Se refiere a los tratamientos que se puedan realizar a la pieza que alterarán sus características iniciales, dando énfasis en las cargas a las que es sometida la superficie.

El medio ambiente influye, debido a que “si se encuentra presente un ambiente corrosivo durante la aplicación de ciclos de fatiga a un metal, el ataque químico acelera de manera muy importante la velocidad a la cual se propaga la fisura por fatiga” (p. 288).

Después de la evaluación de los factores, Santamaría (2007), propone una metodología de evaluación de falla y su búsqueda, la cual fue implementada con una falla de un perno de sujeción de una unidad de bombeo,

proponiendo cuatro fases que son inspección visual, inspección microscópica, inspección de la superficie desgastada y análisis metalográfico.

Para aplicar la inspección visual de la parte fallada, el primer paso debe de ser un análisis macroscópico del perno fracturado. Se da énfasis en determinar la presencia de agentes externos (grasa, óxido); la lejanía de la falla o su desgaste respecto de la tuerca de sujeción y si existen grietas.

La inspección microscópica se realiza con una muestra pequeña de la pieza en donde se evidencia que está contenida la falla, tras limpiar por medio de limpieza ultrasónica y observar la falla en un microscopio de barrido electrónico. Esta inspección evidencia el punto de inicio de fractura y la presencia de grietas.

La inspección de la superficie desgastada consiste en una evaluación de la superficie de la pieza fallada, para buscar desgaste adhesivo (lo cual liga un desgarramiento del material y una rugosidad microscópica). Por inspección visual se puede evidenciar deslizamiento en al menos una cara de la pieza fallada.

El análisis metalográfico consiste en un análisis microscópico de la condición atacada (preparación metalográfica de una probeta de la zona fallada).

Para el caso en estudio, de la propuesta de Santamaría (2007), se adoptará la inspección visual y la inspección de la superficie desgastada. El perno encontrado corresponde a una normativa ASTM A307; descripción que se realiza en incisos posteriores.

## **1.5. Normativa para tornillería para sujeción**

Silva (2005) y Picazo (2007), coinciden en que el uso de remaches para sujeción de estructuras individuales está en decremento y tiende a ser obsoleto, debido al incremento del uso de soldadura, pernos y pernos de alta resistencia (los pernos requieren de mano de obra menos especializada).

Según Silva (2005) y Chapula (2014), los tornillos utilizados para conectar miembros de acero se dividen en tornillos ordinarios y de alta resistencia.

Los tornillos ordinarios o comunes son designados bajo la norma ASTM A307. Se fabrican al carbono con características de esfuerzo y deformación similar al acero A36. Generalmente son de cabeza y tuerca de sección cuadrada, pero existen con sección hexagonal. Son los utilizados en la estructura evaluada.

Los tornillos de alta resistencia son designados bajo las normas ASTM A325 y A490. Se fabrican al carbono tratado de forma térmica y con aceros aleados. Como esencia básica, su resistencia a la tensión es al menos dos veces superior comparada contra la resistencia de los tornillos ordinarios.

Silva (2005), enmarca que los tornillos de alta resistencia: “se usan para todo tipo de estructuras, estos tornillos se desarrollan para superar la debilidad de los remaches” (p. 25). Además, los tornillos de alta resistencia pueden ser apretados hasta que alcancen esfuerzos de tensión muy altos, lo que implica que la conexión tuerca de tornillo – cabeza de tornillo queda afianzada fuertemente. Esto puede permitir la transferencia de cargas de fricción y la posterior ruptura por torsión de la estructura.

Según Aguirre (2010), los pernos de alta resistencia se agrupan conforme a su resistencia:

1. Grupo A: normas ASTM A325, A325M, F1852, A354 Grado BC y A449

## 2. Grupo B: normas ASTM A490, A490M, F2280, A354 Grado BD

Aguirre (2010), indica que las superficies en la junta, tras ser ensamblada e incluyendo las arandelas adyacentes, deben de permanecer sin escamas (quedando exceptuadas las escamas inherentes al proceso de fabricación). La aplicación de este inciso en campo, se ve limitada por el deterioro, debido a agentes de ambiente; descripción a realizar en incisos posteriores.

### 1.6. Conexiones provisionales

Las consideraciones de esta sección son aplicables en el ítem de sustitución de piezas en la estructura durante el monitoreo de estado de condición, considerando que no se desmonta para el efecto.

Para realizar el montaje de piezas individuales unidas por pernos, Chapula (2014), indica que las uniones de las piezas deben de realizarse de forma tal que proporcionen la resistencia requerida para soportar acción de las cargas muertas, los esfuerzos de montaje, viento, sismo y los requerimientos para soporte de niveles superiores de estructura.

Entre las prácticas durante la secuencia de montaje, debe de existir una cuadrilla encargada para la conexión de los elementos individuales entre si utilizando pernos de fijación temporales. La cantidad de los pernos es la mínima necesaria suficiente para el transporte de las juntas hasta su posición final de ajuste.

Hay montadores que, debido a experiencia previa, utilizan pernos de alta resistencia, los cuales no son apretados a su capacidad máxima, pero cumplen con los requerimientos durante el período de montaje (Chapula, 2014).

Conforme a Aguirre (2010), es permitido que los pernos sean instalados en condiciones de apriete ajustado cuando cumplan como conexiones de tipo aplastamiento, exceptuando las uniones de miembros colocados a compresión y en aplicaciones de tracción o en combinación de corte y tracción.

En los planos de diseño, se debe de identificar los pernos que tengan una condición de apriete diferente al contacto firme. “Condición de apriete ajustado se define como el apriete necesario para llevar los elementos conectados a un contacto firme” (Aguirre, 2010, p. 195).

Los anclajes de uniones pernadas requieren de holguras. Cuando las mismas son realizadas en campo requieren que su planeación sea realizada de forma cuidadosa debido a que su ajuste puede ser realizado hasta estar colocada la estructura en su posición final.

Según Chapula (2014), para que el proceso de apriete de pernos en campo pueda ser efectuado con las herramientas indicadas para la actividad, se requieren holguras. Las holguras permiten realizar el montaje sin interferir con los elementos montados en fases previas. La perforación fue realizada antes del montaje utilizando barreno.

### **1.7. Evaluación de diseño estructural de tornillería**

Aguirre (2010), indica que el diseño para conexiones se debe de realizar por fatiga. La definición del estado límite de carga es el “alto ciclaje del rango de tensiones elásticas” (p. 271), requiriendo que su frecuencia y magnitud sean suficientes para la formación de grietas y consecuente falla de tipo progresiva.

La evaluación estructural comprende un hecho clave en el diseño, debido a que sus resultados implican en el dimensionamiento de piezas componentes, diámetros de tornillería y tipos de materiales a seleccionar. Para el caso de

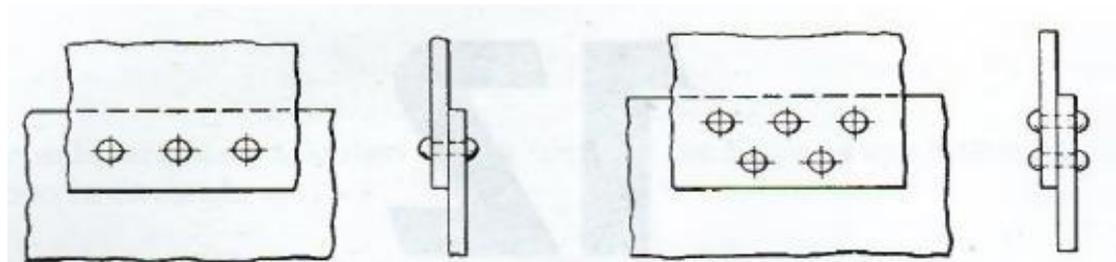
estudio, sirven como un patrón para tratar de identificar fallas por corte en las piezas de tornillería; las fallas por aplastamiento aplican en las piezas metálicas componentes y excede a la investigación.

Pytel y Singer (1994), indican que, en las uniones de piezas metálicas individuales sin importar su tipología, no se puede encontrar una solución exacta del problema, y que en una aproximación se puede obtener “hipótesis significativas” (p. 387).

“Si la carga aplicada pasa por el centro de gravedad de un grupo de conectores, cada uno transmite una fuerza igual a su capacidad de resistencia, a cortante o a la presión de contacto, dependiendo de cuál sea menor” (Pytel; Singer, 1994, p. 387).

Por la disposición de los elementos individuales, Pytel y Singer (1994), indican dos tipos de juntas, unión a traslape y unión a tope.

Figura 2. **Uniones a traslape**



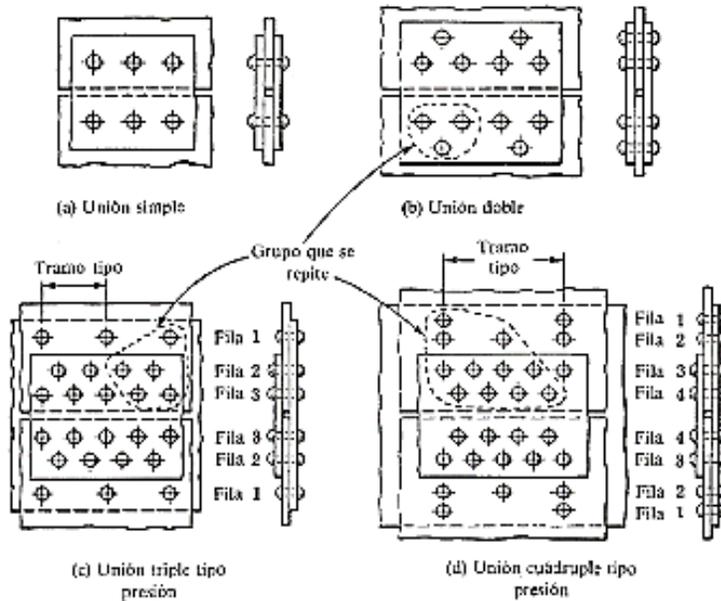
Fuente: Pytel, A.; Singer, F. *Resistencia de materiales*. p. 388.

La unión a traslape sucede cuando “las placas a unir se colocan solapadas, una sobre otra, y se cosen entre sí mediante una o varias filas de conectores” (Pytel; Singer, 1994, p. 387). Se muestra en la figura 2.

La unión a tope sucede cuando “las dos placas a unir están colocadas en el mismo plano, con sus bordes a tope, y se sujetan mediante placas que se

denominan cubrejuntas” (Pytel; Singer, 1994, p. 387). Conforme a la repetición de placas y filas tienen varias denominaciones. Se muestra en la figura 3.

Figura 3. Uniones a tope



Fuente: Pytel, A.; Singer, F. *Resistencia de materiales*. p. 388.

Para identificar en forma teórica si una pieza ha sido diseñada adecuadamente, Pytel y Singer (1994) indican una relación a utilizar:

$$Eficacia = \frac{Resistencia\ de\ la\ unión}{Resistencia\ de\ la\ placa\ llena} \quad (1)$$

Por facilidad de método constructivo, para atravesar una conexión por medio del uso de tornillería, se recomienda realizar la perforación por medio de taladro o punzonado y utilizando escariador ampliar el diámetro 1,5 mm (Pytel; Singer, 1994).

Acorde a la forma de la falla que se produzca, debido a los esfuerzos a los que la tornillería se ve sometida, se puede utilizar una u otra variación de la fórmula de esfuerzo:

$$P = A\sigma \quad (2)$$

Donde:

P = Fuerza axial aplicada

A = Área de la sección de contacto a evaluar

$\sigma$  = Esfuerzo al cual la pieza es sometida por acción de la fuerza axial aplicada en un área de sección definida.

Los tipos de fallas indicados por Pytel y Singer (1994) son ruptura del conector por cortante; ruptura de la placa por tensión; deformación exagerada por presión de contacto y fallas por cercanía de unión al borde.

Las figuras 4, 5, 6 y 7 muestran fallas cercanas al conector, pero que se dan en la placa del acero; aunque no sean parte del estudio, pueden ocurrir en paralelo.

Figura 4. Ruptura del conector por cortante

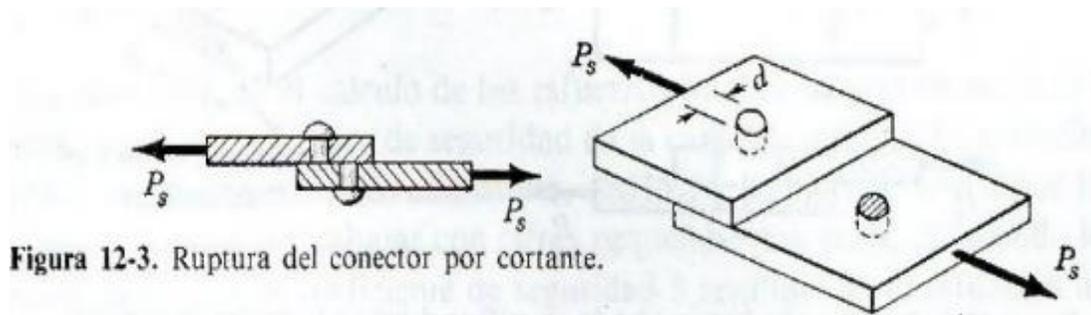
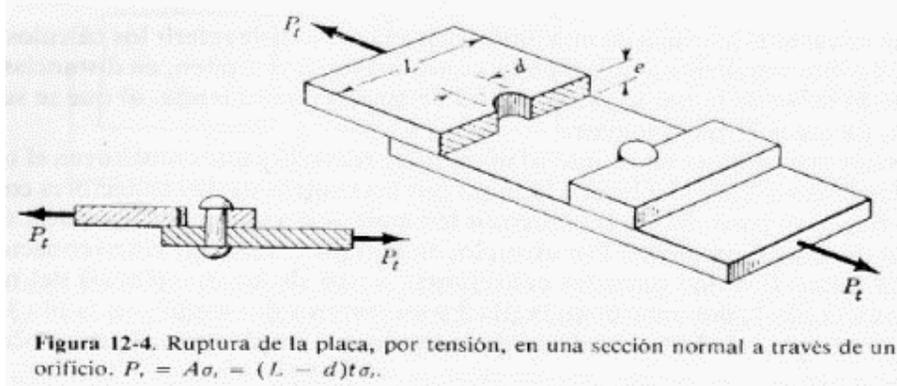


Figura 12-3. Ruptura del conector por cortante.

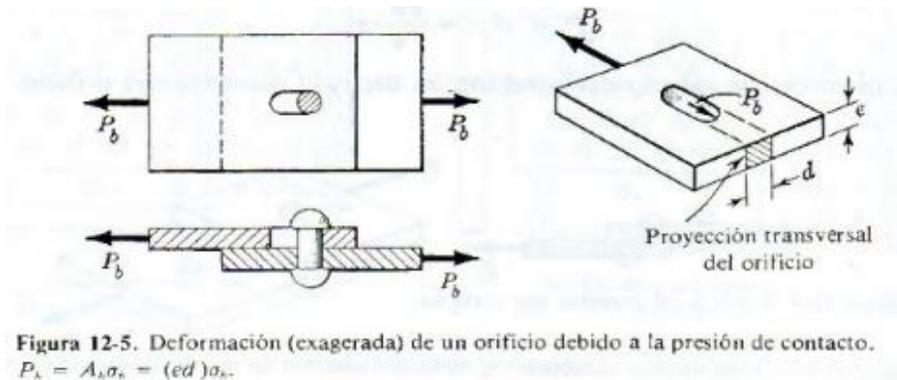
Fuente: Pytel, A.; Singer, F. *Resistencia de materiales*. p. 389.

Figura 5. Ruptura de la placa por tensión



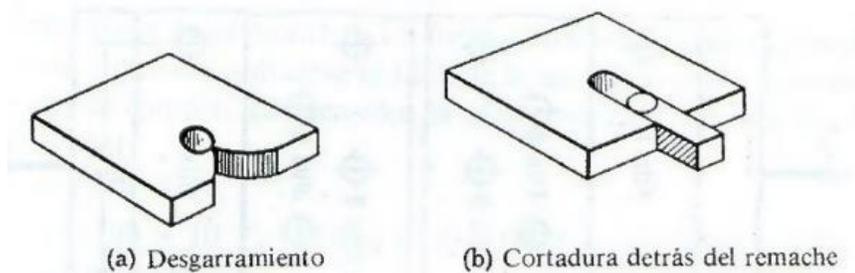
Fuente: Pytel, A.; Singer, F. *Resistencia de materiales*. p. 390.

Figura 6. Deformación exagerada por presión de contacto



Fuente: Pytel, A.; Singer, F. *Resistencia de materiales*. p. 390.

Figura 7. Fallas por cercanía de unión al borde



Fuente: Pytel, A.; Singer, F. *Resistencia de materiales*. p. 391.

Acorde a Aguirre (2010), “la tensión máxima permitida debido a cargas no factoradas es  $0,66 F_y$ ” (p. 271). Esta es una consideración que debe de tomarse en cuenta en la resistencia de las piezas de tornillería al momento de calcular la eficiencia, considerándose como un factor de seguridad.

Las consideraciones de diseño establecidas en los tipos de fallas no consideran la propia deformación de la tornillería. Tampoco consideran que, al momento de colocar la tornillería de forma provisional, se inducen fuerzas de rozamiento entre las piezas metálicas individuales y tornillería.

Por propiedades de los metales y sólidos, debidos a los cambios de temperatura, Pytel y Singer (1994) y Smith y Hashemi (2006) concuerdan en que los elementos serán sometidos a deformaciones aparte de las indicadas por cargas aplicadas, lo cual debe de ser considerado como factor de diseño.

## **1.8. Monitoreo de estado de condición**

Trujillo (2003), indica que el monitoreo de estado de condición, conjunto al mantenimiento predictivo se consideran como dos herramientas utilizadas en el mantenimiento para mejorar la productividad y la competitividad en el mercado. La meta del monitoreo del estado de condición es “conocer la condición de la maquinaria, de tal manera que se pueda determinar su operación de manera segura, eficiente y con economía” (p.1).

El monitoreo del estado de condición constituye el ítem relevante de la investigación, analizando una propuesta para realizar el monitoreo que sirva como base para generar un historial de las piezas de tornillería en una torre de transmisión eléctrica tipo celosía.

Las técnicas que se utilizan son variables. Fuentes (1982), Trujillo (2003) y Zhang; *et. al.* (2017) coinciden en que la base primordial del monitoreo del

estado de condición es la inspección visual, aunque esta puede llegar a requerir experiencia por parte del encargado de realizarla.

Para Trujillo (2003), el mantenimiento de una pieza basado en condición (MBC) se puede basar en el monitoreo de las variables físicas de la máquina, variables que son tomadas como los indicadores del estado de condición y al comparar con valores de referencia que se consideran como normales, se evalúa su nivel de deterioro. Los beneficios del MBC son proactivo y predictivo.

El proactivo sirve para detectar condiciones que puedan ser causa de falla; diagnóstico de causa de la falla. El predictivo pretende detectar problemas en maquinaria; evitar fallos catastróficos; pronóstico de utilidad.

Los conceptos aplicados a maquinaria también son aplicables a condición de estructura. Las pruebas son de fuente de energía variable. Los ensayos no destructivos quedan como fuente principal del estado de condición y serán seleccionados según el fin que se pretenda. Trujillo (2003) y Zhang; *et. al.* (2017) muestran ensayos como ultrasonido, rayos X, termografía y emisiones acústicas.

La finalidad del estado de condición es prevenir una falla mediante la medición continua y constante de los elementos constituyentes de cualquier maquinaria o estructura; utilizando con esa finalidad los END requeridos y llevando un historial adecuado, obteniendo beneficios proactivos y predictivos.

### **1.9. Evaluación de estado de condición de tornillería en uniones**

El estado de condición de tornillería para el efecto de investigación, consiste en una inspección que se realiza a las piezas de tornillería que se utilizan en uniones de estructuras metálicas. La evaluación puede realizarse por medio de técnicas no destructivas y técnicas destructivas.

Durante el proceso de colocación de tornillería, la evaluación inicial, según Aguirre (2010), debe de realizarse en forma visual en forma de observación analítica. Debe de realizarse la verificación de materiales, procedimientos y trabajos realizados sean conforme las disposiciones y documentos constructivos.

La inspección puede realizarse conforme lo indicado por Aguirre (2010), mediante la denominación O para “observar estas partidas de forma aleatoria. Las operaciones no deben ser retrasadas en espera de estas inspecciones” (p. 258), y la denominación P para “desarrollar estas tareas para cada junta apernada” (p. 259). La inspección debe de ser realizada por QC – Inspector de control de calidad o por QA – Inspector de aseguramiento de la calidad.

La inspección de tareas se realiza en fases previas, durante y posterior al apernado. La tabla I presenta las tareas de inspección previas al apernado:

**Tabla I. N5.6-1 Tareas de inspección previas al apernado**

<b>Tareas de Inspección anteriores al Apernado</b>	<b>QC</b>	<b>QA</b>
Certificados del productor disponibles para los materiales de los conectores	O	P
Conectores marcados de acuerdo con los requisitos ASTM	O	O
Conectores seleccionados apropiadamente para el detalle de la junta (grado, tipo, longitud del perno si el hilado ha de ser excluido del plano de corte	O	O
Procedimientos de apernado adecuados seleccionados para el detalle de la junta	O	O
Elementos conectores, incluyendo una condición de la superficie de apriete adecuada y la preparación de agujeros, si es especificado, cumplan con los requisitos aplicables	O	O
Ensayo de verificación anterior a la instalación mediante la instalación personal observada y documentada para ensamblaje de conectores y los métodos usados	P	O

Continuación de la tabla I.

Disponer de un almacenaje adecuado para los pernos, tuercas, golillas y otros componentes de los conectores	○	○
---	---	---

Fuente: Aguirre, C. *Especificación ANSI/AISC 360-10 para Construcciones de Acero*. p. 258.

La tabla II presenta las tareas de inspección durante el apernado:

**Tabla II. N5.6-2 Tareas de Inspección durante el apernado**

<b>Tareas de Inspección durante el Apernado</b>	<b>QC</b>	<b>QA</b>
Ensamblaje de los conectores en un estado apropiado, ubicación en todos los agujeros y las golillas (si son requeridas) son posicionadas según requisitos	○	○
Junta llevada a la condición de apriete fuerte antes de la operación de pretensionado	○	○
Los componentes de los conectores no son girados por la llave previniendo la rotación	○	○
Los conectores son pretensionados de acuerdo con la especificación RCSC, avanzando sistemáticamente desde el punto más rígido hacia los bordes libres	○	○

Fuente: Aguirre, C. *Especificación ANSI/AISC 360-10 para Construcciones de Acero*. p. 258.

La tabla III presenta las tareas de inspección después del apernado:

**Tabla III. N5.6-3 Tareas de inspección después del apernado**

<b>Tareas de Inspección después del Apernado</b>	<b>QC</b>	<b>QA</b>
Documentos de aceptación o rechazo de las conexiones apernadas	P	P

Fuente: Aguirre, C. *Especificación ANSI/AISC 360-10 para Construcciones de Acero*. ALACERO Asociación Latinoamericana del Acero. Chile. 2010. p. 259.

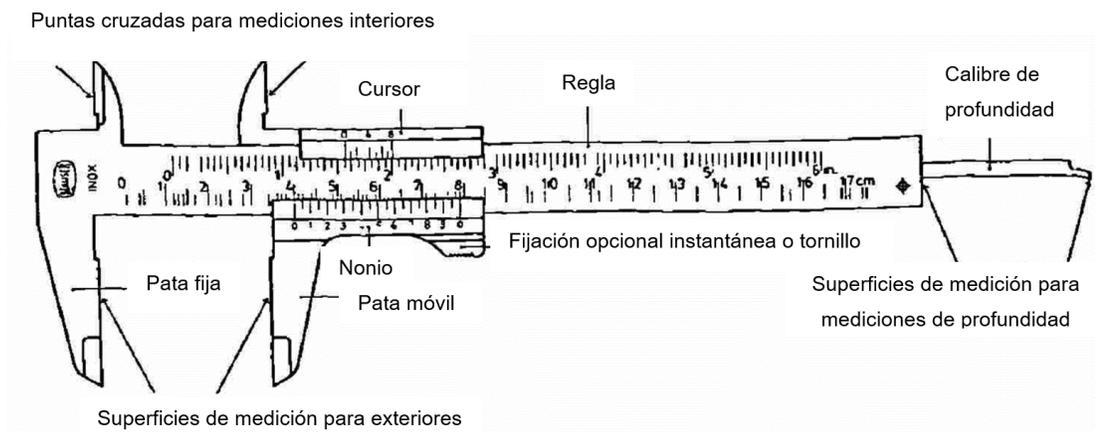
Al momento de no poder realizar una adecuada inspección visual, la inspección se debe de realizar por medio de muestras representativas. En la torre evaluada, la especificación de fabricación del perno es la indicada en ASTM A307.

Para Garzón (2011), durante la instalación de pernos de alta resistencia, se presenta control de inspección por medio de cuatro métodos: control de torque, control de tensión, giro de la tuerca y tensión directa. Estos procedimientos se utilizan también en el control o programa de mantenimiento de la tornillería de sujeción.

### 1.9.1. Técnicas no destructivas

Para monitorear el estado de condición sin retirar la prueba, realizar una medición de sus dimensiones durante su etapa de funcionamiento puede dar un alertivo de las modificaciones que el tornillo ha desarrollado.

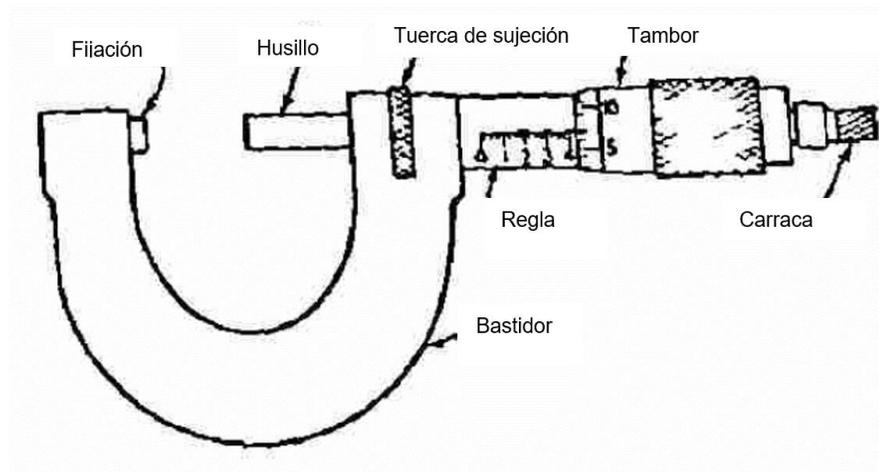
Figura 8. Partes del vernier



Fuente: Fuentes, F. *Ensayos mecánicos en metales*. p.26.

Fuentes (1982), indica que esta medición *in situ* puede ser realizada por aparatos sencillos de manipular y así obtener información: la toma de medidas por “una escala graduada, mediante un vernier de lectura sencillo” (p. 25) y mediante un micrómetro que es “un instrumento para obtener una indicación amplificada de las distancias pequeñas” (p. 27).

Figura 9. **Partes del micrómetro de tornillo**



Fuente: Fuentes, F. *Ensayos mecánicos en metales*. p.28.

Si el ensayo puede realizarse en laboratorio, se puede aplicar un deformímetro, el cual Fuentes (1982) define como “cualquier instrumento que mida la deformación” (p. 31).

La deformación, por lo tanto, es un cambio en la longitud debido a una deformación lineal, la deflexión de una viga o una torsión angular en una flecha.

En tecnologías más recientes, Zhang; *et. al.* (2017) indican que “las juntas atornilladas son omnipresentes en los activos de ingeniería, desempeñando un papel crítico de transferir cargas entre los componentes de interconexión” (p. 278).

Una de las claves para el adecuado funcionamiento de las uniones pernadas, es garantizar que sus componentes no se aflojen.

“La inspección eficaz y el monitoreo del aflojamiento de los pernos durante toda la vida útil prevista garantizan el servicio de las articulaciones” (Zhang; *et. al.*, 2017, p. 278).

Las técnicas utilizadas para hacer la evaluación en la investigación de Zhang; *et. al.* (2017) para determinar aflojamiento de perno y estimación de par residual son disipación de energía de las olas (WED) y modulación vibro acústica (VM), basado en la linealidad acústica de contacto.

El ensayo consiste en evaluar los dos métodos que fueron planteados previamente de forma matemática. A partir de un generador de señales se genera una frecuencia central de 310 kHz, amplificando las mismas por medio de un amplificador de potencia; esta señal se propaga al perno, el cual es monitoreado por medio de un osciloscopio a una frecuencia de 20 MHz.

Tras las mediciones, haciendo del uso de las transformadas de Fourier, “se aplican en las señales capturadas para determinar su distribución de energías” (Zhang; *et. al.*, 2017, p. 282).

“Una excitación mixta, a saber, una vibración de bombeo de baja frecuencia (LF) y una vibración de alta frecuencia (HF) onda de sondeo, se aplican simultáneamente en la estructura monitoreada, para interactuar con el contacto “imperfecto” debido a una grieta o un perno suelto” (Zhang; *et. al.*, 2017, p. 279).

La selección de la prueba a utilizar es una variable a considerar. Ospina, Hernando y Parra (2011), indican que las pruebas deben de ser las requeridas para obtener los mejores resultados y pueden ser complementarias entre sí. Los criterios a considerar son “tipo y origen de discontinuidad a ser detectada; proceso de fabricación y tipo de material; accesibilidad a la región de ensayo; nivel de aceptabilidad deseada; disponibilidad de equipos; y costos” (p. 198).

Los ensayos no destructivos más comunes para realizar la inspección según Ospina, Hernando y Parra (2011) son inspección visual; ensayo líquidos penetrantes; ensayo partículas magnéticas; ensayo radiográfico; ensayo ultrasónico.

El ensayo de medición de torque se realiza conforme el método de control de torque. Garzón (2011), indica que el método de control de torque “consiste en registrar un torque determinado en el instrumento instalador, el cuál transmite ésta energía de torque en el perno y se aprecia una elongación determinada” (p. 70). Garzón indica que la relación entre torque y tensión en un perno puede ser variable hasta 40 %, generando esto una relación con los esfuerzos que le transmite la estructura al perno.

González (1995), indica que los rayos X corresponden a una parte del espectro de luz no visible para el ser humano, que va de los 50 Å a 0.1 Å. Fueron descubiertos por W. Roentgen en 1895 quien, al tener durante el desarrollo de un experimento cianuro de bario (fluorescente) cerca de un tubo cubierto con papel negro. “Los cristales brillaban a pesar de que la luz visible era visible en el papel negro, observó además que los objetos colocados entre el tubo y los cristales proyectaban sombras sobre éstos” (p. 8). Desde entonces la técnica se ha ido modificando y mejorando para ser utilizada como una técnica de ensayo no destructivo.

Para el caso evaluado, se utilizó técnicas no destructivas para monitoreo del estado de condición de tornillería, seleccionando inspección visual, condición de torque y radiología X; con la finalidad de determinar deterioro superficial e interno de las piezas.

### 1.9.2. Técnicas destructivas

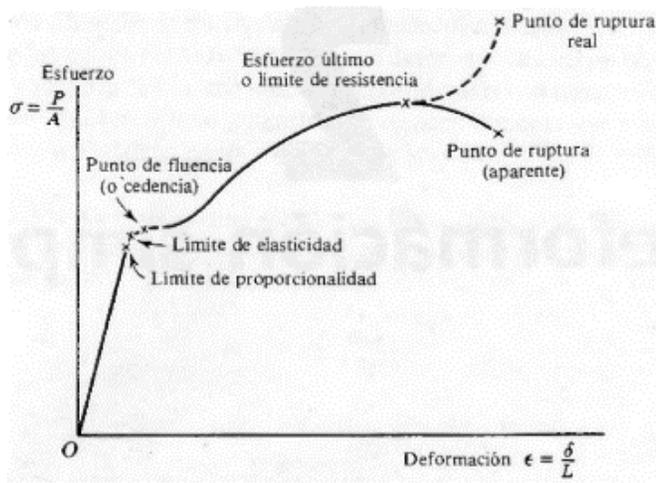
Se realizan en laboratorio. La técnica destructiva de inspección para tornillería es el ensayo de tensión. Según Fuentes (1982), el término se utiliza para “referirse a ensayos en los cuales una probeta preparada es sometida a una carga monoaxial gradualmente creciente (es decir, estática) hasta que ocurre la falla” (p. 36).

A pesar de existir una probeta definida, Fuentes (1982) indica que las propiedades a determinar no están delimitadas a la probeta definida.

“Los ensayos de tamaño completo de los materiales manufacturados, las piezas fabricadas, y los miembros estructurales se realizan comúnmente. La variedad de las piezas elaboradas y los miembros de tamaño real, a los cuales los ensayos de tensión pueden aplicarse, es muy amplia; por ejemplo: tramos seleccionados de alambre, varilla, tubería, barra de refuerzo, cables de alambre, barras tensoras, cadenas para anclas, ganchos para anclas, articulaciones remachadas y soldadas” (p. 36).

La figura 10 muestra el diagrama esfuerzo-deformación típico del acero.

Figura 10. **Diagrama esfuerzo-deformación**



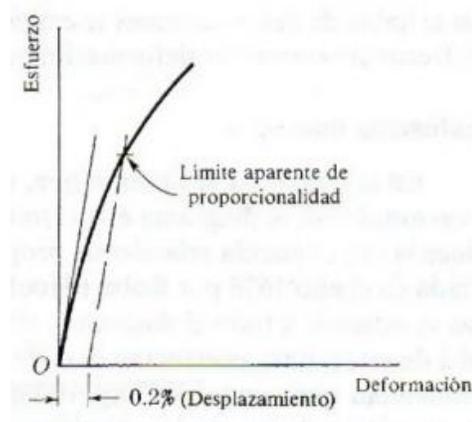
Fuente: Pytel, A.; Singer, F. *Resistencia de materiales*. p. 28.

Fuentes (1982) y Pytel y Singer (1994) coinciden en las propiedades que se pueden determinar con el ensayo de tensión son el límite de proporcionalidad, que es el intervalo representado en la gráfica esfuerzo-deformación en el cual “el esfuerzo y la deformación son proporcionales entre sí” (Fuentes, 1982, p. 43); el límite de elasticidad, que es “esfuerzo mínimo al que ocurre la primer deformación permanente” (Fuentes, 1982, p. 43); y el punto de cedencia o de fluencia, que es el “punto en el cual se alcanza un esfuerzo al cual el material continúa deformándose sin que haya incremento de carga” (Fuentes, 1982, p. 43).

Los límites de proporcionalidad y elasticidad se encuentran en todos los materiales, mientras el punto de fluencia se presenta sólo en algunos materiales dúctiles, tal cual lo es el acero.

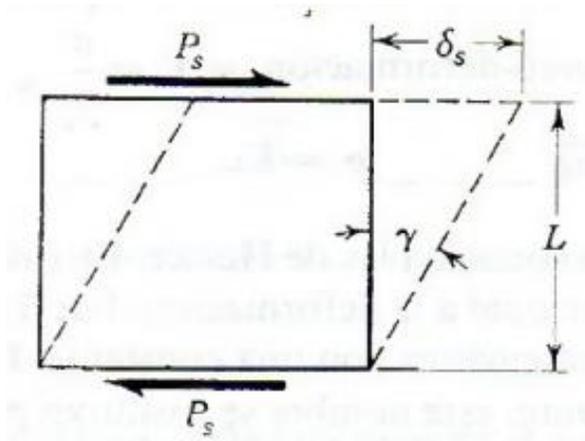
El límite de revisión para realizar en un ensayo de tensión, para definir el factor de seguridad de la carga, debe de ocurrir en el límite de proporcionalidad. Según Pytel y Singer (1994), al tomar datos durante el ensayo, puede ser que al incrementar las cargas no se comporte de forma totalmente lineal, por lo cual el límite de proporcionalidad se define en 0,2 % m/m de la tendencia inicial lineal.

Figura 11. **Determinación del límite de proporcionalidad**



Fuente: Pytel, A.; Singer, F. *Resistencia de materiales*. p. 30.

Figura 12. Deformación angular o distorsión



Fuente: Pytel, A.; Singer, F. *Resistencia de materiales*. p. 32.

La distorsión o deformación angular puede ser generada por cargas axiales de corte. “Un elemento sometido a tensión experimenta un alargamiento, mientras que un elemento sometido a cortante no varía la longitud de sus lados, manifestándose por el contrario un cambio de forma, de rectángulo a paralelogramo” (Pytel; Singer, 1994, p. 32).

Las propiedades determinadas mediante el ensayo de tensión inciden, entre otros, en la adecuada selección de piezas para la estructura estudiada conforme a las condiciones de carga a las que es sometida. La finalidad de las propiedades, para esta investigación, es meramente informativa.

#### 1.10. Factores climatológicos y ambientales influyentes en el deterioro de la tornillería

Aunado a las cargas a las cuales es sometida la estructura, se encuentra el medio ambiente circundante, del cual influyen los factores climatológicos propios de la región y los agentes externos que alteran las condiciones ambientales.

Oliva (2009) presenta un fenómeno común al cual se ven expuestas las estructuras: corrosión. Debido a las condiciones climatológicas, los componentes que puedan componer la atmósfera pueden ser variables. “Se hace énfasis en la importancia del viento como agente transportador” (p. 1).

Los factores climatológicos clave para Oliva (2009), son la temperatura (que tendrá cúspides en horas cercanas a medio día), la humedad relativa (relacionada con la temperatura y el vapor de agua, puede ser agente de herrumbre), la precipitación (en presentación de lluvia, llovizna, granizo, nieve, puede ser agente de herrumbre) y el viento (cuyo flujo no estacionario es el transportador).

La climatología local (cercanía de la estructura a la playa de un lago), la acción corrosiva de los restantes de generación eléctrica (estar en el interior del terreno que ocupa una planta de generación eléctrica a base de carbón que ya no está en funcionamiento) y las cargas a las que ha sido sometida y expuesta la estructura durante su período de funcionamiento son agentes y factores constituyentes a evaluar como agentes que pudieron contribuir con el deterioro de la estructura y por ende, de las piezas de tornillería para sujeción.

Garcés y Hernández (2004) presentan un factor que puede tener ocurrencia en las regiones de estudio y corresponde a un fenómeno fisicoquímico: la lluvia ácida.

“La lluvia ácida es un fenómeno ligado con la alta producción dependiente, principalmente, del consumo de combustibles fósiles y de ciertas prácticas agrícolas como las quemadas, que al liberar indiscriminadamente sustancias como los óxidos de azufre y de nitrógeno a la atmósfera, aportan la materia prima para la formación de los ácidos sulfúrico y nítrico, que posteriormente retornan a la superficie terrestre, bien sea como líquidos o como aerosoles y afectan a los ecosistemas naturales” (Garcés; Hernández, 2004, p. 67).

Las variaciones en la composición de la atmósfera por agentes varios, pueden generar cambios, principalmente incrementos, en la elevación de la acidez de la lluvia (Garcés; Hernández, 2004). Además, los agentes externos que alteren la atmósfera recrean escenarios ambientales diferentes y pueden generar el deterioro de piezas, componentes, materiales de cualquier edificación y sus consecuencias pueden ser evidentes desde una inspección visual hasta un análisis a profundidad, conforme lo indica Oliva (2009).

Una forma de deterioro generada por las condiciones climatológicas y ambientales del medio circundante, es la corrosión. Smith y Hashemi (2006) definen corrosión como “el deterioro de un material producido por el ataque químico de su ambiente” (p. 719).

Se considera la corrosión como un factor a evaluar en técnicas no destructivas mediante inspección visual, ligado a la acción de un ambiente circundante que puede generar una corrosión galvánica, que se refiere a materiales con diferente potencial electroquímico.

### **1.11. Consideraciones de Salud y Seguridad Ocupacional**

Al realizar cualquier tipo de trabajo, se debe de considerar, por legislación vigente en el país a la fecha de investigación y por principio laboral, los aspectos de salud y seguridad ocupacional inminentes a la actividad. La tarea conlleva procedimientos, que a su vez se ligan con riesgos y peligros inherentes.

Cañada, *et. al.* (2007) definen riesgos profesionales como “aquellas situaciones derivadas del trabajo que pueden romper el equilibrio físico, mental y social de las personas” (p. 11). Además, cuando si su causa es una condición de trabajo, se denomina riesgo laboral.

Peligro se denomina como “una fuente o situación con capacidad de daño en términos de lesiones, daños a la propiedad, daños al medio ambiente o a una combinación de ambos” (Cañada; *et. al.*, 2007, p. 11).

El Acuerdo Gubernativo 229-2014 y sus Reformas 33-2016: Reglamento de Salud y Seguridad Ocupacional, contemplan entre sus títulos relevantes conforme al trabajo a realizar:

1. Del Título I Capítulo III, entre las obligaciones de los trabajadores están el cumplir las normas SSO así como las indicaciones e instrucciones que velen por la protección de su vida, salud e integridad corporal y psicológica (Artículo 8, Reglamento SSO).
2. Del Título VIII Capítulo I, previo a realizar cualquier trabajo de construcción o similar se debe de contar con un Plan de Salud y Seguridad Ocupacional. El programa debe de estar en práctica durante las labores, tener y utilizar el equipo de protección personal, estado y calidad de andamios (si su uso es requerido).
3. Del Artículo 382 al Artículo 385 se tratan los temas de estructuras metálicas: si los trabajos tienen riesgo por ser trabajo en alturas se debe de contemplar el uso de arnés de seguridad con línea de vida de dos puntos y anclado adecuadamente, y todos los equipos de seguridad certificados.

Con el contexto de que llevar a cabo la actividad tiene inherente riesgos y peligros, además de la legislación nacional, el fin primordial del estudio del caso es lograr disminuir su impacto, mediante la prevención, con la finalidad de prevenir la ocurrencia de accidentes.

Se considera el equipo para trabajo en alturas, trabajo en vivo (tensión eléctrica), herramientas manuales y capacitación y validación de experiencia del personal.

Según Cañada, *et. al.* (2007), el fin de las políticas en materia de salud y seguridad ocupacional es la prevención, la cual se denomina como el “conjunto de actividades o medidas adoptadas o previstas en todas las fases de actividad de la empresa, con el fin de evitar o disminuir los riesgos derivados del trabajo” (p. 11).

“Accidente de trabajo es todo suceso anormal, no querido ni deseado, que se produce de forma brusca e inesperada, aunque normalmente es evitable, que rompe la normal continuidad del trabajo y puede causar lesiones a las personas” (Cañada; *et. al.*, 2007, p. 13). El accidente es lo que se desea prevenir como esencia primordial de la aplicación de estatutos de SSO.

Los riesgos laborales pueden ser de dos tipos (Cañada; *et. al.*, 2007), siendo provocados por factores técnicos, denominados objetivos, ligados a no cumplir la legislación; o provocados por factores humanos, denominados subjetivos.

Ambos riesgos pueden tener diversos orígenes, y pueden ser provocados por agentes mecánicos, físicos, biológicos, cargas de trabajo y psicosociales. Capacitación y conocimiento de la materia permitirán una mejor ergonomía en la realización de labores.

Al determinar un procedimiento laboral, se debe de considerar como punto importante la implementación de la normativa local vigente a la fecha de investigación en materia de SSO. Todo trabajo a realizar se debe de evaluar en este aspecto para minimizar los riesgos y prever eventualidades no deseadas que puedan incurrir en una lesión leve, lesión grave o fatalidad.

Conforme al origen que los provoca, Cañada, *et. al.* (2007), presentan los probables riesgos ligados con la actividad a realizar divididos en agentes mecánicos, agentes físicos y carga de trabajo.

Los agentes mecánicos son los que provocan caídas, golpes, fricción, proyección de partículas. Pueden generar heridas, contusiones y traumatismo.

Los agentes físicos son los que pueden generar lesiones fisiológicas y psicológicas, trastornos varios en el organismo, alteraciones varias en el organismo. Se generan a partir de radiación, temperatura, presión, humedad.

La carga de trabajo puede provocar fatiga, lumbalgia. Se genera a partir de tipo de movimiento, repetitividad, postura de trabajo, esfuerzo físico.

Debido a que la estructura evaluada es soporte para tensión eléctrica, dentro del procedimiento establecido se consideran las cinco reglas de oro. Cañada, *et. al.* (2007) indican las cinco reglas de oro:

1. “Abrir todas las fuentes de tensión, interruptores y seccionadores, con corte visible”.
2. “Bloqueo de los aparatos de corte o señalización en el mando de los mismos”.
3. “Verificación de la ausencia de tensión eléctrica”.
4. “Puesta a tierra y en corto circuito la totalidad de fuentes con posibilidad de tensión eléctrica”.
5. “Colocación de señales de seguridad para delimitación de zona de trabajo” (p. 128).

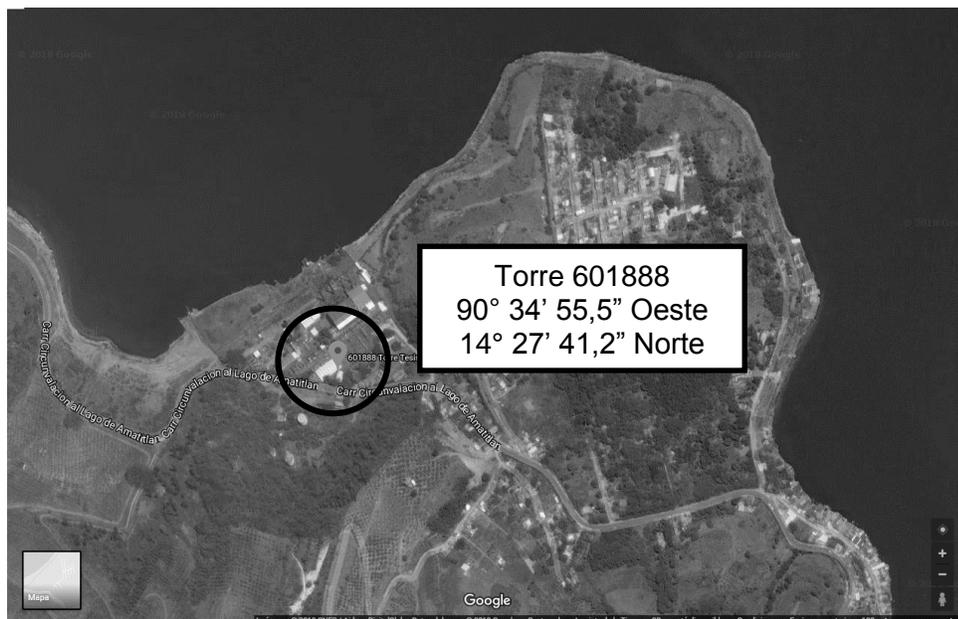
## 2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

### 2.1. Visita de reconocimiento

Para esta fase, se contó con el aval de la empresa interesada para realizar la visita de reconocimiento al lugar que ocupa la torre 601888, torre de transmisión eléctrica utilizada como base para realizar la investigación.

La torre es una estructura de acero tipo celosía, fabricada y montada entre los años 1959-1965; de acero galvanizado, anclado por medio del uso de pernos para soporte. Está ubicada en el municipio de Amatitlán, departamento de Guatemala.

Figura 13. Vista de ubicación de torre 601888



Fuente: Google Maps. Consulta: octubre de 2018.

La recopilación de información relevante se muestra en la tabla XVI, en la sección de ANEXOS, donde se refleja la ficha técnica proporcionada por la empresa interesada con información de la torre, indicando su altura, clase, material, cable que soporta, aislamiento, contaminación, descripción de aterrizaje y generalidades.

En la periferia de la torre, se encuentra una generadora de energía eléctrica a base de carbón manejada por una empresa generadora de electricidad, la cual se encuentra en desuso, pero tiene influencia en el tipo de corrosión atmosférica que ha atacado la estructura de soporte y la tornillería de sujeción. Debido a protección por parte de la empresa, la torre se encuentra dentro de una zona cercada con malla galvanizada, vigilada por personal de seguridad constantemente, lo cual hizo que no haya sido atacada por actos de vandalismo.

Se evidenció que se han realizado mantenimientos esporádicos de colocación de pintura anticorrosiva en áreas cercanas a suelo (alturas de 3,5 m medidos desde la base); misma zona en la cual, por razones de protección contra vandalismo, se realizó colocación de puntos de soldadura a cada uno de los pernos.

## **2.2. Toma de datos y muestras en campo**

Se seleccionaron los ensayos no destructivos inspección visual, medición de torque, medición de longitudes y radiología X. Para la realización de esta fase, se contó con el aval de la empresa interesada para realizar la visita en la cual se midió el torque y se sustituyeron las piezas de tornillería, con las cuales se realizó el ensayo no destructivo en gabinete.

La visita contó con personal de empresa interesada, empresa generadora de electricidad, supervisión SSO, y colaboradores capacitados en montaje y torque de pernos en torres. El procedimiento fue explicado a los involucrados previo a iniciar labores, se da inducción de seguridad industrial y se inicia trabajos.

Se contó con equipo para realizar la medición de presencia de electricidad; delimitando el trabajo de torque a la sección tronco piramidal de la torre sin riesgo eléctrico potencial, y a la parte que no contaba con puntos de soldadura. Se contó con un medidor de torque manual y las copas adecuadas para los tamaños de pernos identificados.

En la sección ANEXOS, la tabla XVII muestra el documento utilizado como permiso de trabajo; y la tabla XVIII muestra el resumen de recopilación de información de torque e inspección visual de la tornillería en la torre 601888, en la cual la información, en la columna de observaciones, muestra los tornillos seleccionados para realizar ensayo destructivo de tensión y ensayos no destructivos de inspección visual y radiografía (tipo rayos X).

En la sección de ANEXOS, la figura 29 muestra la identificación de las piezas por cada cara. De las unidades de tornillería evaluadas, los tornillos con denominación 1, 2, 3, 11, 12 y 13 corresponden a tornillos de unión de piezas de soporte principal, de 2,2 cm de diámetro, en sección mayor de estructura. El resto de denominaciones se utilizan en breizas y son de 1,6 cm de diámetro.

### **2.3. Ensayos no destructivos**

Con las piezas seleccionadas indicadas en la tabla IV e identificadas en la tabla XVIII (referidas a la figura 29), se realizó una inspección no destructiva en los tornillos de muestra. Para cada tornillo se practicó:

- Toma de fotografías e inspección visual de deterioro superficial con las condiciones encontradas en campo tras su retiro y cambio en estructura.
- Primera toma de radiografía X, con las condiciones encontradas en campo.
- Medición de longitud de pieza, diámetro de rosca, diámetro máximo de cabeza, espesor de cabeza.
- Limpieza superficial de piezas, toma de fotografías e inspección visual de deterioro superficial.
- Segunda toma de radiografía X tras someterse a un proceso de limpieza superficial.

### 3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Después de la evaluación teórica de las técnicas para inspección y monitoreo de tornillería que se ofrecen en el mercado y la revisión documental historial de la torre 601888, se plantean las tendencias de información recopilada y se genera el procedimiento para monitoreo.

#### 3.1. Ensayo de radiología X

En la visita de inspección de torque, se realizó la sustitución de piezas para realizar ensayo no destructivo radiología X en laboratorio. La tabla IV muestra el resumen de piezas seleccionadas y su denominación para la continuación de la evaluación:

Tabla IV. Denominación de piezas para evaluación

Denominación	Pieza
01	4A – Cara Este
02	6B – Cara Oeste
03	10C – Cara Oeste
04	16C – Cara Sur
05	Lote de Reemplazo

Fuente: elaboración propia.

Para cada pieza seleccionada, se realizó una primera exposición en la cual se emulan las condiciones en que la pieza fue recolectada, y una segunda exposición tras un proceso de limpieza. La tabla V muestra la dosis absorbida de radiaciones ionizantes en Gray y tiempos de exposición a radiación conforme el ciclo realizado:

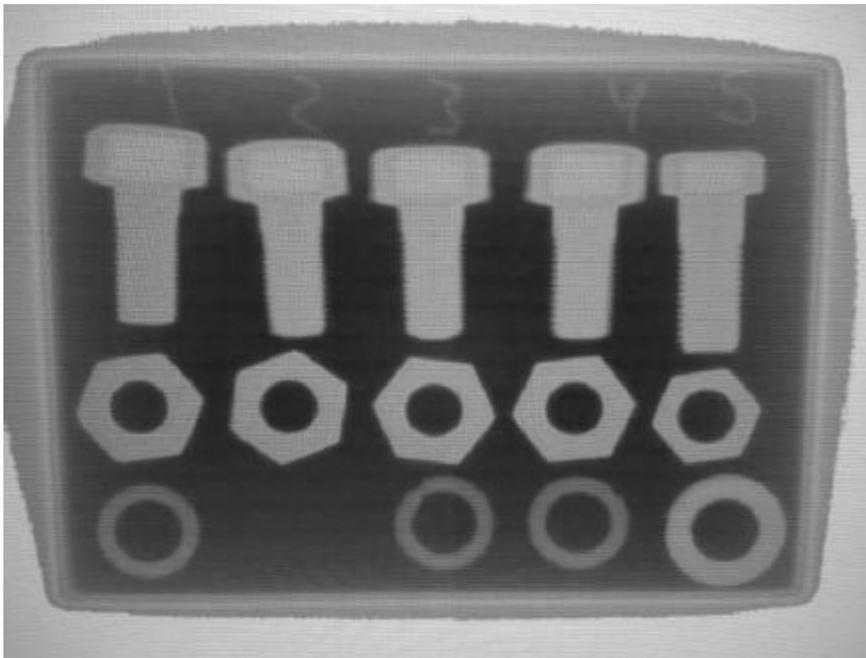
Tabla V. **Radiación absorbida**

No.	Ciclo	Radiación (Gy)	Tiempo (seg)
1	Primero	01	15
2	Segundo	0,1	0,01

Fuente: elaboración propia.

La figura 14 muestra la vista del primer ciclo de radiación en todas las piezas de tornillería seleccionadas para estudio. Las mismas se encuentran ordenadas de derecha a izquierda con su denominación ascendente.

Figura 14. **Primer ciclo de radiación de tornillos**

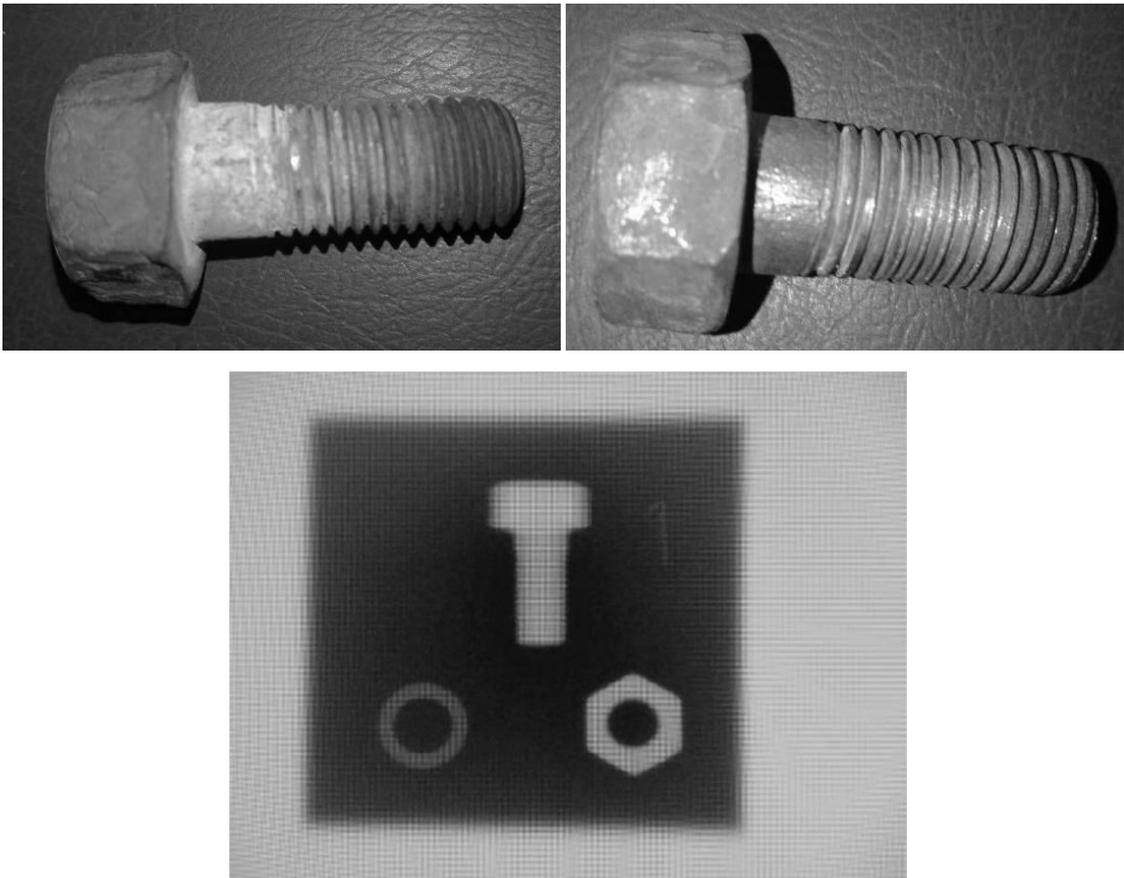


Fuente: Laboratorio de Radiología.

Las figuras 15 a 18 muestran las vistas de cada uno de los tornillos evaluados por medio de radiología y su condición conforme al antes y después del proceso de limpieza. La imagen superior izquierda muestra la vista del tornillo tras su retiro de ubicación en torre, la imagen superior derecha muestra

la vista del tornillo tras su proceso de limpieza superficial y la vista inferior muestra la toma de vista tras el segundo ciclo de radiación.

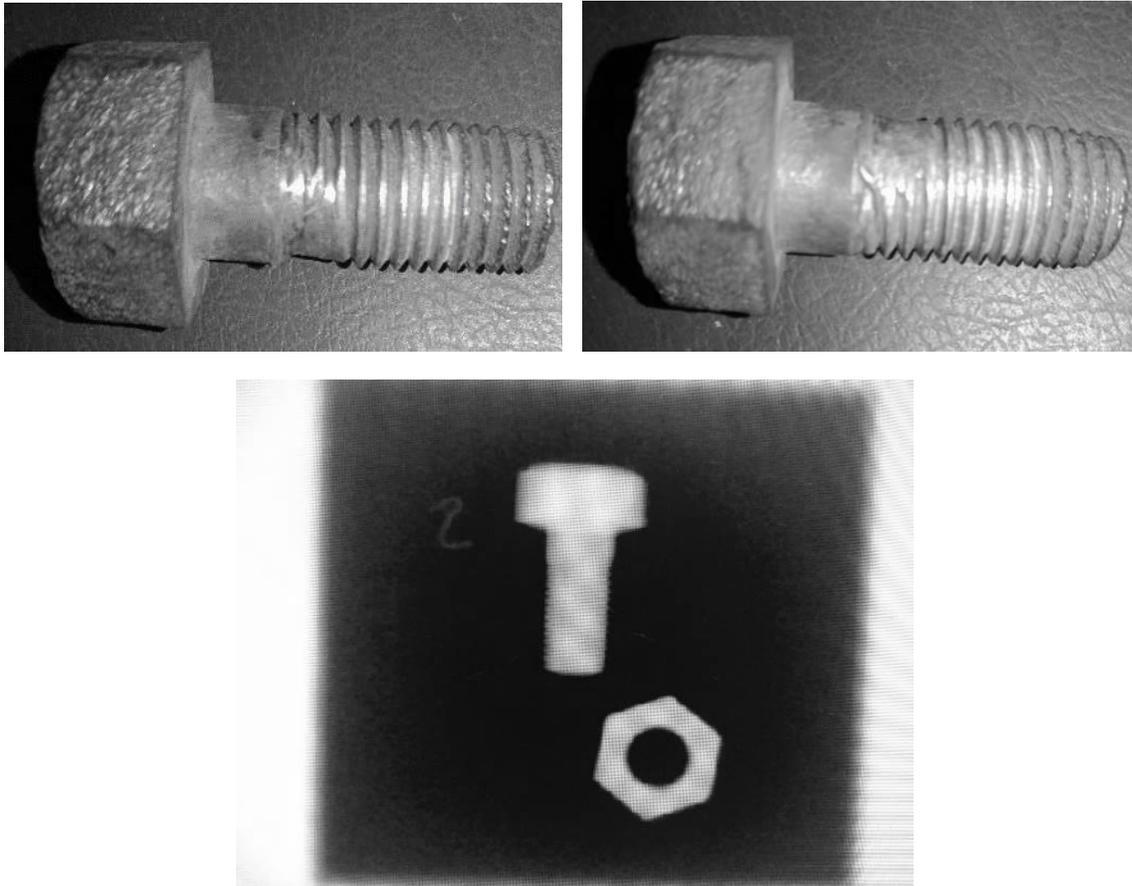
Figura 15. **Tornillo 01**



Fuente: Laboratorio de Radiología.

La pieza tenía tras evaluación, un torque 40 N-m. Presenta corrosión atmosférica y corrosión galvánica con deterioro de pieza. Tras limpieza se evidenció herrumbre y suciedad superficial. Los ensayos de radiología muestran que no evidencia discontinuidades internas.

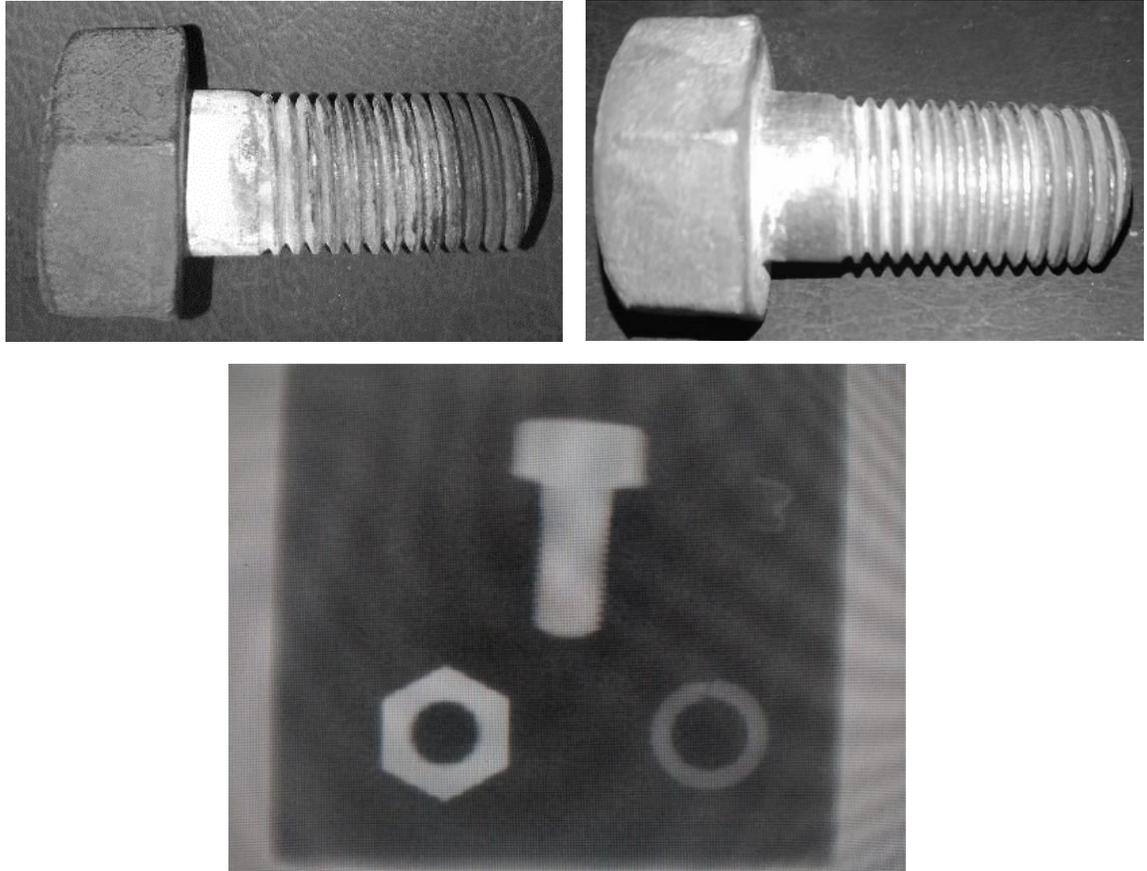
Figura 16. Tornillo 02



Fuente: Laboratorio de Radiología.

La pieza tenía tras evaluación, un torque 20 N-m. Presenta corrosión atmosférica y corrosión galvánica con deterioro pronunciado en la pieza. Tras limpieza se evidenció herrumbre y suciedad superficial, así como grietas en las crestas de los pasos. El deterioro del paso es pronunciado, quedando barrido de su posición contra la tuerca en tres pasos. Su deformación muestra deterioro por desgaste abrasivo en contacto entre piezas. De las inspeccionadas, es la única que no contaba con roldana *in situ*. Los ensayos de radiología muestran que no evidencia discontinuidades internas.

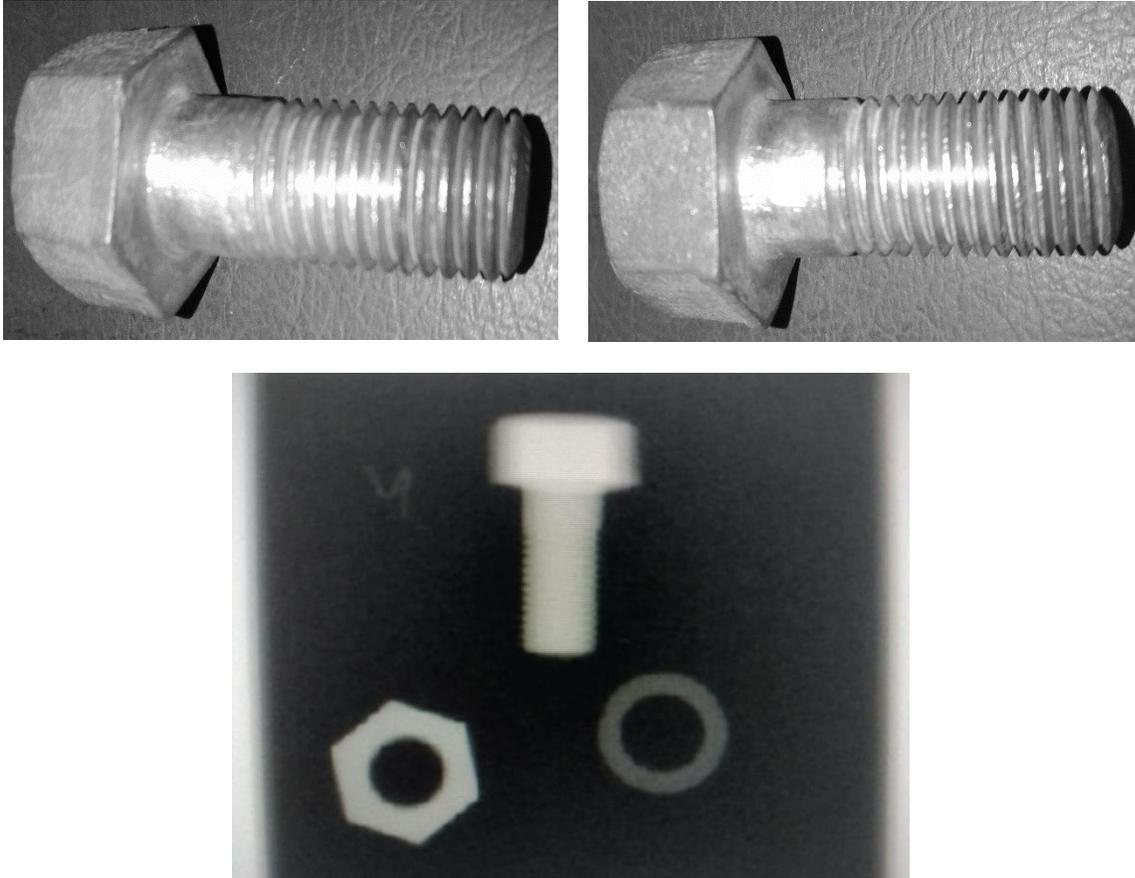
Figura 17. Tornillo 03



Fuente: Laboratorio de Radiología.

La pieza tenía tras evaluación, un torque 30 N-m. Presenta corrosión atmosférica y corrosión galvánica en la pieza. Tras limpieza se evidenció herrumbre y suciedad superficial, así como grietas en las crestas de los pasos. Los ensayos de radiología muestran que no se evidencia discontinuidades internas.

Figura 18. Tornillo 04

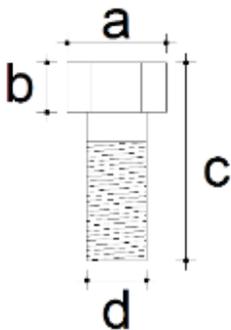


Fuente: Laboratorio de Radiología.

La pieza tenía tras evaluación, un torque 30 N-m. Presenta corrosión atmosférica y corrosión galvánica en la pieza. Tras limpieza se evidenció herrumbre y suciedad superficial. De las piezas evaluadas, es la unidad que cuenta con menor deterioro superficial; recuperando brillo pronunciado tras el proceso de limpieza. Los ensayos de radiología muestran que no evidencia discontinuidades internas.

La tabla VI muestra un cuadro de resumen con características y generalidades identificadas en cada una de las piezas retiradas para análisis no destructivo:

Tabla VI. Generalidades de piezas

	No.	a''	b''	c''	d''	Observaciones
	1	1	1/2	1-15/16	5/8	Corrosión escasa en superficie. Golpes en cabeza (tras limpieza).
	2	1-1/16	1/2	1-15/16	5/8	Corrosión pronunciada en superficie. Desgaste pronunciado de paso.
	3	1-1/16	1/2	1-15/16	5/8	Corrosión escasa en superficie. Grietas superficiales en paso. Cabeza redondeada.
	4	1	1/2	1-15/16	5/8	Corrosión escasa en superficie. Defectos de montaje (tras limpieza). Poco daño en paso.

Fuente: elaboración propia.

El estudio de radiología X sirvió para evidenciar el estado de las piezas en su superficie, validando la inspección visual de su deterioro en la superficie, así como puntos de corrosión; y también evidenció el estado interno de las piezas y su estado tras el tiempo de servicio y las cargas a las cuales ha sido sometida cada pieza.

### 3.2. Ensayo de torque

Tras la obtención de la información de torque recopilada en campo durante la visita de medición y sustitución, se realizó la agrupación de datos recopilados y el análisis estadístico de tendencias.

La información obtenida se clasificó en dos grupos, conforme el diámetro de perno encontrado en la edificación estudiada: 1,6 cm y 2,2 cm.

Tabla VII. Información de diámetros de pernos en torre 601888

<b>Diámetro (cm)</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Porcentaje</b>	<b>Media Torque (N-m)</b>	<b>Desviación Estándar</b>
1,6	64	72,7 %	84,22	15,41
2,2	24	27,3 %	84,38	10,46
Total	88	100,0 %	84,30	12,94

Fuente: elaboración propia.

### 3.2.1. Diámetro 1,6 cm

El torque medido en la torre 601888 para el diámetro 1,6 cm es:

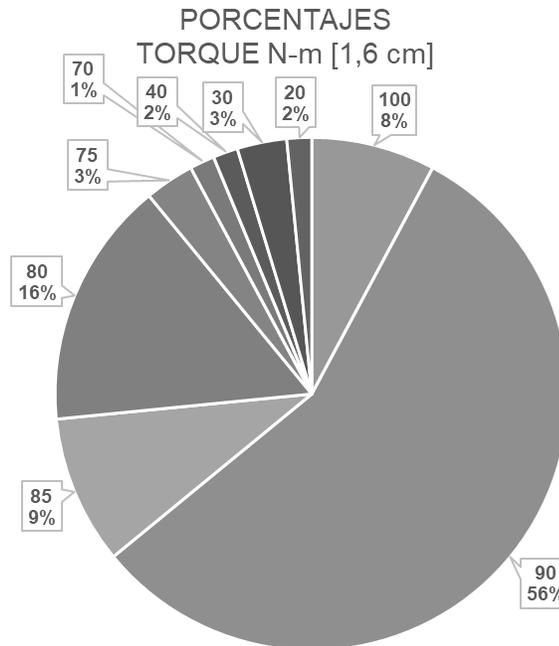
Tabla VIII. Torque 1,6 cm

<b>Torque N-m</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Porcentaje</b>
100	5	7,81 %
90	36	56,25 %
85	6	9,38 %
80	10	15,63 %
75	2	3,13 %
70	1	1,56 %
40	1	1,56 %
30	2	3,13 %
20	1	1,56 %
Total	64	100,0 %

Fuente: elaboración propia.

La figura 19 muestra la distribución de porcentajes en una gráfica circular:

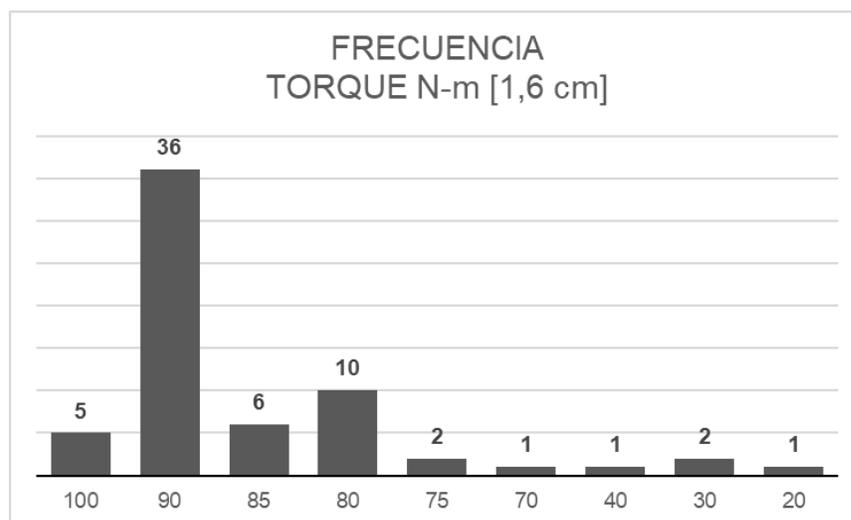
Figura 19. **Gráfica circular 1,6 cm**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

La figura 20 muestra la distribución de frecuencias en una gráfica de barras:

Figura 20. **Gráfica de barras 1,6 cm**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

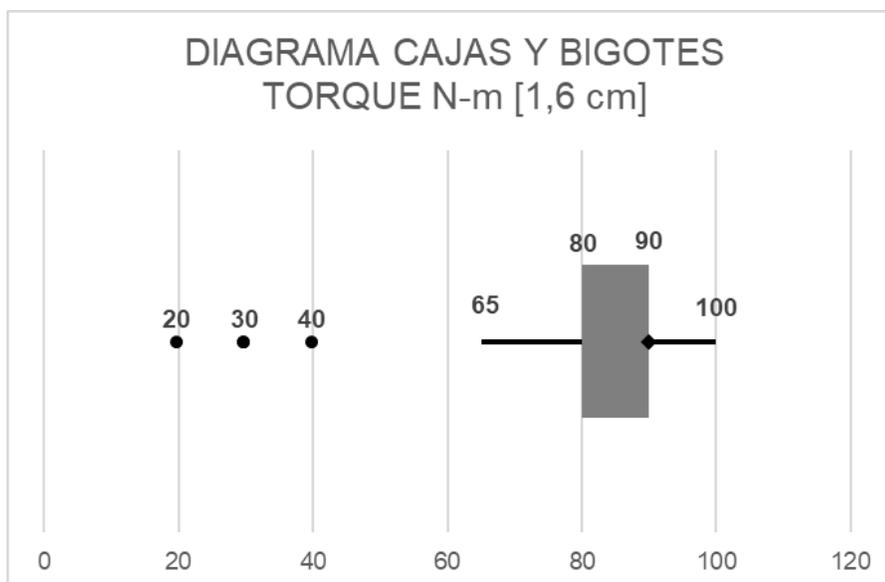
Para muestra de la distribución de datos, se utiliza una gráfica de cajas y bigotes, teniendo como valores característicos los indicados en la tabla IX y mostrando la gráfica en la figura 21.

Tabla IX. **Estadísticos 1,6 cm**

Datos	Valores
Dato menor	20
Cuartil 1	80
Mediana	90
Cuartil 3	90
Dato mayor	100
Rango inter cuartil	10
Tolerancia superior	105
Tolerancia inferior	65

Fuente: elaboración propia.

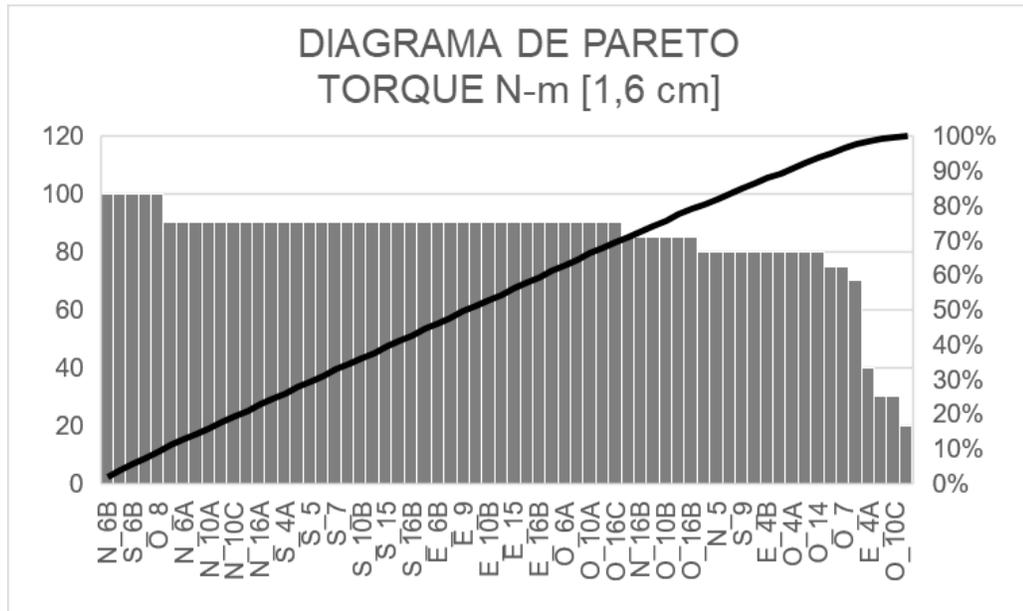
Figura 21. **Diagrama de cajas y bigotes 1,6 cm**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

La figura 22 muestra el diagrama de Pareto generado con la información.

Figura 22. **Diagrama de Pareto 1,6 cm**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

### 3.2.2. Diámetro 2,2 cm

El torque medido en la torre 601888 para el diámetro 2,2 cm es:

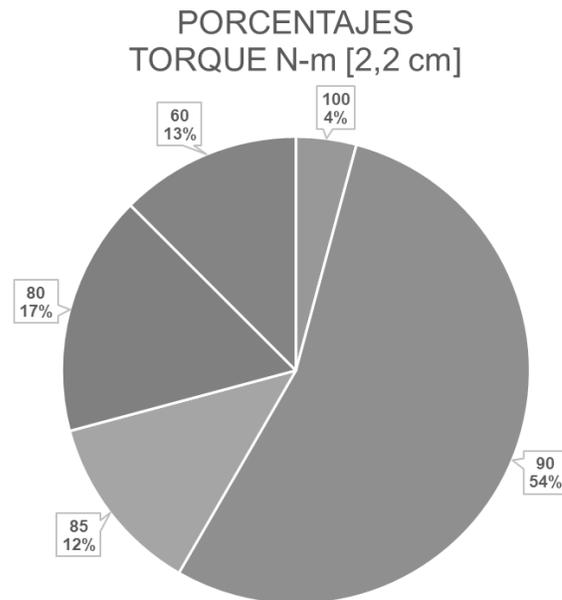
Tabla X. **Torque 2,2 cm**

Torque N-m	Cantidad	Porcentaje
100	1	4,17 %
90	13	54,17 %
85	3	12,50 %
80	4	16,67 %
60	3	12,50 %
Total	24	100,0 %

Fuente: elaboración propia.

La figura 23 muestra la distribución de porcentajes en una gráfica circular:

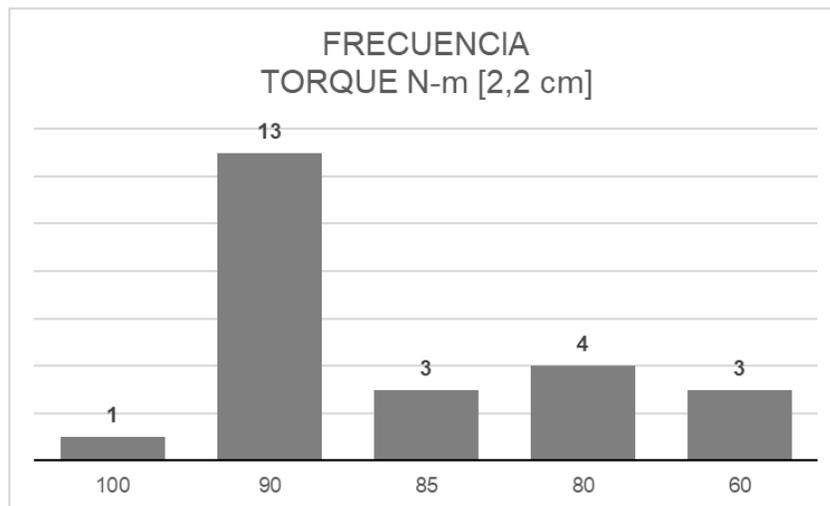
Figura 23. **Gráfica circular 2,2 cm**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

La figura 24 muestra la distribución de frecuencias en una gráfica de barras:

Figura 24. **Gráfica de barras 2,2 cm**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

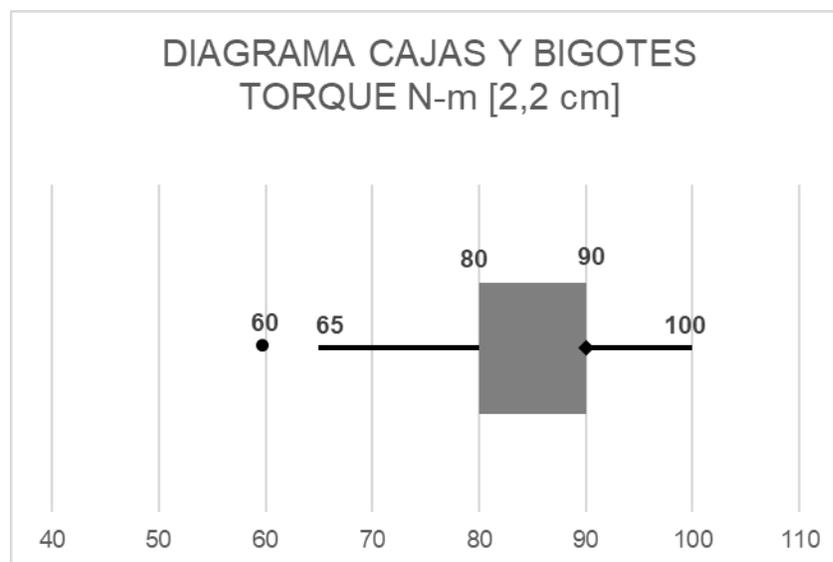
Para muestra de la distribución de datos, se utiliza una gráfica de cajas y bigotes, teniendo como valores característicos los indicados en la tabla XI y mostrando la gráfica en la figura 25.

Tabla XI. **Estadísticos 2,2 cm**

Datos	Valores
Dato menor	60
Cuartil 1	80
Mediana	90
Cuartil 3	90
Dato mayor	100
Rango inter cuartil	10
Tolerancia superior	105
Tolerancia inferior	65

Fuente: elaboración propia.

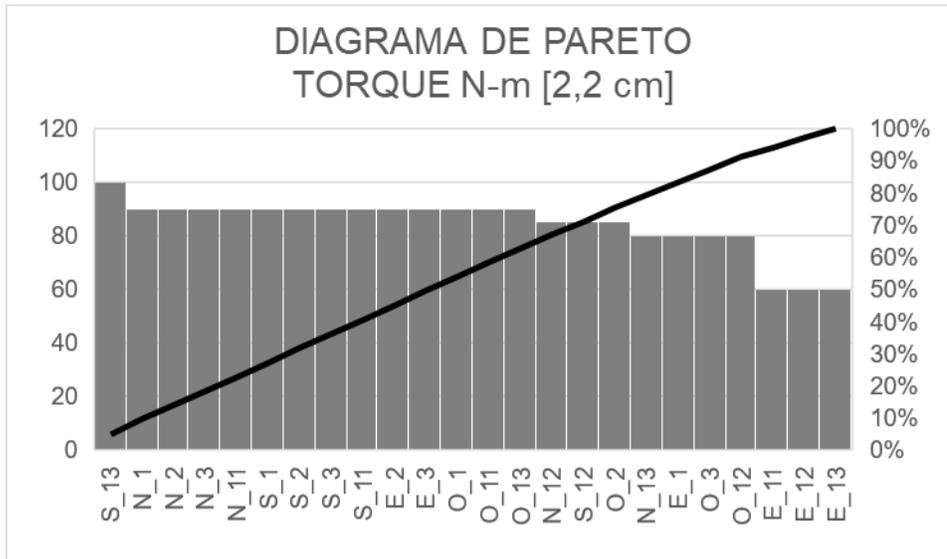
Figura 25. **Diagrama de cajas y bigotes 2,2 cm**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

La figura 26 muestra el diagrama de Pareto generado con la información.

Figura 26. **Diagrama de Pareto 2,2 cm**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

### 3.3. Riesgos

Para el caso de investigación, se describen los riesgos inherentes a la actividad y se plantean una posibilidad para minimizar su impacto:

Conforme a la actividad de montaje y revisión de tornillos, trabajos con electricidad en caliente y trabajos de inspección en altura, los riesgos identificados son trabajo en alturas, riesgo de contacto eléctrico directo e indirecto, riesgo de caída de objetos y riesgo de cortaduras.

Los mismos que son previamente identificados, se dan a conocer en la inducción de seguridad previo a realizar trabajos y se toman acciones en procedimiento y equipo de protección personal y colectivo, para minimizar su impacto.

El desglose y uso de equipos de protección personal y colectivo; las correctas prácticas del manejo de equipo y herramienta a utilizar y la manipulación de materiales para sustitución se evidencia en el procedimiento.

### **3.4. Propuesta para monitoreo de estado de condición y sustitución de tornillería utilizada en uniones en torres de transmisión eléctrica**

La compilación de información por torre, en períodos de tiempo establecidos, con la finalidad de crear un historial de datos que puedan generar tendencias, puede ser fundamental para establecer un período de vida útil de la tornillería colocada en las uniones de piezas metálicas de soporte de estructura, por lo que se sugiere realizar la monitorización de estado de condición, recolectando información de torque, inspección visual, sustitución de tornillería que no cumpla con los parámetros mínimos y evaluación de las variaciones de ambiente circundante a ubicación de la edificación.

#### **3.4.1. Procedimiento**

En la tabla XII se muestra el procedimiento guía propuesto para realizar el monitoreo del estado de condición de tornillería de sujeción de piezas metálicas en una torre de transmisión eléctrica. La figura 30, en la sección ANEXOS, muestra el diagrama de flujo del procedimiento mostrado en la tabla XII.

Tabla XII. **Procedimiento para monitoreo de estado de condición de tornillería**

<b><u>CONTROL DE ENMIENDAS</u></b>			
<b>Naturaleza de la modificación</b>	<b>Página</b>	<b>Revisión</b>	<b>Fecha</b>
Creación	Todas	01	01/10/2018

Continuación de la tabla XII.

<b><u>VALIDACIÓN</u></b>		
	<b>Redactor</b>	<b>Verificador</b>
<b>Fecha</b>	01/10/2018	18/10/2018
<b>Nombre</b>	Carlos Alejandro Alegre Ordóñez	Ludwyn Fernando Fuentes Ramos
<b>Torre</b>	601888. Amatitlán, Guatemala	
<b>Correo</b>	caalegreo@gmail.com	prevencion.consultor@gmail.com

<b><u>DIFUSIÓN</u></b>					
<b>Puesto</b>	<b>Tipo de documento</b>	<b>No. de copia</b>	<b>Formato de la copia</b>	<b>Sitio de archivo</b>	<b>Fecha</b>
Asesor	Original	0	Impreso y digital	Biblioteca propia	19/10/2018
Revisor de escuela	Copia	1	Impreso y digital	Biblioteca propia	11/11/2018
Coordinación maestría	Copia	2	Impreso y digital	Biblioteca propia	12/11/2018
Empresa interesada	Copia	3	Impreso y digital	Biblioteca propia	30/11/2018

<b><u>OBJETIVO</u></b>	Establecer un procedimiento para monitorear el estado de condición de tornillería utilizada en uniones de estructuras metálicas de torres de soporte de transmisión eléctrica.
------------------------	--

<b><u>ALCANCE</u></b>	Redactar el procedimiento para realizar la verificación de torque de piezas de tornillería en una torre de transmisión eléctrica en funcionamiento; delimitando el alcance de riesgo por tensión eléctrica. Realizar inspección visual para identificación de deterioro por efectos de corrosión y/o desgaste y/o grietas superficiales. Sustituir las piezas que no cumplan con los patrones mínimos establecidos. Generar historial de información.
-----------------------	---

Continuación de la tabla XII.

<b><u>EQUIPOS INVOLUCRADOS</u></b>	
<b>No.</b>	<b>Equipo</b>
1	Detector de corriente – chicharra
2	Anclajes para aterrizaje

<b><u>PERSONAL INVOLUCRADO</u></b>		
<b>No.</b>	<b>Puesto</b>	<b>Competencia</b>
1	Montador	Realizar operaciones de detección de corriente eléctrica cercana, colocación de varilla y conexiones de tierra, medición de torque de unidades de tornillería factibles, sustitución de tornillería identificada.
2	Supervisor SSO	Dar charla de inducción cinco minutos, llenar y validar el permiso de trabajo, evaluar y validar condición de EPP, delimitar zonas de trabajo debido a corriente eléctrica.
3	Supervisor de campo	Realizar las inspecciones previas al inicio de trabajo, avalar los permisos de trabajo propuestos por el Supervisor SSO, conciliar el cumplimiento de los requerimientos solicitados e indicados por todas las partes involucradas.

<b><u>TIEMPO ESTIMADO DE EJECUCIÓN</u></b>	05 horas
--	----------

<b><u>EQUIPO DE SEGURIDAD</u></b>	
<b>No.</b>	<b>Equipo</b>
1	Casco dieléctrico Tipo I clase E&G con barbiquejo
2	Botas de seguridad con punteras no metálicas
3	Lentes de seguridad
4	Guantes para alta tensión clase 2, tipo 1, ANSI/ASTM
5	Arnés de seguridad: 01 punto de anclaje dorsal + 01 punto de anclaje esternal
6	Bolsa de cinturón para acarreo de herramientas

Continuación de la tabla XII.

<b><u>HERRAMIENTA</u></b>	
<b>No.</b>	<b>Herramienta</b>
1	Torquímetro manual para medición
2	Copas accesorias para torquímetro
3	Vernier, cinta métrica metálica 03 m
4	Cubeta, soga y polea
5	Martillo, llave Stilson, spray desoxidante
6	Sargentos prensa

<b><u>MATERIALES</u></b>	
<b>No.</b>	<b>Material</b>
1	No aplica

<b><u>REPUESTOS</u></b>	
<b>No.</b>	<b>Repuesto</b>
1	Tornillería para reemplazo

<b><u>CONDICIONES PRELIMINARES</u></b>	
1	Revisión de asistencia de personal previamente inscrito y avalado para actividad.
2	Charla de inducción cinco minutos.
3	Inspección de equipo de protección personal (su colocación y uso).
4	Inspección de herramienta.
5	Verificación del plan de contingencia (redacción y explicación del permiso de trabajo).
6	Se revisa zona baja de estructura, identificando unidades de tornillería con puntos de soldadura y zonas de tratamiento con pintura de recubrimiento.

Continuación de la tabla XII.

<b><u>VERIFICACIÓN DE CORRIENTE</u></b>	
1	Cuadrilla de montadores sube a la torre, utilizando el EPP, reconociendo el procedimiento y sin herramientas. Llevan el detector de corriente previamente revisado.
2	Detectan zona de corriente. Se delimita zona de trabajo superior.
3	Bajan de estructura. Colocan varilla de descarga a tierra. Realizan conexión de tierra física desde varilla colocada hacia cable de tierra de la estructura.

<b><u>MEDICIÓN DE TORQUE E INSPECCIÓN VISUAL</u></b>	
1	Se delimita en mapa de estructura, la zona de trabajo.
2	Se evalúa en piezas de tornillería de la torre, los diámetros de tuercas y pernos para seleccionar piezas accesorias de torquímetro.
3	Cuadrilla de montadores sube a la torre, utilizando el EPP, reconociendo el procedimiento y sin herramienta de gran dimensión. Sube soga y polea para su anclaje a la torre.
4	Por medio del mecanismo de polea, se sube el torquímetro y el vernier. Se mide diámetro de la tuerca.
5	Por medio del mecanismo de polea, se sube la copa requerida para realizar la medición y su adaptador para el torquímetro.
6	Inicia medición de torque. Un montador realiza la verificación del torque y la lectura es identificada por otro montador. Dicta el dato hacia el Supervisor de campo, quien toma la lectura.
7	El montador indica al Supervisor de campo el estado de condición superficial de la unidad de tornillería: grietas, desgaste, corrosión. Indica el dato al Supervisor de campo, anotando la observación.
8	Se identifican las piezas a ser sustituidas, por indicación del Supervisor de campo, realizando una cuantificación de las unidades requeridas.
9	Por medio del mecanismo de polea, se suben las unidades de tornillería (para sustitución), sargentos prensa, llave Stilson y spray desoxidante.

Continuación de la tabla XII.

10	El montador coloca los sargentos prensa para sujeción temporal de piezas metálicas de soporte. Lo ajusta, aprieta e indica al Supervisor de campo para solicitar autorización de sustituir la pieza.
----	--

<b><u>MEDICIÓN DE TORQUE E INSPECCIÓN VISUAL</u></b>	
11	Tras la aprobación del Supervisor de campo, el montador realiza el retiro de la pieza de tornillería identificada. Utiliza llave Stilson para desapretar, martillo y spray desoxidante (si son necesarios). Retira la pieza de tornillería colocada y coloca la pieza de tornillería nueva. Coloca tornillo, roldana, washita de presión (si es requerida) y tuerca; procede a realizar torqueado de pieza utilizando torquímetro hasta llegar al torque establecido.
12	Se repite el procedimiento tantas veces como sea necesario conforme la medición de torque previa.

<b><u>INFORME DE ACTIVIDADES</u></b>	
1	Realizado por el Supervisor de campo, indicando los valores y tendencias establecidos en formato. Revisado y avalados por Supervisor SSO. Firmado por partes interesadas.
2	Informar a la empresa interesada.

Fuente: elaboración propia.

El procedimiento propuesto es desarrollado en función de las vivencias adquiridas durante la recolección de información, las indicaciones de experiencias similares de los antecedentes y las referencias a datos indicados por normas que aplican en la materia.

### 3.4.2. Precio estimado

La tabla XIII muestra el resumen de precios de referencia para realizar el monitoreo del estado de condición de tornillería de sujeción de piezas metálicas en una torre de transmisión eléctrica.

El desglose de precios incluye el pago de personal profesional y técnico a utilizar para la inspección, enseres requeridos y piezas para sustitución *in situ*.

Tabla XIII. Precio estimado

<b>RESUMEN DE PRECIO</b>		
<b>No.</b>	<b>ACTIVIDAD</b>	<b>PRECIO</b>
<b>1</b>	<b>Visita de reconocimiento</b>	<b>Q. 1 350.00</b>
1,1	Día profesional (01)	Q. 750.00
1,2	Viáticos (01)	Q. 350.00
1,3	Enseres múltiples (01)	Q. 250.00
<b>2</b>	<b>Visita de inspección y evaluación</b>	<b>Q. 4 500.00</b>
2,1	Día profesional (02)	Q. 1 500.00
2,2	Día técnicos (03)	Q. 1 500.00
2,3	Viáticos (05)	Q. 1 000.00
2,4	Enseres múltiples (01)	Q. 500.00
<b><u>TOTAL</u></b>		<b><u>Q 5 850.00</u></b>

Fuente: elaboración propia.

La evaluación de torque, inspección visual, toma y procesamiento de datos para monitoreo de estado de condición de tornillería en una torre de transmisión eléctrica se estimó en un precio Q. 5 850,00 (cinco mil ochocientos cincuenta quetzales exactos), los cuales sirven como base para mantenimiento de la torre, justificando la continuidad de su fin primordial como estructura de soporte, disminuyendo el riesgo de colapso parcial o total.



## **4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

Durante el desarrollo de la investigación, cada una de las fases presentó resultados, de los cuales se obtiene información para ser considerada en la elaboración del procedimiento propuesto y se denotan limitantes de los alcances de investigación. La descripción se realiza por cada fase.

### **4.1. Fase de reconocimiento**

Durante la visita de reconocimiento, se evidenció como consideración de la torre estudiada:

- El instrumento propuesto valida información para descripción y reconocimiento de la zona en donde se propone realizar el trabajo. Se marcan alertivos del medio ambiente circundante y de los riesgos inherentes.
- Para el caso de estudio, evidencia en vista superficial el deterioro, debido a la generación de carbón en la planta que funcionó en la periferia de la ubicación de la estructura metálica. Se muestran secuelas de oxidación en las unidades de tornillería y en los elementos de acero componentes.
- Se evidencia que la torre no ha sufrido vandalismo, contando con sus piezas originales de constitución. Del entorno, favorece que la torre se encuentre en una propiedad privada delimitada y que cuenta con seguridad.
- La torre se encuentra ubicada en la periferia de un camino vehicular de importancia intermedia, por lo que su acceso puede ser por cualquier

medio terrestre. Esto puede representar una ventaja a considerar cuando se realicen trabajos posteriores, enmarcando que las rutas para servicios de abastecimiento de enseres y para emergencias están inmediatas.

- La torre sirve para transmisión eléctrica, lo cual enmarca la necesidad de delimitar la zona de influencia del campo eléctrico y colocación de conexión provisional a tierra previo a realizar cualquier trabajo en la ubicación. La torre evidencia que en zonas bajas (hasta 3 m de altura) se han realizado trabajos de protección contra corrosión por medio de pintura y en prevención de conservación de estructura se ha colocado puntos de soldadura a las puntas de tornillo (en unión con tuerca).

Las consideraciones de la visita de inspección quedan anotadas en el instrumento de reconocimiento en cada campo contemplado (tabla XV, sección ANEXOS) y en observaciones generales. Se evidencian también en el diagrama de flujo de procedimiento (figura 30, sección ANEXOS).

#### 4.2. Medición de torque

Conforme a Telecom sites (s.f.), la tabla XIV muestra los torques esperados en tornillos colocados en una estructura metálica de soporte.

Tabla XIV. **Torque esperado en tornillería ASTM A307 colocada en estructura metálica de soporte**

<b>Diámetro (cm)</b>	<b>Torque esperado (N-m)</b>
1,6	94,9
2,2	203,4

Fuente: Telecom sites (s.f.). *Procedimiento de torque de sitios Opsimex*. Operadora de sites mexicanos, S.A. de C.V. p. 4

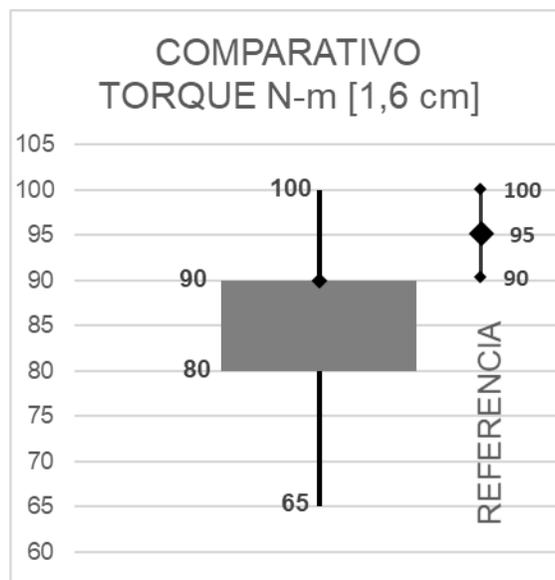
Utilizando el método de control de torque conforme la investigación realizada por Garzón (2011), se hacen los comparativos entre las tendencias identificadas mostradas en el capítulo 3 contra los datos esperados; así como el análisis de las tendencias mostradas.

#### 4.2.1. Diámetro 1,6 cm

Tras la medición del torque en 64 piezas de tornillería de diámetro 1,6 cm, que representan el 72,7 % de los datos de torque recolectados; se evidencia como comportamiento que el 56,25 % de los datos, obtienen un torque de 90 N-m (incerteza del equipo  $\pm 10$  N-m). Datos reflejados en la gráfica circular y en la gráfica de barras.

La figura 27 muestra el comparativo de torques recolectados contra esperados.

Figura 27. Comparativo 1,6 cm



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Conforme lo indicado por Telecom sites (s.f.) el torque al cual se puede considerar aceptable en cada pieza de tornillería es 94,9 N-m. Considerando la incerteza de toma de datos y del equipo ( $\pm 10$  N-m), los valores iguales o mayores a 85 N-m pueden considerarse aceptables, representando el 73,44 % de los datos obtenidos en medición.

El ensayo de inspección visual evidencia deterioro en la capa superficial, particularmente en el área de rosca que se mostraba más cercana a contacto con piezas componentes de la estructura, mostrando fisuras, desprendimiento de paso por abrasión, puntos de corrosión. El ensayo de radiología evidenció en las piezas de este diámetro, que el deterioro es superficial y no mostró fisuras internas en las piezas muestreadas.

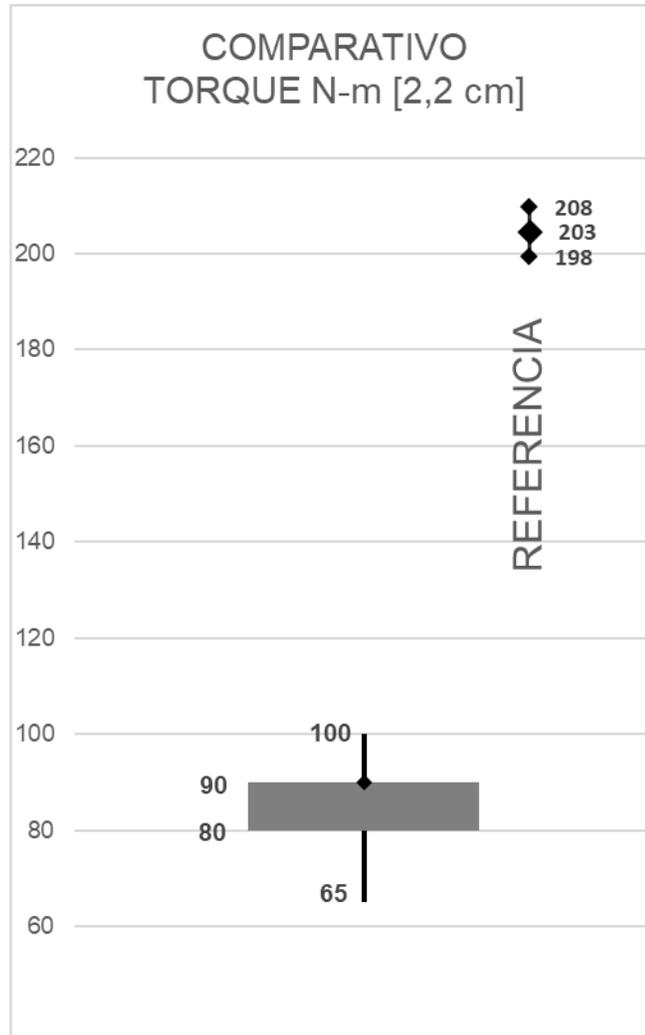
De la información mostrada en el capítulo 3, el diagrama de cajas y bigotes se muestra asimétrico y sesgado a la izquierda, no presenta normalidad en el conjunto de datos, concentrando datos en un valor puntual que representa a la mediana y al cuartil tres de la distribución. Para validar el modelo, se requiere de mayor cantidad de datos. Se evidencian cuatro datos de la distribución como datos atípicos, que representan el 6,25 % de los datos recolectados. El diagrama de Pareto construido conforme a los datos obtenidos, indica que el dato 80-20 es un torque 85 N-m.

#### **4.2.2. Diámetro 2,2 cm**

Tras la medición del torque en 24 piezas de tornillería de diámetro 2,2 cm, que representan el 27,3 % de los datos de torque recolectados; se evidencia como comportamiento que el 54,17 % de los datos obtienen un torque de 90 N-m (incerteza del equipo  $\pm 10$  N-m). Datos reflejados en la gráfica circular y en la gráfica de barras.

La figura 28 muestra el comparativo de torques recolectados contra esperados.

Figura 28. **Comparativo 2,2 cm**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Conforme lo indicado por Telecom sites (s.f.) el torque al cual se puede considerar aceptable en cada pieza de tornillería es 203,4 N-m. Considerando la incerteza de toma de datos y del equipo ( $\pm 10$  N-m), ninguno de los valores obtenidos está en rango aceptable.

De la información mostrada en el capítulo 3, el diagrama de cajas y bigotes se muestra asimétrico y sesgado a la izquierda, no presenta normalidad en el conjunto de datos, concentrando datos en un valor puntual que representa a la mediana y al cuartil tres de la distribución. Para validar el modelo, se requiere de mayor cantidad de datos. Se evidencian tres datos de la distribución como datos atípicos, que representan el 12,5 % de los datos recolectados. El diagrama de Pareto construido conforme a los datos obtenidos, indica que el dato 80-20 es un torque 85 N-m.

### **4.3. Radiología X**

En paralelo con la medición de torque de las piezas, se realizó la sustitución de piezas para refuerzo de estructura y para laboratorio. La exposición a radiología X se realizó en dos tomas, conforme la cantidad de energía y tiempos de exposición mostrados en la tabla V de la sección 3.1.

En la exposición primera, se consideró explorar la sección interna de la pieza tal cual las condiciones de la pieza quedaban tras su retiro, evidenciando su deterioro superficial, desgaste por abrasión, corrosión por influencia de medio ambiente y por química disímil de los materiales que componen las piezas metálicas (soporte y unión). Se evidenció, a pesar de que eran las piezas con menor torque, que el daño es superficial, no encontrando fisuras internas.

En la exposición segunda, se realiza la exposición, considerando un proceso de limpieza superficial manual (utilizando cepillo de alambre) para retirar la oxidación, lo que evidenció que no hay grietas superficiales en las piezas inspeccionadas, pero que si mostraban desgaste por abrasión. El ensayo de radiología no mostró fisuras internas, validando la radiación absorbida de la toma primera.

## CONCLUSIONES

1. El procedimiento para monitoreo de estado de condición fue establecido en la investigación, considerando la evaluación del medio circundante en primera fase; inspección visual en cada pieza de tornillería (factible de evaluar) y medición de torque (incluyendo rango de apriete y sustitución inminente descrita en el procedimiento) en segunda fase, y evaluación de radiología X en tercera fase.
2. El mercado identifica técnicas destructivas y no destructivas para evaluar el deterioro de las piezas. Se seleccionaron técnicas no destructivas: inspección visual y reconocimiento del área (relacionada con el medio circundante, identificando posibles causas de deterioro – para el caso estudiado es la cercanía a una generadora eléctrica a base de carbón), torque (ligado a las cargas a las que es sometida cada pieza, evidenciando fuerzas de tensión y torsión y desgaste superficial) y radiología (tras sustitución de piezas en la estructura estudiada, buscando fisuras internas).
3. Los riesgos inherentes identificados en la evaluación realizada son trabajo en alturas, riesgo de contacto eléctrico directo e indirecto, riesgo de caída de objetos, riesgo de cortaduras. El procedimiento desglosa el análisis de los riesgos identificados y su mitigación mediante la instrucción a los operadores previo a iniciar labores, delimitación de zona de riesgo eléctrico, uso de equipo de protección personal y colectivo acorde a trabajos de riesgo eléctrico y trabajo en alturas, permiso de

trabajo para identificar las rutas de acceso y comunicación hacia centros de asistencia y supervisión cualificada permanente de labores.

4. Del estudio realizado, se establecieron dos medidas de diámetros en las piezas de tornillería, identificando que en el diámetro 1,6 cm el 73,44 % de las mediciones de torque realizadas se encuentran en un rango aceptable; y del diámetro 2,2 cm ninguna de las piezas se encuentra en un rango aceptable. Por ensayo de radiología X, se identificó que no existen grietas internas. Por inspección visual y procesos de limpieza, se evidenció desgaste superficial de las piezas inducido por el medio entorno ambiente.

## RECOMENDACIONES

1. Repetir el procedimiento en la misma torre después de la ocurrencia de un evento climatológico (tormentas, erupciones volcánicas) o sísmico de grandes magnitudes, o en un período de tiempo no mayor a tres años, con afán de validar los datos y generar historial de tendencias para generar modelos preventivos, así como la búsqueda de otros causales de deterioro. Durante la repetición del procedimiento para monitoreo de estado de condición, realizar el ensayo no destructivo radiología X en cada pieza sustituida para determinar la existencia o no existencia de fisuras internas en las piezas de tornillería. Evaluar la factibilidad de realizar la evaluación en otras torres.
2. Buscar nuevas técnicas para el monitoreo del estado de condición. Después de generar un historial, se puede construir un modelo para relacionar el impacto de las mediciones de torque contra el desgaste superficial y/o interno, para con ello validar los períodos de vida útil de las piezas o identificar las ubicaciones de piezas que tienen mayor tendencia a desgaste.
3. Tras la repetición del procedimiento, se puede evaluar la validez de los riesgos inherentes a la actividad. Los riesgos pueden ser diferentes entre cada ubicación. Al recabar la información de los mismos, se puede generar un historial de riesgos, con la finalidad de implementar mejores medidas para prevención.

4. Para el caso de estudio, con las tendencias mostradas, se debe de evaluar la factibilidad de sustitución completa de torre, ya que a la fecha de investigación la torre ha permanecido en operación durante más de 55 años. Se requiere de análisis de los componentes estructurales para validar si su diseño es congruente con las cargas a las que la estructura fue sometida. La investigación puede servir de base para realizar un estudio en campos eléctricos, analizando que el deterioro de la estructura de soporte puede generar deflexiones que a su vez repercuten en cambio de catenaria de las líneas de tensión eléctrica e inducir pérdidas de energía.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aguirre, C. (2010). *Especificación ANSI/AISC 360-10 para Construcciones de Acero*. Chile: ALACERO Asociación Latinoamericana del Acero.
2. Cañada, J.; et. al. (2007). *Manual para el profesor de SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO*. España: Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
3. Chapula, S. (2014). *Procedimiento constructivo con estructuras metálicas* (tesis de pregrado). Universidad Nacional Autónoma de México, México.
4. Fuentes, F. (1982). *Ensayos mecánicos en metales* (tesis de maestría). Universidad Autónoma de Nuevo León, México.
5. Garcés, L. y Hernández, M. (2004). La lluvia ácida: un fenómeno fisicoquímico de ocurrencia local. *Revista Lasallista de investigación*, 1(2), 67-72.
6. Garzón, C. (2011). Pernos de alta resistencia. *Revista CIENCIA*, 14(1), 57-78.

7. Gavidia, A. y Subía, A. (2015). *Elaboración de los procedimientos de fabricación y montaje de una estructura de acero para un edificio tipo* (tesis de pregrado). Universidad Politécnica Nacional, Colombia.
8. González, A. (1995). *Aplicación de los rayos X en la industria como prueba no-destructiva* (tesis de pregrado). Universidad Autónoma de Nuevo León, México.
9. Lamus, F.; Plaza, M. y Luna, P. (2014). Resistencia de una conexión emperrada solicitada a cizalladura doble paralela a la fibra para estructuras de guarda de angustifolia. *Revista Tecnura*, 19(43), 52-62.
10. López, A.; Parnás, V. y Martín, P. (2016). Análisis de la forma del fuste y condiciones de apoyo para una Torre Atirantada. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, 10(1), 1-10.
11. Mayén, J.; *et. al.* (2010). Evaluación de propiedades mecánicas de dos aceros grado herramienta AISI-O1, AISI-D2 y obtención de la concentración de esfuerzos en la geometría de mordazas de sujeción de especímenes compactos de tensión. *Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de Superficies y Materiales A.C*, 23, 10-14.
12. Oliva, A. (2009). Influencia de las variables climáticas en el deterioro del puente Boca de Camarioca debido a la corrosión atmosférica. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, 3(3), 1-15.

13. Ospina, R.; Hernando, C. y Parra, H. (2011). Aplicación y selección de ensayos no destructivos para la evaluación de uniones soldadas. *Scientia et Technica*, XVII(48), 196-201.
14. Picazo, A. (2007). Medios de unión de estructuras metálicas. *E.U. Arquitectura Técnica – Universidad Politécnica de Madrid*, 1-14.
15. Pytel, A.; Singer, F. (1994). *Resistencia de materiales*. México: Editorial Alfaomega.
16. Reformas al Reglamento de Salud y Seguridad Ocupacional 33-2016 (2016). *Diario de Centro América*, 93, febrero 5, 2016.
17. Reglamento de Salud y Seguridad Ocupacional 229-2014 (2014). *Acuerdo Gubernativo 229-2014. Ministerio de Trabajo y Previsión Social*, julio 23, 2014.
18. Rodríguez, F.; Jaime, D. (2011). Diagnóstico de fallos y condiciones anormales en líneas de transmisión con el empleo de redes neuronales artificiales. *Ciencia en su PC*, 1(1), p. 82-92.
19. Santamaría, H. (2007). Análisis de falla en perno de sujeción de unidad de bombeo mecánico Lufkin a640d-427-144. *Universidad Autónoma del Caribe, Volumen 5(2)*, 36-41.

20. Silva, S. (2005). *Tecnología de nueva generación para la edificación con estructuras metálicas* (tesis de pregrado). Instituto Politécnico Nacional, México.
21. Smith, W.; Hashemi, J. (2006). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de los materiales*. México: Editorial Mc Graw Hill.
22. Telecom sites (s.f.). *Procedimiento de torque de sitios Opsimex*. Operadora de sites mexicanos, S.A. de C.V.
23. Tristancho, J.; Higuera, O.; Florez, L. (2007). Evaluación del desgaste adhesivo del acero AISI-SAE 1020. *Scientia et Technica*, XIII(36), 187-191.
24. Trujillo, G. (2003). Monitoreo de condición – Una estrategia de Integración de Tecnologías. *Noria Latín América*, 1-9.
25. Zhang, Z.; et. al. (2017). Continuous monitoring of residual torque of loose bolt in a bolted joint. 6th Asia Pacific Workshop on Structural Health Monitoring, 6th APWSHM. *Procedia Engineering* 188, 278-285.

## ANEXOS

Tabla XV. Reconocimiento de estructura

<b>RECONOCIMIENTO DE LA ESTRUCTURA</b>	
Fecha de la visita	19 de octubre de 2017
Investigador	MA. Ing. Carlos Alejandro Alegre Ordóñez
Seguridad Industrial	Miguel Alonso Cardona Dardón
Acompañantes	---
	---
	---

<b>INFORMACIÓN RECOPIADA</b>	
<b>1. Coordenadas de la ubicación</b>	
X	-90.582084 (90°34'55,5" W)
Y	14.461449 (14°27'41,2" N)

<b>2. Descripción de colindancias</b>	
Norte	Planta de generación Laguna Lago de Amatitlán
Sur	Bodega interior de planta
Este	Bodega interior de planta Subestación Eléctrica
Oeste	Carretera circunvalación al Lago de Amatitlán Contenedores

<b>3. Estado social de la torre</b>	
3.1. ¿Es zona de habitación?	
Sí	
No	X

Continuación de la tabla XV.

3.2. ¿El terreno de la torre se encuentra invadido?

Sí \_\_\_\_\_  
No  \_\_\_\_\_

3.3. ¿La torre tiene evidencias de vandalismo?

Sí \_\_\_\_\_  
No  \_\_\_\_\_

3.4. ¿Se evidencian zonas industriales cerca de la zona?

Sí - La propia planta de generación eléctrica \_\_\_\_\_  
No \_\_\_\_\_

3.5. ¿Hay rutas de transporte colectivo en el lugar?

Sí - Transporte dimensiones pequeñas \_\_\_\_\_  
No \_\_\_\_\_

3.6. ¿Hay rutas de transporte de mercadería en el lugar?

Sí - Ruta alterna de comunicación hacia Amatitlán \_\_\_\_\_  
No \_\_\_\_\_

3.7. ¿Se puede acceder al lugar utilizando vehículo?

Sí - Carretera tangente \_\_\_\_\_  
No \_\_\_\_\_

3.8. Descripción del entorno social de la torre

La torre 601888, se encuentra en el interior de la planta de generación Laguna. La ubicación es tangente a la carretera de acceso y al lago de Amatitlán. En la periferia, se encuentra terrenos baldíos y terrenos utilizados para almacenamientos temporales. Zonas pobladas distan 2,2 km.

#### **4. Estado físico de la torre**

4.1. Condición visual de la torre

Adecuada \_\_\_\_\_  
Aceptable - Por deterioros visibles puntuales \_\_\_\_\_  
Deteriorada \_\_\_\_\_  
Mala \_\_\_\_\_  
Pésima \_\_\_\_\_  
Otro (¿cuál?) \_\_\_\_\_

Continuación de la tabla XV.

4.2. ¿Se evidencia corrosión/herrumbre en las piezas de estructura?

Sí  A distancia

No

4.3. ¿Se evidencia corrosión/herrumbre en las uniones?

Sí

No

4.4. ¿Se observan tornillos sueltos?

Sí (¿cuántos?)

No

4.5. ¿Se observan tornillos doblados?

Sí (¿cuántos?)

No

4.6. ¿Se observan tornillos quebrados?

Sí (¿cuántos?)

No

4.7. ¿Se observan piezas de tornillería incompletas?

Sí (¿cuántos?)

No

4.8. Descripción del entorno de condición visual de la torre

Al encontrarse la torre en una zona cercada y con seguridad permanente, no se evidencia que la misma tenga deterioro por agentes. Se ha tenido mantenimiento preventivo del tipo colocación de pintura anticorrosiva y puntos de soldadura en uniones tuerca-perno en zona tronco piramidal inferior. Al momento de visita, una línea de tensión ya no se encuentra montada sobre torre, teniendo la misma en zona adyacente sobre poste de acero 607676.

Continuación de la tabla XV.

### 5. Observaciones generales

La torre en estudio se encuentra en una zona de planta de generación de energía eléctrica que se encuentra en condición de abandono. Según el personal de seguridad, la misma lleva al menos 10 años de no estar en funcionamiento. Las instalaciones se encuentran con limpieza esporádica. La Subestación Eléctrica se encuentra cableada y probablemente en desuso.

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. Ficha técnica 601888

=Logo de empresa interesada=		FICHA TÉCNICA	
<b>Estructura #</b>	601888	<b>Longitud vano (m)</b>	#N/A
<b>Ubicación Téc.</b>	PALLAGU-TDL693-LAGU69-P601888	<b>Ángulo (grados)</b>	#N/A
<b>Norte</b>	760648.25	<b>Calibre</b>	740.8 (FLINT)
<b>Oeste</b>	1600135.5	<b>Empalme fibra óptica</b>	-
<b>Altura (m)</b>	21	<b>Cantidad Circuitos</b>	-
<b>Clase (lbf)</b>	G-83 H-4	<b>Configuración Doble Circuito</b>	-
<b>Tipo</b>	TORRE	<b>Circuito 1</b>	V
<b>Material</b>	Galvanizado	<b>Circuito 2</b>	-
<b>Ubicación</b>	Privada	<b>Material aislamiento</b>	Porcelana
<b>Tipo Retenida 1</b>	-	<b>Nivel Contaminación</b>	Normal
<b>Tipo Retenida 2</b>	-	<b>Distribución</b>	No
<b>Faseo</b>	BAC	<b>Navega</b>	No
<b>Tipo Conector</b>	-	<b>Condición arbolado</b>	3
<b>Interruptor</b>	-	<b>Conf HG</b>	Remate
<b>No. Interruptor</b>	-	<b>Tipo cable HG</b>	5/16
<b>Flying tap</b>	-		

Continuación de la tabla XVI.

<b>CODIGO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>CANTIDAD</b>
31-0336	Cable Alum 740.8 AAAC-6201 (FLINT)	#N/A
31-0444	Cable acero galv 5/16"	#N/A
#N/A	TORRE N4	1
32-0060	Aislador disco 10" ball-sock 69kV	66
33-0891	Grapa Susp.de Alum.Aisl.T/Post.Cab.740.8	3
33-0943	Grapa de remate para cable 740.8 Flint	6
33-0664	Eslabon de acero forjado, pasador de 3/4	7
33-0940	Grapa hierro Remate L.Guarda 5/16"	1
33-1292	Remate pref. tirante 5/16"	1.00
33-2646	Varilla 5/8"x8' C/Baño cobre	1.00
31-0012	CABLE COPERWELD NO. 2	21
33-0655	Empalme Alum.50 % 740.8 AAAC	4
#N/A		

Fuente: Empresa interesada.

Tabla XVII. **Permiso de trabajo**

<b>PERMISO DE TRABAJO</b>	
Fecha de la visita	17 de febrero de 2018
Investigador	M.A. Ing. Carlos Alejandro Alegre Ordóñez
Técnico	Mario Roberto Goshop
Seguridad Industrial	Miguel Alonso Cardona Dardón
Acompañantes	Aaron Morales
	Nelson Monterroso
	---
	---

Continuación de la tabla XVII.

## INFORMACIÓN REQUERIDA

### 1. Equipo de protección personal del técnico

1.1. ¿Cuenta el operario con el equipo de protección personal en condiciones aceptables? (Sí o No)

Casco dieléctrico	Sí
Botas dieléctricas	Sí
Guantes de protección	Sí
Lentes de protección	Sí

1.2. ¿Tiene el técnico su EPP para trabajo en alturas completo y en buen estado? (Sí o No)

Arnés	Sí
Línea de vida	Sí
Punto de anclaje	Sí

1.3. ¿Tiene el técnico un porta herramienta adecuado y en buen estado para llevar las herramientas manuales en buen estado en forma adecuada?

Sí	X
No	

### 2. Inducción de seguridad al técnico

2.1. ¿Cuenta el técnico con inducción previa en relación al trabajo a realizar?

Sí	X
No	

2.2. ¿Tiene el técnico experiencia previa en el trabajo a realizar?

Sí	X
No	

### 3. Información previa a trabajos

3.1. ¿Se ha notificado al dueño de la estructura del trabajo a realizar?

Sí	X- Presente técnico por parte de dueño de línea
No	

3.2. ¿Existe el permiso por escrito del dueño de la estructura para trabajar?

Sí	X
No	

Continuación de la tabla XVII.

3.3 ¿Se ha repasado por parte de los interesados el procedimiento a realizar?

Sí X  
No \_\_\_\_\_

3.4. ¿Se cuenta con botiquín de primeros auxilios adecuado?

Sí \_\_\_\_\_  
No X- Existe en campo por parte de seguridad

3.5. ¿Se conocen los números de emergencia de puestos cercanos?

Sí X  
No \_\_\_\_\_

3.6. ¿Se conocen las formas de actuar ante una eventualidad?

Sí X  
No \_\_\_\_\_

#### **4. Observaciones generales**

Al inicio de labores, siendo las 09:02 horas, se recibió inducción a personal por parte de la empresa dueña del predio: Orazul Energy. Durante todo el tiempo de labores, el encargado de seguridad ocupacional de Orazul Energy permaneció en las instalaciones y supervisó continuamente los trabajos realizados.

Al inicio de labores, se realizó comprobación de energización de línea, decidiendo frontera de trabajo para alcance seguro, utilizando detector de corriente. Se realizó maniobra de puesta a tierra de estructura y se utilizó todo el equipo de protección personal avalado e indicado.

\* Los procedimientos establecidos en este documento son requisito indispensable para autorizar la realización del trabajo. De no estar satisfechos a cabalidad y en consenso con todos los interesados el procedimiento, NO se dará autorización para realizar el trabajo.

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. Información de torque y evaluación visual de tornillería

<b>INFORMACIÓN DE TORQUE E INSPECCIÓN VISUAL DE TORNILLERÍA</b>	
Fecha de la visita	17 de febrero de 2018
Investigador	M.A. Ing. Carlos Alejandro Alegre Ordóñez
Técnico	Mario Roberto Goshop
Seguridad Industrial	Miguel Alonso Cardona Dardón
Acompañantes	Aaron Morales
	Nelson Monterroso
	Juan Carlos Mazariegos

<b>INFORMACIÓN RECOPIADA</b>				
<b>CARA NORTE</b>				
No.	Denominación	Torque (N-m)	Diámetro (cm)	Observaciones
1	ASTM A307	90 ± 10	2,2	
2	ASTM A307	90 ± 10	2,2	
3	ASTM A307	90 ± 10	2,2	
4A	ASTM A307	80 ± 10	1,6	
4B	ASTM A307	90 ± 10	1,6	
5	ASTM A307	80 ± 10	1,6	
6A	ASTM A307	90 ± 10	1,6	
6B	ASTM A307	100 ± 10	1,6	
7	ASTM A307	80 ± 10	1,6	
8	ASTM A307	90 ± 10	1,6	
9	ASTM A307	85 ± 10	1,6	
10A	ASTM A307	90 ± 10	1,6	
10B	ASTM A307	90 ± 10	1,6	
10C	ASTM A307	90 ± 10	1,6	
11	ASTM A307	90 ± 10	2,2	
12	ASTM A307	85 ± 10	2,2	
13	ASTM A307	80 ± 10	2,2	
14	ASTM A307	90 ± 10	1,6	
15	ASTM A307	100 ± 10	1,6	
16A	ASTM A307	90 ± 10	1,6	
16B	ASTM A307	85 ± 10	1,6	
16C	ASTM A307	90 ± 10	1,6	

Continuación de la tabla XVIII.

<b>CARA SUR</b>				
No.	Denominación	Torque (N-m)	Diámetro (cm)	Observaciones
1	ASTM A307	90 ± 10	2,2	
2	ASTM A307	90 ± 10	2,2	
3	ASTM A307	90 ± 10	2,2	
4A	ASTM A307	90 ± 10	1,6	
4B	ASTM A307	90 ± 10	1,6	
5	ASTM A307	90 ± 10	1,6	
6A	ASTM A307	90 ± 10	1,6	
6B	ASTM A307	100 ± 10	1,6	
7	ASTM A307	90 ± 10	1,6	
8	ASTM A307	90 ± 10	1,6	
9	ASTM A307	80 ± 10	1,6	
10A	ASTM A307	85 ± 10	1,6	
10B	ASTM A307	90 ± 10	1,6	
10C	ASTM A307	90 ± 10	1,6	
11	ASTM A307	90 ± 10	2,2	
12	ASTM A307	85 ± 10	2,2	
13	ASTM A307	100 ± 10	2,2	
14	ASTM A307	80 ± 10	1,6	
15	ASTM A307	90 ± 10	1,6	
16A	ASTM A307	90 ± 10	1,6	
16B	ASTM A307	90 ± 10	1,6	
16C	ASTM A307	30 ± 10	1,6	Reemplazado – END

<b>CARA ESTE</b>				
No.	Denominación	Torque (N-m)	Diámetro (cm)	Observaciones
1	ASTM A307	80 ± 10	2,2	
2	ASTM A307	90 ± 10	2,2	
3	ASTM A307	90 ± 10	2,2	
4A	ASTM A307	40 ± 10	1,6	Reemplazado – END
4B	ASTM A307	80 ± 10	1,6	
5	ASTM A307	90 ± 10	1,6	
6A	ASTM A307	70 ± 10	1,6	

Continuación de la tabla XVIII.

No.	Denominación	Torque (N-m)	Diámetro (cm)	Observaciones
6B	ASTM A307	90 ± 10	1,6	
7	ASTM A307	80 ± 10	1,6	
8	ASTM A307	90 ± 10	1,6	
9	ASTM A307	90 ± 10	1,6	
10A	ASTM A307	90 ± 10	1,6	
10B	ASTM A307	90 ± 10	1,6	
10C	ASTM A307	100 ± 10	1,6	
11	ASTM A307	60 ± 10	2,2	Apretado a torque 90 N-m
12	ASTM A307	60 ± 10	2,2	Apretado a torque 90 N-m
13	ASTM A307	60 ± 10	2,2	Apretado a torque 90 N-m
14	ASTM A307	90 ± 10	1,6	
15	ASTM A307	90 ± 10	1,6	
16A	ASTM A307	90 ± 10	1,6	
16B	ASTM A307	90 ± 10	1,6	
16C	ASTM A307	90 ± 10	1,6	

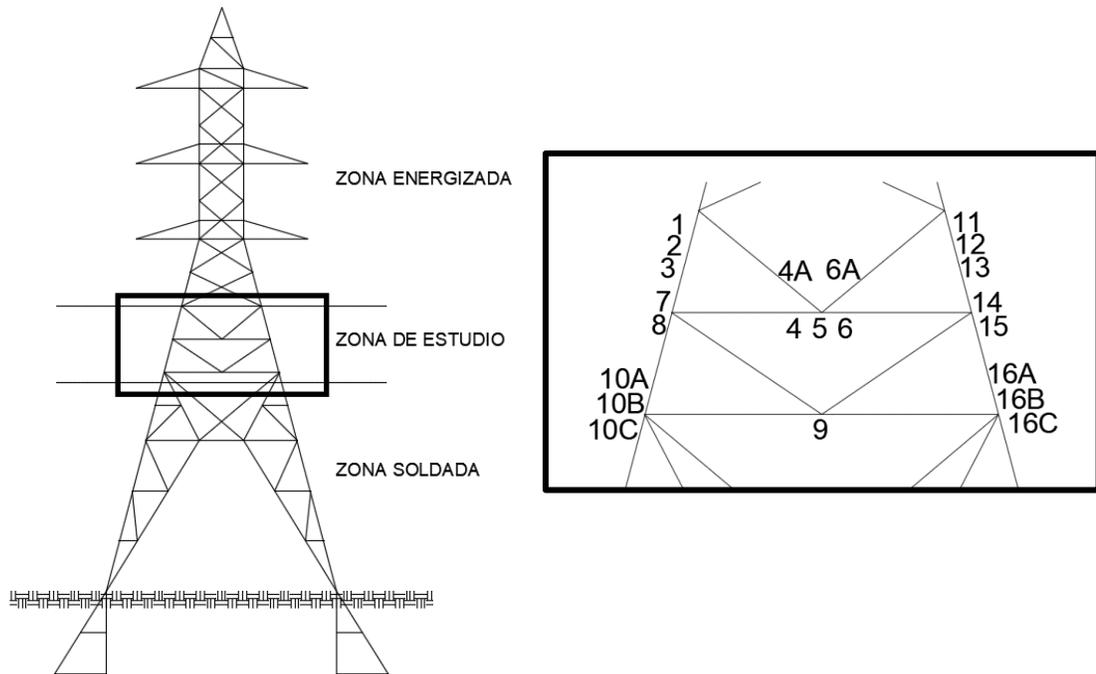
<b>CARA OESTE</b>				
No.	Denominación	Torque (N-m)	Diámetro (cm)	Observaciones
1	ASTM A307	90 ± 10	2,2	
2	ASTM A307	85 ± 10	2,2	
3	ASTM A307	80 ± 10	2,2	
4A	ASTM A307	80 ± 10	1,6	
4B	ASTM A307	75 ± 10	1,6	
5	ASTM A307	80 ± 10	1,6	
6A	ASTM A307	90 ± 10	1,6	
6B	ASTM A307	20 ± 10	1,6	Reemplazado – END
7	ASTM A307	75 ± 10	1,6	
8	ASTM A307	100 ± 10	1,6	
9	ASTM A307	90 ± 10	1,6	
10A	ASTM A307	90 ± 10	1,6	
10B	ASTM A307	85 ± 10	1,6	
10C	ASTM A307	30 ± 10	1,6	Reemplazado – END
11	ASTM A307	90 ± 10	2,2	

Continuación de la tabla XVIII.

No.	Denominación	Torque (N-m)	Diámetro (cm)	Observaciones
12	ASTM A307	80 ± 10	2,2	
13	ASTM A307	90 ± 10	2,2	
14	ASTM A307	80 ± 10	1,6	
15	ASTM A307	85 ± 10	1,6	
16A	ASTM A307	90 ± 10	1,6 </td <td></td>	
16B	ASTM A307	85 ± 10	1,6	
16C	ASTM A307	90 ± 10	1,6	

Fuente: elaboración propia.

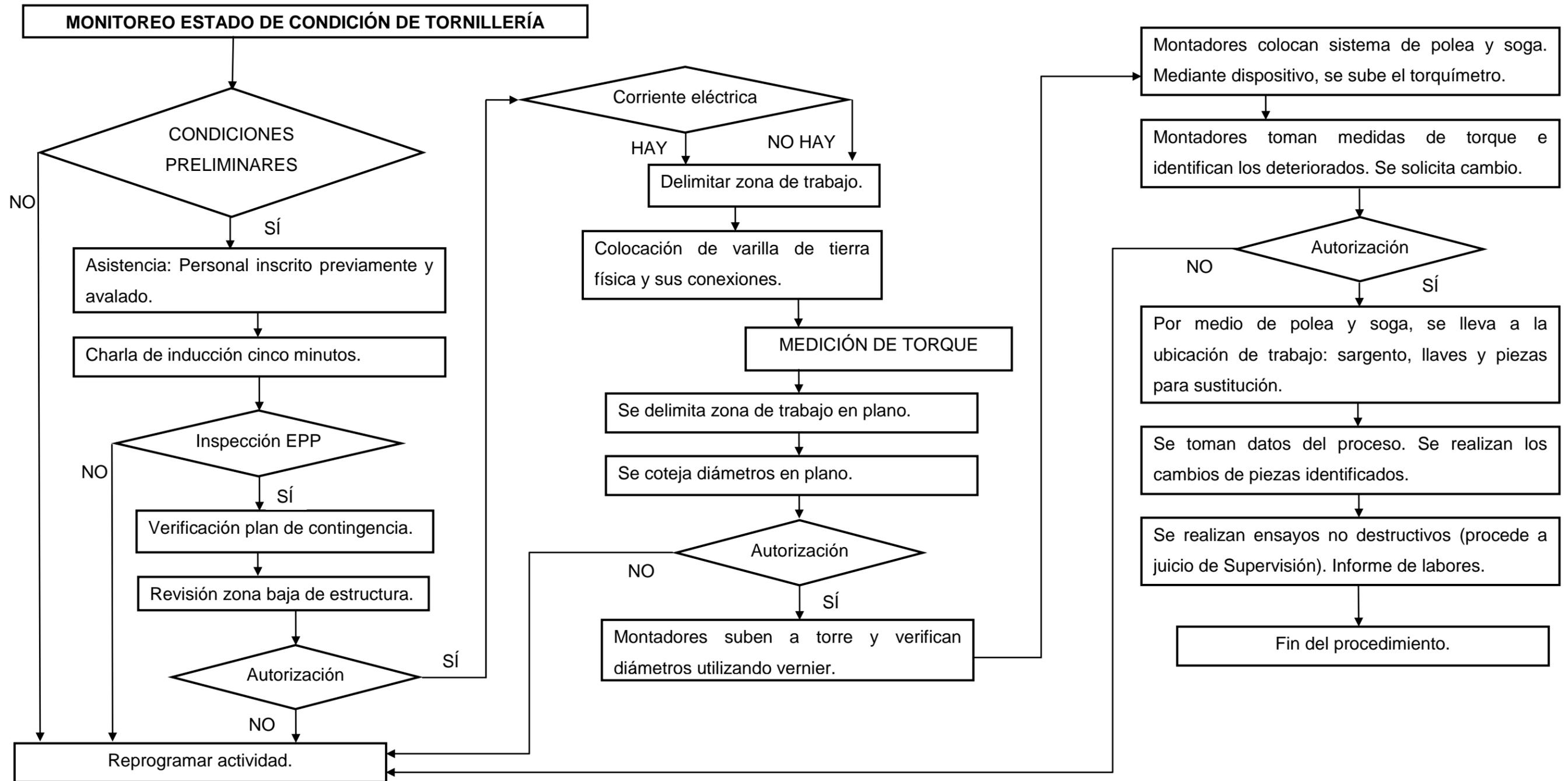
Figura 29. Localización de piezas evaluadas



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.



Figura 30. Diagrama de flujo de procedimiento



Fuente: elaboración propia.



Continuación de la figura 30.

### Secuencia fotográfica de diagrama de flujo

- Revisión de estado y colocación de equipo de protección personal. Charla de inducción y permiso de trabajo
- 1.



2. Colocación de aterrizaje



3. Detección de corriente en parte alta de estructura



Continuación de la figura 30.

3. Detección de corriente en parte alta de estructura



4. Delimitación de trabajo en zona baja de torre. Puntos de soldadura y pintura anticorrosiva

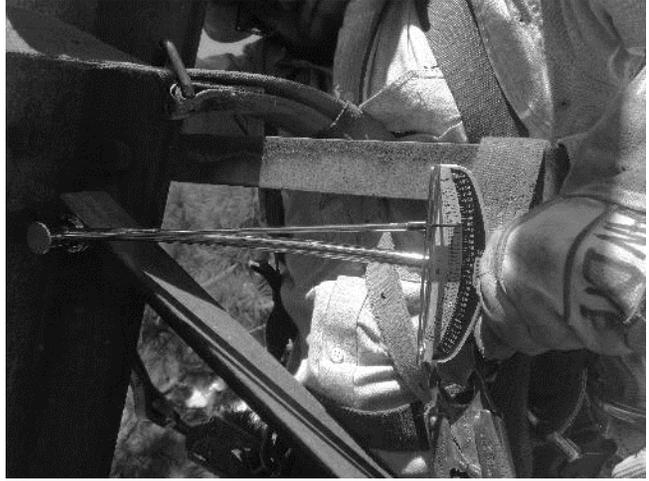


5. Medición de torque en estructura. Toma de datos

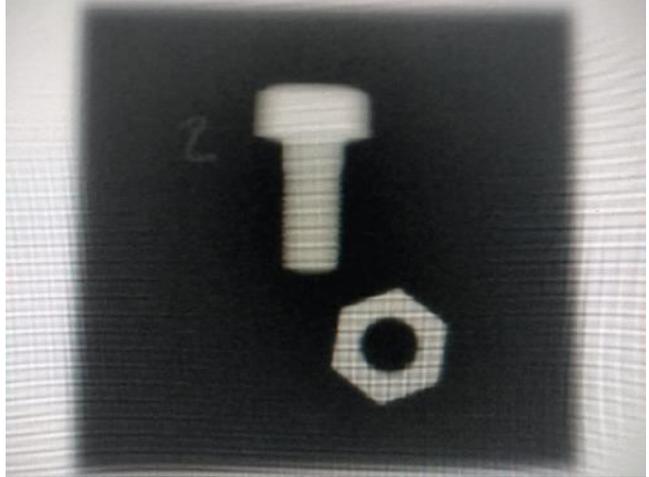


Continuación de la figura 30.

5. Medición de torque en estructura. Toma de datos



6. Laboratorio radiología



Fuente: elaboración propia.





UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA

FACULTAD DE  
INGENIERÍA  
ESCUELA DE ESTUDIOS  
DE POSTGRADO  
MAESTRÍA EN  
INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO

MONITOREO DE ESTADO DE  
CONDICIÓN DE TORNILLERÍA  
UTILIZADA EN UNIONES DE  
ESTRUCTURAS METÁLICAS DE  
TORRES DE SOPORTE DE  
TRANSMISIÓN ELÉCTRICA

ABRIL DE 2019

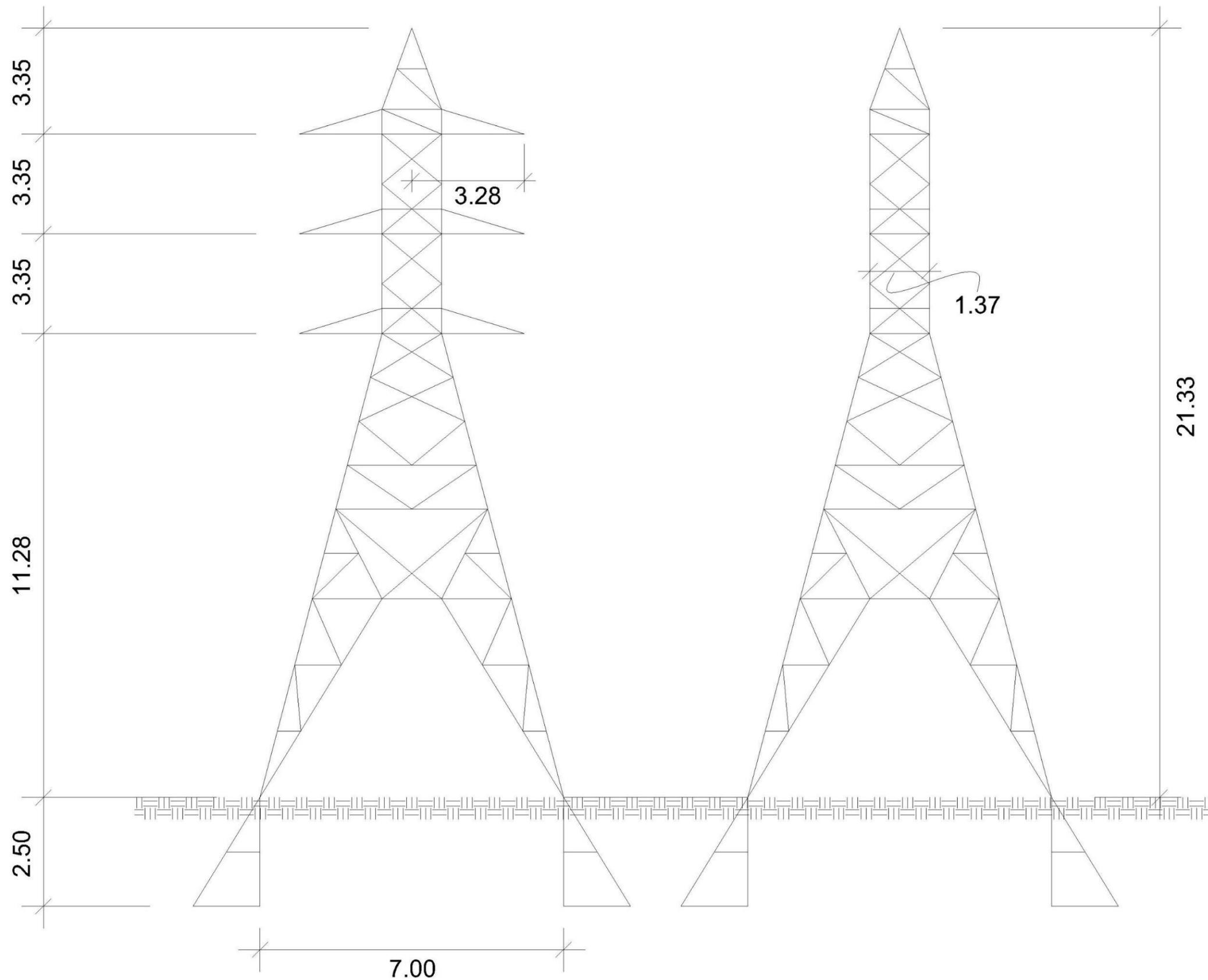
CARLOS ALEJANDRO  
ALEGRE ORDÓÑEZ

PLANO:

VISTA FRONTAL Y VISTA  
LATERAL DE TORRE.  
PLANTA ACOTADA

ESCALA 1:100

01 DE 03





UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA

FACULTAD DE  
INGENIERÍA  
ESCUELA DE ESTUDIOS  
DE POSTGRADO  
MAESTRÍA EN  
INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO

MONITOREO DE ESTADO DE  
CONDICIÓN DE TORNILLERÍA  
UTILIZADA EN UNIONES DE  
ESTRUCTURAS METÁLICAS DE  
TORRES DE SOPORTE DE  
TRANSMISIÓN ELÉCTRICA

ABRIL DE 2019

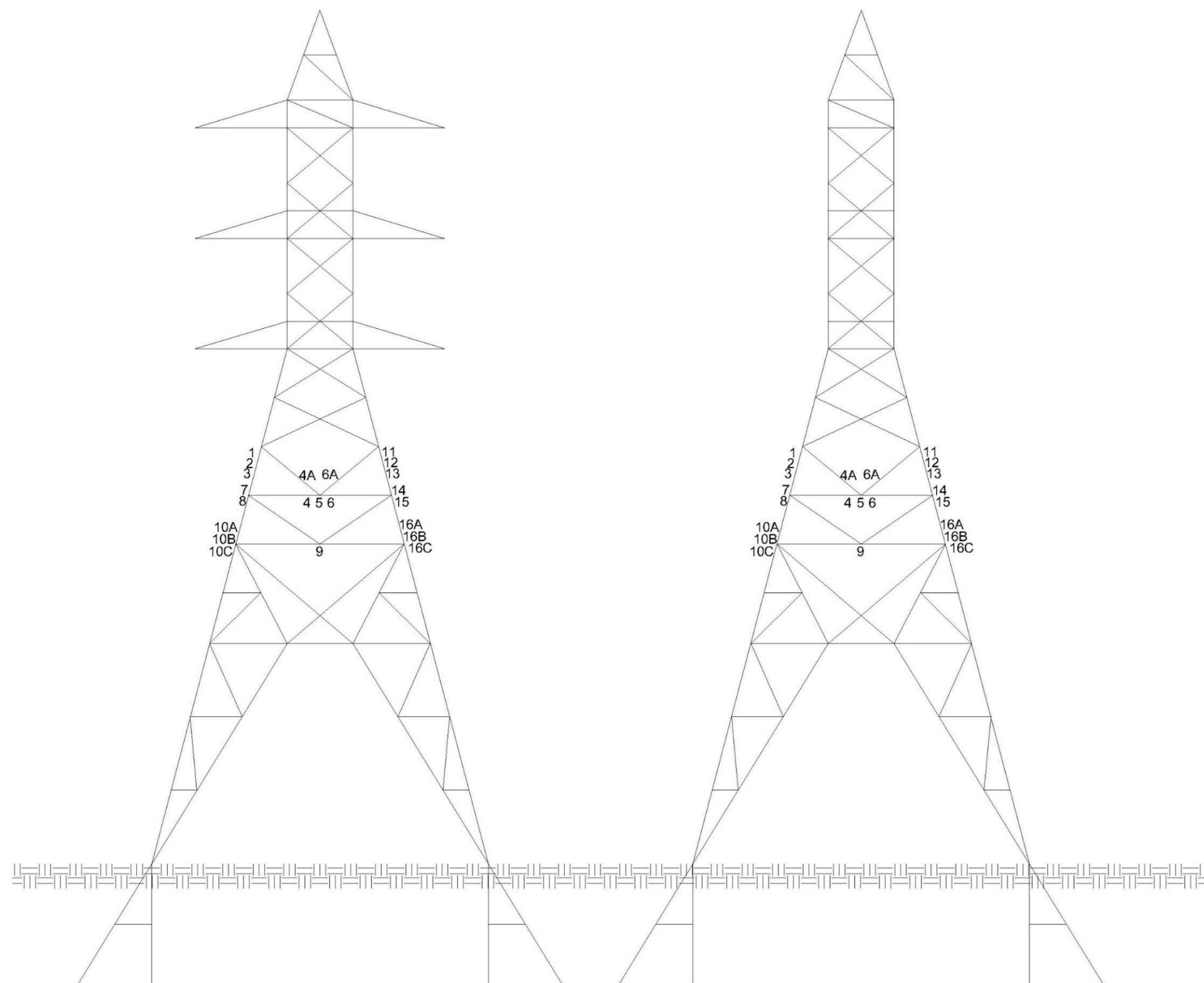
CARLOS ALEJANDRO  
ALEGRE ORDÓÑEZ

PLANO:

VISTA FRONTAL Y VISTA  
LATERAL DE TORRE.  
DENOMINACIÓN PARA  
ESTUDIO

ESCALA 1:100

02 DE 03





UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA

FACULTAD DE  
INGENIERÍA  
ESCUELA DE ESTUDIOS  
DE POSTGRADO  
MAESTRÍA EN  
INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO

MONITOREO DE ESTADO DE  
CONDICIÓN DE TORNILLERÍA  
UTILIZADA EN UNIONES DE  
ESTRUCTURAS METÁLICAS DE  
TORRES DE SOPORTE DE  
TRANSMISIÓN ELÉCTRICA

ABRIL DE 2019

CARLOS ALEJANDRO  
ALEGRE ORDÓÑEZ

PLANO:

DENOMINACIÓN DE  
PIEZAS.  
ZONAS COMPONENTES

ESCALA 1:100

03 DE 03

