

Guía para el cálculo y la selección de apoyos en estructuras de media y baja tensión para sistemas de distribución actualizado a normatividad vigente, RETIE y NTC2050

Jhoan Sebastian Mojica Orozco, Juan Esteban Arboleda Figueroa

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingenieros Electricistas

Director

Rolando Andrés Rincón Saravia

Especialista en Gerencia de Proyectos

Codirector

Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga

Doctor en Ingeniería Eléctrica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

A Dios que ha permitido que hoy culmine esta etapa de mi vida con satisfacción de vencer diferentes obstáculos, siempre contando con el apoyo incondicional de mi madre, hermano, amigos y compañeros de estudios, quienes han sido una fuente constante de motivación y apoyo. Gracias por compartir conmigo este camino académico y por hacer que sea una experiencia divertida y enriquecedora.

También quiero agradecer a mis profesores, quienes, con su sabiduría y experiencia, me han brindado las herramientas para llevar a cabo esta investigación. Este logro es el resultado de su dedicación y esfuerzo.

Jhoan Sebastian Mojica Orozco

Dedico este proyecto cada una de las personas que me acompañaron durante este proceso de formación.

A Dios por permitirme salir adelante día a día, por ser mi fortaleza en los momentos más difíciles durante estos años.

A mi hijo por cada día de alegría, por ser mi fortaleza para seguir con este sueño adelante, por cada minuto que compartimos juntos.

A mis padres que han sido mi más grande apoyo durante todos estos años de mi vida, por estar para mí en las buenas y en las malas, por enseñarme tantas cosas que puedo poner en práctica en mi día a día.

A todos los profesores que aportaron un granito de arena en mi formación académica e integral, sus anécdotas y experiencias fueron muy importantes para entender mejor el mundo en el que vivimos.

A mis amigos, con ellos compartí muy buenos recuerdos y estuvimos juntos apoyándonos con el proceso académico de todos.

Juan Esteban Arboleda Figueroa

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que han contribuido a este logro.

Agradecemos a la Universidad Industrial de Santander por abrirnos las puertas y brindarnos las herramientas en nuestro proceso de formación.

Agradecemos a los profesores de la E3T que nos acompañaron en estos años de estudio y nos aportaron con sus experiencias enriquecedoras.

Agradecemos a los ingenieros Rolando Rincón y Jeison Castillo por su paciencia y su tiempo, por brindarnos su apoyo y acompañamiento en la realización de este proyecto.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	16
1. Objetivos	18
1.1 Objetivo general	18
1.2 Objetivos específicos.....	18
2. Marco Teórico	19
2.1 Cálculos y selección de estructuras según operador EBSA	19
2.1.1 Cálculo de fuerza sobre apoyos.....	19
2.1.1.1 Fuerza por presión del viento.....	19
2.1.2 Cálculo de presión del viento sobre estructuras	20
2.1.3 Cálculo de presión del viento sobre conductores.....	20
2.1.4 Cálculo de presión del viento sobre aisladores.....	21
2.1.1.2 Fuerza por desequilibrio de tensiones mecánicas.....	21
2.1.1.3 Fuerza por cambio de dirección de la línea.....	23
2.1.1.4 Fuerza por levantamiento.....	23
2.1.2 Hipótesis de diseño.....	24
2.1.3 Cálculo de momentos	25
2.1.3.1 Momento resistente.....	26
2.1.3.2 Momento por presión del viento.....	27
2.1.3.3 Momento por cambio de dirección de la línea.....	27
2.1.4 Curva de utilización	28
2.2 Cálculos y selección de estructuras según operador AIR-E.....	28
2.2.1 Cálculo de fuerzas sobre postes.....	32

2.2.1.1 Hipótesis normal	32
2.2.1.1.1 Fuerzas verticales mantenidas.....	32
2.2.1.1.2 Fuerza horizontal transversal por el efecto del viento sobre conductores en apoyos de fin de línea, anclaje (0°).....	33
2.2.1.1.3 Fuerza horizontal resultante debida a la acción del viento transversal sobre conductores y resultante de tensiones en apoyos de alineación, ángulo, anclaje.	34
2.2.1.1.4 Fuerza horizontal transversal por la acción del viento en postes.	34
2.2.1.1.5 Fuerza horizontal transversal por la acción del viento en aisladores.	35
2.2.1.1.6 Fuerza horizontal transversal por la acción del viento en equipos.....	35
2.2.1.1.7 Fuerzas horizontales transversales por excentricidad del peso propio de conductores y equipos.	36
2.2.1.1.8 Fuerza horizontal longitudinal por desequilibrio real de tensión.	37
2.2.1.2 Hipótesis anormales.	37
2.2.1.2.1 Fuerza horizontal longitudinal por rotura de conductor.....	37
2.2.1.2.2 Fuerza horizontal longitudinal por 50% de desequilibrio de tensiones.....	38
2.2.2 Cargas ultimas y factores de mayoración.....	38
2.2.3 Selección de la estructura.....	39
2.3 Cálculos y selección de estructuras según Grupo EPM.	40
2.3.1 Cargas verticales.....	40
2.3.2 Cargas longitudinales	40
2.3.3 Cargas Transversales.....	41
2.3.3.1 Fuerza transversal de viento.....	41
2.3.3.2 Fuerza perpendicular generada en un ángulo.	42
2.3.4 Hipótesis de cargas.....	43

2.3.4.1 Cargas normales (condición 1).....	43
2.3.4.2 Cargas anormales (condición 2).....	44
2.3.5 Parámetros mecánicos para la selección de las estructuras.....	46
2.3.5.1 Capacidad de carga estructural.....	46
2.3.5.2 Deflexión máxima.....	47
2.3.5.3 Cálculo mecánico en estructuras y elementos de sujeción de los equipos.....	47
2.3.5.4 Verificación de poste de concreto.....	48
2.4 Cálculos y selección de estructura en proyectos de diseño.....	48
2.4.1. Selección hipotética de la estructura.....	48
2.4.2. Cálculo de las fuerzas (cargas) que afectan a la estructura.....	49
2.4.3 Cálculo de los momentos generados por las cargas y momento resistente de la estructura..	50
2.4.4. Selección de la estructura y curva de utilización.....	50
3. Revisión de la Normativa actual.....	52
3.1 Revisión RETIE.....	52
3.1.1 Estructuras de soporte.....	52
3.1.2 Distancias de seguridad en redes de distribución.....	52
3.1.3 Conductores Aéreos.....	52
3.1.4 Estructuras, postes y crucetas para redes de distribución.....	53
3.2 Revisión Normativa ESSA.....	54
3.2.1 Apoyos.....	54
4. Metodología de Cálculos Implementados en la Guía.....	56
4.1 Selección Hipotética de la Estructura.....	56
4.2 Cálculo de las Fuerzas Sobre la Estructura.....	57
4.2.1 Hipótesis de Condición Normal.....	57

4.2.1.1 Carga ejercida por la presión del viento.....	58
4.2.1.1.1 Categorías de exposición.....	59
4.2.1.1.2 Factor de conversión, Q.....	61
4.2.1.1.3 Coeficiente de exposición a la velocidad del viento, Kz.....	62
4.2.1.1.4 Altura efectiva, Z.....	62
4.2.1.1.5 Coeficiente topográfico, Kzt.....	63
4.2.1.1.6 Factor de respuesta de Ráfaga, G.....	65
4.2.1.1.7 Área expuesta, A.....	66
4.2.1.1.8 Coeficiente de Fuerza, Cf.....	67
4.2.1.1.9 Velocidad básica del viento, V.....	68
4.2.1.2 Carga ejercida por tensión mecánica del conductor.....	70
4.2.1.3 Carga por cambio de dirección de la línea.....	70
4.2.2 Hipótesis Anormales.....	71
4.2.2.1 Carga por conductor roto.....	71
4.2.2.2 Carga por desequilibrio 50% de tensiones.....	72
4.3 Cálculo de los Momentos Ejercidos por las Cargas.....	72
4.3.1 Hipótesis Normal.....	73
4.3.1.1 Momento por carga de la presión del viento.....	74
4.3.1.2 Momento por tensiones mecánicas en conductores.....	74
4.3.1.3 Momento resistente de la estructura.....	74
4.3.2 Hipótesis Anormales.....	75
4.4 Verificación de las Estructuras de Concreto.....	75
5. Conclusiones.....	77

Referencias Bibliográficas 79

Apéndices 81

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Condiciones anormales según la estructura.	24
Tabla 2. Factores de seguridad según el material y las cargas	25
Tabla 3. Hipótesis de carga de diseño para cada tipo de estructura	28
Tabla 4. Cargas ultimas y factores de mayoración hipótesis normal	38
Tabla 5. Cargas ultimas y factores de mayoración hipótesis anormales	39
Tabla 6. Cargas de las estructuras según Grupo EPM.	43
Tabla 7. Cargas según la hipótesis de condición diaria y de conductor roto	44
Tabla 8. Cargas que se consideran en la hipótesis de desequilibrio del 50% de tensiones.	45
Tabla 9. Factores de seguridad para estructuras según el material	46
Tabla 10. Deflexión máxima de los postes.....	47
Tabla 11. Características posteria de concreto con valores mínimos.....	56
Tabla 12. Valores de Q para combinaciones de altitud y temperatura	61
Tabla 13. Valores de Z_g y α	62
Tabla 14. Multiplicadores topográficos para Exposición C	64
Tabla 15. Parámetros para aumento de la Velocidad sobre Colinas y Escarpes	65
Tabla 16. Valores de c_{exp} , L_s según el tipo de exposición	66
Tabla 17. Coeficientes de Fuerza para estructuras troncocónicas.....	68
Tabla 18. Datos de la línea para ejercicio ejemplo 1.....	81
Tabla 19. Características de la primera selección de la estructura ejercicio ejemplo 1	82
Tabla 20. Variables para el cálculo del coeficiente de exposición para ejercicio ejemplo 1	83
Tabla 21. Variables para el cálculo de I_z y B para ejercicio ejemplo 1	84

Tabla 22. Coeficiente de fuerza de estructura para ejercicio ejemplo 1.....	85
Tabla 23. Características de la segunda selección de la estructura ejercicio ejemplo 1.....	87
Tabla 24. Características de la tercera selección de la estructura ejercicio ejemplo 1	87
Tabla 25. Datos de la línea para ejercicio ejemplo 2.....	89
Tabla 26. Características de la primera selección de la estructura ejercicio ejemplo 2	90
Tabla 27. Variables para el cálculo del coeficiente de exposición para ejercicio ejemplo 2	91
Tabla 28. Variables para el cálculo de I_z y B para ejercicio ejemplo 2	92
Tabla 29. Coeficiente de fuerza de estructura para ejercicio ejemplo 2.....	93
Tabla 30. Características de la segunda selección de la estructura ejercicio ejemplo 2.....	95
Tabla 31. Características de la tercera selección de la estructura ejercicio ejemplo 2.....	96
Tabla 32. Características de la cuarta selección de la estructura ejercicio ejemplo 2.....	96

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Ángulo incidente del viento con respecto a la perpendicular de la dirección de la línea sobre una estructura.....	58
Figura 2. Imagen ilustrativa de una zona de Exposición B.....	60
Figura 3. Imagen ilustrativa de una zona de Exposición C.....	60
Figura 4. Imagen ilustrativa de una zona de Exposición D.....	61
Figura 5. Escarpe y loma con sus respectivos factores para la selección de K_1 , K_2 y K_3	63
Figura 6. Vista del área expuesta de una estructura de concreto.....	67
Figura 7. Velocidad básica del viento por regiones	69
Figura 8. Ilustración tensiones mecánicas de conductores.....	70
Figura 9. Ilustración cambio de dirección, vista de planta.....	71
Figura 10. Ilustración de conductor roto	72
Figura 11. Momentos y fuerzas actuantes sobre estructuras de concreto	73
Figura 12. Diagrama de flujo para selección de estructuras	76
Figura 13. Imagen ilustrativa de la configuración y las alturas de los conductores en el poste Ejercicio ejemplo 1.....	82
Figura 14. Imagen ilustrativa de la configuración y las alturas de los conductores en el poste ejercicio ejemplo 2	90
Figura 15. Desviación de la línea para ejercicio ejemplo 2.....	94

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Ejercicios ejemplo de la metodología	81
Ver apéndices adjuntos y pueden ser consultados en la base de datos de la Biblioteca UIS	
Apéndice B. Guía de cálculos mecánicos y selección de estructuras.	

Resumen

Título: Guía para el cálculo y la selección de apoyos en estructuras de media y baja tensión para sistemas de distribución actualizado a normatividad vigente, RETIE y NTC2050.*

Autor: Jhoan Sebastian Mojica Orozco, Juan Esteban Arboleda Figueroa.**

Palabras Clave: Apoyos tipo poste, cálculos mecánicos, guía didáctica, NTC 2050, RETIE.

Descripción: El presente proyecto de investigación tiene como objetivo principal la creación de una guía didáctica sobre los cálculos mecánicos en las estructuras de soporte tipo poste de concreto para redes aéreas de distribución urbana de nivel de media tensión hasta 34.5 kV, perteneciente a la Electrificadora De Santander. Se realizó una recopilación de los cálculos mecánicos establecidos por operadores de red en Colombia, así como también de proyectos de grado anteriores, posteriormente se realizó una revisión en la normativa RETIE y NTC 2050 de los artículos de obligatorio cumplimiento que permitan la realización de los cálculos mecánicos en los postes de distribución aérea tipo concreto, el cual hace parte del procedimiento que los diseñadores de la red de distribución eléctrica deben realizar en su autonomía profesional. Con dicha información se escogió una metodología para ser expuesta en la guía didáctica, de manera que se creó una herramienta de fácil acceso para los estudiantes de la Universidad Industrial de Santander, con un vistazo general de todos los cálculos y verificaciones necesarias para la selección de estructuras de media tensión de tipo poste de concreto.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Ingeniería Eléctrica. Director: Rolando Andrés Rincón Saravia. Especialista en Gerencia de Proyectos. Codirector: Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga. Doctor en Ingeniería Eléctrica.

Abstract

Title: Guide for the calculation and selection of supports in medium and low voltage structures for distribution systems updated to current regulations, RETIE and NTC2050. *

Author(s): Jhoan Sebastian Mojica Orozco, Juan Esteban Arboleda Figueroa. **

Key Words: Pole type supports, mechanical calculations, didactic guide, NTC 2050, RETIE.

Description: The main objective of this research project is the creation of a didactic guide on mechanical calculations in concrete post-type support structures for urban aerial distribution networks of medium voltage level up to 34.5 kV, belonging to Electrificadora De Santander.

A compilation of the mechanical calculations established by network operators in Colombia was carried out, as well as projects of previous degrees, later a review was carried out in the RETIE and NTC 2050 regulations of the mandatory articles that allow the calculations to be carried out. mechanics in the concrete-type aerial distribution poles, which is part of the procedure that the designers of the electrical distribution network must carry out in their professional autonomy.

With this information, a methodology was chosen to be exposed in the didactic guide, so that an easily accessible tool was created for the students at the Industrial University of Santander, with an overview of all the calculations and verifications necessary for the selection of medium voltage concrete post type structures.

* Degree Work

** Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Electrical Engineering, Electronics and Telecommunications. Electrical Engineering. Director: Rolando Andres Rincón Saravia. Specialist in Project Managing. Co-director: Óscar Arnulfo Quiroga Quiroga. PhD in Electrical Engineering.

Introducción

Las redes aéreas de distribución a lo largo de los años han jugado un papel importante a la hora de transportar energía eléctrica a los diferentes sectores de la sociedad, con un coste de diseño y construcción inferior a otras disposiciones como la subterránea, que entre las principales razones para una menor implementación se deben a que requieren más estudios del subsuelo, y un coste elevado en caso requerir intervenciones frecuentes para hacer algún mantenimiento o debido a una falla que requiera ser solucionada en el menor tiempo posible, por tanto la disposición aérea resulta en su implementación resulta más asequible para economías no tan fuertes, como las de países en vías de desarrollo que enfrentan dificultades particulares como la disponibilidad de maquinaria, mano de obra calificada y propiedades intrínsecas del terreno que requiere un abordaje específico de la teoría de los cálculos mecánicos en los postes de concreto.

De acuerdo con lo anterior, los equipos tales como apoyos, conductores, aisladores, etc. que componen una red aérea de distribución deben estar diseñados de manera que logren dar confiabilidad y seguridad al servicio de energía eléctrica, y debido a que el país se encuentra en una zona geográfica con movimientos telúricos frecuentes, es por esto que en la normativa se exigen ciertas características específicas para la selección de los elementos en los que se garantice una mayor seguridad y confiabilidad en el sistema de distribución aérea.

En la actualidad, cuando se requiere diseñar redes aéreas de distribución eléctrica se tienen grandes inconvenientes a la hora de encontrar material bibliográfico suficiente por tanto esta guía pretende ser un apoyo para que puedan complementar la información necesaria en el desarrollo autónomo de sus funciones profesionales que requieren.

En este proyecto de grado se realiza una búsqueda de información en las normas técnicas de los operadores de red EBSA, AIR-E y ESSA en Colombia, con el propósito de complementar la información para la creación de la guía, ideada como una herramienta didáctica que reúna los procedimientos necesarios para la selección de los elementos de apoyo tipo poste de concreto en la red de distribución aérea de la ESSA, entre los cuales están hipótesis de diseño, cálculos mecánicos y verificaciones de los esfuerzos en los apoyos de concreto, cumpliendo con la normativa colombiana vigente RETIE y NTC 2050 exigidas dentro de los parámetros de diseño de los operadores de red.

Para cumplir con el objetivo principal de este proyecto, en el capítulo uno se investigó acerca de los procedimientos, cálculos y verificaciones para la selección de estructuras en proyectos de grado de anteriores años, así como también en guías presentadas por distintos operadores de red del país. En el capítulo dos se revisó la normativa vigente sobre las características constructivas y requisitos para la selección de las estructuras. Finalmente, en el capítulo tres se planteó una metodología a partir de la bibliografía anteriormente investigada para la implementación en la guía.

En los Anexos se desarrollan algunos ejercicios que son complementarios a la guía didáctica y que sirven como ejemplo para los diseñadores de la red de distribución, logrando así brindar más confiabilidad con un abordaje más amplio en los análisis de los parámetros importantes a la hora de la realización de los cálculos mecánicos, el cual es necesario para la selección del apoyo tipo concreto en el sistema de distribución aérea de media tensión 34.5 kV perteneciente a la ESSA.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Elaborar una guía que permita conocer el proceso para el cálculo y selección de los distintos apoyos tipo poste de concreto, de las redes de distribución aéreas de energía eléctrica de media tensión hasta 34.5 kV y baja tensión, más comunes en Colombia cumpliendo con la normativa vigente RETIE y NTC2050.

1.2 Objetivos específicos

- Revisar el estado del arte de los proyectos y guías de operadores de red relacionados al desarrollo de cálculos y selección de los diferentes tipos de apoyos tipo poste de concreto en redes de media y baja tensión con la normatividad vigente.
- Revisar la norma NTC 2050 y RETIE con el fin de identificar los artículos relacionados a cálculos mecánicos de apoyos para estructuras de media y baja tensión en sistemas de distribución que aporten en el desarrollo de la metodología aplicada en la guía.
- Establecer una metodología para el diseño de cálculos mecánicos en redes aéreas de media y baja tensión que usen apoyos tipo postes de concreto y se ajusten a la norma vigente en Colombia.
- Desarrollar el contenido de la guía, en formato digital, con un enfoque didáctico para la aplicación de los cálculos en los diseños de redes aéreas de distribución de media y baja tensión.

2. Marco Teórico

Los proyectos de diseño de redes de distribución exigen memorias de cálculo, estas memorias de cálculo detallan la metodología usada para la selección de los equipos y elementos de las redes, como lo son las estructuras de apoyo, con el propósito de dar cumplimiento con lo descrito en el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) (2013), dichas metodologías son expuestas por los distintos operadores de red del país en guías de cálculo.

Con el fin de establecer la metodología a implementar en la guía se realizó la búsqueda acerca del tema cálculos mecánicos y selección de estructuras para redes de distribución aérea en proyectos de diseño, en documentos y guías de cálculo de algunos operadores de red. En total se encontraron siete documentos de los cuales cuatro son proyectos y tres son guías de cálculo de operadores de red.

2.1 Cálculos y selección de estructuras según operador EBSA

La empresa de energía de Boyacá establece los cálculos en sus normas de diseño EBSA (2014). Los cálculos propuestos se realizan a través de la aplicación de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (1998) y la referencia de los cuadros o mapas de valores climatológicos emitidos por el IDEAM, siguiendo la metodología descrita a continuación.

2.1.1 Cálculo de fuerza sobre apoyos

Según EBSA (2014) las fuerzas consideradas para el estudio de la selección de la estructura son las generadas por presión del viento sobre conductores, aisladores y la estructura, por desequilibrio de tensiones mecánicas, por cambios de dirección en la línea y por levantamiento en estructuras cuya posición es en puntos más bajos.

2.1.1.1 Fuerza por presión del viento. El cálculo de la fuerza generada por presión del viento se hace mediante el análisis de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (1998), en el cual la presión se calcula mediante las siguientes ecuaciones.

$$V_s = V * S_1 * S_2 * S_3 \quad (1)$$

$$q = 0.0048 * V_s^2 * S_4 \quad (2)$$

Donde V es la velocidad máxima del viento en km/h, S_1 es el factor topográfico, S_2 es el factor de la rugosidad, tamaño y altura de la estructura, S_3 es el factor de seguridad y duración, S_4 es el factor de la variación de densidad del aire y q es la presión dinámica del viento en kg/m^2

2.1.2 Cálculo de presión del viento sobre estructuras.

Para el cálculo de la fuerza sobre estructuras, conductores y aisladores se tiene en cuenta la forma de los elementos mediante el coeficiente de fuerza C_f y para los elementos más pequeños se tiene en cuenta un factor de reducción K, los anteriores valores son tomados de tablas con normalizados en la guía del operador. La fuerza sobre estructuras de manera general se calcula mediante la ecuación (3) (EBSA, 2014).

$$F_{va} = C_f * q * A_e \quad (3)$$

Donde F_{va} es la fuerza del viento en kg sobre la estructura, C_f es el factor de fuerza para estructuras, según su tipo o forma, q es la presión dinámica del viento en kg/m^2 , A_e es el área normal al viento o área efectiva frontal y depende del tipo de estructura y es el área normal a donde se dirige el viento. (EBSA, 2014).

2.1.3 Cálculo de presión del viento sobre conductores.

Para el cálculo de la presión del viento en aisladores y conductores el área depende de la longitud y diámetro del elemento, calculándose con la ecuación (4)

$$F_{vc} = C_f * q * K * \Phi_c * L_v \quad (4)$$

Donde F_{vc} es la carga del viento sobre el conductor en kg, C_f es el factor de fuerza para conductores, q es la presión dinámica del viento en kg/m^2 , K es el factor de reducción, L_v es la longitud del vano viento en metros, y Φ es el diámetro de cable en metros (EBSA, 2014).

2.1.4 Cálculo de presión del viento sobre aisladores.

Para determinar el valor de la presión del viento sobre los aisladores se utiliza la siguiente ecuación.

$$F_{ai} = C_f * q * K * \Phi_{ai} * L_{ai} \quad (5)$$

Donde F_{ai} es la carga del viento sobre los aisladores en kg, C_f es el factor de fuerza para miembros circulares, q es la presión dinámica del viento en kg/m^2 , K es el factor de reducción, L_{ai} es la longitud del aislador en metros, Φ es el diámetro del aislador en metros (EBSA, 2014).

2.1.1.2 Fuerza por desequilibrio de tensiones mecánicas. La fuerza resultante por tensiones mecánicas desequilibradas se calcula mediante la identificación de la hipótesis dominante aplicando la Ley de Hook (6), haciendo uso de las condiciones dadas en las hipótesis de tendido del conductor, teniendo una inicial y una final. (EBSA, 2014).

$$L_2 - L_1 = L_1 * \alpha * (\theta_2 - \theta_1) + L_1 * \frac{t_2 - t_1}{E} \quad (6)$$

$$L_1 = \frac{2 \cdot th_1}{w_1} \cdot \cosh\left(\frac{a \cdot w_1}{2 \cdot th_1}\right) \quad (7)$$

$$L_2 = \frac{2 \cdot th_2}{w_2} \cdot \cosh\left(\frac{a \cdot w_2}{2 \cdot th_2}\right) \quad (8)$$

$$t_1 = th_1 \cdot \cosh\left(\frac{a \cdot w_1}{2 \cdot th_1}\right) \quad (9)$$

$$t_2 = th_2 \cdot \cosh\left(\frac{a \cdot w_2}{2 \cdot th_2}\right) \quad (10)$$

$$\frac{2 \cdot th_2}{w_2} \cdot \cosh\left(\frac{a \cdot w_2}{2 \cdot th_2}\right) - \frac{2 \cdot th_1}{w_1} \cdot \cosh\left(\frac{a \cdot w_1}{2 \cdot th_1}\right) = \frac{2 \cdot th_1}{w_1} \cdot \cosh\left(\frac{a \cdot w_1}{2 \cdot th_1}\right) \cdot \alpha \cdot (\theta_2 - \theta_1) \quad (11)$$

$$+ \frac{2 \cdot th_1}{E \cdot w_1} \cdot \cosh\left(\frac{a \cdot w_1}{2 \cdot th_1}\right) \cdot (th_2 \cdot \cosh\left(\frac{a \cdot w_2}{2 \cdot th_2}\right) - th_1 \cdot \cosh\left(\frac{a \cdot w_1}{2 \cdot th_1}\right))$$

La fórmula para determinar la longitud final del cable (L2) incluye los siguientes factores: la longitud inicial (L1) del cable en metros, la temperatura final (Θ_2) y la temperatura inicial (Θ_1) del conductor en grados Celsius, la tensión mecánica final (t2) y la tensión mecánica inicial (t1) en kg/mm², y el factor de dilatación del cable (α) en °C⁻¹. Además de los factores previamente mencionados, la fórmula también toma en cuenta el módulo de elasticidad del conductor (E) en kg/mm², la tensión mecánica horizontal final (th2) y la tensión mecánica horizontal inicial (th1) en kg/mm², el peso aparente inicial (w1) y el peso aparente final (w2) en kg/m/mm², y la longitud del vano (a) en metros. (EBSA, 2014).

Es necesario recurrir a herramientas computacionales para encontrar las tensiones mecánicas horizontales especificadas en la ecuación de cambio de estado.

El coeficiente de dilatación α y el módulo de elasticidad E del conductor tienen un cálculo estandarizado para los conductores ACSR y AAAC. (EBSA, 2014).

$$\alpha = \frac{\alpha_{al} \cdot E_{al} \cdot h_{al} \cdot \phi_{al}^2 + \alpha_{ac} \cdot E_{ac} \cdot h_{ac} \cdot \phi_{ac}^2}{E_{al} \cdot h_{al} \cdot \phi_{al}^2 + E_{ac} \cdot h_{ac} \cdot \phi_{ac}^2} \quad (12)$$

$$E = \frac{E_{al} \cdot h_{al} \cdot \phi_{al}^2 + E_{ac} \cdot h_{ac} \cdot \phi_{ac}^2}{h_{al} \cdot \phi_{al}^2 + h_{ac} \cdot \phi_{ac}^2} \quad (13)$$

El coeficiente de dilatación del aluminio se denota mediante la letra " α_{al} " y se expresa en términos de °C⁻¹. Del mismo modo, el coeficiente de dilatación del acero se representa como " α_{ac} " y también se encuentra en unidades de °C⁻¹. (EBSA, 2014).

El módulo de elasticidad del aluminio se designa como " E_{al} " y se expresa en kilogramos por milímetros cuadrados (kg/mm^2), mientras que el módulo de elasticidad del acero se representa como " E_{ac} " y también se encuentra en unidades de kg/mm^2 .

El número de hilos de aluminio se indica como " h_{al} ", mientras que el número de hilos de acero se representa como " h_{ac} ". Además, el diámetro de un hilo de aluminio se designa como " Φ_{al} " y se expresa en milímetros (mm), mientras que el diámetro de un hilo de acero se representa como " Φ_{ac} " y también se encuentra en unidades de m.m (EBSA, 2014).

2.1.1.3 Fuerza por cambio de dirección de la línea. La desviación de la línea en un ángulo β genera una fuerza en dirección transversal, el cálculo de dicha fuerza tiene en cuenta la presión ejercida por el viento sobre conductores y aisladores. En las ecuaciones (14) y (15) se tiene en cuenta el cambio del ángulo, así como también tensiones desequilibradas. El cálculo de esta fuerza depende del tipo de estructura y de aisladores (EBSA, 2014).

- Para estructuras de paso y suspensión con aisladores de espigo:

$$F_{cd} = th1_2 * \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) + th2_2 * \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) + F_{vc} * \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) + F_{ai} \quad (14)$$

- Para estructuras de retención o terminal con cadenas de aisladores:

$$F_{cd} = th1_2 * \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) + th2_2 * \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) + F_{vc} * \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) + F1_{ai} * \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) + F2_{ai} * \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (15)$$

2.1.1.4 Fuerza por levantamiento. Se consideran los esfuerzos por levantamiento cuando las estructuras se encuentran en puntos más bajos a las estructuras adyacentes, ya que se genera una tensión mecánica en dirección ascendente. Se busca evitar a toda costa que la estructura sufra estas fuerzas de levantamiento. (EBSA, 2014).

2.1.2 Hipótesis de diseño

Se realiza un estudio de todas las condiciones a las que estará expuesta la estructura con el fin de asegurar la confiabilidad y seguridad del sistema en el caso más desfavorable, siendo obligatorio incluir estos análisis en la memoria de cálculo.

Las condiciones que se estudian son cuando se presentan todos los esfuerzos sin fallas en los conductores (condición normal) y cuando uno o algunos conductores o cables de guarda están rotos (condición anormal) (EBSA, 2014). Las condiciones anormales que se analizan dependen del tipo de estructura y se resumen en la tabla 1.

Tabla 1

Condiciones anormales según la estructura.

Tipo de Estructura	Condiciones anormales
Estructura de suspensión	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="690 982 1388 1234">▪ El conductor es interrumpido en cualquier tramo. Las fases restantes y condición del cable de protección preservadas (velocidad máxima media del viento y temperatura igual). <li data-bbox="690 1276 1388 1528">▪ Los conductores de fases y cable de guarda sanos, y cables de guarda dañados. (velocidad máxima promedio del viento y temperatura de iguales valores).
Estructura de retención	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="690 1585 1388 1837">▪ Interrupción simultánea de cualquier fase y cable de guarda, las demás fases y cables de guarda restantes intactos, (Velocidad de viento máximo promedio y temperatura de iguales valores).

	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Se rompen dos fases diferentes. Y la fase restante y cable de guarda intactos, (Velocidad de viento máximo promedio y temperatura de iguales valores).
Estructura Terminal	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Interrupción simultánea de cualquier fase y cable de guarda, las demás fases y cables de guarda restantes intactos, (Velocidad de viento máximo promedio y temperatura de iguales valores). ▪ Se rompen dos fases distintas. Las fases que quedan y los cables de guarda intactos. (velocidad máxima media del viento y temperatura de coincidencia).

Nota. En esta tabla se encuentran todas las hipótesis anormales a estudiar para cada tipo de estructura, según EBSA. Tomado de Normas de diseño de redes de distribución de energía eléctrica, (EBSA, 2014).

2.1.3 Cálculo de momentos

Para el cálculo de los momentos, en condición normal, a partir de las fuerzas calculados anteriormente, se tienen en cuenta los factores de seguridad definidos por ICONTEC (2013). También se establece que para las condiciones anormales se usa un factor de seguridad de 1.25 para todas las cargas. (EBSA, 2014)

Tabla 2

Factores de seguridad según el material y las cargas.

Descripción	Factor de seguridad
--------------------	----------------------------

Estructura en concreto	2.5
Estructura metálica	1.5
Cargas verticales	1.1
Cargas transversales de viento	2.0
Cargas longitudinales	1.2
Cargas de ángulo	1.5
Cables para templetes	2.0
Aisladores y herrajes	3.0

Nota. Valores de factores según el material y las cargas. Tomado de Normas de diseño de redes de distribución de energía eléctrica, (EBSA, 2014).

2.1.3.1 Momento resistente. Con el momento resistente se determina la capacidad resistente de la estructura, calculada como la carga de rotura T_{rp} aplicada a una altura tomada desde la superficie del terreno hasta 20 centímetros de la cima (ICONTEC, 2013), sobre el factor de seguridad para estructuras de concreto de valor 2.5. (EBSA, 2014).

$$M_{re} = \frac{T_{rp}}{2.5} * (L_{et} - L_{ep} - 0.2) \quad (16)$$

El momento debido a la resistencia (M_{re}) en la estructura se evalúa en unidades de kg·m. La tensión de rotura mecánica (T_{rp}) de la estructura se expresa en kg. La longitud total (L_{et}) de la estructura se cuantifica en metros, mientras que la longitud de anclaje (L_{ep}) también se mide en metros. El factor de seguridad (f_{se}) es un valor utilizado para evaluar la robustez de la estructura y tiene un valor de 2,5 para estructuras de ferroconcreto y 1,5 para estructuras metálicas (EBSA, 2014).

2.1.3.2 Momento por presión del viento. Se considera que la presión del viento ejerce la fuerza sobre el centroide de la estructura generando el momento calculado por la ecuación (17), teniendo en cuenta el factor de seguridad para cargas transversales de viento de la tabla 2.

$$M_{va} = f_{sva} * F_{va} * \left[\frac{(L_{et} - L_{ep})}{3} * \frac{d_b + 2 * d_c}{d_b + d_c} \right] \quad (17)$$

El momento generado por la acción del viento sobre la estructura es designado como M_{va} , cuya unidad de medida es kg·m. El factor de seguridad relacionado con las cargas transversales del viento se simboliza como f_{sva} . La magnitud de la fuerza ejercida por el viento sobre la estructura se expresa mediante F_{va} , con unidades de kg. La altura del centroide y punto de aplicación de la carga generada por el viento se indica por h , que se mide en metros con relación al nivel del terreno. Por otro lado, se utiliza Φ_1 para designar el diámetro equivalente o real de la estructura a nivel del terreno, cuya unidad de medida es metros. Finalmente, el diámetro equivalente o real en la parte superior de la estructura se designa como Φ_2 y se mide en metros (EBSA, 2014).

2.1.3.3 Momento por cambio de dirección de la línea. Se determina que el momento generado por el cambio de dirección de la línea se produce en la altura de sujeción de los conductores y se emplea un factor de seguridad en consideración a las cargas angulares. (EBSA, 2014)

$$M_{cd} = f_{scd} * F_{cd} * h_{mon} \quad (18)$$

El momento generado por los conductores y aisladores como resultado de un cambio en su dirección se designa con M_{cd} , con una unidad de medida en kg·m. El factor de seguridad para las cargas angulares es conocido como f_{scd} , mientras que la fuerza resultante de dicho cambio se indica como F_{cd} , con unidades en kg. La altura en la que se montan los conductores se representa mediante h_{mon} , con unidades en metros. (EBSA, 2014)

2.1.4 Curva de utilización

Con los momentos anteriormente descritos se realiza la curva de utilización en la que se determina la funcionalidad de la estructura mediante una gráfica obtenida a partir de la siguiente ecuación (EBSA, 2014).

$$M_{re} \geq M_{va} + M_{cd} \quad (19)$$

Esta desigualdad debe cumplirse para todas las condiciones estudiadas y debe incluirse en la memoria de cálculo como demostración de que el poste tiene la capacidad estructural correcta. Según EBSA (2014) se debe tener en cuenta que las estructuras usadas en el diseño deben ser autoportadas en la medida de lo posible.

El momento resistente del apoyo se denomina (M_{re}), el momento generado por la presión del viento sobre la estructura es (M_{va}), ambos con unidades en kg·m y el momento generado por los conductores y aisladores como resultado de un cambio en su dirección se designa con M_{cd} (EBSA, 2014).

2.2 Cálculos y selección de estructuras según operador AIR-E

En el caso del operador de red AIR-E los cálculos se exponen en documentos de proyectos tipo (2022). Estos cálculos mecánicos se realizan en base a la norma IEC 60826, para condición normal y anormal, dichas condiciones dependen de la función de la estructura en la línea de distribución y se resumen en la tabla 3.

Tabla 3

Hipótesis de carga de diseño para cada tipo de estructura.

Función	Hipótesis Normal	Hipótesis Anormal	
	Condición 1	Condición 2 (Rotura de conductor)	Condición 3 Desequilibrio 50% de tensiones
Alineación	Cargas verticales mantenidas	No aplica	No aplica
	Carga total en la dirección horizontal causada por la acción del viento transversal en los conductores y el resultado de las tensiones.		
	Carga transversal horizontal debido a la desviación en el peso propio de los conductores		
Ángulo	Carga longitudinal horizontal causada por la desviación en el peso de los equipos.	No aplica	No aplica
	Cargas verticales permanentes.		
	Carga horizontal total derivada de la acción del viento transversal en conductores y consecuencia de las tensiones.		
	Carga horizontal total derivada de la acción del viento transversal en apoyos, equipos eléctricos y aisladores		
	carga horizontal transversal por la desviación del peso propio de los conductores.		
	carga horizontal longitudinal resultante de la desviación del centro de gravedad de los equipos		

Función	Hipótesis Normal	Hipótesis Anormal	
	Condición 1	Condición 2 (Rotura de conductor)	Condición 3 Desequilibrio 50% de tensiones
Anclaje	Cargas verticales mantenidas		
	Carga horizontal total derivada de la acción del viento transversal en conductores y consecuencia de las tensiones.		
	Carga horizontal total derivada del efecto del viento transversal en apoyos, equipos eléctricos y aisladores	No aplica	No aplica
	Carga longitudinal horizontal debido a un desequilibrio real en las tensiones causado por el efecto del viento en su máxima intensidad.		
Anclaje 0°	Cargas verticales mantenidas	Cargas verticales permanente: 100% de conductores íntegros y 50% de conductor dañado	Cargas verticales mantenidas
	Carga transversal horizontal debido a la desviación en el peso propio de los conductores	Carga Horizontal Longitudinal debido a la	El efecto del viento en su máxima intensidad genera un 50% de desequilibrio en las tensiones, lo que resulta en una carga
	La influencia del viento genera una carga horizontal transversal en postes, aisladores y dispositivos eléctricos.	Interrupción de un Conductor bajo la Influencia de un Viento Debilitado	

Función	Hipótesis Normal	Hipótesis Anormal	
	Condición 1	Condición 2 (Rotura de conductor)	Condición 3 Desequilibrio 50% de tensiones
			longitudinal horizontal.
	Carga causada por desequilibrio real de tensiones debido al efecto del viento máximo en la dirección longitudinal.	Excluir la consideración de cualquier otro efecto transversal debido al viento en conductores, postes, etc.	Omitir la consideración de cualquier otra fuerza transversal generada por el viento en conductores, postes, etc.
	Cargas verticales mantenidas	Cargas verticales mantenidas	
	La influencia del viento genera una carga horizontal transversal sobre los conductores.	Omitir la consideración de cualquier otra fuerza transversal generada por el viento en conductores, postes, etc.	
	Carga causada por el efecto del viento en la dirección transversal en postes, aisladores y equipos.		
Fin de línea	Carga transversal horizontal resultante de la desviación en el peso de los conductores		No aplica
	Carga transversal horizontal resultante de la desviación en el peso de los equipos eléctricos.	La rotura de un conductor bajo la influencia reducida del viento genera una carga	
	Carga longitudinal horizontal debido a desequilibrios REALES de tensiones causados por el		

Función	Hipótesis Normal	Hipótesis Anormal	
	Condición 1	Condición 2 (Rotura de conductor)	Condición 3 Desequilibrio 50% de tensiones
	efecto del viento en su máxima intensidad.	longitudinal	horizontal.

Nota. En esta tabla se encuentran todas las hipótesis anormales a estudiar para cada tipo de estructura, según AIR-E. Proyecto Tipo: Líneas Eléctricas Aéreas M.T. Sin Neutro, AIR-E, 2022.

Los datos de velocidad del viento usados para el cálculo de fuerzas sobre estructuras, conductores y equipos se toman de la (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010) donde se encuentran los valores de viento máximo por regiones. La metodología usada para los cálculos es la siguiente.

2.2.1 Cálculo de fuerzas sobre postes.

Se realizan el cálculo de fuerzas en la hipótesis normal y anormales según la tabla 3, considerando fuerzas verticales, transversales por viento y cambios de dirección y longitudinales por tensiones desequilibradas (Suarez Forero, 2022).

2.2.1.1 Hipótesis normal

2.2.1.1.1 Fuerzas verticales mantenidas. Se consideran como fuerzas verticales las generadas por el peso propio de los cables, equipos y aisladores que estén presentes en la estructura. Para los conductores esta carga se calcula a partir de los semigravivanos o vanos peso anterior y posterior, de la componente horizontal de la tensión mecánica y del peso unitario del conductor (Suarez Forero, 2022).

Para Suarez Forero (2022) el peso es una carga puntual por tanto se puede sumar algebraicamente, en el caso de los conductores es necesario calcular el gravivano a_g donde a_{g1} es el gravivano anterior y a_{g2} el posterior en metros y se calcula de la siguiente forma.

$$a_g = a_{g1} + a_{g2} [m] \quad (20)$$

$$a_{g1} = a_1 - \frac{T_{01}}{P_c} / [\tanh^{-1} \frac{\cosh(\frac{P_c a_1}{T_{01}}) - 1}{\sinh(\frac{P_c a_1}{T_{01}})} - \sinh^{-1} \frac{\frac{P_c b_1}{T_{01}}}{\sqrt{\sinh^2(\frac{P_c a_1}{T_{01}}) - (\cosh(\frac{P_c a_1}{T_{01}}) - 1)^2}}] \quad (21)$$

$$a_{g2} = \frac{T_{02}}{P_c} / [\tanh^{-1} \frac{\cosh(\frac{P_c a_2}{T_{02}}) - 1}{\sinh(\frac{P_c a_2}{T_{02}})} - \sinh \frac{\frac{P_c b_2}{T_{02}}}{\sqrt{\sinh^2(\frac{P_c a_2}{T_{02}}) - (\cosh(\frac{P_c a_2}{T_{02}}) - 1)^2}}] \quad (22)$$

Los signos deben corresponder al siguiente criterio para b1 y b2:

$$\begin{aligned} b1 &> 0 \text{ si } yb1 - ya1 > 0 \\ b1 &< 0 \text{ si } yb1 - ya1 < 0 \\ b2 &> 0 \text{ si } yb2 - ya2 > 0 \\ b2 &< 0 \text{ si } yb2 - ya2 < 0 \end{aligned}$$

$$P_c = T_{01} * \sinh\left(\frac{P_c * a_{g1}}{T_{01}}\right) + T_{02} * \sinh\left(\frac{P_c * a_{g2}}{T_{02}}\right) \quad (23)$$

2.2.1.1.2 Fuerza horizontal transversal por el efecto del viento sobre conductores en apoyos de fin de línea, anclaje (0°). La acción del viento sobre los conductores en estructuras de fin de línea y de anclaje sin desviación de la línea está dada por la presión unitaria del viento multiplicada por la longitud del vano eolovano o vano viento y por la sumatoria de la altura de los conductores sobre el punto de aplicación de la fuerza h_N , se estudia para la condición de viento máximo de la zona (Suarez Forero, 2022).

$$F_{TVC} = P_{VC} * a_v * \sum_i \frac{h_i}{h_N} \quad (24)$$

2.2.1.1.3 Fuerza horizontal resultante debida a la acción del viento transversal sobre conductores y resultante de tensiones en apoyos de alineación, ángulo, anclaje. El cálculo de esta fuerza tiene en cuenta el desequilibrio de tensiones, la desviación de la línea en un ángulo β en estructuras de anclaje y de ángulo y la fuerza ejercida por el viento en condición de máxima velocidad del viento.

$$F_{TVC} = \left(P_{VC} * a_v * \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) + \sqrt{(T_{02} - T_{01})^2 * \cos^2\left(\frac{\beta}{2}\right) + (T_{02} - T_{01})^2 * \sin^2\left(\frac{\beta}{2}\right)} \right) * \sum_i \frac{h_i}{h_N} \quad (25)$$

El primer término es debido al efecto del viento sobre los cables en dirección de la fuerza que resulta. El segundo término, son las tensiones resultantes AL y ANG sobre los mismos cantones de apoyos, resulta que $T_{01} = T_{02} = T_0$; donde T_0 es la componente horizontal de la tensión del vano regulador de cantón del poste (Suarez Forero, 2022).

2.2.1.1.4 Fuerza horizontal transversal por la acción del viento en postes. La fuerza ejercida por la acción del viento se asume que actúa de manera transversal y es aplicada en el centroide del apoyo. La expresión matemática para el cálculo de dicha fuerza es la siguiente.

$$F_{TVP} = q_o * C_{xp} * G_T * S_{xp} \quad (26)$$

La presión dinámica del viento q_o , viene dada por la densidad del viento μ y la velocidad máxima del viento de la zona.

$$q_o = \frac{1}{20} * \mu * \left(\frac{V_{max}}{1.37}\right)^2 \quad (27)$$

El coeficiente de arrastre C_{xp} se determina a partir del número de Reynolds y puede ir de 0.75 a 1.2, dependiendo de las características del poste. El factor combinado de viento G_T , se

determina según el tipo de terreno o descrito por la IEC 60826, donde h_p es la altura desde el suelo al centroide de la estructura.

$$\text{Terreno A: } G_T = -0.0002 * h_p^2 + 0.0232 * h_p + 1.4661 \quad (28)$$

$$\text{Terreno B: } G_T = -0.0002 * h_p^2 + 0.0274 * h_p + 1.6820 \quad (29)$$

$$\text{Terreno D: } G_T = -0.0002 * h_p^2 + 0.0384 * h_p + 2.9284 \quad (30)$$

El área frontal efectiva a la acción del viento S_{xp} se halla considerando una estructura troncocónica de diámetros de base y cima distintos (Suarez Forero, 2022).

$$S_{xp} = h_i * \left(\frac{d_b + d_c}{2} \right) \quad (31)$$

2.2.1.1.5 Fuerza horizontal transversal por la acción del viento en aisladores. De igual manera que con el cálculo de la fuerza generada por la acción del viento sobre postes, se asume que la fuerza es aplicada sobre el centroide del aislador.

$$F_{TVA} = q_0 * C_{xa} * G_T * S_{xa} \quad (32)$$

El término q_0 es la presión variable del viento, se refiere a la fuerza por unidad de área ejercida por el viento, medida en daN/m². C_{xa} se refiere a factor del arrastre de los aisladores para máximo viento y describe la resistencia al avance del objeto debido al viento. G_T es el factor mixto de viento y hace referencia a una combinación de factores que influyen en la interacción del objeto con el viento. Por último, S_{xa} es el área frontal efectiva se refiere a la superficie del objeto que está expuesta al flujo de aire y se mide en metros cuadrados (Suarez Forero, 2022).

$$S_{xa} = L_a * d_a \quad (33)$$

2.2.1.1.6 Fuerza horizontal transversal por la acción del viento en equipos. Se considera la fuerza por acción del viento sobre el centroide de los equipos.

$$F_{TVE} = q_0 * C_{xe} * G_T * S_{xe} \quad (34)$$

El valor de coeficiente de arrastre para equipos C_{xe} depende del número de Reynolds y puede tener un valor de hasta 1.2. Se asumen equipos cilíndricos para el cálculo del área frontal efectiva.

$$S_{xe} = L_e * d_e \quad (35)$$

Se tienen en cuenta cuatro variables cruciales para evaluar la incidencia del viento, estas son: la presión dinámica del viento (q_0) expresada en daN/m², el coeficiente de arrastre para el equipo (C_{xe}), el factor combinado de viento (G_T), y el área frontal efectiva (S_{xe}) que se mide en metros cuadrados (Suarez Forero, 2022).

2.2.1.1.7 Fuerzas horizontales transversales por excentricidad del peso propio de conductores y equipos. Los conductores y equipos en una estructura generan un momento flector al trasladar la carga vertical debió al peso propio de los elementos y la distancia al eje del poste. La fuerza transversal por excentricidad del peso del conductor está dada según el peso de los aisladores P_s , la longitud horizontal de los conductores al eje del poste L_{cej} .

$$F_{TEC} = \frac{1}{h_N} * \left[\sum_j (P_{cj} + P_s) * L_{cej} \right] \quad (36)$$

Las siguientes variables son consideradas en el cálculo de la carga: la carga vertical transmitida por el conductor j (P_j) en daN, el peso del aislador o cadena (P_s) en daN, la distancia horizontal desde el conductor hasta el eje del poste (L_j) en metros, la altura a la que se aplica la carga horizontal equivalente (h_N) en metros. Además, se toma en cuenta la fuerza transversal excéntrica del peso del equipo mediante la distancia del centroide del equipo hasta el eje del poste (L_E) en metros y el peso del equipo (P_E) en daN (Suarez Forero, 2022).

$$F_{TEC} = \frac{1}{h_N} * L_E * P_E \quad (37)$$

2.2.1.1.8 Fuerza horizontal longitudinal por desequilibrio real de tensión. Esta fuerza se considera solo en estructuras con cadenas de amarre, en el caso de este operador de red, las estructuras de anclaje y de fin de línea. Cuando los vanos anterior y posterior son distintos, generando un desequilibrio de tensiones.

$$F_{LTC} = |T_{02} - T_{01}| * \sum_i \frac{h_i}{h_N} \quad (38)$$

$$F_{LTC} = T_0 \sum_i \frac{h_i}{h_N} \quad (39)$$

La tensión horizontal en el conductor, ubicada en el vano regulador del cantón anterior (T_{01}) y posterior (T_{02}), se evalúa en daN bajo la hipótesis de viento máximo. La altura del conductor de la fase i se mide en metros (h), y la altura libre del poste se determina restando 0,2 m de acuerdo con la definición de "Fuerza Equivalente" presente en el Capítulo 2 de la norma del operador de red. Cuando los postes trabajan como Fin de Línea, solo existe una tensión aplicada. La componente horizontal de la tensión en el conductor correspondiente al vano regulador del cantón anterior se identifica como T_0 y se evalúa bajo la hipótesis de viento máximo en daN (Suarez Forero, 2022).

2.2.1.2 Hipótesis anormales. Se realizan los cálculos de las fuerzas verticales de la hipótesis normal, además de los siguientes cálculos.

2.2.1.2.1 Fuerza horizontal longitudinal por rotura de conductor. Se asume la rotura de uno de los conductores en uno de los vanos adyacentes a la estructura con condición de viento reducido. La rotura del conductor genera un momento torsor que se aplica en el punto más desfavorable al eje del poste t (Suarez Forero, 2022).

$$M_T = t * \text{Máx}(T_{02}, T_{01}) \quad (40)$$

2.2.1.2.2 Fuerza horizontal longitudinal por 50% de desequilibrio de tensiones. Debido a que puede haber un desequilibrio en los conductores debido a que el armado tenga alguna cadena de amarre, es necesario asumir un desbalance del 50% del valor máximo de tensión presente en los vanos adyacentes a la estructura para incrementar la función de anclaje (Suarez Forero, 2022).

$$F_{LMC} = 0.5 * \text{Máx}(T_{02}, T_{01}) * \sum_i \frac{h_i}{h_N} \quad (41)$$

2.2.2 Cargas ultimas y factores de mayoración

Las cargas ultimas establecen la capacidad estructural máxima de los apoyos, se comparan con las fuerzas anteriormente calculadas para los dos escenarios de hipótesis de carga aplicando del factor de mayoración (Suarez Forero, 2022). Dichos factores y cargas ultimas se encuentran en la siguiente tabla:

Tabla 4

Cargas ultimas y factores de mayoración hipótesis normal

Tipo de Carga Aplicada	Factor de Mayoración	Fuerza Resistente Última
Fuerza total vertical	1,2	La fuerza máxima que genera la rotura por compresión en el lugar donde se aplica la carga.
Fuerza horizontal resultante	2,5	Fuerza de rotura por flexión o fuerza longitudinal última en el punto de aplicación de la carga.

Nota. Factores de seguridad o en este caso factores de mayoración para la hipótesis normal según AIR-E. Proyecto Tipo: Líneas Eléctricas Aéreas M.T. Sin Neutro, AIR-E, 2022.

Tabla 5

Cargas ultimas y factores de mayoración hipótesis anormales

Tipo de Carga Aplicada	Factor de Mayoración	Fuerza Resistente Última
Fuerza total vertical	1,2	La fuerza máxima que genera la rotura por compresión en el lugar donde se aplica la carga.
Fuerza horizontal longitudinal por 50 % de desequilibrio de tensiones	1,5	Fuerza máxima que produce la rotura por flexión.
Momento torsor por rotura de un conductor	1,5	El momento de torsión máximo del poste en la altura en la que se encuentra el conductor en cuestión, durante el análisis.

Nota. Factores de seguridad o en este caso factores de mayoración para las hipótesis anormales según AIR-E. Proyecto Tipo: Líneas Eléctricas Aéreas M.T. Sin Neutro, AIR-E, 2022.

Las fuerzas resistentes ultimas están dadas para los distintos tipos de estructura de concreto dispuestos por (Suarez Forero, 2022). Se calcula la fuerza horizontal resultante como la suma vectorial de las fuerzas horizontales transversales y longitudinales.

$$F_h = \sqrt{\left(\sum F_T\right)^2 + \left(\sum F_L\right)^2} \quad (42)$$

2.2.3 Selección de la estructura

Para la selección de la estructura el esfuerzo presente en la estructura por el factor de mayoración debe ser menor que la carga ultima resistente para todos los escenarios.

$$\text{Carga última} \geq \text{Carga calculada} * \text{Factor de mayoración}$$

Al igual que lo señalado por el operador de red EBSA se exige el uso de estructuras auto soportadas y que los cálculos anteriormente mencionados se encuentren en la memoria de cálculos para cada estructura del proyecto.

2.3 Cálculos y selección de estructuras según Grupo EPM.

Los cables realizan esfuerzos que afectan la estructura como también los elementos de sujeción, las cargas tienen componentes, longitudinal, transversal y vertical. En la guía del grupo EPM en el numeral 7.1 se encuentran las definiciones.

2.3.1 Cargas verticales

Los esfuerzos verticales en la estructura, incluyendo el peso del conductor, el peso del aislador y la carga de mantenimiento, están determinadas por la siguiente expresión.

$$F_V = (V_p * P_u) + P_{CA} \quad (43)$$

Donde V_p es el vano peso, en metros, P_u es el peso unitario del conductor, en daN/m y P_{CA} es el peso de los aisladores incluidos herrajes y accesorios, en daN/m.

La cantidad de peso en una estructura está influenciada por la topografía del terreno. Por tanto, para estructuras de soporte y angulares, el peso en terrenos accidentados puede ser aproximadamente un 40% más que el viento máximo permitido para ese tipo de estructura, mientras que en terrenos llanos puede ser un 20% más (Consultoría Colombiana S.A, 2019).

2.3.2 Cargas longitudinales

Las fuerzas longitudinales se producen debido a la desigualdad en los vectores de fuerza cuando existen vanos reguladores contiguos con diferentes tensiones, así como por desequilibrios causados por la rotura de los conductores. Esta última condición es la más importante.

La tensión longitudinal se iguala con la máxima tensión desequilibrada (diferencia en las tensiones horizontales de los vanos adyacentes) para diferentes situaciones mecánicas (viento

máximo, viento promedio, diaria, inicial y de temperatura máxima) (Consultoría Colombiana S.A, 2019).

La fuerza longitudinal se calcula de la siguiente manera:

$$F_L = \text{Max}(|TL_{iVR1} - TL_{iVR2}|) \quad (44)$$

Donde TL_{iVR1} y TL_{iVR2} son la fuerza longitudinal vano regulador de adelante y de atrás, respectivamente, en daN.

2.3.3 Cargas Transversales

La carga transversal (F_T) en las estructuras es el resultado de sumar la carga causada por el viento en los conductores y aisladores (F_{TV}) y la carga debida a la tensión del conductor debido a su ángulo de inclinación ($F_{T\alpha}$).

$$F_T = F_{TV} - F_{T\alpha} \quad (45)$$

2.3.3.1 Fuerza transversal de viento. Las cargas transversales de viento se basan en la metodología presentada por la American Society of Civil Engineers (2020).

La fuerza del viento en general se calcula de la siguiente manera:

$$F_{TV} = \gamma_w * Q * K_z * K_{zt} * (V_{PR})^2 * G * C_f * A \quad (46)$$

El factor de carga de viento, representado como γ_w , se utiliza para determinar el período de retorno en N años, siendo N=50 años su valor igual a 1.

El factor Q se determina mediante las tablas de ASCE 74(2020) teniendo en cuenta la temperatura ambiente y la altitud de la zona.

El factor topográfico, representado por K_{zt} , se determina en base a las características del terreno de acuerdo con la sección 2.1.7 de la cuarta edición de la ASCE 74(2020). Para terrenos planos, el valor de referencia es 1.0, mientras que para otros tipos de terrenos se utiliza la figura 2-9 de la misma sección para calcular su valor necesario.

La velocidad del viento con un período de retorno de N años, representada como V_{PR} , se mide a 10 metros por encima del nivel del suelo y se expresa en metros por segundo.

El coeficiente de fuerza o arrastre, representado como C_f , varía dependiendo del elemento y se calcula en base a su forma, tamaño, orientación frente al viento, obstrucción al viento, estabilidad y rugosidad. Para los cables, su valor se fija en 1 y para aisladores en 1.2 (Consultoría Colombiana S.A, 2019).

El área expuesta, representada como A, se mide en metros cuadrados y para los conductores se determina multiplicando la longitud del vano (V_v) por su diámetro (D). Para la cadena, se determina multiplicando la longitud de la cadena (L_c) por el diámetro del aislador (D_a) y aplicando un factor de 0.6 para tener en cuenta la forma del aislador (Consultoría Colombiana S.A, 2019).

2.3.3.2 Fuerza perpendicular generada en un ángulo. La fuerza transversal generada por la deflexión se puede calcular como: ($F_{T\alpha}$ en daN) está dada por la ecuación (63)

$$F_{T\alpha} = |T_{iVR1} + T_{iVR2}| * \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (47)$$

Donde T es la tensión máxima en la dirección longitudinal bajo condiciones de viento máximo y temperatura mínima, medida en daN, α es el ángulo de curvatura de la línea.

La acción conjunta del peso propio del conductor y la carga transversal del viento genera el peso virtual del conductor que se representa con la siguiente ecuación.

$$Pr = \sqrt{p^2 + F_{TVc}^2} \quad (48)$$

Donde Pr es el peso virtual del conductor que considera la velocidad del viento, en daN/m, p es el peso del conductor daN/m tomado de datos del fabricante (Consultoría Colombiana S.A, 2019).

2.3.4 Hipótesis de cargas

Se deben considerar dos tipos de hipótesis de cargas, cargas normales y cargas excepcionales o anormales.

2.3.4.1 Cargas normales (condición 1). Bajo las condiciones de cargas normales, se supone que la estructura está sujeta a la combinación de las siguientes fuerzas: conductores y cable de guarda funcionando normalmente en condiciones climáticas de viento máximo y temperatura que es coincidente (Consultoría Colombiana S.A, 2019).

Tabla 6

Cargas de las estructuras según Grupo EPM.

Cargas Verticales	Comprende el peso de los conductores, los aisladores, los accesorios correspondientes a cada vano y el peso de la propia estructura
Cargas Transversales	Se considera la presión del viento sobre la superficie total proyectada de los conductores y aisladores en el vano medio, la presión del viento sobre la estructura, y la componente horizontal transversal de la tensión máxima del conductor debido al desvío máximo
Cargas Longitudinales	Referente a las fuerzas generadas por los desequilibrios en los vanos reguladores adyacentes en una torre y las producidas por la rotura de los conductores

Nota. En esta tabla se encuentran todas las cargas según la dirección de aplicación sobre la estructura según el Grupo EPM, Tomado de Guía Técnica: Cálculo mecánico de estructuras y elementos de sujeción de equipos, Grupo EPM, 2019.

2.3.4.2 Cargas anormales (condición 2). Para este escenario se supone que uno de los conductores está roto y el resto (otros conductores y el cable de guarda si existe) están en buen estado en condiciones climáticas de viento máximo y temperatura promedio (Consultoría Colombiana S.A, 2019).

Tabla 7

Cargas según la hipótesis de condición diaria y de conductor roto.

Cable sano		
Cargas transversales	Es la carga o tensión en los conductores y estructura que persiste bajo la acción constante del viento promedio.	$FT = (FTV + (FT\alpha))$
Cargas verticales	Esfuerzo que permanece en el elemento (conductores, cables de guarda, aisladores, estructuras) después de ser sometido a la acción continua del viento promedio.	$FV = (Vp * Pu) + (PCA)$
Cargas longitudinales	Esfuerzo que permanece en el elemento (conductores, cables de guarda, aisladores, estructuras) después de ser sometido a la acción continua del viento promedio.	$FL = \text{Max} (TL_{iVR1} - TL_{iVR2})$
Cable roto		
Cargas transversales	Excluir cualquier otra fuerza transversal causada por el viento en los conductores, postes, etc.	0
Cargas verticales:	El esfuerzo continuo sujeto a la influencia del viento disminuido en un factor de 0.75.	$FV = 0.75 * ((Vp * Pu) + (PCA))$

Cargas longitudinales	Esfuerzo longitudinal horizontal debido a la rotura de un conductor bajo la influencia del viento.	$FL = (TL_{iVR})$

Nota. En esta tabla se encuentran las cargas en condición diaria y en condición de conductor roto que se deben analizar. Tomado de Guía Técnica: Cálculo mecánico de estructuras y elementos de sujeción de equipos, Grupo EPM, 2019.

Para esta condición de carga se considera 50% de desequilibrio en las tensiones de todos los cables en la estructura en condición climática viento máximo y temperatura coincidente.

Tabla 8

Cargas que se consideran en la hipótesis de desequilibrio del 50% de tensiones.

Desequilibrio 50% de tensiones		
Cargas transversales	Exclusión de cualquier otro tipo de fuerza transversal causada por el viento en conductores, postes, etc.	0
Cargas verticales:	Esfuerzo permanente debido a la acción reducida del viento.	$FV = (Vp * Pu) + (PCA)$
Cargas longitudinales	Esfuerzo horizontal longitudinal debido a un 50% de desequilibrio de tensiones bajo la influencia del viento máximo.	$FL = \text{Max}(TL_{iVR1}, TL_{iVR2}) * 50\%$

Nota. Las cargas en esta tabla corresponden a las estudiadas en la hipótesis de desequilibrio del 50% de tensiones mecánicas de los conductores en la estructura. Tomado de Guía Técnica: Cálculo mecánico de estructuras y elementos de sujeción de equipos, Grupo EPM, 2019.

2.3.5 Parámetros mecánicos para la selección de las estructuras

Es necesario realizar verificaciones mecánicas y conocer los parámetros siguientes para la selección de las estructuras.

2.3.5.1 Capacidad de carga estructural. Referencia a la capacidad de los componentes de una estructura a considerar factores de seguridad para soportar cargas adicionales potenciales. Los factores de seguridad se determinan como la relación entre la carga de rotura especificada del componente y la carga de trabajo máxima (ICONTEC, 2013).

La siguiente tabla muestra los factores de seguridad requeridos por RETIE para postes, crucetas y aisladores de diferentes materiales (vidrio, porcelana y polímero).

Tabla 9

Factores de seguridad para estructuras según el material.

Material	Postes	Herrajes	Aisladores
Concreto	2.5	-	-
Acero	2.0	2.5	-
Fibra de vidrio	2.0	2.5	-
Cerámica*	-	-	2.5

Nota. Se agrupó todos los materiales en los que puede estar compuesto un aislador: vidrio, porcelana y polimérico, según el RETIE. Tomado de Guía Técnica: Cálculo mecánico de estructuras y elementos de sujeción de equipos, Grupo EPM, 2019.

En capítulo 20.17.1 b del RETIE (2013), los postes deben tener una capacidad de rotura de 510 kg, 750 kg, 1050 kg, 1350 kg, etc. Esta es la carga máxima horizontal que el poste puede soportar y se aplica a 20 cm de la parte superior.

2.3.5.2 Deflexión máxima. Como medida de seguridad y para garantizar un buen funcionamiento, cumpliendo con las normas de diseño eléctrico, como las distancias de seguridad, se deben tener en cuenta el desplazamiento máximo permitido en la cima de la estructura, teniendo en cuenta el material de esta.

Tabla 10

Deflexión máxima de los postes

Material	Deflexión máxima
Concreto	3%
Acero	10%
Fibra de vidrio	10%

Nota. Tomado de Guía Técnica: Cálculo mecánico de estructuras y elementos de sujeción de equipos, Grupo EPM, 2019.

La deflexión se mide como un porcentaje de la altura libre del poste, desde el suelo hasta la parte superior.

2.3.5.3 Cálculo mecánico en estructuras y elementos de sujeción de los equipos. Una vez establecidos los parámetros de carga, se verifica la resistencia de cada parte de la estructura. El método de cálculo utilizado para verificar la estructura es el de Esfuerzos admisibles, en el que la carga actuante se divide por la carga de rotura y el resultado debe ser menor o igual que el factor de seguridad (Consultoría Colombiana S.A, 2019).

$$\frac{F_a}{F_R} \leq FS \quad (49)$$

Donde F_a es la fuerza actuante, FS es el factor de seguridad y F_R es la fuerza resistente.

2.3.5.4 Verificación de poste de concreto. La capacidad de estos postes se verificará de acuerdo con la carga máxima horizontal de rotura aplicada a 20 cm de la cima, de acuerdo con las normas ICONTEC (2013).

$$\frac{M_A}{M_r} \leq FS \quad (50)$$

$$M_A = \sqrt{M_L^2 + M_T^2} \quad (51)$$

Donde, M_r es el momento resistente, producido por carga horizontal máxima a 20 cm de la cima. M_A es el momento actuante, M_L es el momento actuante en el sentido longitudinal y M_T es el momento actuante en el sentido transversal.

2.4 Cálculos y selección de estructura en proyectos de diseño

En los proyectos de diseño se espera encontrar la aplicación real de la metodología expuesta por los operadores de red y escogida por el diseñador para dar cumplimiento con los requerimientos mínimos del RETIE. Los proyectos encontrados toman los cálculos y metodología dada por el ICEL (actualmente IPSE), donde la selección de la estructura se realiza con la siguiente serie de pasos:

2.4.1. Selección hipotética de la estructura

Se escoge una estructura con las características mínimas normalizadas por el operador de red a partir del análisis mecánico de los conductores, teniendo en cuenta dichas características se realizan los cálculos de los siguientes pasos para comprobar que la estructura soporte la carga de trabajo diaria a la que estará expuesta.

2.4.2. Cálculo de las fuerzas (cargas) que afectan a la estructura

Se consideran las fuerzas ejercidas por la presión del viento y la producida por los cambios de dirección de la red, todas ellas tomadas de manera transversal a la línea. Para el cálculo de la presión del viento se utiliza la ecuación (43).

$$P_v = 0.0042 * V^2 \quad (52)$$

Esta presión del viento es la misma para los conductores y para la estructura, no se considera el efecto de dicha presión sobre los aisladores. Tampoco se consideran la forma de los elementos, la topografía ni el tipo de exposición de la zona. La fuerza ejercida por la presión de viento está dada por las ecuaciones (44) y (45) para estructuras y conductores respectivamente.

$$C_p = P_v * A_p \quad (53)$$

$$C_v = P_v * A_v \quad (54)$$

Donde A_p y A_v son las áreas de la estructura tipo concreto y los conductores, respectivamente, sobre las cuales incide el viento. Se tienen en cuenta los diámetros de la cima y la base, la altura de la estructura para la ecuación (55), el vano viento y el diámetro del conductor para la ecuación (56).

$$A_p = \frac{d_b + d_c}{200} * h \quad (55)$$

$$A_v = \phi_v * a_v \quad (56)$$

La fuerza generada por el cambio de dirección de la línea se calcula asumiendo que las componentes transversales de la tensión mecánica de los vanos adyacentes tienen igual dirección, sentido y magnitud.

$$C_A = 2 * T_{max} * \text{sen} \left(\frac{\alpha}{2} \right) \quad (57)$$

No se consideran las cargas longitudinales que se generan al tener tensiones mecánicas desequilibradas en la misma estructura, ni el tiro horizontal en los apoyos de final de línea.

2.4.3 Cálculo de los momentos generados por las cargas y momento resistente de la estructura

Se consideran los torques o momentos generados sobre las estructuras como las fuerzas anteriormente calculadas por la distancia de aplicación. De esta manera, los momentos generados por la fuerza de presión del viento C_v y la fuerza por cambio de la línea C_A sobre N número de conductores a una altura h_v se calculan con las ecuaciones (58) y (59), respectivamente.

$$M_v = C_v * h_v * N \quad (58)$$

$$M_A = C_A * h_v * N \quad (59)$$

La fuerza del viento sobre la estructura se asume es aplicada sobre el centroide de la estructura.

$$M_p = C_p * \frac{h}{3} * \left[\frac{d_b + 2 * d_c}{d_b + d_c} \right] \quad (60)$$

El momento resistente define la máxima resistencia de la estructura, se calcula como la carga de rotura C_R del apoyo aplicado a 20 cm de la cima según lo establecido por las normas ICONTEC (2013).

$$M_R = C_R * (L - L_E - 0.2) \quad (61)$$

2.4.4. Selección de la estructura y curva de utilización.

Para seleccionar la estructura se usa el método de fuerzas admisibles (ASD) donde la fuerza resistente de la estructura sobre un factor de seguridad debe ser mayor que la suma de todos los esfuerzos. Dicho factor de seguridad está definido como 2.5, dando el momento resistente de la ecuación (62).

$$M_R = \frac{C_R}{2.5} * (L - L_E - 0.2) \quad (62)$$

$$M_R \geq M_v + M_A + M_p \quad (63)$$

3. Revisión de la Normativa actual

3.1 Revisión RETIE

3.1.1 Estructuras de soporte

En el capítulo 7, cláusula 25.4 se establece que para las estructuras de soporte de columnas para redes aéreas de distribución, se deben utilizar apoyos de dimensiones y cargas de rotura estándar, además aplica la cláusula 3 de esta norma, que establece 2.5 veces el esfuerzo de rotura para un determinado tipo hormigón, este término hace referencia a la acumulación de las fuerzas mecánicas resultantes de la interacción de diversas cargas en la estructura, considerando las cargas mecánicas en el conductor y otros elementos que inciden directamente en la misma.

3.1.2 Distancias de seguridad en redes de distribución.

El artículo 25.6.1 establece lo siguiente: Los cables del circuito de distribución deberán respetar las distancias de seguridad especificadas en el artículo 13 y les son de aplicación las distancias previstas para las subestaciones en el Capítulo 6 del RETIE (2013). La tabla 13.1 del RETIE establece que, para la clase de tensión de los cables de soporte estructural a 34,5 kV, debe ser de 3,8 m. Es importante recalcar lo señalado en el punto A; los cables del circuito de distribución deberán respetar la distancia de seguridad especificada en este artículo 13 y las distancias determinadas para las subestaciones en el Capítulo 6 de este apartado general.

3.1.3 Conductores Aéreos

En el artículo 25.7.1 se establecen los siguientes ítems.

- No debe exceder la tensión de rotura, ni superar el 25% de la tensión máxima admisible, y no se admitirá que el conductor sufra tensiones mecánicas por encima del 25% de la tensión de rotura indicada en las especificaciones.

- Es requerido que los conductores sean instalados con los herrajes adecuados que correspondan con su tipo, material y calibre.
- A la hora de elegir un conductor económico, es fundamental tener en cuenta los criterios de pérdidas técnicas.
- En zonas en las que no puedan garantizarse las distancias de seguridad debido a obstáculos u otros factores, deberán utilizarse conductores aislados o semiaislados obedeciendo lo establecido en el artículo 13 del RETIE (2013).
- Las uniones de los conductores aéreos deben ser diseñadas para que funcionen sin deslizamiento a una tensión mecánica de rotura mínima del 90%.
- Los materiales utilizados en la construcción de los conectores o uniones con otros conductores deben ser adecuados y no deben causar corrosión galvánica, ya que esto podría poner en riesgo la seguridad de la rotura del conductor.
- Si el desgaste del cable debido a la rotura del filamento, la formación de arcos eléctricos cortocircuitos que afecten la tensión de rotura, deben ser modificadas o realizar las debidas correcciones.
- Cuando los cables utilizados para la red aérea se distienden tanto por el uso que ya no alcancen la altura mínima de seguridad, el propietario o titular de la red deberá retener dichos cables. Si con esta medida no se consigue la altura requerida, deberán aumentarse la longitud de las estructuras de soporte o utilizar en su lugar cables aislados o semiaislados.

3.1.4 Estructuras, postes y crucetas para redes de distribución

Según el Ministerio de Minas y Energía (2013) es necesario para los diseñadores de las redes contar una altura estandarizada de 8, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 16, 18, 20 o 22 m con un margen de tolerancia de más o menos 50 mm. Se permiten columnas más cortas en zonas aisladas con

pocas personas donde se utilizan conductos aislados o semiaislados y para las acometidas secundarias que están aisladas. Alternativamente, se podrán utilizar columnas de 6 m de altura (tipo alfardas) para soportar las conexiones aéreas desde el contador hasta el tablero de distribución de la unidad residencial, siempre que sus cargas de rotura no sean inferiores a 250 kgf. Las columnas seccionales se pueden utilizar para obtener dimensiones estándar si su resistencia a la tracción corresponde a los estándares mínimos establecidos para las columnas.

La parte b especifica que para acabados que no sean madera, los requisitos se aplican a cada especificación 5001 N, 7355 N, 10300 N, 13240 N, 17640 N, 19600 N o equivalente 510, 750, 1050, 1350, 1800 o 2000 kgf. Cuando el diseño requiera un mayor esfuerzo de rotura, la aplicación y las especificaciones del poste deben demostrarse completamente.

En la sección d, las columnas redondas de hormigón deben tener una longitud de conicidad de 2 cm/m a 1,5 cm/m, excepto las que se pueden acoplar a pernos.

3.2 Revisión Normativa ESSA

3.2.1 Apoyos

Los materiales utilizados en la construcción de estructuras deben tener una alta resistencia a la corrosión. Si no la tienen por su propia naturaleza, deben ser tratados para protegerlos contra la corrosión. La elección de los materiales para las líneas y redes eléctricas se basará en la carga de trabajo y en la capacidad de ruptura, siguiendo las condiciones especificadas para garantizar su adecuado funcionamiento (Equipo CET – Área de Proyectos, 2022).

La infraestructura de las redes de distribución estará compuesta por estructuras o postes elaborados con hormigón o fibra de vidrio que posean la resistencia adecuada para soportar la carga aplicada, siempre y cuando cumplan con los estándares establecidos por el Ministerio de Minas y Energía (2013). Para los postes de media tensión, se exige una longitud mínima es 12

metros para un voltaje de 13.2 kV y 14 metros para un voltaje de 34.5 kV. La forma de los postes de concreto será troncocónica y su producción puede ser realizada por medio de construcción vibrada, centrifugada o pretensada (Equipo CET – Área de Proyectos, 2022).

De acuerdo con las disposiciones del Ministerio de Minas y Energía (2013), cuando los postes se ubiquen dentro de una franja de retiro o en zonas cercanas a carreteras con alta velocidad vehicular y sean vulnerables a impactos de vehículos, se emplearán postes de fibra de vidrio (PRFV) con una capacidad de rotura hasta de 1350 kgf, pues esta tecnología constructiva representa un menor peligro para los pasajeros de los vehículos garantizando la seguridad de los pasajeros en caso de impacto. En las calles urbanas y carreteras municipales, las velocidades máximas y mínimas permitidas para vehículos de servicio público o privado serán establecidas y señalizadas debidamente por la autoridad competente de tráfico en el distrito o municipio apropiado.

Los soportes de las líneas de distribución eléctrica aérea deben cumplir con una longitud de empotramiento de 60 cm más una décima parte de la longitud del poste. Es importante verificar que la instalación no presente riesgo de volcamiento. El fabricante deberá identificar la sección transversal que cumpla con la distancia requerida con una marcación permanente. Las redes de media tensión aéreas deben colocarse en los apoyos a una longitud máxima entre apoyos consecutivos de 60 m (Equipo CET – Área de Proyectos, 2022).

4. Metodología de Cálculos Implementados en la Guía

La metodología para los cálculos mecánicos y la selección de estructuras tipo concreto implementada en la guía se basa en la propuesta por la Consultoría Colombiana S.A (2019) en su documento Guía Técnica para el cálculo mecánico de estructuras y elementos de sujeción de equipos (GM-12), realizado para el Grupo EPM al cual hace parte la Electrificadora de Santander.

Esta metodología tiene en cuenta el análisis de la topografía y exposición del terreno para el cálculo de la presión del viento sobre las estructuras realizado por la (American Society of Civil Engineers, 2020), tomando como valores de velocidad de viento los expuestos por la (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010) en la norma NSR-10. A continuación, se presenta dicha metodología.

4.1 Selección Hipotética de la Estructura

Se escogen las características mínimas de la estructura, teniendo en cuenta la longitud mínima definida por las normas ESSA para cada valor de tensión, para redes de baja tensión se debe tener 8 metros como mínimo, para redes de media tensión en 13.2 y 34.5 kV se deben tener 12 y 14 metros como mínimo respectivamente. A partir de estos valores se calcula la longitud de empotramiento de la estructura según las normas ICONTEC (2013).

$$L_e = (L * 0.1) + 0.6 \quad (64)$$

Tabla 11

Características postería de concreto con valores mínimos.

Longitud total [m]	Carga de rotura [daN]	Carga de trabajo [daN]	Diámetro [cm]	
			Cima	Base
8	500.1	200	14	26
	735.5	294.2	14	26
	1029.7	411.9	19	31
	500.1	200	14	29

Longitud total [m]	Carga de rotura [daN]	Carga de trabajo [daN]	Diámetro [cm]	
			Cima	Base
10	735.5	294.2	14	29
	1029.7	411.9	19	34
12	500.1	200	14	32
	735.5	294.2	16	34
	1029.7	411.9	19	37
	1323.9	529.6	20	38
14	735.5	294.2	16	37
	1029.7	411.9	19	40
	1323.9	529.6	20	41
16	1029.7	411.9	19	43
	1323.9	529.6	20	44

Nota. Los valores de carga de trabajo corresponden al 40% de la carga de rotura. Adaptado de Especificación técnica para postes de concreto, Grupo EPM, 2019.

4.2 Cálculo de las Fuerzas Sobre la Estructura

Se realiza el análisis completo de las fuerzas que actúan sobre la estructura para las hipótesis de condición normal, condición en la cual la línea estará la mayor parte del tiempo, donde se supone la línea sana en condiciones climáticas normales y las hipótesis de condición anormales, donde se considera la situación de montaje de los conductores de la línea en condición de viento máximo y la situación de falla mecánica de conductor por rotura (Consultoría Colombiana S.A, 2019).

4.2.1 Hipótesis de Condición Normal.

Según Consultoría Colombiana S.A (2019) en la hipótesis de condición normal se considera la acción de la fuerza del viento sobre la estructura, conductores y aisladores, en estructuras de anclaje y fin de línea se consideran los esfuerzos por cambio de dirección de la línea y tensiones mecánicas desequilibradas.

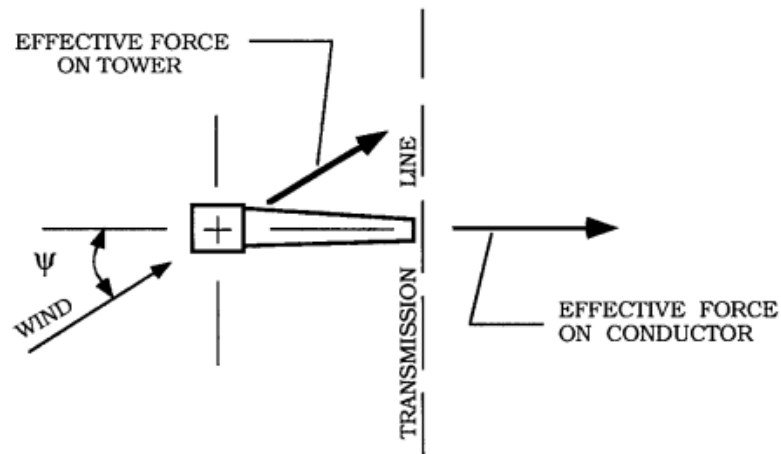
4.2.1.1 Carga ejercida por la presión del viento. El cálculo de la carga por presión del viento sobre las estructuras, conductores y aisladores se calcula de manera general mediante la siguiente ecuación.

$$F_V = Q * K_z * K_{zt} * (V)^2 * G * C_f * A \quad (65)$$

La fuerza por presión del viento depende del factor topográfico, factor de exposición, factor de ráfaga, el área y la forma del elemento, se calcularán para una base de 50 años de retorno del viento. Teniendo en cuenta que la dirección del viento no siempre será perpendicular a la dirección de la línea, se debe realizar el análisis y descomposición de la fuerza para las estructuras, aisladores y conductores (American Society of Civil Engineers, 2020).

Figura 1

Ángulo incidente del viento con respecto a la perpendicular de la dirección de la línea sobre una estructura.



Nota. Fuente: Guidelines for Electrical Transmission Line Structural Loading, ASCE, 2020.

La ecuación (65) puede ser modificada por un factor $\cos^2(\Psi)$ para el cálculo de fuerza del viento sobre los conductores teniendo en cuenta que la fuerza efectiva es la componente de la fuerza que actúa de manera perpendicular(transversal) a la dirección de la línea (American Society of Civil Engineers, 2020).

$$F_{Vs} = Q * K_z * K_{zt} * (V)^2 * G * C_f * \cos^2(\Psi) * A \quad (66)$$

En las estructuras y aisladores se tiene en cuenta la componente transversal y longitudinal de la fuerza debido a la disposición de los elementos, se calculan mediante las ecuaciones (67) y (68), respectivamente.

$$F_{Vt} = Q * K_z * K_{zt} * (V)^2 * G * \cos(\Psi) * C_f * A \quad (67)$$

$$F_{Vl} = Q * K_z * K_{zt} * (V)^2 * G * \sin(\Psi) * C_f * A \quad (68)$$

Sin embargo, se recomienda estudiar el caso más desfavorable que es cuando el viento ejerce la carga de manera completamente transversal a la dirección de la línea sobre los elementos (American Society of Civil Engineers, 2020).

4.2.1.1.1 Categorías de exposición. La rugosidad y exposición del terreno tienen implicación en la variación de la velocidad del viento sobre los elementos de las líneas de transporte de energía eléctrica, por esto, el terreno se caracteriza por categorías.

Exposición B. Corresponde a áreas urbanas y suburbanas, áreas bien arboladas, o terrenos con numerosas obstrucciones poco espaciadas con tamaño de viviendas unifamiliares e incluso algo más grandes. Se escoge la exposición B cuando las características de la zona prevalecen por 800 m o 20 la altura de la estructura de distribución, la que sea mayor (American Society of Civil Engineers, 2020).

Figura 2

Imagen ilustrativa de una zona de Exposición B.



Exposición C. Corresponde a terrenos abiertos con obstrucciones dispersas de alturas generalmente inferiores a 9.0 m. Incluye terrenos planos, campo abierto, granjas, pastizales expuestos al viento. Esta categoría se usa cuando las características del terreno no se ajustan a las descripciones de las demás categorías (American Society of Civil Engineers, 2020).

Figura 3

Imagen ilustrativa de una zona de Exposición C.



Exposición D. Corresponde a áreas planas sin obstáculos y directamente expuestas a vientos provenientes de cuerpos de agua abiertos. Esta categoría incluye pantanos, salinas y superficies de hielo. Se escoge la exposición D cuando las características de la zona prevalecen

por 1500 m o 20 veces la altura de la estructura, la que sea mayor (American Society of Civil Engineers, 2020).

Figura 4

Imagen ilustrativa de una zona de Exposición D.



4.2.1.1.2 Factor de conversión, Q. El factor Q convierte la energía cinética del movimiento del aire en energía potencial de presión. Se determina mediante la ecuación (69), donde ρ es la densidad del aire (American Society of Civil Engineers, 2020).

$$Q = \frac{1}{2} * \rho \tag{69}$$

Se deben considerar los efectos de temperatura del ambiente y la elevación sobre el valor de la constante Q. Los valores de Q se dan en la tabla 12, para distintas combinaciones de altitud y temperatura ambiente.

Tabla 12

Valores de Q para combinaciones de altitud y temperatura.

Temperatura ambiente °C	Altitud sobre el nivel del mar [m]					
	0	1000	2000	2500	3000	3500
30	0.582	0.515	0.459	0.582	0.404	0.404
26	0.590	0.523	0.466	0.582	0.409	0.409
23	0.596	0.529	0.471	0.582	0.413	0.413
21	0.600	0.533	0.474	0.582	0.415	0.415

Temperatura ambiente	Altitud sobre el nivel del mar [m]					
	0	9	15	30	45	60
15	0.613	0.545	0.484	0.582	0.423	0.423
9	0.622	0.557	0.494	0.582	0.432	0.432
0	0.637	0.576	0.508	0.582	0.447	0.447

Nota. Adaptada de Guidelines for Electrical Transmission Line Structural Loading, ASCE, 2020.

4.2.1.1.3 Coeficiente de exposición a la velocidad del viento, K_z . El coeficiente de exposición K_z modifica el valor de velocidad del viento teniendo en cuenta que el viento varía según la altura debido al cambio de la fricción producido por la rugosidad del terreno. El coeficiente se determina mediante la ecuación (70) (American Society of Civil Engineers, 2020).

$$K_z = 2.01 * \left(\frac{Z}{Z_g} \right)^{\frac{2}{\alpha}} \quad (70)$$

Los valores de la altura de gradiente Z_g y el exponente α se toman de la tabla 13, estas variables dependen de la categoría de exposición del terreno, definidas anteriormente.

Tabla 13

Valores de Z_g y α .

Tipo de Terreno	α	Z_g [m]
B	7.0	366
C	9.5	274
D	11.5	213

Nota. Adaptada de Guidelines for Electrical Transmission Line Structural Loading, ASCE, 2020.

4.2.1.1.4 Altura efectiva, Z . La altura efectiva es la distancia vertical, tomada desde la base de la estructura, donde es aplicada la fuerza ejercida por la presión del viento. La altura efectiva para conductores, Z_w y para aisladores, Z_a es la altura de promedio de los elementos comunes en metros (American Society of Civil Engineers, 2020). Para las estructuras se supone que el punto de aplicación de la carga es el centroide y se calcula con la ecuación (71).

$$Z_s = \frac{L - L_e}{3} * \left[\frac{2 * d_c + d_b}{d_c + d_b} \right] \tag{71}$$

Donde el diámetro de la base, d_b en metros y el diámetro de la cima, d_c en metros, se toman de la tabla 11.

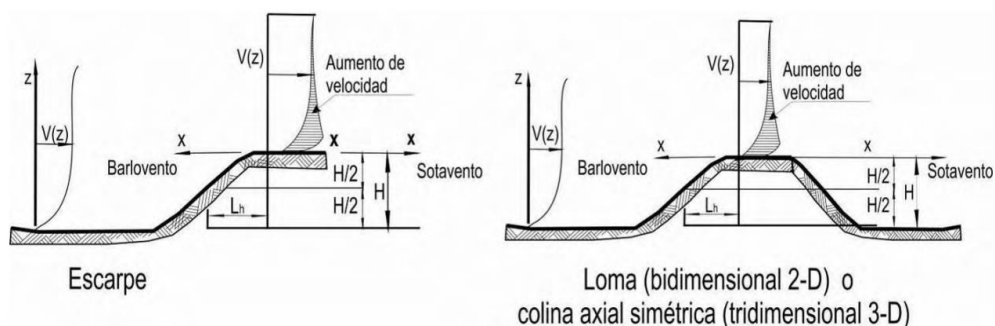
4.2.1.1.5 Coeficiente topográfico, K_{zt} . Según el American Society of Civil Engineers, (2020) los cambios topográficos en los terrenos pueden influir en la velocidad del viento que llega hacia las estructuras, estos cambios en la velocidad del viento, resultado de la ubicación de las estructuras sobre lomas o escarpes, son contemplados por el coeficiente topográfico, K_{zt} , que se calcula con la ecuación (72).

$$K_{zt} = (1 + K_1 * K_2 * K_3)^2 \tag{72}$$

Según la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2010) la característica del terreno se describe mediante dos variables, H (la altura de la colina o acantilado en relación con el terreno de barlovento) y L (la distancia de barlovento desde la cresta hasta el punto donde la diferencia de altura del terreno es la mitad) en metros de altura sobre cerros o terraplenes. Los factores multiplicativos K_1 , K_2 y K_3 , se toman de la tabla 14. El valor calculado de K_{zt} no puede ser menor a 1.0 y para zonas planas se puede usar un valor de 1.0 (American Society of Civil Engineers, 2020).

Figura 5

Escarpe y loma con sus respectivos factores para la selección de K_1 , K_2 y K_3 .



Nota. Fuente: Reglamento colombiano de construcción sismo resistente, ACIS, 2010.

Tabla 14

Multiplicadores topográficos para Exposición C.

Multiplicador Topográfico para Exposición C											
H/L _h	Multiplicador K ₁			x/L _h	Multiplicar K ₂			z/L _h	Multiplicar K ₃		
	Loma 2-D	Escarpe 2-D	Colina Axial simétrica 3-D		Escarpe 2-D	Todos los otros casos	Loma 2-D		Escarpe 2-D	Colina Axial simétrica 3-D	
0.20	0.29	0.17	0.21	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	
0.25	0.36	0.21	0.26	0.50	0.88	0.67	0.10	0.74	0.78	0.67	
0.30	0.43	0.26	0.32	1.00	0.75	0.33	0.20	0.55	0.61	0.45	
0.35	0.51	0.30	0.37	1.50	0.63	0.00	0.30	0.41	0.47	0.30	
0.40	0.58	0.34	0.42	2.00	0.50	0.00	0.40	0.30	0.37	0.20	
0.45	0.65	0.38	0.47	2.50	0.38	0.00	0.50	0.22	0.29	0.14	
0.50	0.72	0.43	0.53	3.00	0.25	0.00	0.60	0.17	0.22	0.09	
				3.50	0.13	0.00	0.70	0.12	0.17	0.06	
				4.00	0.00	0.00	0.80	0.09	0.14	0.04	
							0.90	0.07	0.11	0.03	
							1.00	0.05	0.08	0.02	
							1.50	0.01	0.02	0.00	
							2.00	0.00	0.00	0.00	

Notas:

1. Para valores de H/L_h, x/L_h, y z/L_h distintos a los indicados, se permite la interpolación lineal.
2. Para H/L_h > 0.5, suponer que H/L_h = 0.5 para la evaluación de K₁, y sustituir L_h por 2H para la evaluación de K₂, y K₃.
3. Los multiplicadores se basan en la suposición de que el viento se aproxima a la colina o escarpe en la dirección de máxima pendiente.
4. Notación:
H : Altura de la colina o escarpe referida al terreno ubicado en barlovento, en m.
L_h: distancia hacia barlovento, desde la cresta hasta el punto en que la diferencia de elevación del terreno es la mitad de la MM MM altura de la colina o escarpe, en m.
K₁: factor que tiene en cuenta las características topográficas y el efecto de máximo aumento de velocidad.
K₂: factor que tiene en cuenta la reducción en el aumento de la velocidad con la distancia desde la cresta, a barlovento o sotavento.
K₃: factor que tiene en cuenta la reducción en el aumento de velocidad con la altura sobre el terreno local.
x : distancia (a barlovento o sotavento) desde la cresta hasta el lugar del edificio en m.
z : altura sobre el nivel del terreno local, en m.
μ : factor de atenuación horizontal.
γ : factor de atenuación en altura.

Tomado de Reglamento colombiano de construcción sismo resistente, ACIS, 2010.

Otra alternativa propuesta es calcular los valores de los multiplicadores, tomando el valor de K₁ de la tabla 15, y los valores de K₂ y K₃ con las siguientes ecuaciones (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010).

$$K_2 = \left(1 - \frac{|x|}{\mu L_h}\right) \tag{73}$$

$$K_3 = e^{-\gamma z/L_h} \tag{74}$$

Tabla 15

Parámetros para aumento de la Velocidad sobre Colinas y Escarpes.

Forma de la Colina	K ₁ /(H/L _h)			γ	μ	
	Exposición				Hacia barlovento desde la cresta	Hacia sotavento desde la cresta
	B	C	D			
Lomas bidimensionales (2D) o valles con H negativa en K ₁ /(H/L _h)	1.30	1.45	1.55	3	1.5	1.5
Escarpes bidimensionales (2D)	0.75	0.85	0.95	2.5	1.5	4
Colina tridimensional axialsimétrica	0.95	1.05	1.15	4	1.5	1.5

Nota. Tomada de Reglamento colombiano de construcción sismo resistente, ACIS, 2010.

4.2.1.1.6 Factor de respuesta de Ráfaga, G. El factor de respuesta de ráfaga es la relación entre el efecto de la carga máxima sobre la estructura o los conductores y el efecto de la carga media correspondiente a la velocidad del viento. Con este factor se tienen en cuenta los efectos dinámicos de la turbulencia del viento sobre los elementos de la línea eléctrica. Se calcula con la ecuación (75) para conductores y con la ecuación (76) para estructuras y aisladores (American Society of Civil Engineers, 2020).

$$G_w = \frac{1 + 4.6 * I_z * B_w}{1 + 6.1 * I_z} \tag{75}$$

$$G_t = \frac{1 + 4.6 * I_z * B_t}{1 + 6.1 * I_z} \tag{76}$$

Los valores de I_z, B_w y B_t se calculan con las ecuaciones (77)-(78), respectivamente.

$$I_z = c_{exp} * \left(\frac{10}{Z}\right)^{\frac{1}{6}} \quad (77)$$

$$B_w = \frac{1}{1 + \frac{0.8 * V_V}{L_s}} \quad (78)$$

$$B_t = \frac{1}{1 + \frac{0.56 * Z}{L_s}} \quad (79)$$

Donde los valores de κ , L_s y α_{FM} se toman de la tabla 16 según el tipo de exposición del terreno, V_V es el vano viento en metros y los valores de Z para E y B_t serán los valores definidos en Alturas Efectivas para estructuras, conductores y aisladores (American Society of Civil Engineers, 2020).

Tabla 16

Valores de c_{exp} , L_s según el tipo de exposición.

Tipo de Terreno	c_{exp}	L_s [m]
B	0.3	52
C	0.2	67
D	0.15	76

Nota. Adaptada de Guidelines for Electrical Transmission Line Structural Loading, ASCE, 2020.

4.2.1.1.7 Área expuesta, A. Se toma como área expuesta al área proyectada en el plano normal a la dirección del viento. Para los conductores el área expuesta es el vano viento en metros por el diámetro del conductor en milímetros (Consultoría Colombiana S.A, 2019).

$$A_w = V_V * \frac{d_w}{1000} \quad (80)$$

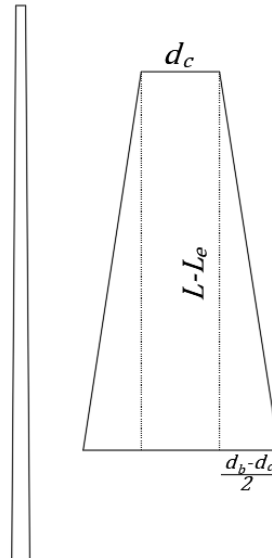
El área expuesta de los aisladores es la longitud del aislador L_a en milímetros por el diámetro del aislador en milímetros, multiplicado por un factor de 0.6 para tener en cuenta su forma (Consultoría Colombiana S.A, 2019).

$$A_a = \frac{L_a}{1000} * \frac{d_a}{1000} * 0.6 \quad (81)$$

Las estructuras de concreto presentan una forma troncocónica según la norma ESSA, por ende, el área normal a la dirección del viento es la mostrada en la figura 6, sin importar la dirección del viento con respecto a la línea, y su área se calcula por medio de la ecuación (82), con los diámetros en centímetros.

Figura 6

Vista del área expuesta de una estructura de concreto.



Nota. Fuente: Autores.

$$A_s = \frac{(L - L_e) * (d_b + d_c)}{200} \quad (82)$$

4.2.1.1.8 Coeficiente de Fuerza, C_f . Las características de los elementos, forma y tamaño se tienen en cuenta en el coeficiente de fuerza, C_f . Según la Consultoría Colombiana S.A (2019) para conductores y aisladores se usan valores estandarizados de 1.0 y 1.2 respectivamente; para el coeficiente de arrastre en estructuras troncocónicas se realiza el cálculo del número de Reynolds

como se define en la ecuación (83), y se toma el valor de C_f de la tabla 17 (American Society of Civil Engineers, 2020).

$$R_e = 9350 * (\sqrt{K_z} * V) * \frac{d_b + d_c}{24} \quad (83)$$

Donde los diámetros de base y cima deben estar en pies y la velocidad del viento tomado de la figura 7, debe estar en mph.

Tabla 17

Coefficientes de Fuerza para estructuras troncocónicas.

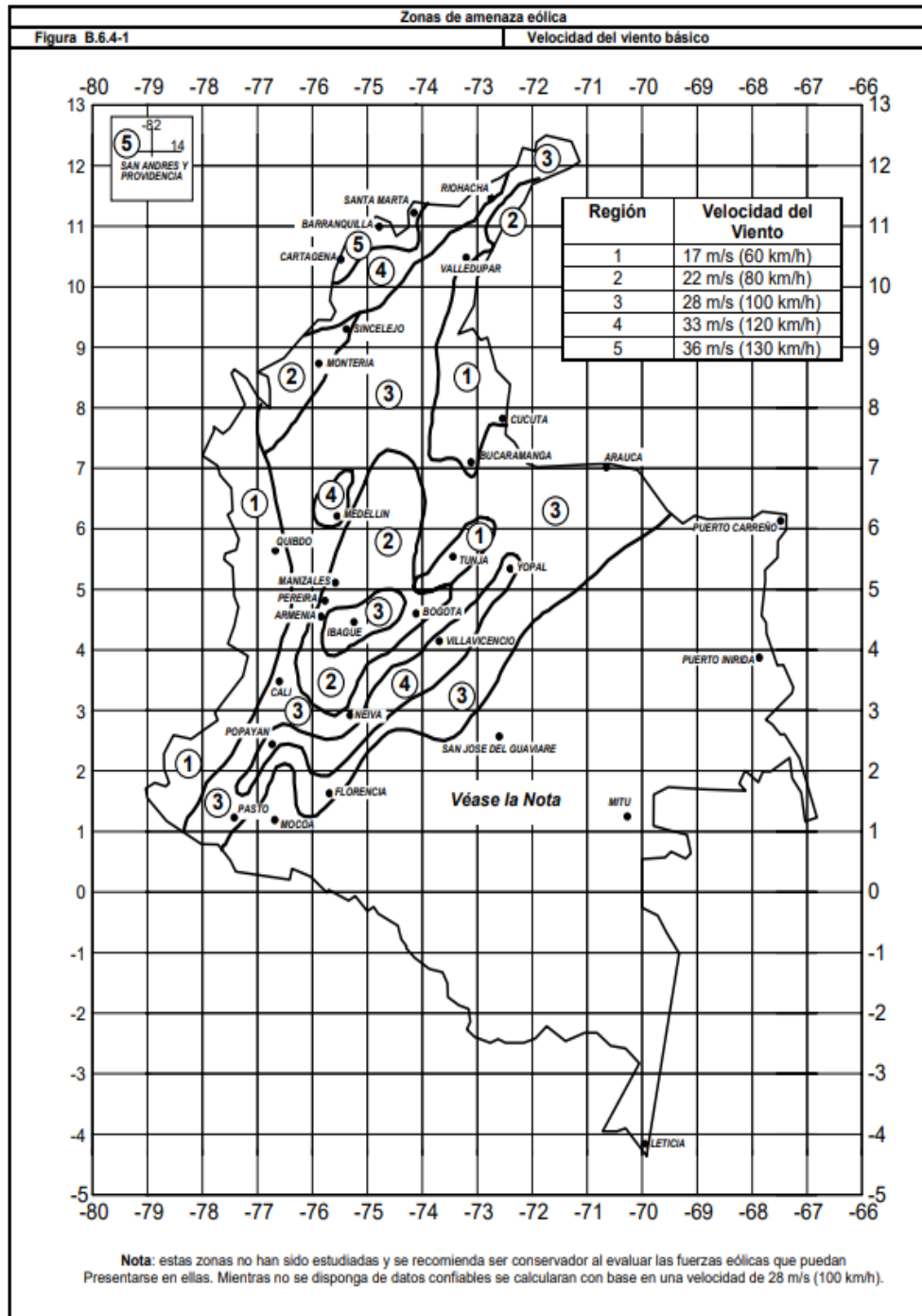
Número de Reynolds	Coefficiente de Fuerza
$R_e < 3 * 10^5$	1.1
$3 * 10^5 < R_e < 6 * 10^5$	$14.5 * 10^6 / R_e^{1.3}$
$R_e > 6 * 10^5$	0.45

Nota. Tomada de Guidelines for Electrical Transmission Line Structural Loading, ASCE, 2020.

4.2.1.1.9 Velocidad básica del viento, V. La velocidad básica de viento corresponde a la velocidad de una ráfaga de 3 segundos a una altura de 10 m por encima del suelo en un terreno de categoría de exposición C (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010). Este valor se puede seleccionar usando los datos climatológicos regionales siempre y cuando se haya cumplido con los requisitos descritos en por la NSR-10. De lo contrario, se toma el valor de velocidad básica el viento de la figura 7, tomado de la misma norma (American Society of Civil Engineers, 2020).

Figura 7

Velocidad básica del viento por regiones.

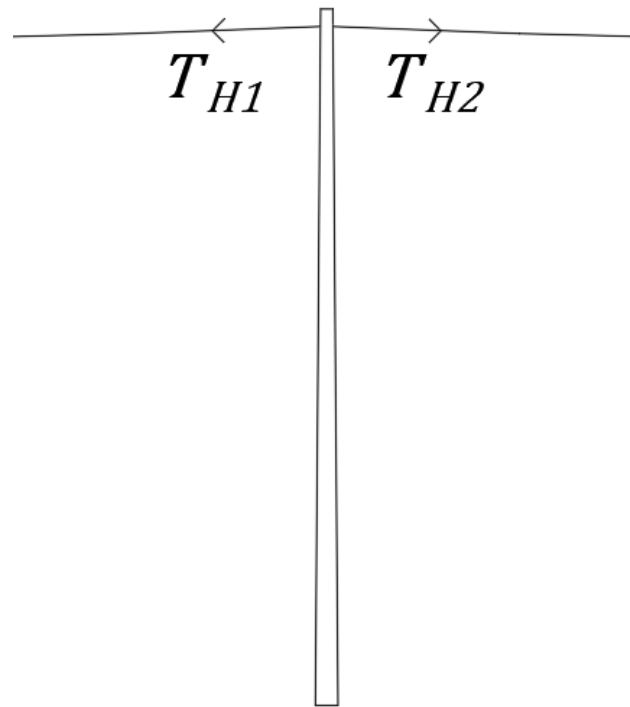


Fuente: Reglamento colombiano de construcción sismo resistente, ACIS, 2010.

4.2.1.2 Carga ejercida por tensión mecánica del conductor. Se tendrá en cuenta la carga por tensión mecánica de los conductores, de manera longitudinal, cuando las tensiones de los vanos adyacentes no tengan igual magnitud, como en estructuras desniveladas, terminales y de anclaje, con las tensiones calculadas para la hipótesis de operación diaria de tendido de conductores (Consultoría Colombiana S.A, 2019).

Figura 8

Ilustración tensiones mecánicas de conductores.



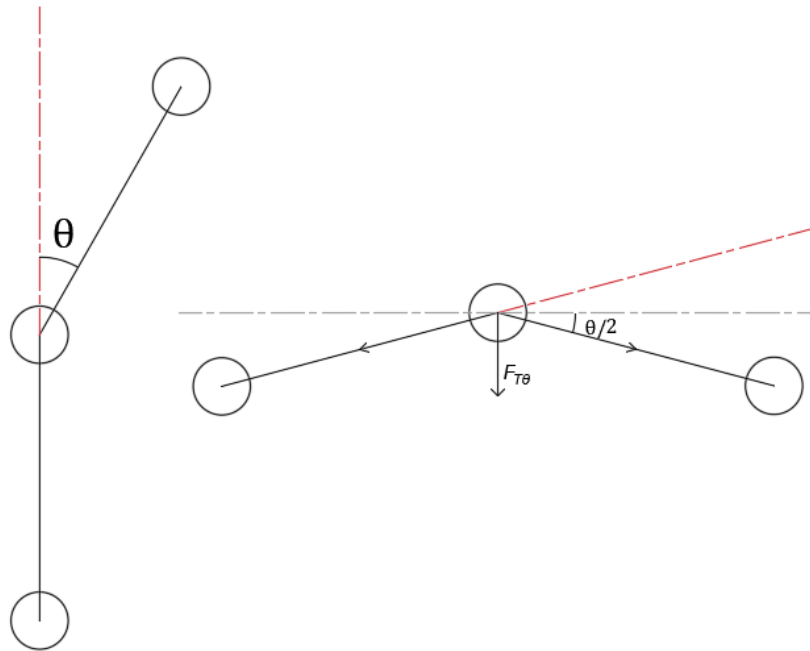
Nota. Fuente: Autores.

$$F_{Tw} = \text{abs}(T_{H1} - T_{H2}) \quad (84)$$

4.2.1.3 Carga por cambio de dirección de la línea. Los cambios de dirección en las líneas eléctricas generan una fuerza por tensión mecánica de manera transversal a la dirección de la línea sobre la estructura en ángulo (Consultoría Colombiana S.A, 2019). También se debe estudiar en este caso cuando hay desequilibrios en las tensiones mecánicas de manera longitudinal, por esta razón los cálculos de estas cargas se realizan con la ecuación (85) y (86), respectivamente.

Figura 9

Ilustración cambio de dirección, vista de planta.



Nota. Fuente: Autores.

$$F_{T\theta} = (T_{H1} + T_{H2}) * \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (85)$$

$$F_{Tw} = (T_{H1} - T_{H2}) * \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (86)$$

4.2.2 Hipótesis Anormales

Se considera la condición de conductor roto en uno de los vanos adyacentes de la estructura y el desequilibrio del 50% de las tensiones mecánicas, en ambas condiciones no se tendrán en cuenta cargas transversales, según la Consultoría Colombiana S.A (2019).

4.2.2.1 Carga por conductor roto. En esta hipótesis se supone que uno de los conductores o cable de guarda en uno de los vanos adyacentes a la estructura está roto en condición de viento reducido, generando un desequilibrio mecánico completo en una de las fases. De esta manera se

considera que el esfuerzo es ejercido por el cable adyacente al cable roto (Consultoría Colombiana S.A, 2019).

Figura 10

Ilustración de conductor roto.



Nota. Fuente: Autores

$$F_{CR} = |T_{LiVR}| \quad (87)$$

4.2.2.2 Carga por desequilibrio 50% de tensiones. Es la carga ejercida por el 50% de la tensión máxima de los vanos adyacentes de la estructura en condición de viento máximo, se calcula mediante la ecuación (88) (Consultoría Colombiana S.A, 2019).

$$F_{50\%} = 0.5 * Máx(T_{H1}, T_{H2}) \quad (88)$$

4.3 Cálculo de los Momentos Ejercidos por las Cargas

Las fuerzas calculadas ejercen un momento (torque) sobre la estructura. Se calculan los momentos para asegurar que las características de la estructura, altura y diámetros sean adecuadas para evitar roturas o deflexiones, que pongan en peligro la integridad de las personas y la confiabilidad del servicio de energía eléctrica.

Figura 11

Momentos y fuerzas actuantes sobre estructuras de concreto.



Nota. Fuente: Guía Técnica para el cálculo mecánico de estructuras y elementos de sujeción de equipos, Grupo EPM, 2019.

4.3.1 Hipótesis Normal

Se define el momento actuante total de todas las cargas en hipótesis normal como la suma de todos los momentos longitudinales y transversales ejercidos sobre la estructura.

$$M_A = \sqrt{M_l^2 + M_t^2} \quad (89)$$

Los esfuerzos longitudinales, M_l , son realizados por fuerzas con dirección paralela a la línea, entre los cuales se encuentran las cargas generadas por tensiones mecánicas desequilibradas de los conductores y, si las hay, cargas por presión del viento sobre estructuras y aisladores (Consultoría Colombiana S.A, 2019).

$$M_l = M_{Tw} + M_{Vls} + M_{Vla} \quad (90)$$

Con cargas de presión del viento

$$M_l = M_{Tw} \quad (91)$$

Sin cargas de presión del viento

Los esfuerzos transversales, M_t , son generados por fuerzas que actúan de manera perpendicular a la dirección de la línea, estas cargas son la presión del viento sobre estructuras, aisladores y conductores y la tensión mecánica resultante por cambios de dirección en la línea (Consultoría Colombiana S.A, 2019).

$$M_t = M_{\theta w} + M_{Vts} + M_{Vta} + M_{Vw} \quad (92)$$

4.3.1.1 Momento por carga de la presión del viento. El cálculo del momento generado por presión del viento sobre los elementos de la línea se realiza con las ecuaciones (93)-(95). Donde N_w y N_a son el número de conductores y aisladores en la estructura, respectivamente y se considera que el punto de aplicación de las cargas son las alturas efectivas, bajo las cuales se realiza el estudio topográfico y de exposición para el cálculo las cargas por presión del viento.

$$M_{Vs} = F_{Vs} * Z_s \quad (93)$$

$$M_{Va} = F_{Va} * N_a * Z_a \quad (94)$$

$$M_{Vw} = F_{Vw} * N_w * Z_w \quad (95)$$

4.3.1.2 Momento por tensiones mecánicas en conductores. El punto de aplicación de estas cargas será el promedio de alturas de los conductores, igual a lo definido como altura efectiva para conductores, donde N_F se refiere a la cantidad de pares de conductores adyacentes.

$$M_{Tw} = F_{Tw} * N_F * Z_w \quad (96)$$

$$M_{\theta w} = F_{\theta w} * N_F * Z_w \quad (97)$$

4.3.1.3 Momento resistente de la estructura. El momento resistente, M_R , es la característica que depende de la longitud y diámetros de las estructuras, define la resistencia

mecánica del elemento y se calcula con la carga de rotura, aplicada a 20 centímetros de la cima, sobre el factor de seguridad de 2.5 (ICONTEC, 2013).

$$M_R = \frac{C_R}{F_S} * (L - L_e - 0.2) \quad (98)$$

4.3.2 Hipótesis Anormales

El momento actuante para las hipótesis anormales será el calculado a partir de la fuerza por conductor roto y por desequilibrio del 50% de tensiones, en estructuras donde los conductores se encuentran a distintas alturas se supone que el conductor roto es el más alto.

$$M_A = F_{CR} * Z_{CH} \quad (99)$$

$$M_A = F_{50\%} * N_F * Z_w \quad (100)$$

4.4 Verificación de las Estructuras de Concreto

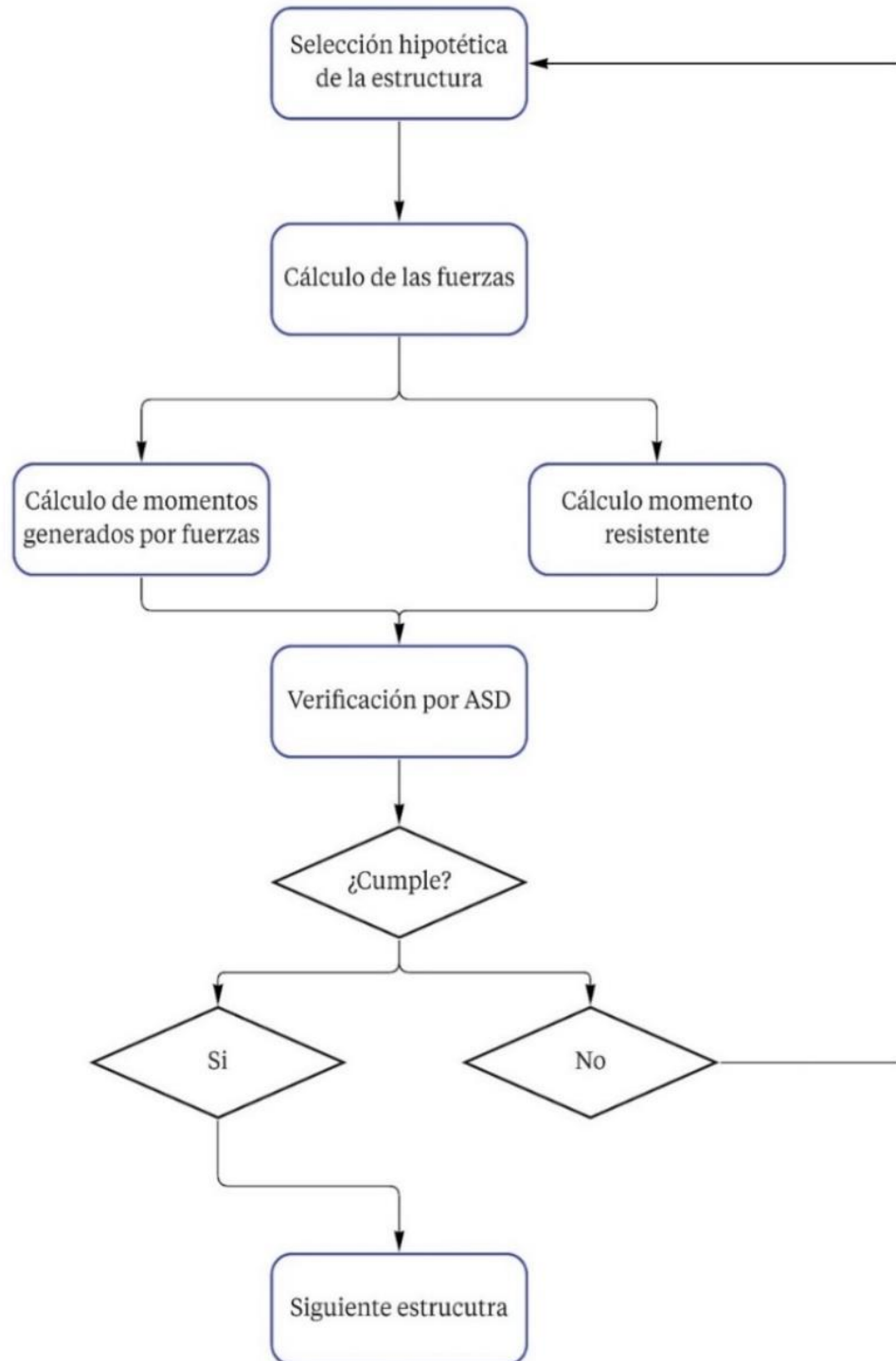
La resistencia de las estructuras de concreto se comprueba mediante el método de esfuerzos admisibles (ASD), de acuerdo con lo descrito por la Consultoría Colombiana S.A (2019), donde el momento actuante debe ser menor o igual que el momento resistente de la estructura.

$$M_R \geq M_A \quad (101)$$

Si la estructura escogida no cumple con la ecuación (101), se vuelve a realizar el proceso desde la sección 3.1 con los siguientes valores de carga de rotura y diámetros de la tabla 11, hasta obtener una estructura que cumpla con dicha ecuación.

Figura 12

Diagrama de flujo para selección de estructuras.



Nota. Fuente: Autores

5. Conclusiones

Luego de revisar las diferentes fuentes bibliográficas, se obtuvo como resultado una guía que ayudará a los estudiantes a comprender con una visión general, los aspectos más importantes en la selección de estructuras de media tensión tipo concreto, cumpliendo con el objetivo principal de este trabajo de grado.

En la revisión de la normativa se determinó que los documentos consultados en el estado del arte, en cuanto a proyectos de grado anteriores, están desactualizados, debido al cambio de las normas por parte del Ministerio de Minas y Energía, ICONTEC y de los operadores de red en el tema de selección de estructuras para redes áreas de media tensión. Los cálculos exigidos actualmente requieren un mayor estudio de las condiciones ambientales y topográficas de la zona, además de la obligación de analizar las condiciones anormales a la que podrán estar expuestas las estructuras.

Se determinó que el RETIE y NTC 2050 no contienen suficiente información para establecer una metodología de cálculo y selección de estructuras, sin embargo, los operadores de red presentan guías metodológicas a partir de otras normas como lo son la ASCE 74 que permitieron complementar la información de los documentos iniciales, logrando establecer los procedimientos matemáticos para la selección de las estructuras con los cuales se cumple con lo solicitado por el RETIE.

La metodología escogida para la guía cumple con la normativa vigente, realiza un análisis completo de las condiciones de la ubicación de la red de distribución, realiza el estudio para la condición de montaje de la estructura donde se presenta desequilibrios de tensiones mecánicas de

los conductores y la condición de falla por rotura de un conductor, lo que permite asegurar la integridad de la estructura en cualquiera de los casos posibles.

La guía de cálculos y selección de estructuras es una herramienta practica para que los estudiantes puedan aprender y consultar acerca de la correcta selección de las estructuras de media tensión tipo poste de concreto, incluyen estructuras estandarizadas, cálculos y verificaciones. Con este recurso se abren las puertas a futuros proyectos que busquen aplicar los conceptos que en éste se encuentran, de manera dinámica y programable.

Referencias Bibliográficas

- American Society of Civil Engineers. (2020). *Guidelines for Electrical Transmission Line Structural Loading* (F. W. Agnew, Ed.; Fourth Edition). American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784415566>
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*.
- Centeno Torres, J. F., & Isaza Sánchez, F. A. (2012). Análisis, cálculo y diseño de un sistema de distribución en media y baja tensión para la electrificación rural de los usuarios de la vereda las hortensias del corregimiento el Llanito municipio Barrancabermeja. Universidad Industrial de Santander.
- Consultoría Colombiana S.A. (2019). *Guía Técnica: Cálculo mecánico de estructuras y elementos de sujeción de equipos*. https://www.essa.com.co/site/Portals/clientes/Norma_Tecnica_Vigente/Normas_Complementarias_Diseño/GM-12%20GUIA%20METODOLOGICA%20CALCULO%20ELECTROMECHANICO%20Y%20ELEMENTOS%20DE%20SUJECION.pdf
- EBSA, E. de E. de B. S. A. E. S. P. (2014). *Normas de diseño de redes de distribución de energía eléctrica*.
- Equipo CET – Área de Proyectos. (2022). *REDES AÉREAS DE MEDIA TENSIÓN*. <https://www.essa.com.co/site/Portals/proveedores/ntr-01%20redes%20aereas%20de%20media%20tension.pdf?ver=2022-09-29-173518-387>
- Estepa Romero, W. R., Urbano Contreras, S., & Rodríguez Pérez, R. A. (2010). Diseño, cálculos eléctricos y mecánicos de las redes de distribución en media y baja tensión para las veredas

- de Agualinda en el municipio de Bolívar, Togüi en el municipio del Peñón y el corregimiento de Rioblanco del municipio del Peñón. Universidad Industrial de Santander.
- Forero Galán, N. E., & Manrique Sandoval, J. S. (2014). Cálculo y diseño de redes de media y baja tensión como proyecto de electrificación, para el progreso, desarrollo y comodidad, de la vereda el Guaimaral en Girón Santander. Universidad Industrial de Santander.
- Gómez Gómez, P. A., & Rojas Pérez, H. A. (2017). Estructuración de un proyecto de electrificación rural en las veredas Guarigua Alto, Montecitos Alto Y Alto Campo Hermoso del municipio de San Gil, departamento de Santander. Universidad Industrial de Santander.
- ICONTEC. (2013). *Norma Técnica Colombiana: Prefabricados en concreto. Postes de concreto para líneas de energía eléctrica y telecomunicaciones.*
- Ministerio de Minas y Energía. (2013). *Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas.*
https://www.minenergia.gov.co/documents/3809/Anexo_General_del_RETIE_vigente_a_ctualizado_a_2015-1.pdf
- Suarez Forero, J. de D. (2022). *Proyecto Tipo: Líneas Eléctricas Aéreas M.T. Sin Neutro.*
<https://www.air-e.com/Portals/aire/documentos/proyectos-tipo/1-lineas-electricas-aereas/memorias-pt-lineas-electricas-aereas-mt-sin-neutro.pdf>

Apéndice A. Ejercicios ejemplo de la metodología

En este anexo se encuentran ejercicios ejemplos de la metodología utilizada en la Guía de cálculos mecánicos y selección de estructuras. Estos ejemplos muestran los cálculos de fuerzas, momentos y verificación correspondientes para la selección de estructuras para distintas condiciones de diseño.

Ejercicio Ejemplo 1

Tabla 18

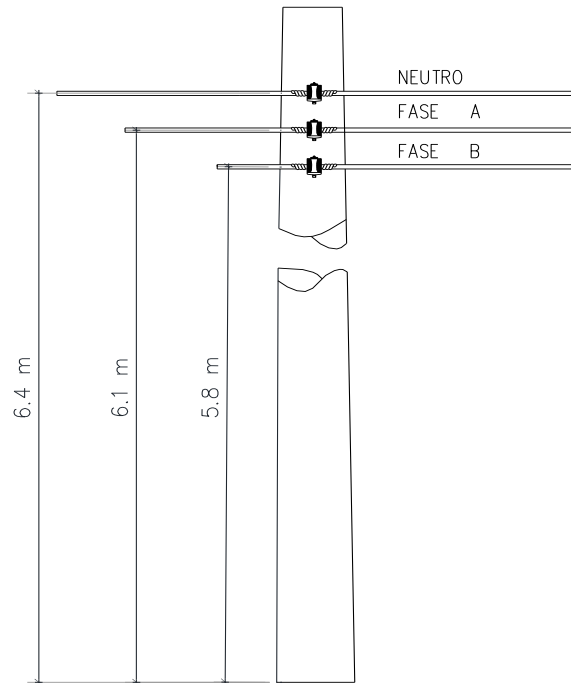
Datos de la línea para ejercicio ejemplo 1.

CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA		
Ubicación	Barrancabermeja – Santander	
Altitud	75 m.s.n.m	
Temperatura media ambiente	27 °C	
Zona urbana sin efectos topográficos		
CARACTERÍSTICAS DE LA RED		
Nivel de tensión	Baja tensión	
Desviación de la línea	0°	
Vanos	Anterior	Posterior
	25 m	25 m
Conductores	2 x 4 (F) AWG + 4 (N) AWG	
Diámetros conductores	6.360 mm	
Tensión mecánica en operación diaria	165.7113 daN	
Tensión mecánica en viento reducido	216.3053 daN	
Tensión mecánica en viento máximo	225.5590 daN	
Cantidad de aisladores	3	
Longitud de los aisladores	80 mm	
Diámetro de los aisladores	70 mm	

Nota. Las características presentes en esta tabla son calculadas en la selección de conductores y el estudio geográfico de la zona. Fuente propia.

Figura 13

Imagen ilustrativa de la configuración y las alturas de los conductores en el poste Ejercicio ejemplo 1.



Nota. Fuente: Autores.

La selección hipotética inicial de la estructura se realiza según el nivel de tensión de la red de distribución. Para este ejercicio la altura mínima de la estructura es 8 metros con las características mínimas, debido a que se especifica que es una red de baja tensión.

Tabla 19

Características de la primera selección de la estructura ejercicio ejemplo 1.

Longitud total [m]	Carga de rotura [daN]	Carga de trabajo [daN]	Diámetro [cm]	
			Cima	Base
8	500.1	200	14	26

La calcula la longitud de empotramiento para la estructura a partir de su altura de 8 metros.

$$L_e = (8 * 0.1) + 0.6$$

$$L_e = 1.4 [m]$$

Cálculo de Fuerzas

Hipótesis Normal.

Fuerza del viento sobre conductores, aisladores y estructura. Debido a que la zona es terreno abierto la categoría de exposición corresponde a al tipo B. Además, se aclara de que no hay efectos topográficos a considerar en la zona, por esta razón $K_{zt} = 1$.

Se toma el valor de Q de tablas para una de altitud de 75 m.s.n.m a una temperatura de 27 °C, o el más aproximado a estos valores, en este caso se tiene un valor de 0.590. La altura efectiva de los conductores y aisladores es el promedio de alturas, se puede considerar la altura de los aisladores igual a la altura de amarre de los conductores

$$Z_w = Z_a = \frac{6.4 + 6.1 + 5.8}{3} = 6.1 [m]$$

$$Z_s = \frac{8 - 1.4}{3} * \left[\frac{2 * 14 + 26}{14 + 26} \right]$$

$$Z_s = 2.97 [m]$$

Para el coeficiente de exposición se toman las variables de la tabla 13 para el tipo de exposición B y con dichos valores se realiza el cálculo para conductores, aisladores y estructura.

Tabla 20

Variables para el cálculo del coeficiente de exposición para ejercicio ejemplo 1.

Tipo de Terreno	α	Z_g [m]
B	7.0	366

$$K_z = 2.01 * \left(\frac{6.1}{366} \right)^{\frac{2}{7}} = 0.6239$$

Para conductores y aisladores

$$K_z = 2.01 * \left(\frac{2.97}{366}\right)^{\frac{2}{7}} = 0.5079 \quad \text{Para la estructura}$$

Se seleccionan κ , α_{FM} y L_s , para el tipo de exposición B.

Tabla 21

Variables para el cálculo de I_z y B para ejercicio ejemplo 1.

Tipo de Terreno	c_{exp}	L_s [m]
B	0.3	52

$$I_z = 0.3 * \left(\frac{10}{6.1}\right)^{\frac{1}{6}} = 0.3258 \quad \text{Para conductores y aisladores}$$

$$I_z = 0.3 * \left(\frac{10}{2.97}\right)^{\frac{1}{6}} = 0.3673 \quad \text{Para la estructura}$$

$$B_w = \frac{1}{1 + \frac{0.8 * 25}{52}} = 0.7222 \quad \text{Para conductores}$$

$$B_t = \frac{1}{1 + \frac{0.56 * 6.1}{52}} = 0.9384 \quad \text{Para aisladores}$$

$$B_t = \frac{1}{1 + \frac{0.56 * 2.97}{52}} = 0.969 \quad \text{Para la estructura}$$

Con estos valores se calcula los valores de factor de ráfaga.

$$G_w = \frac{1 + 4.6 * 0.3258 * 0.7222}{1 + 6.1 * 0.3258} = 0.6970 \quad \text{Para conductores}$$

$$G_t = \frac{1 + 4.6 * 0.3258 * 0.9384}{1 + 6.1 * 0.3258} = 0.8055 \quad \text{Para aisladores}$$

$$G_s = \frac{1 + 4.6 * 0.3673 * 0.969}{1 + 6.1 * 0.3673} = 0.8138 \quad \text{Para la estructura}$$

Se calculan las áreas expuestas por cada elemento.

$$A_w = 25 * \frac{6.360}{1000} = 0.159 \quad \text{Para conductores}$$

$$A_a = \frac{80}{1000} * \frac{70}{1000} * 0.6 = 0.00336 \quad \text{Para aisladores}$$

$$A_s = \frac{(8 - 1.4) * (26 + 14)}{200} = 1.32 \quad \text{Para la estructura}$$

La velocidad del viento para la zona de Barrancabermeja es de 17 [m/s] o aproximadamente 38 mph según la figura 7. El coeficiente de forma es 1 para conductores y 1.2 para aisladores. Se calcula el número de Reynolds para hallar el factor de forma de la estructura, se toma la velocidad del viento en mph y los diámetros en pies.

$$R_e = 9350 * (\sqrt{0.5079} * 38) * \frac{0.853 + 0.46}{24} = 13852.80$$

Con el valor de R_e anteriormente calculado se toma el coeficiente de forma de la tabla.

Tabla 22

Coefficiente de fuerza de estructura para ejercicio ejemplo 1.

Número de Reynolds	Coefficiente de Fuerza
$R_e < 3 * 10^5$	1.1

Se calcula la fuerza del viento para conductores, aisladores y estructura.

$$F_{Vw} = 0.590 * 0.6239 * 1 * (17)^2 * 0.6970 * 1 * 0.159 \quad \text{Para conductores}$$

$$= 11.7895 [N] = 1.1789 [daN]$$

$$F_{Va} = 0.590 * 0.6239 * 1 * (17)^2 * 0.8055 * 1.2 * 0.00336 \quad \text{Para aisladores}$$

$$= 0.3455 [N] = 0.0345 [daN]$$

$$F_{Vs} = 0.590 * 0.5079 * 1 * (17)^2 * 0.8138 * 1.1 * 1.32 \quad \text{Para la estructura}$$

$$= 102.3322[N] = 10.2332 [daN]$$

Fuerza por desequilibrio de tensiones. No se indica que haya un desequilibrio de tensiones entre los vanos de la estructura, por ende, se supone que la tensión es igual en ambos.

$$F_{Tw} = \text{abs}(165.7113 - 165.7113) = 0$$

Fuerza por cambio de dirección de la línea. En la Tabla 18 se indica que la desviación de la línea es 0, se supone que la estructura será de suspensión, por esta razón no hay fuerza ocasionada por cambio de dirección.

$$F_{\theta w} = (165.7113 + 165.7113) * \sin\left(\frac{0}{2}\right) = 0 \text{ [daN]}$$

Hipótesis Anormales.

Fuerza por rotura de conductor. Teniendo en cuenta la tensión mecánica en condición de viento reducido se calcula la fuerza por rotura de conductor.

$$F_{CR} = \text{Máx}(216.3053, 216.3053) = 216.3053 \text{ [daN]}$$

Fuerza por desequilibrio de 50% de tensiones. Teniendo en cuenta la tensión mecánica en condición de viento máximo se calcula la fuerza por desequilibrio de 50% de tensiones mecánicas.

$$F_{50\%} = 0.5 * \text{Máx}(225.5590, 225.5590) = 112.7795 \text{ [daN]}$$

Cálculo de Momentos

A partir de las fuerzas halladas se calculan los momentos generados sobre la estructura.

Hipótesis normal.

$$M_{Vs} = 10.2332 * 2.97 = 30.3926 \text{ [daN * m]}$$

$$M_{Va} = 0.0345 * 3 * 6.1 = 0.6313 \text{ [daN * m]}$$

$$M_{Vw} = 1.1789 * 3 * 6.1 = 21.5738 \text{ [daN * m]}$$

$$M_A = \sqrt{(0)^2 + (30.3926 + 0.6313 + 21.5738)^2} = 52.5977 \text{ [daN * m]}$$

Hipótesis anormales.

$$M_A = 216.3053 * 6.4 = 1384.3539 \text{ [daN * m]}$$

$$M_A = 112.7795 * 3 * 6.1 = 2063.8648 \text{ [daN * m]}$$

Verificación para Selección de la Estructura

Se realiza el cálculo del momento resistente del poste para comparar los valores de momento actuante y comprobar que la estructura escogida resista los esfuerzos.

$$M_R = \frac{500.1}{2.5} * (8 - 1.4 - 0.2) = 1280.256 \text{ [daN * m]}$$

Se comparan los momentos actuantes con los momentos resistentes para cada hipótesis de carga.

52.5977 < 1280.256	Cumple
1384.3539 > 1280.256	No cumple
2063.8648 > 1280.256	No cumple

Con estas características no se cumplen las hipótesis de carga anormal, por esta razón, se debe seleccionar las siguientes características y verificar que se cumpla en el peor de los dos casos, en este ejercicio el mayor momento actuante en hipótesis anormal es el de desequilibrio del 50% de tensiones mecánicas.

Tabla 23

Características de la segunda selección de la estructura ejercicio ejemplo 1.

Longitud total [m]	Carga de rotura [daN]	Carga de trabajo [daN]	Diámetro [cm]	
			Cima	Base
8	735.5	294.2	14	26

$$M_R = \frac{735.5}{2.5} * (8 - 1.4 - 0.2) = 1882.88 \text{ [daN * m]}$$

Para cargas anormales

2063.8648 > 1882.88 [daN * m] No cumple

Tabla 24

Características de la tercera selección de la estructura ejercicio ejemplo 1.

Longitud total	Carga de rotura	Carga de trabajo	Diámetro
----------------	-----------------	------------------	----------

[m]	[daN]	[daN]	[cm]	
			Cima	Base
8	1029.7	411.9	19	31

$$M_R = \frac{1029.7}{2.5} * (8 - 1.4 - 0.2) = 2636.032 \text{ [daN * m]} \quad \text{Para cargas anormales}$$

$$2063.8648 < 2636.032 \text{ [daN * m]} \quad \text{Cumple}$$

Se cumple con las ultimas características seleccionadas, ahora se debe recalcular el momento actuante en la hipótesis normal.

$$Z_s = \frac{8 - 1.4}{3} * \left[\frac{2 * 19 + 31}{19 + 31} \right] = 3.036 \text{ [m]}$$

$$K_z = 2.01 * \left(\frac{3.036}{366} \right)^{\frac{2}{7}} = 0.5111 \quad \text{Para la estructura}$$

$$I_z = 0.3 * \left(\frac{10}{3.036} \right)^{\frac{1}{6}} = 0.3659 \quad \text{Para la estructura}$$

$$B_t = \frac{1}{1 + \frac{0.56 * 3.036}{52}} = 0.9683 \quad \text{Para la estructura}$$

$$G_s = \frac{1 + 4.6 * 0.3659 * 0.9683}{1 + 6.1 * 0.3659} = 0.8136 \quad \text{Para la estructura}$$

$$A_s = \frac{(8 - 1.4) * (31 + 19)}{200} = 1.65 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$F_{Vs} = 0.590 * 0.511 * 1 * (17)^2 * 0.8136 * 1.1 * 1.65 = 128.6644 \text{ [N]} = 12.8664 \text{ [daN]}$$

Recálculo de Momentos

$$M_{Vs} = 12.8664 * 3.036 = 39.0623 \text{ [daN * m]}$$

$$M_A = \sqrt{(0)^2 + (39.0623 + 0.6313 + 21.5738)^2} = 61.2674 \text{ [daN * m]}$$

$$61.2674 < 2636.032 \quad \text{Cumple}$$

$$1384.3539 < 2636.032$$

Cumple

Se cumple la condición en los tres casos de carga estudiados, por esta razón la estructura es válida para la red de baja tensión.

Ejercicio Ejemplo 2

Tabla 25

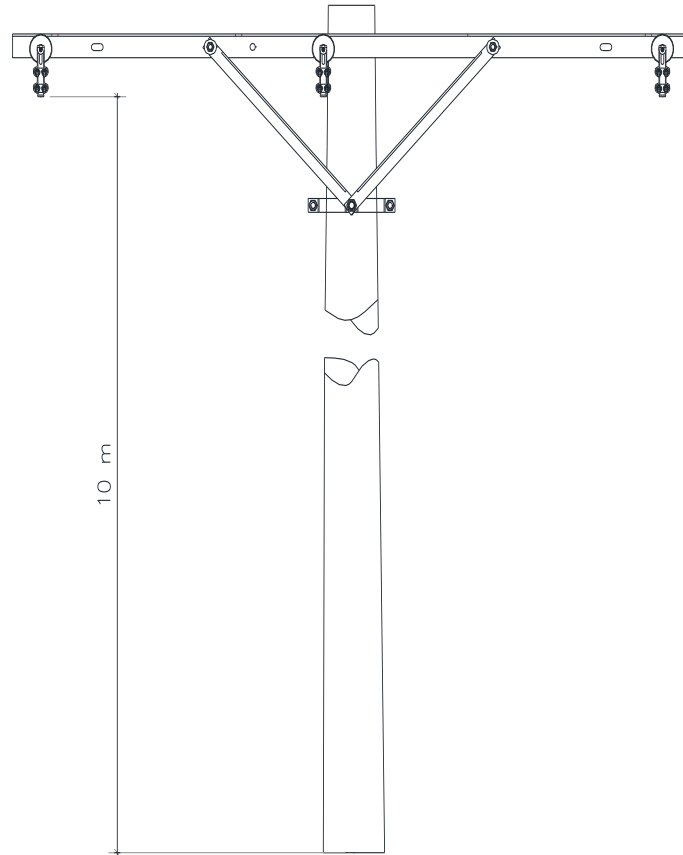
Datos de la línea para ejercicio ejemplo 2.

CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA		
Ubicación	Bucaramanga – Santander	
Altitud	959 m.s.n.m	
Temperatura media ambiente	24 °C	
Terreno abierto sin efectos topográficos		
CARACTERÍSTICAS DE LA RED		
Nivel de tensión	Media tensión 13.2 kV	
Desviación de la línea	12°	
Vanos	Anterior	Posterior
	40 m	40 m
Conductores	3 x 2/0 (F) AWG	3 x 2/0 (F) AWG
Tensión mecánica en operación diaria	295.658 daN	215.658 daN
Tensión mecánica en viento reducido	313.569 daN	233.569 daN
Tensión mecánica en viento máximo	342.345 daN	262.345 daN
Diámetros conductores	11.350 mm	
Cantidad de aisladores	6	
Longitud de los aisladores	260 mm	
Diámetro de los aisladores	180 mm	

Nota. Las características presentes en esta tabla son calculadas en la selección de conductores y el estudio geográfico de la zona. Fuente propia.

Figura 14

Imagen ilustrativa de la configuración y las alturas de los conductores en el poste ejercicio ejemplo 2.



Nota. Fuente: Autores.

Se hace la selección hipotética inicial de la estructura según el nivel de tensión de la red de distribución. Para este ejercicio la altura mínima de la estructura es 12 metros con las características mínimas.

Tabla 26

Características de la primera selección de la estructura ejercicio ejemplo 2.

Longitud total [m]	Carga de rotura [daN]	Carga de trabajo [daN]	Diámetro [cm]	
			Cima	Base
12	500.1	200	14	32

Se realiza el cálculo de la longitud de empotramiento para la estructura de 12 metros.

$$L_e = (12 * 0.1) + 0.6$$

$$L_e = 1.8 [m]$$

Cálculo de Fuerzas

Hipótesis Normal.

Fuerza del viento sobre conductores, aisladores y estructura. Debido a que la zona es terreno abierto la categoría de exposición corresponde a al tipo C. Además, se aclara de que no hay efectos topográficos a considerar en la zona, por esta razón $K_{zt} = 1$.

Se toma el valor de Q de tablas para una de altitud de 959 m.s.n.m a una temperatura de 24 °C, o el más aproximado a estos valores, para este ejercicio se toma 0.529. La altura efectiva de los conductores y aisladores es el promedio de alturas, como se ve en la figura 14 los 3 conductores y aisladores se encuentra a la misma altura, $Z_w = Z_a = 10$. La altura efectiva a la presión del viento de la estructura es:

$$Z_s = \frac{12 - 1.8}{3} * \left[\frac{2 * 0.14 + 0.32}{0.14 + 0.32} \right]$$

$$Z_s = 4.4348 [m]$$

Para el coeficiente de exposición se toman las variables de la tabla 13 para el tipo de exposición C y con dichos valores se realiza el cálculo para conductores, aisladores y estructura.

Tabla 27

Variables para el cálculo del coeficiente de exposición para ejercicio ejemplo 2.

Tipo de Terreno	α	Z_g [m]
C	9.5	274

$$K_z = 2.01 * \left(\frac{10}{274} \right)^{\frac{2}{9.5}} = 1.0011$$

Para conductores y aisladores

$$K_z = 2.01 * \left(\frac{4.4348}{274}\right)^{\frac{2}{9.5}} = 0.8437 \quad \text{Para la estructura}$$

Se seleccionan κ , α_{FM} y L_s , para el tipo de exposición C.

Tabla 28

Variables para el cálculo de I_z y B para ejercicio ejemplo 2.

Tipo de Terreno	c_{exp}	L_s [m]
C	0.2	67

$$I_z = 0.2 * \left(\frac{10}{10}\right)^{\frac{1}{6}} = 0.2 \quad \text{Para conductores y aisladores}$$

$$I_z = 0.2 * \left(\frac{10}{4.4348}\right)^{\frac{1}{6}} = 0.229 \quad \text{Para la estructura}$$

$$B_w = \frac{1}{1 + \frac{0.8 * 40}{67}} = 0.6767 \quad \text{Para conductores}$$

$$B_t = \frac{1}{1 + \frac{0.56 * 10}{67}} = 0.9228 \quad \text{Para aisladores}$$

$$B_s = \frac{1}{1 + \frac{0.56 * 4.4348}{67}} = 0.9643 \quad \text{Para la estructura}$$

Con estos valores se calcula los valores de factor de ráfaga.

$$G_w = \frac{1 + 4.6 * 0.2 * 0.6767}{1 + 6.1 * 0.2} = 0.7309 \quad \text{Para conductores}$$

$$G_t = \frac{1 + 4.6 * 0.2 * 0.9228}{1 + 6.1 * 0.2} = 0.8328 \quad \text{Para aisladores}$$

$$G_s = \frac{1 + 4.6 * 0.229 * 0.9643}{1 + 6.1 * 0.229} = 0.841 \quad \text{Para la estructura}$$

Se calculan las áreas expuestas por cada elemento.

$$A_w = 40 * \frac{11.350}{1000} = 0.454 \quad \text{Para conductores}$$

$$A_a = \frac{260}{1000} * \frac{180}{1000} * 0.6 = 0.0281 \quad \text{Para aisladores}$$

$$A_s = \frac{(12 - 1.8) * (32 + 14)}{200} = 2.346 \quad \text{Para la estructura}$$

Se tiene una velocidad del viento para la zona de Bucaramanga de 17 [m/s] o aproximadamente 38 mph según la figura 7. El coeficiente de forma es 1 para conductores y 1.2 para aisladores. Se calcula el número de Reynolds para hallar el factor de forma de la estructura, se toma la velocidad del viento en mph y los diámetros en pies.

$$R_e = 9350 * (\sqrt{0.8437} * 38) * \frac{1.05 + 0.46}{24} = 20533.1196$$

Según este valor se toma el coeficiente de forma de la tabla.

Tabla 29

Coeficiente de fuerza de estructura para ejercicio ejemplo 2.

Número de Reynolds	Coeficiente de Fuerza
$R_e < 3 * 10^5$	1.1

Se calcula la fuerza del viento para conductores, aisladores y estructura.

$$F_{Vw} = 0.529 * 1.0011 * 1 * (17)^2 * 0.7309 * 1 * 0.454 \quad \text{Para conductores}$$

$$= 50.7861 [N] = 5.0786 [daN]$$

$$F_{Va} = 0.529 * 1.0011 * 1 * (17)^2 * 0.8328 * 1.2 * 0.0281 \quad \text{Para aisladores}$$

$$= 4.2979 [N] = 0.4297 [daN]$$

$$F_{Vs} = 0.529 * 0.8437 * 1 * (17)^2 * 0.841 * 1.1 * 2.346 \quad \text{Para la estructura}$$

$$= 279.9356 [N] = 27.9935 [daN]$$

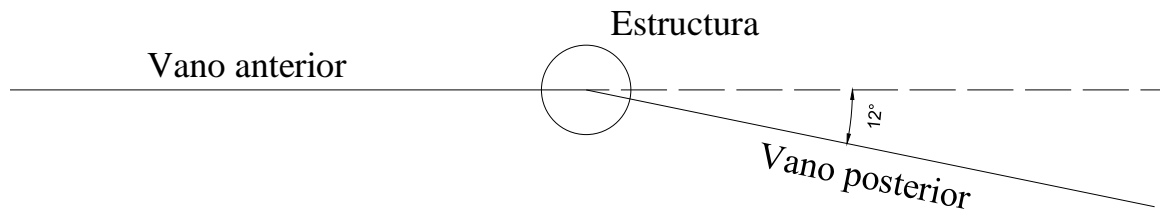
Fuerza por desequilibrio de tensiones. En el caso de este ejemplo la tensión mecánica en el vano anterior no es igual a la tensión mecánica del vano posterior.

$$F_{Tw} = abs(295.658 - 215.658) = 80 [daN]$$

Fuerza por cambio de dirección de la línea. Para este ejercicio tenemos una desviación de la línea en 12 grados con respecto a la paralela de la línea como se muestra en la siguiente imagen.

Figura 15

Desviación de la línea para ejercicio ejemplo 2.



Nota. Fuente: Autores.

$$F_{\theta w} = (295.658 + 215.658) * \sin\left(\frac{12}{2}\right) = 53.447 [daN]$$

$$F_{Tw} = 80 * \cos\left(\frac{12}{2}\right) = 79.5617 [daN]$$

Hipótesis Anormales.

Fuerza por rotura de conductor. Teniendo en cuenta la tensión mecánica en condición de viento reducido se calcula la fuerza por rotura de conductor.

$$F_{CR} = \text{Máx}(313.569, 233.569) = 313.569 [daN]$$

Fuerza por desequilibrio de 50% de tensiones. Teniendo en cuenta la tensión mecánica en condición de viento máximo se calcula la fuerza por desequilibrio de 50% de tensiones mecánicas.

$$F_{50\%} = 0.5 * \text{Máx}(342.345, 262.345) = 171.1725 [daN]$$

Cálculo de Momentos

A partir de las fuerzas halladas se calculan los momentos generados sobre la estructura.

Hipótesis Normal.

$$M_{Vs} = 27.9935 * 4.4348 = 124.1455 [daN * m]$$

$$M_{Va} = 0.4297 * 6 * 10 = 25.782 [daN * m]$$

$$M_{Vw} = 5.0786 * 6 * 10 = 304.716 \text{ [daN * m]}$$

$$M_{\theta w} = 53.447 * 3 * 10 = 1603.41 \text{ [daN * m]}$$

$$M_{Tw} = 79.5617 * 3 * 10 = 2386.851 \text{ [daN * m]}$$

$$M_A = \sqrt{(2386.85)^2 + (124.1455 + 25.782 + 304.716 + 1603.41)^2} = 3151.6086 \text{ [daN * m]}$$

Hipótesis Anormales.

$$M_A = 313.569 * 10 = 3135.69 \text{ [daN * m]}$$

$$M_A = 171.1725 * 3 * 10 = 5135.175 \text{ [daN * m]}$$

Verificación para la Selección de la Estructura

Se realiza el cálculo del momento resistente del poste para comparar los valores de momento actuante y comprobar que la estructura escogida resista los esfuerzos.

$$M_R = \frac{500.1}{2.5} * (12 - 1.8 - 0.2) = 2000.4 \text{ [daN * m]}$$

Se comparan los momentos actuantes con los momentos resistentes para cada hipótesis de carga.

$3151.6086 > 2000.4 \text{ [daN * m]}$	No cumple
$3135.69 > 2000.4 \text{ [daN * m]}$	No cumple
$5135.175 > 2000.4 \text{ [daN * m]}$	No cumple

Como la estructura seleccionada con las características mínimas no cumple con las hipótesis de carga, se seleccionan las siguientes características y se realizan los cálculos hasta que se cumpla.

Tabla 30

Características de la segunda selección de la estructura ejercicio ejemplo 2.

Longitud total [m]	Carga de rotura [daN]	Carga de trabajo [daN]	Diámetro [cm]	
			Cima	Base

12	735.5	294.2	16	34
----	-------	-------	----	----

Como el valor más grande de momento actuante es el de la hipótesis de desequilibrio del 50% de tensiones, se comprueba que se cumpla este primero.

$$M_R = \frac{735.5}{2.5} * (12 - 1.8 - 0.2) = 2942 [daN * m]$$

5135.175 > 2942 [daN * m] No cumple

Tabla 31

Características de la tercera selección de la estructura ejercicio ejemplo 2.

Longitud total [m]	Carga de rotura [daN]	Carga de trabajo [daN]	Diámetro [cm]	
			Cima	Base
12	1029.7	411.9	19	37

$$M_R = \frac{1029.7}{2.5} * (12 - 1.8 - 0.2) = 4118.8 [daN * m]$$

5135.175 > 4118.8 [daN * m] No cumple

Tabla 32

Características de la cuarta selección de la estructura ejercicio ejemplo 2.

Longitud total [m]	Carga de rotura [daN]	Carga de trabajo [daN]	Diámetro [cm]	
			Cima	Base
12	1323.9	529.6	20	38

$$M_R = \frac{1323.9}{2.5} * (12 - 1.8 - 0.2) = 5295.6 [daN * m]$$

5135.175 < 5295.6 [daN * m] Cumple

Estas características de la estructura cumplen con la hipótesis de carga anormal, ahora se analiza la hipótesis de carga normal.

$$Z_s = \frac{12 - 1.8}{3} * \left[\frac{2 * 0.2 + 0.38}{0.2 + 0.38} \right] = 4.5724$$

$$K_z = 2.01 * \left(\frac{4.5724}{274} \right)^{\frac{2}{9.5}} = 0.8491$$

$$I_z = 0.2 * \left(\frac{10}{4.5724} \right)^{\frac{1}{6}} = 0.2278$$

$$B_t = \frac{1}{1 + \frac{0.56 * 4.5724}{67}} = 0.9632$$

$$G_s = \frac{1 + 4.6 * 0.2278 * 0.9632}{1 + 6.1 * 0.2278} = 0.8408$$

$$A_s = \frac{(12 - 1.8) * (38 + 20)}{200} = 2.958$$

$$F_{V_s} = 0.529 * 0.8491 * 1 * (17)^2 * 0.8408 * 1.1 * 2.958 = 355.1369 [N] = 35.5136 [daN]$$

Recálculo de Momentos

$$M_{V_s} = 35.5136 * 4.5724 = 1623.8283 = 162.3828 [daN * m]$$

$$M_A = \sqrt{(2386.85)^2 + (162.3828 + 25.782 + 304.716 + 1603.41)^2} = 3176.7102 [daN * m]$$

$$3176.7102 < 5295.6 [daN * m] \quad \text{Cumple}$$

$$5135.175 < 5295.6 [daN * m] \quad \text{Cumple}$$

Se cumple la condición en los tres casos de carga estudiados, por esta razón la estructura es válida para la red de media tensión.