


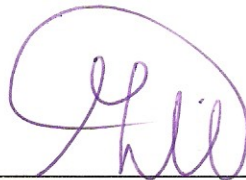
**CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE
PROYECTO DE GRADUACIÓN**

Proyecto de Graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por los profesores Ing. Gustavo Rojas Moya, Ing. Miguel Peralta Salas, Ing. Adrián Chaverri Coto, Ing. Ángel Navarro Mora, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Ing. Gustavo Rojas Moya.
Director



Ing. Miguel Peralta Salas.
Profesor Guía



Ing. Adrián Chaverri Coto.
Profesor Lector

Ing. Ángel Navarro Mora.
Profesor Observador

Evaluación estructural e integral de postes de madera de distribución eléctrica en la zona de Turrialba, a cargo de la Región Huetar Caribe del ICE

Abstract

The purpose of this document is to indicate the quantity of wood utility poles that continue in service, require maintenance or that must be replaced, based on the integral and structural evaluation of the element, on a sample from Turrialba.

To make the integral evaluation, a scoring matrix was developed, which, based on a total, results in a color classification, this tool is constructed according to the identification of agents that cause deterioration to the wood, such as they are, fungi, insects and woodpeckers; additionally, an evaluation was made by a SYLVATESTDUO ultrasound device, which measures the time it takes to pass a wave from one transducer to another.

The structural evaluation is made by the design of the element in bending, shear, compression parallel to the grain and a combination of compression and bending, calculating the last moments through the structural program SAP2000.

The results indicate that all the elements are capable of supporting the loads to which they are subjected and for Alto Varas area, 43% of the poles can continue in service, 57% must be provided with maintenance and don't have poles for immediate replacement. For the Sauce area, 40% of poles can continue in service, 18% of poles require maintenance, 2% of poles that need maintenance are close to being classified as immediate replacement, 40% of poles are rated to replace for loss of more than 75% of the elastic modulus.

Keywords: Pole, wood, electrical distribution, evaluation, structural, loads, software SAP2000.

Resumen

El desarrollo del presente documento, tiene como objetivo, indicar la cantidad de postes de madera que continúan en servicio, que requieren de mantenimiento o que deben ser reemplazados, a partir de la evaluación integral y estructural del elemento, sobre una muestra en la zona de Turrialba.

Para realizar la evaluación integral, se procedió a elaborar una matriz de puntuación, que a partir de una sumatoria de puntos, resulte una clasificación por colores, esta herramienta se construye de acuerdo con la identificación de agentes que provocan el deterioro a la madera, como lo son, los hongos, los insectos y las aves carpinteras; adicionalmente se realizó una valoración por medio de un equipo de ultrasonido SYLVATESTDUO, el cual mide el tiempo que dura en pasar una onda de un transductor a otro.

La evaluación estructural se realiza por medio del diseño del elemento en flexión, cortante, compresión paralela al grano y flexocompresión, calculando los momentos últimos por medio del programa estructural SAP2000.

Los resultados indican que todos los elementos son capaces de soportar las cargas a las cuales están sometidos y que, para la zona de Alto Varas, un 43% de los postes pueden continuar en servicio, un 57% se les debe proporcionar mantenimiento y no se presentan postes para reemplazo inmediato por alto deterioro. Para la zona del Sauce, se obtuvo un 40% de postes que pueden continuar en servicio, un 18% de los postes requieren mantenimiento, un 2% de los postes que necesitan mantenimiento están próximos a clasificarse como reemplazo inmediato, un 40% de los postes se clasifican para reemplazar por la pérdida de más del 75% del módulo elástico.

Palabras clave: Poste, madera, distribución eléctrica, evaluación, estructural, cargas, SAP2000.

Evaluación estructural e integral de postes de madera de distribución eléctrica en la zona de Turrialba, a cargo de la Región Huetar Caribe del ICE

SHERILYN NATASHA CASTILLO MÉNDEZ

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Noviembre del 2019

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

| | |
|-------------------------------------|----|
| Prefacio | 1 |
| Resumen ejecutivo..... | 2 |
| Introducción..... | 3 |
| Metodología | 5 |
| Resultados | 39 |
| Análisis de los resultados | 60 |
| Conclusiones y Recomendaciones..... | 65 |
| Apéndices | 67 |
| Anexos | 68 |
| Referencias | 69 |

Prefacio

A causa de la falta de un procedimiento para evaluar la condición de un poste de madera y considerar su debido reemplazo bajo criterio técnico, se realiza el presente proyecto para el beneficio principal del Instituto Costarricense de Electricidad.

El correcto reemplazo de los postes y no de manera anticipada, provoca una reducción económica por el proceso que conlleva la construcción de una línea de distribución nueva.

Asimismo, se mantiene la seguridad del buen funcionamiento de la línea de distribución, a los usuarios y consumidores; debido a que las inspecciones, los técnicos la realizan por medio de camiones grúa, no es usual que utilicen equipo para escalar el poste, sin embargo, si esta acción fuera necesaria, se asegura que no ocurra ningún accidente, al poste estar en malas condiciones.

El proyecto tiene como objetivo, evaluar las condiciones en las cuales se encuentra el poste a causa de los agentes que provocan su deterioro, sugerir medidas de tratamiento, verificar el cumplimiento estructural sobre las cargas que recibe el poste y determinar la cantidad de postes que continúan en servicio, aquellos que requieren mantenimiento o de lo contrario, ser reemplazados.

Al Ing. Miguel Peralta Salas MSc., como profesor guía, por brindar su conocimiento, tiempo y dedicación, para la elaboración de este proyecto.

Al Dr. Alexander Berrocal Jiménez, profesor e investigador de la Escuela de Ingeniería Forestal, por compartir su conocimiento y consejos, la paciencia y disposición, para el desarrollo técnico del área integral de la madera.

A mi familia, por ser mi apoyo incondicional.

A mis amigos, en especial a José y a Darnel, por brindarme su apoyo y paciencia durante el proceso.

Agradecimientos

Le agradezco a los profesionales del Instituto Costarricense de Electricidad, al Ing. Ángelo Vargas Hernández MSc., Ing. Claudio Paniagua, Ing. Luis Calvo, Ing. Luis Carlos Sánchez, Ing. Nelson Vega, por los aportes, el acompañamiento y la colaboración para la realización de la práctica profesional y este proyecto; a los técnicos por la asistencia y cooperación en el trabajo de inspección en campo.

Resumen ejecutivo

El presente trabajo pretende brindar una guía de evaluación de postes de madera, que asista al Instituto Costarricense de Electricidad a la decisión de conservar o reemplazar el poste, con la sugerencia de medidas de mantenimiento; de esta manera, se brinda la seguridad a las comunidades del correcto funcionamiento del soporte de las líneas de distribución, y adicionalmente, se produce un impacto en la economía, al no sustituir elementos que aún no agotan su vida útil.

A partir de la revisión de causas comunes por las que los postes sufren de deterioro, se realiza el planteamiento de una matriz de puntuación, con la que, al inspeccionar características ambientales y biológicas, se asigna un valor del uno al tres, para obtener como resultado una condición de color verde, amarillo o rojo, y de esta manera, proporcionar una solución alternativa en el proceso de toma de decisión para el correspondiente reemplazo.

Sin embargo, una inspección visual, en muchas ocasiones, no es suficiente, por lo que se aplicó una prueba no destructiva, la cual amplía la condición de deterioro, el equipo de ultrasonido SYLVATESTDUO, ya que otro tipo de ensayos no son posibles de realizar, pues el poste está en servicio, esto produce una nueva condición en los resultados de evaluación, el cual indica que debe considerarse su debido reemplazo.

Asimismo, se realiza una verificación estructural a partir de las cargas mecánicas que actúan sobre el poste, con el planteamiento de diseño para miembros estructurales que proporciona el código NDS (National Design Specification) de la institución, American Wood Council, en Estados Unidos, el Código Sísmico de Costa Rica y el uso del software SAP2000.

Los agentes más usuales que causan deterioro en el poste de madera, son los hongos, los insectos y las aves carpinteras; los hongos e insectos se propagan por la disminución de la

acción del químico protector, adicionalmente los hongos requieren de condiciones ambientales óptimas para propagarse, algunos son causantes de deterioro superficial y otros de forma interna del poste, así como los insectos que se alimentan o desarrollan su residencia en el elemento, provocando pérdida de sección transversal en ambas situaciones. Con respecto al ave carpintera, desarrolla su nido en el poste, la mayoría de las veces en la parte superior del poste, donde este es más frágil, pues las cargas actúan en los primeros metros del poste.

Con la evaluación integral de los postes, se obtuvo, para la zona de Alto Varas, un 43% de los postes pueden continuar en servicio, un 57% se les debe proporcionar mantenimiento y no se presentan postes para reemplazo inmediato por alto deterioro.

Para la zona del Sauce, se obtuvo un 40% de postes que pueden continuar en servicio, un 18% de los postes requieren mantenimiento, un 2% de los postes que necesitan mantenimiento están próximos a clasificarse como reemplazo inmediato, y un 40% de los postes se clasifican para reemplazar por la pérdida de más del 75% del módulo elástico.

Adicionalmente, los modelos cumplen con la revisión de cargas mecánicas en el diseño por flexión, cortante, compresión paralela al grano y flexo-compresión.

Con la identificación de las causas que producen el deterioro, se describen opciones para efectuar el mantenimiento a partir del agente que produce el daño, como los son el uso de fungicidas, con contenido de creosota o fluoruros, insecticidas y epóxicos para el relleno de agujeros para pájaros carpinteros.

Se recomienda que la institución diseñe un plan de mantenimiento preventivo cada 8-10 años, específicamente para la zona del país inspeccionada, los distritos La Isabel y Santa Teresita, de Turrialba, donde las condiciones de temperatura y humedad, son óptimas para el desarrollo de los agentes que provocan el daño en el elemento.

Introducción

El desarrollo de la población nacional, causa la necesidad de llevar, a cada rincón posible, energía eléctrica, por ello se ve en la necesidad de construir nuevas líneas aéreas de distribución, utilizando materiales que sean posibles de manipular por los trabajadores encargados de realizar las obras en campo, de esta manera, surge la utilización de postes de madera, elementos de menor peso, que se transportan y siembran a través de diversas zonas, desde campos rurales y montañas sin caminos definidos hasta zonas urbanas.

Con el paso de los años, la adquisición de maquinaria y tecnología, permite utilizar postes de distribución de distintos materiales, usualmente, metal y concreto, que, además, resisten mayores cargas mecánicas y requieren de menor mantenimiento.

No obstante, muchos de los postes de madera permanecen en funcionamiento en aquellas zonas, mayormente rurales, que la demanda no ha incrementado desmesuradamente.

Debido a esto, y a la necesidad de encontrar la manera técnica de tomar la decisión de si el elemento requiere de reemplazo, surge el presente proyecto. Anteriormente, la sustitución surgía de revisar el poste golpeándolo con una piedra para reconocer si el elemento se escuchaba hueco, o de lo contrario, cuando el poste se quebraba.

Por esto se realiza el planteamiento de una matriz de evaluación, con el objetivo de brindar una solución para el momento cuando se requiere tomar una decisión con el reemplazo del poste.

Aún hay muchos países en el mundo que conservan el uso de postes de madera, con un plan de mantenimiento preventivo y la compra de elementos de calidad, sin embargo, en el país no existe la suficiente información y estudios que respalden la continuación del uso de la madera

como elemento estructural y se prefieren materiales, con características más definidas y que no se ven mayormente influenciadas por las condiciones ambientales.

Adicionalmente, se realizó una verificación en el cumplimiento estructural considerando cargas mecánicas y acciones ambientales que sufre el elemento, de acuerdo con las especificaciones y valores de diseño de la literatura norteamericana, específicamente estadounidense, el cual es un país que desarrolla continuamente estudios y pruebas en diversos materiales.

Con el desarrollo de este documento, se pretende brindar una guía de evaluación de postes de madera, que asista a la decisión de conservar o reemplazar el poste, con la sugerencia de medidas de mantenimiento; de esta manera la institución ofrece a las comunidades la seguridad en el funcionamiento del soporte de las líneas de distribución, y adicionalmente, se produce un impacto en la economía, al no sustituir elementos que aún no agotaban su vida útil.

Objetivos

Objetivo general

Determinar el comportamiento estructural, las características integrales y el mantenimiento respectivo de postes de madera de distribución eléctrica del ICE en la zona de Turrialba.

Objetivos específicos

- Clasificar los postes a partir de las características de instalación de las líneas eléctricas, para reducir la cantidad de modelos computacionales por analizar.
- Identificar el estado integral de los postes mediante una inspección visual en sitio de acuerdo con factores ambientales,

- biológicos y mecánicos que afectan los postes.
- Evaluar el cumplimiento estructural bajo las cargas mecánicas en los elementos por medio de un modelo computacional.
 - Sugerir medidas de mantenimiento para los postes que continúen en servicio a partir del estado de la madera.
 - Establecer una matriz de puntuación de acuerdo con el estado de los postes para determinar el reemplazo de los elementos.

Alcances y limitaciones

El alcance del proyecto abarca, la inspección visual individual de los postes de madera seleccionados, y la determinación de los factores que provocan el deterioro del elemento, para la confección de una herramienta, la cual permita evaluar otros postes de madera.

La revisión en el cumplimiento del diseño a flexión, compresión paralela al grano, cortante y flexo-compresión del poste de madera, con cargas resultantes causadas por los conductores y el efecto de la fuerza natural que predomine. No incluye verificaciones en las propiedades del suelo donde se cimientan los postes.

Entre las limitaciones generadas en el proyecto destacan, la falta de información de la construcción de la línea eléctrica que abarca los postes evaluados, la fecha de tratamiento del preservante químico realizado al nivel del suelo de los postes después de construida, las

especificaciones de compra de los postes con la garantía de calidad.

La falta de disponibilidad de camión grúa para la inspección de la cúspide de los postes y la medición de agujeros por pájaros. El equipo de ultrasonido presentó fallos técnicos antes de terminar la medición de todos los postes de madera. La cantidad de postes por inspeccionar, al no realizar cálculos probabilísticos para trabajar con una muestra representativa, debido a que las zonas y la cantidad fueron escogidas por situarse cerca de proyectos para la renovación de líneas eléctricas.

Falta de información sobre valores teóricos de las propiedades mecánicas de la especie de la madera a través de los tres ejes, radial, tangencial y longitudinal.

El uso de valores no representativos, como la utilización del valor de la densidad de la madera al 12% de contenido de humedad, debido a que la información teórica de los radios elásticos, es calculada con este porcentaje de contenido de humedad y no se logra la conversión al valor con el porcentaje de la humedad del sitio.

Inacceso a normas técnicas, las cuales son de pago y que la universidad no tiene convenio con dichas instituciones, como la ANSI O5 y AWWA, estas son internacionales y a partir de estudios y ensayos, determinan valores teóricos y procedimientos de análisis.

No se considera en el cálculo de fuerzas resultantes, el aumento en la carga por cambios térmicos sobre los conductores, ni el cálculo de catenarias en la longitud total de los conductores. En el cálculo de la fuerza resultante, no se consideran variaciones en los ángulos hacia ambas direcciones, es decir, combinaciones entre los ángulos de desvío.

Metodología

El presente proyecto se desarrolló por medio de la modalidad de Práctica Profesional Dirigida en el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), Región Huetar Caribe, bajo la supervisión del Negocio de Distribución y Comercialización de la Subregión Cónccavas, en conjunto con el área de Mantenimiento de la Subregión Turrialba.

De acuerdo con la información actual brindada por el ICE, en el área Cónccavas-Turrialba, se tienen casi 20 000 postes de distribución eléctrica, de los cuales los postes de madera representan un 19.8% (Figura 1), dividido en 4.6% en Cónccavas (Cartago) y un 15.2% en Turrialba.

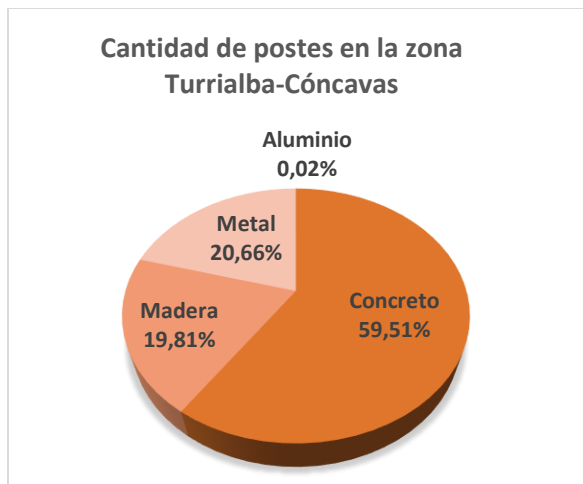


Figura 1. Gráfico cantidad porcentual de postes por material en servicio para la zona Turrialba-Cónccavas.

El Área de Mantenimiento de la Subregión Turrialba, planteó la inspección a postes de madera que pertenecen al circuito de distribución eléctrica llamado Angostura-Peralta, y seleccionó 3 zonas, El Sauce (Figura 3), Alto Varas (Figura 4) y Dulce Nombre; con un total de 100 postes divididos en cantidades de 50, 30 y 20 postes, respectivamente; lo cual representa aproximadamente un 2% de postes de madera que aún están en servicio del área Cónccavas-Turrialba.

Sin embargo, no fue posible realizar la inspección de los 100 postes planteados, debido a que el equipo de ultrasonido, para evaluar la condición interna del poste, presentó problemas técnicos antes de completar la evaluación, por esto, la zona de Dulce Nombre no se considera en lo que resta del documento.

El valor total de la muestra por inspeccionar, no fue sometida a valores probabilísticos para ser escogido, por ello no se puede considerar como una muestra representativa para el total de postes de madera de la zona Cónccavas-Turrialba.

El circuito Angostura-Peralta posee aproximadamente 600 postes de madera y esto representa un 19.9% de la totalidad de postes de madera ubicados en el cantón de Turrialba.

La zona Palomo-El Sauce representa la mayor cantidad, con un 22.8% de postes de madera, y, en cuarto lugar, Alto Varas con un 11.3% de postes de madera (Figura 2).

Es decir, los 50 postes por inspeccionar, representan un 36.5% de la zona Palomo-El Sauce y los 30 postes de madera de la zona de Alto Varas, representan un 44.1%.

Distribución de postes de madera Circuito Angostura Peralta

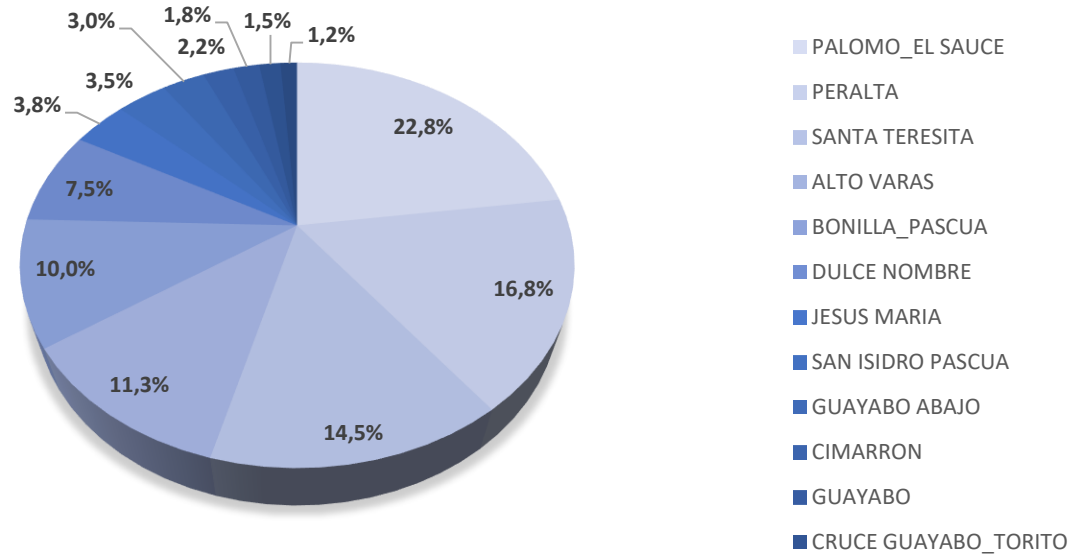


Figura 2. Gráfico cantidad porcentual de la distribución de postes en las zonas que abastece el Circuito Angostura-Peralta.

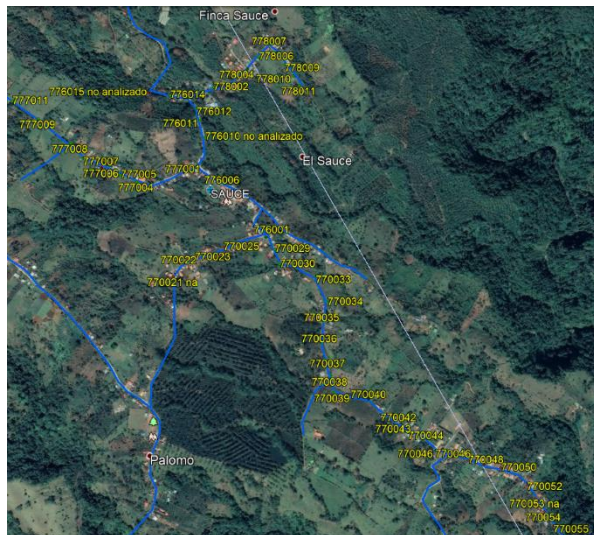


Figura 3. Recorrido planteado para la inspección de postes de madera en la zona de El Sauce.

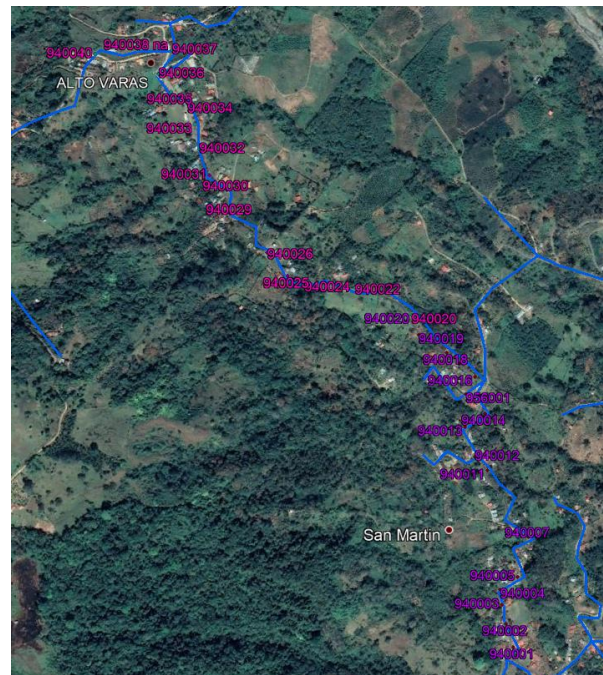


Figura 4. Recorrido planteado para la inspección de postes de madera en la zona de Alto Varas.

Descripción del sitio

La inspección de los postes de madera se llevó a cabo al norte del cantón de Turrialba, en los distritos La Isabel y Santa Teresita, específicamente, desde el centro de Turrialba, a unos 9.9 km y 27.5 km, en los pueblos Alto Varas y El Sauce respectivamente; este último limita con el cantón de Siquirres, Limón (Figuras 5 y 6).

Debido a la diferencia de altitudes en la región, existen variedad de climas, y no es posible definir estaciones por su ubicación entre el Caribe y el Valle Central, sin embargo, las lluvias se presentan constantes durante todo el año¹.

De acuerdo al Informe de Caracterización Integral Básica del territorio Turrialba-Jiménez (2014), las zonas se encuentran entre un ecosistema denominado Bosque muy húmedo Tropical (Bmh-T) y Bosque muy húmedo Premontano (Bmh-P), con un nivel de precipitación de 2400 a 4500 mm/año.

Según los datos registrados desde 1958 al 2016 de la estación meteorológica CATIE, se registra una temperatura promedio de 22°C, considerando una temperatura promedio máxima de 28°C y una mínima de 18°C; con una humedad relativa promedio de 89%.

La zona inspeccionada presenta una velocidad de diseño de viento de 80 km/h, medido a 10 m de altura sobre el terreno, de acuerdo al mapa de zonificación eólica del país, realizado por el Ing. Mauricio Patiño (2007), con un periodo de retorno de 50 años, es decir, la velocidad propuesta puede que se exceda una vez cada 50 años².

De acuerdo al mapa de órdenes de suelo de Costa Rica³, en la región se identifica el tipo de suelo Andisol, el cual es derivado de materiales volcánicos, con una coloración pardo rojizo. Debido a la presencia de altos contenidos de organominerales estables, se propicia el buen drenaje, pero a su vez, una buena retención de humedad⁴.

Adicionalmente, en el Código de Cimentaciones de Costa Rica (2009), se indica que, en la zona de Turrialba, se encuentran suelos limo arcillosos de baja resistencia, con contenidos de humedad óptimos del orden de 100%, y con posibles espesores de suelo de hasta 9 m y más,

¹ (Instituto de Desarrollo Rural de Costa Rica, 2014)

² (Castillo Barahona & Johanning Cordero, 2015)

con valores del ensayo de penetración estándar de 1 a 5 golpes.

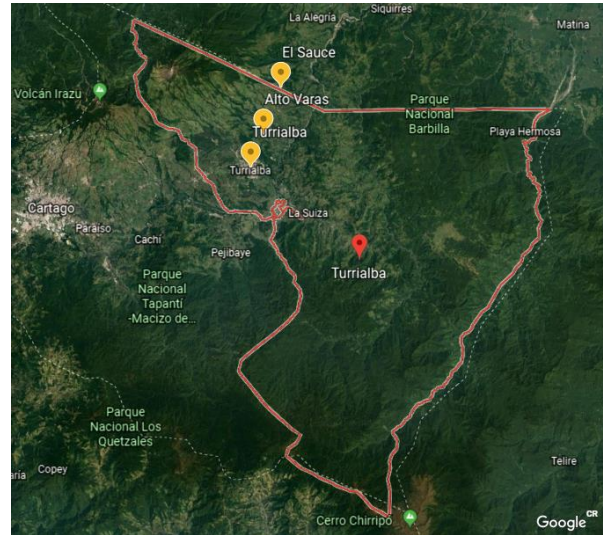


Figura 5. Ubicación de los pueblos El Sauce y Alto Varas en el cantón de Turrialba.

Fuente. Google Earth, 2019.

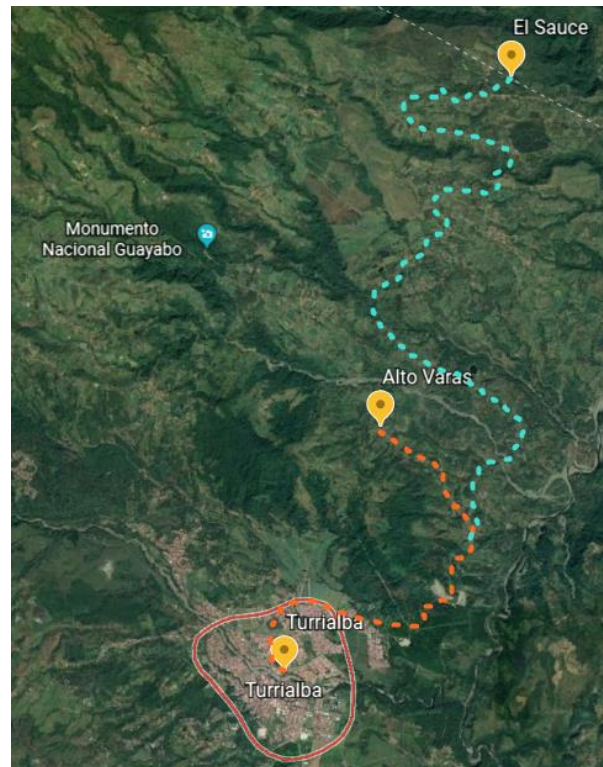


Figura 6. Ubicación de los pueblos El Sauce y Alto Varas.

Fuente. Google Earth, 2019.

³ (Centro de Investigaciones Agronómicas, 2016)

⁴ (Bertsch, Henríquez, & Mata, 1993)

Tipificación de postes

Para realizar un análisis del comportamiento estructural de la postería de distribución eléctrica, se realizó una recopilación de datos en sitio, sobre las variables que propiciarán una clasificación, para la disminución de la cantidad de elementos por analizar.

Se identificó que una posible variación entre los postes, son la cantidad de tensiones ejercidas por los cables que se ubican para brindar el servicio de disposición de energía y comunicación hacia las comunidades, y el ángulo de desvío al que los cables se direccionan de un poste a otro, ya que las líneas de distribución no se diseñan y construyen en línea recta, a causa de variantes en la topografía o por la alineación con la carretera o camino existente; pues aunque las tensiones de trabajo de los conductores no cambie, la fuerza resultante que actúa sobre el poste si se ve modificada, por ende, al aumentar el ángulo de desvío, la carga también aumenta.

Los ángulos de desvío presentes en el Manual de Normas de Construcción del ICE son de, 0°-30°, 30°-60° y 60°-90° (Figura 7), los cuales además presentan variaciones en los elementos de montaje, con los cuales funciona cada poste.

El montaje o vestido para la estructura soportante, es un conjunto de elementos, entre ellos, aisladores, pernos, tuercas, conectores, soportes, entre otros, que cumplen la función de unir la línea de distribución al poste y mantener la tensión eléctrica alejada del suelo, para que la corriente trasiegue de manera segura a donde se requiera (Figura 8).

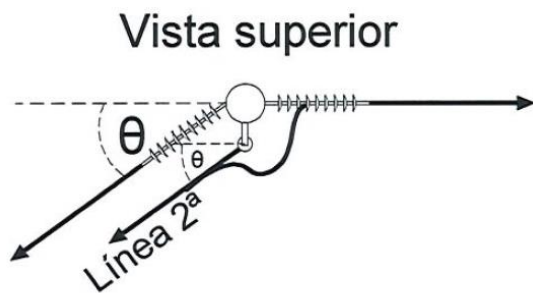


Figura 7. Vista superior del ángulo de desvío de un conductor.

Fuente. Instituto Costarricense de Electricidad, (s.f).

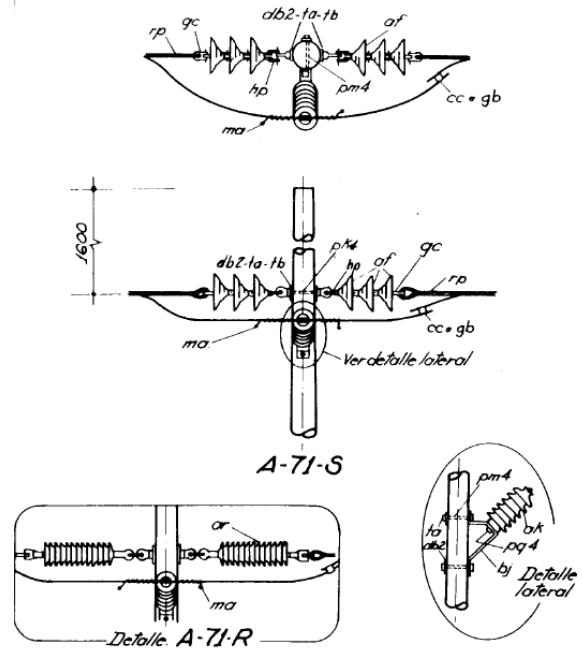


Figura 8. Ejemplo de montaje para una línea primaria monofásica para ángulos de 0°-30°.

Fuente. Instituto Costarricense de Electricidad, (s.f).

Debido a que la línea eléctrica del Circuito Angostura-Peralta tiene casi cuatro décadas, no se cuenta con el historial de diseño original, además este ha sufrido variaciones a través de los años, por ello se procedió a recopilar los datos en sitio con las visitas a cada poste, esto por medio de fotografías y la utilización de un equipo GPS, Geo Serie 7X Trimble.

Posteriormente, se utilizó el software Trimble GPS Pathfinder Office, para el postprocesamiento GNSS, el cual realiza una corrección diferencial del levantamiento de puntos por medio de estaciones de referencia, por ello se utilizaron las estaciones base de Angostura y Reventazón, debido a su proximidad con las zonas analizadas, esto corrige la posición y la elevación de los puntos para obtener resultados precisos.

A partir de la obtención de los puntos corregidos, se utiliza la aplicación de ArcGIS Desktop, ArcMap, el cual permite la exportación en forma de puntos en formato cad, lo que permite la medición de vanos y de los ángulos de cambio de dirección en el software AutoCAD (Figura 9); y en formato kmz para su visualización en Google Earth (Figura 10), por lo que fue posible observar sobre el mapa el recorrido realizado con sus respectivas altitudes.

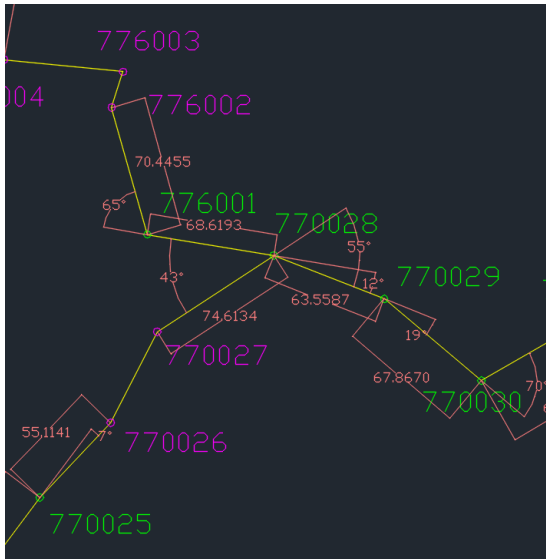


Figura 9. Ejemplo de visualización de puntos de localización de los postes de madera en AutoCAD.

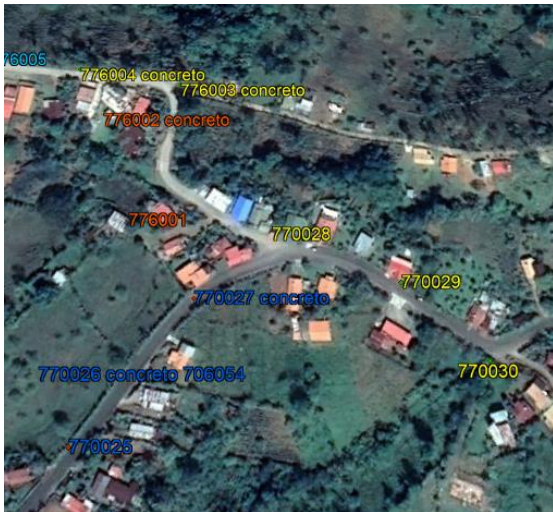


Figura 10. Ejemplo de visualización de puntos de localización de los postes de madera en el visor de Google Earth.

Con los datos recopilados, se identificó que los vanos entre postes, tienden a estar entre los 60 m y 100 m, por lo que se utilizó un vano de 100 m como longitud tributaria para obtener datos de pesos de conductores para un análisis estructural conservador.

Se consideró, en sitio, que la cantidad de conductores presentes en el elemento varía, pero la condición más crítica es cuando el poste presenta los conductores para primario (P), neutro (N), fase a (A), fase b (B), de telefonía (T) y de televisión (F) (Figura 11).

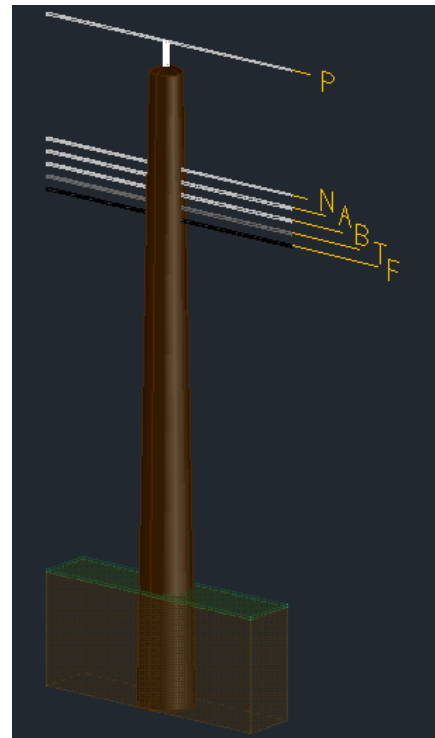


Figura 11. Condición crítica de configuración de conductores.

Para la identificación de rangos de ángulos se utilizó una letra mayúscula, C, D, E, que representan respectivamente, los ángulos de 0°-30°, 30°-60° y 60°-90°; y para referirse al poste con la cantidad total de seis conductores, ejerciendo fuerzas, se nombró Tipo 1.

Sin embargo, como más adelante se mencionará, surgieron rangos de variación de propiedades mecánicas propias de la madera que constituye el poste, lo cual produjo que las tres clasificaciones contemplaran estos datos.

Inspección del estado de la madera

Dado que la madera es un material susceptible al ataque de diversos organismos biológicos y no biológicos, requiere de una inspección de manera regular, que permita la determinación para aplicar tratamientos, los cuales preservan la condición del poste, o para considerar el reemplazo de la estructura, con el fin de asegurar el funcionamiento de la línea de distribución eléctrica.

Para la inspección de los postes, se contó con la ayuda del área de mantenimiento de la Subregión Turrialba, con un técnico y transporte para acceder a las zonas determinadas por el encargado del área, y transportar las herramientas y equipo que fueron necesarios.

La estructura del poste sufre mayor daño en dos lugares principalmente, en la cúspide, y a 15 cm sobre y de 30 cm a 60 cm por debajo, de la línea de nivel del suelo (Figura 12).



Figura 12. Identificación de la línea a nivel del suelo del poste de madera.

Si el preservante químico aplicado en las estructuras de madera, pierde el efecto preventivo, inicia el proceso de degradación por agentes destructores. El impacto de la degradación de la madera depende de las condiciones climáticas de la zona.

De los agentes biológicos que mayor daño provocan, son los hongos xilófagos que se encuentran en el aire y agua, esperando las condiciones para germinar, y los insectos xilófagos, construyendo galerías para su reproducción y obteniendo alimento. Entre las condiciones adecuadas para la reproducción de hongos son, condiciones de humedad sobre el punto de saturación de las fibras, entre 30% y 50%, y una temperatura de entre 20-30°C, por debajo de 3°C y mayor a 40°C no es posible la reproducción.⁵

Cuando los agentes destructores se desarrollan en la madera, se produce la disminución de la sección transversal, y por lo tanto la pérdida de estabilidad y rigidez del elemento.

Se observó si el poste conservaba la coloración verdosa típica del preservante de arseniato de cobre cromatado (CCA) o si de lo contrario, se podía observar el color natural de la madera, como señal de remoción de la capa superficial del químico protector en los postes.

Debido a que no fue posible revisar la cúspide a la correspondiente altura, para poder identificar si existe pérdida de sección, grietas o agujeros de carpintero (Figura 13), se intentó aproximar la presencia de agujeros por medio de unos binoculares marca Celestron.

Sin embargo, el desgaste de la cúspide (Figura 15) puede alertar sobre el reemplazo del poste, debido a que es la sección transversal más cercana donde se instalan los cables y a la vez, donde la fuerza de los cables actúa, pues no hay mantenimiento que repare el elemento. Al disminuir las dimensiones donde se instalan los pernos de conexión para los conductores, se provoca una falla y el trasiego de energía se ve afectado.

Para la inspección a nivel de la línea del suelo, se desenterró alrededor del poste, 30 cm de profundidad, por recomendación del ingeniero forestal, Dr. Alexander Berrocal (Figura 16 y 17), para observar si hay signos de degradación como, presencia de hongos o pérdida de sección en la circunferencia, es decir, la superficie del poste no es continua y de una sola textura, presenta hundimientos, huecos o faltante de material, bolsas de pudrición, o parecidos.

⁵ (Programa Chile Califica Red Manufacturera de la Madera de la Región de Maule, 2005)

En la zona desenterrada, se realizó la prueba de penetración con una cuchilla, para identificar suavidad en el área perimetral producto de la degradación, posteriormente se midió la profundidad a la que ingresó la cuchilla (Figura 18). La prueba de penetración no requiere de una herramienta con características específicas, la cuchilla solamente debe tener punta y estar afilada para incrustar la hoja de la cuchilla fácilmente.



Figura 13. Ejemplo de agujeros de pájaro carpintero en poste de madera.
Fuente. Osmose, (s.f.).



Figura 14. Pérdida de sección por pájaro carpintero.
Fuente. Toppng, 2019.



Figura 15. Ejemplo de degradación de la cúspide de poste de madera.
Fuente. RTO Insider, 2019.



Figura 16. Desentierro circunferencial.



Figura 17. Desentierro de 30 cm por debajo de la línea del nivel del suelo.



Figura 18. Perforación con cuchilla en la zona desenterrada.

Otro aspecto que se verificó, fue la existencia de grietas en la zona perimetral del poste, hasta una altura de 2 m aproximadamente desde el nivel desenterrado. Para la medición de las grietas se utilizó un vernier para las medidas de ancho y profundidad, y una cinta métrica para las medidas longitudinales.

Con la medición de las grietas, fue posible identificar la presencia de insectos dentro del elemento, lo que representa la posible formación de galerías (Figura 19). Con la inspección visual no es simple identificar el grado de destrucción que los insectos xilófagos han realizado, pero se debe considerar en la planificación de mantenimiento. Además, al desenterrar, se debe observar si hay agujeros que se identifiquen como túneles o larvas de insectos (Figura 20).

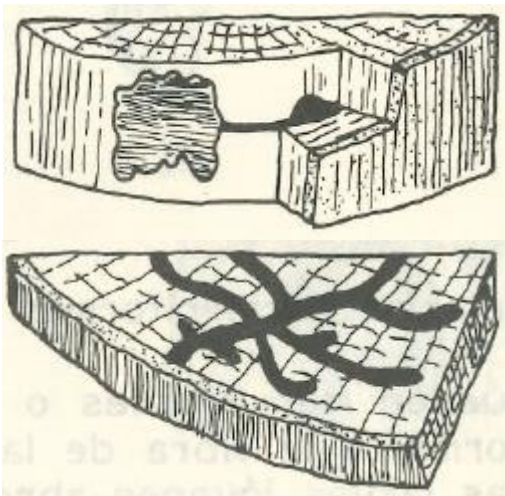


Figura 19. Ejemplo de tipos de galerías, producidas por insectos destructores de madera.

Fuente. Junta de Acuerdo de Cartagena, 1988.

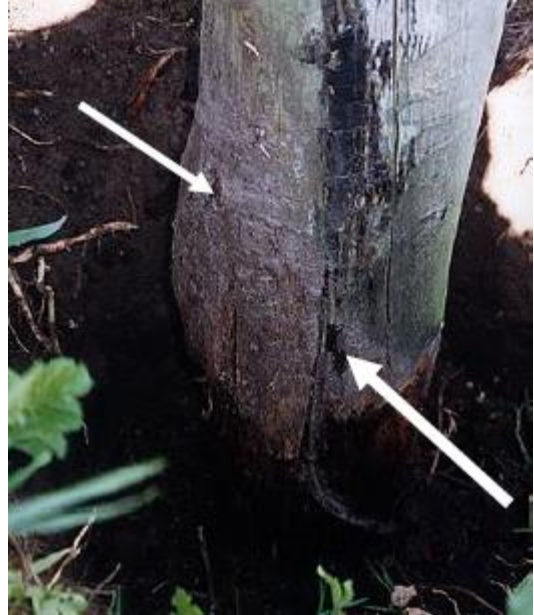


Figura 20. Agujeros de galerías internas producidas por termitas y hormigas.

Fuente. Osmose (s.f.).

Por falta de registros de compra en el ICE, se identificó si el poste conservaba la identificación, por medio de placa metálica o marcado con calor, para identificar la especie y el año de tratamiento, adicionalmente, por medio de entrevistas a los técnicos de campo con mayor estancia en la institución, se logró aproximar que los postes provenían de Honduras, Argentina y otros eran elaborados en Costa Rica, y que los postes pueden tener entre 34 a 36 años de haberse instalado.



Figura 21. Placa metálica para identificación de poste.

La identificación de un poste se puede leer de la siguiente manera, en la Figura 21, se aprecia una placa metálica que, de arriba hacia abajo, identifica la empresa de producción, en ese caso las iniciales son MCL, luego se tiene el lugar de origen, en este caso se presenta una H, que se relacionó con Honduras de acuerdo con la entrevista.

Seguidamente, se identifica el año de tratamiento, 77 (1977), lo cual refleja que el poste fue protegido hace más de 40 años. Las siglas, SP, sugieren la especie de la madera, Southern Pine (Pino Sureño) y las siglas CCA, indican el tipo de preservante usado, Arseniato de Cobre Cromatado. Por último, el número 6 indica la clase del poste y el número 35 indica la altura en pies, lo que corresponde a 10.67 m.

El número de clase en los postes de madera, es una clasificación utilizada para identificar la carga horizontal que el poste soporta (Figura 22); y a su vez, normar las dimensiones mínimas de la circunferencia de acuerdo con la altura del poste⁶.

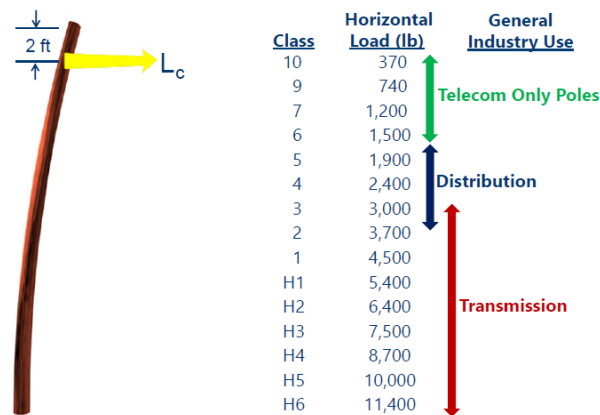


Figura 22. Ejemplo de la clasificación de acuerdo a la carga horizontal y el uso general en la industria.
Fuente. Nelson Research (s.f.).

Para evaluar la degradación interna del poste de madera, existen diversos métodos y equipos. Debido a que los postes deben continuar en servicio, se realizó una prueba no destructiva con un equipo de ultrasonido, SYLVATEST DUO (Figura 23), de origen suizo; consta de 2 cables con 2 salidas que consisten en transductores piezoeléctricos, donde uno genera la onda a una frecuencia de 22 kHz (emisor) y el otro recibe la onda transmitida (receptor) (Figura 24).



Figura 23. Equipo de ultrasonido SYLVATEST DUO.
Fuente. sciencedirect.com

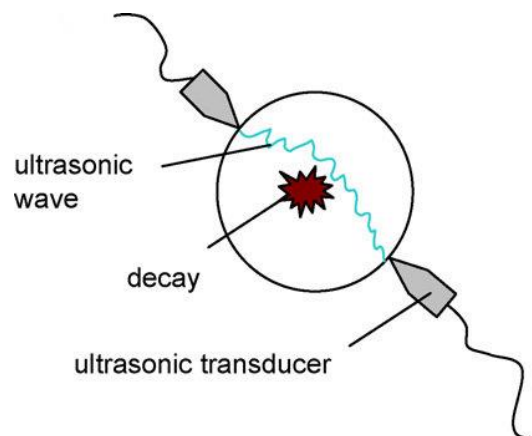


Figura 24. Funcionamiento de la onda de ultrasonido de un transductor a otro.
Fuente. researchgate.net



Figura 25. Medición con equipo de ultrasonido.

⁶ (Nelson Research)

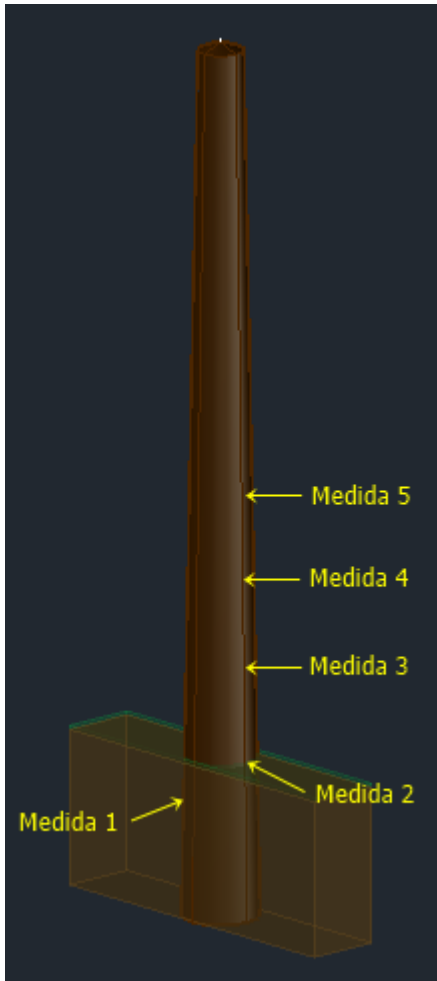


Figura 26. Puntos de medición con el equipo de ultrasonido.



Figura 27. Medición de la circunferencia del poste de madera.

Los transductores se ubican a cada lado del elemento, a una misma altura y alineados al centro (Figura 25). Debido a que el poste está en servicio, la medida se realizó en sentido radial de la sección transversal; se estableció la lectura de cinco medidas, la primera al nivel de los 30 cm desenterrados, la segunda al nivel de la línea del suelo y las siguientes a 1, 2 y 3 metros medidos desde el nivel del suelo (Figura 26).

Para la medida de 3 m, se requirió una escalera y el soporte del técnico, pues por normas de seguridad del ICE, no es posible realizar trabajos de altura sin la debida capacitación.

Con cada medida realizada, se midió la circunferencia en la sección en que se ubicaron los transductores (Figura 27), para el cálculo del diámetro a esa altura. Con el equipo se obtiene un valor en unidades de tiempo, el cual representa lo que tardó la onda en llegar de un transductor a otro.

Con el tiempo que tarda la onda de ultrasonido, es posible determinar la velocidad y el módulo de elasticidad dinámico.

$$V = \frac{d}{t * 0.000001} \quad (1)$$

$$MOE = V^2 * \rho * 10^{-6} \quad (2)$$

Donde, V es velocidad (m/s), d es el diámetro del poste en donde se realizó la medida (m), t es el tiempo obtenido del equipo (μ s), MOE es el módulo elástico dinámico (MPa) y, ρ es la densidad de la madera (kg/m^3).

Conociendo el dato teórico del módulo elástico, del tipo de madera del poste, es posible identificar si los resultados obtenidos en campo son cercanos o son menores, y hacer una relación con la degradación interna del poste.

Con los datos obtenidos de módulo elástico, se realizan gráficos de probabilidad y a estos gráficos se realizan pruebas de bondad de ajuste, las cuales se basan en la prueba de Anderson-Darling.

Esta prueba es una medida de que tan bien los datos se ajustan a una distribución

específica, utilizando el parámetro estadístico AD, dado por la ecuación 3⁷.

$$AD = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2i - 1) [\ln F(X_i) + \ln(1 - F(X_{n-i+1}))]$$

(3)

Donde, n, es el tamaño de la muestra, F(x) es la función de distribución acumulativa para la distribución específica, e, i es la i-ésima muestra, calculada cuando los datos se ordenan en orden ascendente.

Esta prueba de bondad da mayor peso a las colas del conjunto de datos en comparación con otras pruebas, como la de Kolmogorov-Smirnov; por ello es ideal para datos que pueden estar sesgados⁸.

A partir del resultado obtenido en AD, se calcula el p-value (Cuadro 1) el cual es comparado con el nivel de significancia escogido. Se utiliza un nivel de significancia de $\alpha=0.05$.

Si p-value < α , entonces se debe rechazar la hipótesis nula, esto implica que los datos no se adaptan a la distribución probabilística probada.

Por otro lado, si p-value $\geq \alpha$, entonces se acepta la hipótesis nula, lo cual significa que los datos se adaptan de mejor manera a la distribución probabilística testada.

| Cuadro 1. Cálculo de p-value con base en valor de AD | |
|--|---|
| AD statistic | p-value Formula |
| $AD \geq 0.60$ | $p = \exp(1.2937 - 5.709(AD) + 0.0186(AD)^2)$ |
| $0.34 < AD^* < 0.60$ | $p = \exp(0.9177 - 4.279(AD) - 1.38(AD)^2)$ |
| $0.20 < AD^* < 0.34$ | $p = 1 - \exp(-8.318 + 42.796(AD) - 59.938(AD)^2)$ |
| $AD \leq 0.20 < AD^* < 0.34$ | $p = 1 - \exp(-13.436 + 101.14(AD) - 223.73(AD)^2)$ |

Fuente. Glen, 2014.

⁷ (Glen, 2014)

Comportamiento estructural

Solicitaciones

Los postes son parte del sistema de suministro eléctrico que se utiliza como soporte para líneas aéreas de distribución, las cuales producen cargas laterales, debido a las fuerzas de operación de los conductores a la hora de instalarlos.

Estas fuerzas se nombran como tensiones de trabajo (T.T.), para las cuales el ICE define solicitaciones mínimas, que varían de acuerdo al tipo de conductor, su calibre y material con el que está fabricado, y la temperatura de la zona, donde se instalan.

Para el caso de este documento se utilizan las tensiones de trabajo a la temperatura registrada como promedio según la estación meteorológica CATIE, 22°C (Cuadro 2).

En resumen, las tensiones de trabajo utilizadas para los 6 conductores se presentan en el Cuadro 3.

| Cuadro 2. Tensiones de trabajo (kgf) para conductores a distintas temperaturas | | | |
|--|------------------------|--------------------------|---------------------|
| Temp. (°C) | Primario Conductor 1/0 | Secundario Conductor 1/0 | Neutro Conductor #2 |
| 18 | 240 | 275 | 175 |
| 20 | 225 | 260 | 165 |
| 22 | 210 | 245 | 155 |
| 26 | 190 | 220 | 140 |
| 30 | 165 | 195 | 120 |
| 35 | 145 | 165 | 105 |
| 40 | 125 | 145 | 90 |

Fuente. Instituto Costarricense de Electricidad, (s.f).

⁸ (iSixSigma, s.f.)

| Cuadro 3. Tensiones de trabajo (T.T.) mínimas | | | |
|--|--------------|----------|--------------------------|
| Conductores | | Cantidad | T.T. por conductor (kgf) |
| Primario | AAAC 1/0 AWG | 1 | 210 |
| Neutro | AAAC 2 AWG | 1 | 155 |
| Secundario | AAAC 1/0 AWG | 2 | 245 |
| Telefónico | 100 pares | 1 | 250 |
| Televisión | | 1 | 100 |

Fuente. Instituto Costarricense de Electricidad, (s.f).

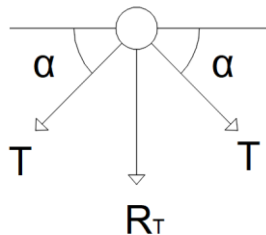


Figura 28. Diagrama de la fuerza resultante entre los conductores.

Con las tensiones de trabajo es posible calcular una fuerza resultante de acuerdo al ángulo de diseño.

$$R_T = 2 * T * \text{sen}(\alpha) \quad (4)$$

Donde, RT: fuerza resultante; T: valor de tensión de trabajo obtenido del cuadro 3; α : ángulo de desvío.

De esta manera, se obtuvieron las fuerzas resultantes por conductor, considerando el aumento que ejerce el ángulo de desvío.

Con las fuerzas que producen los cables sobre el poste, se realizó el cálculo del peso de los cables, además, el cálculo del peso de montaje sobre el poste y el peso de otros equipos que se instalan en la estructura, como, luminaria, cortacircuito, pararrayo y un transformador, para posteriormente ingresarlo al software SAP2000 como sobre carga muerta.

Se debe analizar el efecto de las fuerzas de viento y sismo, y corroborar cuál es la que predomina en el comportamiento de la estructura.

⁹ (Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo, 1983)

Para calcular el efecto perpendicular del viento, tanto sobre el poste como en los conductores, se utilizó la versión vieja del Reglamento de Construcciones de Costa Rica⁹, debido a que en la versión del 2018, no se presentan referencias para el cálculo de la fuerza del viento. En el Cuadro 4, se indican las presiones básicas para construcciones en campo abierto (tabla XX.9.2 del Reglamento de Construcciones de Costa Rica), y se interpoló entre los valores de altura de 7 m y 10 m, ya que el poste de madera tiene una altura libre de 8.87 m.

En el cálculo de la presión de viento (q_d), se establecen algunos parámetros de acuerdo con las condiciones de uso (C_{uso}), topografía (C_{top}) y forma (C_p).

$$q_d = C_{top} * C_{uso} * C_p \quad (5)$$

| Cuadro 4. Presión básica del viento (kgf/m²) de acuerdo a la altura | | |
|---|-------------------------------|---|
| Altura sobre el terreno (m) | Ciudad o rugosidad comparable | Campo abierto, frente al mar y sitios similares |
| 0 | 55 | 70 |
| 1 | 55 | 70 |
| 7 | 64 | 95 |
| 10 | 68 | 105 |
| 15 | 75 | 120 |
| 20 | 85 | 125 |
| 30 | 95 | 135 |
| 40 | 105 | 145 |
| 50 | 110 | 150 |
| 75 | 120 | 165 |
| 100 | 130 | 170 |

Fuente. Reglamento de Construcciones de Costa Rica, 1983.

Para el coeficiente de topografía (C_{top}) se toma un valor de 1,2, ya que se presentan postes en altas topografías, como cerros o bordes de carreteras de zonas montañosas.

Para el coeficiente de uso (C_{uso}), se realizó una comparación entre los valores que resultan de presión de viento, si se utiliza un grado de seguridad elevado y moderado, grupo A y B respectivamente, los cuales se establecen en el Reglamento de Construcciones⁹, sección XXII.10.4.

Para el modelo en el software SAP2000 se seleccionó el grupo A, al considerar que, en caso de una eventualidad, es necesario poseer energía eléctrica para evitar la menor cantidad de pérdidas humanas o económicas.

Para el coeficiente de forma (C_p), el Reglamento de Construcciones de Costa Rica no presenta una opción para evaluar las estructuras tipo poste o similares, por esto, se utilizó las Normas Técnicas Complementarias de la Ley de Edificaciones del Estado de Baja California de Seguridad Estructural en Materia de Diseño por Viento (2017), en la cual se presentan valores para coeficiente de ajuste por forma, que considera la variación en función de la forma de la sección transversal y de la relación de esbeltez (Cuadro 5).

La relación de esbeltez se define como la relación entre la altura libre y el lado de menor dimensión de la estructura, para el caso del poste de madera, se utilizó el diámetro de menor dimensión.

Con una altura libre del poste de 8.87 m y un diámetro menor de 0.17 m, y considerando que la superficie del poste es rugosa por ser madera, se utiliza un coeficiente de forma (C_p) de 0.9.

| Cuadro 5. Coeficientes de ajuste por forma de la estructura | | | |
|---|----------------------|-----|-----|
| Forma de la sección transversal | Relación de esbeltez | | |
| | 1 | 7 | 25 |
| Cuadrada | | | |
| Viento normal | 1.3 | 1.4 | 2.0 |
| Ángulo de incidencia 45° | 0.9 | 1.2 | 1.6 |
| Hexagonal u octogonal | 1.0 | 1.2 | 1.4 |
| Circular (superficie rugosa) | 0.7 | 0.8 | 0.9 |
| Circular (superficie lisa) | 0.5 | 0.6 | 0.7 |

Fuente. Normas Técnicas Complementarias de la Ley de Edificaciones del Estado de Baja California de Seguridad Estructural en Materia de Diseño por Viento, 2017.

$$F_v = q_d * A_i \quad (6)$$

La presión de viento se utiliza para obtener la fuerza de viento, multiplicando por el área de incidencia del viento, es decir, para los

¹⁰ (Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica, 2010)

conductores es el área longitudinal, para esto se toma una longitud tributaria, sin considerar la catenaria, de 100 m; y para el área del poste, se selecciona el área de la forma geométrica trapezoidal, debido a que esta corresponde con la proyección sobre un plano vertical.

Los valores de la fuerza de viento se consideran en el software, de acuerdo con la altura de instalación que plantea el ICE en el Manual de Normas de Construcción (Cuadro 6), para la fuerza provocada por los conductores; y la altura hasta la cúspide del poste, para la fuerza de viento que incide en la superficie del poste.

| Cuadro 6. Altura de instalación de los conductores desde el nivel del suelo | |
|---|---------------------------------|
| Conductores | Altura sobre nivel de suelo (m) |
| Primario | 8.77 |
| Neutro | 6.70 |
| Fase A | 6.50 |
| Fase B | 6.30 |
| Telefónico | 6.10 |
| Televisión | 5.90 |

Fuente. Instituto Costarricense de Electricidad, (s.f).

Las cargas producidas por el sismo se obtuvieron de acuerdo con la metodología del Código Sísmico de Costa Rica (CSCR).¹⁰ Se consideró un sitio de cimentación tipo S3, ya que las propiedades geotécnicas no se conocen con suficiente detalle; y la zonificación sísmica se establece como zona III para el cantón de Turrialba, con estos datos se obtuvo una aceleración pico efectiva de $a_{ef}=0.36$.

La selección del factor de importancia, se realizó de manera similar al coeficiente de uso del cálculo de la presión del viento. Se compararon los resultados de la fuerza sísmica si se utiliza un factor de $I=1.25$ y $I=1.00$, es decir, edificaciones e instalaciones esenciales y de ocupación normal, respectivamente. Para el modelo en el software SAP2000, se utilizaron los valores de fuera sísmica obtenidos con un factor de importancia de $I=1.25$.

El poste se clasifica como un sistema estructural tipo voladizo, es una estructura existente y se desconoce la capacidad de

disipación de energía actual, por lo que el valor para ductilidad global es igual a $\mu=1$, según el capítulo 11 del CSCR¹⁰. Para obtener el valor del factor espectral dinámico (FED), se interpoló de la tabla E.7 del CSCR¹⁰, de acuerdo al valor del periodo que se extrae del software SAP2000.

Para el valor del factor de sobrerresistencia, se define para estructuras tipo voladizo, $SR=1.2$. Con estos datos se calcula el coeficiente sísmico (C_{sism}), de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$C_{sism} = \frac{a_{ef} * I * FED}{SR} \quad (7)$$

Multiplicando el coeficiente sísmico por el peso total de la estructura, se obtiene la fuerza sísmica para el caso del poste.

$$F_{sism} = C_{sism} * W \quad (8)$$

Debido a que la cimentación, el sector enterrado del poste, no es capaz de tomar todas las acciones en algunos casos, y que la estructura, no tiene las capacidades mecánicas de resistir las tensiones por sí sola, es necesario recurrir a la instalación de una retenida, la cual tiene la función de contrarrestar las tensiones mecánicas de los conductores, se ancla al suelo y se ubica con un ángulo de acuerdo al diseño o a la distancia horizontal a la que se tenga acceso.

De acuerdo a la consulta a ingenieros del ICE, se utilizó un ángulo de 65° (Figura 30) para la posición del cable de retenida, debido a que es un ángulo usual para el anclaje, ya que cada retenida se diseña de acuerdo al ángulo de los conductores y a la ubicación del poste, además que existen diferentes tipos de retenidas de acuerdo a las circunstancias de diseño; adicionalmente, según el Manual de Normas de Construcción¹¹, para un anclaje liviano, se utilizó un cable de $3/8"$ de diámetro.

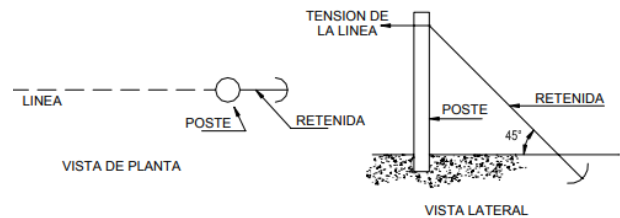


Figura 29. Ejemplo de diagrama de cable de retenida.
Fuente. Comisión Federal de Electricidad, (s.f.).

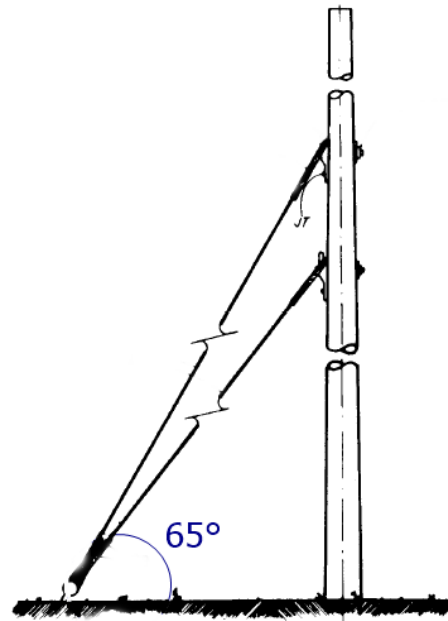


Figura 30. Ángulo utilizado para cable de retenida para primario y secundario.
Fuente. Instituto Costarricense de Electricidad, (s.f.).

Diseño

Para realizar la verificación del poste, se debe comprobar el diseño por flexión, compresión paralela, cortante y flexo-compresión. Para cada cálculo de comprobación, se requieren los valores de esfuerzos básicos (Cuadro 7), los cuales se tomaron de las especificaciones del NDS 2018¹², debido a que la madera que compone los postes, Pino Sureño (Southern Pine), no se encuentra en el libro, Madera: Diseño y Construcción.¹³

¹⁰ (Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica, 2010)

¹¹ (Instituto Costarricense de Electricidad)

¹² (American Wood Council, 2018)

¹³ (Tuk Durán, 2007)

| Cuadro 7. Esfuerzos admisibles para postes circulares según clasificación por ASTM D3200 (MPa) | | | | | | |
|--|------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------------|-----------------|------------------|
| Especie | Esfuerzo flexión | Esfuerzo cortante | Compresión perpendicular al grano | Compresión paralela al grano | Módulo elástico | |
| | F _b | F _v | F _{c⊥} | F _c | E | E _{min} |
| Pino sureño | 19.5 | 1.6 | 4.4 | 12.5 | 15000 | 600 |

Fuente. NDS, 2018.

Los factores de ajuste se aplican de acuerdo al esfuerzo básico que se necesite utilizar para diseñar, tal y como se presenta en la Figura 31.

| | ASD only | ASD and LRFD | | | | | | | LRFD only | | | |
|---------------------------------------|----------|----------------------|--------------------|----------------------------|----------------|-------------------------|-------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|------|--------------------|
| | | Load Duration Factor | Temperature Factor | Condition Treatment Factor | Size Factor | Column Stability Factor | Critical Section Factor | Bearing Area Factor | Load Sharing Factor | Formal Conversion Factor | | Time Effect Factor |
| | | | | | | | | | | K _F | φ | |
| F _c ' = F _c | x | C _D | C _t | C _{et} | - | C _P | C _{cs} | - | C _{ls} | 2.40 | 0.90 | λ |
| F _b ' = F _b | x | C _D | C _t | C _{et} | C _F | - | - | - | C _{ls} | 2.54 | 0.85 | λ |
| F _v ' = F _v | x | C _D | C _t | C _{et} | - | - | - | - | - | 2.88 | 0.75 | λ |
| F _{c⊥} ' = F _{c⊥} | x | - | C _t | C _{et} | - | - | - | C _b | - | 1.67 | 0.90 | - |
| E' = E | x | - | C _t | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| E _{min} ' = E _{min} | x | - | C _t | - | - | - | - | - | - | 1.76 | 0.85 | - |

Figura 31. Factores de ajuste para cada esfuerzo básico. Fuente. NDS, 2018.

Para la obtención de los factores se considera lo siguiente:

- Factor por contenido de humedad, C_M, cuando se ajustan los esfuerzos admisibles, se considera que, si el contenido de humedad supera el 18%, se debe multiplicar por un factor que considere la humedad, sin embargo, según el NDS (2018), para postes redondos de madera, los valores de diseño se aplican a condiciones de servicio húmedo o seco (C_M=1.0).
- Factor de temperatura, C_t, se elige de acuerdo con la temperatura de la región y a si la madera está en condiciones de servicio húmedo o seco, la temperatura tiene tres rangos, temperatura menor a

38°C, de 38°C a 52°C y de 52°C a 66°C, pero debido a que en el país no se sobrepasan los 38°C, el valor de C_t para cualquier esfuerzo básico es C_t=1, ya sea húmedo o seco.

- Factor de condición de tratamiento, C_{ct}, este valor se basa en el acondicionamiento secado al aire, si se utiliza el secado al horno o con vapor antes del tratamiento, los valores de diseño se multiplican por los valores de ajuste. Para este proyecto se supone que los postes se secaron al horno previo al tratamiento.

Cuadro 8. Factor de condición de tratamiento C_{ct}

| Secado al aire | Secado al horno | Evaporación al vacío (Boulton) | Vapor (Normal) | Vapor (Marino) |
|----------------|-----------------|--------------------------------|----------------|----------------|
| 1 | 0.9 | 0.95 | 0.8 | 0.74 |

Fuente. NDS, 2018.

- Factor de estabilidad, C_L, según el NDS (2018), en el capítulo 6, sección 6.3.6, pág. 45, los postes redondos de madera no deben ajustarse por estabilidad.
- Factor de tamaño, C_F, cuando la circunferencia del poste excede los 109.22 cm, en la sección crítica en flexión, se debe multiplicar el esfuerzo a flexión por el factor C_F. Debido a que los postes analizados no sobrepasan esta medida, C_F=1.
- Factor de estabilidad de columnas, C_p, este factor involucra la esbeltez que puede sufrir la columna

$$C_p = \frac{1 + \left(\frac{F_{CE}}{F_C^*}\right)}{2c} - \sqrt{\left[\frac{1 + \left(\frac{F_{CE}}{F_C^*}\right)}{2c}\right]^2 - \frac{\left(\frac{F_{CE}}{F_C^*}\right)}{c}} \quad (9)$$

$$F_{CE} = \frac{0.822 * E'_{min}}{(le/d)^2} \quad (10)$$

$$E'_{min} = 0.3653 * E * Ct * kf \quad (11)$$

Donde, le, longitud efectiva de la columna, es la multiplicación de la longitud libre por un factor $k_e=2.10$, k_e representa las condiciones de apoyo de la columna (Figura 32).

F_C^* , es el valor de esfuerzo básico multiplicado por los factores de ajuste, excepto C_p .

El factor c depende del uso del material, se utiliza un valor de $c=0.85$, ya que es el factor que el NDS (2018) aplica para postes circulares. Se tiene:

$c=0.80$ para madera aserrada.

$c=0.85$ para postes y pilotes de madera circular.

$c=0.90$ para madera laminada y compuesta estructural.

El factor de conversión de formato, k_f , varía de acuerdo al esfuerzo básico que se necesite utilizar para diseñar; permite realizar la conversión de esfuerzos permisibles (ASD) a esfuerzos nominales (LRFD), como se observa en la figura 31.

| Buckling modes | | | | | | |
|---|-----------------------------------|------|-----|-----|------|-----|
| Theoretical K_e value | 0.5 | 0.7 | 1.0 | 1.0 | 2.0 | 2.0 |
| Recommended design K_e when ideal conditions approximated | 0.65 | 0.80 | 1.2 | 1.0 | 2.10 | 2.4 |
| End condition code | | | | | | |
| | Rotation fixed, translation fixed | | | | | |
| | Rotation free, translation fixed | | | | | |
| | Rotation fixed, translation free | | | | | |
| | Rotation free, translation free | | | | | |

Figura 32. Factores de longitud k_e .
Fuente. NDS, 2018.

- Factor de sección crítica, C_{cs} , está basado en la fuerza de la cúspide del poste.

$$C_{CS} = 1 + 0.004 * L_c \quad (12)$$

Donde, L_c , es la longitud desde la cúspide hasta la sección crítica, este valor debe ser menor o igual a 1.10.

- Factor de área de apoyo, C_b , para apoyos menores de 6" de longitud y no mayores de 3" al final del elemento, el valor de esfuerzo admisible, se debe multiplicar por el factor dado por la siguiente ecuación

$$C_b = \frac{l_b + 0.375}{l_b} \quad (13)$$

- Factor de carga compartida, C_{is} , se debe realizar un ajuste cuando se diseña más de un poste, lo cual no es el caso para este proyecto.
- Factor de reducción de tiempo, λ , este factor considera el efecto de tiempo y varía de acuerdo con la combinación de cargas últimas que especifica el CSCR (2010).

| Cuadro 9. Valores de factor de tiempo λ | |
|---|--------------------------------|
| Combinación de carga | λ |
| 1.4 CP | 0.6 |
| 1.2 CP + 1.6 CT | 0.7 si CT es de almacenamiento |
| | 0.8 si CT es por ocupación |
| 1.05 CP + f1 CT \pm CS | 1.0 |
| 0.95 CP \pm CS | 1.0 |

Con los factores determinados se realizó el diseño a flexión, compresión paralela al grano, cortante y flexocompresión.

Para el diseño por flexión:

$$M_u = \phi_b \lambda M' \quad (14)$$

$$M' = S * F'_b \quad (15)$$

$$S = I/c \quad (16)$$

$$F'_b = F_b * C_t * C_{ct} * C_F * C_{is} \quad (17)$$

Donde; S, es el módulo de sección de la sección transversal del elemento, I, la inercia de la sección transversal y c, es la distancia desde la fibra extrema hasta el centroide.

F'b, es el esfuerzo corregido, Φ_b , es el factor de reducción LRFD, que para el caso de flexión es $\Phi_b= 0.85$ y M_u , es el momento nominal.

Para el diseño por cortante:

$$V_u = \Phi_v \lambda V_n \quad (18)$$

$$V_n = \frac{2}{3} F'_v * A \quad (19)$$

$$F'_v = F_v * C_t * C_{ct} \quad (20)$$

Donde, A, es el área transversal del elemento, Φ_v , es el factor de reducción LRFD, que para el caso de cortante es $\Phi_v= 0.75$ y V_u , es el cortante nominal. F'v, es el esfuerzo corregido, para el caso de este proyecto se utiliza el esfuerzo de compresión perpendicular al grano ($F_{c\perp}$), debido a que las cargas se aplican perpendicular al grano y se produce la compresión de las cavidades contenidas en el elemento¹⁴.

Para el diseño por compresión paralela al grano:

$$P_u = \Phi_c * \lambda * f'_{cII} * A \quad (21)$$

$$f_{cII} = f_{cII} * C_t * C_{ct} * C_{cs} * C_p * C_{ls} \quad (22)$$

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 * E' * A}{r_e^2} \quad (23)$$

$$r_e = \frac{k_e * l_e}{r} \quad (24)$$

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (25)$$

$$P_u \leq 0.90 P_{cr} \quad (26)$$

Donde, A, es el área transversal de la sección a la que se le aplica la compresión, P_u , es la compresión paralela nominal, Φ_c , es el factor de reducción LRFD, que para el caso de compresión es $\Phi_c= 0.90$, P_{cr} , es la carga crítica de Euler, r_e ,

es la relación de esbeltez, r, el radio de giro, e, I, el momento de inercia de la figura transversal.

Para el diseño por flexocompresión monoaxial:

$$\left(\frac{P_u}{P_n}\right)^2 + \frac{1}{1 - \frac{P_u}{P_E}} \left(\frac{M_u}{M_n}\right) \leq 1.0 \quad (27)$$

$$P_E = A_n * F_{cE} \quad (28)$$

Donde, F_{cE} , es el esfuerzo crítico de Euler Ec. 6, A_n , es el área bruta de la sección. El resultado debe dar menor a uno para que no se exceda la capacidad máxima del elemento.

Modelación en SAP2000

Para la obtención de los esfuerzos internos en la estructura, se utilizó el software SAP2000 versión 21, en donde se definen las características mecánicas del material, la sección del poste, las cargas calculadas de acuerdo con lo planteado en las solicitaciones y las combinaciones de carga que se definen en el Código Sísmico de Costa Rica.

La madera se define como un material ortotrópico, es decir, las propiedades mecánicas son independientes en las 3 direcciones de los ejes, longitudinal, radial y tangencial (Figura 33). El eje longitudinal (L) es paralelo al grano, el eje radial (R) es normal a los anillos de crecimiento (perpendicular al grano en la dirección radial), y el eje tangencial (T) es perpendicular al grano, pero tangente a los anillos de crecimiento¹⁵.

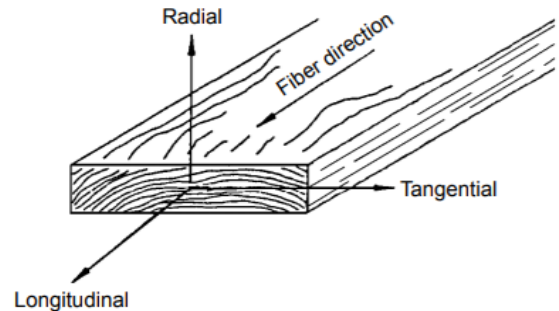


Figura 33. Los tres ejes principales de la madera con respecto a la dirección del grano y anillos de crecimiento.
Fuente. Forest Products Laboratory, 2010.

¹⁴ (Curbelo)

¹⁵ (Forest Products Laboratory, 2010)

Los valores para los ejes radial y tangencial no son comunes, y más aún, cuando se busca para una especie determinada, debido a que el valor más utilizado es en sentido longitudinal, obtenido por pruebas de flexión.

La especie que se identificó en sitio y se utiliza para todos los postes es el llamado comúnmente, Pino Sureño (Southern Pine), esta especie está conformada por un grupo de cuatro tipos de pinos, Loblolly Pine (*Pinus taeda*), Longleaf Pine (*Pinus palustris*), Shortleaf Pine (*Pinus echinata*) y Slash Pine (*Pinus elliotii*).

Para la obtención de los datos mecánicos para cada eje, se utilizó valores de radios elásticos (Cuadro 10) y coeficientes de Poisson (Cuadro 11) del libro, Wood Handbook – Wood as an Engineering Material¹⁶, en donde se relacionan los valores por medio de datos adimensionales, de acuerdo con estudios y pruebas de laboratorio, adicionalmente, se utilizaron los valores de gravedad específica de la misma fuente (Cuadro 12).

Debido a que el Pino Sureño no tiene un único valor para las propiedades mecánicas, se seleccionó los valores menores, que corresponden al Pino Slash, si bien no todos los valores son menores, comparando con los otros tipos de pinos (Loblolly y Longleaf), si representa la mayoría; en el caso de la gravedad específica se utilizó el mayor valor, 0.59, ya que las propiedades mecánicas están dadas al 12% de contenido de humedad; esto proporciona un diseño conservador.

El valor de densidad se obtiene de la tabla 4-6a¹⁷ del libro Wood Handbook¹⁶, está relaciona la gravedad específica y el contenido de humedad, en el Cuadro 13, se representa un extracto de la información, para obtener la densidad se realizó una interpolación.

A causa de que los radios elásticos sólo se indican a un contenido de humedad del 12%, la densidad se calcula al mismo contenido de humedad, sin embargo, el contenido de humedad de la madera de los postes no fue medida en sitio.

Con la tabla 4-2¹⁸ del libro Wood Handbook¹⁶, es posible obtener el contenido de humedad de la madera, de acuerdo con la humedad relativa del aire y la temperatura, en el Cuadro 14, se tiene un extracto de la información,

si se consideran los valores ambientales promedio de temperatura y humedad relativa, 22°C y 89%, respectivamente, es posible obtener una aproximación del contenido de humedad de la madera en sitio.

| Cuadro 10. Radios elásticos para el grupo de Pino Sureño al 12% CH¹⁹ | | | | | |
|--|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Pino | E _T /E _L | E _R /E _L | G _{LR} /E _L | G _{LT} /E _L | G _{RT} /E _L |
| Loblolly | 0.078 | 0.113 | 0.082 | 0.081 | 0.013 |
| Longleaf | 0.068 | 0.102 | 0.071 | 0.046 | 0.005 |
| Slash | 0.045 | 0.074 | 0.055 | 0.053 | 0.010 |

Fuente. Forest Products Laboratory, 2010.

| Cuadro 11. Coeficientes de Poisson para el grupo de Pino Sureño al 12% CH²⁰ | | | |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|
| Pino | μ _{LR} | μ _{LT} | μ _{RT} |
| Loblolly | 0.3280 | 0.2920 | 0.3820 |
| Longleaf | 0.3160 | 0.3470 | 0.4690 |
| Slash | 0.3920 | 0.4440 | 0.4470 |

Fuente. Forest Products Laboratory, 2010.

| Cuadro 12. Gravedad específica a distinto contenido de humedad para el grupo de Pino Sureño | | |
|--|---------------------------|--------|
| Pino | Contenido de humedad (CH) | |
| | Verde | 12% CH |
| Loblolly | 0.47 | 0.51 |
| Longleaf | 0.54 | 0.59 |
| Shortleaf | 0.47 | 0.51 |
| Slash | 0.54 | 0.59 |

Fuente. Forest Products Laboratory, 2010.

¹⁶ (Forest Products Laboratory, 2010)

¹⁷ Anexo 2

¹⁸ Anexo 1

¹⁹ Anexo 3

²⁰ Anexo 4

| Cuadro 13. Densidad de la madera en función de la gravedad específica y el contenido de humedad (kg/m ³) | | |
|--|---------------------|------|
| Contenido de humedad de la madera (%) | Gravedad específica | |
| | 0.58 | 0.60 |
| 12 | 650 | 672 |
| 16 | 673 | 696 |
| 20 | 696 | 720 |
| 24 | 719 | 744 |

Fuente. Forest Products Laboratory, 2010.

| Cuadro 14. Contenido de humedad de la madera en equilibrio en relación con la temperatura y la humedad relativa (%) | | | |
|---|----------------------|------|------|
| Temperatura (°C) | Humedad relativa (%) | | |
| | 80 | 85 | 90 |
| 15.6 | 16.2 | 18.2 | 20.7 |
| 21.1 | 16.0 | 17.9 | 20.5 |
| 26.7 | 15.7 | 17.7 | 20.2 |
| 32.2 | 15.4 | 17.3 | 19.8 |

Fuente. Forest Products Laboratory, 2010.

Los valores promedio del módulo de elasticidad, obtenidos de pruebas de flexión, incluyen un efecto de desviación de corte. Para eliminar este efecto, el módulo de elasticidad del eje longitudinal (E_L) se aumenta un 10%²¹. Con el E_L ajustado, se determinaron los módulos de elasticidad y los módulos de rigidez de los 3 ejes principales, utilizando los radios elásticos (Cuadro 10), que para el presente proyecto se consideraron como los valores teóricos. A partir de los valores teóricos, fue posible realizar una comparación con los valores obtenidos por medio del ultrasonido y los radios elásticos.

El módulo de elasticidad (E), es un parámetro que relaciona el aumento de esfuerzo que se le aplica a un material y el incremento de la deformación producida por la fuerza, por ello describe la rigidez de un material, entre mayor sea el módulo, mayor resistencia a la deformación²².

El módulo de rigidez (G), indica la resistencia a la deformación de un elemento debido a un esfuerzo de corte²².

El coeficiente de Poisson (μ), indica la capacidad de relación entre las deformaciones perpendiculares y en dirección de la fuerza aplicada²².

Con la información de las propiedades mecánicas para el Pino Sureño, se procedió a definir el material en el software SAP2000.

En la barra de herramientas principal, en "Definir", de primero en la lista de selección se encuentra "Materiales"; se ingresó un material nuevo y se definió como ortotrópico (Figura 34 y 35).

Se ingresaron los valores de las propiedades mecánicas (Figura 37) para 3 modelos distintos, un modelo considera las propiedades mecánicas teóricas y 2 modelos corresponden a valores experimentales para la zona de El Sauce, con rangos de valores de módulo elástico radial de 100-300 MPa y 300-600 MPa; a cada modelo se le realizaron los cambios de las cargas de los conductores para los 3 tipos de ángulos de desvío.

El valor de densidad (weight per unit volumen) se obtuvo de la interpolación del Cuadro 13, y el valor denominado "Mass per unit volumen", es el resultado de multiplicar la densidad por la aceleración de la gravedad (9.81 m/s²) (Figura 36).

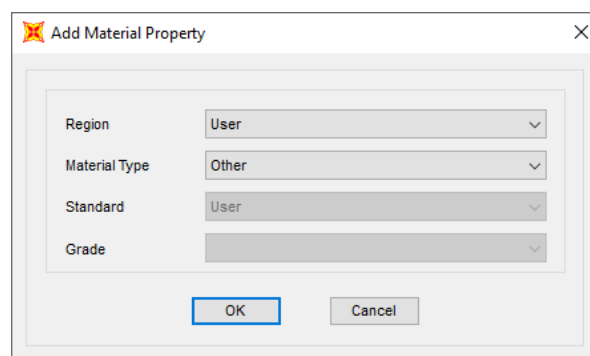


Figura 34. Ventana Añadir Propiedades del Material, software SAP2000.

²¹ Anexo 3

²² (Forest Products Laboratory, 2010)

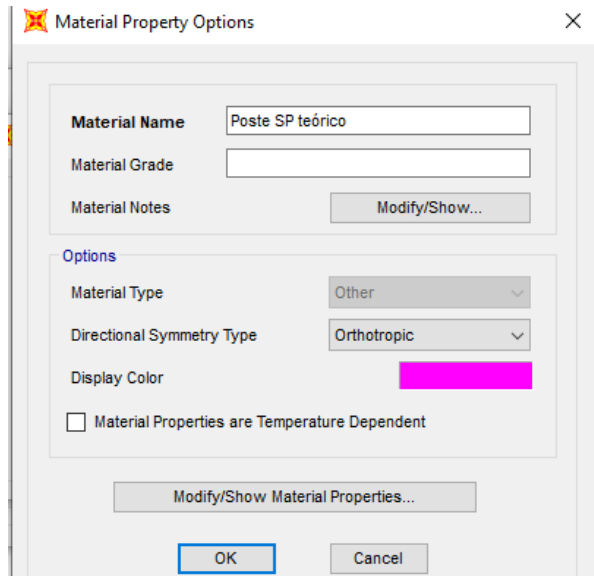


Figura 35. Ventana de elección de Opciones de Propiedades del Material, software SAP2000.

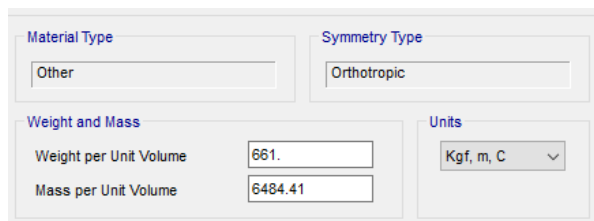


Figura 36. Ventana de Modificación en las Propiedades del Material, software SAP2000.

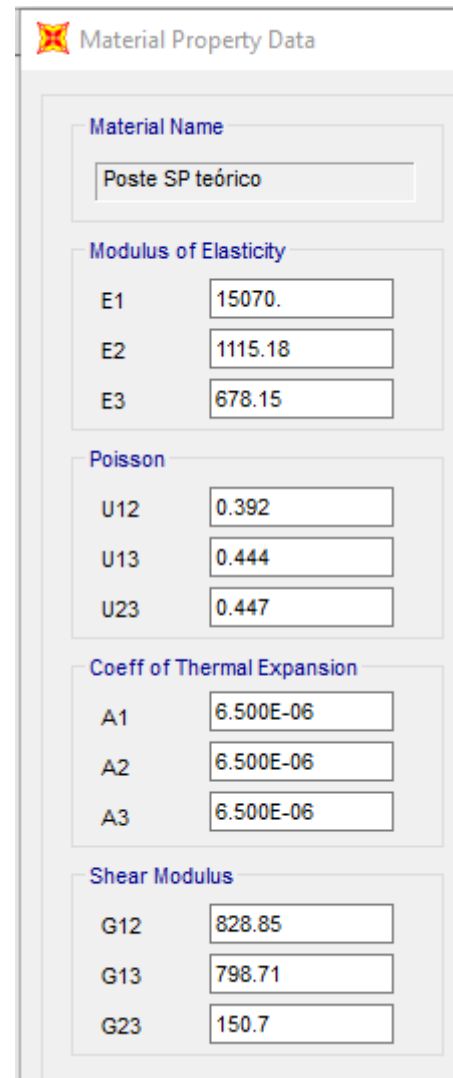


Figura 37. Ventana de Modificación en las Propiedades del Material, software SAP2000.

Para definir la sección, no se cuenta con dimensiones del proveedor de los postes, por lo que se seleccionó las menores dimensiones de circunferencia medidas en las visitas al sitio, para realizar un modelo conservador.

Las medidas de las circunferencias no fueron hechas al total de la longitud del poste, sin embargo, de acuerdo con consultas al personal del ICE, se considera el cambio de circunferencia 1 cm por cada metro de longitud.

Con las circunferencias se calcularon los diámetros por medio de la ecuación 29; el diámetro menor, en la cúspide, es de 0.17 m, y el diámetro en la zona a nivel del suelo es de 0.21 m, con una altura libre de 8.87 m y una longitud enterrada de

1.8 m según el Manual de Normas de Construcción²³, sin embargo la longitud enterrada no se consideró en el modelo.

$$d = \frac{c}{\pi} \quad (29)$$

En la barra de herramientas principal, en “Definir”, en la opción “Propiedades de Sección”, se despliega una lista de opciones, se selecciona “Secciones de marco” y se agrega una nueva propiedad (Figura 38).

Con el material de la madera definido, se elige en cualquier menú, una sección circular sólida (Figura 39). Cada sección se identificó con un nombre que designa las características para cada modelo, se dividió el poste en partes (9 partes), por recomendación del Ing. Miguel Peralta, con los diámetros: 0.17 m, 0.18 m, 0.19 m, 0.20 m, 0.21 m y 0.22 m; y en la parte inferior se selecciona la configuración del material (Figura 40).

Dividir la estructura total en partes más pequeñas, permite garantizar una aproximación más precisa al Método de Elementos Finitos (FEM por sus siglas en inglés).

El método se basa en transformar un cuerpo continuo en un modelo discreto aproximado; esto sucede en el interior del modelo del cuerpo aproximado, se obtiene mediante la interpolación de los valores conocidos en los nodos²⁴.

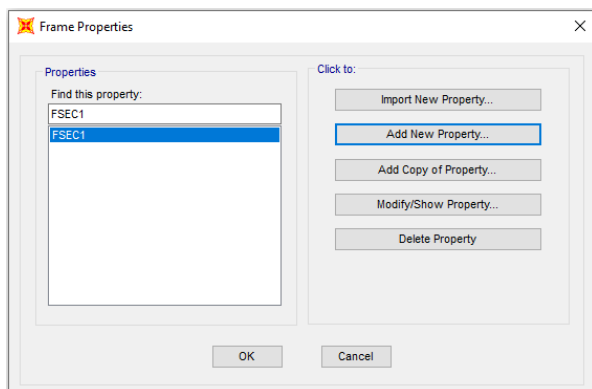


Figura 38. Ventana Añadir Propiedades de Marco, software SAP2000.

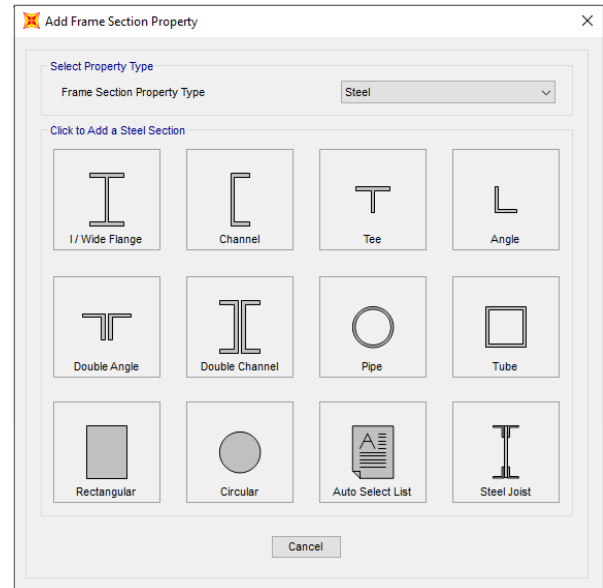


Figura 39. Ventana de elección de Opciones de Sección de Marco, software SAP2000.

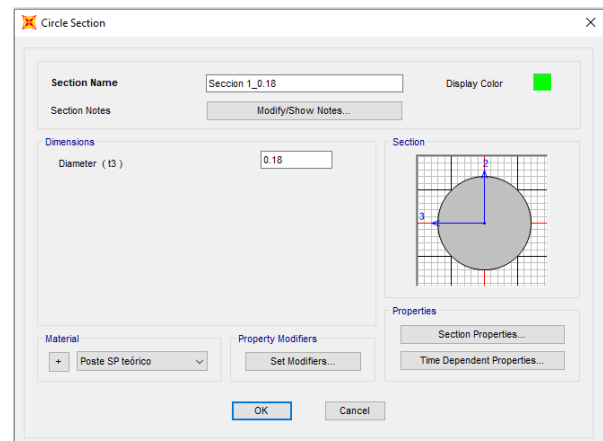


Figura 40. Ventana de Modificación en las Propiedades de la sección transversal, software SAP2000.

²³ (Instituto Costarricense de Electricidad)

²⁴ (Frias Valero, 2004)

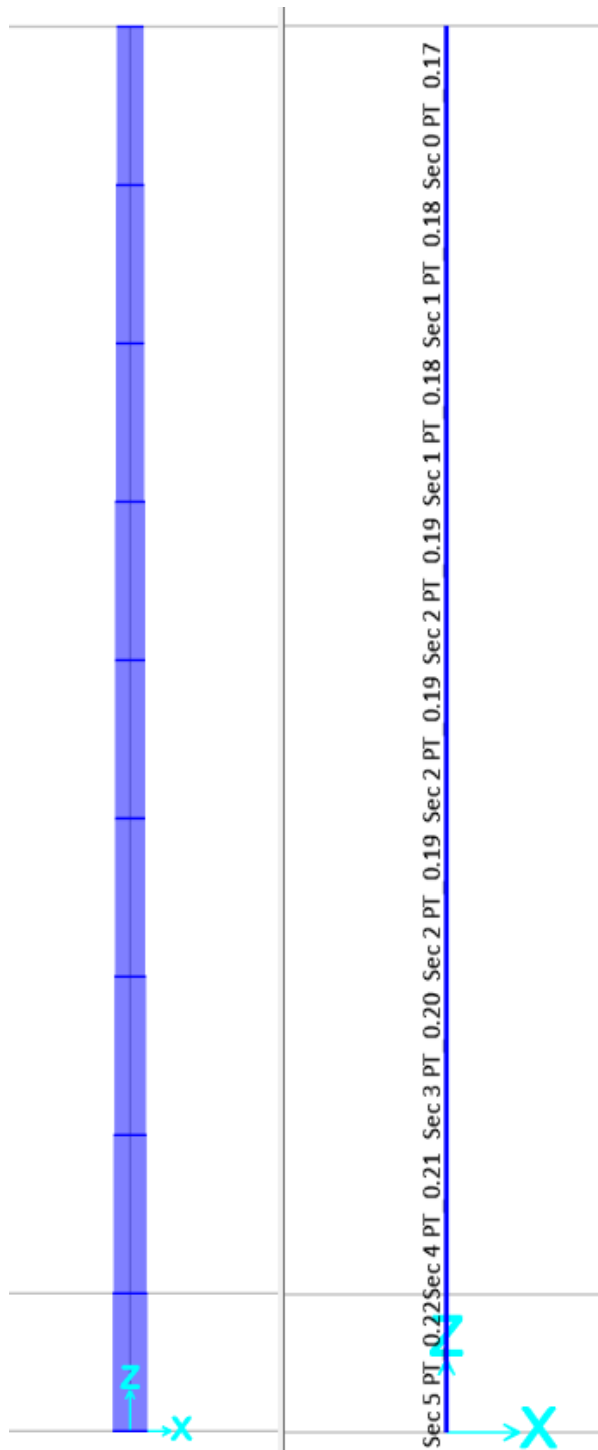


Figura 41. Vista de las secciones en el elemento, Software SAP2000.

Para modelar el cable de retenida, se utiliza el elemento "Link", en la barra de herramientas principal, en "Dibujar", en la opción "Dibuja Link de 2 articulaciones".

Para crear los puntos seleccionados para el elemento Link, se calculó la distancia horizontal en el eje x, para un ángulo de 65°, y la distancia vertical en el eje z, se utilizó un valor de 8.77 m, distancia a la que se coloca el conductor primario.

Para definir las propiedades del elemento de retenida, en la barra de herramientas principal, en "Asignar", en la opción "Link/Support", se despliega una lista de opciones, se selecciona "Propiedades para Link/Support", y se añade una nueva propiedad (Figura 42).

Se utilizó la opción de link tipo "Hook", y en la sección de propiedades direccionales, se modificó el valor de rigidez efectiva, de acuerdo a la ecuación 30.

$$k = \frac{A \cdot E}{L} \quad (30)$$

Donde, k, es el valor de rigidez axial, A es el área de la sección transversal, E es el módulo de elasticidad y L es la longitud del elemento.

Para calcular la sección transversal, de acuerdo al Manual de Normas de Construcción del ICE, se utiliza un cable de acero galvanizado de 3/8" (diámetro de 0.9525 cm). El módulo elástico del acero es 2 100 000 kg/cm² y la longitud, se obtuvo por medio de Pitágoras, o en su defecto, SAP2000 provee el valor.

Se realizó un elemento "Link" que represente el cable de retenida para el conductor primario (Figura 43 y 44) y otro para el secundario (Figura 45 y 46).

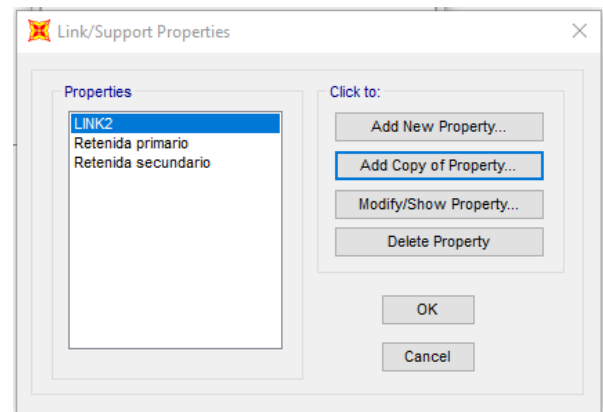


Figura 42. Ventana Añadir Propiedades de Link, software SAP2000.

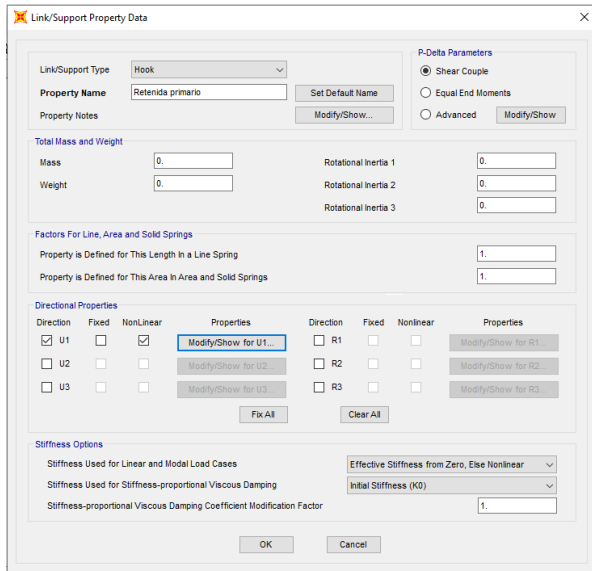


Figura 43. Ventana de Modificación en las Propiedades del Link, Retenida primario, software SAP2000.

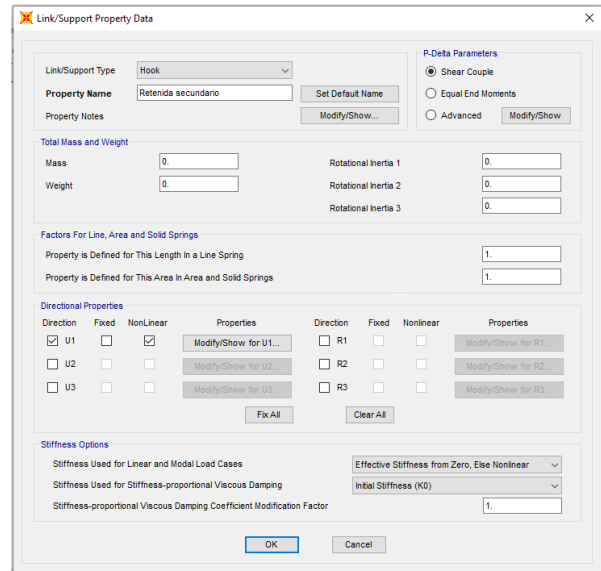


Figura 45. Ventana de Modificación en las Propiedades del Link, Retenida secundario, software SAP2000.

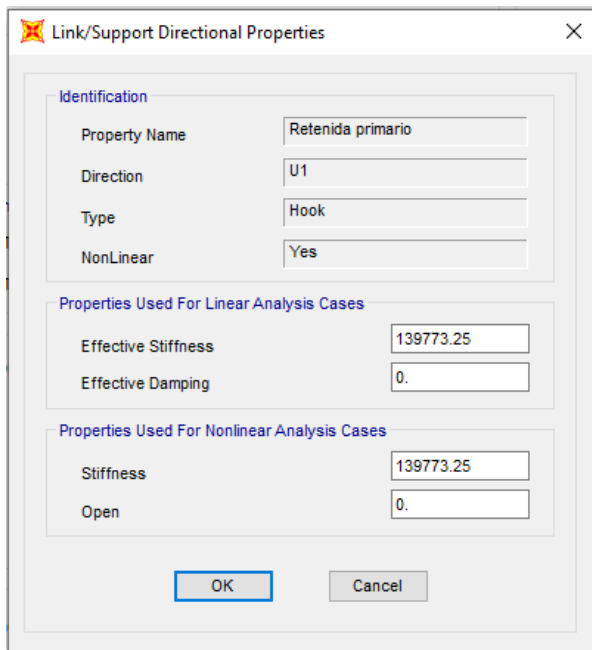


Figura 44. Ventana de Modificación en las Propiedades Direccionales, Retenida primario, software SAP2000.

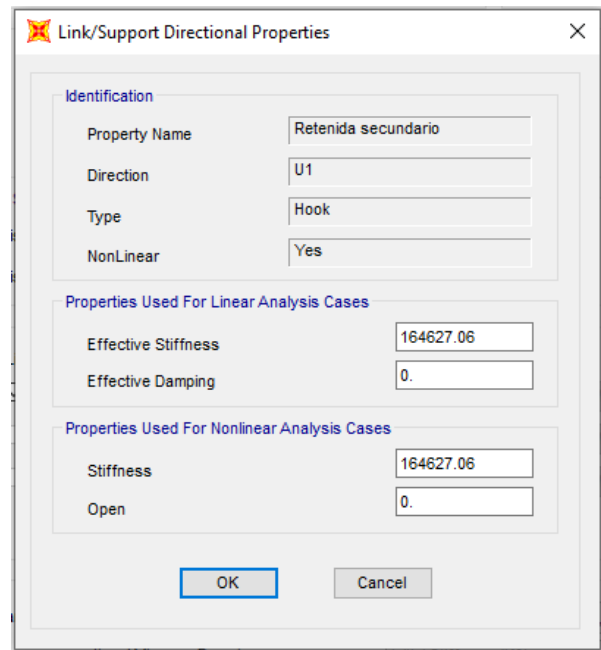


Figura 46. Ventana de Modificación en las Propiedades Direccionales, Retenida secundario, software SAP2000.

Los apoyos se definen en la barra de herramientas principal, en "Asignar", en la opción "Apoyos", se despliega una lista de opciones, se selecciona "Restricciones" (Figura 47). Se seleccionó un apoyo tipo empotrado para el poste y un apoyo tipo articulado para el cable de retenida (Figura 48).

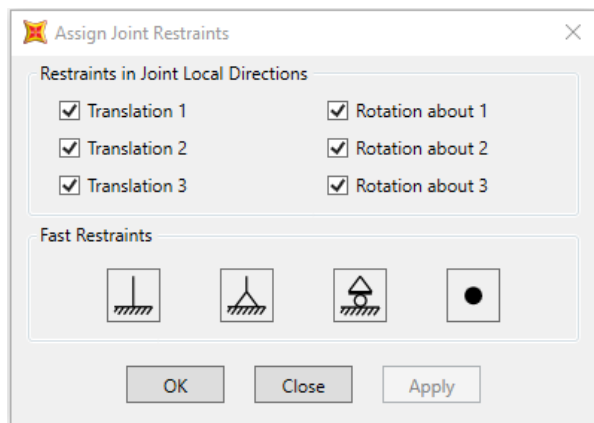


Figura 47. Ventana de Selección de Restricciones, software SAP2000.

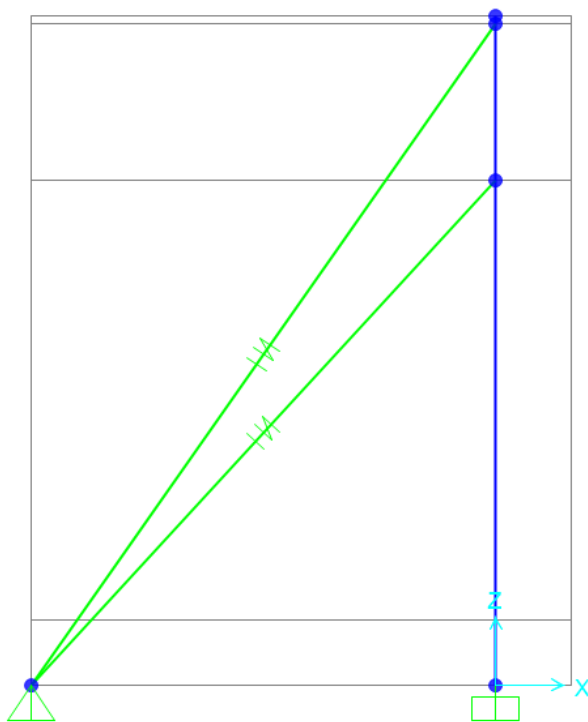


Figura 48. Modelo de poste y cable de retenida, software SAP2000.

Los tipos de cargas se definen en la barra de herramientas principal, en “Definir”, en la opción “Load Patterns”; se crearon las cargas por viento (CV), sismo (CS), la carga viva (CT) que corresponde al peso de un operario, y las cargas permanentes: fuerza por conductores (SCM_conductores), peso de los conductores (SCM_peso_conduct) y peso de equipos (SCM_equipo) (Figura 49).

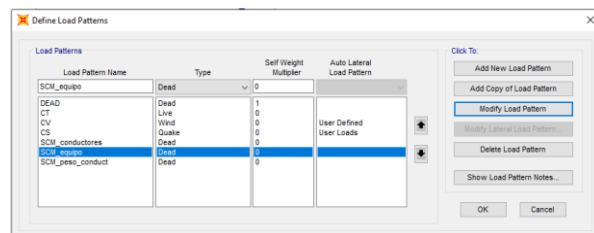


Figura 49. Ventana de Definición de Load Patterns, software SAP2000.

Las combinaciones de carga para obtener la carga última de diseño, están definidas en el Código Sísmico de Costa Rica (2010), a partir del método de Diseño por Factor de Carga y Resistencia, LRFD (por sus siglas en inglés).

$$CU1 = 1.4 CP \quad (31)$$

$$CU2 = 1.2 CP + 1.6 CT \quad (32)$$

$$CU3+ = 1.05 CP + f_1 CT + CS \quad (33)$$

$$CU3- = 1.05 CP + f_1 CT - CS \quad (34)$$

$$CU4+ = 0.95 CP + CS \quad (35)$$

$$CU4- = 0.95 CP - CS \quad (36)$$

$$CU5+ = 1.05 CP + f_1 CT + CV \quad (37)$$

$$CU5- = 1.05 CP + f_1 CT - CV \quad (38)$$

$$CU6+ = 0.95 CP + CV \quad (39)$$

$$CU6- = 0.95 CP - CV \quad (40)$$

Donde, CU es la carga última de diseño, la cual se enumeró en el software SAP2000 y el signo indica si la carga ambiental está positiva o negativa, es decir, representa la dirección de la carga. CP es la carga permanente, que representa la sobre carga muerta; CT es la carga temporal, CS es la carga sísmica; CV es la carga del viento, y $f_1 = 0.5$ debido a que la estructura tiene baja probabilidad de ocupación plena de carga temporal a la hora del sismo.

En el software, las combinaciones de carga se definen, en la barra de herramientas principal, en “Definir”, en la opción “Load Combinations” (Figura 50). Se añadieron las 10 combinaciones, definiendo en cada una el factor de mayorización de las cargas (Figuras 51 a 60).

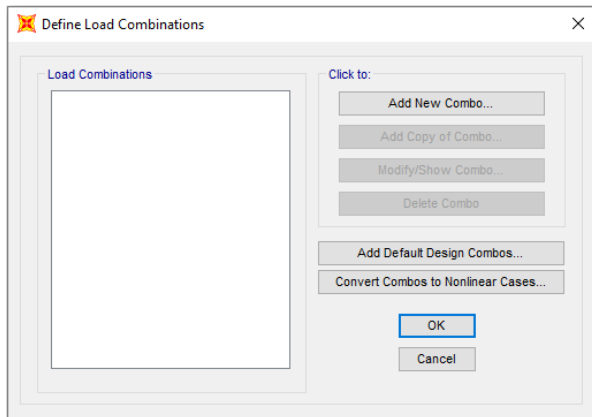


Figura 50. Ventana Añadir Combinaciones de Carga, software SAP2000.

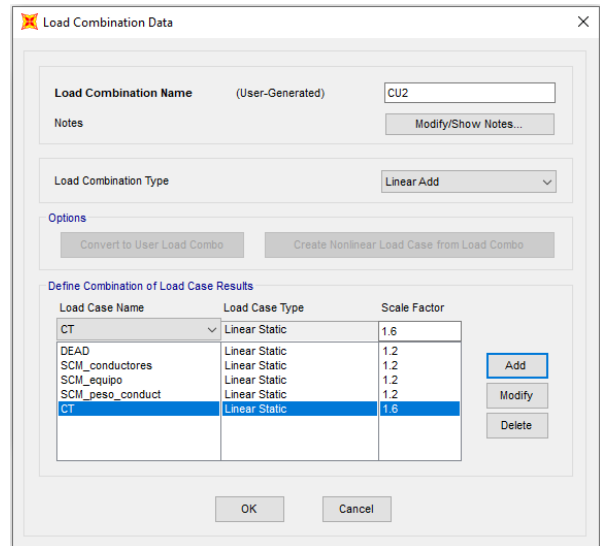


Figura 52. Ventana Definición de Combinaciones de Carga, Combinación Última 2, software SAP2000.

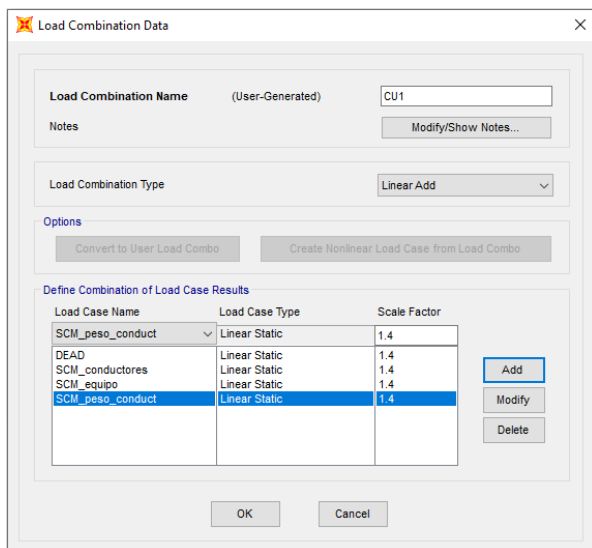


Figura 51. Ventana Definición de Combinaciones de Carga, Combinación Última 1, software SAP2000.

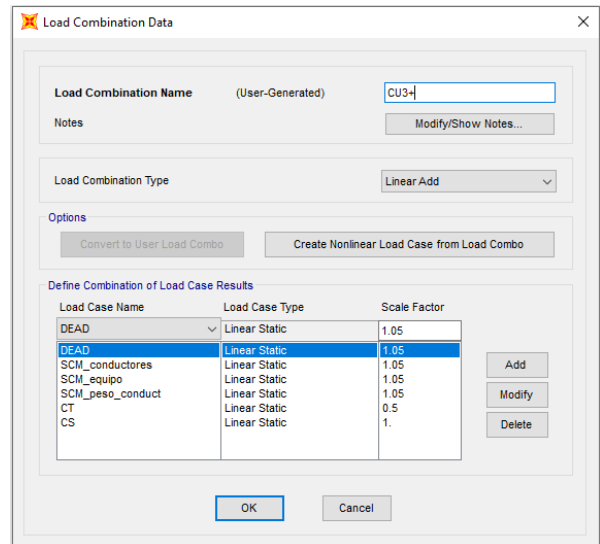


Figura 53. Ventana Definición de Combinaciones de Carga, Combinación Última 3 positiva, software SAP2000.

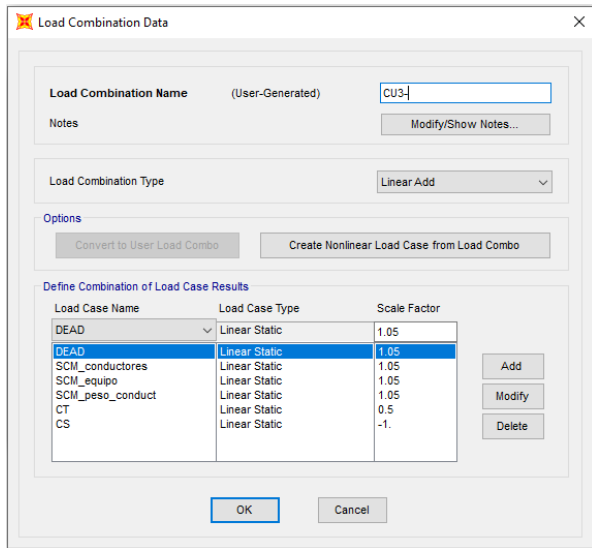


Figura 54. Ventana Definición de Combinaciones de Carga, Combinación Última 3 negativa, software SAP2000.

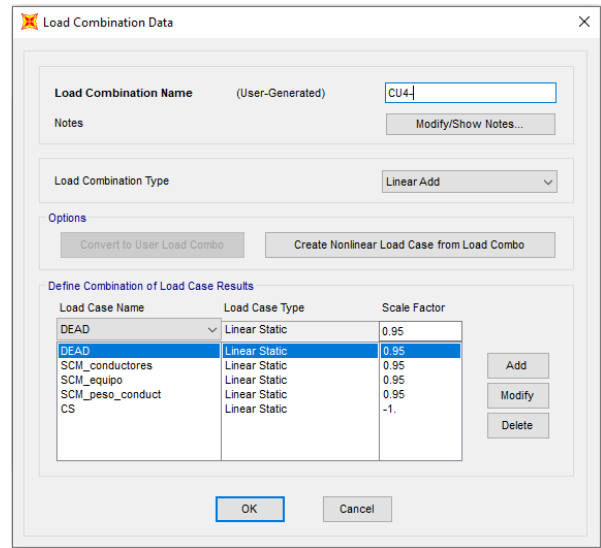


Figura 56. Ventana Definición de Combinaciones de Carga, Combinación Última 4 negativa, software SAP2000.

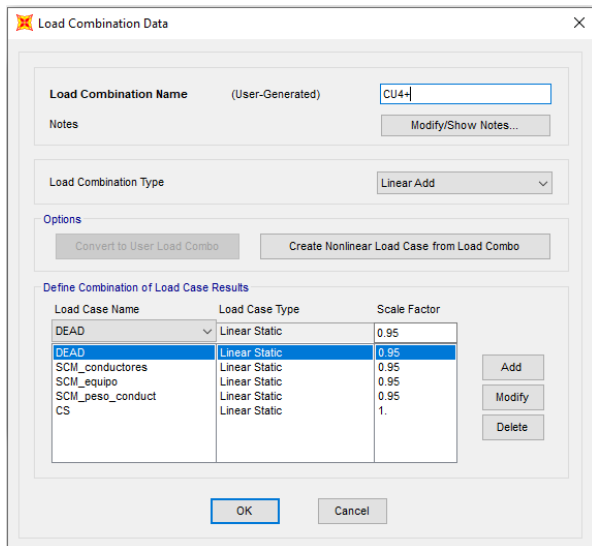


Figura 55. Ventana Definición de Combinaciones de Carga, Combinación Última 4 positiva, software SAP2000.

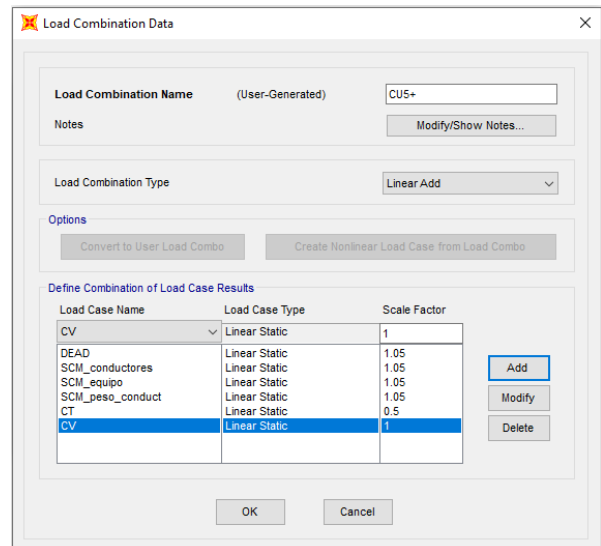


Figura 57. Ventana Definición de Combinaciones de Carga, Combinación Última 5 positiva, software SAP2000.

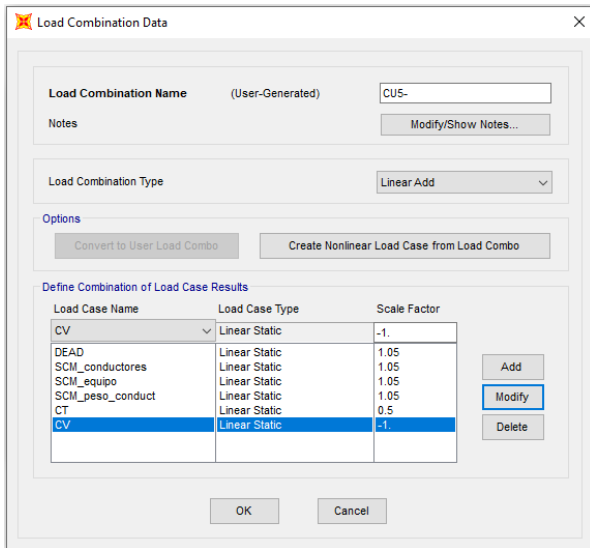


Figura 58. Ventana Definición de Combinaciones de Carga, Combinación Última 5 negativa, software SAP2000.

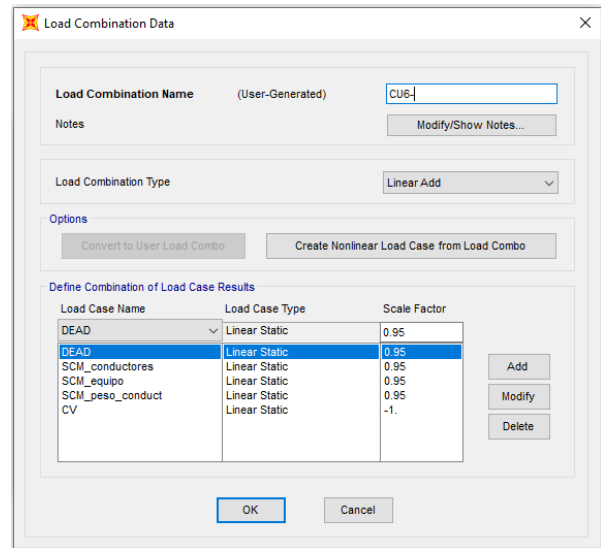


Figura 60. Ventana Definición de Combinaciones de Carga, Combinación Última 6 negativa, software SAP2000.

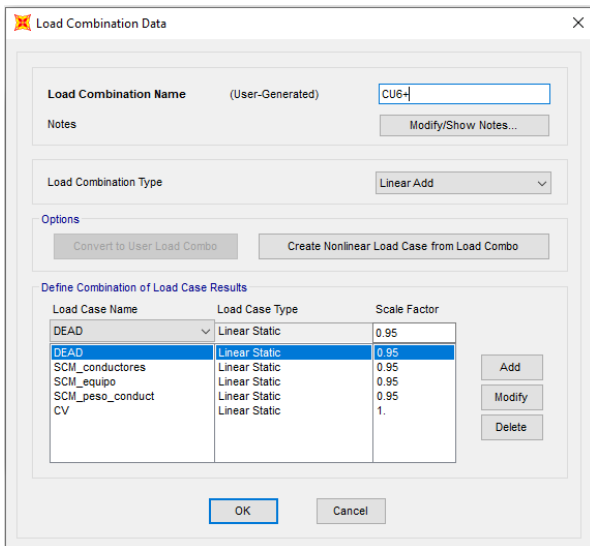


Figura 59. Ventana Definición de Combinaciones de Carga, Combinación Última 6 positiva, software SAP2000.

Para definir los valores de las fuerzas que actúan sobre el elemento, en la barra de herramientas principal, en “Asignar”, en la opción “Frame Loads”, se despliega una lista de opciones, se selecciona “Point”, para cargas puntuales. En la opción “Load Pattern”, se selecciona el tipo de carga que se va a definir, para distancias absolutas y la dirección en la que impacta al poste (Figura 61).

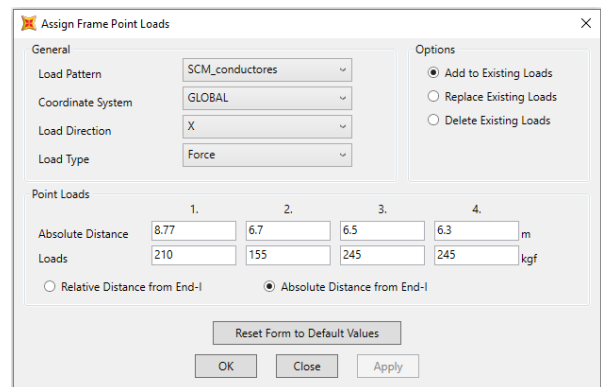


Figura 61. Ventana Asignar cargas puntuales en el elemento, software SAP2000.

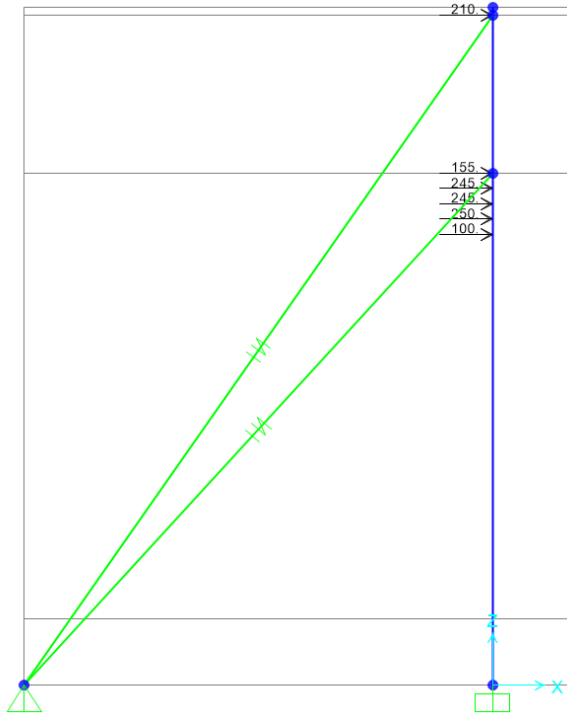


Figura 62. Definición de cargas por fuerza de conductores a 30°, software SAP2000.

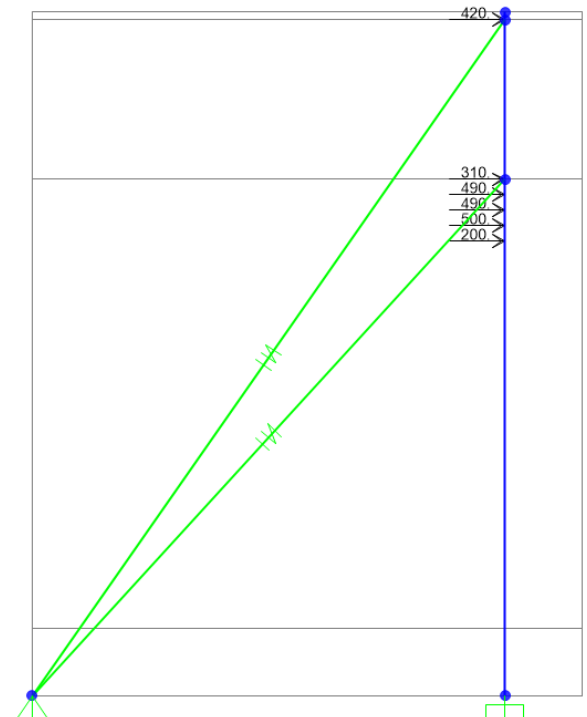


Figura 64. Definición de cargas por fuerza de conductores a 90°, software SAP2000.

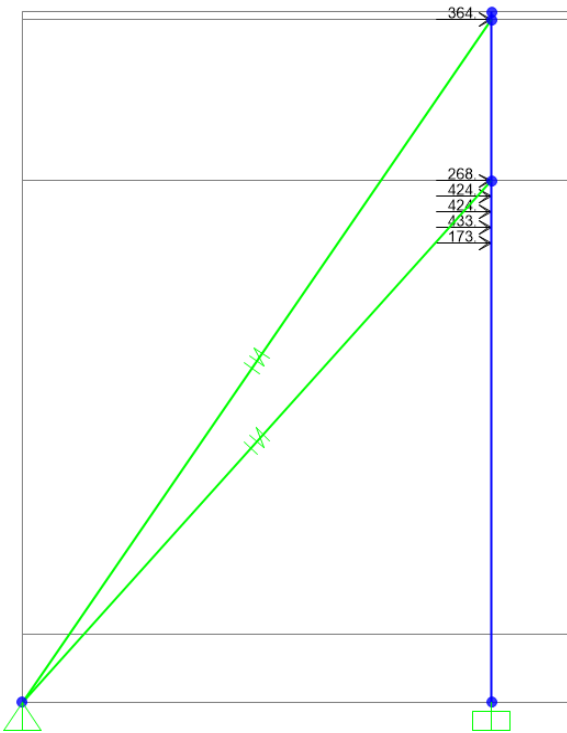


Figura 63. Definición de cargas por fuerza de conductores a 60°, software SAP2000.

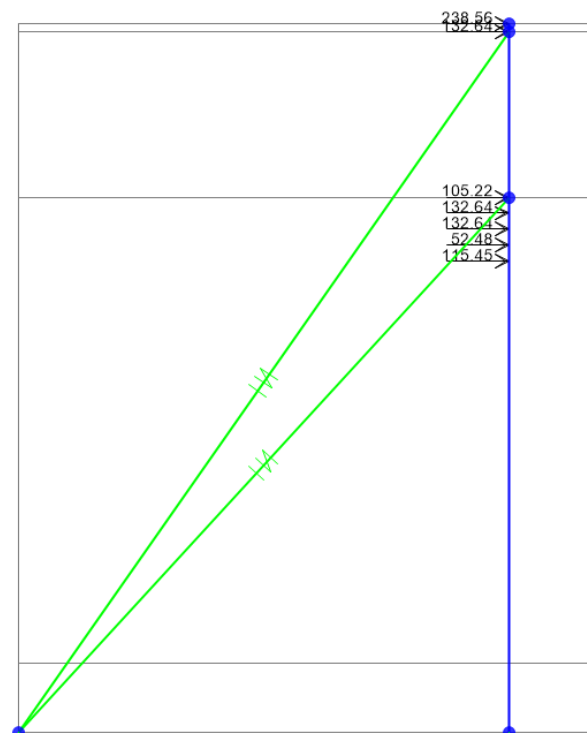


Figura 65. Definición de cargas por fuerza de viento, software SAP2000.

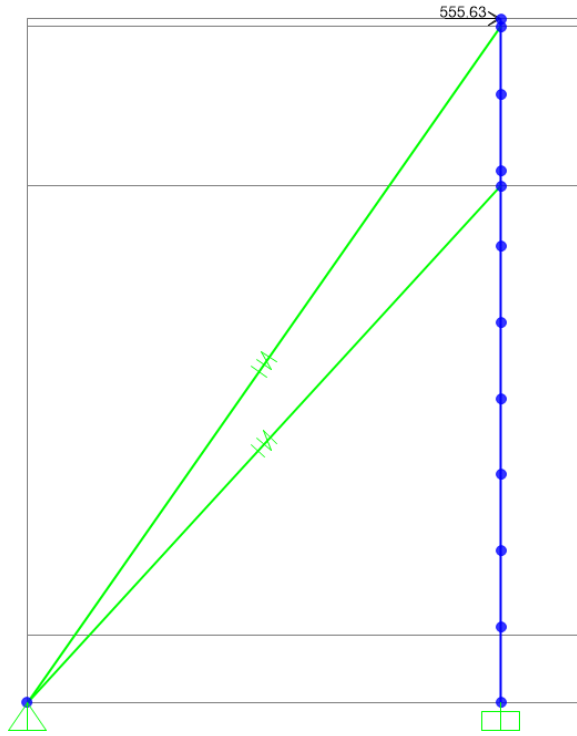


Figura 66. Definición de cargas por fuerza de sismo para las propiedades teóricas, software SAP2000.

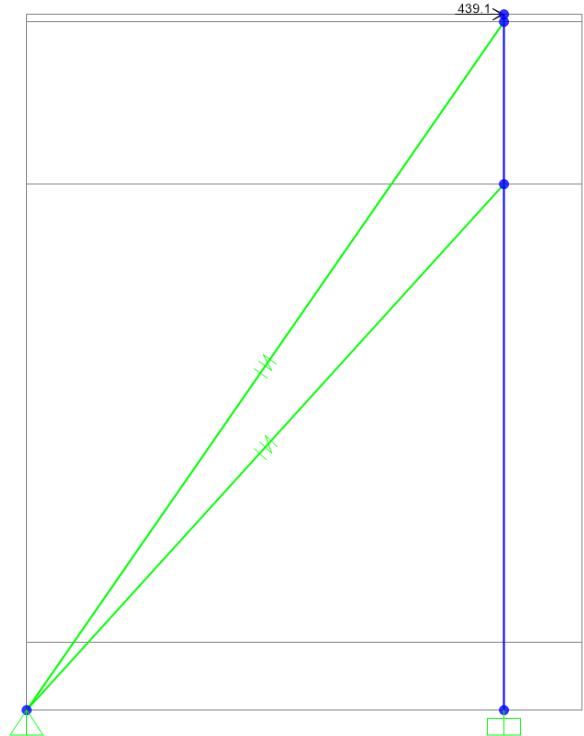


Figura 68. Definición de cargas por fuerza de sismo para las propiedades del poste S 300-600, software SAP2000.

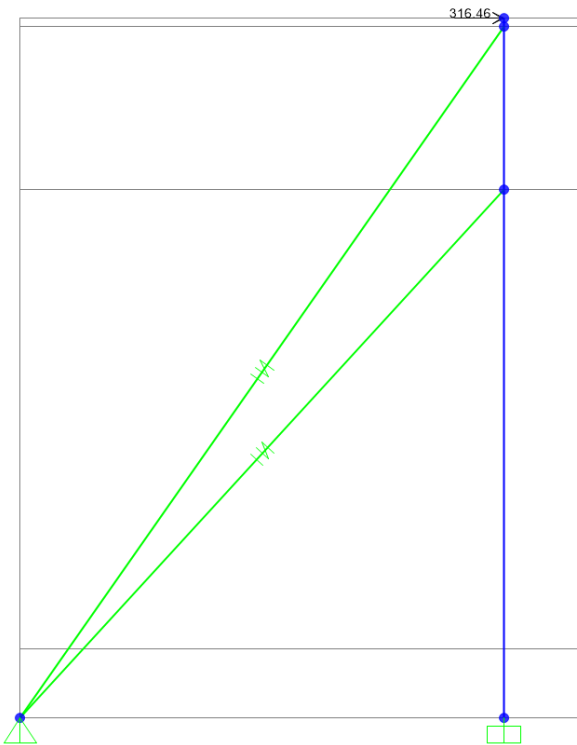


Figura 67. Definición de cargas por fuerza de sismo para las propiedades del poste S 100-300, software SAP2000.

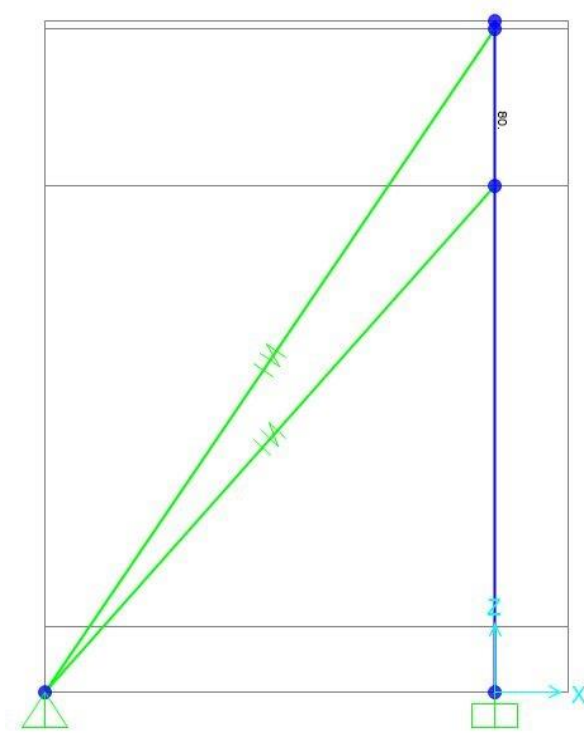


Figura 69. Definición de carga temporal, software SAP2000.

Con las características mecánicas y las fuerzas definidas, se activa el modelo, el cual va a presentar los valores de momento, cortante y carga axial últimos para ser comparados con los valores nominales calculados; de esta manera se conoce si la estructura es aceptable y es capaz de resistir un evento de diseño.

Con el software, se obtienen los datos de deflexión en la cúspide del elemento y se realiza la comparación con el valor límite según el Instituto Costarricense de Electricidad, que corresponde a un 25% de la dimensión del diámetro de la base del poste²⁵. Sin embargo, el valor límite no hace distinción del material de la estructura soportante.

Mantenimiento

Para la sugerencia de medidas de mantenimiento, se realizó una búsqueda para determinar cuáles opciones son posibles de acuerdo a los daños.

Las causas de fallo de un poste se dan por el deterioro a nivel de la línea de suelo y en la cúspide, principalmente. En la sección de la cúspide, los pájaros carpinteros causan disminución en la sección transversal y esto causa disminución en la resistencia, la cual puede llegar a ser hasta de un 57%²⁶.

De acuerdo con la revisión de literatura, para los agujeros de carpintero no se ha fabricado una solución permanente. Existen registros de intentos sin buenos resultados, como la aplicación de barreras de plástico o malla de alambre, las cuales son puestas antes del levantamiento de la línea, sin embargo la barrera plástica retiene la humedad y provoca la descomposición en el área cubierta, además de deteriorarse con los rayos ultravioleta; y con la malla de alambre, varía la efectividad con respecto a la especie de pájaro carpintero que habita en la zona, además que provoca el aumento en la conductividad del poste, y esto se vuelve peligroso para los técnicos de mantenimiento. Algunas instituciones optan por aplicar un material con superficie resbaladiza, como envolturas de fibra de vidrio o neopreno, pero esto aumenta los costos.²⁷

Por otro lado, también se utiliza la opción de rellenar el agujero, existe la opción de una

mezcla de aserrín y goma sintética, o el uso de materiales epóxicos como el producto denominado "OsmoWeld MPF", de la empresa norteamericana Osmose, pero se ha identificado que las aves retornan al poste.

La empresa Osmose se dedica a la inspección y restauración de postes de madera, una de las opciones de tratamiento para el deterioro a nivel de la línea de suelo, es la colocación de una armadura de acero galvanizado en caliente, el cual se encarga de tomar el momento de flexión y no la base del poste.

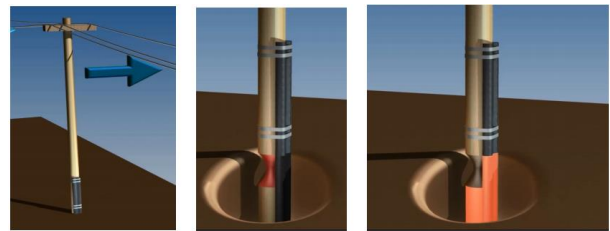


Figura 69. Restauración de acero para poste de madera.
Fuente. Osmose, (s.f.).



Figura 70. Restauración de acero para poste de madera.
Fuente. Osmose, (s.f.).

Los productos de esta compañía son posibles de adquirir, ya que otras empresas de distribución del país lo utilizan.

Para el deterioro a nivel de la línea de suelo, existen productos fungicidas o preservantes

²⁵ (González Lee, 2012)

²⁶ (Steenhof, 2011)

²⁷ (Harness & Walters, 2005)

que ayudan a controlar la velocidad del deterioro. Los productos usualmente son a base de petróleo, pueden contener cobre, creosota, fluoruro de sodio, dicromato de sodio, bicromato de sodio, arseniato de sodio, entre otros, estos productos ayudan de igual manera con el ataque de insectos²⁸.

Otro producto que se utiliza en el país es el alquitrán, sin embargo, el material es inflamable y atenta contra la seguridad de la comunidad si alguna falla o descarga eléctrica como la rayería, impacta el poste.

El tratamiento se realiza, desenterrando el poste de 30 a 60 cm, se realiza una limpieza superficial, retirando material suave y anteriores tratamientos, se aplica el preservante o fungicida y se cubre con polietileno reforzado con papel o similar, y se vuelve a cubrir.



Figura 71. Tratamiento a nivel del suelo en poste de madera.

Para tratar la presencia de nidos de insectos en el interior del poste, se utilizan insecticidas, inyectando directamente al interior de las grietas, ya que el efecto es más rápido que la fumigación.

En el país no existe variedad de opciones de productos a la venta, para realizar estos tratamientos, además, usualmente la empresa que se dedique a desempeñar servicios relacionados, no vende el producto individualmente.

Según estudios sobre el impacto ambiental de las maderas tratadas, se tiene que la madera libera pequeñas cantidades de componentes del preservante al ambiente, a las

zonas del suelo próximas del elemento, estos componentes tienen baja solubilidad en agua que limitan su dispersión, por ello, las concentraciones son inferiores para afectar la vida acuática.²⁹

Evaluación

Para definir una matriz de evaluación se identificaron las características más comunes que provocan una disminución en la resistencia del poste y se aplicó una escala numeral que al sumar una serie de aspectos, el resultado refleja un color. Debe considerarse que la evaluación sólo es de forma externa, no considera la visualización de daños internos.

Para la evaluación, los colores advierten la medida que se debe tomar sobre el elemento, se sugiere una distribución estilo semáforo que cuando se refleja el color verde, el poste continúa en servicio sin ser necesario la aplicación de medidas de mantenimiento.

Si la evaluación refleja el color amarillo, el poste presenta daño, por lo que requiere aplicar medidas de mantenimiento que reduzca la velocidad con la que el poste va a dejar de ser funcional y seguro.

Y, por último, si la evaluación indica un color rojo, el poste debe ser reemplazado para evitar la ruptura, que provoque un accidente y la discontinuación del servicio eléctrico.

Se realizó siete cuadros con información comparativa y su respectivo valor para colocar en un cuadro principal el número que represente lo observado en la inspección en sitio.

| Cuadro 1³⁰. Calificación por grietas y agujeros | |
|---|--------------|
| Condición | Calificación |
| Profundidad < 50% Radio | 1 |
| Profundidad > 50% Radio | 2 |
| Profundidad > 100% Radio | 3 |

²⁸ (Morris Carreño & Paez Riaño, 2003)

²⁹ (Moreno & Wottitz, 2011)

³⁰ No se continua la numeración de los cuadros debido a la forma en la que se realizó el cuadro de evaluación principal.

| Cuadro 2. Calificación por humedad-hongos a nivel de la línea del suelo ± 30cm | |
|---|--------------|
| Condición | Calificación |
| Presencia de humedad por condiciones ambientales | 1 |
| Formación de líquenes u hongos | 2 |
| Formación de líquenes, hongos, bolsas de pudrición | 3 |

| Cuadro 3. Calificación por prueba penetración con cuchilla | |
|---|--------------|
| Descripción | Calificación |
| Perforación < 5 mm | 1 |
| Perforación 5 mm a < 30 mm | 2 |
| Perforación > 30 mm | 3 |

| Cuadro 4. Calificación por preservante | |
|---|--------------|
| Condición | Calificación |
| Conserva el tono del preservante (CCA=verdoso, grisáceo) | 1 |
| Remoción de capa superficial del preservante | 2 |
| Remoción de capa superficial del preservante en la totalidad del poste, se identifica el color natural de la madera | 3 |

| Cuadro 5. Calificación por pérdida de sección a nivel de línea de suelo | |
|--|--------------|
| Condición | Calificación |
| No hay disminución en la circunferencia, ni desgaste | 1 |
| Disminución en la circunferencia por hundición, huecos, desgaste, desprendimiento de antiguos tratamientos | 2 |
| Disminución en la circunferencia > 13% ³¹ | 3 |

| Cuadro 6. Calificación por insectos | |
|--|--------------|
| Condición | Calificación |
| No hay presencia interna de insectos en el poste | 1 |
| Túneles de termitas, orificios o nidos que indiquen la presencia interna de insectos | 2 |
| Comprobación de pérdida de sección interna por insectos | 3 |

| Cuadro 7. Calificación por deformación | |
|--|--------------|
| Condición | Calificación |
| No hay deformación | 1 |
| Deformación por tensión de conductores o desplazamiento del eje vertical | 2 |
| Deformación de doble curvatura | 3 |

| Cuadro 8. Calificación de poste | | |
|---|-----------------------------|----------|
| Condición | Calificación | |
| Calificación por grietas y agujeros | Ver cuadro 1 | |
| Calificación por humedad-hongos | Ver cuadro 2 | |
| Calificación por prueba penetración con cuchilla | Ver cuadro 3 | |
| Calificación por preservante | Ver cuadro 4 | |
| Calificación por pérdida de sección a nivel de línea de suelo | Ver cuadro 5 | |
| Calificación por insectos | Ver cuadro 6 | |
| Calificación por deformación | Ver cuadro 7 | |
| Presencia de agujeros de pájaro carpintero | 2 | |
| Resultado | | 0 |
| Condición | Continua en servicio | |

La evaluación se realiza en el software de Microsoft Excel, en donde se definió la programación de la condición para que cambie automáticamente a la hora de que la sumatoria se haya realizado.

³¹ (Osmose)

En verde se tiene una puntuación menor o igual a 10, si el resultado varía de 11 a 16, la condición se presenta en amarillo y mayor o igual a 17 puntos, se tiene una condición en rojo.

El color verde representa que el poste continúa en servicio y no requiere de acciones correctivas. Si se obtiene color amarillo significa que el poste presenta deterioro y es necesario aplicar tratamiento para minimizar el daño a futuro y que continúe en servicio. El color rojo indica reemplazo, ya que el poste representa un peligro y aplicar un tratamiento ya no es suficiente.

Las grietas longitudinales no provocan disminución en la resistencia del poste, mientras las perpendiculares al grano pueden ser señal de mayor daño, aunque en la literatura no se identifique un dato general en la profundidad que distinga la grieta como no permitida, se considera una grieta de gran profundidad cuando la longitud es mayor al 50% del diámetro del poste. Adicionalmente, las grietas causan deterioro, pues deja expuesta la parte interna que no fue preservada, exponiendo al poste a hongos e insectos que provocan disminución en la sección transversal.

La presencia de hongos es una característica que va a ocurrir si las condiciones ambientales lo favorecen, un 30% de humedad es óptimo para el desarrollo y el constante contacto con el agua del suelo. Un deterioro avanzado por hongos, puede provocar la disminución de la resistencia mecánica de hasta un 15%³², por ello es importante la garantía del proveedor de un buen proceso de tratamiento preservante.

Para la valoración para la prueba de penetración de cuchilla al nivel de la línea de suelo, se utilizaron los criterios propuestos en un informe No.25 del Centro de Investigación en Integración Bosque Industria, del Instituto Tecnológico de Costa Rica, en este evalúan la degradación en postes por hongos en la zona comprendida entre los 5 cm por encima y por debajo de la línea de tierra³³.

De acuerdo con la consulta realizada al Dr. Alexander Berrocal, profesor en la escuela de Ingeniería Forestal, del Instituto Tecnológico de Costa Rica, a partir de fotografías sobre el desprendimiento de materia en la superficie del poste, se concluyó que se observa la remoción de

la capa superficial del químico protector de los postes, pues no se observa el color verde turquesa que otorga el cobre del preservante, sino que se logra ver el color natural de la madera. Al verse disminuido el efecto del preservante, los agentes biológicos empiezan a deteriorar el poste.

Los nidos de insectos presentes en el interior del poste o a nivel de la línea de tierra, indican que el químico protector perdió efecto, por ello es necesario reaplicar un insecticida para que el poste no sufra pérdida de sección transversal, debido a que estos insectos se alimentan de la madera.

Cuando existen deformaciones por tensión de conductores, es necesario revisar si el poste brinda señales de posibles rupturas por el incremento de cargas, por esto se adicionó esta característica a los daños que se presentan en el poste, se logra observar por la formación de grietas en el lado del elemento que está en tensión, aunque la madera es considerada flexible, si existe disminución en las propiedades mecánicas, el poste no va a soportar el exceso de cargas.

Uno de los principales causantes de ruptura en los postes, son los agujeros provocados por el pájaro carpintero. Estos provocan una disminución en la sección transversal de la cúspide del poste, la cual es la de menor dimensión. Cuando esta especie afecta un poste, deja señal para otros pájaros lleguen a anidar; pues no fue posible inspeccionar esta área, se adicionó un puntaje en la tabla principal, ya que, si existen agujeros críticos, el poste podría fallar en cualquier momento. Sin embargo, si los agujeros pueden ser medidos, se aplican las características del cuadro 1.

En el cuadro 5, cuando sea posible medir la diferencia de circunferencia, eliminando la madera suave y podrida, si la diferencia entre estas es del 13%, se clasifica que el poste es peligroso³⁴.

$$\frac{C_2 - C_1}{C_2} * 100 \quad (41)$$

Donde, C_1 es la circunferencia original y C_2 es la circunferencia medida.

El resultado de evaluación se debe considerar en conjunto con los resultados

³² (Cruz de León, 2010)

³³ (Canessa A, González T, Moya R, & Serrano M, 2004)

³⁴ (Osmose)

obtenidos por medio del ultrasonido que se realizó en campo, por lo que aquellos postes identificados dentro de cierto rango de disminución de valores mecánicos, se aplicó un color rojizo, el cual describe que el elemento debe considerarse con daño interno, por ello se debe plantear su correspondiente reemplazo.

Resultados

Inspección del estado de la madera

La inspección en sitio se evidenció por medio de fotografías, con las cuales se muestran las características más comunes que afectan los postes de madera, para posteriormente realizar la evaluación de los elementos.



Figura 72. Desentierro de poste a nivel de línea de tierra conservado, con mínima presencia de humedad.



Figura 73. Inspección de 30 cm enterrados, con evidencia de tratamiento posterior a la instalación.



Figura 74. Formación de líquenes sobre la superficie desenterrada.



Figura 75. Evidencia de deterioro a nivel de la línea desenterrada, pérdida de sección y hundiciones.



Figura 76. Deterioro a nivel de línea de suelo con pérdida de sección, inicio de pudrición.



Figura 77. Pudrición a nivel de distancia desenterrada con evidencia de larvas.



Figura 78. Presencia de hongos y pudrición a nivel de distancia desenterrada.



Figura 79. Evidencia de pudrición sobre la línea de suelo.



Figura 81. Formación de grietas anchas y profundas.



Figura 80. Agujeros sobre la superficie del poste.



Figura 82. Formación de grietas.



Figura 83. Formación de hongo marrón sobre la superficie del poste.



Figura 85. Presencia evidente de insectos.



Figura 84. Formación de canales de insectos.



Figura 86. Desprendimiento del preservante superficial, visualización del color natural de la madera.



Figura 87. Desprendimiento del preservante superficial.



Figura 89. Deformación por tensión de los conductores.



Figura 88. Deformaciones por tensión de los conductores.

A partir de los resultados obtenidos con el equipo de ultrasonido, se realizan gráficos de probabilidad y a estos se les aplican pruebas de bondad de ajuste para definir a cuál distribución se ajustan mejor los datos, con este resultado se calcula el p-value, los cuales se observan en las figuras 90 y 91.

Además, se representaron los datos por medio de histogramas, con la distribución que mejor se adapta (Figura 92 y 93).

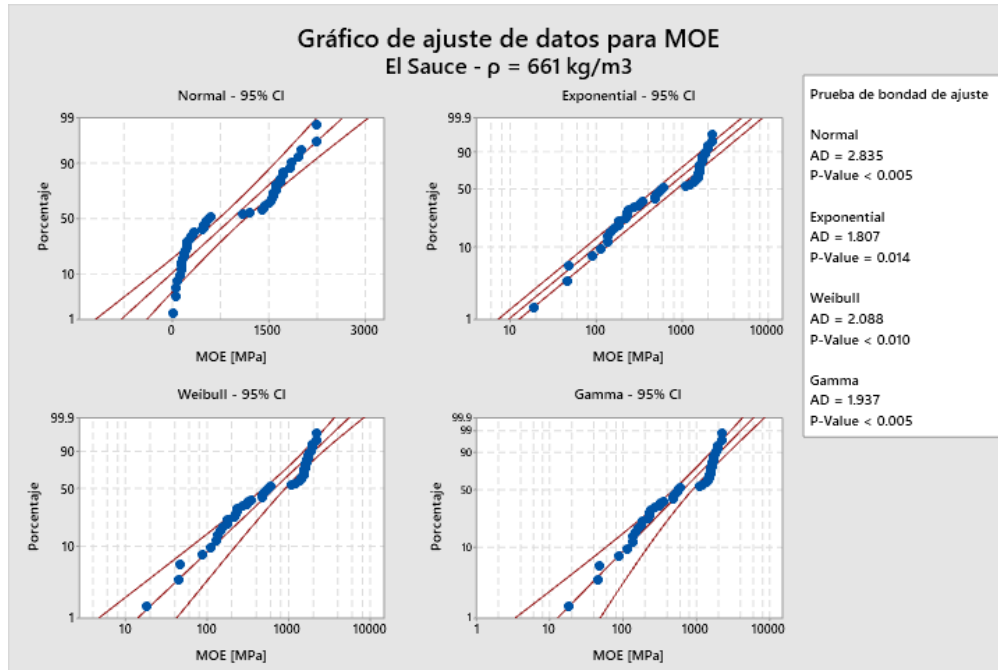


Figura 90. Gráfico de probabilidad de módulo elástico (MOE) para la zona de Sauce.

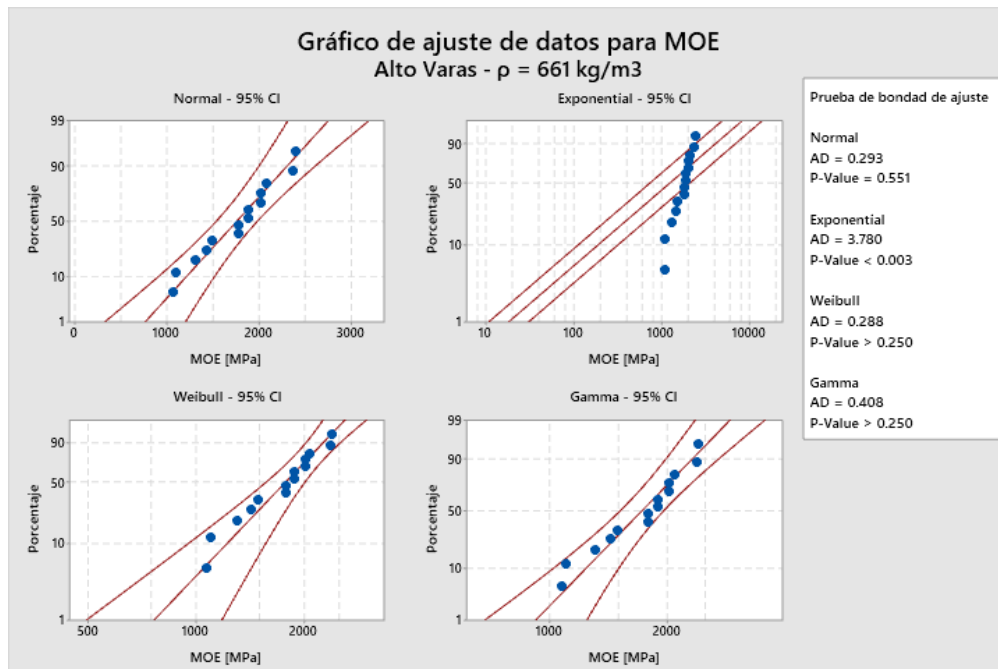


Figura 91. Gráfico de probabilidad de módulo elástico (MOE) para la zona de Alto Varas.

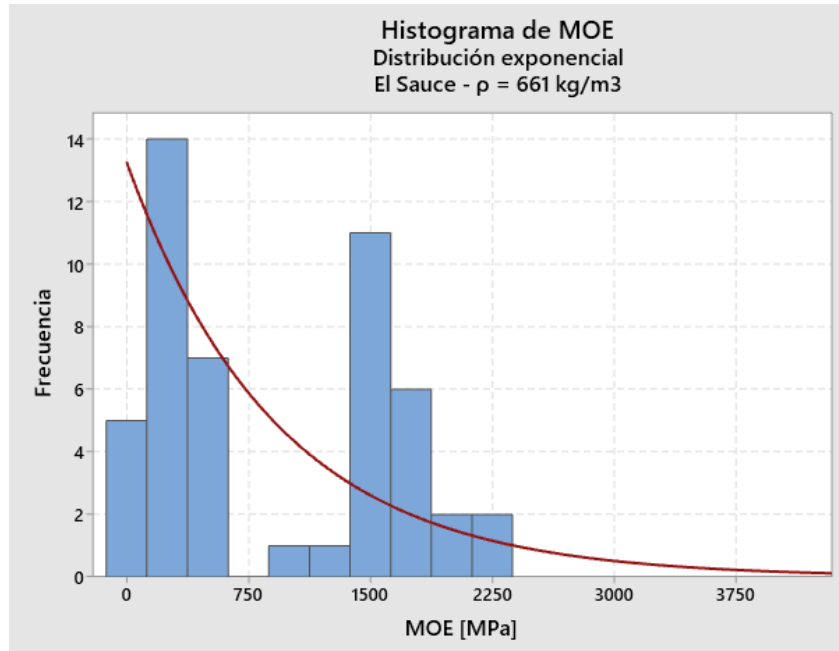


Figura 92. Histograma de módulo elástico radial para la zona de Sauce.

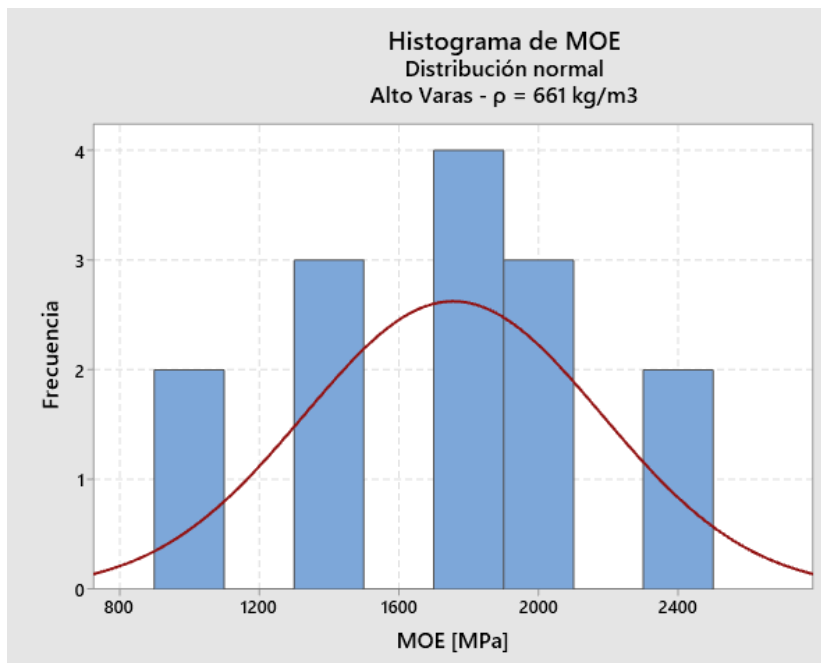


Figura 93. Histograma de módulo elástico radial para la zona de Alto Varas.

A partir de la medición del módulo elástico radial para cada poste y el uso de los radios elásticos, se obtienen los valores de diseño para

el modelo, estos se separan por rangos de acuerdo con los gráficos anteriores.

| Cuadro 15. Propiedades mecánicas de la madera para la zona del Sauce (MPa) | | | | | | |
|---|---------|----------|--------|---------|---------|--------|
| Rango E (MPa) | ER | EL | ET | GLR | GLT | GRT |
| 100-300 | 276.24 | 3732.97 | 167.98 | 205.31 | 197.85 | 37.33 |
| 300-600 | 596.04 | 8054.59 | 362.46 | 443.00 | 426.89 | 80.55 |
| 1200-1500 | 1450.22 | 19597.63 | 881.89 | 1077.87 | 1038.67 | 195.98 |

| Cuadro 16. Propiedades mecánicas de la madera para la zona de Alto Varas (MPa) | | | | | | |
|---|---------|----------|---------|---------|---------|--------|
| Rango E (MPa) | ER | EL | ET | GLR | GLT | GRT |
| 1000-1500 | 1485.29 | 20071.55 | 903.22 | 1103.94 | 1063.79 | 200.72 |
| 1800-2100 | 2020.40 | 27302.74 | 1228.62 | 1501.65 | 1447.05 | 273.03 |

| Cuadro 17. Propiedades mecánicas teóricas para el grupo de Pino Sureño al 12% de CH (MPa) | | | | | | |
|--|----------|---------|---------|---------|---------|--------|
| Tipo de Pino | EL | ER | ET | GLR | GLT | GRT |
| Loblolly | 13530.00 | 1528.89 | 1055.34 | 1109.46 | 1095.93 | 175.89 |
| Longleaf | 15070.00 | 1537.14 | 1024.76 | 1069.97 | 693.22 | 75.35 |
| Slash | 15070.00 | 1115.18 | 678.15 | 828.85 | 798.71 | 150.70 |

Fuente. Forest Products Laboratory, 2010.

Comportamiento estructural

Los valores de la fuerza resultante de acuerdo con el ángulo de desvío por cada conductor, según la ecuación 4. Correspondiente a la clasificación Tipo 1-C, Tipo 1-D y Tipo 1-E, modelados en el software SAP2000 (Figuras 62, 63, 64).

| Cuadro 18. Cargas mínimas de operación sobre un poste de madera de 10.67 m | | | |
|---|---------------------------------------|---------------------|---------------------|
| Conductores | Resultante de fuerza por ángulo (kgf) | | |
| | $\theta = 30^\circ$ | $\theta = 60^\circ$ | $\theta = 90^\circ$ |
| Primario | 210 | 364 | 420 |
| Neutro | 155 | 268 | 310 |
| Fase A | 245 | 424 | 490 |
| Fase B | 245 | 424 | 490 |
| Telefónico | 250 | 433 | 500 |
| Televisión | 100 | 173 | 200 |

Los parámetros de diseño para obtener la carga del viento, de acuerdo al Reglamento de Construcciones de Costa Rica y las Normas Técnicas Complementarias para el diseño por viento (2017), y el efecto del viento sobre el poste y los conductores.

| Cuadro 19. Interpolación de los valores de presión básica según la altura libre del poste de madera | |
|--|--------------------------------------|
| Altura (m) | Presión básica (kgf/m ²) |
| 7.00 | 95.00 |
| 8.87 | 101.23 |
| 10.00 | 105.00 |

| Cuadro 20. Parámetros para diseño de Carga de Viento | | | |
|---|---|---|--|
| Coefficiente de topografía (C _{top}) | Coefficiente de uso (C _{uso}) | Coefficiente de forma (C _p) | Presión básica de viento (kgf/m ²) |
| 1.20 | 1.20 | 0.90 | 101.23 |

| Cuadro 21. Efecto de viento sobre el poste de madera | | |
|---|---|------------------------|
| Área de incidencia (m ²) | Presión de viento (kgf/m ²) | Fuerza de viento (kgf) |
| 1.82 | 131.20 | 238.56 |

| Cuadro 22. Efecto de viento sobre los conductores | | | | | | |
|--|-------------------------|---------------------------|-----------------------|--------------------------------------|---------------------------------|------------------------|
| Conductores | Cantidad de conductores | Diámetro de conductor (m) | Longitud del vano (m) | Área de incidencia (m ²) | Altura sobre nivel de suelo (m) | Fuerza de viento (kgf) |
| Primario | 1.00 | 0.010 | 100.00 | 1.01 | 8.77 | 132.64 |
| Neutro | 1.00 | 0.008 | 100.00 | 0.80 | 6.70 | 105.22 |
| Fase A | 1.00 | 0.010 | 100.00 | 1.01 | 6.50 | 132.64 |
| Fase B | 1.00 | 0.010 | 100.00 | 1.01 | 6.30 | 132.64 |
| Telefónico | 1.00 | 0.004 | 100.00 | 0.40 | 6.10 | 52.48 |
| Televisión | 1.00 | 0.009 | 100.00 | 0.88 | 5.90 | 115.45 |

| Cuadro 23. Efecto de la fuerza del viento total sobre el poste de madera | | |
|---|---|------------------------------|
| Efecto de viento sobre poste (kg) | Efecto de viento sobre conductores (kg) | Fuerza de viento total (kgf) |
| 238.56 | 671.08 | 909.64 |

Los valores de carga muerta (DEAD), sobrecarga muerta (SCM) y carga viva (CV), para la obtención del peso total de la estructura.

| Cuadro 24. Cálculo de Carga Muerta del poste de madera | | | |
|---|---------------------------|-------------------------------|-----------|
| Altura poste (m) | Volumen (m ³) | Densidad (kg/m ³) | Peso (kg) |
| 10.67 | 0.45 | 661.00 | 297.45 |

| Cuadro 25. Cálculo de Sobre Carga Muerta de los conductores | | | |
|--|--------------|-------------------------|-----------|
| Conductores | Peso (kg/km) | Longitud tributaria (m) | Peso (kg) |
| Primario | 172.20 | 100.00 | 17.22 |
| Neutro | 108.20 | 100.00 | 10.82 |
| Fase A | 172.20 | 100.00 | 17.22 |
| Fase B | 172.20 | 100.00 | 17.22 |
| Telefónico | 513.00 | 100.00 | 51.30 |
| Televisión | 130.00 | 100.00 | 13.00 |
| Total | | | 126.78 |

| Cuadro 26. Cálculo de Sobre Carga Muerta de Equipo de Montaje Clasificación Tipo 1-C | | | | |
|---|--|----------|--------------------|-----------------|
| Tipo de Montaje | Descripción del material | Cantidad | Peso unitario (kg) | Peso total (kg) |
| A-4-P | PERNO CAB CUADRADA GALV 15.87 X 203.2 0 MM R/O | 2.00 | 0.37 | 0.74 |
| | PERNO GALV TODO ROSCA 15.87 X 254.00 MM | 1.00 | 0.40 | 0.40 |
| | ARANDELA GALVANIZADA PLANA 15.87 MM 1 | 1.00 | 0.07 | 0.07 |
| | ARANDELA CURVA GALV 4.76 X 57.15 X 15.87 MM | 4.00 | 0.11 | 0.44 |
| | TUERCA DE OJO DE 15.87 MM | 2.00 | 0.25 | 0.50 |
| | CONTRATUERCA GALVANIZADA 15.87 MM | 6.00 | 0.03 | 0.18 |
| | ALAMBRE ALUMINIO P/ATAR # 6 AWG | 2.00 | 0.04 | 0.07 |
| | AISLADOR T/POSTE 45KV C/PERNO P/CRUCERO DE METAL | 1.00 | 12.17 | 12.17 |
| | CONECTOR A COMPRESION FIG 3 P/CABLE # 1/0 A 2/0 ACSR # | 1.00 | 0.07 | 0.07 |
| | GRILLETE HO GALV 17.46 X 6350 MM C/PASA DOR 15.88 MM | 2.00 | 0.37 | 0.74 |
| | GUARDACABO HIERRO GALV ACERO PRENSADO C/REMATE | 2.00 | 0.76 | 1.52 |
| | REMATE PREFORMADO P/CABLE ALUM # 1/0 ACSR MOD DG- | 2.00 | 0.37 | 0.74 |
| | PERNO PRISIONERO P/METAL | 1.00 | 0.25 | 0.25 |
| | AISLADOR DE SUSPENSION | 6.00 | 6.01 | 36.06 |
| | SOPORTE HIERRO GALV. P/AISLADOR T/POSTE | 1.00 | 1.56 | 1.56 |
| B-6 | PERNO CAB CUADRADA GALV 15.87 X 254.00 MM R/O | 2.00 | 0.32 | 0.64 |
| | ARANDELA CURVA GALV 4.76 X 57.15 X 15.87 MM | 2.00 | 0.11 | 0.22 |
| | CONTRATUERCA GALVANIZADA 15.87 MM | 2.00 | 0.03 | 0.06 |
| | ALAMBRE ALUMINIO P/ATAR # 6 AWG | 1.60 | 0.04 | 0.06 |
| | AISLADOR CARRETE PORCELANA 76.20 X 79.57 MM NEMA 53-2 | 2.00 | 0.56 | 1.12 |
| | MANGAS DE EMPALME NEOPRENO P/CABLE ACSR # 2-1//0 | 2.00 | 0.01 | 0.02 |
| | PERCHA HIERRO GALV 1 AISLADOR 76.20 MM | 2.00 | 0.46 | 0.92 |
| B-1 | PERNO CAB CUADRADA GALV 15.87 X 254.00 MM R/O | 2.00 | 0.32 | 0.64 |
| | ARANDELA CURVA GALV 4.76 X 57.15 X 15.87 MM | 2.00 | 0.11 | 0.22 |
| | CONTRATUERCA GALVANIZADA 15.87 MM | 2.00 | 0.03 | 0.06 |
| | ALAMBRE ALUMINIO P/ATAR # 6 AWG | 1.60 | 0.04 | 0.06 |
| | AISLADOR CARRETE PORCELANA 76.20 X 79.57 MM NEMA 53-2 | 2.00 | 0.56 | 1.12 |
| | MANGAS DE EMPALME NEOPRENO P/CABLE ACSR # 2-1//0 | 2.00 | 0.01 | 0.02 |
| | PERCHA HIERRO GALV 1 AISLADOR 76.20 MM | 2.00 | 0.46 | 0.92 |
| | REMATE PREFORMADO P/CABLE ALUM # 1/0 ACSR MOD DG- | 2.00 | 0.37 | 0.74 |
| Total | | | | 62.33 |

Fuente. Instituto Costarricense de Electricidad, (s.f).

| Cuadro 27. Cálculo de Sobre Carga Muerta de Equipo de Montaje Clasificación Tipo 1-D | | | | |
|---|--|----------|--------------------|-----------------|
| Tipo de Montaje | Descripción del material | Cantidad | Peso unitario (kg) | Peso total (kg) |
| A-5 | PERNO GALV TODO ROSCA 15.87 X 254.00 MM | 1.00 | 0.40 | 0.40 |
| | ARANDELA CURVA GALV 4.76 X 57.15 X 15.87 MM | 2.00 | 0.11 | 0.22 |
| | TUERCA DE OJO DE 15.87 MM | 2.00 | 0.25 | 0.50 |
| | CONTRATUERCA GALVANIZADA 15.87 MM | 4.00 | 0.03 | 0.12 |
| | CONECTOR A COMPRESION FIG 3 P/CABLE # 1/0 A 2/0 ACSR # | 1.00 | 0.07 | 0.07 |
| | GRILLETE HO GALV 17.46 X 6350 MM C/PASADOR 15.88 MM | 2.00 | 0.37 | 0.74 |
| | GUARDACABO HIERRO GALV ACERO PRENSADO C/REMATE | 2.00 | 0.76 | 1.52 |
| | AISLADOR DE SUSPENSION | 6.00 | 6.01 | 36.06 |
| B-7 | REMATE PREFORMADO P/CABLE ALUM # 1/0 ACSR MOD DG- | 2.00 | 0.37 | 0.74 |
| | PERNO CAB CUADRADA GALV 15.87 X 254.00 MM R/O | 2.00 | 0.32 | 0.64 |
| | CONTRATUERCA GALVANIZADA 15.87 MM | 2.00 | 0.03 | 0.06 |
| | AISLADOR CARRETE PORCELANA 76.20 X 79.57 MM NEMA 53-2 | 4.00 | 0.56 | 2.24 |
| | CONECTOR A COMPRESION FIG 3 P/CABLE # 1/0 A 2/0 ACSR # | 2.00 | 0.07 | 0.14 |
| | PERCHA HIERRO GALV 1 AISLADOR 76.20 MM | 4.00 | 0.46 | 1.84 |
| B-14 | REMATE PREFORMADO P/CABLE ALUM # 1/0 ACSR MOD DG- | 4.00 | 0.37 | 1.48 |
| | PERNO CAB CUADRADA GALV 15.87 X 254.00 MM R/O | 2.00 | 0.32 | 0.64 |
| | ARANDELA CURVA GALV 4.76 X 57.15 X 15.87 MM | 2.00 | 0.11 | 0.22 |
| | CONTRATUERCA GALVANIZADA 15.87 MM | 2.00 | 0.03 | 0.06 |
| | AISLADOR CARRETE PORCELANA 76.20 X 79.57 MM NEMA 53-2 | 2.00 | 0.56 | 1.12 |
| | CONECTOR A COMPRESION FIG 3 P/CABLE # 1/0 A 2/0 ACSR # | 1.00 | 0.07 | 0.07 |
| | PERCHA HIERRO GALV 1 AISLADOR 76.20 MM | 2.00 | 0.46 | 0.92 |
| REMATE PREFORMADO P/CABLE ALUM # 1/0 ACSR MOD DG- | 2.00 | 0.37 | 0.74 | |
| Total | | | | 50.54 |

Fuente. Instituto Costarricense de Electricidad, (s.f).

| Cuadro 28. Cálculo de Sobre Carga Muerta de Equipo de Montaje Clasificación Tipo 1-E | | | | |
|---|--|----------|--------------------|-----------------|
| Tipo de Montaje | Descripción del material | Cantidad | Peso unitario (kg) | Peso total (kg) |
| A-6 | PERNO GALV CABEZA CUADRADO 15.87 X 228.60 MM | 2.00 | 0.40 | 0.80 |
| | ARANDELA CURVA GALV 4.76 X 57.15 X 15.87 MM | 4.00 | 0.11 | 0.44 |
| | TUERCA DE OJO DE 15.87 MM | 2.00 | 0.25 | 0.50 |
| | CONTRATUERCA GALVANIZADA 15.87 MM | 4.00 | 0.03 | 0.12 |
| | CONECTOR A COMPRESION FIG 3 P/CABLE # 1/0 A 2/0 ACSR # | 1.00 | 0.07 | 0.07 |
| | GRILLETE HO GALV 17.46 X 6350 MM C/PASADOR 15.88 MM | 2.00 | 0.37 | 0.74 |
| | GUARDACABO HIERRO GALV ACERO PRENSADO C/REMATE | 2.00 | 0.76 | 1.52 |
| | AISLADOR DE SUSPENSION | 6.00 | 6.01 | 36.06 |
| | REMATE PREFORMADO P/CABLE ALUM # 1/0 ACSR MOD DG- | 2.00 | 0.37 | 0.74 |
| B-13 | PERNO CAB CUADRADA GALV 15.87 X 254.00 MM R/O | 4.00 | 0.32 | 1.28 |
| | ARANDELA CURVA GALV 4.76 X 57.15 X 15.87 MM | 4.00 | 0.11 | 0.44 |
| | CONTRATUERCA GALVANIZADA 15.87 MM | 4.00 | 0.03 | 0.12 |
| | AISLADOR CARRETE PORCELANA 76.20 X 79.57 MM NEMA 53-2 | 4.00 | 0.56 | 2.24 |
| | CONECTOR A COMPRESION FIG 3 P/CABLE # 1/0 A 2/0 ACSR # | 2.00 | 0.07 | 0.14 |
| | PERCHA HIERRO GALV 1 AISLADOR 76.20 MM | 4.00 | 0.46 | 1.84 |
| | REMATE PREFORMADO P/CABLE ALUM # 1/0 ACSR MOD DG- | 4.00 | 0.37 | 1.48 |
| B-4 | PERNO CAB CUADRADA GALV 15.87 X 254.00 MM R/O | 1.00 | 0.32 | 0.32 |
| | ARANDELA CURVA GALV 4.76 X 57.15 X 15.87 MM | 1.00 | 0.11 | 0.11 |
| | CONTRATUERCA GALVANIZADA 15.87 MM | 1.00 | 0.03 | 0.03 |
| | ALAMBRE ALUMINIO P/ATAR # 6 AWG | 0.50 | 0.04 | 0.02 |
| | AISLADOR CARRETE PORCELANA 76.20 X 79.57 MM NEMA 53-2 | 1.00 | 0.56 | 0.56 |
| | PERCHA HIERRO GALV 1 AISLADOR 76.20 MM | 1.00 | 0.46 | 0.46 |
| | REMATE PREFORMADO P CABLE ALUM 6 ACSR CAT 4500 | 1.00 | 0.37 | 0.37 |
| Total | | | | 50.40 |

Fuente. Instituto Costarricense de Electricidad, (s.f).

| Cuadro 29. Cálculo de Sobre Carga Muerta de equipo adicional sobre poste de madera | |
|---|-----------|
| Equipo | Peso (kg) |
| Transformador | 216 |
| Lámpara | 10 |
| Cortacircuitos | 5 |
| Pararrayos | 4 |
| Total | 235 |

| Cuadro 30. Cálculo de Carga Viva sobre el poste de madera | | | |
|--|----------|-----------|-----------------|
| Descripción | Cantidad | Peso (kg) | Peso total (kg) |
| Operario | 1 | 80 | 80 |

| Cuadro 31. Resumen de cargas sobre el poste por clasificación | | | |
|--|-----------|----------|---------|
| Clasificación | DEAD (kg) | SCM (kg) | CT (kg) |
| Tipo 1-C | 297.45 | 424.11 | 80.00 |
| Tipo 1-D | 297.45 | 412.32 | 80.00 |
| Tipo 1-E | 297.45 | 412.18 | 80.00 |

| Cuadro 32. Resumen de cargas y peso total de la estructura para efectos sísmicos del modelo | | | |
|--|-----------|---------------|-----------|
| Tipo de Carga | Peso (kg) | Participación | Peso (kg) |
| DEAD | 297.45 | 1.00 | 297.45 |
| SCM | 424.11 | 1.00 | 424.11 |
| CV | 80.00 | 0.15 | 12.00 |
| Total | | | 733.56 |

Los parámetros de diseño para obtener la fuerza sísmica, de acuerdo con el Código Sísmico de Costa Rica (2010), y la fuerza sísmica para distintas propiedades mecánicas aplicadas al modelo.

| Cuadro 33. Parámetros sísmicos de acuerdo al CSCR 2010 | | | | | | |
|---|----------------------|---------------------------------|---------------------------|---------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| Zonificación sísmica | Sitio de cimentación | Aceleración pico efectiva (aef) | Factor de importancia (I) | Sistema estructural | Ductilidad global (μ) | Factor de sobrerresistencia (SR) |
| III | S3 | 0.36 | 1.25 | Voladizo | 1.00 | 1.20 |


 Deformed Shape (MODAL) - Mode 1; T = 0.75365; f = 1.32688

Figura 94. Valor del periodo de la estructura en segundos según las cargas para el modelo de las propiedades mecánicas teóricas de la madera.

Fuente. Software SAP2000, CSI.


 Deformed Shape (MODAL) - Mode 1; T = 1.30432; f = 0.76668

Figura 95. Valor del periodo de la estructura en segundos según las cargas para el modelo de las propiedades mecánicas de la madera S 100-300 MPa.

Fuente. Software SAP2000, CSI.


 Deformed Shape (MODAL) - Mode 1; T = 0.94868; f = 1.05409

Figura 96. Valor del periodo de la estructura en segundos según las cargas para el modelo de las propiedades mecánicas de la madera S 300-600 MPa.

Fuente. Software SAP2000, CSI.

| Cuadro 34. Parámetros sísmicos para distintas propiedades mecánicas de la madera | | | |
|---|----------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Parámetro | Propiedades teóricas | Propiedades del poste S 100-300 | Propiedades del poste S 300-600 |
| Periodo (s) | 0.75 | 1.30 | 0.95 |
| FED | 2.02 | 1.15 | 1.60 |
| Coefficiente Sísmico | 0.76 | 0.43 | 0.60 |
| Corte Basal | 555.63 | 316.46 | 439.10 |

| Cuadro 35. Cálculo de Fuerza sísmica para distintas propiedades mecánicas de la madera | | | |
|---|----------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Parámetro | Propiedades teóricas | Propiedades del poste S 100-300 | Propiedades del poste S 300-600 |
| Dirección | x-y | x-y | x-y |
| W (kgf) | 733.56 | 733.56 | 733.56 |
| Altura (m) | 8.87 | 8.87 | 8.87 |
| W * Altura | 6506.65 | 6506.65 | 6506.65 |
| % F. Sísm. | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| F sísm (kgf) | 555.63 | 316.46 | 439.10 |

| Cuadro 36. Comparación de las cargas últimas mínimas de diseño para viento y sismo | | | |
|---|-----------------------------------|-------------|--------|
| Ángulo de línea | Fuerza total por conductores (kg) | Fuerza (kg) | |
| | | | Viento |
| 0°-30° | 1205.00 | 909.64 | 555.63 |
| 30°-60° | 2087.12 | 909.64 | 555.63 |
| | | Sismo | 555.63 |
| 60°-90° | 2410.00 | 909.64 | 555.63 |
| | | Sismo | 555.63 |

Los resultados de comparación entre las fuerzas de viento y sismo, para la visualización de la carga accidental que rige sobre la estructura (Cuadro 36).

Los resultados del diseño por flexión, cortante, compresión paralela al grano y flexocompresión para los postes con clasificación Tipo 1-C, Tipo 1-D y Tipo 1-E, para los modelos de las propiedades mecánicas de la madera.

| Cuadro 37. Esfuerzos admisibles y esfuerzos corregidos para postes circulares (kgf/m²) | | | | | |
|--|----------------------------|-------------------|-----------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Esfuerzo flexión | Esfuerzo flexión corregido | Esfuerzo cortante | Esfuerzo cortante corregido | Compresión paralela al grano | Esfuerzo compresión corregido |
| F _b | F _{b'} | F _v | F _{v'} | F _c | F _{c'} |
| 1988454.00 | 1988454.90 | 448676.80 | 403809.12 | 1274650.00 | 1131267.71 |

| Cuadro 38. Factores de ajuste para diseñar de acuerdo al esfuerzo básico | | | | | | | | | |
|---|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|---------------------------|---------------|--------------------------|--------------|
| C _t | C _{ct} | C _F | C _{ls} | C _p | C _{cs} | KF (flexión y compresión) | KF (cortante) | φ (flexión y compresión) | φ (cortante) |
| 1.00 | 0.90 | 1.00 | 1.00 | 0.98 | 1.01 | 2.54 | 2.88 | 0.85 | 0.75 |

| Cuadro 39. Resultados de diseño por flexión para propiedades mecánicas de la madera del modelo teórico | | | | | | | |
|---|----------|---------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Clasificación | Momentos | Combinación (kgf.m) | | | | | |
| | | CU1 | CU2 | CU5+ | CU5- | CU6+ | CU6- |
| Tipo 1-C | Mn | 2692.70 | 3590.26 | 4487.83 | 4487.83 | 4487.83 | 4487.83 |
| | +Mu | 501.07 | 429.28 | 538.67 | 212.80 | 502.94 | 177.08 |
| | -Mu | 438.60 | 375.92 | 441.89 | 228.17 | 410.83 | 196.84 |
| Tipo 1-D | Mn | 2692.70 | 3590.26 | 4487.83 | 4487.83 | 4487.83 | 4487.83 |
| | +Mu | 857.56 | 743.42 | 813.54 | 487.67 | 751.63 | 425.76 |
| | -Mu | 759.04 | 650.58 | 680.15 | 468.49 | 626.40 | 414.28 |
| Tipo 1-E | Mn | 2692.70 | 3590.26 | 4487.83 | 4487.83 | 4487.83 | 4487.83 |
| | +Mu | 1002.71 | 859.26 | 914.90 | 589.04 | 843.35 | 517.48 |
| | -Mu | 877.26 | 751.91 | 768.07 | 557.16 | 705.95 | 494.50 |

| Cuadro 40. Resultados de diseño por flexión para propiedades mecánicas de la madera del modelo S 100-300 MPa | | | | | | | |
|---|----------|---------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Clasificación | Momentos | Combinación (kgf.m) | | | | | |
| | | CU1 | CU2 | CU5+ | CU5- | CU6+ | CU6- |
| Tipo 1-C | Mn | 2692.70 | 3590.26 | 4487.83 | 4487.83 | 4487.83 | 4487.83 |
| | +Mu | 261.40 | 223.84 | 290.54 | 101.42 | 271.94 | 82.82 |
| | -Mu | 276.40 | 236.89 | 303.59 | 121.60 | 283.86 | 102.56 |
| Tipo 1-D | Mn | 2692.70 | 3590.26 | 4487.83 | 4487.83 | 4487.83 | 4487.83 |
| | +Mu | 452.88 | 387.96 | 434.15 | 245.03 | 401.87 | 212.75 |
| | -Mu | 478.43 | 410.06 | 455.12 | 267.80 | 420.95 | 234.84 |
| Tipo 1-E | Mn | 2692.70 | 3590.26 | 4487.83 | 4487.83 | 4487.83 | 4487.83 |
| | +Mu | 523.43 | 448.44 | 487.07 | 287.95 | 449.75 | 260.63 |
| | -Mu | 552.88 | 473.87 | 510.95 | 321.65 | 471.47 | 283.56 |

| Cuadro 41. Resultados de diseño por flexión para propiedades mecánicas de la madera del modelo S 300-600 MPa | | | | | | | |
|---|----------|---------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Clasificación | Momentos | Combinación (kgf.m) | | | | | |
| | | CU1 | CU2 | CU5+ | CU5- | CU6+ | CU6- |
| Tipo 1-C | Mn | 2692.70 | 3590.26 | 4487.83 | 4487.83 | 4487.83 | 4487.83 |
| | +Mu | 364.73 | 312.41 | 396.12 | 150.84 | 370.14 | 124.86 |
| | -Mu | 348.06 | 298.32 | 366.60 | 169.27 | 341.75 | 144.69 |
| Tipo 1-D | Mn | 2692.70 | 3590.26 | 4487.83 | 4487.83 | 4487.83 | 4487.83 |
| | +Mu | 631.66 | 541.21 | 596.32 | 351.04 | 551.27 | 305.99 |
| | -Mu | 602.39 | 516.32 | 557.35 | 357.94 | 514.33 | 315.39 |
| Tipo 1-E | Mn | 2692.70 | 3590.26 | 4487.83 | 4487.83 | 4487.83 | 4487.83 |
| | +Mu | 730.07 | 625.56 | 670.13 | 424.84 | 618.04 | 372.76 |
| | -Mu | 696.18 | 596.71 | 627.69 | 427.50 | 577.97 | 378.33 |

| Cuadro 42. Resultados de diseño por cortante para propiedades mecánicas de la madera del modelo teórico | | | | | | | |
|--|----------|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Clasificación | Cortante | Combinación (kgf) | | | | | |
| | | CU1 | CU2 | CU5+ | CU5- | CU6+ | CU6- |
| Tipo 1-C | Vn | 13262.49 | 17683.32 | 22104.15 | 22104.15 | 22104.15 | 22104.15 |
| | +Vu | 158.63 | 135.94 | 252.18 | 88.77 | 252.18 | 87.45 |
| | -Vu | 1017.37 | 872.06 | 1173.73 | 352.34 | 1101.05 | 279.66 |
| Tipo 1-D | Vn | 13262.49 | 17683.32 | 22104.15 | 22104.15 | 22104.15 | 22104.15 |
| | +Vu | 274.60 | 235.33 | 253.17 | 158.70 | 252.18 | 139.10 |
| | -Vu | 1167.40 | 1509.47 | 1731.46 | 910.07 | 1605.66 | 784.27 |
| Tipo 1-E | Vn | 13262.49 | 17683.32 | 22104.15 | 22104.15 | 22104.15 | 22104.15 |
| | +Vu | 317.37 | 272.00 | 285.25 | 190.78 | 262.59 | 168.13 |
| | -Vu | 2034.63 | 1744.00 | 1936.68 | 1115.29 | 1791.34 | 969.94 |

| Cuadro 43. Resultados de diseño por cortante para propiedades mecánicas de la madera del modelo S 100-300 MPa | | | | | | | |
|--|----------|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Clasificación | Cortante | Combinación (kgf) | | | | | |
| | | CU1 | CU2 | CU5+ | CU5- | CU6+ | CU6- |
| Tipo 1-C | Vn | 13262.49 | 17683.32 | 22104.15 | 22104.15 | 22104.15 | 22104.15 |
| | +Vu | 91.15 | 78.09 | 252.18 | 53.04 | 252.18 | 56.54 |
| | -Vu | 1084.85 | 929.91 | 1239.23 | 388.07 | 1161.73 | 310.57 |
| Tipo 1-D | Vn | 13262.49 | 17683.32 | 22104.15 | 22104.15 | 22104.15 | 22104.15 |
| | +Vu | 157.85 | 135.26 | 252.18 | 86.02 | 252.18 | 74.76 |
| | -Vu | 1877.75 | 1609.54 | 1833.91 | 982.75 | 1699.77 | 848.61 |
| Tipo 1-E | Vn | 13262.49 | 17683.32 | 22104.15 | 22104.15 | 22104.15 | 22104.15 |
| | +Vu | 182.43 | 156.32 | 252.18 | 104.46 | 156.14 | 91.44 |
| | -Vu | 2169.57 | 1859.68 | 2052.77 | 1201.61 | 1897.79 | 1046.63 |

| Cuadro 44. Resultados de diseño por cortante para propiedades mecánicas de la madera del modelo S 300-600 MPa | | | | | | | |
|--|----------|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Clasificación | Cortante | Combinación (kgf) | | | | | |
| | | CU1 | CU2 | CU5+ | CU5- | CU6+ | CU6- |
| Tipo 1-C | Vn | 13262.49 | 17683.32 | 22104.15 | 22104.15 | 22104.15 | 22104.15 |
| | +Vu | 120.81 | 103.51 | 252.18 | 68.96 | 252.18 | 43.30 |
| | -Vu | 1055.19 | 904.49 | 1210.65 | 372.15 | 1135.27 | 296.77 |
| Tipo 1-D | Vn | 13262.49 | 17683.32 | 22104.15 | 22104.15 | 22104.15 | 22104.15 |
| | +Vu | 209.16 | 179.24 | 252.18 | 118.18 | 252.18 | 103.25 |
| | -Vu | 1826.44 | 1565.56 | 1789.09 | 950.59 | 1658.62 | 820.12 |
| Tipo 1-E | Vn | 13262.49 | 17683.32 | 22104.15 | 22104.15 | 22104.15 | 22104.15 |
| | +Vu | 241.74 | 207.16 | 252.18 | 142.61 | 252.18 | 125.36 |
| | -Vu | 2110.26 | 1808.84 | 2001.96 | 1163.46 | 1851.22 | 1012.71 |

| Cuadro 45. Resultados de diseño por compresión para propiedades mecánicas de la madera del modelo teórico | | | | | | | |
|--|------------|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Clasificación | Compresión | Combinación (kgf) | | | | | |
| | | CU1 | CU2 | CU5+ | CU5- | CU6+ | CU6- |
| Tipo 1-C | Pn | 21931.62 | 29242.17 | 36552.71 | 36552.71 | 36552.71 | 36552.71 |
| | +Pu | | | | 219.40 | | 249.49 |
| | -Pu | 1505.53 | 1162.48 | 2213.24 | 1.58 | 2145.69 | 1.43 |
| Tipo 1-D | Pn | 21931.62 | 29242.17 | 36552.71 | 36552.71 | 36552.71 | 36552.71 |
| | +Pu | | | | | | 29.00 |
| | -Pu | 2801.58 | 2273.38 | 3185.28 | 937.11 | 3025.15 | 776.98 |
| Tipo 1-E | Pn | 21931.62 | 29242.17 | 36552.71 | 36552.71 | 36552.71 | 36552.71 |
| | +Pu | | | | | | |
| | -Pu | 3277.84 | 2681.61 | 3542.48 | 1294.31 | 3348.34 | 1100.17 |

| Cuadro 46. Resultados de diseño por compresión para propiedades mecánicas de la madera del modelo S 100-300 MPa | | | | | | | |
|--|------------|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Clasificación | Compresión | Combinación (kgf) | | | | | |
| | | CU1 | CU2 | CU5+ | CU5- | CU6+ | CU6- |
| Tipo 1-C | Pn | 21931.62 | 29242.17 | 36552.71 | 36552.71 | 36552.71 | 36552.71 |
| | +Pu | | | | 307.73 | | 327.34 |
| | -Pu | 1544.56 | 1195.94 | 2253.65 | 1.58 | 2183.31 | 1.43 |
| Tipo 1-D | Pn | 21931.62 | 29242.17 | 36552.71 | 36552.71 | 36552.71 | 36552.71 |
| | +Pu | | | | 144.27 | | 179.45 |
| | -Pu | 2869.11 | 2331.27 | 3247.07 | 976.63 | 3082.12 | 811.68 |
| Tipo 1-E | Pn | 21931.62 | 29242.17 | 36552.71 | 36552.71 | 36552.71 | 36552.71 |
| | +Pu | | | | 85.05 | | 125.87 |
| | -Pu | 3355.90 | 2748.52 | 3612.16 | 1341.72 | 3412.44 | 1142.00 |

| Cuadro 47. Resultados de diseño por compresión para propiedades mecánicas de la madera del modelo S 300-600 MPa | | | | | | | |
|--|------------|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Clasificación | Compresión | Combinación (kgf) | | | | | |
| | | CU1 | CU2 | CU5+ | CU5- | CU6+ | CU6- |
| Tipo 1-C | Pn | 21931.62 | 29242.17 | 36552.71 | 36552.71 | 36552.71 | 36552.71 |
| | +Pu | | | | 268.24 | | 292.56 |
| | -Pu | 1527.73 | 1181.52 | 2236.46 | 1.58 | 2167.32 | 1.43 |
| Tipo 1-D | Pn | 21931.62 | 29242.17 | 36552.71 | 36552.71 | 36552.71 | 36552.71 |
| | +Pu | | | | 68.76 | | 112.08 |
| | -Pu | 2840.00 | 2306.32 | 3220.65 | 959.36 | 3057.79 | 796.49 |
| Tipo 1-E | Pn | 21931.62 | 29242.17 | 36552.71 | 36552.71 | 36552.71 | 36552.71 |
| | +Pu | | | | | | 46.44 |
| | -Pu | 3322.25 | 2719.68 | 3582.34 | 1321.05 | 3385.03 | 1123.74 |

| Cuadro 48. Resultados de diseño por flexo-compresión según las propiedades mecánicas de la madera de los modelos | | | | | | | | |
|---|-------------|------|------|------|------|------|------------|-----------|
| Clasificación | Combinación | | | | | | Límite (m) | Condición |
| | CU1 | CU2 | CU5+ | CU5- | CU6+ | CU6- | | |
| Tipo 1-C PT | 0.19 | 0.12 | 0.12 | 0.05 | 0.12 | 0.04 | 1.00 | Cumple |
| Tipo 1-D PT | 0.34 | 0.21 | 0.19 | 0.11 | 0.18 | 0.10 | 1.00 | Cumple |
| Tipo 1-E PT | 0.40 | 0.25 | 0.22 | 0.13 | 0.20 | 0.12 | 1.00 | Cumple |
| Tipo 1-C S 100-300 | 0.11 | 0.07 | 0.07 | 0.03 | 0.07 | 0.02 | 1.00 | Cumple |
| Tipo 1-D S 100-300 | 0.20 | 0.12 | 0.11 | 0.06 | 0.10 | 0.05 | 1.00 | Cumple |
| Tipo 1-E S 100-300 | 0.23 | 0.14 | 0.12 | 0.07 | 0.11 | 0.06 | 1.00 | Cumple |
| Tipo 1-C S 300-600 | 0.14 | 0.09 | 0.09 | 0.04 | 0.09 | 0.03 | 1.00 | Cumple |
| Tipo 1-D S 300-600 | 0.25 | 0.16 | 0.14 | 0.08 | 0.13 | 0.07 | 1.00 | Cumple |
| Tipo 1-E S 300-600 | 0.30 | 0.18 | 0.16 | 0.10 | 0.15 | 0.09 | 1.00 | Cumple |

PT: Poste Teórico, S: Sauce.

| Cuadro 49. Valores de deflexión (m) en la cúspide del poste según la modelación en SAP2000 | | | | | | | | |
|---|-------------|-------|-------|--------|-------|--------|------------|-----------|
| Clasificación | Combinación | | | | | | Límite (m) | Condición |
| | CU1 | CU2 | CU5+ | CU5- | CU6+ | CU6- | | |
| Tipo 1-C PT | 0.008 | 0.007 | 0.014 | -0.002 | 0.014 | -0.003 | 0.055 | Cumple |
| Tipo 1-D PT | 0.012 | 0.010 | 0.017 | 0.000 | 0.016 | -0.001 | 0.055 | Cumple |
| Tipo 1-E PT | 0.013 | 0.011 | 0.019 | 0.001 | 0.018 | 0.000 | 0.055 | Cumple |
| Tipo 1-C S 100-300 | 0.005 | 0.005 | 0.013 | -0.005 | 0.013 | -0.006 | 0.055 | Cumple |
| Tipo 1-D S 100-300 | 0.010 | 0.008 | 0.017 | -0.002 | 0.016 | -0.003 | 0.055 | Cumple |
| Tipo 1-E S 100-300 | 0.011 | 0.010 | 0.018 | -0.001 | 0.017 | -0.002 | 0.055 | Cumple |
| Tipo 1-C S 300-600 | 0.006 | 0.005 | 0.013 | -0.004 | 0.012 | -0.005 | 0.055 | Cumple |
| Tipo 1-D S 300-600 | 0.010 | 0.008 | 0.016 | -0.001 | 0.015 | -0.002 | 0.055 | Cumple |
| Tipo 1-E S 300-600 | 0.011 | 0.010 | 0.017 | 0.000 | 0.016 | -0.001 | 0.055 | Cumple |

PT: Poste Teórico, S: Sauce.

Evaluación

Aplicando la matriz de puntuación, se grafica porcentualmente de acuerdo con la condición de cada poste por zona.



Figura 97. Gráfico cantidad porcentual de la condición de los postes de madera inspeccionados en la zona de Alto Varas.



Figura 98. Gráfico cantidad porcentual de la condición de los postes de madera inspeccionados en la zona del Sauce.

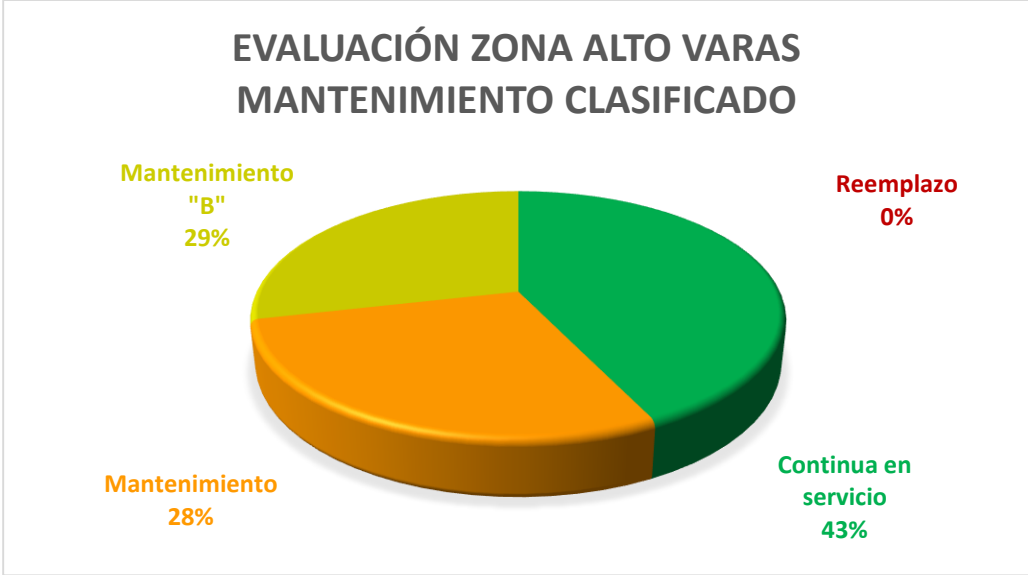


Figura 99. Gráfico cantidad porcentual de la condición de los postes de madera inspeccionados en la zona de Alto Varas.

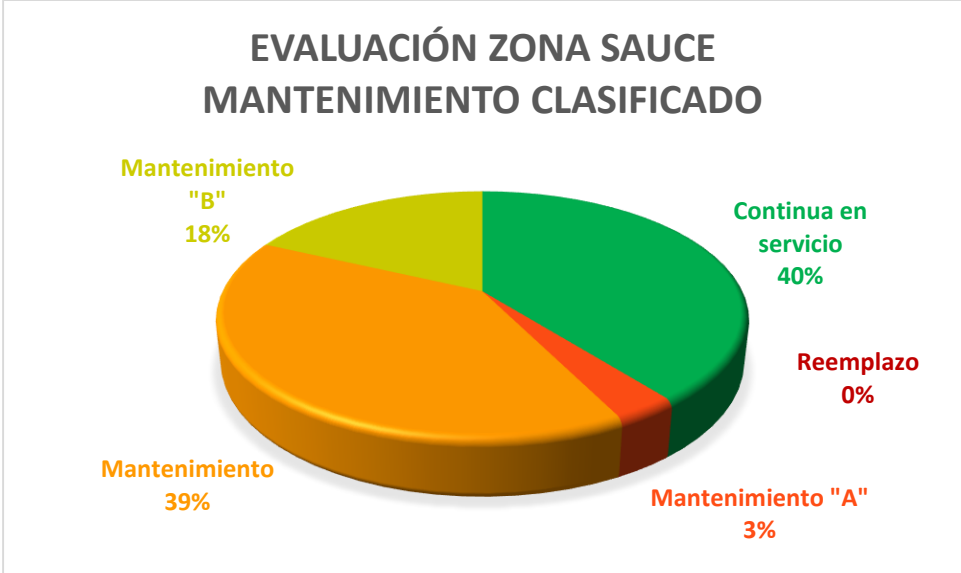


Figura 100. Gráfico cantidad porcentual de la condición de los postes de madera inspeccionados en la zona del Sauce.



Figura 101. Gráfico cantidad porcentual de la condición de los postes de madera inspeccionados según el valor del MOE en la zona del Sauce.



Figura 102. Gráfico cantidad porcentual de la condición de los postes de madera inspeccionados según el valor del MOE en la zona del Sauce.

Análisis de los resultados

Inspección del estado de la madera

A partir de la inspección, se pueden observar, de la figura 72 a la 79, ejemplos de daños que se presentan en la distancia enterrada y 20 cm sobre la línea del suelo.

En la figura 72, se identifica después de desenterrar, una sección superficial sana con presencia de humedad natural del ambiente y el contacto con el suelo.

Se debe considerar que el suelo de las zonas inspeccionadas, retiene la humedad³⁵ y esto propicia las condiciones idóneas para la formación de hongos, más del 20% de humedad en el material y contacto con el suelo,³⁶ por ello resulta en la pudrición de la madera, tal es el caso de las figuras 75, 76 y 77, y como consecuencia se produce la pérdida de sección.

En la figura 74, se observa la formación de líquenes, lo cual consiste en la unión de un hongo más alga, y en la figura 83, se determina un hongo marrón, los cuales son indicadores de biodeterioro causado por la humedad, la temperatura y la falta de protección química, si el poste fue preservado, se perdió el efecto y la durabilidad de la madera se ve reducida con el paso del tiempo³⁷.

El deterioro por hongos reduce la resistencia de la madera, ya que metaboliza la celulosa que le da resistencia al material. La reducción de las propiedades mecánicas puede darse en más del 10% antes de que el daño se haga visible, esto afecta mayormente a la carga máxima por flexión y a la tenacidad. Una de las consecuencias de los hongos es la formación de

grietas a través del grano, la contracción y el colapso del elemento.³⁸

En la figura 73, se conserva el color del preservante CCA, un tono verdoso provocado por el porcentaje de cobre que contiene la mezcla, esto se dio en muy pocos postes, sin embargo, debido a las condiciones de lluvia y al impacto de los rayos ultravioleta, el poste tiende a tomar de color oscuro, casi negro, en muchas ocasiones en la inspección, se identificó que esta coloración oscura estaba sólo sobre un lado de la superficie del poste, esto denota que es donde comúnmente le impactan estas condiciones, pues muchos de los postes se encuentran rodeados de árboles, vegetación alta y espesa.

Caso contrario se visualiza en las figuras 86 y 87, donde se manifiesta una acción de descascamiento sobre la superficie del poste, lo que manifiesta la remoción de la capa superficial del químico protector, por ello se puede ver el color natural de la madera, esto es perjudicial, pues es el preservante la barrera que detiene la formación de agentes dañinos, los cuales provocan la reducción de la resistencia del elemento.

En la figura 80, se observa un agujero a una altura aproximada de un metro y medio, este agujero no corresponde a uno realizado por un pájaro carpintero. Como se mencionó anteriormente, no fue posible realizar la medición de profundidades y anchos de agujeros por pájaro, sin embargo, es de gran importancia identificarlos, debido a que un agujero, dependiendo de sus dimensiones, puede provocar una reducción de la resistencia de la sección transversal de hasta un 57%, según ensayos realizados.³⁸

En la figura 81 y 82, se muestra el dimensionamiento de algunas de las grietas presentes en los postes, en su forma longitudinal no representan una disminución en la resistencia, sin embargo, si la grieta afecta radialmente y la profundidad sobrepasa el 50% del diámetro, indica que el daño en la sección transversal es considerable, esto permite el desarrollo de

³⁵ (Bertsch, Mata, & Henríquez, 1993)

³⁶ (Cruz de León, 2010)

³⁷ (Berrocal, 2019)

³⁸ (Steenhof, 2011)

agentes que provocan la reducción de la sección interna.

En la figura 84 y 85, se visualizan túneles producidos por insectos de manera externa, esta condición puede ejemplificar el desarrollo de insectos y sus pasajes que se presentan en la zona interna del poste, actualmente no existen métodos confiables para estimar la reducción de la resistencia en la madera provocada por este agente biológico, sin embargo, se conoce que muchos de los insectos de madera, se alimentan y fabrican su residencia, y esto causa la destrucción interna, reduciendo la sección transversal, la cual es utilizada en cálculos mecánicos, en este caso, para el soporte de cargas.

Existen gran variedad de insectos que afectan la madera, sin embargo, es difícil identificarlos en sitio y sin el conocimiento biológico adecuado, por ende, lo que más se observó en sitio fueron hormigas, arañas y larvas desconocidas, que, al realizar la medición de profundidad de las grietas, salían en gran cantidad.

En las figuras 88 y 89, se ilustran algunas deformaciones usuales en los postes, debido a que la madera es un material más flexible, estas deformaciones son más comunes de observar cuando hay exceso de tensión o una disminución en la rigidez del material. Para la inspección no fue posible medir las deformaciones, pero se le atribuye a la evaluación para aumentar la calificación.

Para los resultados de módulo elástico dinámico (MOE_d) radial, obtenidos a partir del ultrasonido, se realizó gráficos de probabilidad, a los que fueron probadas las distribuciones probabilísticas: normal, exponencial, gamma y Weibull; debido a que son las más utilizadas para la descripción de este tipo de datos.

En el gráfico de MOE_d de Sauce, figura 90, se observa que ninguna de las distribuciones se ajusta a los datos, debido a que todos los p-value son menores al nivel de significancia escogido de 5%. La distribución que mejor se adapta es la exponencial (p-value= 1.4%). En el histograma, figura 92, se muestra que la línea de distribución exponencial se adapta bien, a excepción de los datos en el rango de 1400 a 1600 MPa, que obtuvieron una frecuencia alta, lo que disminuye la representatividad de la distribución. Sin embargo,

se denota que la mayor representación está en los valores pequeños (100 a 300 MPa).

Por otro lado, los postes de Alto Varas tienen datos más uniformes y centrados, por lo que se observa (figura 91) que la distribución exponencial no se acerca en el ajuste, puesto que tiene un p-value= 0.3%. Mientras que las otras distribuciones se pueden adaptar completamente al conjunto de datos. Se seleccionó la distribución normal, ya que el p-value= 55.1% y es una de las distribuciones más utilizadas para describir los datos de ensayos de caracterización de materiales.

La velocidad de onda que se transmite a través de la madera del poste puede verse afectada por el contenido de humedad, la temperatura, la orientación del grano, la densidad y el deterioro.³⁹

Por lo que, de acuerdo con los datos y a que las condiciones ambientales eran similares entre las zonas, se deduce que los postes del Sauce obtuvieron menor valor de módulo elástico, pues el deterioro interno es mayor, ya que esto no se logró verificar en sitio, para realizarlo es necesario hacer un corte transversal y los postes aún debían continuar en servicio.

Debido a que no existen registros, no es posible considerar que las líneas se hayan construido o no en el mismo año; además no se conocen las garantías ni las condiciones de calidad del proveedor de postes, pues se puede considerar que algunos lotes hayan tenido un proceso de tratamiento irregular, provocando que el preservante no ingresara a la madera adecuadamente, por ello el efecto duraría menor cantidad de años y el efecto de biodeterioro avanzara con mayor velocidad.

Esto puede representar la alta variación de datos obtenidos para la zona del Sauce, adicionalmente, el pueblo se ubica al límite con la provincia de Limón, por ello la sensación térmica y de humedad son mayores que en Alto Varas.

Con los datos del módulo elástico radial se obtienen los valores de los cuadros 15 y 16, a partir de los radios elásticos y se procede a clasificarlos por rangos a partir de las figuras 92 y 93. Con los valores teóricos de las propiedades de los pinos del cuadro 17, es posible evidenciar que, para el Sauce, el rango 100-300 MPa, obtuvo una pérdida del 75% de su valor teórico y el rango de 300-600 MPa, presenta una disminución del 47%.

³⁹ (Hassan, Horáček, & Tippner)

Por el contrario, los valores de la zona de Alto Varas, registrados con el ultrasonido, superan los valores registrados como teóricos.

Se conoce que conforme el tiempo pasa, el módulo de elasticidad disminuye, y si el módulo disminuye, también lo hace la rigidez y el esfuerzo de flexión.⁴⁰ Lo que varía la velocidad en la cual disminuyen estos factores, es el deterioro que presenta el elemento, como se observa entre Alto Varas y el Sauce.

Comportamiento estructural

Entre los objetivos del proyecto, se tiene la evaluación del cumplimiento estructural del elemento vertical, para esto se obtuvieron tres tipificaciones de postes, de acuerdo con los tres ángulos de instalación de líneas eléctricas. A su vez, cada una de las anteriores se clasificaron en tres adicionales, según las características mecánicas del material, madera de Pino Sureño, en total se realizaron nueve modelos en el software SAP2000.

En el cuadro 18, se presentan las fuerzas que ejercen los conductores sobre la estructura, de acuerdo al ángulo de desvío de la línea eléctrica. Se tiene que las fuerzas más críticas resultan del ángulo mayor (90°), las cuales duplican los resultados del ángulo menor (30°), para todos los conductores.

De acuerdo con lo descrito en el apartado de la metodología, se calculan las cargas accidentales que pueden actuar en la región de inspección del país, carga de viento y sismo.

Los resultados de la carga de viento se presentan del cuadro 19 al 23, y los valores para obtener la fuerza sísmica se presentan del cuadro 24 al 35.

En el cuadro 31, se indican diferentes resultados para la sobrecarga muerta (SCM), estos valores varían debido a que el montaje de los elementos eléctricos es diferente para cada ángulo de desvío, según el Manual de Normas de Construcción⁴¹.

Se seleccionó el valor de mayor peso para la obtención de la fuerza sísmica, pues representa

la situación más crítica al que un poste se somete cuando la carga accidental actúa. Así mismo, en el cuadro 29, se identifican los pesos de equipo adicional que se puede presentar sobre un poste, como situación crítica, sin embargo, no necesariamente todos los postes pueden tener tal instalación. En los cuadros 26, 27 y 28, se detallan los pesos de cada elemento de montaje, causantes de la variación de los resultados finales de sobrecarga muerta.

En el cuadro 30, se considera una carga temporal (o carga viva), es decir, una carga que está en movimiento o que no siempre se presenta en la estructura, de 80 kg, considerando un solo técnico, realizando inspección o mantenimiento. De acuerdo con los técnicos de la región, para un poste de madera sólo una persona puede trabajar en el elemento a la vez, sin embargo, actualmente se realizan los trabajos de mantenimiento con camiones grúa.

El valor de carga viva sufre una disminución en la participación del peso total que ejerce un efecto sobre el poste, de un 15%, como se observa en el cuadro 32, debido a la especificación del Código Sísmico de Costa Rica⁴², donde se indica que, para la determinación de la carga sísmica, el peso de cada nivel de una estructura, constituye el peso de la carga permanente más una fracción de su carga temporal. Para el caso de un poste de instalación eléctrica, se considera de un nivel y una fracción del 15% de carga temporal, como la opción de cargas en edificios, ya que es la opción que se adecua a la estructura del elemento vertical, entre las que proporciona el código.

Para el cálculo del coeficiente sísmico, los parámetros constantes se presentan en el cuadro 33. El factor espectral dinámico (FED) es el único parámetro que varía (cuadro 34), pues el periodo (T) obtenido del software SAP2000 de cada modelo, da distinto resultado (figura 94, 95 y 96). El cambio en los resultados se debe a que cada modelo tiene una configuración distinta en las propiedades mecánicas del material y el periodo es en función de la masa y la rigidez de la estructura.

Los modelos se identifican por la variación en el módulo de elasticidad. Al aumentar o disminuir el módulo de elasticidad, la rigidez del

⁴⁰ (Steenhof, 2011)

⁴¹ (Instituto Costarricense de Electricidad)

⁴² (Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica, 2010)

material del elemento estructural, aumenta o disminuye respectivamente.

Como se observa en el cuadro 34, a mayor valor de módulo de elasticidad, menor resultado en el periodo, debido a que la rigidez es mayor, por lo tanto, la estructura tarda menos en completar un ciclo de vibración, contrario para el elemento que presenta una mayor degradación del material.

En el cuadro 36, se identifica que la carga natural que predomina en el diseño es la carga de viento, comparado con la fuerza sísmica más crítica, esto es posible debido a que, en este caso, un poste de madera pesa menos y es más flexible que los postes de otros materiales, como el concreto.

Por medio de los modelos de la representación del poste, en el programa SAP2000, con las cargas aplicadas, se realiza el análisis estructural y se obtienen los valores últimos de diseño, momento último (M_u), cortante último (V_u) y carga axial última (P_u).

Los valores últimos se comparan con los valores nominales, calculados de acuerdo a la metodología, momento nominal (M_n), cortante nominal (V_n) y carga axial nominal (P_n), respectivamente.

Los resultados del diseño por flexión se presentan en los cuadros 39, 40 y 41, todos los valores de momento último son menores que los valores de momento nominal, por lo tanto, se cumplen con los límites de diseño.

Para los modelos con las propiedades mecánicas teóricas (cuadro 39), para la clasificación Tipo 1-C, el mayor momento se tiene en la combinación de cargas CU5+, de 538.67 kg.m y representa el 12.00% del momento nominal calculado. En la clasificación Tipo 1-D y Tipo 1-E, en la combinación CU1, se identifica el momento último de mayor valor, de 857.56 kg.m y 1002.71 kg.m, es decir, representan un 31.85% y 37.24%, con relación al momento nominal.

Para los modelos S 100-300 MPa (cuadro 40) y S 300-600 MPa (cuadro 41), para la clasificación Tipo 1-C, los momentos últimos de mayor valor se presentan en la combinación CU5+, de 303.59 kg.m y 396.12 kg.m, lo que representa menos del 10% de momento nominal. Para la clasificación Tipo 1-D y Tipo 1-E, en la combinación CU1, se identifica el momento último de mayor valor, de 478.43 kg.m y 631.66 kg.m, y 552.88 kg.m y 730.07 kg.m, respectivamente para

cada modelo. los cuales no superan el 30% del momento nominal de 2692.70 kg.m, por ello se verifica el cumplimiento del diseño.

La clasificación Tipo 1-E refleja los momentos más altos, debido a que es el modelo con las cargas más grandes y a su vez, el modelo con las propiedades teóricas presenta los momentos más altos por sobre las propiedades experimentales, esto se debe a que la resistencia del poste es mayor.

En los cuadros 42, 43 y 44, se muestran los resultados de diseño por cortante. Para el modelo con las propiedades mecánicas teóricas (cuadro 42), para la clasificación Tipo 1-C y Tipo 1-D, la combinación CU5+ presenta el valor mayor de cortante último de 1173.73 kg y 1731.46 kg. Para la clasificación Tipo 1-E, en la combinación CU1, se obtiene un cortante último de 2034.63 kg.

Para los modelos S 100-300 MPa (cuadro 43) y S 300-600 MPa (cuadro 44), para la clasificación Tipo 1-C, la combinación CU5+ presenta el valor mayor de cortante último de 1239.23 kg y 1210.65 kg. Para la clasificación Tipo 1-D y Tipo 1-E, en la combinación CU1, se obtiene un cortante último de mayor valor de 1877.75 y 1826.44 kg, y 2110.26 kg y 2169.57 kg, respectivamente.

Con respecto al cortante nominal, los resultados no superan el 20%, por lo que cumplen con los límites de diseño. De acuerdo a los diagramas de cortante⁴³, el valor más crítico se ubica en la unión de la retenida secundaria, debido a que es el punto en donde se aplica la mayor cantidad de cargas.

En los cuadros 45, 46 y 47, se muestran los resultados de diseño por compresión. Para todos los modelos y todas las clasificaciones, la combinación CU5+ presenta el valor mayor de carga axial última, con resultados entre 2213.24 kg hasta 3612.16 kg, los cuales no superan el 10% de la carga axial nominal de 36552.71 kg, por ello se verifica el cumplimiento del diseño.

Se identifica que los valores de compresión son mayores en la clasificación Tipo 1-E, y aumentan conforme menor es el valor de módulo de elasticidad, en el modelo S 100-300 MPa, al igual que los resultados de cortante, debido a la disminución de resistencia por el deterioro.

La verificación del diseño por flexo-compresión se muestra en el cuadro 48, de

⁴³ Apéndice 1

acuerdo con la ecuación 27, se tiene que el límite para el cumplimiento de la combinación de la resistencia a flexión y a la carga axial, debe ser menor a uno. Los resultados de flexo-compresión no superan el 50% del valor límite, por lo tanto, la combinación de estas cargas no lleva a la falla de la columna por diseño.

El ICE no proporciona o establece una deflexión límite en la cúspide para postes de madera, sin embargo, se toma como referencia general un 25% de las dimensiones de la base⁴⁴. En el cuadro 49, se muestran los datos de deflexión para todos los modelos y se determinan que son menores que el límite admisible 0.055 m. Las deflexiones de mayor valor se presentan en la combinación CU5+, la cual considera la carga del viento, los valores son similares entre modelos, con una diferencia de entre el 5% al 9%, con respecto a los valores del poste teórico.

Adicionalmente, con los valores que indica el software SAP2000, para cada nodo, se comparó la deformación obtenida y resultaron menores que el valor límite.

Evaluación

La matriz de evaluación se definió en la metodología, con esta y con la toma de datos de la inspección en sitio, se dividen los resultados en tres partes.

Inicialmente, en la figura 97, para la zona de Alto Varas, se estima que un 43% de los postes, pueden continuar en servicio, debido a que no se identifican como deteriorados, un 57% de los elementos se les debe proporcionar mantenimiento para que continúen en servicio y no se presentan postes para reemplazo inmediato por alto deterioro. En la figura 98, para la zona del Sauce, tanto los postes que continúan en servicio, como a los que se les debe proporcionar mantenimiento, se estima un 50% respectivamente.

Para los postes que requieren mantenimiento, se identifica la cantidad, estuvieron próximos a entrar en la categoría de reemplazo (mantenimiento A), y aquellos que, por un valor unitario, sobrepasaron la categoría de continuar en servicio (mantenimiento B).

En la figura 99, para la zona de Alto Varas, se obtiene que un 43% de los postes pueden continuar en servicio y se mantiene que no hay cifra para postes con reemplazo inmediato. Se identifica un 29% de postes clasificados como mantenimiento B y un 28% de postes que requieren de mantenimiento.

En la figura 100, para la zona del Sauce, se tiene un 40% de postes que pueden continuar en servicio y se mantiene que no hay cifra para postes con reemplazo inmediato. Un 39% de los postes requieren mantenimiento y se obtiene un 3% clasificados como mantenimiento A, y un 18% como mantenimiento B.

Por último, a los datos de la evaluación visual se adicionan los datos de módulo de elasticidad obtenidos por medio del ultrasonido, sólo para los postes que presentan un módulo menor a 300 MPa, por ello la zona de Alto Varas se excluye.

En la figura 101, se obtiene que un 39% de los postes pueden continuar en servicio, a un 21% de los elementos se les debe proporcionar mantenimiento y un 40% de los postes se clasifican para reemplazar por disminución en el módulo elástico.

En la figura 102, se realiza la segunda clasificación para el grupo de postes por mantenimiento. Se tiene un 40% de postes que pueden continuar en servicio, un 8% de los postes requieren mantenimiento y se obtiene un 2% clasificados como mantenimiento A, y un 10% como mantenimiento B, y un 40% de los postes se clasifican para reemplazar por la pérdida de más del 75% en el módulo elástico.

⁴⁴ (González Lee, 2012)

Conclusiones y Recomendaciones

El desarrollo del proyecto se llevó a cabo para el estudio de nueve modelos digitales en el programa estructural SAP2000. La clasificación de los modelos parte de las cargas resultantes por los ángulos de desvío del diseño eléctrico, y las propiedades mecánicas calculadas a partir del módulo elástico de la madera, teórica y experimental.

Los valores experimentales obtenidos del módulo de elasticidad, demuestran una disminución en su valor conforme transcurre el tiempo y se expone a las condiciones climáticas y biológicas. Específicamente, los postes de la zona del Sauce, casi un 40% de los postes valorados, resultaron con una disminución de más del 75% de módulo elástico.

Por el contrario, para la zona de Alto Varas, de acuerdo con la comparación entre los valores teóricos⁴⁵, no se reflejan valores con disminución en el MOE, sino que, los valores son superiores de hasta más del 50%.

Se concluye que, la variación de los resultados experimentales se debe a la calidad de la madera, al carecer de documentación sobre la adquisición de los elementos, no se puede dictar que sean del mismo proveedor, ni del mismo lote, y a su vez, del mismo año de la preservación química. Adicionalmente, se atribuye que, en la zona del Sauce, la sensación térmica y de humedad puede llegar a ser mayor.

El análisis estructural concluye que todos los modelos cumplen con los valores límites de diseño por flexión, compresión y cortante. Los resultados destacan que, aunque algunas propiedades mecánicas del material han disminuido considerablemente, no impacta a la revisión estructural, por lo tanto, son capaces de resistir las cargas.

Sin embargo, los resultados extraídos de SAP2000, sí presentaron variaciones, se concluye que entre mayor sea la carga aplicada y menor el valor del módulo elástico, son mayores las cargas últimas, debido a la pérdida de resistencia que sufre el elemento.

Para los valores resultantes del diseño por flexión, no superaron el 40% del momento nominal; para el diseño por cortante, se obtuvo que no superan el 20% del cortante nominal y, para el diseño por compresión, los valores no sobrepasaron el 10% de la carga axial nominal.

Se concluye del proceso de evaluación, para la zona de Alto Varas, que un 43% de los postes pueden continuar en servicio, un 57% de los elementos se les debe proporcionar mantenimiento para que continúen y no se presentan postes para reemplazo inmediato por alto deterioro.

Para la zona del Sauce, se obtuvo un 40% de postes que pueden continuar en servicio, un 18% de los postes requieren mantenimiento, un 2% de los postes que necesitan mantenimiento están próximos a clasificarse como reemplazo inmediato, un 40% de los postes se clasifican para reemplazar por la pérdida de más del 75% del módulo elástico, esto indica pérdida de sección y rigidez en el elemento.

La matriz de evaluación se elaboró a partir de la inspección en sitio. Con la inspección se determinó la presencia de hongos, líquenes y nido de insectos, como agentes biológicos.

Se evidenció presencia de grietas, deformación por tensión y agujeros de carpintero. Los agujeros son provocados por un agente biológico, sin embargo, impacta en los resultados mecánicos del comportamiento de la estructura, provocando una reducción en la resistencia de la sección transversal de hasta un 57%⁴⁶. No obstante, los factores no son concluyentes para el análisis estructural, debido a la falta de pruebas técnicas no realizadas para el presente proyecto.

Se reportó descascaramiento sobre la superficie del poste, lo que manifiesta reducción del efecto del químico preservante, provocando la

⁴⁵ (Forest Products Laboratory, 2010)

⁴⁶ (Steenhof, 2011)

disminución en la durabilidad de la madera, y pérdida de sección a nivel de la línea de tierra.

Se concluye que la disminución de la sección transversal superficial, es producto de los hongos, causado por la humedad, la temperatura y la falta de protección química. El deterioro por hongos reduce la resistencia de la madera, esto metaboliza la celulosa que le da resistencia al material. La reducción de las propiedades mecánicas puede darse en más del 10%⁴⁷.

Se concluye que el principal mantenimiento debe realizarse al nivel de la línea del suelo del poste. Con productos que contengan cobre, creosota, fluoruro de sodio, dicromato de sodio, bicromato de sodio, arseniato de sodio, entre otros, como los productos fungicidas o preservantes químicos, que se aplican directamente en la madera. Adicionalmente, la aplicación de insecticidas inyectados directamente al interior de las grietas, para el tratamiento de nidos de insectos. Este tratamiento debe realizarse cada 8-10 años para sobrepasar los 45 años de vida útil que se le promedia a los postes de Pino.

La matriz de evaluación es aplicable para zonas del país con condiciones similares a las descritas en el presente proyecto, cuando las condiciones ambientales cambien, al aumentar o disminuir la temperatura o la humedad del sitio, los factores biológicos no son necesariamente los mismos.

Se concluye que la muestra no es representativa, pues la cantidad por inspeccionar, no fue sometida a valores probabilísticos. Además, del 19.8% de postes de madera de la zona Turrialba-Cónccavas, el proyecto se aplicó sólo para menos del 2% de los postes.

Se recomienda realizar pruebas de flexión en postes, para identificar la disminución en la resistencia por el paso de los años de servicio, aprovechando aquellos postes que se retiran al hacer cambios en la línea eléctrica.

Realizar un modelo analizando las condiciones de interacción suelo estructura, para determinar el comportamiento dinámico del elemento, ante las cargas permanentes y accidentales. Asimismo, realizar la verificación de la efectividad en la profundidad de empotramiento del elemento.

Se recomienda realizar el cálculo de la fuerza de viento con el nuevo lineamiento de viento de Costa Rica, para comparar los resultados y determinar si existe algún cambio, paralelamente a lo estipulado en el Reglamento de Construcciones (1983). Adicionalmente, se recomienda, si la norma a utilizar así lo especifica para el cálculo del coeficiente de arrastre, se considere distinto para conductores eléctricos y el poste.

Para el presente proyecto se utilizaron combinaciones de carga para edificaciones, establecidas en el Código Sísmico de Costa Rica, sin embargo, se recomienda realizar la sustitución de las mismas en caso de que se establezcan para líneas de distribución específicamente.

Para los cables de retenida, se recomienda un análisis para determinar si las propiedades del acero se pueden garantizar a través del tiempo o si influyen en el comportamiento del poste al disminuir la resistencia de la madera.

Se recomienda plantear un proceso de inspección de postes de madera cada 8-10 años (sugerido para zonas tropicales), para recopilar una adecuada base de datos sobre el comportamiento y avance de daños con el paso del tiempo, para realizar los tratamientos correspondientes y prolongar el uso de la estructura, disminuyendo las acciones por mantenimiento correctivo.

Inspeccionar el área de la cúspide del poste, para la identificación del deterioro producto de aves, grietas y daños por el contacto directo de la sección transversal con las condiciones ambientales.

Se recomienda para otras zonas del país, una evaluación probabilística para la toma de la muestra; y el uso de mecanismos no destructivos para la evaluación del deterioro interno del elemento, como el ultrasonido.

Se sugiere el planteamiento de un análisis económico de la sustitución de los postes de madera por otro material contra el costo del mantenimiento con productos químicos. Adicionalmente, se recomienda a la institución el resguardo histórico de los documentos, que respalden el año de la compra, las propiedades, el tratamiento, entre otra información necesaria para el estudio e investigación de las estructuras de soporte de las líneas de distribución eléctrica.

⁴⁷ (Steenhof, 2011)

Apéndices

Apéndice 1

Figuras de diagramas de momento, carga axial y cortante para las combinaciones CU1, CU2, CU5+, CU5-, CU6+ y CU6- para los modelos de poste teórico, S 100-300 MPa y S 300-600 MPa según las clasificaciones Tipo 1-C, Tipo 1-D y Tipo 1-E.

Apéndice 2

Memoria de cálculo de la revisión de diseño por flexión, compresión paralela al grano, cortante y flexo-compresión.

Apéndice 3

Recopilación de datos en campo, fichero de fotografías, evaluación por ultrasonido y resultado de evaluación para un poste en condición verde y amarilla de la zona de Alto Varas, y un poste en condición verde y amarilla de la zona del Sauce, como ejemplificación del muestreo total.

Anexos

Anexo 1

Tabla 4-2. Contenido de humedad de la madera en equilibrio con la temperatura y la humedad relativa.

Anexo 2

Tabla 4-6a. Densidad de la madera en función de la gravedad específica y el contenido de humedad.

Anexo 3

Tabla 5-1. Radios elásticos para varias especies al 12% de contenido de humedad aproximadamente.

Anexo 4

Tabla 5-2. Radio de Poisson para varias especies al 12% de contenido de humedad aproximadamente.

Anexo 5

Tabla 5-3a. Propiedades de resistencia de algunas maderas de comercialización producidas en Estados Unidos.

Referencias

- American Wood Council. (2018). *National Design Specification (NDS) for Wood Construction*. Estados Unidos.
- Asociación Costarricense de Geotecnia. Comisión Código de Cimentaciones de Costa Rica. (2009). *Código de cimentaciones de Costa Rica* (Segunda ed.). San José: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- ASTM International. (2017). ASTM D2555-17a, Standard Practice for Establishing Clear Wood Strength Values. West Conshohocken, PA. Obtenido de www.astm.org
- Berrocal, A. (2019). (S. Castillo, Entrevistador) Cartago.
- Bertsch, F., Henríquez, C., & Mata, R. (1993). *Características de los principales ordenes de suelos presentes en Costa Rica*. Universidad de Costa Rica, Centro de Investigaciones Agronómicas, San José. Obtenido de http://www.mag.go.cr/congreso_agronomico_ix/A01-1277-15.pdf
- Canessa A, E., González T, G., Moya R, R., & Serrano M, R. (2004). *Estudios preliminares sobre la durabilidad natural y la propiedades de preservación de la madera de Melina Gmelina arborea) creciendo en Costa Rica*. Tecnológico de Costa Rica, Centro de Investigación en Integración Bosque Industria CIIBI, Cartago.
- Castillo Barahona, R., & Johanning Cordero, D. (Junio de 2015). Código de viento para Costa Rica. *Boletín Estructuras*(5). Obtenido de <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/1348>
- CATIE. (s.f.). *Estación Meteorológica del CATIE*. Obtenido de www.catie.ac.cr
- Centro de Investigaciones Agronómicas. (2016). *Mapa digital de suelos de Costa Rica*. Universidad de Costa Rica, San José.
- Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica. (2010). *Código Sísmico de Costa Rica*. Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Cruz de León, J. (2010). *Manual para la protección contra el deterioro de la madera*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México. Obtenido de <https://www.conafor.gob.mx/biblioteca/Proteccion-Madera.pdf>
- Curbelo, B. (s.f.). *Madera Estructural*. Cuba. Obtenido de <https://es.slideshare.net/rostorres2002/manual-de-madera-estructural-aplicando-el-mtodo-de-los-esfuerzos-permisibles-ing-basilio-j-curbelocivil-geekscom-61166610>
- Forest Products Laboratory. (2010). *Wood Handbook - Wood as an Engineering Material*. Madison, Wisconsin, U.S.: Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- Frias Valero, E. (2004). *Aportaciones al estudio de las maquinas electricas de flujo axial mediante la aplicacion del metodo de los elementos finitos*. Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Departament d'Enginyeria Elèctrica, España. Obtenido de <http://hdl.handle.net/2117/93606>
- Glen, S. (2014). *Statistics How To*. Obtenido de Anderson-Darling Test & Statistic: <https://www.statisticshowto.datasciencecentral.com/anderson-darling-test/>
- González Lee, E. (2012). *Diseño de una alternativa al uso de postes autoportantes convencionales en líneas de distribución eléctrica, desde un punto de vista estructural y constructivo*. Trabajo Final de Graduación de Licenciatura, Universidad de Costa Rica, Facultad de Ingeniería, San José, Costa Rica.
- Grabher, G., Pereyra, O., Weber, E., & Zaderenko, C. (2015). Determinación de la Correlación entre Mediciones del Módulo de Elasticidad "MOE" y Módulo de Rotura "MOR" en Vigas Laminadas, por Ultrasonido y Máquina Universal de Ensayos. *Yvyrareta*(22), 51-57. Obtenido de

- http://www.yvyrareta.com.ar/images/descargas/N22/Articulo_Grabher_2015.pdf
- Harness, R., & Walters, E. (2005). Woodpeckers and utility pole damage. *IEEE Industry Applications Magazine*, 71-72. Obtenido de www.ieee.org/ias
- Hassan, K., Horáček, P., & Tippner, J. (s.f.). *Evaluation of Stiffness and Strength of Scots Pine wood using resonance frequency and ultrasonic techniques*.
- Instituto Costarricense de Electricidad. (2010). *Documentos de licitación para la adquisición de materiales para líneas de distribución y alumbrado público. LPI No:2010LI-00021-PROV*. San José, Costa Rica.
- Instituto Costarricense de Electricidad. (s.f.). *Manual de Normas de Construcción Tomo II Montajes Normalizados*. San José, Costa Rica.
- Instituto de Desarrollo Rural de Costa Rica. (2014). *Informe de Caracterización Integral Básica Territorio Turrialba-Jiménez*. San José. Obtenido de <https://www.inder.go.cr/turrialba-jimenez/Caracterizacion-Turrialba-Jimenez.pdf>
- Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo. (2018). *Reglamento de Construcciones*. San José, Costa Rica. Obtenido de <http://www.pgrweb.go.cr/scij/>
- iSixSigma. (s.f.). Obtenido de Anderson-Darling Normality Test: <https://www.isixsigma.com/dictionary/anderson-darling-normality-test/>
- Junta de Acuerdo de Cartagena. (1988). *Manual del Grupo Andino para la Preservación de Maderas* (1era. ed.). (P. S. Construcción, Ed.) Lima, Perú.
- Moody, R., & Wolfe, R. (s.f.). *Standard Specifications for Wood Poles*. Forest Products Laboratory, U.S. Department of Agriculture, Madison.
- Moreno, G., & Wottitz, C. (2011). Fijación química del preservante CCA-C en la madera de *Pinus elliotti* Parte 1: Influencia de la temperatura y de la humedad relativa. *Madera, Ciencia y Tecnología*, 13(1), 85-103. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2011000100008>
- Morris Carreño, J., & Paez Riaño, O. (2003). *Postratamiento a postes de madera levantamiento, catastro y diagnóstico de las redes de media y baja tensión en servicio involucradas*. Bogotá.
- Nelson Research. (s.f.). *National Wood Pole Standards*. Nelson Research. Obtenido de https://woodpoles.org/portals/2/documents/WoodPoleCode_Overview.pdf
- Normas Técnicas Complementarias de la Ley de Edificaciones del Estado de Baja California, de Seguridad Estructural en Materia de Diseño por Viento*. (2017). México D.F.
- Osmose. (s.f.). *Wood Pole Restoration System*. Obtenido de <https://www.osmose.com/>
- Programa Chile Califica Red Manufacturera de la Madera de la Región de Maule. (2005). *Documento Técnico N°2 Preservación de la Madera*. (D. Maureira, Ed.) Talca, Chile. Obtenido de www.redmadera.cl
- Steenhof, M. (2011). *Effect of Woodpecker Damage and Wood Decay on Wood Utility Pole Strength*. University of Waterloo, Civil Engineering, Waterloo, Ontario, Canada.
- Tuk Durán, J. (2007). *Madera: Diseño y Construcción*. San José: Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica.

Anexo 1

Tabla 4-2. Contenido de humedad de la madera en equilibrio con la temperatura y la humedad relativa.

Table 4-2. Moisture content of wood in equilibrium with stated temperature and relative humidity

| Temperature | | Moisture content (%) at various relative humidity values | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|-------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| (°C) | (°F) | 5% | 10% | 15% | 20% | 25% | 30% | 35% | 40% | 45% | 50% | 55% | 60% | 65% | 70% | 75% | 80% | 85% | 90% | 95% |
| -1.1 | (30) | 1.4 | 2.6 | 3.7 | 4.6 | 5.5 | 6.3 | 7.1 | 7.9 | 8.7 | 9.5 | 10.4 | 11.3 | 12.4 | 13.5 | 14.9 | 16.5 | 18.5 | 21.0 | 24.3 |
| 4.4 | (40) | 1.4 | 2.6 | 3.7 | 4.6 | 5.5 | 6.3 | 7.1 | 7.9 | 8.7 | 9.5 | 10.4 | 11.3 | 12.3 | 13.5 | 14.9 | 16.5 | 18.5 | 21.0 | 24.3 |
| 10.0 | (50) | 1.4 | 2.6 | 3.6 | 4.6 | 5.5 | 6.3 | 7.1 | 7.9 | 8.7 | 9.5 | 10.3 | 11.2 | 12.3 | 13.4 | 14.8 | 16.4 | 18.4 | 20.9 | 24.3 |
| 15.6 | (60) | 1.3 | 2.5 | 3.6 | 4.6 | 5.4 | 6.2 | 7.0 | 7.8 | 8.6 | 9.4 | 10.2 | 11.1 | 12.1 | 13.3 | 14.6 | 16.2 | 18.2 | 20.7 | 24.1 |
| 21.1 | (70) | 1.3 | 2.5 | 3.5 | 4.5 | 5.4 | 6.2 | 6.9 | 7.7 | 8.5 | 9.2 | 10.1 | 11.0 | 12.0 | 13.1 | 14.4 | 16.0 | 17.9 | 20.5 | 23.9 |
| 26.7 | (80) | 1.3 | 2.4 | 3.5 | 4.4 | 5.3 | 6.1 | 6.8 | 7.6 | 8.3 | 9.1 | 9.9 | 10.8 | 11.7 | 12.9 | 14.2 | 15.7 | 17.7 | 20.2 | 23.6 |
| 32.2 | (90) | 1.2 | 2.3 | 3.4 | 4.3 | 5.1 | 5.9 | 6.7 | 7.4 | 8.1 | 8.9 | 9.7 | 10.5 | 11.5 | 12.6 | 13.9 | 15.4 | 17.3 | 19.8 | 23.3 |
| 37.8 | (100) | 1.2 | 2.3 | 3.3 | 4.2 | 5.0 | 5.8 | 6.5 | 7.2 | 7.9 | 8.7 | 9.5 | 10.3 | 11.2 | 12.3 | 13.6 | 15.1 | 17.0 | 19.5 | 22.9 |
| 43.3 | (110) | 1.1 | 2.2 | 3.2 | 4.0 | 4.9 | 5.6 | 6.3 | 7.0 | 7.7 | 8.4 | 9.2 | 10.0 | 11.0 | 12.0 | 13.2 | 14.7 | 16.6 | 19.1 | 22.4 |
| 48.9 | (120) | 1.1 | 2.1 | 3.0 | 3.9 | 4.7 | 5.4 | 6.1 | 6.8 | 7.5 | 8.2 | 8.9 | 9.7 | 10.6 | 11.7 | 12.9 | 14.4 | 16.2 | 18.6 | 22.0 |
| 54.4 | (130) | 1.0 | 2.0 | 2.9 | 3.7 | 4.5 | 5.2 | 5.9 | 6.6 | 7.2 | 7.9 | 8.7 | 9.4 | 10.3 | 11.3 | 12.5 | 14.0 | 15.8 | 18.2 | 21.5 |
| 60.0 | (140) | 0.9 | 1.9 | 2.8 | 3.6 | 4.3 | 5.0 | 5.7 | 6.3 | 7.0 | 7.7 | 8.4 | 9.1 | 10.0 | 11.0 | 12.1 | 13.6 | 15.3 | 17.7 | 21.0 |
| 65.6 | (150) | 0.9 | 1.8 | 2.6 | 3.4 | 4.1 | 4.8 | 5.5 | 6.1 | 6.7 | 7.4 | 8.1 | 8.8 | 9.7 | 10.6 | 11.8 | 13.1 | 14.9 | 17.2 | 20.4 |
| 71.1 | (160) | 0.8 | 1.6 | 2.4 | 3.2 | 3.9 | 4.6 | 5.2 | 5.8 | 6.4 | 7.1 | 7.8 | 8.5 | 9.3 | 10.3 | 11.4 | 12.7 | 14.4 | 16.7 | 19.9 |
| 76.7 | (170) | 0.7 | 1.5 | 2.3 | 3.0 | 3.7 | 4.3 | 4.9 | 5.6 | 6.2 | 6.8 | 7.4 | 8.2 | 9.0 | 9.9 | 11.0 | 12.3 | 14.0 | 16.2 | 19.3 |
| 82.2 | (180) | 0.7 | 1.4 | 2.1 | 2.8 | 3.5 | 4.1 | 4.7 | 5.3 | 5.9 | 6.5 | 7.1 | 7.8 | 8.6 | 9.5 | 10.5 | 11.8 | 13.5 | 15.7 | 18.7 |
| 87.8 | (190) | 0.6 | 1.3 | 1.9 | 2.6 | 3.2 | 3.8 | 4.4 | 5.0 | 5.5 | 6.1 | 6.8 | 7.5 | 8.2 | 9.1 | 10.1 | 11.4 | 13.0 | 15.1 | 18.1 |
| 93.3 | (200) | 0.5 | 1.1 | 1.7 | 2.4 | 3.0 | 3.5 | 4.1 | 4.6 | 5.2 | 5.8 | 6.4 | 7.1 | 7.8 | 8.7 | 9.7 | 10.9 | 12.5 | 14.6 | 17.5 |
| 98.9 | (210) | 0.5 | 1.0 | 1.6 | 2.1 | 2.7 | 3.2 | 3.8 | 4.3 | 4.9 | 5.4 | 6.0 | 6.7 | 7.4 | 8.3 | 9.2 | 10.4 | 12.0 | 14.0 | 16.9 |
| 104.4 | (220) | 0.4 | 0.9 | 1.4 | 1.9 | 2.4 | 2.9 | 3.4 | 3.9 | 4.5 | 5.0 | 5.6 | 6.3 | 7.0 | 7.8 | 8.8 | 9.9 | | | |
| 110.0 | (230) | 0.3 | 0.8 | 1.2 | 1.6 | 2.1 | 2.6 | 3.1 | 3.6 | 4.2 | 4.7 | 5.3 | 6.0 | 6.7 | | | | | | |
| 115.6 | (240) | 0.3 | 0.6 | 0.9 | 1.3 | 1.7 | 2.1 | 2.6 | 3.1 | 3.5 | 4.1 | 4.6 | | | | | | | | |
| 121.1 | (250) | 0.2 | 0.4 | 0.7 | 1.0 | 1.3 | 1.7 | 2.1 | 2.5 | 2.9 | | | | | | | | | | |
| 126.7 | (260) | 0.2 | 0.3 | 0.5 | 0.7 | 0.9 | 1.1 | 1.4 | | | | | | | | | | | | |
| 132.2 | (270) | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | | | | | | | | | | | | | |

Fuente. Forest Products Laboratory, 2010.

Anexo 2

Tabla 4-6a. Densidad de la madera en función de la gravedad específica y el contenido de humedad.

Table 4-6a. Density of wood as a function of specific gravity and moisture content (SI)

| Moisture content of wood (%) | Density (kg m ⁻³) when the specific gravity G_r is | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------|--|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0.30 | 0.32 | 0.34 | 0.36 | 0.38 | 0.40 | 0.42 | 0.44 | 0.46 | 0.48 | 0.50 | 0.52 | 0.54 | 0.56 | 0.58 | 0.60 | 0.62 | 0.64 | 0.66 | 0.68 | 0.70 |
| 0 | 300 | 320 | 340 | 360 | 380 | 400 | 420 | 440 | 460 | 480 | 500 | 520 | 540 | 560 | 580 | 600 | 620 | 640 | 660 | 680 | 700 |
| 4 | 312 | 333 | 354 | 374 | 395 | 416 | 437 | 458 | 478 | 499 | 520 | 541 | 562 | 582 | 603 | 624 | 645 | 666 | 686 | 707 | 728 |
| 8 | 324 | 346 | 367 | 389 | 410 | 432 | 454 | 475 | 497 | 518 | 540 | 562 | 583 | 605 | 626 | 648 | 670 | 691 | 713 | 734 | 756 |
| 12 | 336 | 358 | 381 | 403 | 426 | 448 | 470 | 493 | 515 | 538 | 560 | 582 | 605 | 627 | 650 | 672 | 694 | 717 | 739 | 762 | 784 |
| 16 | 348 | 371 | 394 | 418 | 441 | 464 | 487 | 510 | 534 | 557 | 580 | 603 | 626 | 650 | 673 | 696 | 719 | 742 | 766 | 789 | 812 |
| 20 | 360 | 384 | 408 | 432 | 456 | 480 | 504 | 528 | 552 | 576 | 600 | 624 | 648 | 672 | 696 | 720 | 744 | 768 | 792 | 816 | 840 |
| 24 | 372 | 397 | 422 | 446 | 471 | 496 | 521 | 546 | 570 | 595 | 620 | 645 | 670 | 694 | 719 | 744 | 769 | 794 | 818 | 843 | 868 |
| 28 | 384 | 410 | 435 | 461 | 486 | 512 | 538 | 563 | 589 | 614 | 640 | 666 | 691 | 717 | 742 | 768 | 794 | 819 | 845 | 870 | 896 |
| 32 | 396 | 422 | 449 | 475 | 502 | 528 | 554 | 581 | 607 | 634 | 660 | 686 | 713 | 739 | 766 | 792 | 818 | 845 | 871 | 898 | 924 |
| 36 | 408 | 435 | 462 | 490 | 517 | 544 | 571 | 598 | 626 | 653 | 680 | 707 | 734 | 762 | 789 | 816 | 843 | 870 | 898 | 925 | 952 |
| 40 | 420 | 448 | 476 | 504 | 532 | 560 | 588 | 616 | 644 | 672 | 700 | 728 | 756 | 784 | 812 | 840 | 868 | 896 | 924 | 952 | 980 |
| 44 | 432 | 461 | 490 | 518 | 547 | 576 | 605 | 634 | 662 | 691 | 720 | 749 | 778 | 806 | 835 | 864 | 893 | 922 | 950 | 979 | 1,008 |
| 48 | 444 | 474 | 503 | 533 | 562 | 592 | 622 | 651 | 681 | 710 | 740 | 770 | 799 | 829 | 858 | 888 | 918 | 947 | 977 | 1,006 | 1,036 |
| 52 | 456 | 486 | 517 | 547 | 578 | 608 | 638 | 669 | 699 | 730 | 760 | 790 | 821 | 851 | 882 | 912 | 942 | 973 | 1,003 | 1,034 | 1,064 |
| 56 | 468 | 499 | 530 | 562 | 593 | 624 | 655 | 686 | 718 | 749 | 780 | 811 | 842 | 874 | 905 | 936 | 967 | 998 | 1,030 | 1,061 | 1,092 |
| 60 | 480 | 512 | 544 | 576 | 608 | 640 | 672 | 704 | 736 | 768 | 800 | 832 | 864 | 896 | 928 | 960 | 992 | 1,024 | 1,056 | 1,088 | 1,120 |
| 64 | 492 | 525 | 558 | 590 | 623 | 656 | 689 | 722 | 754 | 787 | 820 | 853 | 886 | 918 | 951 | 984 | 1,017 | 1,050 | 1,082 | 1,115 | 1,148 |
| 68 | 504 | 538 | 571 | 605 | 638 | 672 | 706 | 739 | 773 | 806 | 840 | 874 | 907 | 941 | 974 | 1,008 | 1,042 | 1,075 | 1,109 | 1,142 | 1,176 |
| 72 | 516 | 550 | 585 | 619 | 654 | 688 | 722 | 757 | 791 | 826 | 860 | 894 | 929 | 963 | 998 | 1,032 | 1,066 | 1,101 | 1,135 | 1,170 | 1,204 |
| 76 | 528 | 563 | 598 | 634 | 669 | 704 | 739 | 774 | 810 | 845 | 880 | 915 | 950 | 986 | 1,021 | 1,056 | 1,091 | 1,126 | 1,162 | 1,197 | |
| 80 | 540 | 576 | 612 | 648 | 684 | 720 | 756 | 792 | 828 | 864 | 900 | 936 | 972 | 1,008 | 1,044 | 1,080 | 1,116 | 1,152 | 1,188 | | |
| 84 | 552 | 589 | 626 | 662 | 699 | 736 | 773 | 810 | 846 | 883 | 920 | 957 | 994 | 1,030 | 1,067 | 1,104 | 1,141 | 1,178 | | | |
| 88 | 564 | 602 | 639 | 677 | 714 | 752 | 790 | 827 | 865 | 902 | 940 | 978 | 1,015 | 1,053 | 1,090 | 1,128 | 1,166 | | | | |
| 92 | 576 | 614 | 653 | 691 | 730 | 768 | 806 | 845 | 883 | 922 | 960 | 998 | 1,037 | 1,075 | 1,114 | 1,152 | 1,190 | | | | |
| 96 | 588 | 627 | 666 | 706 | 745 | 784 | 823 | 862 | 902 | 941 | 980 | 1,019 | 1,058 | 1,098 | 1,137 | 1,176 | | | | | |
| 100 | 600 | 640 | 680 | 720 | 760 | 800 | 840 | 880 | 920 | 960 | 1,000 | 1,040 | 1,080 | 1,120 | 1,160 | 1,200 | | | | | |
| 110 | 630 | 672 | 714 | 756 | 798 | 840 | 882 | 924 | 966 | 1,008 | 1,050 | 1,092 | 1,134 | 1,176 | 1,218 | | | | | | |
| 120 | 660 | 704 | 748 | 792 | 836 | 880 | 924 | 968 | 1,012 | 1,056 | 1,100 | 1,144 | 1,188 | 1,232 | | | | | | | |
| 130 | 690 | 736 | 782 | 828 | 874 | 920 | 966 | 1,012 | 1,058 | 1,104 | 1,150 | 1,196 | 1,242 | 1,288 | | | | | | | |
| 140 | 720 | 768 | 816 | 864 | 912 | 960 | 1,008 | 1,056 | 1,104 | 1,152 | 1,200 | 1,248 | 1,296 | | | | | | | | |
| 150 | 750 | 800 | 850 | 900 | 950 | 1,000 | 1,050 | 1,100 | 1,150 | 1,200 | 1,250 | 1,300 | 1,350 | | | | | | | | |

Fuente. Forest Products Laboratory, 2010.

Anexo 3

Tabla 5-1. Radios elásticos para varias especies al 12% de contenido de humedad aproximadamente.

Table 5-1. Elastic ratios for various species at approximately 12% moisture content^a

| Species | E_T/E_L | E_R/E_L | G_{LR}/E_L | G_{LT}/E_L | G_{RT}/E_L |
|-----------------------|-----------|-----------|--------------|--------------|--------------|
| Hardwoods | | | | | |
| Ash, white | 0.080 | 0.125 | 0.109 | 0.077 | — |
| Balsa | 0.015 | 0.046 | 0.054 | 0.037 | 0.005 |
| Basswood | 0.027 | 0.066 | 0.056 | 0.046 | — |
| Birch, yellow | 0.050 | 0.078 | 0.074 | 0.068 | 0.017 |
| Cherry, black | 0.086 | 0.197 | 0.147 | 0.097 | — |
| Cottonwood, eastern | 0.047 | 0.083 | 0.076 | 0.052 | — |
| Mahogany, African | 0.050 | 0.111 | 0.088 | 0.059 | 0.021 |
| Mahogany, Honduras | 0.064 | 0.107 | 0.066 | 0.086 | 0.028 |
| Maple, sugar | 0.065 | 0.132 | 0.111 | 0.063 | — |
| Maple, red | 0.067 | 0.140 | 0.133 | 0.074 | — |
| Oak, red | 0.082 | 0.154 | 0.089 | 0.081 | — |
| Oak, white | 0.072 | 0.163 | 0.086 | — | — |
| Sweetgum | 0.050 | 0.115 | 0.089 | 0.061 | 0.021 |
| Walnut, black | 0.056 | 0.106 | 0.085 | 0.062 | 0.021 |
| Yellow-poplar | 0.043 | 0.092 | 0.075 | 0.069 | 0.011 |
| Softwoods | | | | | |
| Baldcypress | 0.039 | 0.084 | 0.063 | 0.054 | 0.007 |
| Cedar, northern white | 0.081 | 0.183 | 0.210 | 0.187 | 0.015 |
| Cedar, western red | 0.055 | 0.081 | 0.087 | 0.086 | 0.005 |
| Douglas-fir | 0.050 | 0.068 | 0.064 | 0.078 | 0.007 |
| Fir, subalpine | 0.039 | 0.102 | 0.070 | 0.058 | 0.006 |
| Hemlock, western | 0.031 | 0.058 | 0.038 | 0.032 | 0.003 |
| Larch, western | 0.065 | 0.079 | 0.063 | 0.069 | 0.007 |
| Pine | | | | | |
| Loblolly | 0.078 | 0.113 | 0.082 | 0.081 | 0.013 |
| Lodgepole | 0.068 | 0.102 | 0.049 | 0.046 | 0.005 |
| Longleaf | 0.055 | 0.102 | 0.071 | 0.060 | 0.012 |
| Pond | 0.041 | 0.071 | 0.050 | 0.045 | 0.009 |
| Ponderosa | 0.083 | 0.122 | 0.138 | 0.115 | 0.017 |
| Red | 0.044 | 0.088 | 0.096 | 0.081 | 0.011 |
| Slash | 0.045 | 0.074 | 0.055 | 0.053 | 0.010 |
| Sugar | 0.087 | 0.131 | 0.124 | 0.113 | 0.019 |
| Western white | 0.038 | 0.078 | 0.052 | 0.048 | 0.005 |
| Redwood | 0.089 | 0.087 | 0.066 | 0.077 | 0.011 |
| Spruce, Sitka | 0.043 | 0.078 | 0.064 | 0.061 | 0.003 |
| Spruce, Engelmann | 0.059 | 0.128 | 0.124 | 0.120 | 0.010 |

^a E_L may be approximated by increasing modulus of elasticity values in Table 5-3 by 10%.

Fuente. Forest Products Laboratory, 2010.

Anexo 4

Tabla 5-2. Coeficientes de Poisson para varias especies al 12% de contenido de humedad aproximadamente.

Table 5–2. Poisson's ratios for various species at approximately 12% moisture content

| Species | μ_{LR} | μ_{LT} | μ_{RT} | μ_{TR} | μ_{RL} | μ_{TL} |
|-----------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Hardwoods | | | | | | |
| Ash, white | 0.371 | 0.440 | 0.684 | 0.360 | 0.059 | 0.051 |
| Aspen, quaking | 0.489 | 0.374 | — | 0.496 | 0.054 | 0.022 |
| Balsa | 0.229 | 0.488 | 0.665 | 0.231 | 0.018 | 0.009 |
| Basswood | 0.364 | 0.406 | 0.912 | 0.346 | 0.034 | 0.022 |
| Birch, yellow | 0.426 | 0.451 | 0.697 | 0.426 | 0.043 | 0.024 |
| Cherry, black | 0.392 | 0.428 | 0.695 | 0.282 | 0.086 | 0.048 |
| Cottonwood, eastern | 0.344 | 0.420 | 0.875 | 0.292 | 0.043 | 0.018 |
| Mahogany, African | 0.297 | 0.641 | 0.604 | 0.264 | 0.033 | 0.032 |
| Mahogany, Honduras | 0.314 | 0.533 | 0.600 | 0.326 | 0.033 | 0.034 |
| Maple, sugar | 0.424 | 0.476 | 0.774 | 0.349 | 0.065 | 0.037 |
| Maple, red | 0.434 | 0.509 | 0.762 | 0.354 | 0.063 | 0.044 |
| Oak, red | 0.350 | 0.448 | 0.560 | 0.292 | 0.064 | 0.033 |
| Oak, white | 0.369 | 0.428 | 0.618 | 0.300 | 0.074 | 0.036 |
| Sweetgum | 0.325 | 0.403 | 0.682 | 0.309 | 0.044 | 0.023 |
| Walnut, black | 0.495 | 0.632 | 0.718 | 0.367 | 0.052 | 0.036 |
| Yellow-poplar | 0.318 | 0.392 | 0.703 | 0.329 | 0.030 | 0.019 |
| Softwoods | | | | | | |
| Baldcypress | 0.338 | 0.326 | 0.411 | 0.356 | — | — |
| Cedar, northern white | 0.337 | 0.340 | 0.458 | 0.345 | — | — |
| Cedar, western red | 0.378 | 0.296 | 0.484 | 0.403 | — | — |
| Douglas-fir | 0.292 | 0.449 | 0.390 | 0.374 | 0.036 | 0.029 |
| Fir, subalpine | 0.341 | 0.332 | 0.437 | 0.336 | — | — |
| Hemlock, western | 0.485 | 0.423 | 0.442 | 0.382 | — | — |
| Larch, western | 0.355 | 0.276 | 0.389 | 0.352 | — | — |
| Pine | | | | | | |
| Loblolly | 0.328 | 0.292 | 0.382 | 0.362 | — | — |
| Lodgepole | 0.316 | 0.347 | 0.469 | 0.381 | — | — |
| Longleaf | 0.332 | 0.365 | 0.384 | 0.342 | — | — |
| Pond | 0.280 | 0.364 | 0.389 | 0.320 | — | — |
| Ponderosa | 0.337 | 0.400 | 0.426 | 0.359 | — | — |
| Red | 0.347 | 0.315 | 0.408 | 0.308 | — | — |
| Slash | 0.392 | 0.444 | 0.447 | 0.387 | — | — |
| Sugar | 0.356 | 0.349 | 0.428 | 0.358 | — | — |
| Western white | 0.329 | 0.344 | 0.410 | 0.334 | — | — |
| Redwood | 0.360 | 0.346 | 0.373 | 0.400 | — | — |
| Spruce, Sitka | 0.372 | 0.467 | 0.435 | 0.245 | 0.040 | 0.025 |
| Spruce, Engelmann | 0.422 | 0.462 | 0.530 | 0.255 | 0.083 | 0.058 |

Fuente. Forest Products Laboratory, 2010.

Anexo 5

Tabla 5-3a. Propiedades de resistencia de algunas maderas de comercialización producidas en Estados Unidos.

Table 5-3a. Strength properties of some commercially important woods grown in the United States (metric)^a—con.

| Common species names | Moisture content | Specific gravity ^b | Static bending | | | Impact bending (mm) | Compression parallel to grain (kPa) | Compression perpendicular to grain (kPa) | Shear parallel to grain (kPa) | Tension perpendicular to grain (kPa) | Side hardness (N) |
|----------------------|------------------|-------------------------------|--------------------------|--|--|---------------------|-------------------------------------|--|-------------------------------|--------------------------------------|-------------------|
| | | | Modulus of rupture (kPa) | Modulus of elasticity ^c (MPa) | Work to maximum load (kJ m ⁻³) | | | | | | |
| Pine | | | | | | | | | | | |
| Eastern white | Green | 0.34 | 34,000 | 6,800 | 36 | 430 | 16,800 | 1,500 | 4,700 | 1,700 | 1,300 |
| | 12% | 0.35 | 59,000 | 8,500 | 47 | 460 | 33,100 | 3,000 | 6,200 | 2,100 | 1,700 |
| Jack | Green | 0.40 | 41,000 | 7,400 | 50 | 660 | 20,300 | 2,100 | 5,200 | 2,500 | 1,800 |
| | 12% | 0.43 | 68,000 | 9,300 | 57 | 690 | 39,000 | 4,000 | 8,100 | 2,900 | 2,500 |
| Loblolly | Green | 0.47 | 50,000 | 9,700 | 57 | 760 | 24,200 | 2,700 | 5,900 | 1,800 | 2,000 |
| | 12% | 0.51 | 88,000 | 12,300 | 72 | 760 | 49,200 | 5,400 | 9,600 | 3,200 | 3,100 |
| Lodgepole | Green | 0.38 | 38,000 | 7,400 | 39 | 510 | 18,000 | 1,700 | 4,700 | 1,500 | 1,500 |
| | 12% | 0.41 | 65,000 | 9,200 | 47 | 510 | 37,000 | 4,200 | 6,100 | 2,000 | 2,100 |
| Longleaf | Green | 0.54 | 59,000 | 11,000 | 61 | 890 | 29,800 | 3,300 | 7,200 | 2,300 | 2,600 |
| | 12% | 0.59 | 100,000 | 13,700 | 81 | 860 | 58,400 | 6,600 | 10,400 | 3,200 | 3,900 |
| Pitch | Green | 0.47 | 47,000 | 8,300 | 63 | — | 20,300 | 2,500 | 5,900 | — | — |
| | 12% | 0.52 | 74,000 | 9,900 | 63 | — | 41,000 | 5,600 | 9,400 | — | — |
| Pond | Green | 0.51 | 51,000 | 8,800 | 52 | — | 25,200 | 3,000 | 6,500 | — | — |
| | 12% | 0.56 | 80,000 | 12,100 | 59 | — | 52,000 | 6,300 | 9,500 | — | — |
| Ponderosa | Green | 0.38 | 35,000 | 6,900 | 36 | 530 | 16,900 | 1,900 | 4,800 | 2,100 | 1,400 |
| | 12% | 0.40 | 65,000 | 8,900 | 49 | 480 | 36,700 | 4,000 | 7,800 | 2,900 | 2,000 |
| Red | Green | 0.41 | 40,000 | 8,800 | 42 | 660 | 18,800 | 1,800 | 4,800 | 2,100 | 1,500 |
| | 12% | 0.46 | 76,000 | 11,200 | 68 | 660 | 41,900 | 4,100 | 8,400 | 3,200 | 2,500 |
| Sand | Green | 0.46 | 52,000 | 7,000 | 66 | — | 23,700 | 3,100 | 7,900 | — | — |
| | 12% | 0.48 | 80,000 | 9,700 | 66 | — | 47,700 | 5,800 | — | — | — |
| Shortleaf | Green | 0.47 | 51,000 | 9,600 | 57 | 760 | 24,300 | 2,400 | 6,300 | 2,200 | 2,000 |
| | 12% | 0.51 | 90,000 | 12,100 | 76 | 840 | 50,100 | 5,700 | 9,600 | 3,200 | 3,100 |
| Slash | Green | 0.54 | 60,000 | 10,500 | 66 | — | 26,300 | 3,700 | 6,600 | — | — |
| | 12% | 0.59 | 112,000 | 13,700 | 91 | — | 56,100 | 7,000 | 11,600 | — | — |
| Spruce | Green | 0.41 | 41,000 | 6,900 | — | — | 19,600 | 1,900 | 6,200 | — | 2,000 |
| | 12% | 0.44 | 72,000 | 8,500 | — | — | 39,000 | 5,000 | 10,300 | — | 2,900 |
| Sugar | Green | 0.34 | 34,000 | 7,100 | 37 | 430 | 17,000 | 1,400 | 5,000 | 1,900 | 1,200 |
| | 12% | 0.36 | 57,000 | 8,200 | 38 | 460 | 30,800 | 3,400 | 7,800 | 2,400 | 1,700 |
| Virginia | Green | 0.45 | 50,000 | 8,400 | 75 | 860 | 23,600 | 2,700 | 6,100 | 2,800 | 2,400 |
| | 12% | 0.48 | 90,000 | 10,500 | 94 | 810 | 46,300 | 6,300 | 9,300 | 2,600 | 3,300 |
| Western white | Green | 0.36 | 32,000 | 8,200 | 34 | 480 | 16,800 | 1,300 | 4,700 | 1,800 | 1,200 |
| | 12% | 0.35 | 67,000 | 10,100 | 61 | 580 | 34,700 | 3,200 | 7,200 | — | 1,900 |

^aResults of tests on clear specimens in the green and air-dried conditions, converted to metric units directly from Table 5-3b. Definition of properties: impact bending is height of drop that causes complete failure, using 0.71-kg (50-lb) hammer; compression parallel to grain is also called maximum crushing strength; compression perpendicular to grain is fiber stress at proportional limit; shear is maximum shearing strength; tension is maximum tensile strength; and side hardness is hardness measured when load is perpendicular to grain.

^bSpecific gravity is based on weight when oven-dry and volume when green or at 12% moisture content.

^cModulus of elasticity measured from a simply supported, center-loaded beam, on a span depth ratio of 14/1. To correct for shear deflection, the modulus can be increased by 10%.

^dValues for side hardness of the true hickories are from Bendtsen and Ethington (1975).

^eCoast Douglas-fir is defined as Douglas-fir growing in Oregon and Washington State west of the Cascade Mountains summit. Interior West includes California and all counties in Oregon and Washington east of, but adjacent to, the Cascade summit; Interior North, the remainder of Oregon and Washington plus Idaho, Montana, and Wyoming; and Interior South, Utah, Colorado, Arizona, and New Mexico.

Fuente. Forest Products Laboratory, 2010.