UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Lineamientos normativos para el diseño civil estructural de subestaciones eléctricas de alta tensión

Laura Margarita Moreno Soto

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de ingeniería civil y agrícola
Bogotá D.C., Colombia
2024

Lineamientos normativos para el diseño civil estructural de subestaciones eléctricas de alta tensión

Laura Margarita Moreno Soto

Trabajo final presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magíster en Ingeniería - Estructuras

Director (a):

Ph.D. Caori Patricia Takeuchi Tam

Línea de investigación:

Diseño estructural

Grupo de investigación:

Grupo de investigación en estructuras (GIES)

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de ingeniería civil y agrícola

Bogotá D.C., Colombia

2024

A mi madre Martha Soto, que me ha brindado el mayor ejemplo de constancia y dedicación, que con altruismo forjó la piedra angular con la que he cimentado la construcción de quien soy.

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada con el respeto a los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras o el material de otros autores.

Cuando se presentan ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad

Laura Margarita Moreno Soto

Fecha 22/10/2024

Agradecimientos

Agradezco en primera instancia a Jehová Dios que me ha acompañado en el transitar de este proceso, con amor, paciencia y sabiduría para llevar a cabo este cometido.

A la ingeniera Caori Takeuchi por su constante apoyo y dirección, realizando un seguimiento concienzudo del desarrollo del presente trabajo.

Sin duda a la universidad Nacional con su planta docente que, durante el transcurso de la maestría en estructuras, aportaron un invaluable conocimiento el cual construyó significativamente al desarrollo profesional y con su aporte a la elaboración de este documento.

A Natalia Muñoz quien aportó significativamente en la elaboración de la diagramación de los instructivos

Al ingeniero Andrés Avellaneda que con su gran apoyo se plasmó el desarrollo gráfico de ilustraciones y figuras.

Finalmente, a mi familia, compañeros y colegas que gracias a su acompañamiento se logró alcanzar esta meta.

Resumen

Lineamientos normativos para el diseño civil estructural de subestaciones eléctricas de alta tensión

Concebir una subestación funcional que cumpla con los aspectos de confiabilidad, seguridad y operatividad implica partir de la comprensión de su propósito. La función de las subestaciones en el manejo de la energía es de suma importancia, dado que permiten alterar o transformar las propiedades de la transferencia de la energía eléctrica. Este trabajo de final de maestría presenta los lineamientos normativos que regulan los análisis y diseños de una subestación, que permiten plantear un desarrollo conceptual y un diseño detallado para su construcción, de ahí la necesidad de compilar guías, normas y documentos que tengan injerencia en esta área, para analizar su aplicabilidad a los diversos aspectos que componen las subestaciones eléctricas de alta tensión aisladas con aire.

Este documento contextualiza la funcionalidad de una subestación, presentando las pautas normativas que determinan el planteamiento de la disposición física, junto con las nociones conceptuales, que ayudan entender el funcionamiento de sus equipos. Este contexto permite comprender las necesidades estructurales que se deben satisfacer para un diseño funcional. En ese sentido, para facilitar la comprensión de su composición la infraestructura se dividió en cinco aspectos: infraestructura de pórticos, equipos de patio, equipos de transformación y compensación, edificios ocupacionales e infraestructura correspondiente a otras obras civiles. Se hace un análisis detallado de cada aspecto, brindando recomendaciones y pautas técnicas para el dimensionamiento, análisis y diseño adecuado, según las necesidades, y poniendo en contexto las normativas vigentes aplicables

Palabras claves: subestación eléctrica, pórticos, equipos de patio, lineamientos.

Abstract

Regulatory guidelines for the civil structural design of high voltage electrical substations

Developing a functional substation that meets all aspects of reliability, safety, and operability criteria requires an understanding of its purpose. Substations play a pivotal role in energy management stages, as they facilitate the alteration or transformation of the properties of electrical energy transfer. It is important to grasp the regulatory guidelines that govern the analysis and design of substations in order to propose a conceptual development and detailed design for its construction. With this aim in mind, the need arises to compile guidelines, standards and relevant documents to this area, assessing their applicability to the various aspects that comprise air-insulated-high- voltage substations.

This document contextualizes the operational functionality of a substation by presenting regulatory guidelines that determine the physical layout alongside conceptual principles that help understand the functioning of its equipment. This context fosters a deeper understanding of the structural requirements necessary for an effective design. In such a way, to facilitate the understanding of its composition, the infrastructure is categorized into five key aspects: box-type structure, electrical equipment support, power transformer and shunt reactor, occupational buildings and infrastructure related to other civil works. A comprehensive analysis is conducted for each aspect, providing recommendations and technical guidelines for sizing, analysis and design according to needs, while contextualizing the applicable current regulations.

Keywords: Electrical substation, box- type structure, electrical equipment supports, guidelines.

Contenido

Pág.

Contenido

Justificación 3

1. Marco referencial 7
1.1 Antecedentes 7
1.2 Marco normativo 12

2. Conceptos generales de los equipos que conforman la infraestructura de subestaciones convencionales 16
2.1 Equipos de patio 16
2.1.1 Interruptores de potencia 16
2.1.2 Seccionadores 19
2.1.3 Transformadores de tensión o potencial 22
2.1.4 Transformadores de corriente 24
2.1.5 Descargadores de sobretensión o pararrayos 25
2.2 Equipos de transformación y compensación 27

3. Consideraciones particulares en cuanto a la disposición física de la infraestructura de una subestación 31
3.1 Disposición física general para subestaciones 31
3.1.1 Configuración seleccionada de la subestación 31
3.1.2 Equipos que se deben para emplear 32
3.1.3 Tipos de barraje para conexiones de alta tensión. 33
3.1.4 Disposiciones físicas que se pueden usar 38

4. Criterios de evaluación de cargas para subestaciones 46
4.1.1 Cargas muertas 46
4.1.2 Cargas operativas de los equipos 46
4.1.3 Cargas de tensión mecánica y cálculo de flechas de los conductores flexibles 47
4.1.4 Cargas de cortocircuito 57
4.1.5 Cargas de construcción y mantenimiento 58
4.1.6 Cargas de viento 59
4.1.7 Cargas sísmicas 60

5. Criterios para la aplicación de cargas, análisis y diseño de infraestructura para pórticos y equipos de patio 65

5.1 Combinación de cargas para el diseño de estructuras 65
5.1 Análisis y aplicación de cargas para la infraestructura de subestaciones convencionales 68
5.1.1 Conexiones con varios tipos de conductores 68
5.1.2 Análisis de cargas para las estructuras que conforman los pórticos. 69
5.1.3 Configuración estructural típica para pórticos 91
5.1.4 Análisis y aplicación de cargas para las estructuras metálicas que soportan los equipos de patio 94
5.1.5 Configuración estructural típica para soportes de equipos de patio 131
131
5.1.6 Criterios de diseño para las estructuras metálicas de los equipos de patio y los pórticos 136

6. Criterios para obras civiles, cimentaciones y edificios ocupacionales 144
6.1 Análisis de para cimentaciones y fosos para equipos inductivos o transformadores 144
6.2 Análisis para los muros cortafuego 160
6.2.1 Procedimiento para el análisis y los cálculos del diseño de los muros cortafuego 161
6.3 Análisis para edificios ocupacionales 164
6.3.1 Análisis para edificaciones 164
6.4 Análisis y configuración de las cimentaciones de las estructuras de equipos de patio y pórticos 172
6.4.1 Metodología de análisis y diseño para las cimentaciones superficiales 175
6.4.2 Configuración estructural típica para cimentaciones de equipos y de pórticos
184
6.5 Obras complementarias civiles 187

7. Conclusiones y recomendaciones 193
7.1 Conclusiones 193
7.2 Recomendaciones 195

Anexo 1: Guía de proceso para el diseño civil estructural de subestaciones eléctricas convencionales de alta tensión 196

Anexo 2: Ejemplo de cálculo 197

Bibliografía 198

Lista de figuras

Pág.

Figura 1 *Tipos de interruptores según la instalación, el diseño, el medio de interrupción y el mecanismo de operación* 17
Figura 2 *Tipos de seccionadores, según el mecanismo de operación y su ubicación.* 20
Figura 3 *Tipos de seccionadores según función y construcción* 21
Figura 4 *Clasificación de transformadores de corriente, según su construcción y uso.* 24
Figura 5 *Clasificación de pararrayos según su amperaje* 26
Figura 6 *Tipos constructivos de transformadores* 28
Figura 7 *Conexión clásica de barraje flexible* 33
Figura 8 *Conexión clásica, barraje rígido, conexión rígida* 34
Figura 9 *Conexión clásica, barraje rígido, conexión flexible* 35
Figura 10 *Conexión clásica, barraje flexible* 36
Figura 11 *Conexión con seccionadores pantógrafos, barraje flexible* 37
Figura 12 *Conexión con seccionadores pantógrafos, barraje rígido* 37
Figura 13 *Conexión clásica modificada, barraje flexible* 38
Figura 14 *Barra sencilla, disposición clásica* 39
Figura 15 *Barra sencilla, salidas enfrentadas, disposición clásica* 39
Figura 16 *Barra principal y de transferencia, disposición clásica* 40
Figura 17 *Doble barra, disposición clásica* 40
Figura 18 *Doble barra, más bypass o paso directo, disposición clásica* 41
Figura 19 *Doble barra, conexión a transformadores* 42
Figura 20 *Doble barra, conexión a transformadores* 42
Figura 21 *Configuración de interruptores, conexión a transformadores* 43
Figura 22 *Planta típica de transformadores* 43
Figura 23 *Resultante de la carga total del conductor WT* 48
Figura 24 *Conductores con cargas concentradas* 49
Figura 25 *Trayectoria parabólica con apoyos a nivel* 51
Figura 26 *Apoyos de la catenaria del cable a distintos niveles* 52
Figura 27 *Dimensiones considerando las cadenas de aisladores y herrajes* 54
Figura 28 *Trayectoria de la catenaria del conductor* 56
Figura 29 *Espectro elástico de aceleraciones de diseño como fracción de g* 61
Figura 30 *Configuración de las conexiones en las subestaciones* 69
Figura 31 *Isométrico de cargas y localización de templas SE ejemplo* 70
Figura 32 *Plano de planta con localización de templas SE ejemplo* 70

Figura 33 *Parámetros básicos para evaluar las cargas de los pórticos* 71
Figura 34 *Longitud del vano de apoyo de conductores* 74
Figura 35 *Parámetros para Dh y longitudes de los vanos* 75
Figura 36 *Esquema de cargas concentradas en los conductores* 76
Figura 37 *Factor ψ relativo a la fuerza de tracción en conductores flexibles.* 80
Figura 38 *∂m=Ángulo de declinación máximo durante o después del cortocircuito* 81
Figura 39 *Alturas de fijación* 88
Figura 40 *Representación de los ángulos de fase* 89
Figura 41 *Disposición típica de cargas de cable de guarda* 90
Figura 42 *Representación árboles de carga de las conexiones de los conductores* 90
Figura 43 *Configuración típica para pórticos metálicos* 91
Figura 44 *Configuración típica para pórticos metálicos 2* 92
Figura 45 *Configuraciones típicas para la estructura metálica de pórticos conectados* 93
Figura 46 *Modelos de los pórticos* 94
Figura 47 *Ejemplo de vano horizontal, centro a centro del equipo.* 97
Figura 48 *Ejemplo de vano horizontal, conexión con seccionador, centro del polo al centro del equipo.* 97
Figura 49 *Consideraciones para el cálculo de flechas y tensiones de la conexión entre equipos* 98
Figura 50 *Oscilación de fases durante y después de cortocircuito trifásico* 99
Figura 51 *Factor ψ relativo a la fuerza de tracción en conductores flexibles.* 102
Figura 52 *∂m=Ángulo de declinación máximo durante o después del cortocircuito* 103
Figura 53 *Esquema de separación de conductores* 104
Figura 54 *V2 como función de V1* 105
Figura 55 *V3 como función de as/d* 106
Figura 56 ξ como función de j y εst 107
Figura 57 Conductores rígidos y dirección de fuerzas electromagnéticas 110
Figura 58 *Cálculo del factor k* 115
Figura 59 *Relación entre la fuerza dinámica y estática de los puntos de apoyo Vf* 115
Figura 60 *Relación de fuerzas dinámica y estática de conductor* $V\sigma$ 116
Figura 61 *Cálculo de bajante en barraje flexible* 118
Figura 62 *Geometría de la bajante* 119
Figura 63 *Ejemplo de ficha técnica* 121
Figura 64 *Distancias en equipos de patio para cálculos de cargas* 122
Figura 65 *Distancia aferente entre equipos* 123
Figura 66 *Altura de equipo y soportes* 124
Figura 67 *Perfiles en celosía, detalle de anclajes para la estructura de soporte* 125
Figura 68 *Áreas aferentes para el cálculo de presión del viento* 126
Figura 69 *Árboles de carga para seccionadores* 129
Figura 70 *Aplicación de árboles de carga para equipos monopolares* 130
Figura 71 *Estructura tipo de un seccionador* 131
Figura 72 *Seccionador tipo pantógrafo* 132
Figura 73 *Equipo tipo para transformador de potencia* 132
Figura 74 *Equipo tipo para transformador de corriente* 133

Figura 75 *Planos tipo para descargador de sobretensión* 133
Figura 76 *Planos tipo para estructuras de soporte en alma llena* 134
Figura 77 *Planos tipo para seccionador tipo pantógrafo* 135
Figura 78 *Relación w/t para perfilería estructural* 137
Figura 79 *Bloque de cortante* 139
Figura 80 *Distancias mínimas de borde "e"* 142
Figura 81 Esquemas dimensionales para la cimentación de los transformadores y separación de muros entre equipos 146
Figura 82 Distancia entre transformador y superficie de edificio de material no combustible 147
Figura 83 Distancia entre transformador y superficie de edificio de material combustible 148
Figura 84 Distancia entre transformador a estructuras de material no combustible y combustible 148
Figura 85 Recomendaciones de las separaciones de transformadores aislados 151
Figura 86 *Criterios de separación de transformadores que contienen aceite, para exteriores* 152
Figura 87 *Esquema para foso y carrilera de transformadores* 153
Figura 88 *Esquema tipo en alzado para transformadores con ruedas soportado en vigas carrileras.* 154
Figura 89 *Ejemplo ficha técnica de un transformador tipo* 155
Figura 90 *Configuración dimensional del foso de un transformador* 156
Figura 91 *Esquema para evaluar la deformación máxima del muro, como una viga empotrada* 162
Figura 92 Tabla con las combinaciones de cargas de diseño y estabilidad de los muros cortafuego 162
Figura 93 *Ejemplo de un cuarto de control (configuración arquitectónica)* 165
Figura 94 *Ejemplo de una caseta de relés (configuración arquitectónica).* 166
Figura 95 *Ejemplo de la portería (configuración arquitectónica).* 166
Figura 96 *Figura esquemática para validación de irregularidades en ambos sentidos sísmicos (Sx y Sy)* 171
Figura 97 *Análisis de cargas para cimentaciones* 174
Figura 98 *Zonas de posible ubicación de cargas resultantes* 177
Figura 99 *Cortante en dos direcciones* 180
Figura 100 *Cortante en una dirección* 180
Figura 101 *Aplastamiento en la zapata* 181
Figura 102 *Zapata y pedestal sencilla para equipos de patio monopolares* 185
Figura 103 *Zapata combinada con dos pedestales para equipos de patio bipolares.* 185
Figura 104 *Zapata combinada con tres pedestales para equipos de patio tripolares*. 186
Figura 105 *Zapata combinada típica para pórticos.* 186
Figura 106 *Plano ejemplo de obras complementarias* 192

Lista de tablas

Pág.

Tabla 1 *Valores del coeficiente Fa, para la zona de periodos cortos del espectro*..... 62
Tabla 2 *Valores de coeficiente Fv, para la zona de períodos intermedios del espectro*. 62
Tabla 3 *Factor de modificación de respuesta estructural* 64
Tabla 4 *Tabla de parámetros globales* 72
Tabla 5 *Características del conductor* 73
Tabla 6 *Características del cable de guarda* 73
Tabla 7 *Características de los aisladores*..... 74
Tabla 8 *Tabla resumen para cálculo de la fuerza del viento*..... 86
Tabla 9 *Tabla resumen de los árboles de carga*..... 87
Tabla 10 *Factores αf y β y ɣ para diferentes disposiciones de apoyos de barrajes* 113
Tabla 11 *Características específicas del conductor* 120
Tabla 12 *Resumen para el cálculo de la presión del viento*.....126
Tabla 13 *Resumen de los árboles de carga* 128
Tabla 14 *Tabla de relaciones de esbeltez*.....138
Tabla 15 *Distancias de seguridad para transformadores para uso exterior* 145
Tabla 16 *Criterios de separación de transformadores*.....150
Tabla 17 *Tabla de cuantías mínimas para estructuras en concreto*.....158
Tabla 18 *Combinaciones de cara para el diseño y la estabilidad de las cimentaciones*160
Tabla 19 *Criterios de estabilidad para cimentaciones* 175
Tabla 20 *Verificación de anclajes a tracción* 183
Tabla 21 *Verificaciones del anclaje a cortante* 184

Lista de imágenes

Pág.
Imagen 1 *Distribución de la energía eléctrica* 5
Imagen 2 *Fotografía de un interruptor de potencia* 18
Imagen 3 *Tipos de seccionadores* 22
Imagen 4 *Transformadores de potencial* 23
Imagen 5 *Ejemplo de transformadores de corriente* 25
Imagen 6 *Descargadores de sobretensión* 26
Imagen 7 *Equipo de transformación de potencia* 29
Imagen 8 *Transformador con su respectivo muro cortafuego* 30
Imagen 9 Conductores conectados en pórticos 71
Imagen 10 *Ubicación de muros cortafuego, en casos de no cumplir con distancias de seguridad* 157

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término
a	Separación entre fases.
a_s	Distancia entre centros de subconductores.
A	Apoyo izquierdo
Aa	Aceleración horizontal pico efectiva de diseño
Ac	Área de la sección transversal del cable
A,E	Ancho y largo del pedestal.
Aexp	Área expuesta del muro cortafuegos, a la aplicación de la presión del fuego en m^2
Ah	Área hidráulica, m^2.
Alsop	Área neta longitudinal.
Amin	Distancia mínima en mitad del vano.
(Anf)	Ángulo de fricción interna.
Anm	Altura sobre el nivel del mar.
A_p	Área proyectada en un plano normal a la dirección del viento
Ast	Altura del pedestal sobre el suelo.
At	Cálculo de área expuesta al viento de equipo.
Ata	Área neta mínima en tensión desde el orificio hasta la punta del ángulo perpendicular a línea de fuerza.
Atsop	Área neta transversal.
Av	Velocidad horizontal pico efectiva de diseño.
Avm	Área neta mínima.
B	Apoyo derecho.
B_1	Longitud del foso que apoya el transformador.
B_2	Ancho del foso que apoya el transformador.
B'	Dimensión efectiva de la cimentación en dirección y.

Símbolo	Término
Bc	Dimensión de la cimentación en dirección y.
Bct	Máxima flecha en mitad de vano por elongaciones térmicas y elásticas.
Bh	Máximo desplazamiento horizontal dentro del vano.
B, L	Lado *x* y lado *y* de la zapata.
Bsl	Lado cara longitudinal.
Bst	Lado cara transversal.
c	Constante dada por la relación entre la tensión y el peso
C	Categoría de exposición.
C'	Fuerza de atracción de corriente monofásica.
Cc	Cargas de sobretensión en conductores por efecto de cortocircuito.
C_{ce}	Relación de esbeltez de la columna, que separa el pandeo elástico del pandeo inelástico.
Cd	Constante de elongación, aumenta la flecha del vano causado por elongaciones térmicas y elásticas del conductor.
Cexpl	Carga producto del fuego en Kn.
C_f	Coeficiente de fuerza para el cálculo del viento
Cf	Constante de forma, incrementa la flecha dinámica del vano causado por el cambio de forma en la curva del conductor.
Cm	Cargas de mantenimiento.
C_m	Coeficiente para miembros con restricción de desplazamiento de uno de sus extremos con respecto al otro.
Csv	La carga de sismo vertical se calcula como el 80% de la carga de sismo horizontal según la ASCE 113.
Csx y Csy	Cargas por sismo horizontal sobre equipos y estructuras.
Ct	Carga horizontal de tiro.
Cth	Constante del material del conductor.
Cv	Carga de viento.
d	Diámetro de un subconductor.

Símbolo	Término
dh	Diámetro orificio de fijación.
di	Diámetro interior
dp	Diámetro nominal del perno.
D	Diámetro del conductor
Da	Cargas de accionamiento.
De	Diámetro exterior.
Ds	Cargas que permanecen siempre en la estructura.
e	Máxima elongación elástica debida al cambio de tensión.
e_c	Espesor del conductor tubular.
e_x	Excentricidad de la carga en dirección x.
e_y	Excentricidad de la carga en dirección y.
eh	Espesor de lámina de hielo
et	Máxima elongación térmica debido al calentamiento por la corriente de cortocircuito.
E	Módulo de elasticidad.
Ec	Módulo de elasticidad del cable
Es	Módulo de elasticidad real.
EX	Excentricidad.
$E_{x,y}$	Cargas por sismo horizontal sobre equipo y/o estructura.
E (x,y,z)	Cargas producidas por efectos sísmicos.
F	Cargas debidas al peso y la presión de fluidos.
F'	Fuerza electromagnética.
Fa	Coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de periodos cortos debida a los efectos de sitio
Fas	Peso de la cadena de aisladores
(*f'c*)	Resistencia del concreto.
F_E	Fuerza lateral sísmica aplicada en el centro gravitacional de la estructura.

Símbolo	Término
Ff	Tensión después del cortocircuito causada por el movimiento brusco del conductor.
Flcc	Carga en condición del cortocircuito longitudinal.
Flct	Tensión longitudinal.
Fo	Carga horizontal total.
Flea	Carga en sentido longitudinal.
Fst	Tensión estática del conductor.
FS_x	Factor de seguridad al volcamiento en la dirección x.
FS_y	Factor de seguridad al volcamiento en la dirección y.
F_t	Fuerza del viento
Ft	Máxima tensión durante el cortocircuito.
Ftcc	Carga en condición de cortocircuito transversal.
Ftcs=Flcs	Fuerza horizontal en el conductor por sismo.
Ftss=Flss	Fuerza horizontal en el soporte por sismo.
Fu	Resistencia a tracción mínima específica para el miembro.
Fv	Coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de periodos intermedios debida a los efectos de sitio.
Fvc	Carga vertical actuante.
Fvcs	Fuerza vertical en el conductor por sismo.
Fvea	Carga en sentido vertical.
Ftea	Carga en sentido transversal.
Ftes=Fles	Fuerza horizontal en el equipo por sismo.
Fves	Fuerza vertical en el equipo por sismo.
FVo	Carga vertical total.
Fvss	Fuerza vertical en el soporte por sismo.
Fy	Esfuerzo de fluencia del acero.

Símbolo	Término
G	Factor de respuesta de ráfaga para conductores, cables de guarda y estructuras.
(*Gc*)	Peso unitario del concreto.
Gr	Carga debida al granizo, sin tener en cuenta la contribución del empozamiento.
(Grel)	Peso unitario del relleno.
H	Cargas debidas al empuje lateral del suelo.
*H**	Altura de la pared divisoria resistente al fuego.
H_1	Altura de la cámara de expansión del transformador o tanque superior del transformador.
H_2	Altura de la cámara de expansión del transformador o tanque del transformador inferior.
Hat	Centroide de áreas cara transversal / longitudinal.
Hc	Altura medida desde la base del equipo hasta el punto de conexión.
He	Altura total del equipo.
Hm	Centroide de masa.
Hs	Altura.
I	Coeficiente de importancia.
I_{FE}	Factor de importancia para cargas sísmicas.
I_{k2}	Corriente de cortocircuito simétrica fase.
I_{k3}	Corriente de cortocircuito simétrica trifásica inicial.
I_{MV}	Es 1.0 cuando el modo de vibración dominante es uno, y se toma como 1.5 cuando hay varios modos de vibración considerados en el diseño.
Ix	Momento de inercia con respecto al eje x.
Iy	Momento de inercia con respecto al eje y.
J	Momento de inercia.
k	Factor multiplicador por relación $\frac{R}{X}$ (valor pico de la corriente de corto)
k^n	Valor de x, para cuando R(x)=0

Símbolo	Término
K	Valor pico de la corriente de corto.
Ke	Coeficiente de longitud efectiva.
(*Kp)*	Coeficiente de presión pasiva.
KxLx, KyLy	Longitudes efectivas en los correspondientes planos a flexión.
K_z	Coeficiente de exposición de presión por la velocidad del viento
K_{zt}	Factor topográfico
l_s	Distancia media entre separadores adyacentes.
L	Longitud del vano (separación entre soportes).
L'	Dimensión efectiva de la cimentación en dirección x.
*L**	Longitud del muro cortafuego.
L_a	Longitud de un aislador
L_{af}	Longitud aferente.
Lc	Longitud del vano (horizontal) del conductor sin herrajes ni accesorios
Ld	Dimensión de la cimentación en dirección x.
Le	Carga de empozamiento de agua.
Li	Cargas vivas debidas al uso y ocupación de la edificación.
Ll	Longitud libre.
Lo	Distancia mínima desde el centro del orificio hasta el eje de cualquier miembro.
LP	Longitud del pedestal.
Lr	Cargas vivas sobre la cubierta.
Lx	Longitud en el sentido x.
Ly	Longitud en el sentido y.
m_c	Masa por unidad de longitud.
M	Momento máximo
Max, May	Momentos admisibles.

Símbolo	Término
(ME)	Momento estabilizador.
Mo	Momento en la base.
Mx, My	Momentos con respecto al eje x y al eje y.
n	Número de conductores por fase.
nc	Número de cargas concentradas
nm	Coeficiente de rugosidad de Manning.
N	Número de aisladores
Nc	Rigidez conjunto conductor.
N_{cl}	Número de columnas.
N_{co}	Cantidad.
p	Perímetro mojado, m.
P	Fuerza de diseño a tracción en la conexión.
Pa	Compresión axial de acuerdo con lo calculado en el diseño a compresión.
Pax	Compresión axial.
PD	Profundidad de desplante.
Pexpl	Presión de fuego= 0.24 kN/m^2 (NFPA 5000, 2024)
Pf	Presión por fuego de 0.24kPa perpendicular a la cara del muro.
Pi	Carga concentrada.
Po	Presión del viento calculada para la velocidad del viento de diseño.
PP	Peso propio del equipo y/o de la estructura.
Pp	Peso propio de la estructura, equipos y cualquier tipo de elemento implícito en la implementación del mismo, como cargas debido a montaje y mantenimiento.
Ppe	Fuerza transmitida por el perno.
Pv	Carga vertical (daN).
Py	Compresión axial al rendimiento *(Fy*A).*

Símbolo	Término
q	Factor de forma que depende de las características geométricas de la barra.
Q	Densidad del aire
Qacc	Esfuerzo máximo neto actuante a compresión.
Qadm	Capacidad admisible en condiciones estáticas, a nivel de desplante de la zapata sin considerar la masa de relleno que gravita sobre ella.
Q_d	Caudal de descarga, l/s.
Qmáx	Esfuerzo máximo actuante.
r	Relación entre la fuerza electromagnética y la fuerza gravitacional.
rg	Radio de giro.
$\frac{R}{X}$	Relación de resistencia a reactancia.
R	Coeficiente de modificación a la respuesta sísmica o disipación de energía.
R_A	Reacción vertical apoyo A
R_B	Reacción vertical apoyo B
Rec	Recubrimiento de acero de la zapata.
$R_{(x)}$	Carga cortante en un punto x debido a todas las cargas aplicadas en el vano
S	Pendiente longitudinal, m/m.
Sa	Valor del espectro de aceleraciones de diseño para un periodo de vibración dado.
Sa/R	Coeficiente sísmico de diseño.
S_0	Longitud del cable entre el apoyo B y el punto más bajo
Sv/Sh	Relación sismo vertical / horizontal.
S_1	Longitud del cable entre e apoyo A y el punto más bajo
t	Espesor del elemento.
T	Periodo de vibración del sistema elástico.
T_{AY}	Tensión resultante en el apoyo A

Símbolo	Término
T_{BY}	Tensión resultante en el apoyo B
Tc	Periodo de oscilación del conductor.
Te	Fuerzas y afectaciones causadas por efectos acumulados de variación de temperatura
Tk1	Intervalo de tiempo entre el inicio del cortocircuito y el primer corte de la corriente, s.
To	Tensión mecánica horizontal del conductor
T_{01}	Tensión mecánica horizontal básica en el estado 1
T_{02}	Tensión mecánica horizontal básica en el estado 2
Tr	Periodo de oscilación resultante.
Tz	Espesor de la zapata.
V	Máxima velocidad del viento para flujo laminar.
Vc	Velocidad, m/s.
V_D	Velocidad básica del viento.
V_d	Carga de viento de diseño sobre el equipo y/o de la estructura.
V_f	Relación entre las fuerzas dinámicas entre los apoyos A yB
Vr	Relación entre fuerzas dinámicas con y sin recierre presentadas en los apoyos A y B
V_s	Carga viento de servicio sobre equipo y/o de la estructura.
Vs	Velocidad básica del viento.
W	Carga muerta de los elementos.
We	Peso total del equipo.
wc	Peso de cable por unidad de longitud.
w'c	Carga vertical debida al peso del cable y a la capa de hielo.
Weq	Carga externa y uniforme equivalente.
wi	Peso del hielo por unidad de longitud sobre el conductor.
WR	Peso total de relleno más el cimiento.
Ws	Peso.

Símbolo	Término
WT	Carga resultante actuante sobre el barraje.
W_T	Carga total en el conductor por unidad de longitud.
W_{T1}	Carga uniforme equivalente sobre el conductor en el estado 1
W_{T2}	Carga uniforme equivalente sobre el conductor en el estado 2
W'w	Acción del viento sobre el conductor y la capa de hielo.
X_a	Proyección horizontal de la longitud de la cadena de aisladores.
Xi	Posición de la carga Pi, respecto al apoyo A
X_1, Y_1	Coordenadas de apoyo A
X_0, Y_0	Coordenadas de apoyo B
y	Desnivel entre apoyos, $Y_1 – Y_0$
Y	Flecha máxima del conductor.
Y_a	Flecha de la cadena de aisladores y herrajes.
Y_C	Flecha del vano.
Z	Módulo de sección.

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	
α	Coeficiente térmico de dilatación lineal del cable	1/ºC
α_f	Factor de esfuerzo en los soportes	
ΔT	Variación de temperatura	ºC
β	Factor de esfuerzo sobre el conductor principal.	
ϕ	Diámetro.	
$\phi\tau$	Relación de solidez cara transversal.	
$\phi\lambda$	Relación de solidez cara longitudinal.	
∂	Dirección angular de la fuerza.	

Símbolo	Término
∂k	Ángulo de declinación durante o después del cortocircuito.
∂m	Ángulo de declinación máximo durante o después del cortocircuito.
φ	Factor de tracción parámetro de carga.
σ	Esfuerzo del suelo (daN/m^2).
$\bar{\sigma}$	Esfuerzo medio equivalente (daN/m^2).
ρ	Densidad del aire.
σ_{fin}	Menor valor del esfuerzo estático.
ψ	Factor relativo a la fuerza de tracción en un conductor flexible.
γ	Factor de la frecuencia natural del tubo.
γ_w	Factor de ajuste para carga de viento
ζ	Factor de tensión mecánica del conductor.

Introducción

La infraestructura eléctrica hace parte esencial del comportamiento y funcionamiento confiable de la sociedad moderna. Para satisfacer esa dinámica en su funcionamiento surgen necesidades esenciales que deben garantizar eficiencia, seguridad y confiabilidad. Con esta idea como preámbulo se desarrolla el presente trabajo, que plantea una metodología de análisis y diseño estructural, tomando como referencia diversos lineamientos normativos vigentes que permiten garantizar un diseño adecuado para infraestructuras eléctricas, específicamente subestaciones de alta tensión aisladas con aire, las cuales desempeñan un papel crucial en la transformación y distribución de energía eléctrica mediante redes de alta y extra alta tensión, que son los nodos vitales para conectar las fuentes de generación, distribución y transformación de energía hasta llegar a los puntos de consumo, convirtiéndose así en componentes críticos de la red eléctrica.
Las subestaciones eléctricas son importantes por su capacidad para asegurar la confiabilidad del suministro eléctrico, cualquier falla en su diseño o funcionamiento podría resultar en interrupciones significativas, afectando a la industria, a los servicios públicos y, en última instancia, a la vida cotidiana de millones de personas. Adicionalmente, la transición hacia fuentes de energía más limpias y renovables se encuentra actualmente en el centro de la agenda global, en cuya integración las subestaciones eléctricas de alta tensión también desempeñan un papel relevante.

Este trabajo incursiona en la aplicación de la ingeniería civil estructural, proponiendo una metodología de diseño con diversos lineamientos normativos específicos destinados a garantizar la integridad y fiabilidad de las subestaciones eléctricas de alta tensión. Se construye un marco normativo sólido y adaptable que responda a las demandas cambiantes del panorama eléctrico actual, considerando especialmente las implicaciones estructurales. El trabajo de investigación inicia con la recopilación de las normas nacionales y estadounidenses que influyen en el diseño estructural de las subestaciones eléctricas. Se contextualizan los conceptos eléctricos referentes a los niveles de tensión, las consideraciones de aislamiento y las distancias mínimas para proponer la disposición

física, junto con definiciones de las funciones de los equipos que intervienen. Posteriormente, las subestaciones se clasifican según su infraestructura. Para cada caso en particular se propone una metodología integral que busca consolidar los conocimientos y se hacen recomendaciones de análisis y diseño; además de presentar ejemplos de configuraciones esquemáticas que normalmente se emplean en la infraestructura de una subestación.

La metodología propuesta se sintetiza en guías de diseño seccionadas para las infraestructuras que conforman una subestación eléctrica. Estas guías facilitan el análisis y parametrizan los procesos de diseño para las subestaciones eléctricas de alta tensión. La síntesis de estos procesos se garantiza la sostenibilidad y eficiencia de la infraestructura eléctrica del país.

Justificación

Con el fin de entender el concepto de funcionalidad de una subestación y comprender la necesidad de plantear un lineamiento de diseño civil estructural, que permita establecer una metodología de diseño las subestaciones, se requiere contextualizar algunos conceptos básicos respecto a las etapas del manejo de la energía eléctrica. Se han planteado varias etapas del manejo de la energía, las cuales se dividen en las siguientes categorías: generación, transmisión y subtransmisión, distribución y una etapa que se presenta de forma alterna en las anteriores mencionadas la cual es el proceso de transformación.

- **Generación**

  Esta primera etapa comprende el proceso de desarrollo de energía eléctrica, con la cual de acuerdo con las condiciones particulares de la zona geográfica donde se realizará el proceso, se pueden obtener diversas fuentes de generación, tales como termoeléctricas, generación eólica, biomasas, energía solar, energía hidráulica, entre otras. Normalmente esta etapa del manejo de la energía, se desarrolla con tensiones bajas, las máximas tensiones que se manejan en Colombia, según el Libro de subestaciones eléctricas de José Carlos Romero (Escobar, 2014) menciona que en la mayoría de zonas del país con centrales hidroeléctricas y térmicas se maneja un nivel de tensión alrededor de 13.8 kV.

- **Transmisión y subtransmisión**

  Hace referencia a la necesidad de transportar la energía que parte de las fuentes de generación o de los puntos de transformación, la cual se requiere disponer en los sitios de consumo dispuestos en las ciudades o diversas zonas ocupacionales del país. En este proceso de transmisión, se requiere llevar la energía con altos niveles de tensión, de tal manera que no se tengan tantas pérdidas en el proceso y sea más económico realizarlo. Cuando se menciona el proceso de transmisión

se enfatiza en el transporte de energía con altos niveles de tensión, tales como: 500kV, 230kV y 115kV. Evaluando la subtransmisión se enfatiza en niveles menores de tensión, tales como 66kV, 44kV y 34.5kV

- **Distribución**

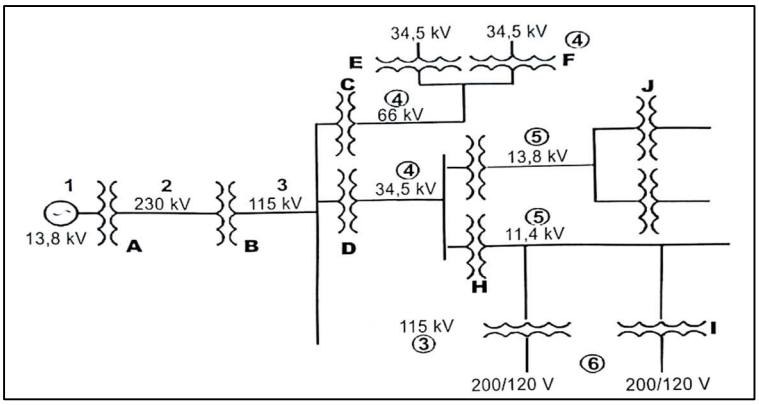
  En zonas habitacionales se requiere disponer de niveles de energía adecuados a las necesidades de consumo, de tal manera que los niveles de tensión son relativamente bajos, los cuales oscilan entre 1000V - 25V. Durante este proceso se llevan estos niveles de voltaje a transformadores de distribución que permiten realizar ajustes en los niveles de tensión y lograr una distribución ajustada a lo que requieren los puntos de llegada.

- **Transformación**

  Esta etapa hace parte de los procesos del manejo de la energía, sin embargo, se presenta de forma intermedia en las etapas mencionadas previamente; esto se debe a la necesidad de realizar modificaciones de tipo eléctrico durante los procesos de generación, transporte y distribución de la energía, los ajustes que se realizan de consideraciones eléctricas, se desarrollan en la infraestructura que conforman las subestaciones, las cuales presentan de forma física un sistema eléctrico en la cual se transforman los niveles de tensión, corriente, frecuencia o reordenamiento de flujos de carga, de tal manera que se realicen acondicionamientos necesarios para continuar el transporte de la energía, son los nodos vitales que conectan las fuentes de generación de energía con los puntos de consumo, lo que las convierte en componentes críticos de la red eléctrica. En la Imagen 1 se presenta esquemáticamente el manejo de la energía y se evidencia el uso de subestaciones para el ajuste de condiciones eléctricas en el proceso completo, las letras A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, representan la ubicación de las subestaciones eléctricas, las cuales están de forma transversal a todo el proceso de la energía. Los numerales representan los siguientes aspectos: 1. Tensión de generación, 2. Tensión de transmisión, 3. Tensión de transmisión o subtransmisión, 4. Tensión de subtransmisión, 5. Tensión de distribución y 6. Tensión de consumo domiciliario o comercial.

Imagen 1

Distribución de la energía eléctrica



Nota. Tomado de Escobar (2014).

Durante la experiencia práctica del diseño de subestaciones y en la búsqueda bibliográfica para comprender los lineamientos del diseño de estas instalaciones, se ha evidenciado que hay una vasta información existente, la cual sirve como referente a nivel profesional y académico, esta se enfoca principalmente en abordar el tema del diseño de la infraestructura desde el concepto electricista, si bien el diseño eléctrico es la base primaria del planteamiento de su uso, equipos, disposición física, entre otros; la información encontrada, se queda corta en términos de un planteamiento que considere las implicaciones del diseño civil estructural de tal manera que aborde de forma global y secuencial las aplicaciones que se deben tener en cuenta desde ese ámbito. Entendiendo que una necesidad esencial en el diseño de subestaciones es que este debe garantizar el poder contar con eficiencia y seguridad para el funcionamiento de la misma, todo el concepto no se satisface planteando el conocimiento desde la visión electricista, sino también se debe abordar este planteamiento desde la visión civil estructural; tomando ese argumento, se desarrolla la el trabajo final de maestría, el cual considera plantear una metodología de diseño civil estructural tomando como referencia diversos lineamientos normativos existentes que permitan garantizar un diseño adecuado a la infraestructura de las subestaciones. El desarrollo del documento presenta una contextualización general del alcance del diseño eléctrico, del cual parte toda la disposición de equipos y espacial de la subestación, sin embargo, el principal enfoque es el análisis y evaluación de las aplicaciones civiles estructurales en el diseño de la infraestructura que conlleva una subestación.

Objetivos

General

Plantear una metodología para el diseño estructural de las subestaciones eléctricas de alta tensión, bajo lineamientos normativos aplicables colombianos y estadounidenses.

Específicos

- Realizar una recopilación de normas, guías y documentos investigativos nacionales y estadounidenses que regulen el diseño estructural de subestaciones eléctricas de alta tensión.

- Analizar de forma detallada la aplicabilidad de la bibliografía encontrada, al diseño estructural de la infraestructura particular que componen las subestaciones convencionales de alta tensión.

- Brindar recomendaciones y pautas técnicas para el dimensionamiento, análisis y proceso de diseño estructural de la infraestructura requerida en las subestaciones eléctricas convencionales de alta tensión.

- Elaborar una guía del proceso a seguir detallando con los lineamientos normativos para el diseño estructural de subestaciones eléctricas de alta tensión.

1. Marco referencial

Este capítulo presenta los aspectos principales sobre el marco normativo y legal que rigen actualmente para el diseño estructural de las subestaciones.

1.1 Antecedentes

En la búsqueda bibliográfica realizada se evidencian investigaciones y diversos documentos que se han desarrollado con el fin de conocer algunos de los lineamientos que se deben seguir para el diseño principalmente eléctrico y dan algunas pautas para el planteamiento y análisis civil estructural para la infraestructura que conforma la subestación; a continuación, se presentan algunos documentos significativos.

- **Subestaciones de alta y extra alta tensión guía práctica de diseño** (HMV Ingenieros Ltda, 2021)

  Este libro es un referido a los lineamientos que se ciñen en el diseño de subestaciones a nivel de Colombia y algunos otros países latinoamericanos.

  La información allí presentada es dada por la experiencia y el desarrollo práctico de diseño de subestaciones en las cuales han logrado ser parte la empresa HMV a nivel nacional e internacional. Se presentan inicialmente las consideraciones generales para el diseño de una subestación, partiendo de toda la información de entrada que requiere el desarrollo de los primeros planteamientos, considerando aspectos como la localización general de la subestación, información básica como las tensiones de diseño y las características del sitio donde se construirá. Luego de definir los aspectos globales, se enfoca en la descripción de actividades a ejecutar, lo cual implica realizar estudios específicos como la selección de la configuración, la implantación eléctrica, la evaluación de características necesarias y los estudios que normalmente se desarrollan en campo para implantar una infraestructura en un sitio en particular. Plantea el desarrollo del diseño eléctrico para la definición de la disposición física de las subestaciones, considerando todos sus componentes, tales como equipos de alta tensión (interruptores, seccionadores, transformadores de corriente, pararrayos, aisladores, entre otros), también presenta el diseño para

Contenido

Pág.

Introducción 1
Justificación 3

1. Marco referencial 7
1.1 Antecedentes 7
1.2 Marco normativo 12

2. Conceptos generales de los equipos que conforman la infraestructura de subestaciones convencionales 16
2.1 Equipos de patio 16
2.1.1 Interruptores de potencia 16
2.1.2 Seccionadores 19
2.1.3 Transformadores de tensión o potencial 22
2.1.4 Transformadores de corriente 24
2.1.5 Descargadores de sobretensión o pararrayos 25
2.2 Equipos de transformación y compensación 27

3. Consideraciones particulares en cuanto a la disposición física de la infraestructura de una subestación 31
3.1 Disposición física general para subestaciones 31
3.1.1 Configuración seleccionada de la subestación 31
3.1.2 Equipos que se deben para emplear 32
3.1.3 Tipos de barraje para conexiones de alta tensión. 33
3.1.4 Disposiciones físicas que se pueden usar 38

4. Criterios de evaluación de cargas para subestaciones 46
4.1.1 Cargas muertas 46
4.1.2 Cargas operativas de los equipos 46
4.1.3 Cargas de tensión mecánica y cálculo de flechas de los conductores flexibles 47
4.1.4 Cargas de cortocircuito 57
4.1.5 Cargas de construcción y mantenimiento 58
4.1.6 Cargas de viento 59
4.1.7 Cargas sísmicas 60

5. Criterios para la aplicación de cargas, análisis y diseño de infraestructura para pórticos y equipos de patio 65

5.1 Combinación de cargas para el diseño de estructuras 65
5.1 Análisis y aplicación de cargas para la infraestructura de subestaciones convencionales 68
5.1.1 Conexiones con varios tipos de conductores 68
5.1.2 Análisis de cargas para las estructuras que conforman los pórticos. 69
5.1.3 Configuración estructural típica para pórticos 91
5.1.4 Análisis y aplicación de cargas para las estructuras metálicas que soportan los equipos de patio 94
5.1.5 Configuración estructural típica para soportes de equipos de patio 131
131
5.1.6 Criterios de diseño para las estructuras metálicas de los equipos de patio y los pórticos 136

6. Criterios para obras civiles, cimentaciones y edificios ocupacionales 144
6.1 Análisis de para cimentaciones y fosos para equipos inductivos o transformadores 144
6.2 Análisis para los muros cortafuego 160
6.2.1 Procedimiento para el análisis y los cálculos del diseño de los muros cortafuego 161
6.3 Análisis para edificios ocupacionales 164
6.3.1 Análisis para edificaciones 164
6.4 Análisis y configuración de las cimentaciones de las estructuras de equipos de patio y pórticos 172
6.4.1 Metodología de análisis y diseño para las cimentaciones superficiales 175
6.4.2 Configuración estructural típica para cimentaciones de equipos y de pórticos
184
6.5 Obras complementarias civiles 187

7. Conclusiones y recomendaciones 193
7.1 Conclusiones 193
7.2 Recomendaciones 195

Anexo 1: Guía de proceso para el diseño civil estructural de subestaciones eléctricas convencionales de alta tensión 196

Anexo 2: Ejemplo de cálculo 219

Bibliografía 236

Lista de figuras

Pág.

Figura 1 *Tipos de interruptores según la instalación, el diseño, el medio de interrupción y el mecanismo de operación* 17
Figura 2 *Tipos de seccionadores, según el mecanismo de operación y su ubicación.* 20
Figura 3 *Tipos de seccionadores según función y construcción* 21
Figura 4 *Clasificación de transformadores de corriente, según su construcción y uso.* 24
Figura 5 *Clasificación de pararrayos según su amperaje* 26
Figura 6 *Tipos constructivos de transformadores* 28
Figura 7 *Conexión clásica de barraje flexible* 33
Figura 8 *Conexión clásica, barraje rígido, conexión rígida* 34
Figura 9 *Conexión clásica, barraje rígido, conexión flexible* 35
Figura 10 *Conexión clásica, barraje flexible* 36
Figura 11 *Conexión con seccionadores pantógrafos, barraje flexible* 37
Figura 12 *Conexión con seccionadores pantógrafos, barraje rígido* 37
Figura 13 *Conexión clásica modificada, barraje flexible* 38
Figura 14 *Barra sencilla, disposición clásica* 39
Figura 15 *Barra sencilla, salidas enfrentadas, disposición clásica* 39
Figura 16 *Barra principal y de transferencia, disposición clásica* 40
Figura 17 *Doble barra, disposición clásica* 40
Figura 18 *Doble barra, más bypass o paso directo, disposición clásica* 41
Figura 19 *Doble barra, conexión a transformadores* 42
Figura 20 *Doble barra, conexión a transformadores* 42
Figura 21 *Configuración de interruptores, conexión a transformadores* 43
Figura 22 *Planta típica de transformadores* 43
Figura 23 *Resultante de la carga total del conductor WT* 48
Figura 24 *Conductores con cargas concentradas* 49
Figura 25 *Trayectoria parabólica con apoyos a nivel* 51
Figura 26 *Apoyos de la catenaria del cable a distintos niveles* 52
Figura 27 *Dimensiones considerando las cadenas de aisladores y herrajes* 54
Figura 28 *Trayectoria de la catenaria del conductor* 56
Figura 29 *Espectro elástico de aceleraciones de diseño como fracción de g* 61
Figura 30 *Configuración de las conexiones en las subestaciones* 69
Figura 31 *Isométrico de cargas y localización de templas SE ejemplo* 70
Figura 32 *Plano de planta con localización de templas SE ejemplo* 70

Figura 33 *Parámetros básicos para evaluar las cargas de los pórticos* 71
Figura 34 *Longitud del vano de apoyo de conductores* 74
Figura 35 *Parámetros para Dh y longitudes de los vanos* 75
Figura 36 *Esquema de cargas concentradas en los conductores* 76
Figura 37 *Factor ψ relativo a la fuerza de tracción en conductores flexibles.* 80
Figura 38 *∂m=Ángulo de declinación máximo durante o después del cortocircuito* 81
Figura 39 *Alturas de fijación* 88
Figura 40 *Representación de los ángulos de fase* 89
Figura 41 *Disposición típica de cargas de cable de guarda* 90
Figura 42 *Representación árboles de carga de las conexiones de los conductores* 90
Figura 43 *Configuración típica para pórticos metálicos* 91
Figura 44 *Configuración típica para pórticos metálicos 2* 92
Figura 45 *Configuraciones típicas para la estructura metálica de pórticos conectados* 93
Figura 46 *Modelos de los pórticos* 94
Figura 47 *Ejemplo de vano horizontal, centro a centro del equipo.* 97
Figura 48 *Ejemplo de vano horizontal, conexión con seccionador, centro del polo al centro del equipo.* 97
Figura 49 *Consideraciones para el cálculo de flechas y tensiones de la conexión entre equipos* 98
Figura 50 *Oscilación de fases durante y después de cortocircuito trifásico* 99
Figura 51 *Factor ψ relativo a la fuerza de tracción en conductores flexibles.* 102
Figura 52 *∂m=Ángulo de declinación máximo durante o después del cortocircuito* 103
Figura 53 *Esquema de separación de conductores* 104
Figura 54 *V2 como función de V1* 105
Figura 55 *V3 como función de as/d* 106
Figura 56 ξ como función de j y εst 107
Figura 57 Conductores rígidos y dirección de fuerzas electromagnéticas 110
Figura 58 *Cálculo del factor k* 115
Figura 59 *Relación entre la fuerza dinámica y estática de los puntos de apoyo Vf* 115
Figura 60 *Relación de fuerzas dinámica y estática de conductor* $V\sigma$ 116
Figura 61 *Cálculo de bajante en barraje flexible* 118
Figura 62 *Geometría de la bajante* 119
Figura 63 *Ejemplo de ficha técnica* 121
Figura 64 *Distancias en equipos de patio para cálculos de cargas* 122
Figura 65 *Distancia aferente entre equipos* 123
Figura 66 *Altura de equipo y soportes* 124
Figura 67 *Perfiles en celosía, detalle de anclajes para la estructura de soporte* 125
Figura 68 *Áreas aferentes para el cálculo de presión del viento* 126
Figura 69 *Árboles de carga para seccionadores* 129
Figura 70 *Aplicación de árboles de carga para equipos monopolares* 130
Figura 71 *Estructura tipo de un seccionador* 131
Figura 72 *Seccionador tipo pantógrafo* 132
Figura 73 *Equipo tipo para transformador de potencia* 132
Figura 74 *Equipo tipo para transformador de corriente* 133

Figura 75 *Planos tipo para descargador de sobretensión* 133
Figura 76 *Planos tipo para estructuras de soporte en alma llena* 134
Figura 77 *Planos tipo para seccionador tipo pantógrafo* 135
Figura 78 *Relación w/t para perfilería estructural* 137
Figura 79 *Bloque de cortante* 139
Figura 80 *Distancias mínimas de borde "e"* 142
Figura 81 Esquemas dimensionales para la cimentación de los transformadores y separación de muros entre equipos 146
Figura 82 Distancia entre transformador y superficie de edificio de material no combustible 147
Figura 83 Distancia entre transformador y superficie de edificio de material combustible 148
Figura 84 Distancia entre transformador a estructuras de material no combustible y combustible 148
Figura 85 Recomendaciones de las separaciones de transformadores aislados 151
Figura 86 *Criterios de separación de transformadores que contienen aceite, para exteriores* 152
Figura 87 *Esquema para foso y carrilera de transformadores* 153
Figura 88 *Esquema tipo en alzado para transformadores con ruedas soportado en vigas carrileras.* 154
Figura 89 *Ejemplo ficha técnica de un transformador tipo* 155
Figura 90 *Configuración dimensional del foso de un transformador* 156
Figura 91 *Esquema para evaluar la deformación máxima del muro, como una viga empotrada* 162
Figura 92 Tabla con las combinaciones de cargas de diseño y estabilidad de los muros cortafuego 162
Figura 93 *Ejemplo de un cuarto de control (configuración arquitectónica)* 165
Figura 94 *Ejemplo de una caseta de relés (configuración arquitectónica).* 166
Figura 95 *Ejemplo de la portería (configuración arquitectónica).* 166
Figura 96 *Figura esquemática para validación de irregularidades en ambos sentidos sísmicos (Sx y Sy)* 171
Figura 97 *Análisis de cargas para cimentaciones* 174
Figura 98 *Zonas de posible ubicación de cargas resultantes* 177
Figura 99 *Cortante en dos direcciones* 180
Figura 100 *Cortante en una dirección* 180
Figura 101 *Aplastamiento en la zapata* 181
Figura 102 *Zapata y pedestal sencilla para equipos de patio monopolares* 185
Figura 103 *Zapata combinada con dos pedestales para equipos de patio bipolares.* 185
Figura 104 *Zapata combinada con tres pedestales para equipos de patio tripolares*. 186
Figura 105 *Zapata combinada típica para pórticos.* 186
Figura 106 *Plano ejemplo de obras complementarias* 192

Lista de tablas

Pág.

Tabla 1 *Valores del coeficiente Fa, para la zona de periodos cortos del espectro*..... 62
Tabla 2 *Valores de coeficiente Fv, para la zona de períodos intermedios del espectro*. 62
Tabla 3 *Factor de modificación de respuesta estructural* 64
Tabla 4 *Tabla de parámetros globales* 72
Tabla 5 *Características del conductor* 73
Tabla 6 *Características del cable de guarda* 73
Tabla 7 *Características de los aisladores*..... 74
Tabla 8 *Tabla resumen para cálculo de la fuerza del viento*..... 86
Tabla 9 *Tabla resumen de los árboles de carga*..... 87
Tabla 10 *Factores αf y β y ɣ para diferentes disposiciones de apoyos de barrajes* 113
Tabla 11 *Características específicas del conductor* 120
Tabla 12 *Resumen para el cálculo de la presión del viento*.....126
Tabla 13 *Resumen de los árboles de carga* 128
Tabla 14 *Tabla de relaciones de esbeltez* 138
Tabla 15 *Distancias de seguridad para transformadores para uso exterior* 145
Tabla 16 *Criterios de separación de transformadores* 150
Tabla 17 *Tabla de cuantías mínimas para estructuras en concreto*.....158
Tabla 18 *Combinaciones de cara para el diseño y la estabilidad de las cimentaciones*160
Tabla 19 *Criterios de estabilidad para cimentaciones* 175
Tabla 20 *Verificación de anclajes a tracción* 183
Tabla 21 *Verificaciones del anclaje a cortante* 184

Lista de imágenes

Pág.

Imagen 1 *Distribución de la energía eléctrica* 5
Imagen 2 *Fotografía de un interruptor de potencia* 18
Imagen 3 *Tipos de seccionadores* 22
Imagen 4 *Transformadores de potencial* 23
Imagen 5 *Ejemplo de transformadores de corriente* 25
Imagen 6 *Descargadores de sobretensión* 26
Imagen 7 *Equipo de transformación de potencia* 29
Imagen 8 *Transformador con su respectivo muro cortafuego* 30
Imagen 9 Conductores conectados en pórticos 71
Imagen 10 *Ubicación de muros cortafuego, en casos de no cumplir con distancias de seguridad* 157

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término
a	Separación entre fases.
a_s	Distancia entre centros de subconductores.
A	Apoyo izquierdo
Aa	Aceleración horizontal pico efectiva de diseño
Ac	Área de la sección transversal del cable
A,E	Ancho y largo del pedestal.
Aexp	Área expuesta del muro cortafuegos, a la aplicación de la presión del fuego en m^2
Ah	Área hidráulica, m^2.
Alsop	Área neta longitudinal.
Amin	Distancia mínima en mitad del vano.
(Anf)	Ángulo de fricción interna.
Anm	Altura sobre el nivel del mar.
A_p	Área proyectada en un plano normal a la dirección del viento
Ast	Altura del pedestal sobre el suelo.
At	Cálculo de área expuesta al viento de equipo.
Ata	Área neta mínima en tensión desde el orificio hasta la punta del ángulo perpendicular a línea de fuerza.
Atsop	Área neta transversal.
Av	Velocidad horizontal pico efectiva de diseño.
Avm	Área neta mínima.
B	Apoyo derecho.
B_1	Longitud del foso que apoya el transformador.
B_2	Ancho del foso que apoya el transformador.
B'	Dimensión efectiva de la cimentación en dirección y.

Símbolo	Término
Bc	Dimensión de la cimentación en dirección y.
Bct	Máxima flecha en mitad de vano por elongaciones térmicas y elásticas.
Bh	Máximo desplazamiento horizontal dentro del vano.
B, L	Lado *x* y lado *y* de la zapata.
Bsl	Lado cara longitudinal.
Bst	Lado cara transversal.
c	Constante dada por la relación entre la tensión y el peso
C	Categoría de exposición.
C'	Fuerza de atracción de corriente monofásica.
Cc	Cargas de sobretensión en conductores por efecto de cortocircuito.
C_{ce}	Relación de esbeltez de la columna, que separa el pandeo elástico del pandeo inelástico.
Cd	Constante de elongación, aumenta la flecha del vano causado por elongaciones térmicas y elásticas del conductor.
Cexpl	Carga producto del fuego en Kn.
C_f	Coeficiente de fuerza para el cálculo del viento
Cf	Constante de forma, incrementa la flecha dinámica del vano causado por el cambio de forma en la curva del conductor.
Cm	Cargas de mantenimiento.
C_m	Coeficiente para miembros con restricción de desplazamiento de uno de sus extremos con respecto al otro.
Csv	La carga de sismo vertical se calcula como el 80% de la carga de sismo horizontal según la ASCE 113.
Csx y Csy	Cargas por sismo horizontal sobre equipos y estructuras.
Ct	Carga horizontal de tiro.
Cth	Constante del material del conductor.
Cv	Carga de viento.
d	Diámetro de un subconductor.

Símbolo	Término
dh	Diámetro orificio de fijación.
di	Diámetro interior
dp	Diámetro nominal del perno.
D	Diámetro del conductor
Da	Cargas de accionamiento.
De	Diámetro exterior.
Ds	Cargas que permanecen siempre en la estructura.
e	Máxima elongación elástica debida al cambio de tensión.
e_c	Espesor del conductor tubular.
e_x	Excentricidad de la carga en dirección x.
e_y	Excentricidad de la carga en dirección y.
eh	Espesor de lámina de hielo
et	Máxima elongación térmica debido al calentamiento por la corriente de cortocircuito.
E	Módulo de elasticidad.
Ec	Módulo de elasticidad del cable
Es	Módulo de elasticidad real.
EX	Excentricidad.
$E_{x,y}$	Cargas por sismo horizontal sobre equipo y/o estructura.
E (x,y,z)	Cargas producidas por efectos sísmicos.
F	Cargas debidas al peso y la presión de fluidos.
F'	Fuerza electromagnética.
Fa	Coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de periodos cortos debida a los efectos de sitio
Fas	Peso de la cadena de aisladores
(*f'c*)	Resistencia del concreto.
F_E	Fuerza lateral sísmica aplicada en el centro gravitacional de la estructura.

Símbolo	Término
Ff	Tensión después del cortocircuito causada por el movimiento brusco del conductor.
Flcc	Carga en condición del cortocircuito longitudinal.
Flct	Tensión longitudinal.
Fo	Carga horizontal total.
Flea	Carga en sentido longitudinal.
Fst	Tensión estática del conductor.
FS_x	Factor de seguridad al volcamiento en la dirección x.
FS_y	Factor de seguridad al volcamiento en la dirección y.
F_t	Fuerza del viento
Ft	Máxima tensión durante el cortocircuito.
Ftcc	Carga en condición de cortocircuito transversal.
Ftcs=Flcs	Fuerza horizontal en el conductor por sismo.
Ftss=Flss	Fuerza horizontal en el soporte por sismo.
Fu	Resistencia a tracción mínima específica para el miembro.
Fv	Coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de periodos intermedios debida a los efectos de sitio.
Fvc	Carga vertical actuante.
Fvcs	Fuerza vertical en el conductor por sismo.
Fvea	Carga en sentido vertical.
Ftea	Carga en sentido transversal.
Ftes=Fles	Fuerza horizontal en el equipo por sismo.
Fves	Fuerza vertical en el equipo por sismo.
FVo	Carga vertical total.
Fvss	Fuerza vertical en el soporte por sismo.
Fy	Esfuerzo de fluencia del acero.

Símbolo	Término
G	Factor de respuesta de ráfaga para conductores, cables de guarda y estructuras.
(*Gc*)	Peso unitario del concreto.
Gr	Carga debida al granizo, sin tener en cuenta la contribución del empozamiento.
(Grel)	Peso unitario del relleno.
H	Cargas debidas al empuje lateral del suelo.
*H**	Altura de la pared divisoria resistente al fuego.
H_1	Altura de la cámara de expansión del transformador o tanque superior del transformador.
H_2	Altura de la cámara de expansión del transformador o tanque del transformador inferior.
Hat	Centroide de áreas cara transversal / longitudinal.
Hc	Altura medida desde la base del equipo hasta el punto de conexión.
He	Altura total del equipo.
Hm	Centroide de masa.
Hs	Altura.
I	Coeficiente de importancia.
I_{FE}	Factor de importancia para cargas sísmicas.
I_{k2}	Corriente de cortocircuito simétrica fase.
I_{k3}	Corriente de cortocircuito simétrica trifásica inicial.
I_{MV}	Es 1.0 cuando el modo de vibración dominante es uno, y se toma como 1.5 cuando hay varios modos de vibración considerados en el diseño.
Ix	Momento de inercia con respecto al eje x.
Iy	Momento de inercia con respecto al eje y.
J	Momento de inercia.
k	Factor multiplicador por relación $\frac{R}{X}$ (valor pico de la corriente de corto)
k^n	Valor de x, para cuando R(x)=0

Símbolo	Término
K	Valor pico de la corriente de corto.
Ke	Coeficiente de longitud efectiva.
(*Kp)*	Coeficiente de presión pasiva.
KxLx, KyLy	Longitudes efectivas en los correspondientes planos a flexión.
K_z	Coeficiente de exposición de presión por la velocidad del viento
K_{zt}	Factor topográfico
l_s	Distancia media entre separadores adyacentes.
L	Longitud del vano (separación entre soportes).
L'	Dimensión efectiva de la cimentación en dirección x.
*L**	Longitud del muro cortafuego.
L_a	Longitud de un aislador
L_{af}	Longitud aferente.
Lc	Longitud del vano (horizontal) del conductor sin herrajes ni accesorios
Ld	Dimensión de la cimentación en dirección x.
Le	Carga de empozamiento de agua.
Li	Cargas vivas debidas al uso y ocupación de la edificación.
Ll	Longitud libre.
Lo	Distancia mínima desde el centro del orificio hasta el eje de cualquier miembro.
LP	Longitud del pedestal.
Lr	Cargas vivas sobre la cubierta.
Lx	Longitud en el sentido x.
Ly	Longitud en el sentido y.
m_c	Masa por unidad de longitud.
M	Momento máximo
Max, May	Momentos admisibles.

Símbolo	Término
(ME)	Momento estabilizador.
Mo	Momento en la base.
Mx, My	Momentos con respecto al eje x y al eje y.
n	Número de conductores por fase.
nc	Número de cargas concentradas
nm	Coeficiente de rugosidad de Manning.
N	Número de aisladores
Nc	Rigidez conjunto conductor.
N_{cl}	Número de columnas.
N_{co}	Cantidad.
p	Perímetro mojado, m.
P	Fuerza de diseño a tracción en la conexión.
Pa	Compresión axial de acuerdo con lo calculado en el diseño a compresión.
Pax	Compresión axial.
PD	Profundidad de desplante.
Pexpl	Presión de fuego= 0.24 kN/m^2 (NFPA 5000, 2024)
Pf	Presión por fuego de 0.24kPa perpendicular a la cara del muro.
Pi	Carga concentrada.
Po	Presión del viento calculada para la velocidad del viento de diseño.
PP	Peso propio del equipo y/o de la estructura.
Pp	Peso propio de la estructura, equipos y cualquier tipo de elemento implícito en la implementación del mismo, como cargas debido a montaje y mantenimiento.
Ppe	Fuerza transmitida por el perno.
Pv	Carga vertical (daN).
Py	Compresión axial al rendimiento *(Fy*A).*

Símbolo	Término
q	Factor de forma que depende de las características geométricas de la barra.
Q	Densidad del aire
Qacc	Esfuerzo máximo neto actuante a compresión.
Qadm	Capacidad admisible en condiciones estáticas, a nivel de desplante de la zapata sin considerar la masa de relleno que gravita sobre ella.
Q_d	Caudal de descarga, l/s.
Qmáx	Esfuerzo máximo actuante.
r	Relación entre la fuerza electromagnética y la fuerza gravitacional.
rg	Radio de giro.
$\frac{R}{X}$	Relación de resistencia a reactancia.
R	Coeficiente de modificación a la respuesta sísmica o disipación de energía.
R_A	Reacción vertical apoyo A
R_B	Reacción vertical apoyo B
Rec	Recubrimiento de acero de la zapata.
$R_{(x)}$	Carga cortante en un punto x debido a todas las cargas aplicadas en el vano
S	Pendiente longitudinal, m/m.
Sa	Valor del espectro de aceleraciones de diseño para un periodo de vibración dado.
Sa/R	Coeficiente sísmico de diseño.
S_0	Longitud del cable entre el apoyo B y el punto más bajo
Sv/Sh	Relación sismo vertical / horizontal.
S_1	Longitud del cable entre e apoyo A y el punto más bajo
t	Espesor del elemento.
T	Periodo de vibración del sistema elástico.
T_{AY}	Tensión resultante en el apoyo A

Símbolo	Término
T_{BY}	Tensión resultante en el apoyo B
Tc	Periodo de oscilación del conductor.
Te	Fuerzas y afectaciones causadas por efectos acumulados de variación de temperatura
Tk1	Intervalo de tiempo entre el inicio del cortocircuito y el primer corte de la corriente, s.
To	Tensión mecánica horizontal del conductor
T_{01}	Tensión mecánica horizontal básica en el estado 1
T_{02}	Tensión mecánica horizontal básica en el estado 2
Tr	Periodo de oscilación resultante.
Tz	Espesor de la zapata.
V	Máxima velocidad del viento para flujo laminar.
Vc	Velocidad, m/s.
V_D	Velocidad básica del viento.
V_d	Carga de viento de diseño sobre el equipo y/o de la estructura.
V_f	Relación entre las fuerzas dinámicas entre los apoyos A yB
Vr	Relación entre fuerzas dinámicas con y sin recierre presentadas en los apoyos A y B
V_s	Carga viento de servicio sobre equipo y/o de la estructura.
Vs	Velocidad básica del viento.
W	Carga muerta de los elementos.
We	Peso total del equipo.
wc	Peso de cable por unidad de longitud.
w'c	Carga vertical debida al peso del cable y a la capa de hielo.
Weq	Carga externa y uniforme equivalente.
wi	Peso del hielo por unidad de longitud sobre el conductor.
WR	Peso total de relleno más el cimiento.
Ws	Peso.

Símbolo	Término
WT	Carga resultante actuante sobre el barraje.
W_T	Carga total en el conductor por unidad de longitud.
W_{T1}	Carga uniforme equivalente sobre el conductor en el estado 1
W_{T2}	Carga uniforme equivalente sobre el conductor en el estado 2
W'w	Acción del viento sobre el conductor y la capa de hielo.
X_a	Proyección horizontal de la longitud de la cadena de aisladores.
Xi	Posición de la carga Pi, respecto al apoyo A
X_1, Y_1	Coordenadas de apoyo A
X_0, Y_0	Coordenadas de apoyo B
y	Desnivel entre apoyos, $Y_1 – Y_0$
Y	Flecha máxima del conductor.
Y_a	Flecha de la cadena de aisladores y herrajes.
Y_C	Flecha del vano.
Z	Módulo de sección.

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	
α	Coeficiente térmico de dilatación lineal del cable	1/ºC
α_f	Factor de esfuerzo en los soportes	
ΔT	Variación de temperatura	ºC
β	Factor de esfuerzo sobre el conductor principal.	
ϕ	Diámetro.	
$\phi\tau$	Relación de solidez cara transversal.	
$\phi\lambda$	Relación de solidez cara longitudinal.	
∂	Dirección angular de la fuerza.	

Símbolo	Término
∂k	Ángulo de declinación durante o después del cortocircuito.
∂m	Ángulo de declinación máximo durante o después del cortocircuito.
φ	Factor de tracción parámetro de carga.
σ	Esfuerzo del suelo (daN/m^2).
$\bar{\sigma}$	Esfuerzo medio equivalente (daN/m^2).
ρ	Densidad del aire.
σ_{fin}	Menor valor del esfuerzo estático.
ψ	Factor relativo a la fuerza de tracción en un conductor flexible.
γ	Factor de la frecuencia natural del tubo.
γ_w	Factor de ajuste para carga de viento
ζ	Factor de tensión mecánica del conductor.

Introducción

La infraestructura eléctrica hace parte esencial del comportamiento y funcionamiento confiable de la sociedad moderna. Para satisfacer esa dinámica en su funcionamiento surgen necesidades esenciales que deben garantizar eficiencia, seguridad y confiabilidad. Con esta idea como preámbulo se desarrolla el presente trabajo, que plantea una metodología de análisis y diseño estructural, tomando como referencia diversos lineamientos normativos vigentes que permiten garantizar un diseño adecuado para infraestructuras eléctricas, específicamente subestaciones de alta tensión aisladas con aire, las cuales desempeñan un papel crucial en la transformación y distribución de energía eléctrica mediante redes de alta y extra alta tensión, que son los nodos vitales para conectar las fuentes de generación, distribución y transformación de energía hasta llegar a los puntos de consumo, convirtiéndose así en componentes críticos de la red eléctrica.
Las subestaciones eléctricas son importantes por su capacidad para asegurar la confiabilidad del suministro eléctrico, cualquier falla en su diseño o funcionamiento podría resultar en interrupciones significativas, afectando a la industria, a los servicios públicos y, en última instancia, a la vida cotidiana de millones de personas. Adicionalmente, la transición hacia fuentes de energía más limpias y renovables se encuentra actualmente en el centro de la agenda global, en cuya integración las subestaciones eléctricas de alta tensión también desempeñan un papel relevante.

Este trabajo incursiona en la aplicación de la ingeniería civil estructural, proponiendo una metodología de diseño con diversos lineamientos normativos específicos destinados a garantizar la integridad y fiabilidad de las subestaciones eléctricas de alta tensión. Se construye un marco normativo sólido y adaptable que responda a las demandas cambiantes del panorama eléctrico actual, considerando especialmente las implicaciones estructurales. El trabajo de investigación inicia con la recopilación de las normas nacionales y estadounidenses que influyen en el diseño estructural de las subestaciones eléctricas. Se contextualizan los conceptos eléctricos referentes a los niveles de tensión, las consideraciones de aislamiento y las distancias mínimas para proponer la disposición

física, junto con definiciones de las funciones de los equipos que intervienen. Posteriormente, las subestaciones se clasifican según su infraestructura. Para cada caso en particular se propone una metodología integral que busca consolidar los conocimientos y se hacen recomendaciones de análisis y diseño; además de presentar ejemplos de configuraciones esquemáticas que normalmente se emplean en la infraestructura de una subestación.

La metodología propuesta se sintetiza en guías de diseño seccionadas para las infraestructuras que conforman una subestación eléctrica. Estas guías facilitan el análisis y parametrizan los procesos de diseño para las subestaciones eléctricas de alta tensión. La síntesis de estos procesos se garantiza la sostenibilidad y eficiencia de la infraestructura eléctrica del país.

Justificación

Con el fin de entender el concepto de funcionalidad de una subestación y comprender la necesidad de plantear un lineamiento de diseño civil estructural, que permita establecer una metodología de diseño las subestaciones, se requiere contextualizar algunos conceptos básicos respecto a las etapas del manejo de la energía eléctrica. Se han planteado varias etapas del manejo de la energía, las cuales se dividen en las siguientes categorías: generación, transmisión y subtransmisión, distribución y una etapa que se presenta de forma alterna en las anteriores mencionadas la cual es el proceso de transformación.

- **Generación**

  Esta primera etapa comprende el proceso de desarrollo de energía eléctrica, con la cual de acuerdo con las condiciones particulares de la zona geográfica donde se realizará el proceso, se pueden obtener diversas fuentes de generación, tales como termoeléctricas, generación eólica, biomasas, energía solar, energía hidráulica, entre otras. Normalmente esta etapa del manejo de la energía, se desarrolla con tensiones bajas, las máximas tensiones que se manejan en Colombia, según el Libro de subestaciones eléctricas de José Carlos Romero (Escobar, 2014) menciona que en la mayoría de zonas del país con centrales hidroeléctricas y térmicas se maneja un nivel de tensión alrededor de 13.8 kV.

- **Transmisión y subtransmisión**

  Hace referencia a la necesidad de transportar la energía que parte de las fuentes de generación o de los puntos de transformación, la cual se requiere disponer en los sitios de consumo dispuestos en las ciudades o diversas zonas ocupacionales del país. En este proceso de transmisión, se requiere llevar la energía con altos niveles de tensión, de tal manera que no se tengan tantas pérdidas en el proceso y sea más económico realizarlo. Cuando se menciona el proceso de transmisión

se enfatiza en el transporte de energía con altos niveles de tensión, tales como: 500kV, 230kV y 115kV. Evaluando la subtransmisión se enfatiza en niveles menores de tensión, tales como 66kV, 44kV y 34.5kV

- **Distribución**

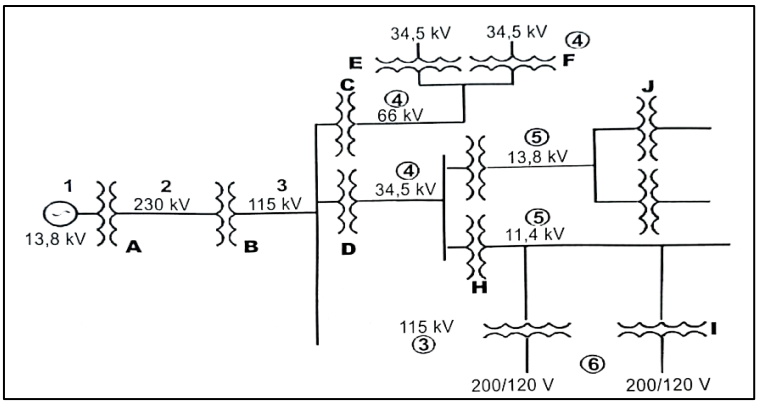
  En zonas habitacionales se requiere disponer de niveles de energía adecuados a las necesidades de consumo, de tal manera que los niveles de tensión son relativamente bajos, los cuales oscilan entre 1000V - 25V. Durante este proceso se llevan estos niveles de voltaje a transformadores de distribución que permiten realizar ajustes en los niveles de tensión y lograr una distribución ajustada a lo que requieren los puntos de llegada.

- **Transformación**

  Esta etapa hace parte de los procesos del manejo de la energía, sin embargo, se presenta de forma intermedia en las etapas mencionadas previamente; esto se debe a la necesidad de realizar modificaciones de tipo eléctrico durante los procesos de generación, transporte y distribución de la energía, los ajustes que se realizan de consideraciones eléctricas, se desarrollan en la infraestructura que conforman las subestaciones, las cuales presentan de forma física un sistema eléctrico en la cual se transforman los niveles de tensión, corriente, frecuencia o reordenamiento de flujos de carga, de tal manera que se realicen acondicionamientos necesarios para continuar el transporte de la energía, son los nodos vitales que conectan las fuentes de generación de energía con los puntos de consumo, lo que las convierte en componentes críticos de la red eléctrica. En la Imagen 1 se presenta esquemáticamente el manejo de la energía y se evidencia el uso de subestaciones para el ajuste de condiciones eléctricas en el proceso completo, las letras A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, representan la ubicación de las subestaciones eléctricas, las cuales están de forma transversal a todo el proceso de la energía. Los numerales representan los siguientes aspectos: 1. Tensión de generación, 2. Tensión de transmisión, 3. Tensión de transmisión o subtransmisión, 4. Tensión de subtransmisión, 5. Tensión de distribución y 6. Tensión de consumo domiciliario o comercial.

Imagen 1

Distribución de la energía eléctrica



Nota. Tomado de Escobar (2014).

Durante la experiencia práctica del diseño de subestaciones y en la búsqueda bibliográfica para comprender los lineamientos del diseño de estas instalaciones, se ha evidenciado que hay una vasta información existente, la cual sirve como referente a nivel profesional y académico, esta se enfoca principalmente en abordar el tema del diseño de la infraestructura desde el concepto electricista, si bien el diseño eléctrico es la base primaria del planteamiento de su uso, equipos, disposición física, entre otros; la información encontrada, se queda corta en términos de un planteamiento que considere las implicaciones del diseño civil estructural de tal manera que aborde de forma global y secuencial las aplicaciones que se deben tener en cuenta desde ese ámbito. Entendiendo que una necesidad esencial en el diseño de subestaciones es que este debe garantizar el poder contar con eficiencia y seguridad para el funcionamiento de la misma, todo el concepto no se satisface planteando el conocimiento desde la visión electricista, sino también se debe abordar este planteamiento desde la visión civil estructural; tomando ese argumento, se desarrolla la el trabajo final de maestría, el cual considera plantear una metodología de diseño civil estructural tomando como referencia diversos lineamientos normativos existentes que permitan garantizar un diseño adecuado a la infraestructura de las subestaciones. El desarrollo del documento presenta una contextualización general del alcance del diseño eléctrico, del cual parte toda la disposición de equipos y espacial de la subestación, sin embargo, el principal enfoque es el análisis y evaluación de las aplicaciones civiles estructurales en el diseño de la infraestructura que conlleva una subestación.

Objetivos

General

Plantear una metodología para el diseño estructural de las subestaciones eléctricas de alta tensión, bajo lineamientos normativos aplicables colombianos y estadounidenses.

Específicos

- Realizar una recopilación de normas, guías y documentos investigativos nacionales y estadounidenses que regulen el diseño estructural de subestaciones eléctricas de alta tensión.

- Analizar de forma detallada la aplicabilidad de la bibliografía encontrada, al diseño estructural de la infraestructura particular que componen las subestaciones convencionales de alta tensión.

- Brindar recomendaciones y pautas técnicas para el dimensionamiento, análisis y proceso de diseño estructural de la infraestructura requerida en las subestaciones eléctricas convencionales de alta tensión.

- Elaborar una guía del proceso a seguir detallando con los lineamientos normativos para el diseño estructural de subestaciones eléctricas de alta tensión.

1. Marco referencial

Este capítulo presenta los aspectos principales sobre el marco normativo y legal que rigen actualmente para el diseño estructural de las subestaciones.

1.1 Antecedentes

En la búsqueda bibliográfica realizada se evidencian investigaciones y diversos documentos que se han desarrollado con el fin de conocer algunos de los lineamientos que se deben seguir para el diseño principalmente eléctrico y dan algunas pautas para el planteamiento y análisis civil estructural para la infraestructura que conforma la subestación; a continuación, se presentan algunos documentos significativos.

- **Subestaciones de alta y extra alta tensión guía práctica de diseño** (HMV Ingenieros Ltda, 2021)

  Este libro es un referido a los lineamientos que se ciñen en el diseño de subestaciones a nivel de Colombia y algunos otros países latinoamericanos.

  La información allí presentada es dada por la experiencia y el desarrollo práctico de diseño de subestaciones en las cuales han logrado ser parte la empresa HMV a nivel nacional e internacional. Se presentan inicialmente las consideraciones generales para el diseño de una subestación, partiendo de toda la información de entrada que requiere el desarrollo de los primeros planteamientos, considerando aspectos como la localización general de la subestación, información básica como las tensiones de diseño y las características del sitio donde se construirá. Luego de definir los aspectos globales, se enfoca en la descripción de actividades a ejecutar, lo cual implica realizar estudios específicos como la selección de la configuración, la implantación eléctrica, la evaluación de características necesarias y los estudios que normalmente se desarrollan en campo para implantar una infraestructura en un sitio en particular. Plantea el desarrollo del diseño eléctrico para la definición de la disposición física de las subestaciones, considerando todos sus componentes, tales como equipos de alta tensión (interruptores, seccionadores, transformadores de corriente, pararrayos, aisladores, entre otros), también presenta el diseño para

los equipos de transformación, los cuales incluyen transformadores, reactores de línea, terciarios, neutros, baterías de condensadores, equipos y sistemas de compensación. En los componentes de media tensión presenta equipos como celdas, interruptores, seccionadores de puesta a tierra, transformadores de corriente, transformadores de tensión, pararrayos y aisladores de soporte; este libro aborda diseños como la malla a tierra, sistemas de protección, telecomunicaciones, servicios auxiliares, sistemas de automatización y finalmente en algunos apartados del libro menciona las adecuaciones al predio y el diseño de obras civiles junto con estructuras metálicas básicas necesarias sin entrar en mayor detalle estructural.

- **Diseño de subestaciones eléctricas (Escobar, 2014)**

  Este libro parte de la necesidad de tener un documento como referencia académica y profesional, que brinde una guía principalmente a los ingenieros eléctricos, de tal manera que amplía el conocimiento respecto a las implicaciones del diseño de subestaciones eléctricas, ahondando los conocimientos en términos de las disposiciones generales, los equipos principales con los que cuenta una subestación, y plasmando los factores más relevantes que se deben tener en consideración para escoger los esquemas de la configuración de una subestación tales como las distancias de aislamiento, distancias de seguridad y los niveles de tensión con los que se trabajará. Ya luego de presentar de manera global esas consideraciones iniciales, el libro enfoca su desarrollo en el diseño y selección de los equipos que componen la subestación, a nivel eléctrico (Descargadores de sobretensiones, barrajes, transformadores de instrumentos, interruptores, seccionadores, entre otros), presenta de manera general el diseño de las mallas de conexión a tierra, los diseños de servicios de baja tensión, trampas de onda, comunicaciones y transformadores de potencia. También en el contexto global, presentan los tipos de subestaciones que se manejan, según su configuración y uso. Finalmente menciona temas de la automatización y trae algunos apartes con cálculos específicos para algunas necesidades eléctricas del proceso de diseño.

- **Especificación técnica "GE-ESPE-CIVIL-S-01-D0301 Diseño de obras civiles ISA" (Interconexión Eléctrica S.A E.S.P. - ISA, 2022)**

  En este documento se encuentran las especificaciones generales que se declaran en la normativa de ISA, para el diseño de subestaciones de energía eléctrica. Se estipulan parámetros respecto a cómo se deben llevar a cabo los procesos de diseño definiendo el alcance, junto con los mínimos requerimientos en cuanto a información con la cual se requiere contar, tal como los estudios de suelos, la topografía, la disposición física que debe tener la subestación, con los equipos que se suministrarán en el proyecto. Se proponen los espectros de diseño para las estructuras y obras civiles, considerando los aspectos sísmicos del lugar donde se encuentre ubicada la subestación. Según los tipos de estructuras define los coeficientes de disipación de energía R, junto con el factor de amplificación Ω_0

  Se detallan todas las obras civiles adicionales tales como los requerimientos para las vías de acceso, las consideraciones de los movimientos de tierra que son necesarios para la adecuación del lote, todas las obras de drenaje que considerarán el manejo de aguas lluvia en los patios de equipos, cerramientos, cajas de tiro y ductos. Dentro de los aspectos principales se encuentra el diseño de cimentaciones de pórticos y equipos donde se detallan los tipos de consideraciones de cargas a tener en cuenta en el diseño estructural; estas cargas son: carga de conexión sobre estructuras de pórticos y soportes de equipos, cargas de peso propio, cargas de viento, cargas de sismo, cargas de montaje y mantenimiento, junto con las combinaciones y factores aplicables para cada caso de carga. También presenta los criterios generales para el diseño estructural de las cimentaciones, tanto para las estructuras metálicas, como para los fosos y equipos inductivos. Al finalizar el documento se encuentran las consideraciones generales para los diseños estructurales de edificaciones ocupacionales, las cuales se describen en la NSR-10

- **Análisis y diseño de estructuras metálicas mayores para subestaciones eléctricas. (Martínez, 2011)**

  En ese documento se presentan los principales factores a considerar en todas las etapas para análisis estructural y diseño de una estructura mayor o pórticos en

subestaciones eléctricas. Se enfoca específicamente al análisis de marcos de celosía o pórticos metálicos según lo que especifica la Comisión Federal de Electricidad Especificación CFE JA100-57 Estructuras metálicas mayores y menores para subestaciones. Esta tesis, presenta de manera general los criterios del diseño estructural que aplican para el diseño de pórticos, teniendo en cuenta conceptos como los estados límites de falla, los estados límites de servicio. La especificación CFE JA100-57 define las estructuras metálicas mayores como "estructuras a base de marcos metálicos de alma llena, tubular o celosía, para sostener cables de energía eléctrica, equipos y accesorios." Por lo tanto, estos son los tipos de estructuras que pretende analizar dicha tesis. Realiza una clasificación en términos de disposición de elementos, sección transversal, nivel de tensión y también considera los niveles de importancia para cada estructura.

Evalúa los tipos de cargas a considerar en el diseño estructural, tales como peso propio de la estructura, equipos y accesorios, carga que transmiten los conductores a la estructura, tensión mecánica, entre otros, considera la acción del viento, sismo y en casos especiales la acumulación de hielo. Describe los procesos para el cálculo de estas cargas, junto con su posterior análisis aplicando las combinaciones que plantea la Norma del CFE. Al final del documento presenta un análisis detallado de un caso específico para un pórtico en la subestación de NOPALA, donde muestra los datos generales de la estructura y la aplicación de los pasos previamente mencionados en el documento.

- **Dimensionamiento de subestaciones de alta tensión por Eliana Patiño Yepes (Yepes, 2012)**

  El objetivo de ese trabajo es diseñar un aplicativo informático en Microsoft Office Access que permita a la empresa GERS realizar un dimensionamiento de subestaciones eléctricas tipo intemperie de alta tensión ($57.5 \leq V \leq 230$ kV). Algo importante a resaltar del documento es la contextualización teórica y conceptual que se desarrolla a lo largo del mismo, dado que presenta un estado del arte bastante descriptivo y aborda conceptos globales de temas necesarios para el dimensionamiento de subestaciones, tiene en cuenta aspectos como las distancias de seguridad, el dimensionamiento de los cárcamos, la coordinación de

aislamiento, el cálculo de conductores y el dimensionamiento de los transformadores de corriente y tensión. La globalidad del proyecto está enmarcada en la aplicación de la Norma Técnica Colombiana NTC 2050, junto con el reglamento técnico de instalaciones eléctricas, RETIE.

En el desarrollo del estado del arte, presenta de forma consistente, la clasificación de las subestaciones, según su función operación y construcción, de acuerdo con su tecnología las clasifica en AIS, GIS, subestación prefabricada, subestación híbrida y móvil.

Presenta esquemas con los componentes de una subestación, dentro de los cuales incluye los equipos de patio, los equipos de tablero, equipos auxiliares entre otros. Caracteriza cada uno de los equipos según su funcionalidad, tales como equipos para drenar- sobretensiones, equipos de maniobra, equipos de puesta a tierra, equipos que convierten valores de tensión, equipos de corriente y tensión. Presenta de forma generalizada los equipos que hacen parte de una subestación, con sus respectivos tipos, características, clasificación y aplicaciones. En el marco conceptual del documento, se describen los tipos de configuraciones que normalmente se consideran en las subestaciones, empleando los diferentes equipos previamente mencionados; partiendo de esa instancia se menciona los tipos de configuraciones que normalmente se manejan, los cuales se enfocan en dos tendencias particulares, la europea y la americana. En la europea se encuentran configuraciones con barrajes sencillo, simple, barraje doble o juegos de barras triples; a diferencia de la configuración americana, que considera configuraciones con interruptores. Después de presentar el marco teórico se plantea la metodología a implementar para el planteamiento del dimensionamiento de una subestación, considerando aspectos importantes, tales como el diseño de la coordinación de aislamiento, el cálculo de las distancias de seguridad, la selección del conductor con la evaluación de temperatura, el dimensionamiento de los cárcamos, junto con los transformadores de instrumento y de corriente. Finalmente, en el documento se presenta el aplicativo Access como el sistema de gestión de bases de datos, que permite el desarrollo del aplicativo a plantear, de tal manera que pueda mejorar los procesos y tiempos de ingeniería para el dimensionamiento de las subestaciones

1.2 Marco normativo

Se hace un contexto normativo para mostrar, manera global, las temáticas que abordan las principales disposiciones sobre el diseño estructural de las subestaciones. Se presentan las normas más representativas que abarcan estos diseños, principalmente con enfoque estructural, para visualizar el alcance de los reglamentos vigentes y su aplicabilidad en los diversos aspectos de la infraestructura que compone las subestaciones eléctricas de alta tensión.

- **Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10**

  El reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10 Asociación Colombiana de ingeniería sísmica, 2017) aplica para estructuras de uso ocupacional. En el caso de subestaciones se considera importante tenerlo en cuenta para diseñar edificios de control, casetas de relés, porterías, entre otros, que tengan dicha característica. El objetivo principal de este reglamento es "[defender] primordialmente la vida humana ante la ocurrencia de sismos y la defensa de la propiedad no deja de ser un subproducto de la defensa de la vida". El marco jurídico que lo contempla es la Ley 400 de 1997 y el Decreto 926 del 19 de marzo del 2010, que reglamenta las modificaciones realizadas.

  Esta norma considera los requisitos generales de diseño y construcción sismorresistente, teniendo en cuentas las cargas aplicables según cada caso, los diversos materiales que pueden aplicarse en la construcción de la infraestructura, como concreto, mampostería, estructuras metálicas, madera, entre otros. Así mismo, considera los estudios geotécnicos necesarios asociados al diseño estructural de cimentaciones y obras asociadas a los aspectos geotécnicos. Establece los parámetros que se deben tener en cuenta en la supervisión técnica, los requisitos de protección contra fuego en edificaciones y otros aspectos necesarios para cumplir con su objeto principal.

- **Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas, RETIE**

  Este reglamento técnico se expidió con la Resolución 907087 de 2013, con diversas actualizaciones en la Resolución 40492 de 2015 (RETIE, 2024). Es de obligatorio

cumplimiento en Colombia, porque especifica las condiciones que garantizan la seguridad de las instalaciones eléctricas. Se aplica a los productos y las personas que intervienen en este proceso. Este reglamento se enfoca en garantizar el buen funcionamiento de estas instalaciones y establece los parámetros mínimos de seguridad. Su objeto principal es salvaguardar la seguridad de las personas y la vida animal, y preservar el medioambiente, minimizando o eliminando los riesgos eléctricos.

Su conformación general plantea los requisitos mínimos legales para los procesos de generación, transmisión, transformación (subestaciones), distribución y uso final de la energía. Además, trata aspectos como la vigilancia y control, junto con la revisión constante y actualización a la misma normativa.

- **Norma NTC 2050 - Código Eléctrico Colombiano**

  Este código tiene como base la edición del National Electrical Code (NEC) y lo desarrolla el Icontec. Su principal objetivo es salvaguardar vidas y proteger los bienes que puedan estar en riesgo por el uso de la electricidad.

  Adicionalmente, incluye información respecto a las consideraciones generales de las instalaciones de conductores, equipos eléctricos situados en diversas estructuras ocupacionales o infraestructura que requiera el uso de instalaciones eléctricas y da las pautas respecto a las condiciones especiales en las áreas de instalación de equipos. Ofrece información para evaluar la transparencia en los procesos de contratación en esa área. Establece parámetros para determinar la calidad de los trabajos realizados, garantiza un buen uso de la energía eléctrica y plantea los riesgos que implica.

- **Manuals and Reports on Engineering Practice No. 113. Substation Structure Design Guide, ASCE**

  Este manual provee aspectos integrales sobre el diseño estructural de subestaciones eléctricas convencionales ubicadas al aire libre. Estas recomendaciones aplican para estructuras que soportan equipos eléctricos, barras rígidas, conductores y otros elementos eléctricos. Este manual considera aspectos importantes como los requisitos operativos de los equipos que se están soportando,

con el fin de validar la configuración estructural de los elementos. También establece los límites de deflexión para la operatividad y control del diseño de diversas infraestructuras que conforman una subestación.

Recomienda pautas para las consideraciones de cargas estructurales, límites de deflexión, análisis, diseño, fabricación, mantenimiento y construcción de estructuras. Establece los lineamientos para el diseño de las conexiones entre su estructura y su cimentación, considera diversos materiales empleados, incluyendo los más convencionales (concreto y acero). Este manual toma como referencia las normas de diseño estructural existentes, tales como el Instituto Americano del Concreto (ACI) y el Instituto Americano de Construcción en Acero (AISC).

- **Recommended practice for seismic design of substations, the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Piscataway, N.J., IEEE Std 693**

  El Instituto de Ingenieros Electrónicos y Eléctricos desarrollaron ese documento como guía para brindar recomendaciones respecto al diseño sísmico de equipos empleados en subestaciones, estableciendo métodos estándar para proporcionar y validar los datos sísmicos. Permite evaluar la resistencia de los equipos de subestaciones, brinda métodos detallados de prueba y análisis para los equipos de las subestaciones eléctricas. Su objetivo es proporcionar pautas que permitan a los fabricantes y a los usuarios de las subestaciones contar con equipos que tengan alta resistencia ante eventos sísmicos.

  Este documento presenta las condiciones para los ensayos en la mesa vibratoria para calificación de bujes, evalúa los efectos de las cargas sísmicas en los conductores, presenta los métodos de prueba con acelerogramas en tiempo historia para validar equipos que se emplean en subestaciones y brinda una metodología para validar el diseño de anclajes de los equipos.

- **International Electrotechnical Commission, IEC**

  La Comisión Electrotécnica Internacional regula y normaliza las instalaciones que emplean la electricidad para su funcionamiento. Abarca la estandarización en todas las etapas de la energía (generación, transmission, distribución y transformación). Normaliza la transformación de los niveles de tensión, corriente, frecuencia y

reordenamiento de flujos de carga, entre otros componentes que hacen parte de la red eléctrica, de tal manera que se garantice la confiabilidad, eficiencia y seguridad.

2. Conceptos generales de los equipos que conforman la infraestructura de subestaciones convencionales

Con el fin de contextualizar las implicaciones del análisis y diseño de la infraestructura de las subestaciones, estas constan de un grupo de dispositivos por medio de los cuales se transfiere energía eléctrica en conjunto para alterar o ajustar sus propiedades. Es importante conocer las características físicas y eléctricas de los equipos que se encuentran dentro de una subestación convencional, con una disposición física particular de tal manera que se pueda comprender su funcionamiento y su papel dentro del sistema. Entre los componentes de una subestación se encuentran los siguientes: equipos de patio, equipos de transformación y compensación, conexiones de alta tensión, equipos auxiliares y otros.

2.1 Equipos de patio

En los equipos que conforman la infraestructura de una subestación, un aspecto que determina sus parámetros y características eléctricas radica en las necesidades y requisitos de su funcionamiento dentro del sistema. Normalmente, cada uno debe tener unas condiciones estándar de servicio, en el caso particular de los equipos de patio, deben cumplir con condiciones evaluadas en intemperie o exteriores, en ciertas circunstancias se requieren condiciones especiales de servicio, diversas pruebas tipo, de rutina o especiales, las cuales se realizan para validar las características asignadas y sus mecanismos de operación.
A continuación, se describen los equipos de patio más comunes.

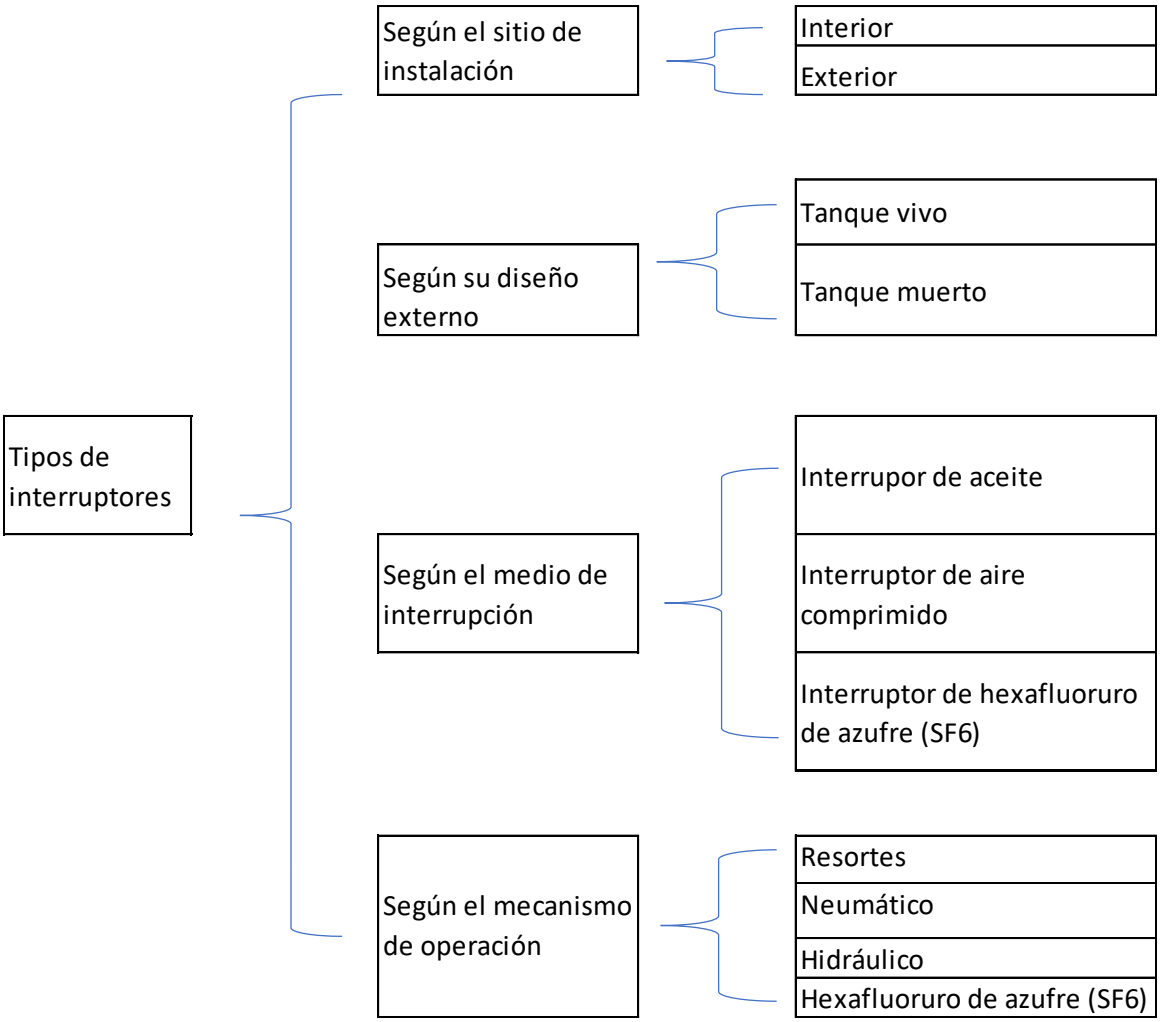
2.1.1 Interruptores de potencia

Se utilizan para aislar eléctricamente, conectar o desconectar una línea de transmisión, los transformadores, los barrajes, entre otros. Tiene capacidad para conducir, interrumpir y establecer corrientes normales. Estos equipos se abren después de que el circuito se ha des-

energizado. A continuación, se presentan, de forma esquemática, los tipos de interruptores que se pueden encontrar (Figura 1).

Figura 1

Tipos de interruptores según la instalación, el diseño, el medio de interrupción y el mecanismo de operación



Nota. Adaptado de Yepes (2012).

Imagen 2

Fotografía de un interruptor de potencia



Según el medio de interrupción que se presentó en la Figura 1, cabe aclarar que el objetivo de los interruptores de aceite es vaporizar rápidamente este líquido y formar burbujas de gas, las cuales son un gran medio de extinción y refrigerante en el caso de presentarse un arco eléctrico. Los equipos difieren en la cantidad de volumen de aceite que contienen. Sin embargo, ya no son comerciales debido a que ahora el más convencional es el que contiene el gas SF_6. Antes de este, el interruptor que operó de manera satisfactoria fue el de aire comprimido, que eliminó el riesgo de explosión de los interruptores de aceite. Finalmente, el interruptor de gas SF_6 es el que mejor se ha comportado y presenta un excelente aislamiento y enfriamiento ante el arco eléctrico. El uso de este tipo de gas hizo obsoleta la tecnología de aceite y aire comprimido. Actualmente,

se buscan tecnologías más amigables con el medioambiente, cuyos componentes garanticen un buen aislamiento.

Respecto al mecanismo de operación, los conceptos que se deben tener en cuenta son el medio de energía almacenada y el mecanismo que acciona el interruptor, entre los cuales se encuentran los resortes, los neumáticos, los hidráulicos y en menor medida el gas SF_6.

2.1.2 Seccionadores

Equipo de maniobra mecánico que suministra una distancia de aislamiento, de acuerdo con los requisitos del operador.

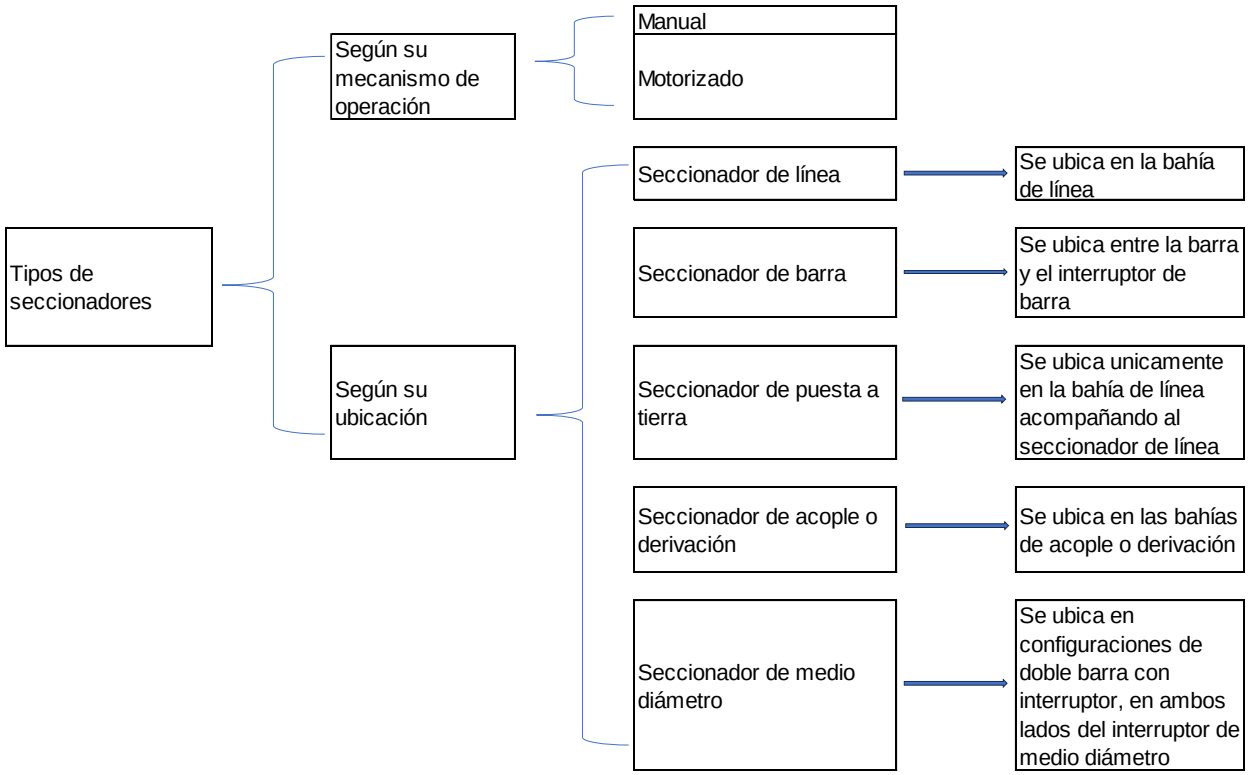
Según La guía de diseño de subestaciones de alta y extra alta tensión de HMV Ingenieros Ltda. (2029), los seccionadores “solo pueden operar cuando hay una variación de tensión insignificante entre sus terminales o realizar cierres o aperturas de corrientes insignificantes” (p. 264). Estos equipos pueden presentar variaciones de tensión, según la corriente que manejen, son capaces de transportar la corriente asignada o, durante cierto tiempo, la corriente de cortocircuito.

Entre las funciones más comunes de este equipo están las de seccionar circuitos por temas de operación o aislar componentes del sistema, con el fin de realizar mantenimientos. En las figuras 2 y 3 se presenta, de forma sintetizada, la clasificación de los seccionadores.

La aplicación y disposición de los seccionadores, con todas sus normas técnicas y estandarización, se encuentra en las normas establecidas por la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC62271-102, 2021).

Figura 2

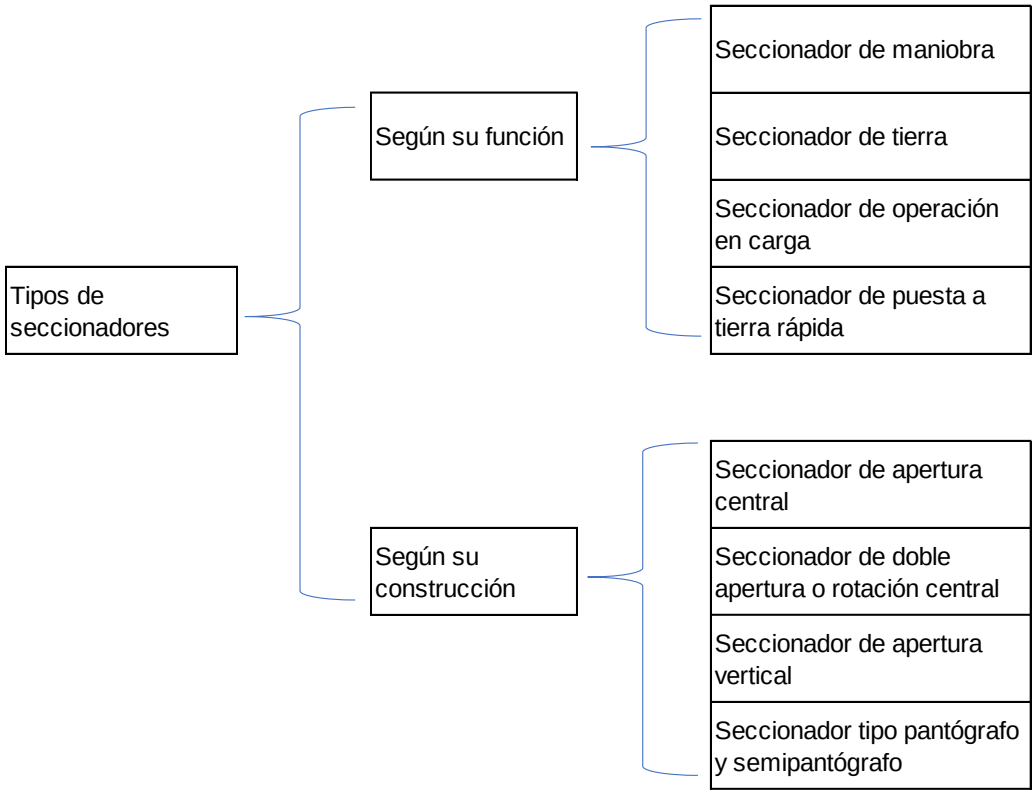
Tipos de seccionadores, según el mecanismo de operación y su ubicación.



Nota. Adaptado de *Dimensionamiento de subestaciones de alta tensión* por Yepes, E.P., 2012, Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali.

Figura 3

Tipos de seccionadores según función y construcción



Nota. Adaptado de *Dimensionamiento de subestaciones de alta tensión* por Yepes, E.P., 2012, Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali.

Para escoger los seccionadores se debe tener en cuenta la norma IEC 62271-101, que presenta los siguientes aspectos que se deben considerar:

- Tensión máxima del sistema
- Niveles de aislamiento
- Frecuencia asignada
- Corriente en servicio continuo
- Corriente de corta duración admisible
- Valor pico de la corriente admisible asignada
- Duración asignada del cortocircuito
- Poder de cierre en cortocircuito

En la Imagen 3 se presentan dos tipos de seccionadores.

Imagen 3

Tipos de seccionadores



Nota. La imagen de la izquierda muestra un seccionador CPT y la de la derecha un seccionador tipo pantógrafo.

2.1.3 Transformadores de tensión o potencial

Según la guía de diseño de subestaciones de alta y extra alta tensión de HMV Ingenieros Ltda. (2021), estos transformadores se utilizan para medir la tensión cuando los sistemas son superiores a 600V. Su función principal es aislar los equipos de baja tensión con los circuitos de alta tensión y buscar que los efectos de régimen permanente aplicados en el circuito de alta tensión se reproduzcan fielmente en el de baja tensión. La monografía de Atencio (2008) menciona de forma generalizada los requisitos que se deben tener en cuenta para seleccionar

los transformadores de tensión, según la norma IEC 61869-3. En la Imagen 4 se muestra un transformador de potencial

Imagen 4

Transformadores de potencial



Aspectos que se deben tener en cuenta para su elección:

- Tensión primaria asignada
- Tensión secundaria asignada
- Potencia de precisión
- Factor de tensión asignado
- Requerimientos de aislamiento
- Frecuencia asignada
- Clase de precisión
- Cantidad de devanados secundarios
- Relación de transformación asignada
- Conexión de los devanados secundarios
- Límites del error de tensión y de desplazamiento

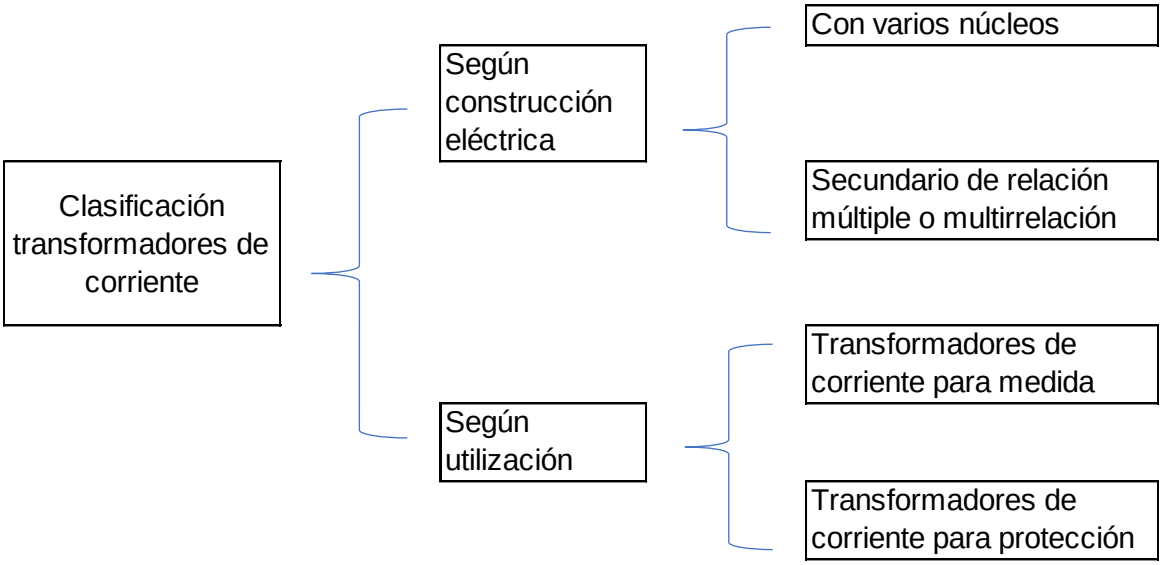
- Capacitancia mínima (solo para divisores capacitivos)
- Rango de frecuencia para PLC (solo para divisores capacitivos)
- Variación de la frecuencia asignada (solo para divisores capacitivos)
- Tipo de instalación (interior o exterior)

2.1.4 Transformadores de corriente

El libro de guía de diseño de subestaciones de alta y extra alta tensión de HMV Ingenieros Ltda. (2021) describe de manera general la funcionalidad de los transformadores de corriente, los cuales permiten medir la corriente en sistemas eléctricos. Estos transformadores reducen las corrientes de alta tensión a baja corriente. En la Figura 4 se presenta la clasificación general para los transformadores de corriente.

Figura 4

Clasificación de transformadores de corriente, según su construcción y uso.



Nota. adaptado de *La guía de diseño de subestaciones de alta y extra alta tensión*, por HMV Ingenieros Ltda., 2021.

Entre las principales características de estos equipos se encuentran las siguientes: corriente primaria asignada, corriente secundaria asignada, corrientes de cortocircuito asignadas, corriente térmica continua asignada, potencia de salida asignada, límites de calentamiento,

frecuencia asignada, clase de precisión, número de núcleos secundarios y tipo de instalación. En la Imagen 5 se muestra un ejemplo de los equipos de transformación de corriente.

Imagen 5

Ejemplo de transformadores de corriente



La norma IEC 61869-2 regula la selección y clasificación de estos equipos.

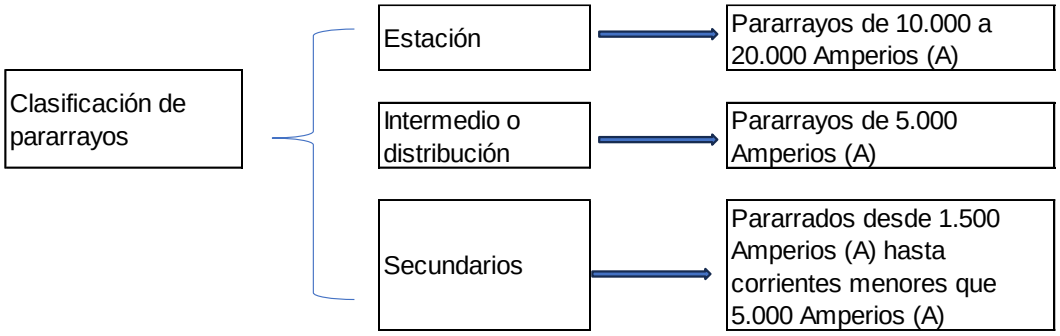
2.1.5 Descargadores de sobretensión o pararrayos

Las normas recomendadas aplicables a los pararrayos son la IEC 60099-4 y la IEC 60099-5, las cuales contienen las características técnicas que deben cumplir estos equipos. Adicionalmente, la guía de HMV Ingenieros Ltda. (2021) presenta los procedimientos de selección para estos equipos, planteando las pautas eléctricas y mecánicas de estos elementos. Es importante tener

en cuenta que el objetivo de estos instrumentos es proteger contra sobretensiones. A continuación, Figura 5, se presenta la clasificación de los pararrayos.

Figura 5

Clasificación de pararrayos según su amperaje

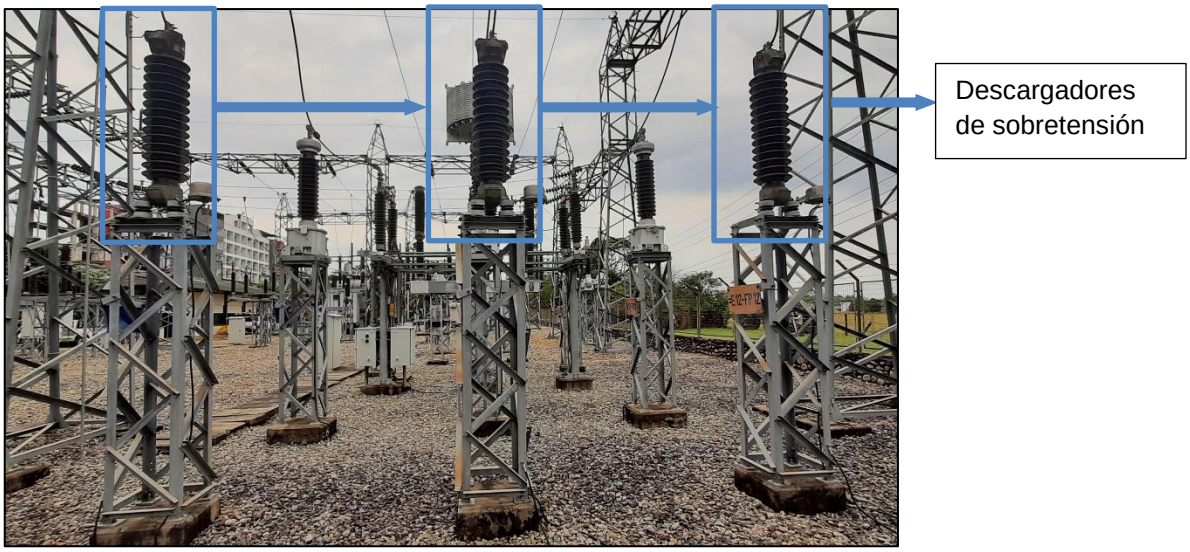


Nota. Adaptado de *Dimensionamiento de subestaciones de alta tensión* por Yepes, E.P., 2012, Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali

En la Imagen 6 se muestra un ejemplo de los descargadores de sobretensión.

Imagen 6

Descargadores de sobretensión



Inicialmente se empleaban descargadores no lineales de carburo de silicio (SiC); no obstante, han sido remplazados por el uso de pararrayos con dos resistencias no lineales de óxido de zinc (ZnO). A continuación, se describen las características técnicas para la selección de dichos equipos. Estas especificaciones se encuentran detalladas en la guía de HMV Ingenieros Ltda (2021).

- Tensión continua de operación
- Tensión asignada
- Frecuencia asignada
- Impulso
- Corriente de descarga nominal
- Niveles de protección
- Capacidad de transferencia de carga repetitiva
- Energía térmica y transferencia de carga térmica
- Resistencia a la contaminación
- Definición de cargas mecánicas asignadas

2.2 Equipos de transformación y compensación

- **EQUIPOS DE TRANSFORMACIÓN**

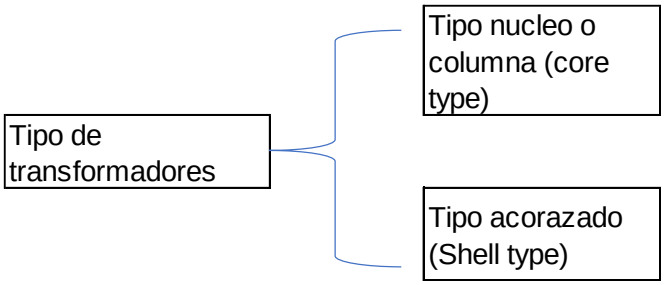
Según la definición de la función eléctrica para los equipos de transformación, “Un transformador de potencia es un equipo estático con dos o más devanados que por inducción electromagnética transforma un sistema de tensión alterna a otro sistema de valor diferente y de la misma frecuencia para transmitir potencia eléctrica” (HMV Ingenieros Ltda., 2021).

La función principal de este equipo consiste en subir o bajar los niveles de tensión para el suministro de energía, de acuerdo con el uso que se tenga.

En la Figura 6 se presentan algunos tipos de trasformadores según su construcción. Es importante considerar que se pueden construir como unidades trifásicas o monofásicas. Para seleccionar el tipo de transformador que se requiere se deben tener en cuenta los aspectos que se enumeran más adelante.

Figura 6

Tipos constructivos de transformadores



Nota. Adaptado de *La guía de diseño de subestaciones de alta y extra alta tensión*, por HMV Ingenieros Ltda., 2021.

- Limitación de transporte y peso
- Confiabilidad y unidades de reserva
- Valoración de pérdidas

La disposición de estos transformadores depende de la cantidad, la configuración de barrajes; además, se busca que tengan espacio para unidades de reserva, con el fin de aumentar su confiabilidad.

- **EQUIPOS DE COMPENSACIÓN EN PARALELO**

La función principal de estos equipos es mantener los niveles de tensión en un punto determinado, ante las variaciones de carga. Algunos elementos comunes para este sistema en paralelo son los siguientes:

- Reactores
- Reactores en derivación
- Reactores de neutro
- Reactor terciario de transformadores

Entre los equipos de compensación y transformación también se encuentran configuraciones de equipos de compensación en serie, equipos de compensación estática y reactores limitadores de corriente. En las imágenes 6 y 7 se presentan ejemplos de estos equipos.

Imagen 7

Equipo de transformación de potencia



Imagen 8

Transformador con su respectivo muro cortafuego



Estos equipos se deben verificar sísmicamente debido a su rigidez, incluyendo todos sus componentes, con el fin de evaluar su estabilidad local y global. El método de análisis más adecuado es el estático. Según la norma IEE 698-2018, los análisis de verificación sísmica los debe realizar el fabricante del equipo.

3. Consideraciones particulares en cuanto a la disposición física de la infraestructura de una subestación

Se presentarán las consideraciones generales y los tipos de infraestructura para la configuración física de subestaciones de alta tensión aisladas con aire, junto con la descripción de ciertos aspectos que determinan consideraciones de orden y selección para emplear ciertos equipos.

3.1 Disposición física general para subestaciones

La disposición física de una subestación aislada con aire se debe plantear cumpliendo los siguientes aspectos, según el libro *Subestaciones de alta y extra alta tensión. Guía práctica de diseño* (HMV Ingenieros Ltda., 2021).

3.1.1 Configuración seleccionada de la subestación

Se parte de esta configuración para plantear conexiones de barra o de interruptores. Para la primera, se propone que en cada circuito haya un interruptor que permita conectarse a una o más barras a través de los seccionadores. A continuación, se presentan las consideraciones típicas para este tipo de conexión:

- Barra sencilla
- Barra principal o de transferencia
- Doble barra
- Doble barra más seccionador de *bypass* o paso directo
- Doble barra más seccionador de transferencia

- Doble barra más barra de transferencia

Para configurar la conexión de interruptores se tienen en cuenta los siguientes tipos:

- Anillo
- Interruptor y medio
- Doble barra con doble interruptor
- Anillo cruzado

Para otras conexiones: interruptor y tres cuartos, malla y doble transferencia.

La selección de la configuración depende principalmente de los criterios de evaluación definidos en el *CIGRÉ* (CIGRÉ Study committee (Subestations)115, 2002), en el que se evalúan la confiabilidad, la seguridad en el servicio, la disponibilidad durante el mantenimiento y la flexibilidad en la operación.

Otro factor que se evalúa en el análisis detallado para seleccionar la configuración es el tipo de subestación. Fundamentalmente, existen tres tipos: generación, interconexión y transformación. Según el tipo, se evalúan factores característicos para cada una, como la seguridad en el servicio, la disponibilidad durante los mantenimientos y la flexibilidad en la operación.

3.1.2 Equipos que se deben para emplear

La tecnología de los equipos y la selección de los seccionadores determinan la disposición física de la subestación. En el capítulo 2 se hizo una breve descripción de los equipos que se deben emplear en la subestación, partiendo de los de patio, que principalmente son interruptores de potencia, seccionadores, transformadores de tensión, transformadores de corriente y transformadores de media no convencionales y pararrayos. Así mismo, se evalúa la necesidad de los equipos de transformación: de compensación en paralelo, de compensación en serie y reactor de corriente.

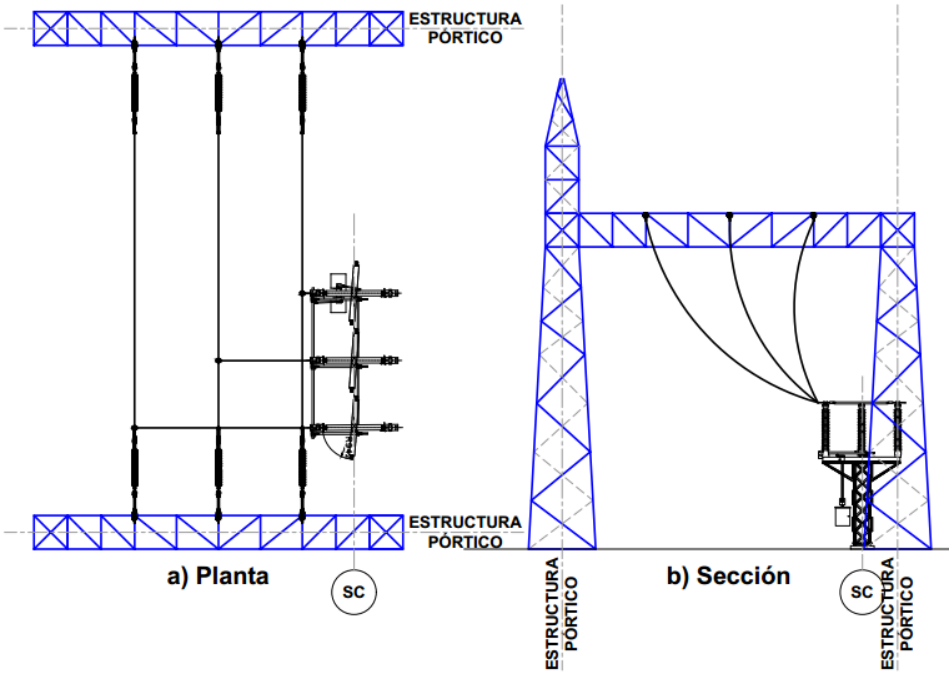
3.1.3 Tipos de barraje para conexiones de alta tensión.

Estos tipos de conexión se muestran en "*Subestaciones de alta y extra alta tensión. Guía práctica de diseño"* (HMV Ingenieros Ltda., 2021).

- Conexión clásica, barraje flexible, conexión flexible (Figura 7).
- Conexión clásica, barraje rígido, conexión rígida (Figura 8)
- Conexión con seccionadores pantógrafos, barraje flexible, conexión flexible (Figura 9).
- Conexión con seccionadores pantógrafos, barraje rígido, conexión flexible.
- Conexión escalonada barraje flexible.

Figura 7

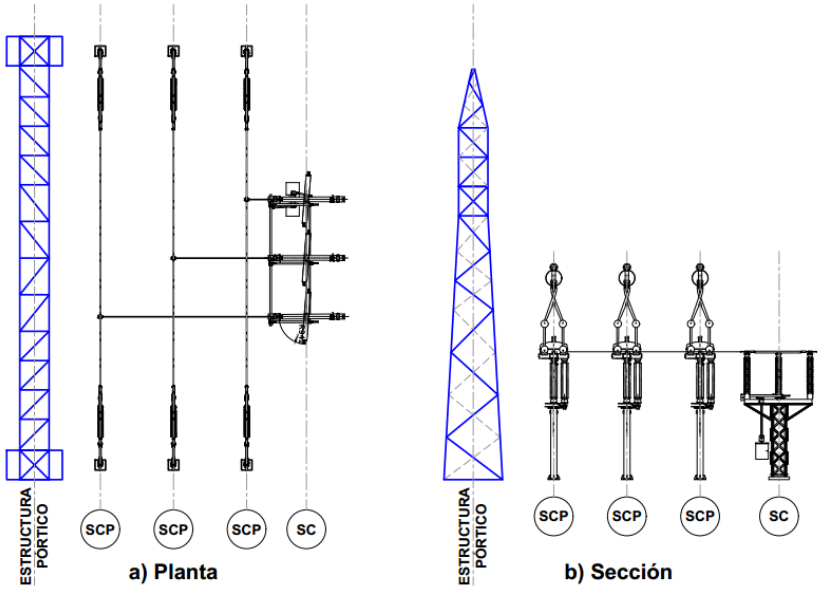
Conexión clásica de barraje flexible



Nota. Adaptado de *Subestaciones de alta y extra alta tensión. Guía práctica de diseño* (HMV Ingenieros Ltda., 2021).

Figura 8

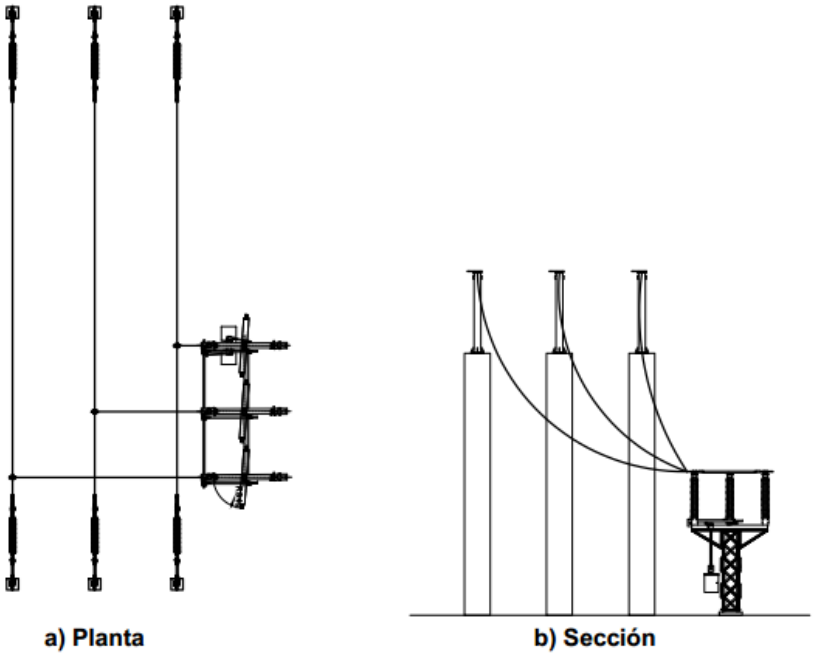
Conexión clásica, barraje rígido, conexión rígida



Nota. Adaptado de *Subestaciones de alta y extra alta tensión. Guía práctica de diseño* (HMV Ingenieros Ltda., 2021).

Figura 9

Conexión clásica, barraje rígido, conexión flexible



Nota. Adaptado de *Subestaciones de alta y extra alta tensión. Guía práctica de diseño* (HMV Ingenieros Ltda., 2021).

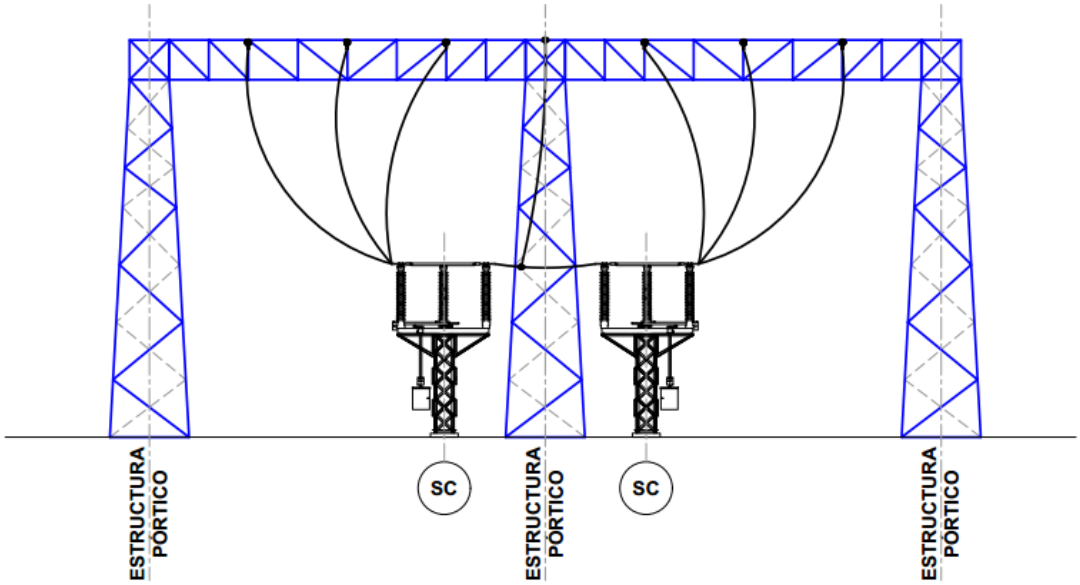
Cuando se tienen configuraciones de doble barra, la conexión se puede realizar de las siguientes maneras:

- Conexión clásica, barraje flexible (Figura 10)
- Conexión con seccionadores pantógrafos, barraje flexible (Figura 11)
- Conexión con seccionadores pantógrafos, barraje rígido (Figura 12)
- Conexión clásica modificada, barraje flexible (Figura 13)
- Conexión con barras colectoras abajo, barraje flexible
- Conexión escalonada transversal, barraje flexible

- Conexión alineada de seccionadores, barraje rígido

Figura 10

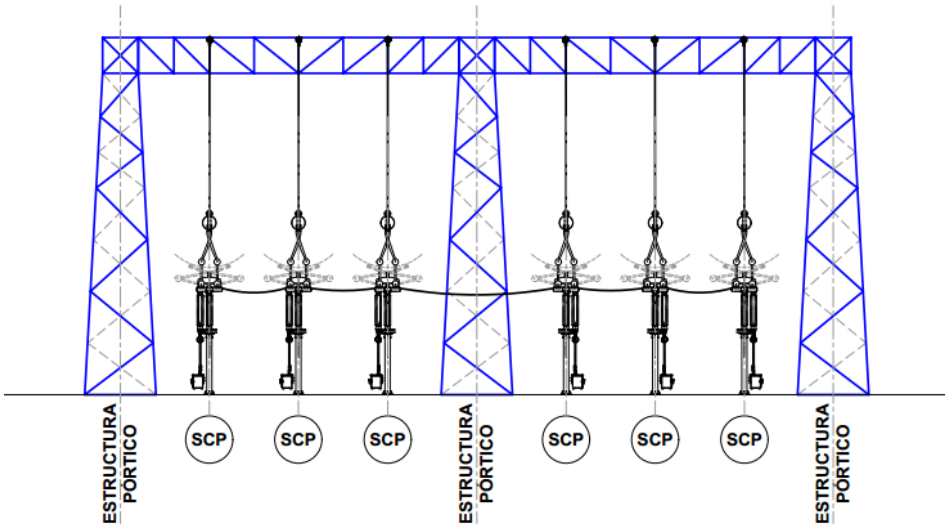
Conexión clásica, barraje flexible



Nota. Adaptado de *Subestaciones de alta y extra alta tensión. Guía práctica de diseño* (HMV Ingenieros Ltda., 2021).

Figura 11

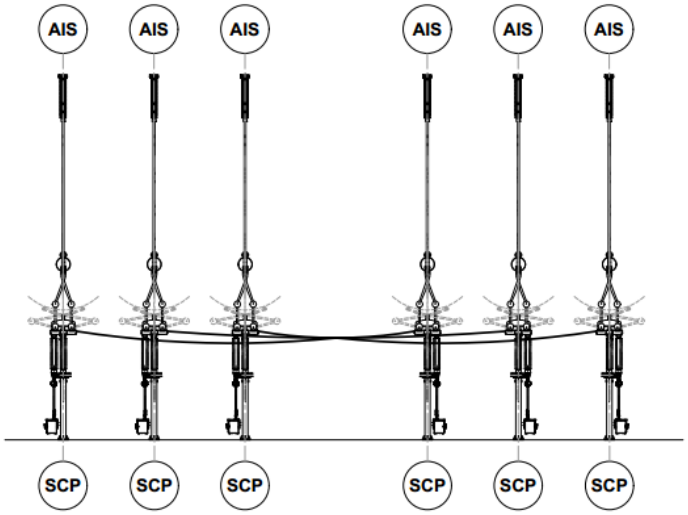
Conexión con seccionadores pantógrafos, barraje flexible



Nota. Adaptado de *Subestaciones de alta y extra alta tensión. Guía práctica de diseño* (HMV Ingenieros Ltda., 2021).

Figura 12

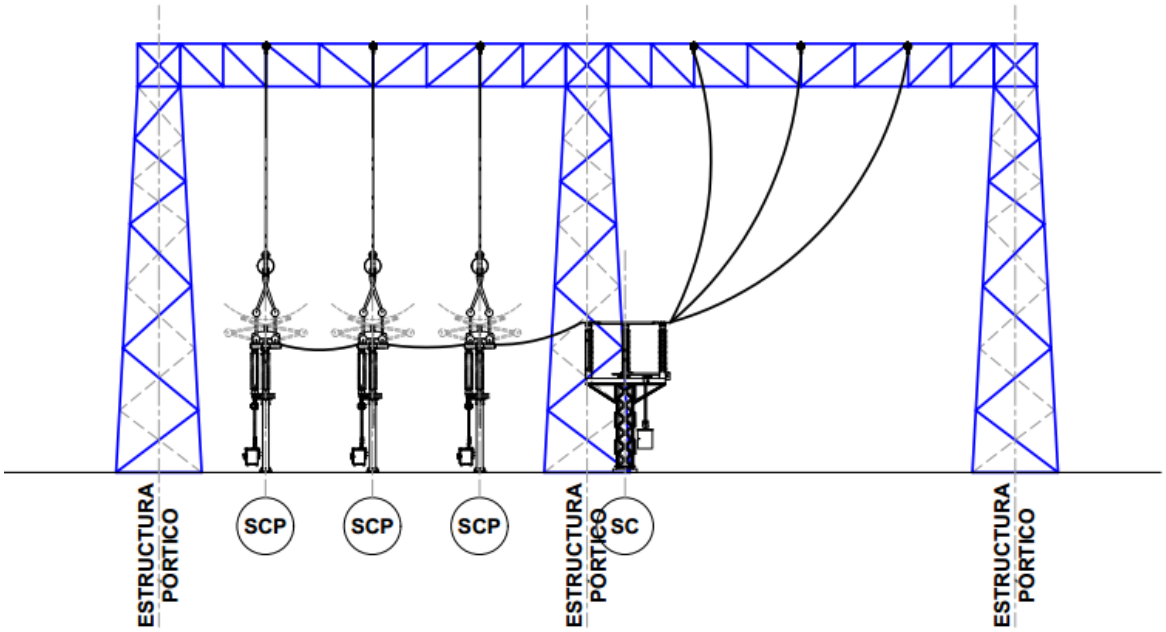
Conexión con seccionadores pantógrafos, barraje rígido



Nota. Adaptado de *Subestaciones de alta y extra alta tensión. Guía práctica de diseño* (HMV Ingenieros Ltda., 2021).

Figura 13

Conexión clásica modificada, barraje flexible



Nota. Adaptado de *Subestaciones de alta y extra alta tensión. Guía práctica de diseño* (HMV Ingenieros Ltda., 2021).

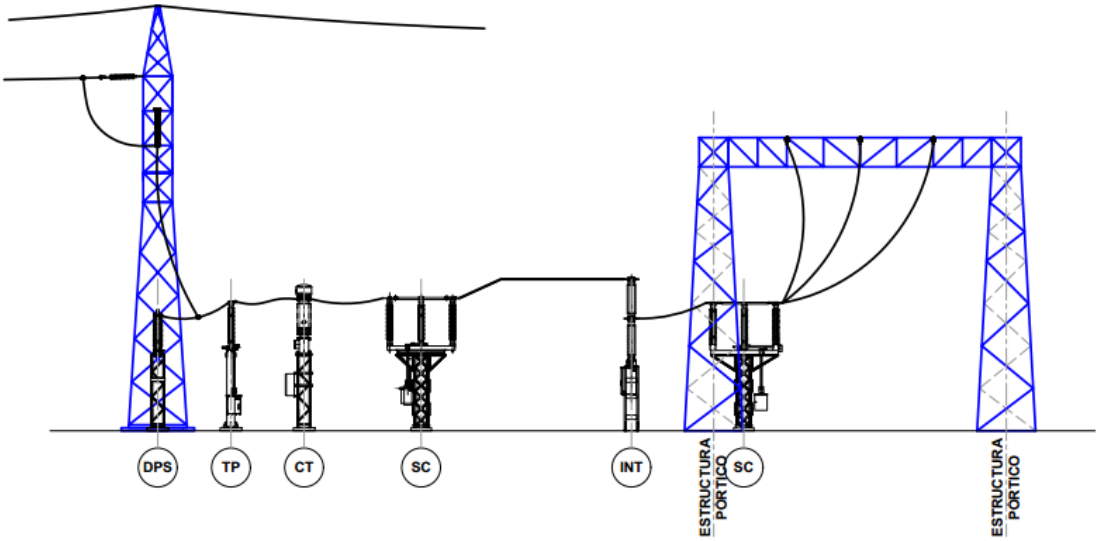
3.1.4 Disposiciones físicas que se pueden usar

El libro *Subestaciones de alta y extra alta tensión. Guía práctica de diseño* (HMV Ingenieros Ltda., 2021) plantea las siguientes disposiciones clásicas:

- Barra sencilla (Figura 14 y 15)
- Barra principal y de transferencia (Figura 16)
- Doble barra (Figura 17)
- Doble barra más *bypass* o paso directo (Figura 18)
- Doble barra más barra de transferencia.

Figura 14

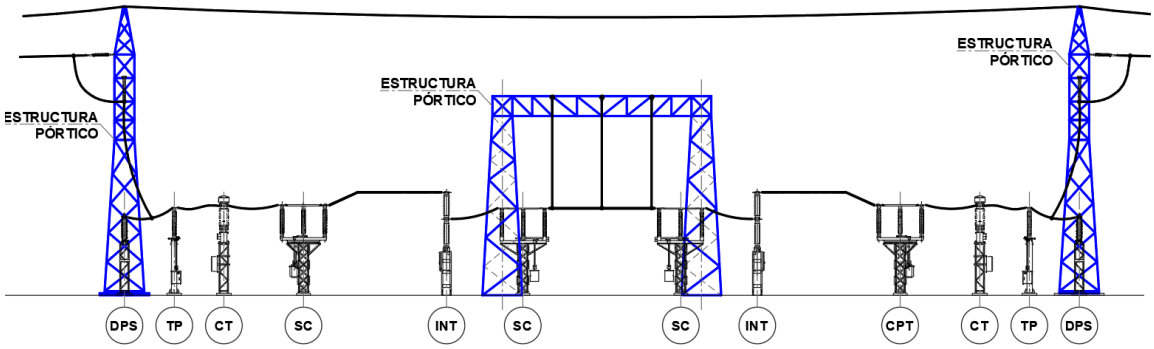
Barra sencilla. disposición clásica



Nota. Adaptado *Subestaciones de alta y extra alta tensión. Guía práctica de diseño* (HMV Ingenieros Ltda., 2021).

Figura 15

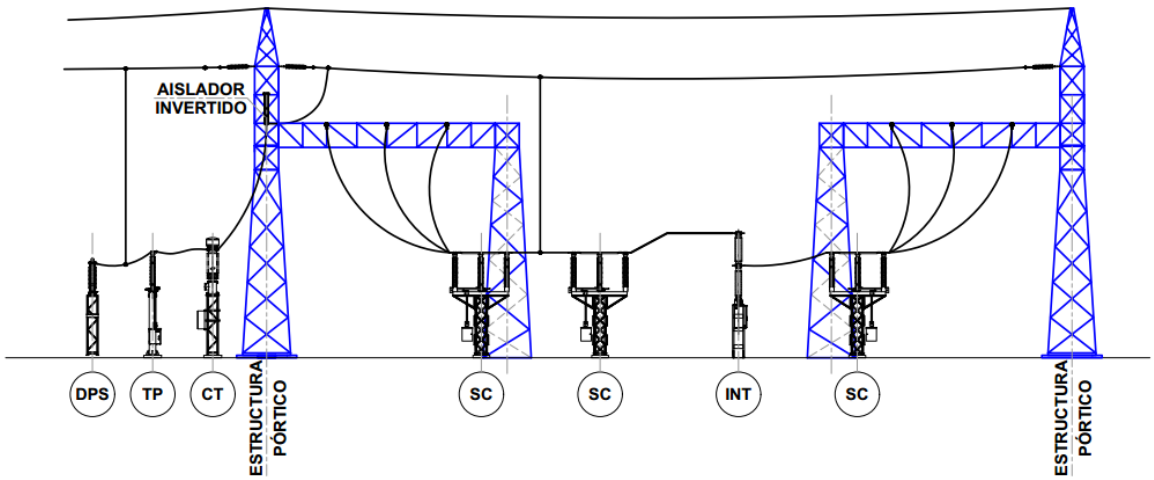
Barra sencilla. salidas enfrentadas. disposición clásica



Nota. Adaptado de *Subestaciones de alta y extra alta tensión. Guía práctica de diseño* (HMV Ingenieros Ltda., 2021).

Figura 16

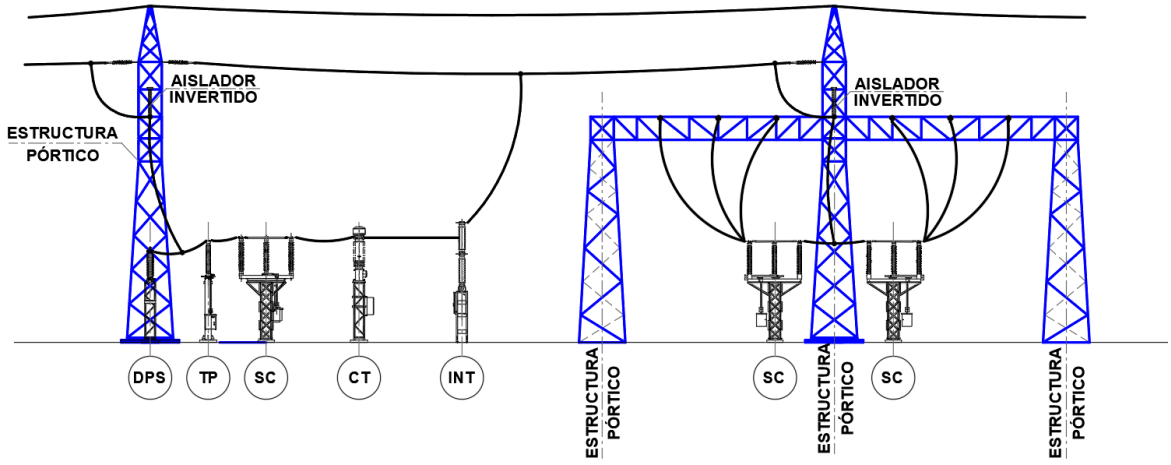
Barra principal y de transferencia, disposición clásica



Nota. Adaptado de *Subestaciones de alta y extra alta tensión. Guía práctica de diseño* (HMV Ingenieros Ltda., 2021).

Figura 17

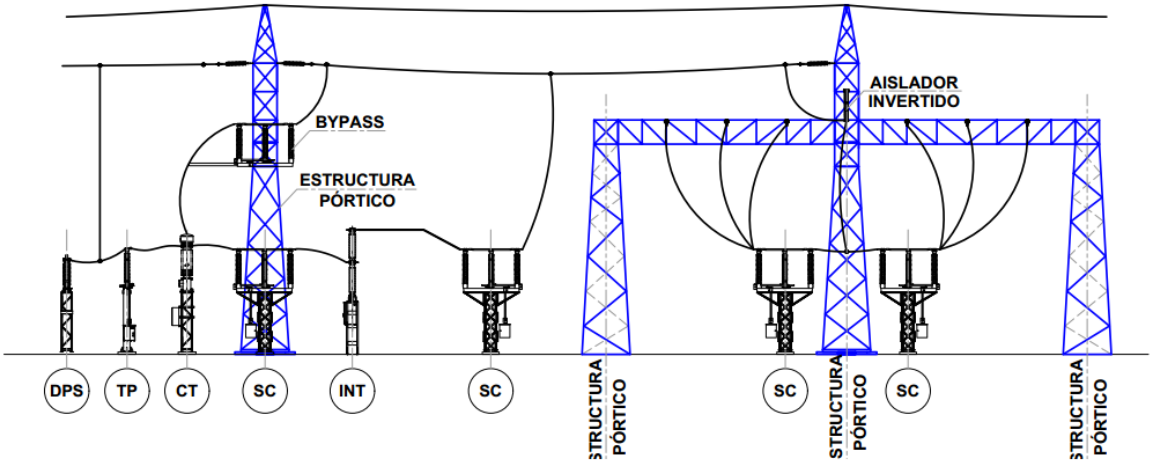
Doble barra, disposición clásica



Nota. Adaptado de *Subestaciones de alta y extra alta tensión. Guía práctica de diseño* (HMV Ingenieros Ltda., 2021).

Figura 18

Doble barra, más bypass o paso directo, disposición clásica



Nota. Adaptado de *Subestaciones de alta y extra alta tensión. Guía práctica de diseño* (HMV Ingenieros Ltda., 2021).

Las disposiciones de la subestación pueden variar según las siguientes consideraciones:

- Disposición escalonada con filas en sentido longitudinal.
- Disposición escalonada con filas en sentido transversal.
- Disposición alineada de seccionadores.
- Disposición elevada.
- Diversas formas constructivas con seccionadores tipo pantógrafo y semipantógrafo.
- Formas constructivas combinadas y especiales.

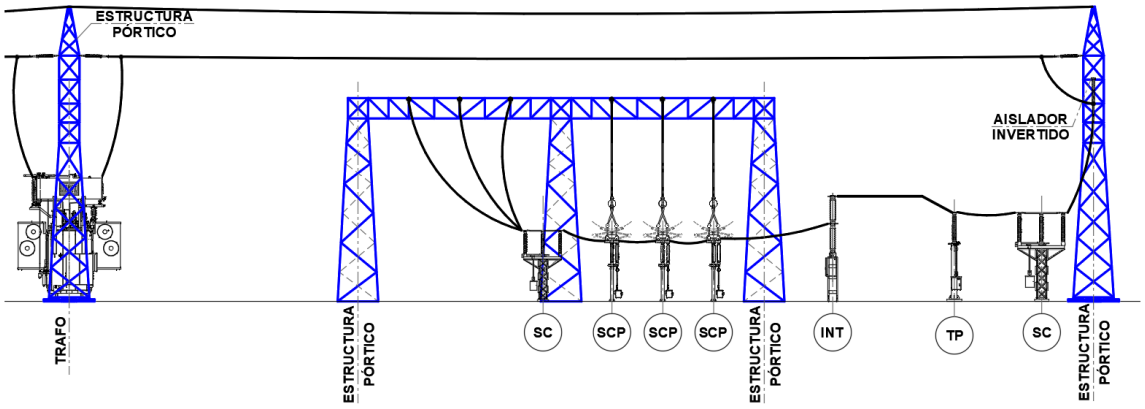
Lo mencionado considera la ubicación de los equipos de patio, los tipos de barraje para conexiones y los pórticos metálicos que soportan estos elementos de conexión; sin embargo, es importante considerar la ubicación de los transformadores de corriente

Comúnmente, en las configuraciones con doble barra los transformadores de corriente pueden estar cerca al interruptor o en la entrada de la conexión. Estas localizaciones se determinan según las condiciones de mantenimiento del transformador, de tal forma que pueda permanecer aislado de la línea.

Las conexiones a los transformadores pueden variar según la topografía y la distancia entre los patios de conexión (Figura 20, 20, 21 y 22). A continuación, se presentan estos tipos de configuraciones.

Figura 19

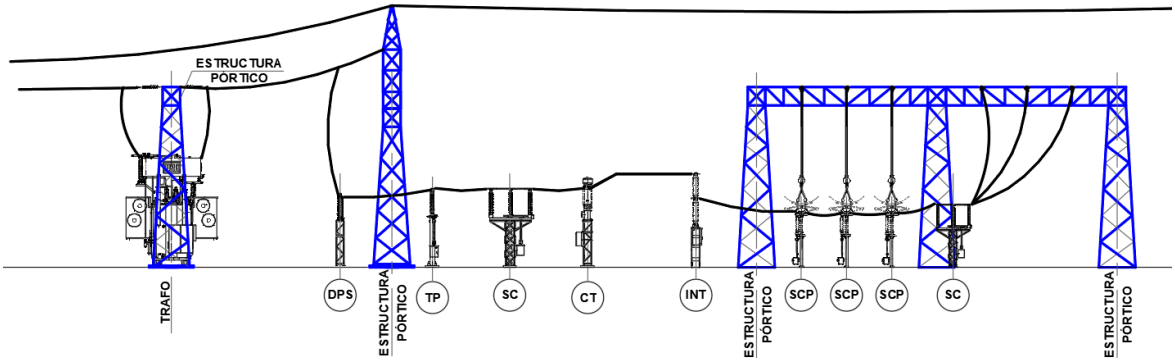
Doble barra, conexión a transformadores



Nota. Adaptado de *Subestaciones de alta y extra alta tensión. Guía práctica de diseño* (HMV Ingenieros Ltda., 2021).

Figura 20

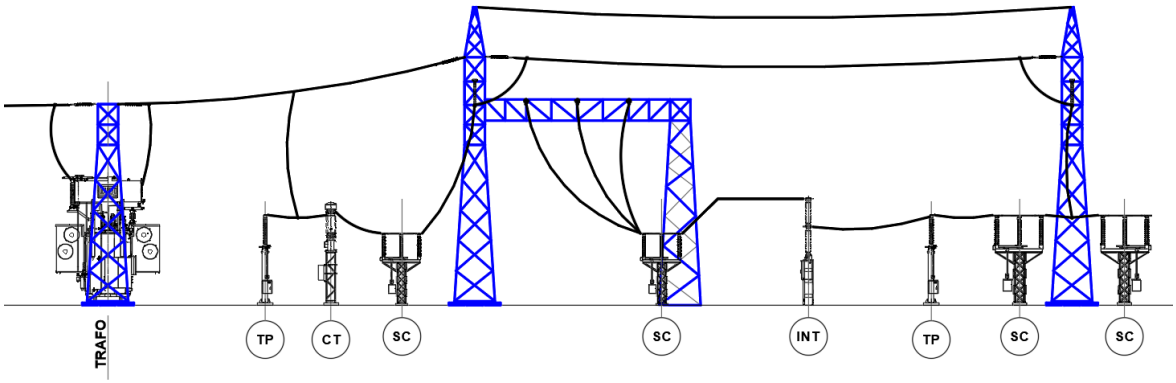
Doble barra, conexión a transformadores



Nota. Adaptado de *Subestaciones de alta y extra alta tensión. Guía práctica de diseño* (HMV Ingenieros Ltda., 2021).

Figura 21

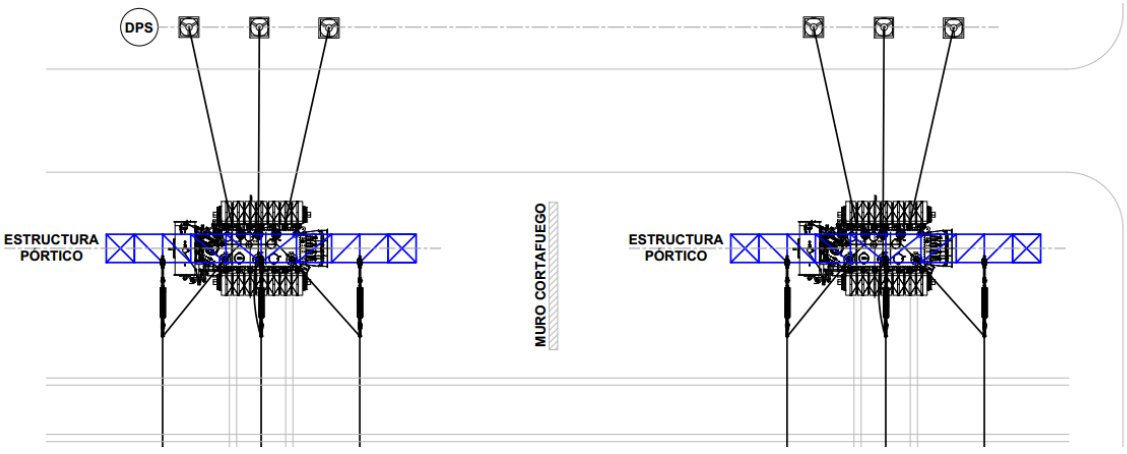
Configuración de interruptores, conexión a transformadores



Nota. Adaptado de *Subestaciones de alta y extra alta tensión. Guía práctica de diseño* (HMV Ingenieros Ltda., 2021).

Figura 22

Planta típica de transformadores

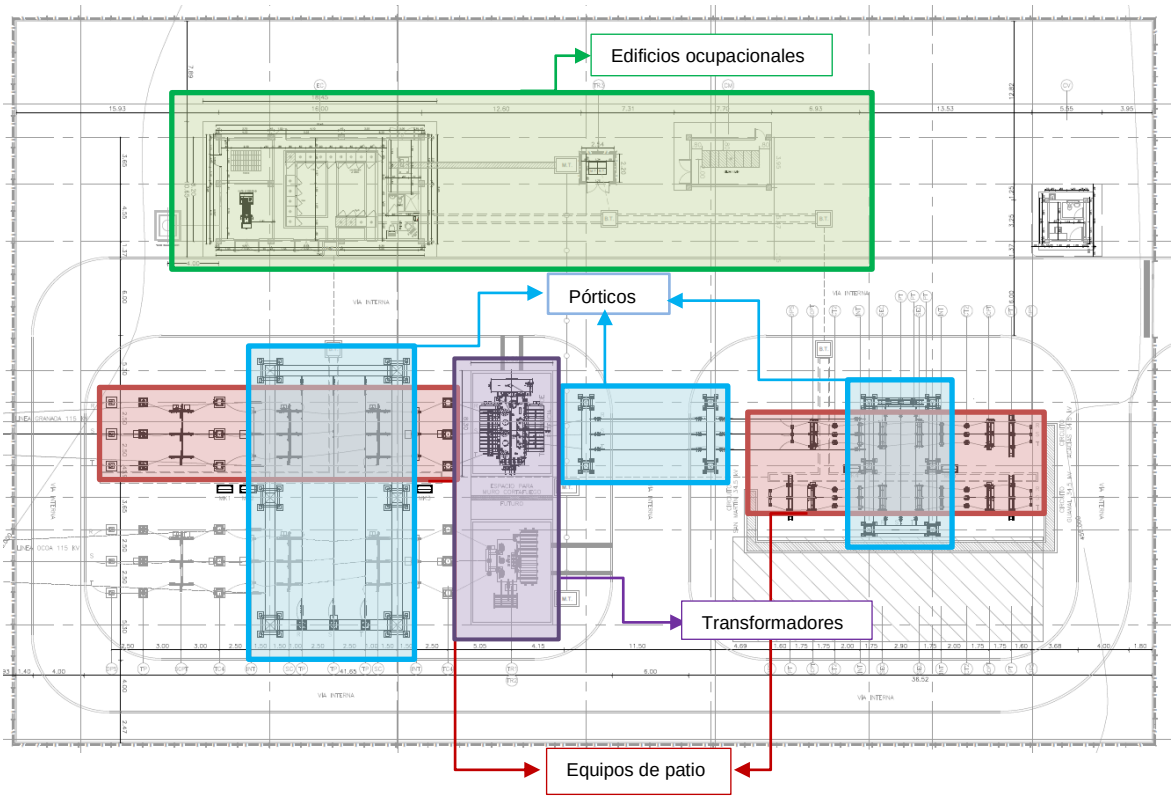


Nota. Adaptado de *Subestaciones de alta y extra alta tensión. Guía práctica de diseño* (HMV Ingenieros Ltda., 2021).

Después de evaluar las configuraciones generales de los equipos y la disposición física de las subestaciones, las cuales se plantean conjuntamente con los ingenieros eléctricos, se presentan ejemplos para diversas subestaciones típicas aisladas con aire (Plano y 2).

Plano 1

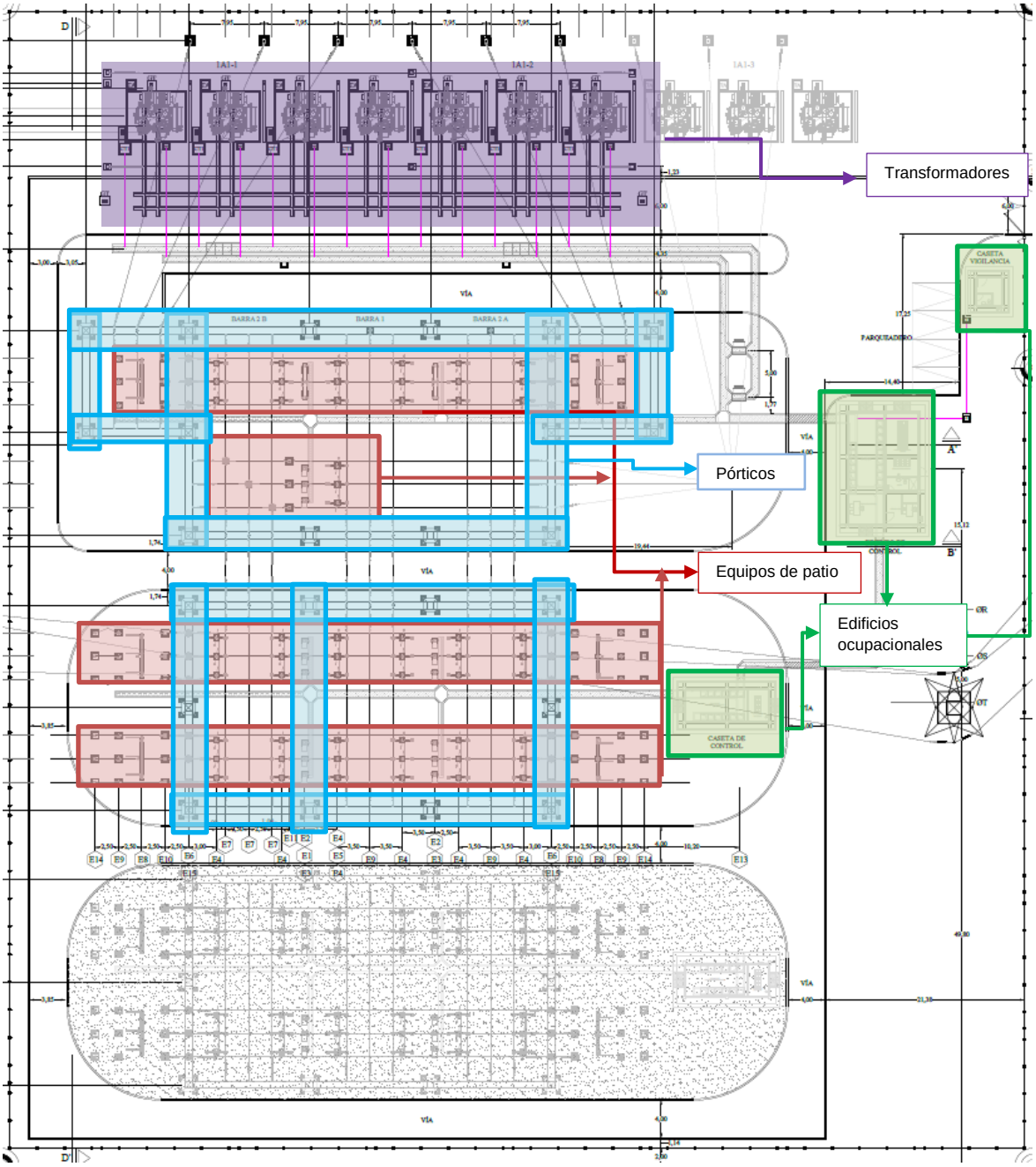
Ejemplo de una planta típica para configuración de una subestación aislada con aire.



Nota. Se toma como referencia Subestación Eléctrica Violetas.

Plano 2

Ejemplo de disposición física para subestación.



Nota. Se toma como referencia Subestación Eléctrica San Fernando

4. Criterios de evaluación de cargas para subestaciones

Las estructuras de las subestaciones deben estar diseñadas para soportar diversos tipos de cargas, tales como cargas muertas, cargas de viento, tensiones de conductores, sismos, cargas de cortocircuito, cargas operativas o cargas vivas, que se transmiten en los procesos de mantenimiento o en otras condiciones de servicio específicas o inusuales. A continuación, se presentan los casos de carga convencionales y los más recomendados que se deben estudiar y analizar en la evaluación para diseñar las estructuras de las subestaciones.

4.1.1 Cargas muertas

Está compuesta por el propio peso de las estructuras. Es importante considerar el peso de elementos que, aunque no hacen parte de la estructura, permanecen durante toda su vida útil, como los equipos de soporte, los accesorios que se instalan en las estructuras, los rellenos, etc. Cada uno de estos elementos se debe evaluar considerando sus características físicas.

4.1.2 Cargas operativas de los equipos

Normalmente, mientras los equipos se encuentran operando, en particular los de patio, por la naturaleza de su funcionamiento, generan solicitaciones de cargas dinámicas u operativas en las estructuras que los soportan.

Estas cargas se deben tener en cuenta para realizar el correcto análisis de las solicitaciones para las estructuras de soporte. Cada equipo de patio tiene una ficha técnica, provista por el fabricante, en la que se evidencian las consideraciones específicas para la aplicación de la carga dinámica, considerando sus rangos, magnitudes y los aspectos ambientales que pueden afectar el comportamiento del equipo. Dichas fichas

contienen indicaciones sobre los requisitos operativos y funcionales de deflexión específicos de cada equipo.

4.1.3 Cargas de tensión mecánica y cálculo de flechas de los conductores flexibles

Existen varias estructuras que soportan cables (conductores) dentro y fuera de las subestaciones, que se denominan estructuras sin salida de conexión. Las tensiones mecánicas y el cálculo de la catenaria o flechas del cable son indispensables para diseñar las estructuras que soportan los conductores de la subestación eléctrica. Estos análisis permiten establecer los posibles acercamientos que tengan los cables con las estructuras de soporte y los equipos, pues el objetivo principal durante la operación es no romper las distancias de seguridad, cumpliendo con lo que establece la normatividad satisfaciendo los requisitos de flechas y tensiones para diversos casos de combinaciones de carga.

Comúnmente, el cálculo de estas tensiones para los conductores se debe trabajar con valores bajos de tensión de rotura aproximadamente del 20%, como máximo, con el fin de obtener un factor de seguridad alto. Para estos cálculos es importante conocer las características y propiedades mecánicas del conductor y los aisladores, lo cual es significativo para establecer la relación entre el peso y la longitud del conductor, considerando las cargas concentradas que influyen en el control de flechas del cable.

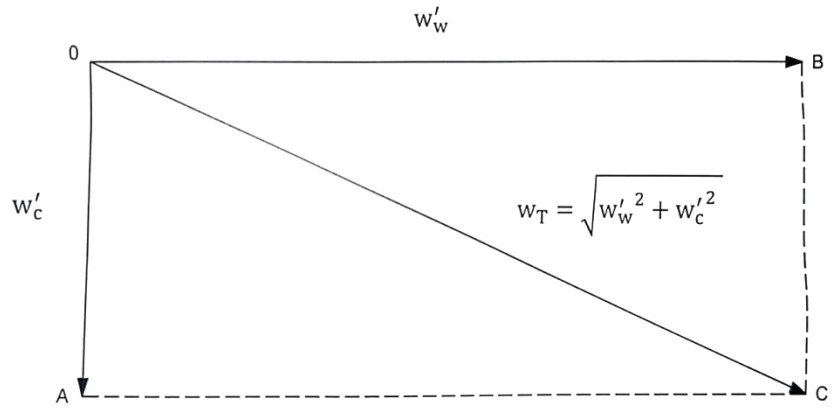
A continuación, se presentan los cálculos y las consideraciones necesarias para obtener la carga resultante del conductor que permitan evaluar las flechas y tensiones. Según la guía de HMV Ingenieros Ltda. (2021), se tienen en cuenta los siguientes aspectos:

- **Carga actuante (W_T)**

Es la carga total resultante sobre el conductor, la cual considera las sobrecargas simultáneas como el viento y el hielo. A continuación, se describe la forma como actúa cada una de ellas. En primera instancia, el peso propio del cable se toma de manera vertical; la carga del viento actúa de forma perpendicular a la configuración del cable, y finalmente, para la carga de hielo se considera un aumento de la sección transversal del cable por el recubrimiento de hielo, lo que implica que se aumenta el área de contacto con el viento junto con el incremento del propio peso. La resultante de W_T es la suma vectorial (Figura 23).

Figura 23

Resultante de la carga total del conductor WT



Nota. La resultante de la carga total considera el peso propio con la carga de hielo y del viento. Tomado de *Subestaciones de alta y extra alta tensión. Guía práctica de diseño* (HMV Ingenieros Ltda., 2021).

.

Las ecuaciones que se tienen en cuenta son las siguientes:

$$w'c = wc + wi$$

w'c = Carga vertical debida al peso del cable y a la capa de hielo.

wi = Peso del hielo por unidad de longitud sobre el conductor.

$wc =$ Peso de cable por unidad de longitud.

$$W'w = P_0 \ x \ G \ x \ C_f \ x \ (D + 2 \ x \ e)$$

$W'w =$ Acción del viento sobre el conductor y la capa de hielo.

$P_0 =$ Presión del viento calculada para la velocidad del viento de diseño.

$D =$ Diámetro del conductor.

$eh =$ Espesor de lámina de hielo.

$G =$ Factor de respuesta de ráfaga para conductores, cables de guarda y estructuras.

$C_f =$ Coeficiente de fuerza.

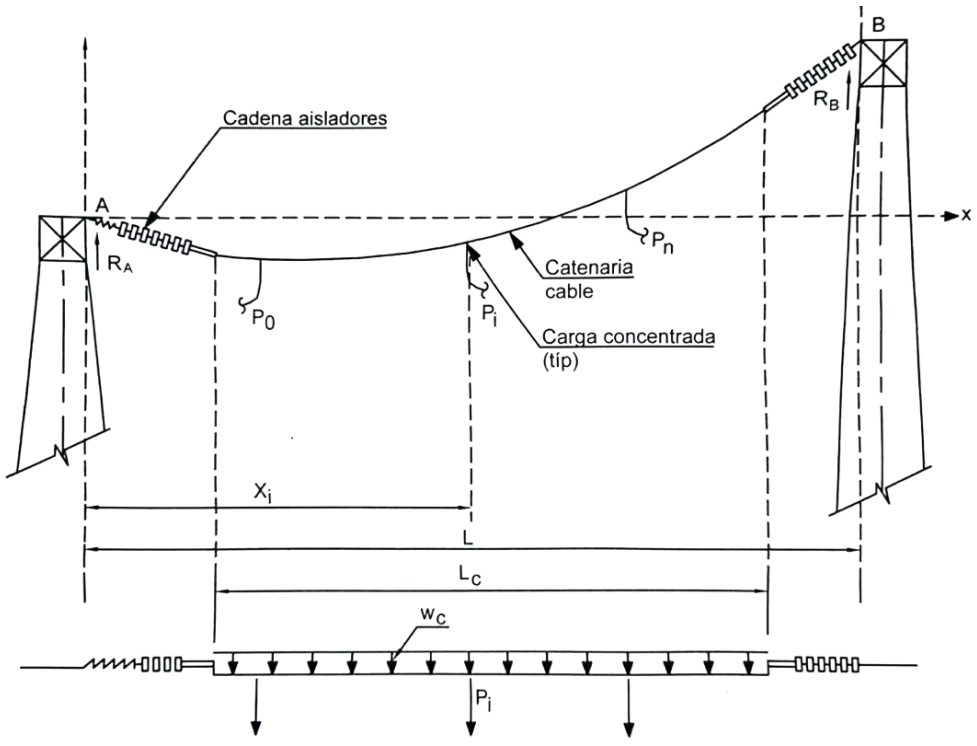
Para los valores G y Cf se recomienda revisar el numeral 10.10.2.3 de la guía de HMV Ingenieros Ltda. (2021).

- **Carga externa y uniforme equivalente (W_{eq})**

Existen diversas cargas externas que se pueden presentar a lo largo de la catenaria del cable, como consecuencia de los conductores bajantes que conectan a los equipos de patio, junto con las cargas de los aisladores y los accesorios. En la Figura 24 se evidencia la aplicación de cargas

Figura 24

Conductores con cargas concentradas



Nota. Esquema de cargas externas y uniformes. Tomado de *Subestaciones de alta y extra alta tensión. Guía práctica de diseño* (HMV Ingenieros Ltda., 2021).

$A =$ Apoyo izquierdo.

$B =$ Apoyo derecho.

$Xi =$ Posición de la carga Pi, respecto al apoyo A.

$Pi =$ Carga concentrada.

$wc =$ Peso de cable por unidad de longitud.

$R_A =$ Reacción vertical apoyo A.

$R_B =$ Reacción vertical apoyo B.

$L =$ Longitud del vano (separación entre soportes).

$L_C =$ Longitud del vano (horizontal) del conductor sin herrajes ni accesorios.

El conductor se simula como una viga simplemente apoyada con cada carga puntual y la carga distribuida por su peso, se calcula el momento máximo, según la siguiente ecuación.

$$W_g = W_{eq} = \frac{8\ x\ M}{Lc^2}$$

$W_{eq} =$ Carga externa y uniforme equivalente.

$M =$ Momento máximo.

$$RA = \frac{Wc\ x\ \frac{L^2}{2} + \sum_{i=0}^{n} Pi\ x\ (L - Xi)}{L}$$

$$R(X) = RA - \sum_{i=0}^{n} (wc\ x\ Xi) - \sum_{i=0}^{n} Pi$$

$$M = \int_0^{k^n} R(X)dx$$

$RA =$ Reacción vertical apoyo A.

$R(x) =$ Carga cortante en un punto x debido a todas las cargas aplicadas en el vano.

$n =$ Número de conductores por fase.

$k^n =$ Valor de x, para cuando R(x)=0.

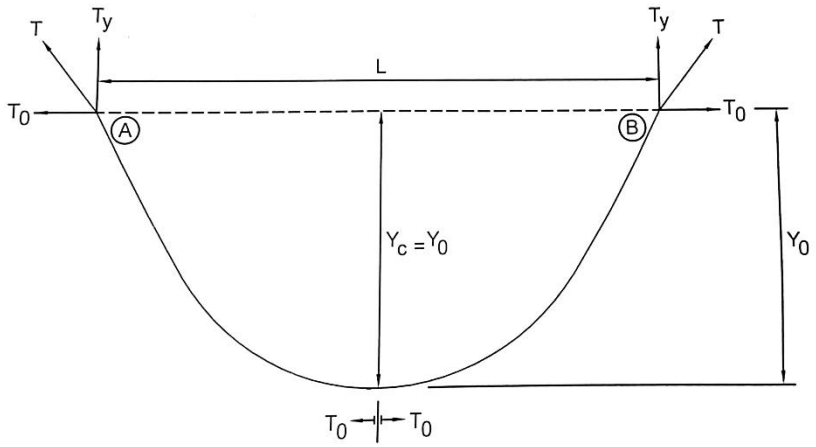
Para calcular la tensión mínima del cable se pueden establecer dos configuraciones estándar que adquiere el conductor cuando se deforma. Puede adoptar una forma parabólica o una curva catenaria; sin embargo, independiente de la forma, el cálculo de la tensión mínima se determina en el punto más bajo del cable. Teniendo presente esta consideración, se muestran los cálculos para las trayectorias parabólicas y de curva catenaria, con el fin de obtener la tensión mínima del conductor.

- **Trayectoria parabólica**
  - **Vano con ambos apoyos en el mismo nivel**

En vanos cortos se puede tomar la metodología simplificada que se menciona en el libro de HVM Ingenieros Ltda., (HMV Ingenieros Ltda., 2021) como se muestra en la Figura 25

Figura 25

Trayectoria parabólica con apoyos a nivel



Nota. Tomado de *Subestaciones de alta y extra alta tensión. Guía práctica de diseño* (HMV Ingenieros Ltda., 2021).

El valor de la tensión mínima y la flecha máxima del conductor, en el punto más bajo, se calcula de la siguiente manera:

$$T_0 = \frac{W_T \, X \, L^2}{8 \, X \, Y_C}$$

$$Y_C = \frac{W_T \, X \, L^2}{8 \, X \, T_0}$$

$T_0 =$ Tensión mecánica horizontal del conductor.

$W_T =$ Carga total en el conductor por unidad de longitud.

$L =$ Longitud del vano (separación entre soportes).

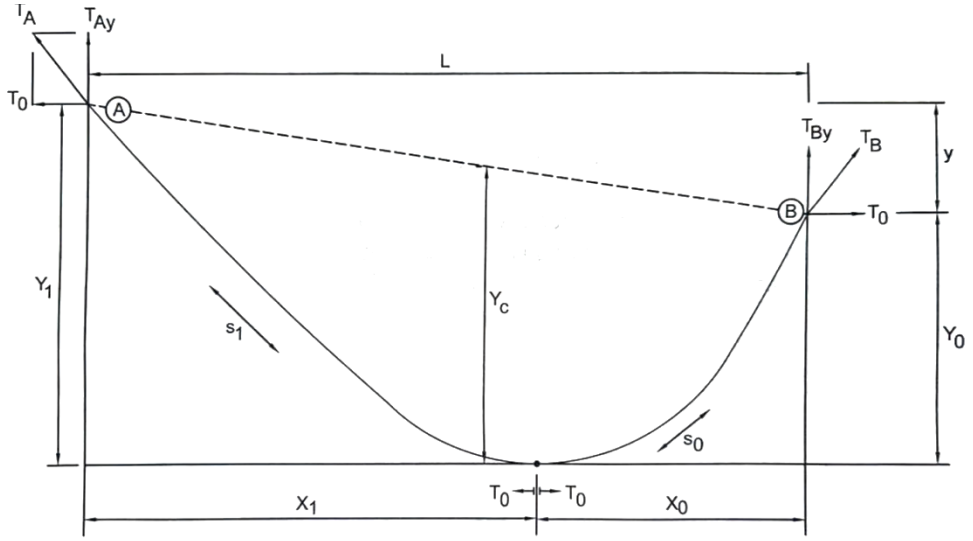
$Y_C =$ Flecha del vano.

- **Vano con ambos apoyos a desnivel**

En ciertas ocasiones la trayectoria del cable presenta apoyos a desnivel, como se muestra en la Figura 26.

Figura 26

Apoyos de la catenaria del cable a distintos niveles



Nota. Tomado de *Subestaciones de alta y extra alta tensión. Guía práctica de diseño* (HMV Ingenieros Ltda., 2021).

Las siguientes ecuaciones permiten calcular la posición del punto más bajo de la catenaria del cable:

$$X_0 = \frac{L}{2} * \left(1 - \frac{y}{4 * Yc}\right)$$

$$Y_0 = Y_C * \left(1 - \frac{y}{4 * Y_c}\right)^2$$

$L =$ Longitud del vano (separación entre soportes).

$Y_C =$ Flecha del vano.

$X_1, Y_1 =$ Coordenadas de apoyo A.

$X_0, Y_0 =$ Coordenadas de apoyo B.

$y =$ Desnivel entre apoyos, $Y_1 - Y_0$

El cable se calcula sumando la longitud de S_0 y S_1, con base en la siguiente ecuación:

$$S_1 = X_1 * \left(1 + \frac{8 * {Y_1}^2}{3 * {X_1}^2}\right)$$

$$\mathrm{S}_0 = X_0 * \left(1 + \frac{8 * {Y_0}^2}{3 * {X_0}^2}\right)$$

$S_0 =$ Longitud del cable entre el apoyo B y el punto más bajo.

$S_1 =$ Longitud del cable entre e apoyo A y el punto más bajo.

Según la Figura 26 se genera una reacción vertical en los apoyos extremos del cable, la cual se calcula de la siguiente manera:

$$T_{AY} = W_T * S_1$$

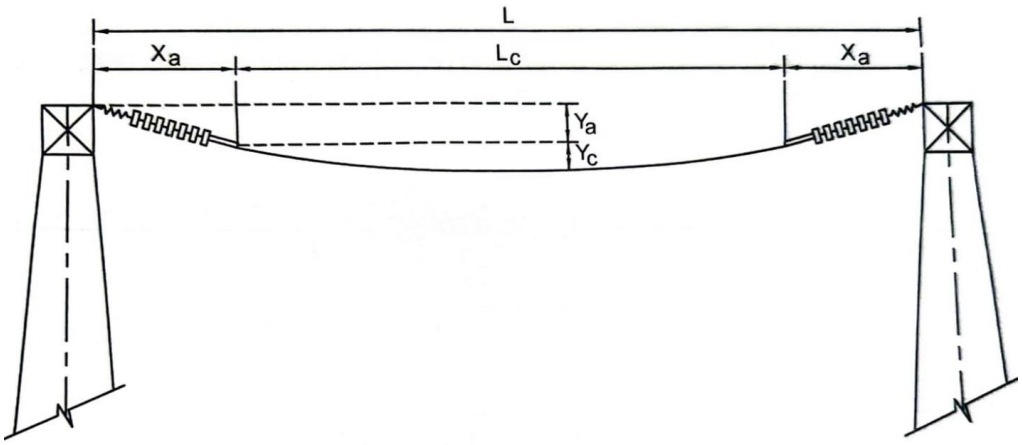
$$T_{BY} = W_T * S_0$$

- **Flechas con cadena de aisladores y herrajes**

Las cadenas de aisladores, con sus respetivos herrajes, generan efectos sobre la trayectoria del conductor, de tal manera que se toman como elementos rígidos con una articulación en el anclaje y con el peso total concentrado en el centro de cada elemento. A renglón seguido se presenta un ejemplo con apoyos al mismo nivel (Figura 27).

Figura 27

Dimensiones considerando las cadenas de aisladores y herrajes



Nota. Tomado de *Subestaciones de alta y extra alta tensión. Guía práctica de diseño* (HMV Ingenieros Ltda., 2021).

En este caso, el cálculo de la flecha máxima del vano es

$$Y = Y_a + Y_c$$

$$Y_a = \frac{X_a}{2 * T_0} * (W_T * L_C * F_{as})$$

$Y =$ Flecha máxima del conductor.

$Y_C =$ Flecha del conductor.

$Y_a =$ Flecha de la cadena de aisladores y herrajes.

$L_C =$ Longitud del vano (horizontal) del conductor sin herrajes ni accesorios.

La siguiente es la tensión en el punto máximo de la flecha

$$T_0 = \frac{W_T * L^2 - 4 * W_T * {X_a}^2 + 4 * X_a * F_{as}}{8 * Y}$$

La longitud horizontal del cable se calcula aplicando la siguiente ecuación:

$$L_C = L - 2 * X_a$$

$L =$ Longitud del vano (separación entre soportes).

$X_a =$ Proyección horizontal de la longitud de la cadena de aisladores.

$L_a =$ Longitud de un aislador.

La longitud de la cadena de aisladores se calcula de la siguiente forma:

$$L_a = N * la$$

$N =$ Número de aisladores.

$la =$ Longitud de un aislador.

$Fas =$ Peso de la cadena de aisladores.

$T_0 =$ Tensión mecánica horizontal del conductor.

$W_T =$ Carga total en el conductor por unidad de longitud.

- **Efectos de temperatura**

Es claro que los cambios de temperatura pueden alterar las elongaciones del cable. Debido al cambio de estado 1 a estado 2, se debe calcular nuevamente las ecuaciones de equilibrio para el conductor. Si la temperatura se incrementa, se presenta una dilatación del conductor. Sin embargo, esta elongación se contrarresta disminuyendo la tensión del conductor. El estado 2 se puede calcular con la siguiente ecuación de tercer grado, mediante el método de Newton-Raphson.

$$T_{02}{}^3 + T_{02}{}^2 * \left(\frac{Ac * Ec * W_{T1}{}^2 * L^2}{24\ x\ T_{01}{}^2} + Ac * Ec * \alpha * \Delta T * T_{01}\right) - \frac{Ac * Ec * W_{T2}{}^2 * L^2}{24} = 0$$

$\alpha =$ Coeficiente térmico de dilatación lineal del cable, 1/ºC.

$\Delta T =$ Variación de temperatura, ºC

$Ac =$ Área de la sección transversal del cable, cm^2

$Ec =$ Módulo de elasticidad del cable, daN/cm^2

$L =$ Longitud del vano (separación entre soportes), m.

$T_{01} =$ Tensión mecánica horizontal básica en el estado 1, daN.

$T_{02} =$ Tensión mecánica horizontal básica en el estado 2, daN.

$W_{T1} =$ Carga uniforme equivalente sobre el conductor en el estado 1, daN/m

$W_{T2} =$ Carga uniforme equivalente sobre el conductor en el estado 2, daN/m.

Con la siguiente ecuación se considera la corrección de la carga WT por la temperatura

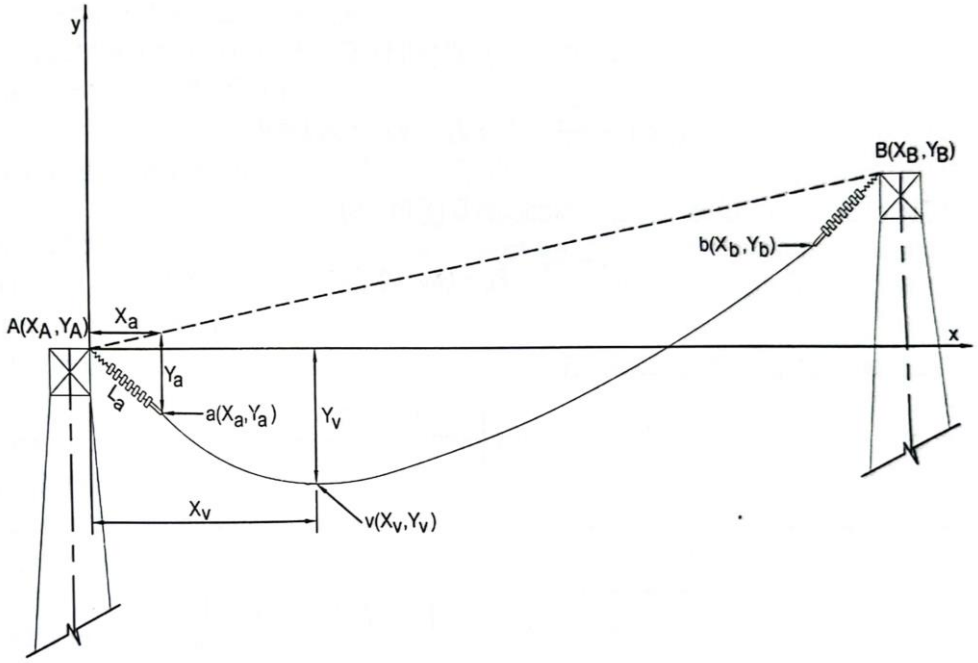
$$W_{T2} = W_{T1}/(1 + \alpha * \Delta T)$$

- **Trayectoria de la catenaria**

Normalmente, cuando se conecta el conductor se presentan diferencias de niveles entre los dos apoyos donde se conectan los aisladores y herrajes, lo cual influye en la configuración de la catenaria del cable. A continuación, se presenta la evaluación de la trayectoria del cable, teniendo en cuenta estas consideraciones, como se reflejan en la (Figura 28).

Figura 28

Trayectoria de la catenaria del conductor



Nota. Tomado de *Subestaciones de alta y extra alta tensión. Guía práctica de diseño* (HMV Ingenieros Ltda., 2021).

La configuración de la catenaria del cable se representa por medio de coordenadas *(x,y)* a lo largo de toda la trayectoria. Estas coordenadas se relacionan con la siguiente ecuación:

$$y(x) = c * \left[\cosh\left(\frac{x - X_v}{c}\right) - 1\right] + Y_v$$

$c =$ Constante dada por la relación entre la tensión y el peso.

$$c = \frac{T_0}{W_T}$$

$T_0 =$ Tensión mecánica horizontal del conductor.

$W_T =$ Carga total en el conductor por unidad de longitud.

La pendiente de la catenaria en una coordenada específica está dada por:

$$y'(x) = \sinh\left(\frac{x - X_v}{c}\right)$$

La longitud del conductor, desde el vértice hasta el punto *(x,y),* se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$s(x) = c\ x\ y'(x) = c\ x\ \sinh\left(\frac{x - X_V}{c}\right)$$

La tensión del conductor en un punto específico, con coordenada (*x, y),* se determina así:

$$T(x) = \sqrt{{T_0}^2 + {w_T}^2 * s^2(x)}$$

Las ecuaciones de equilibrio para la cadena de aisladores en cada punto de apoyo A y B *(∑M=0*), junto con las ecuaciones de punto de coincidencia para *X* y *Y* y la ecuación de cambio de estado por efectos de temperatura se pueden tomar del numeral 10.10.3.5 de la guía de HMV Ingenieros Ltda.

4.1.4 Cargas de cortocircuito

Los efectos de las corrientes de cortocircuito determinan de manera considerable la configuración de los barrajes flexibles o rígidos de la subestación, debido a que producen campos electromagnéticos que provocan fuerzas en los conductores y, eventualmente, en los equipos.

En este documento se presenta el cálculo de las fuerzas electromagnéticas impartidas a la estructura por la corriente de cortocircuito, aplicando la metodología que recomienda el CIGRÉ con la norma IEC 608865-1 (IEC 60865-1, 2013), según la cual estas fuerzas dependen del espaciamiento de los conductores, la magnitud de la corriente de falla del cortocircuito, el tipo de cortocircuito y el grado de asimetría del cortocircuito. Otros factores que se deben considerar son la flexibilidad del soporte y la configuración rígida del trazado (efectos de esquina y extremo) (ASCE American Society of Civil Engineers, 2007)

Adicionalmente, para calcular las tensiones y los desplazamientos causados por la fuerza electromagnética del corto, se debe contar con las características físicas y mecánicas del conductor, junto con la longitud del vano y la duración del cortocircuito (estos cálculos aplican cuando se tiene más de un conductor por fase), dentro de las cuales se debe considerar la carga a tensión debida al acercamiento de los sub-conductores, conocida como *pinch force*.

Regularmente, en los datos de entrada se requiere información suministrada por el ingeniero eléctrico, principalmente para determinar la corriente de corto.

4.1.5 Cargas de construcción y mantenimiento

En el diseño de las estructuras de una subestación se debe prever que durante la construcción estas deben soportar a los trabajadores junto con sus herramientas, considerando que se realizan procesos de maniobra, para los cuales se debe proveer apoyo adecuado para las fuerzas que se les impongan de tiro, halado o izaje de los equipos. Así mismo, es importante tener en cuenta los requisitos de salud y seguridad en el trabajo, los cuales se presentan en la norma (OSHA), además algunos requisitos de seguridad de la norma IEEE 1307, que se aplica a estructuras de subestaciones, en las que se presentan las cargas mínimas de seguridad de los trabajadores. Por otra parte, los equipos deben ser accesibles para sus procesos de operación y mantenimiento, ya que deben cumplir ciertas exigencias mínimas de inspección, en los que se requiere revisar que no tengan daños, no presenten problemas de posible corrosión, se verifican las conexiones, el deterioro o la pérdida de los elementos estructurales o daños en las cimentaciones. Estos son algunos procesos que se llevan a cabo durante el

mantenimiento. Igualmente, el ingeniero debe determinar la magnitud de las cargas inusuales que se apliquen durante las operaciones de construcción y mantenimiento. Generalmente, estos pesos no se combinan con otras cargas climáticas extremas, porque es poco probable que los trabajadores realicen la construcción o el mantenimiento durante condiciones climáticas severas, y las cargas de construcción y mantenimiento se especifican con factores más elevados (ASCE American Society of Civil Engineers, 2007).

4.1.6 Cargas de viento

Para estimar las cargas de viento sobre las estructuras de la subestación convencional se recomienda la metodología propuesta en la guía ASCE 74 con las velocidades de viento definidas en el capítulo B de NSR-10 (NSR-10 Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2017). La máxima velocidad del viento se debe considerar de acuerdo con la normatividad de construcción que rige para la zona del proyecto.

A renglón seguido se presenta la metodología de cálculo propuesta en la ASCE 74 (ASCE No 74, 2020), en la que la fuerza F_t, que es la acción del viento, actúa de manera horizontal sobre el elemento. Para el cálculo, se consideran diversos parámetros en la ecuación, como se presenta a continuación.

$$F_t = \gamma_w \; x \; Q \; x \; K_Z \; x \; K_{zt} \; x \; V_D^2 \; x \; G \; x \; C_f \; x \; A_p$$

F_t =fuerza del viento (N).

γ_w = factor de ajuste según la probabilidad de falla de un diseño tomado de la NSR-10.

Q= densidad del aire (kg/m^3)d

V_D = velocidad básica del viento en m/s.

K_Z = coeficiente de exposición de presión por velocidad, modifica la velocidad básica con diferentes alturas sobre el nivel del terreno y las categorías de exposición.

K_{Zt} = factor topográfico.

G= factor de respuesta de ráfaga para conductores, cables de tierra y estructuras.

$C_{f=}$coeficiente de fuerza.

$A_p =$ área proyectada en un plano normal a la dirección del viento m^2.

La evaluación y determinación de cada factor se puede determinar según las consideraciones del título B.6 de la NSR-10. Partiendo de la figura B.6.4-1 de la NSR-10 (NSR-10 Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2017), en la que se muestran las velocidades del viento básico, según las zonas de amenaza eólica.

4.1.7 Cargas sísmicas

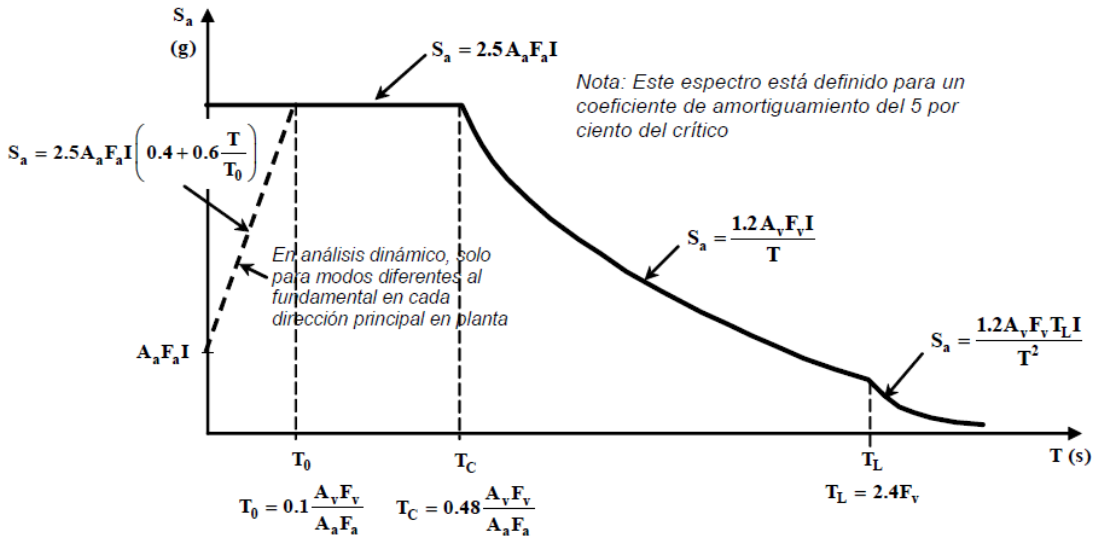
En la guía práctica de diseño de HMV Ingenieros Ltda. Se especifican los parámetros que se deben considerar para evaluar las cargas sísmicas. Cabe aclarar que los diseños estructurales deben estar diseñados para resistir y tener un buen desempeño ante estas cargas; por lo tanto, se deben considerar los parámetros máximos de aceleración, velocidad y desplazamiento horizontal del terreno, según las características del lugar y del suelo en el que se encuentre la subestación.

Normalmente, los cálculos para el diseño de las estructuras se realizan a partir de los espectros sísmicos de la zona, partiendo del nivel de amenaza del sitio del proyecto y considerando un porcentaje de amortiguamiento según el tipo de estructura.

De acuerdo con la localización del proyecto y la normativa local, se usan las siguientes ecuaciones que permiten calcular el espectro sísmico de la zona, en particular donde se encuentre ubicado el proyecto. En Colombia, las definiciones del espectro se encuentran en la NSR-10 y se presentan de la siguiente manera (Figura 29).

Figura 29

Espectro elástico de aceleraciones de diseño como fracción de g



Nota. Tomado de NSR-10, 2017, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.

Aa: aceleración horizontal pico efectiva de diseño, g

Av: velocidad horizontal pico efectiva de diseño, g

Fa: coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de periodos cortos debida a los efectos de sitio.

Fv: coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de periodos intermedios debida a los efectos de sitio.

I: coeficiente de importancia

Sa: valor del espectro de aceleraciones de diseño para un periodo de vibración dado

T: periodo de vibración del sistema elástico.

Con base en lo anterior, se tienen en cuenta los valores de *Aa*, *Av* y el tipo de suelo, de tal manera que se puedan calcular los coeficientes de amplificación *Fa* y *Fv*, según las tablas A.2.4.3 y A.2.4-4 de la NSR-10, como se muestra a continuación.

Tabla 1

Valores del coeficiente Fa, para la zona de periodos cortos del espectro

Tipo de Perfil	Intensidad de los movimientos sísmicos				
	$A_a \leq 0.1$	$A_a = 0.2$	$A_a = 0.3$	$A_a = 0.4$	$A_a \geq 0.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
E	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
F	véase nota	véase nota	véase nota	Véase nota	véase nota

Nota: Para el perfil tipo **F** debe realizarse una investigación geotécnica particular para el lugar específico y debe llevarse a cabo un análisis de amplificación de onda de acuerdo con A.2.10.

Nota. Tomada de NSR-10, 2017, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.

Tabla 2

Valores de coeficiente Fv, para la zona de períodos intermedios del espectro

Tipo de Perfil	Intensidad de los movimientos sísmicos				
	$A_v \leq 0.1$	$A_v = 0.2$	$A_v = 0.3$	$A_v = 0.4$	$A_v \geq 0.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
D	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5
E	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4
F	véase nota	véase nota	véase nota	Véase nota	véase nota

Nota: Para el perfil tipo **F** debe realizarse una investigación geotécnica particular para el lugar específico y debe llevarse a cabo un análisis de amplificación de onda de acuerdo con A.2.10.

Nota. Tomada de NSR-10, 2017, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica

Para determinar las fuerzas sísmicas, a partir de los espectros sísmicos, se emplea el método elástico o el método de fuerza horizontal equivalente, en el que las fuerzas son proporcionales al peso de la estructura, al coeficiente sísmico, según el espectro y su amortiguamiento, junto con el periodo fundamental de vibración. A continuación, se

presentan las ecuaciones planteadas en la guía 113 de diseño de subestaciones (ASCE American Society of Civil Engineers, 2007). La ecuación se aplica para establecer las fuerzas sísmicas a partir de la metodología de fuerza horizontal equivalente:

$$F_E = \left(\frac{Sa}{R}\right) W(I_{FE})(I_{MV})$$

F_E= fuerza lateral sísmica aplicada en el centro gravitacional de la estructura.

R= coeficiente de modificación a la respuesta sísmica o disipación de energía

I_{FE} = factor de importancia para cargas sísmicas.

W= carga muerta de los elementos

Sa= valor del espectro de aceleraciones de diseño para un periodo de vibración dado

I_{MV} =es 1.0 cuando el modo de vibración dominante es uno, y se toma como 1.5 cuando hay varios modos de vibración considerados en el diseño.

- **FACTOR DE IMPORTANCIA (I_{FE}):**

Los factores de importancia considerados según el manual de la ASCE 113 (ASCE American Society of Civil Engineers, 2007) son los siguientes:

Estructuras y equipos esenciales para la operación._____1.25

Anclaje de estructuras y equipos esenciales para la operación. _____2.0

Todas las demás estructuras y equipos. _____1.0

Todos los demás anclajes. _____ 1.5

La selección del factor de importancia apropiado es responsabilidad del ingeniero diseñador.

- **FACTOR DE MODIFICACIÓN A LA RESPUESTA SÍSMICA** $(\boldsymbol{R})$**:**

Las fuerzas sísmicas se reducen en ciertos casos considerando el coeficiente de disipación de energía *R*, el cual considera la ductilidad del sistema. Según el manual ASCE 113 (ASCE American Society of Civil Engineers, 2007), se consideran los siguientes valores de R para estructuras particulares de las subestaciones (Tabla 3).

Tabla 3

Factor de modificación de respuesta estructural

ESTRUCTURA O TIPO DE COMPONENTE	METODOLOGÍA USD	METODOLOGÍA ASD
Pórticos resistentes a momento	3.0	4.0
Torres en celosía	3.0	4.0
Estructuras de soporte en voladizo	2.0	2.7
Poste tubular	1.5	2.0
Soportes de barraje de acero o alumnio	2.0	2.7
Aisladores de postes	1.0	1.3
Barraje rígido en (Alumnio o cobre)	2.0	2.7
Estructuras con frecuencias naturales > 25 Hz	1.3	1.7

Nota. La tabla presenta los coeficientes de disipación de energía según el tipo de estructura. Tomada de American Society of Civil Engineers, 2007.

La metodología de diseño USD corresponde a diseño por resistencia última y ASD a metodología por esfuerzos permisibles. Los valores que se toman para estructuras ocupacionales que hagan parte de la subestación se revisan según el sistema estructural adoptado y se validan según la NSR-10.

5. Criterios para la aplicación de cargas, análisis y diseño de infraestructura para pórticos y equipos de patio

En el capítulo 4 se presentaron la evaluación y el análisis de las cargas que normalmente se aplican durante el diseño de la infraestructura para subestaciones convencionales, como las cargas muertas, las operativas de los equipos, de tensión mecánica y cálculo de flechas de los conductores flexibles, de cortocircuito, de construcción y mantenimiento, de viento y sismo. Existen diversos métodos para estimar estas cargas, los cuales se basan principalmente en modelos estadísticos, que si bien son adecuados, también arrojan resultados no tan precisos. En ese sentido, se debe contar con un nivel de confiabilidad mayor y para garantizar esa fiabilidad estructural, se introducen factores de carga para compensar esta incertidumbre. Según la Guía de diseño ASCE 113, "la confiabilidad operativa del sistema de línea de transmisión generalmente se aborda mediante los trazados de la propia red y redundancias adicionales. Por lo tanto, la confiabilidad de la red eléctrica generalmente no depende de una estructura individual. Por esta razón, se pueden reducir los factores de carga sin comprometer la confiabilidad del sistema." (ASCE American Society of Civil Engineers, 2007). Esto implica que los valores de los factores de carga, en la mayoría de los casos, no sean tan elevados.

5.1 Combinación de cargas para el diseño de estructuras

De acuerdo con las recomendaciones del ASCE 113 (ASCE American Society of Civil Engineers, 2007), las combinaciones de carga y factores de sobrecarga para estructuras metálicas y fundaciones son las siguientes:

P1 = 1.2 Pp + 1.3 Ct + 1.3 Cm

P2 = 1.2 Pp + 1.3 Ct

P3 = 1.1 Pp + 1.3 Cvx, y + 0.75 Cc + 1.1 Ct

P4 = 1.1 Pp + 1.0 Cc + 1.1 Ct

P5 = 1.1 Pp + 1.1 Ct ± 1.0 Csx, y + 0.30 Csx, y ± Csv

P6 = 1.1 Pp + 0.75 Cc + 1.1 Ct ± 1.0 Da

P7 = 0.90 Pp + 1.20 Ct +/- 1.0 Cv

Combinaciones para trabajo:

P1 = 1.0 Pp + 1.0 Ct + 1.0 Cm

P2 = 1.0 Pp + 1.0 Ct

P3 = 1.0 Pp ± 1.0 Cvx, y + 0.60 Cc + 1.0 Ct

P4 = 1.0 Pp + 1.0 Cc + 1.0 Ct

P5 = 1.0 Pp + 1.0 Ct ± 0.70 Csx, y + 0.21 Csx, y ± 0.70 Csv

P6 = 1.0 Pp + 0.75Cc + 1.0 Ct ± 1.0 Da

P7 = 0.90 Pp + 1.00 Ct +/- 1.0 Cv

En la aplicación del sismo se consideran las mismas magnitudes, pero con sentidos contrarios. Donde:

Csx y Csy= Cargas por sismo horizontal sobre equipos y estructuras.

Csv= La carga de sismo vertical se calcula como el 80% de la carga de sismo horizontal según la ASCE 113.

Pp= Peso propio de la estructura, equipos y cualquier tipo de elemento implícito en la implementación del mismo, como cargas debido a montaje y mantenimiento.

Ct= Cargas horizontal de tiro.

Cc= Cargas de sobretensión en conductores por efecto de cortocircuito.

Cv= Carga de viento.

Da= Cargas de accionamiento

Cm= Cargas de mantenimiento

El diseño de otras estructuras, diferentes a las metálicas, como la caseta de relés, sus componentes y cimentación, se realiza de tal forma que sus resistencias de diseño igualen o excedan los efectos producidos por las cargas mayoradas en las siguientes combinaciones, según NSR-10:

1.4(Pp + F)

1.2(Pp + F + Te) + 1.6(Li + H) + 0.5(Lr o Gr o Le)

1.2 Pp + 1.6(Lr o Gr o Le) + (Li o 0.8 Cv)

1.2 Pp + 1.6Cv+ 1.0Li + 0.5(Lr o Gr o Le)

1.2 Pp + 1.0(Csx o Csy) + 1.0Li

0.9 Pp + 1.6Cv+ 1.6H

0.9 Pp + 1.0(Csx o Csy) + 1.6H

Donde:

F= Cargas debidas al peso y la presión de fluidos con densidades bien definidas y alturas máximas controlables.

Te: Fuerzas y afectaciones causadas por efectos acumulados de variación de temperatura, retracción de fraguado, flujo plástico, cambios de humedad, asentamiento diferencial o la combinación de varios de estos efectos.

Li: Cargas vivas debidas al uso y ocupación de la edificación, incluyendo las cargas debidas a objetos móviles o particiones que se pueden cambiar de sitio. L incluye cualquier reducción que se permita. Si se toma en cuenta la resistencia a cargas de impacto, este efecto debe tenerse en cuenta en la carga viva L.

H: Cargas debidas al empuje lateral del suelo, de agua freática o de materiales almacenados con restricción horizontal.

Lr: Cargas vivas sobre la cubierta.

Gr: Carga debida al granizo, sin tener en cuenta la contribución del empozamiento.

Le: Carga de empozamiento de agua.

5.1 Análisis y aplicación de cargas para la infraestructura de subestaciones convencionales

5.1.1 Conexiones con varios tipos de conductores

Los conductores que normalmente se emplean para conectar las subestaciones de alta tensión son:

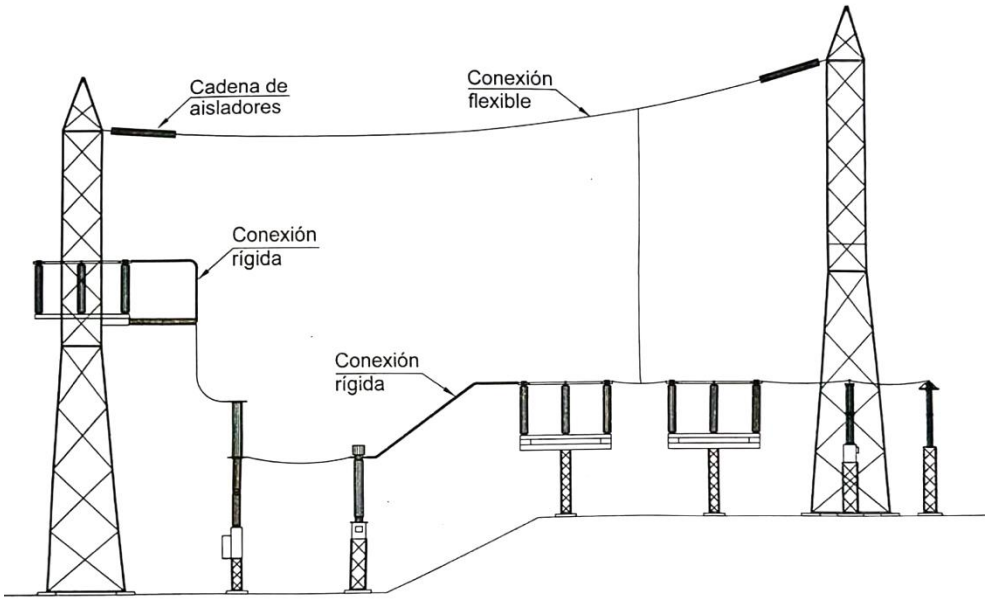
- Conductor de aluminio (AAC “All aluminium conductor”)
- Conductor de aleación de aluminio (AAAC “All aluminium alloy conductor”)
- Conductor de aluminio reforzado con aleación de aluminio (ACAR “Aluminium conductor alloy reinforced”)
- Conductor de aluminio reforzado con acero (ACSR “Aluminium conductor Steel reinforced”)
- Conductor de acero recubierto de aluminio o alumoweld (ACS “Aluminium clad Steel”)
- Cable de acero galvanizado de alta resistencia (EHS “Extra high strength”)

Estos conductores deben garantizar buenas conexiones, soportar los esfuerzos electrodinámicos presentes y disponer de un buen medio de transporte de corriente, adecuado a los niveles de potencia.

Para calcular de los esfuerzos mecánicos de los barrajes se considera la siguiente configuración típica de conexiones para subestaciones (Figura 30):

Figura 30

Configuración de las conexiones en las subestaciones



Nota. Tomado de *Subestaciones de alta y extra alta tensión. Guía práctica de diseño* (HMV Ingenieros Ltda., 2021).

5.1.2 Análisis de cargas para las estructuras que conforman los pórticos.

La metodología propuesta en este documento se desarrolla dentro de los lineamientos presentados, según los planos de disposición física de la subestación eléctrica que se describieron en el capítulo 3. Una vez conocida la configuración se designa la numeración del conjunto de templas (conductores de fase, cables de guarda y bajantes), de acuerdo con las propiedades geométricas equivalentes propias de cada tendido, como el tipo de cable, la longitud de vano, el ángulo de deflexión en el plano de la dirección del tendido y la altura de fijación, que determinen la máxima tensión (figuras 31 y 32).

Figura 31

Isométrico de cargas y localización de templas SE ejemplo

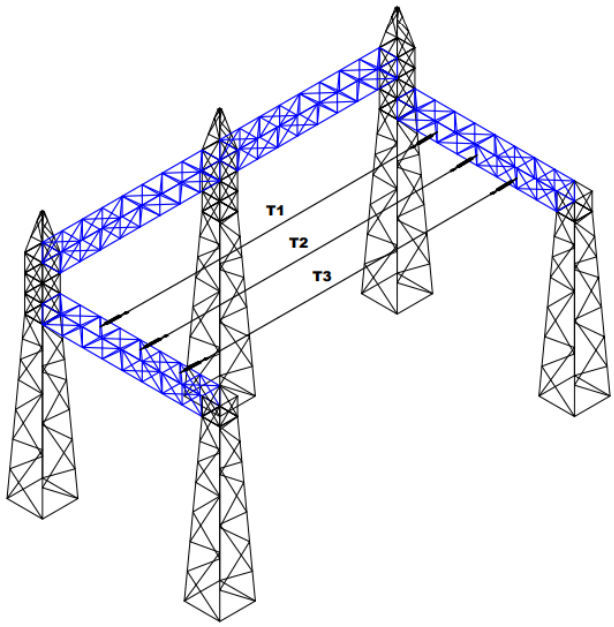
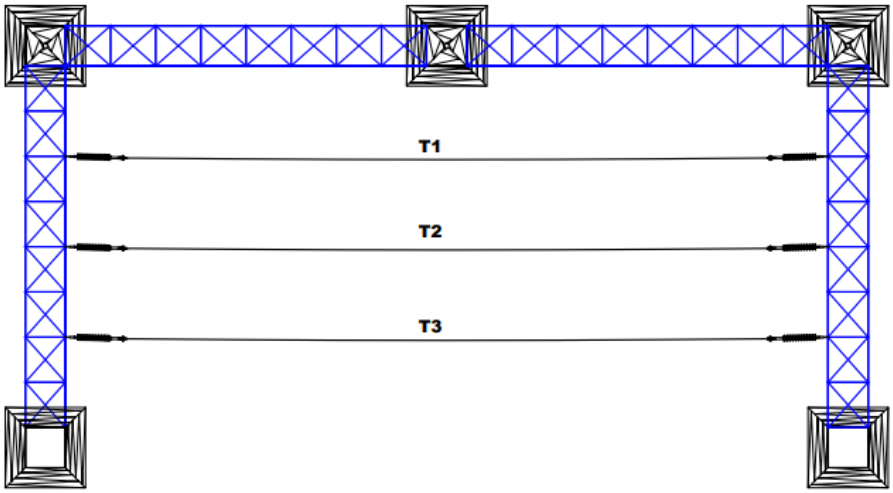


Figura 32

Plano de planta con localización de templas SE ejemplo



En el desarrollo de los cálculos de flechas y tensiones para los conductores y para los cables de guarda, se deben tener en cuenta las cargas durante y después del

cortocircuito en conductores, así como las cargas de viento y sismo que deben soportar los pórticos. Este cálculo se debe desarrollar según el numeral 4.1.3 “Carga de tensión tensión mecánica y cálculo de flechas de los conductores flexibles”. Inicialmente, se debe considerar la disposición general de los pórticos, de tal manera que se tenga claridad en las templas tanto para conductores como para cables de guarda. En la Figura 33, se presentan los parámetros básicos para evaluar las cargas de los pórticos.

Figura 33

Parámetros básicos para evaluar las cargas de los pórticos

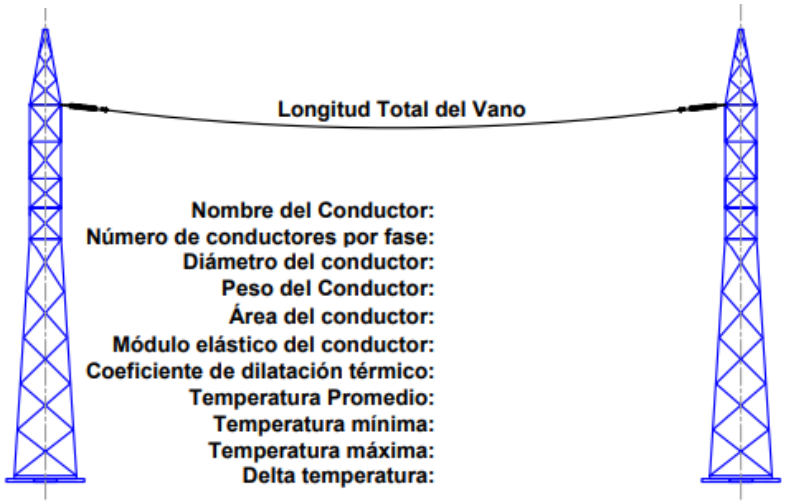


Imagen 9

Conductores conectados en pórticos



5.1.2.1 PARÁMETROS BÁSICOS DE DISEÑO

Se describe a continuación los parámetros generales que son necesarios para el cálculo de flechas y tensiones y cargas de cortocircuito de los conductores

- **Parámetros globales**

  Con estos parámetros se pretende considerar las variaciones de temperatura, junto con las características sísmicas del lugar de la implantación de la subestación (Tabla 4)

  Tabla 4

  Tabla de parámetros globales

PARÁMETROS	UNIDAD
Altura sobre el nivel del mar	(m)
Temperatura ambiente	
Mínima	°C
Media	°C
Máxima	°C
Tipo de suelo	
Zona de amenaza sísmica	(alta, media, baja)
Aceleración pico efectiva Aa	valor
Velocidad horizontal pico efectiva Av	valor
Nivel de contaminación ambiental	
Precipitación media anual, mm/año	valor
Velocidad básica del viento	valor

- **Temperatura (T, °C)**

  Con el fin de conocer las variaciones de los esfuerzos mecánicos en los conductores, se deben evaluar diferentes rangos de flechas y tensiones para diversas condiciones meteorológicas y ambientales de sitio, como la temperatura mínima, la temperatura media (EDS), la temperatura máxima para verificar acercamientos, la temperatura coincidente con la velocidad de viento máxima y las variaciones de temperatura conocidas para las tablas de tendido.

- **Características eléctricas y mecánicas del conductor entre equipos**

  Se deben considerar las características electromecánicas de los conductores para los barrajes dentro de la subestación. En la tabla 5 se presentan los parámetros que se deben tener en cuenta respecto a las características del conductor.

Tabla 5

Características del conductor

DESCRIPCIÓN	UNIDAD
Nombre de la templa (corresponde con el plano)	Nombre
Número de subconductores por fase	Und
Tipo de cable	Nombre
Sección transversal (área)	mm^2
Diámetro	mm
Calibre	kcmil
Masa unitaria	kg/m
Peso unitario	N/m
Tensión de rotura	kN
Módulo de elasticidad	Mpa
Coeficiente de dilatación térmica	/°C

- **Características eléctricas y mecánicas del cable de guarda**

  Se requiere considerar las características electromecánicas del cable de guarda. En la tabla 6 se presentan los parámetros que se deben tener en cuenta.

Tabla 6

Características del cable de guarda

DESCRIPCIÓN	UNIDAD
Nombre de la templa (corresponde con el plano)	Nombre
Tipo de cable	Nombre
Sección transversal (área)	mm^2
Diámetro	mm
Masa unitaria	kg/m
Peso unitario	N/m
Tensión de rotura	kN
Módulo de elasticidad	Mpa
Coeficiente de dilatación térmica	/°C

- **Características de los aisladores**

  La ficha técnica de las cadenas de aisladores previstas en la subestación eléctrica contiene información sobre la longitud *(La,m)*, el peso *(Wa,kN)* y el diámetro *(øa,°)*. Se deben conocer las características que corresponden a cada vano, como la longitud, el nombre de cada uno y el número de conductores por fase que se contemplan en cada cálculo (**Tabla 7**)

Tabla 7

Características de los aisladores

DESCRIPCIÓN	UNIDAD
Longitud de aislador	mm
Resistencia mecánica	Fuerza
Distancia de fuga	mm
Distancia de arco	mm
Peso del aislador	Fuerza

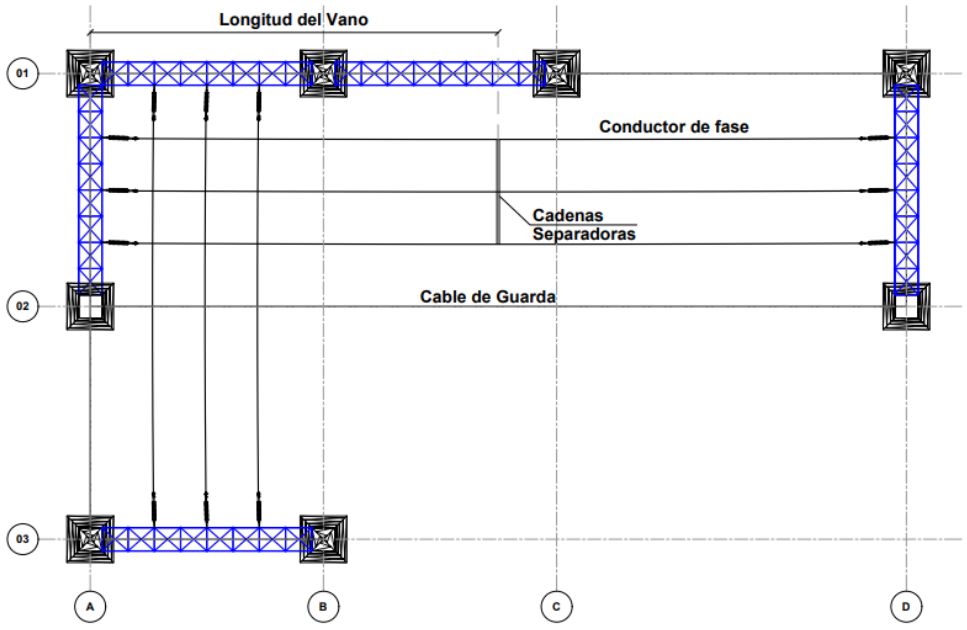
- **Localización del tendido y entidades geométricas**

  Longitud del vano

  Hace referencia a la distancia horizontal entre apoyos, considera la longitud horizontal del conductor junto con la de las cadenas de aisladores. La longitud se desarrolla entre las fijaciones dadas en pórtico-pórtico, pórtico-cadena separadora, pórtico-equipo, pórtico-poste, poste-poste, entre otros entre otros (Figura 34)

Figura 34

Longitud del vano de apoyo de conductores

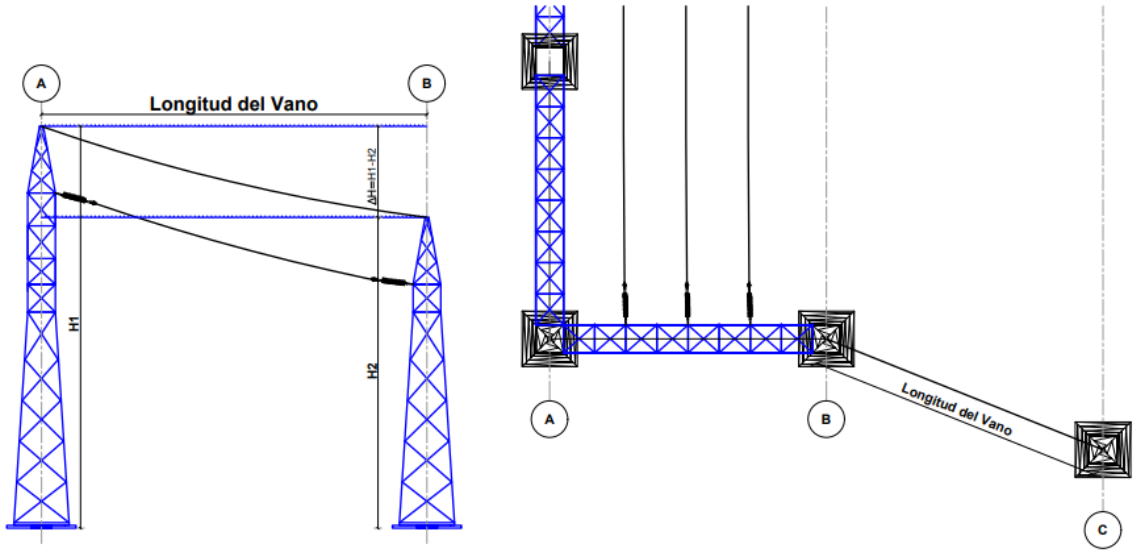


- **Diferencia de altura (Dh, M)**

  Desnivel entre los apoyos o las fijaciones en los extremos del conductor respecto al nivel de adecuación del terreno. Si el desnivel sobre la trayectoria geométrica del conductor permanece constante, entonces ΔH = 0 m. (Figura 35)

Figura 35

Parámetros para Dh y longitudes de los vanos



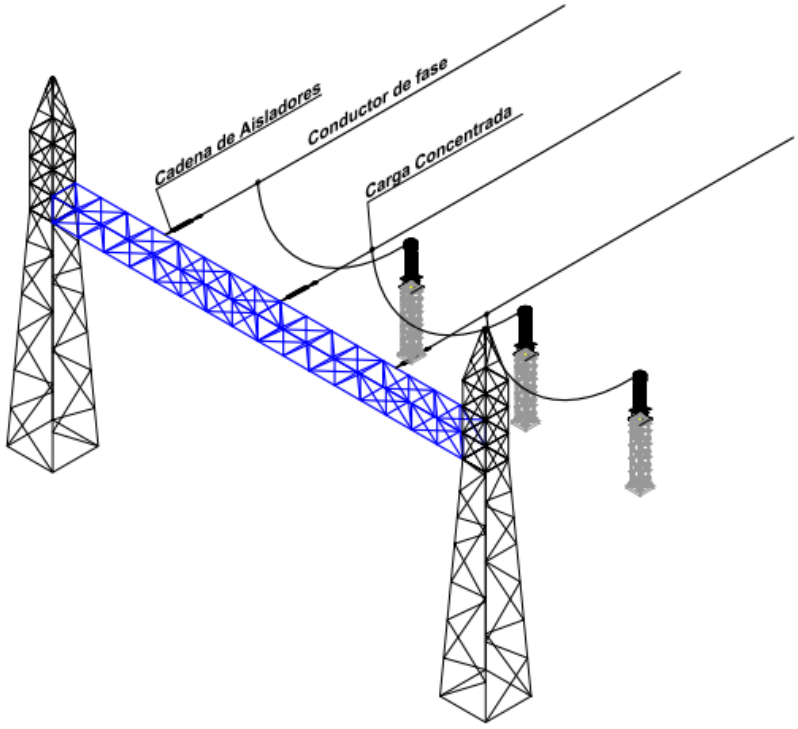
Adicionalmente, se entiende que a mayor diferencia de altura mayor tensión para el apoyo más alto, su porcentaje de participación es mayor al apoyo más bajo debido a la fuerza gravitacional. En este caso, se debe tomar un criterio de carga de acuerdo con el apoyo analizado.

- **Cargas concentradas (bajantes) (Pi, Kn)**

  Las cargas concentradas hacen referencia a los cables dispuestos verticalmente que se encuentran suspendidos de los conductores de fase, en los cuales se debe considerar el peso de los accesorios dispuestos para su conexión (Figura 49). El cálculo de la carga concentrada se desarrolla según la siguiente ecuación:

Figura 36

Esquema de cargas concentradas en los conductores



$$Carga\ concentrada = Longitud\ del\ cable\ suspendido\ x\ Peso\ unitario\ conductor$$

$$(P, kN) \quad = \quad (S, m) \quad x \quad (Wc, \frac{kN}{m})$$

5.1.2.2 CRITERIOS BÁSICOS PARA CALCULAR LAS CARGAS

Con base en las buenas prácticas de la ingeniería y las normas establecidas para el diseño, se han fijado diversos criterios y especificaciones.

5.1.2.2.1 Criterios para el tensionado

Para el diseño de las templas que están entre los pórticos, en el cálculo de las tensiones o las cargas básicas se tiene un parámetro de flecha entre 3% y 4% para el conductor y para el cable de guarda entre el 2% y el 3%. Esta información la recomienda el libro *Líneas de transporte de energía* (Checa, 2004).

Un criterio principal para diseñar las templas del conductor es determinar una tensión básica que conste del 10% de la tensión de rotura del cable conductor. Por su parte, el cable de guarda se calcula para una tensión cuya flecha sea el 90% de la flecha del conductor. Las consideraciones para el cálculo de flechas y tensiones se deben realizar según el numeral 4.1.3 “Cargas de tensión mecánica y cálculo de flechas de los conductores flexibles”.

5.1.2.2.2 CARGAS DE CORTO CIRCUITO

Para el cálculo del cortocircuito es necesario tener presente la norma IEC-60865 (IEC 60865-1, 2013). En ese procedimiento se deben verificar las tensiones máximas durante y después del cortocircuito, teniendo cuidado de validar las distancias de acercamiento entre conductores, de tal manera que no sea menor que la distancia de seguridad fase-fase.

El procedimiento de cálculo de los efectos electromagnéticos sobre conductores flexibles horizontales y verticales (bajantes) se detalla en la norma previamente mencionada que para longitudes de vano inferiores o iguales a 120 m y un 8% de flecha de la longitud de vano. Para vanos más largos, el movimiento del conductor puede derivar en menores tensiones mecánicas que las calculadas usando dichas ecuaciones. En el diseño de estructuras para cortocircuitos trifásicos cabe recordar que el valor máximo de *Ft,d* o *Ff,d* se presenta en dos fases, la tercera fase está sometida solamente a la tensión estática. Los cálculos de cortocircuito se efectúan sobre la base de la fuerza de tracción estática *Fst* existente a la temperatura máxima y mínima de funcionamiento. El valor resultante de cortocircuito corresponde a la tensión por el número de subconductores indicados. Este valor se debe dividir por el número de subconductores. Los cálculos efectuados se realizan de acuerdo con las cargas de tensión estáticas existentes para una temperatura mínima y una máxima; sin embargo, se debe considerar para el caso de tracción más desfavorable (6.1 párr. 4, IEC 60865).

El efecto del cortocircuito se presenta cuando las templas están alineadas horizontalmente. Para los vanos de llegada o salida de la línea, se considera que el efecto de cortocircuito se presenta en la mitad del vano (condición más

desfavorable). Como consecuencia de los cambios de altura y la disposición vertical de las templas en las torres se reduce la longitud en la que el barraje se alinea horizontalmente.

5.1.2.2.2.1 CÁLCULO DE ESFUERZOS DE CORTO CIRCUITO PARA BARRAJES FLEXIBLES

El método para realizar los cálculos de corto circuito se plantea en la norma IEC 60868-1, 2013.

- **Dimensionamiento de los cables conductores por esfuerzos mecánicos de corto circuito**

  Para este cálculo se tienen en cuenta aspectos como longitud de vano más largo [L], distancia entre fases [a], longitud de las cadenas de retención [Li], módulo de Young del cable [E], área del cable [A], masa del cable [m´], número de conductores por fase [n], aceleración de la gravedad [g], rigidez de apoyos en cada extremo [S], temperatura inicial, fuerza de tensión estática de un subconductor [Fsc], fuerza de tensión estática del conjunto de conductores [Fst], flecha inicial a la tensión estática [bc], corriente en cortocircuito simétrica trifásica [Ik3], duración del cortocircuito [Tk1], total de cargas concentradas (conexiones y cadenas de aisladores) [P] y masa equivalente del conductor con las cargas concentradas [m´´].

- **Datos iniciales**

  $I_{k3} =$ Corriente de cortocircuito simétrica trifásica inicial, kA.

  $I_{k2} =$ Corriente de cortocircuito simétrica fase – fase inicial, kA.

  $I_{k2} = \frac{\sqrt{3}}{2} x I_{k3}$

- **Fuerza electromagnética *(F´)* adicional aplicada a la línea en condiciones de corto circuito**

  Para determinar la fuerza electromagnética se consideran los siguientes cálculos:$F' =$ Fuerza electromagnética.

  $r =$ Relación entre la fuerza electromagnética y la fuerza gravitacional.

  $\partial =$ Dirección angular de la fuerza.

  $F' = \left(0.15 * \frac{Ik3^2}{a}\right)$

$r = F'/(n * m'' * g)$

$\partial = \text{Arctan}(r)$

- **Cálculo de la flecha estática en medio del vano**

$bc = \frac{n*m'*g*L^2}{8*F_{st}}$

$n =$ Número de conductores por fase.

$Fst =$ Tensión estática del conductor.

- **Periodo de oscilación del conductor**

El cálculo se realiza de la siguiente manera:

$Tc =$ Período de oscilación del conductor.

$Tc = 2 * \pi * \sqrt{\frac{0.8*bc}{g}} \approx 1.78 * \sqrt{bc}$

$Tr =$ Período de oscilación resultante.

$T = 0.79 * bc^{0.5}$

$Tr = \frac{T}{\sqrt[4]{1+r^2}*\left[1-\frac{\pi^2}{64}*\left(\frac{\partial}{90°}\right)^2\right]}$

Máxima fuerza de tensión resultante durante el cortocircuito (*Ft)*

El cálculo se realiza de la siguiente manera:

$Es =$ Módulo de elasticidad real.

$Nc =$ Rigidez conjunto conductor.

$\zeta =$factor de tensión mecánica del conductor

$\partial k =$ Ángulo de declinación durante o después del cortocircuito.

$\varphi =$ Factor de tracción parámetro de carga.

$\psi =$ factor relativo a la fuerza de tracción en un conductor flexible

$Ft =$ Máxima tensión durante el cortocircuito.

$Nc = \frac{1}{S*L} + \frac{1}{n*Es*A}$

$$Es = \begin{cases} E * \left[0.3 + 0.7 * \sin\left(\frac{90°*Fst}{n*A*\sigma_{fin}}\right)\right] & Si\ \frac{Fst}{n*A} \leq \sigma_{fin} \\ E & Si\ \frac{Fst}{n*A} > \sigma_{fin} \end{cases}$$

$\sigma_{fin} =$ Menor valor del esfuerzo estático, 5x10^{7}N/m^2.

$\zeta = (n * g * m'' * L)^2/(24 * Fst^3 * Nc)$

El vano tendrá oscilaciones después del flujo de corriente, fuera del estado estable, con lo cual la posición se determina con el ángulo de oscilación después del flujo de corriente

$\partial k = \partial * (1 - Cos\left(360^{\circ} * \frac{Tk1}{Tr}\right)$ Si Tk1/Trs <= 0.5

$\partial k = \partial * 2$ Si Tk1/Trs > 0.5

Tk1= Intervalo de tiempo entre el inicio del cortocircuito y el primer corte de la corriente, s. En caso de que se conozca $T_{k1} > 0.4T$ o T_{k1}, se debe tomar Tk1=0.4T en las siguientes condiciones:

$\varphi = 3 * [(1 + r^2)^{0.5} - 1]$ Si Tk1 >= Trs/4

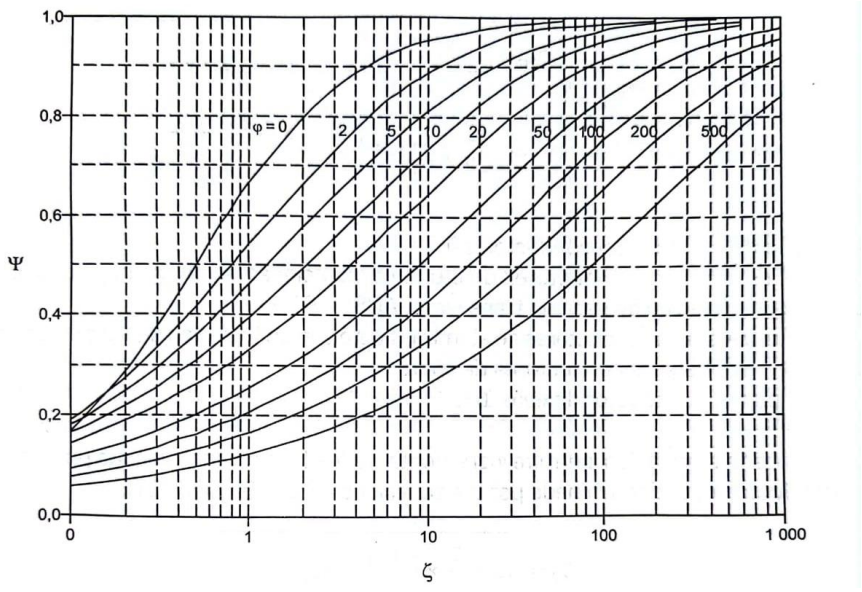
$\varphi = 3 * [r * sen(\partial k) + \cos(\partial k) - 1]$ Si Tk1 >= Trs/4

El factor ψ es una función de los factores φ y z que se puede calcular con la Figura 50 resolviendo la siguiente ecuación:

$\varphi^2 * \psi^3 + \varphi * (2 + \zeta) * \psi^2 + (1 + 2 * \zeta) * \psi - \zeta * (2 + \varphi) = 0$

Figura 37

Factor ψ relativo a la fuerza de tracción en conductores flexibles.



Nota: Tomado de IEC 60868-1, 2013.

La carga radial ψ causa una fuerza de tensión máxima durante el cortocircuito, dada por:

$Ft = k * Fst * (1 + \varphi * \psi)$

Donde *k*= 1 para un conductor por fase y

k= 1.1 para dos conductores por fase

Durante o después del cortocircuito, el ángulo de oscilación máxima (∂m) se calcula de la siguiente manera o con la figura 38

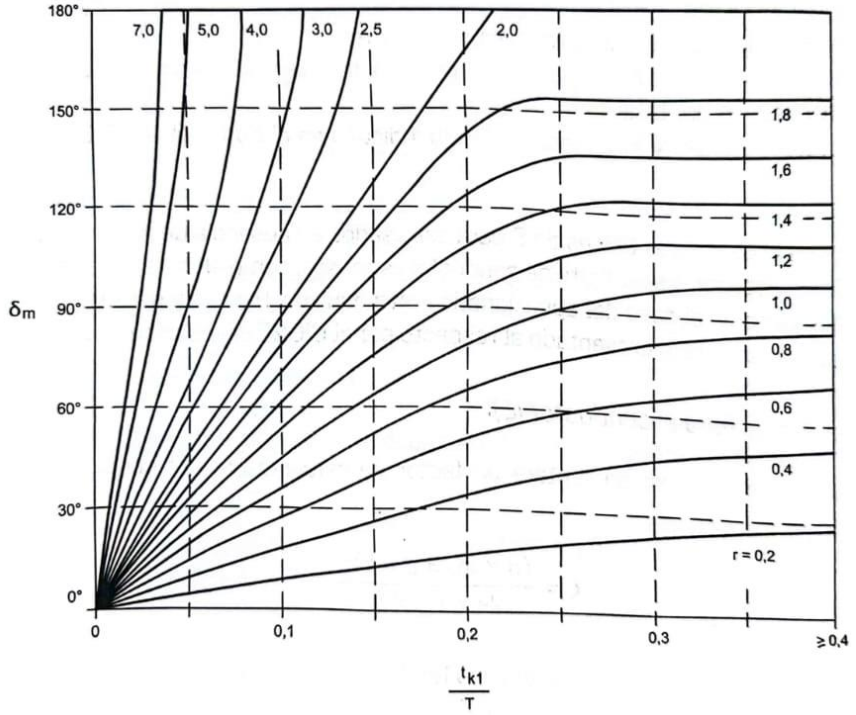
$\partial m =$ Ángulo de declinación máximo durante o después del cortocircuito.

$$x = \begin{cases} 1 - r * sen(\partial k) & Si\ 0 \leq \partial k \leq 90° \\ 1 - r & Si\ (\partial k) > 90° \end{cases}$$

$$\partial m = \begin{cases} 1.25 * \arccos(x) & Si\ 0.766 \leq x \leq 1 \\ 10^{\circ} * \arccos(x) & Si - 0.985 \leq x \leq 0.766 \\ 180° & Si\ x < -0.985 \end{cases}$$

Figura 38

∂m=Ángulo de declinación máximo durante o después del cortocircuito



Nota: Tomado de IEC 60868-1, 2013.

- **Máxima fuerza de tensión resultante después del cortocircuito *(Ff)***

  Ff= Tensión después del cortocircuito causada por el movimiento brusco del conductor

  $$Ff = 1.2 * Fst * \sqrt{1 + 8 * z * \frac{\partial m}{180°}}$$

- **Resumen de tensiones**

  Ft= Máxima fuerza de tensión durante el cortocircuito

  Ff= Máxima tensión después del cortocircuito

  Máxima tensión para el diseño (*F*)

  Máxima carga transversal (***F*L'***)

- **Desplazamiento horizontal del vano y mínima distancia en aire**

  e= Máxima elongación elástica debida al cambio de tensión

  et= Máxima elongación térmica debido al calentamiento por la corriente de cortocircuito

  Cth= Depende del material del conductor

  0.27E-18 m^4/A^2s para conductores de aluminio o aleación de aluminio y conductores de aluminio / acero con una relación de sección transversal $Al/St > 6$

  0.17E-18 m^4/A^2s para conductores de aluminio / acero con una relación de sección transversal $Al/St \leq 6$

  0.088E-18 m^4/A^2s para conductores de cobre

  Nc= Rigidez normal para un conductor flexible, 1/N

  Bct= Máxima flecha en mitad de vano por elongaciones térmicas y elásticas

  Cf= Constante de forma, incrementa la flecha dinámica del vano causado por el cambio de forma en la curva del conductor

  Bh= Máximo desplazamiento horizontal dentro del vano

  Amin= Distancia mínima en mitad del vano

  Cd= Constante de elongación, aumenta la flecha del vano causado por elongaciones térmicas y elásticas del conductor.

$$e = Nc * (Ft - Fst)$$

$$et = \begin{cases} Cth * \left(\frac{I_{k3}}{n*A}\right)^2 * \frac{Trs}{4} & Si\ T_{k1} \geq \frac{Trs}{4} \\ Cth * \left(\frac{I_{k3}}{n*A}\right)^2 * T_{k1} & Si\ T_{k1} < \frac{Trs}{4} \end{cases}$$

$$Cd = \sqrt{1 + \frac{3}{8} * \left(\frac{L}{bc}\right)^2 * (e + et)}$$

$$bct = Cd * bc$$

$$Cf = \begin{cases} 1.05 & Si\ r \leq 0.8 \\ 0.97 + 0.1 * r & Si\ 0.8 < r < 1.8 \\ 1.15 & Si\ r \geq 1.8 \end{cases}$$

Desplazamiento máximo horizontal debido a un cortocircuito en un vano entre dos equipos

$$bh = \begin{cases} Cf * Cd * bc & Si(\partial m) \geq 90° \\ Cf * Cd * bc * sen(\partial m) & Si(\partial m) < 90° \end{cases}$$

Desplazamiento máximo horizontal entre dos cadenas de aisladores

$$bh = \begin{cases} Cf * Cd * bc * sen(\partial) & Si(\partial m) \geq \partial \\ Cf * Cd * bc * sen(\partial m) & Si(\partial m) < \partial \end{cases}$$

$$amin = a - 2 * bh$$

Para calcular la distancia de seguridad mínima se debe realizar la siguiente validación:

$$amin \geq (Dist\ de\ seguridad)/2$$

- **Efecto por fuerza pinch**

  Al presentarse haces de conductores en una falla se genera un aumento de tensión longitudinal en la conexión, lo cual se conoce como efecto pinch (*Fpi*), produciendo una fuerza de atracción que implica que haya un posible choque entre los conductores. Se considera que los conductores chocan, cuando la distancia entre los centros y entre los separadores cumple las siguientes relaciones:

$$\frac{a_s}{d} \leq 2.0 \qquad y \qquad ls \leq 50 * a_s$$

$$\frac{a_s}{d} \leq 2.5 \qquad y \qquad ls \leq 70 * a_s$$

$a_s =$ Distancia entre centros de subconductores, m.

$d =$ Diámetro de un subconductor, m.

$l_s =$ Distancia media entre separadores adyacentes (subvano), m.

Si se chocan los subconductores, la fuerza pinch (*Fpi*) se relaciona con la fuerza de cortocircuito *Ft*, de la siguiente manera:

$$Fpi = 1.1 * Ft$$

Esta fuerza se debe considerar para diseñar las estructuras de soporte, en caso de que sea mayor que la fuerza de tensión antes y después del cortocircuito permite calcular la cantidad de aisladores necesarios para cumplir con las distancias mínimas y evitar que choquen los subconductores.

5.1.2.2.3 Cargas muertas

Están compuestas por el peso propio de los conductores, las conexiones, las cadenas de aisladores, las bajantes a equipos que generan cargas concentradas a lo largo de los conductores y son permanentes, así como por las cargas de mantenimiento. Para el cable de guarda, básicamente, está compuesta por el peso propio de los elementos.

5.1.2.2.4 Cargas de viento

Los cálculos de la carga de viento se deben realizar sobre los conductores usando la metodología del manual ASCE No. 74 (2020), la cual se presentó en el numeral 4.1.6 “Cargas de viento”, considerando la velocidad de viento de ráfaga de 3 s, con un periodo de retorno de 50 años, con la velocidad específica de la zona. Se debe contemplar la categoría de exposición correspondiente a la zona de estudio.

5.1.2.2.5 Cargas de sismo

Es la fuerza máxima que actúa sobre la estructura, producto de movimientos sísmicos, evaluando su ocurrencia con un periodo de retorno mayor de 50 años. Para calcular los árboles de carga se debe tener en cuenta el sismo sobre el conductor y el cable de guarda.

Esta aceleración actúa sobre la estructura como una fuerza horizontal. Para este análisis se debe considerar lo mencionado en el numeral 4.1.7 “Cargas sísmicas”.

5.1.2.3 CÁLCULO DE ÁRBOLES DE CARGA

Para evaluar los árboles de carga se consideran los siguientes aspectos:

- **Parámetros básicos del equipo**
  - $Tipo$ (interruptores de potencia, seccionadores, transformadores de tensión, transformadores de corriente, transformadores de medida no convencionales, pararrayos).
  - $Número\ de\ fases\ del\ equipo$
  - $[He]$ = altura
  - $[We]$ = peso total
  - $[Hm]$ = centroide de masa
  - Cargas dinámicas por accionamientos
  - $[Fvea]$ = en sentido vertical
  - $[Ftea]$ = en sentido transversal
  - $[Flea]$ = en sentido longitudinal

- **Propiedades del conductor**
  - $Tipo\ del\ conductor$
  - $[Ø]$ = diámetro total
  - $[Nc]$ = cantidad de conductores
  - $[Lc]$ = longitud aferente
  - $[wc]$ = masa unitaria
  - $[Fvc]$ = carga vertical actuante
  - $[Flct]$ = tensión longitudinal
  - $[Flcc]$ = carga en condición de cortocircuito longitudinal
  - $[Ftcc]$ = carga en condición de cortocircuito transversal

- **Parámetros del soporte metálico**
  - $[Hs]$ =altura
  - $[Nc]$ =número de columnas
  - $[Bst]$ =lado cara transversal
  - $[Bsl]$ =lado cara longitudinal
  - $[Ws]$ =peso
  - $[\phi\beth]$ =relación de solidez cara transversal
  - $[\phi\lambda]$ =relación de solidez cara longitudinal

- $[Atsop]$ =área neta transversal
- $[Alsop]$ =área neta longitudinal

- **Cálculo de la carga de viento (Tabla 8)**
  - $[Vs]$ =velocidad básica del viento
  - $[Anm]$ =altura sobre el nivel del mar
  - $[\rho]$ =densidad del aire
  - $[Po]$ =presión básica del viento
  - $[C]$ =categoría de exposición
  - $[At]$ =cálculo de área expuesta al viento del equipo
  - $[Hat]$ =centroide de áreas cara transversal / longitudinal
  - $[C_V]$ =Cargas de viento

Tabla 8

Tabla resumen para cálculo de la fuerza del viento

Altura	kz	Área	Cf	F= Po*kz*Cf*A
Conductor [Ftcv]				
Equipo transversal [Ftev]				
Equipo longitudinal [Flev]				
Soporte transversal [Ftsv]				
Soporte longitudinal [Flsv]				

- **Cálculo de carga de sismo**
  - $[Fa]$ = coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de periodos cortos debida a los efectos de sitio.
  - $[Aa]$ = aceleración horizontal pico efectiva de diseño.
  - $[I]$ = coeficiente de importancia.
  - $[Sa]$ = aceleración máxima horizontal.
  - $[R]$ = factor de modificación de respuesta.
  - $[Sa/R]$ = coeficiente sísmico de diseño.
  - $[I]$ = coeficiente de importancia.

- $[Sv/Sh]$ = relación sismo vertical / horizontal.
- $[Ftcs = Flcs]$ = fuerza horizontal en el conductor por sismo.
- $[Fvcs]$ = fuerza vertical en el conductor por sismo.
- $[Ftes = Fles]$ = fuerza horizontal en el equipo por sismo.
- $[Fves]$ = fuerza vertical en el equipo por sismo.
- $[Ftss = Flss]$ = fuerza horizontal en el soporte por sismo.
- $[Fvss]$ = fuerza vertical en el soporte por sismo.

- **Descripción de las cargas**

  Se presenta la tabla 9 con los resúmenes totales de los cálculos de árboles de carga.

Tabla 9

Tabla resumen de los árboles de carga

Descripción	Altura (m)	Numeración templa	Verticales			Transversales					Longitudinales		
			PP	CSV	CM	CV	CB	CBC	CC	CSH	CC	CT	CSH
Conductor	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
Guarda	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)

PP	Peso propio de la estructura
CT	Cargas por tensión mecánica
CC	Cargas sobre conductores por efecto de cortocircuito
CM	Cargas de montaje y mantenimiento
CV	Cargas de viento sobre templas, equipos y estructuras
CS	Cargas por sismo horizontal
CSV	Cargas por sismo vertical en equipos y estructuras
CB	Cargas de ángulo
CBC	Cargas de ángulo en condición de cortocircuito

- **Combinaciones de carga, trabajo y diseño**

  Se aplican las combinaciones de carga descritas en el numeral 4.1 “Combinaciones de carga para diseño de estructuras”, según la AISC 113.

  Combinaciones: [*P1, P2, P3x, P4y, P5, P5x+, P5x-, P5y+, P5y-, P6+, P6-, P7x, P7y*]

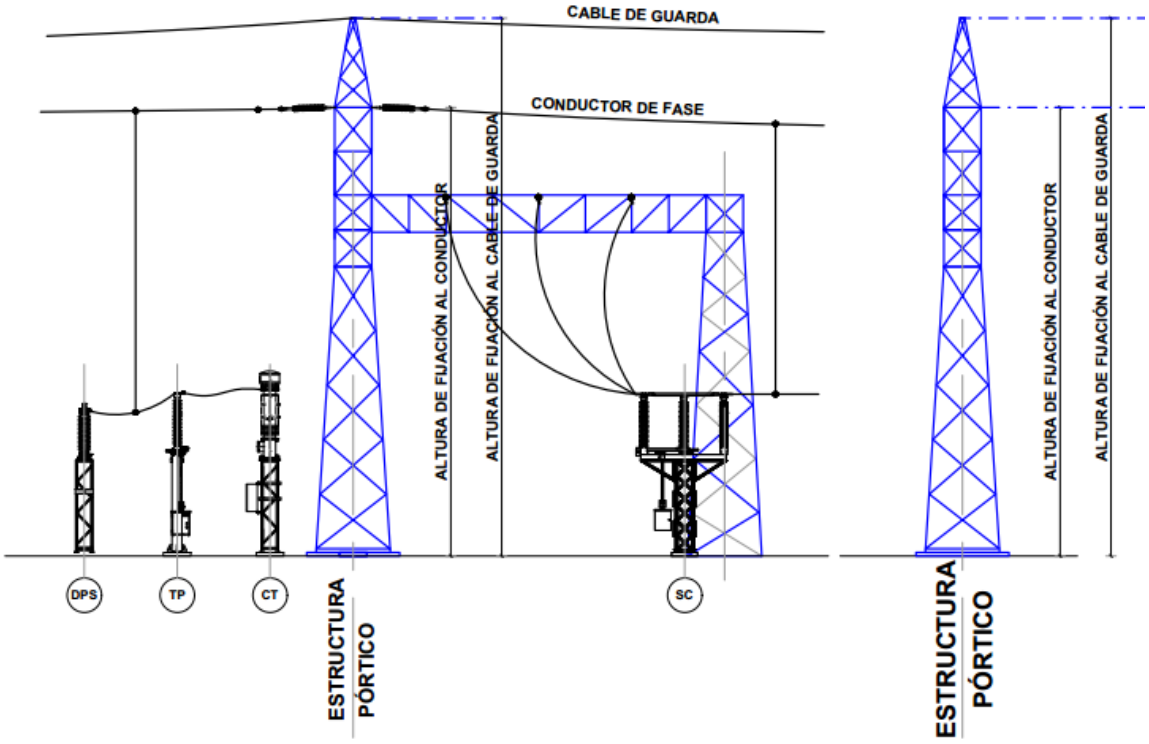
- **Ubicación de los árboles de cargas**

  Alturas de fijación

  Corresponde a la elevación en la que se encuentra el punto de fijación del tendido con respecto al nivel de adecuación del terreno. Totaliza la altura que sobresale del pedestal sobre el nivel de adecuación del terreno y la altura de fijación de la estructura metálica. (Figura 39)

Figura 39

Alturas de fijación

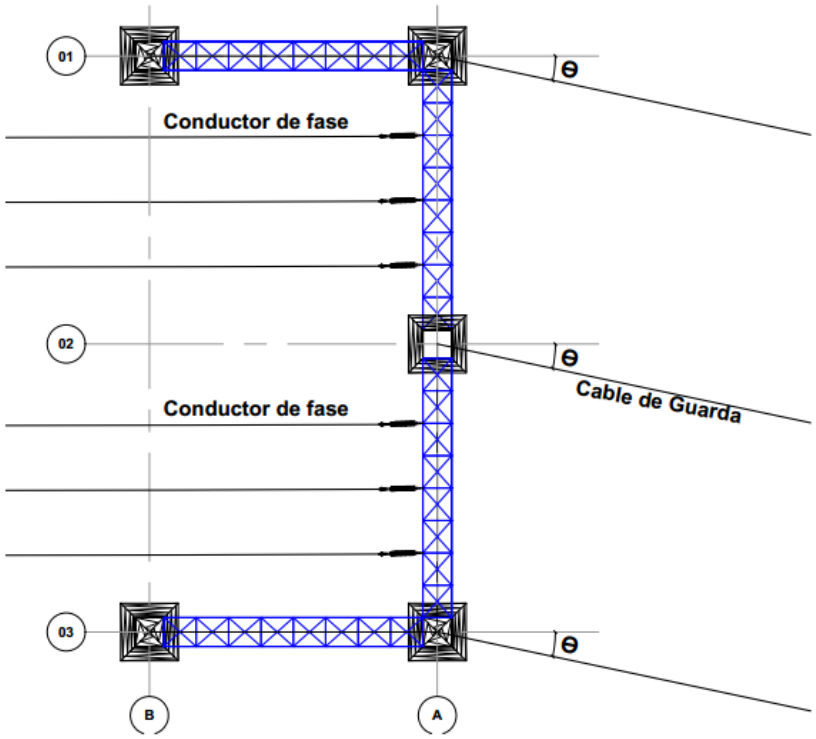


Ángulos de deflexión (Ɵ°)

El ángulo de deflexión se toma respecto al eje longitudinal del conductor (orientación de tendido del conductor). (Figura 40).

Figura 40

Representación de los ángulos de fase



A continuación, se presenta la aplicación de los árboles de carga según cada equipo de patio que se analice (Figura 41).

Figura 41

Disposición típica de cargas de cable de guarda

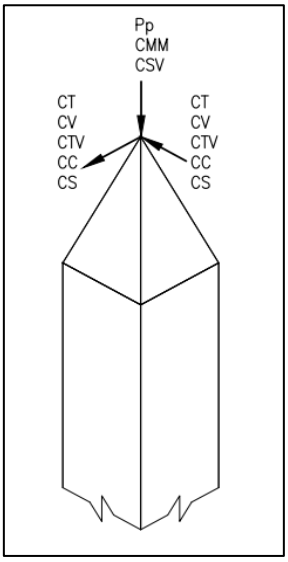
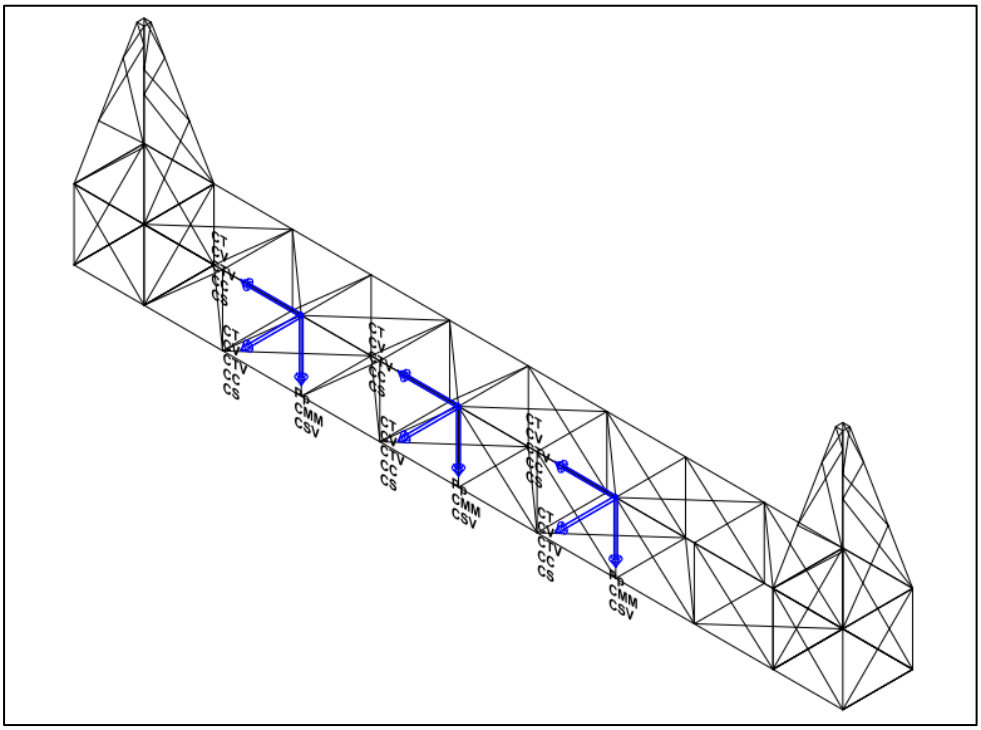


Figura 42

Representación árboles de carga de las conexiones de los conductores



5.1.3 Configuración estructural típica para pórticos

5.1.3.1 Configuración estructura metálica para pórticos (torres sencillas)

A renglón seguido se muestran las configuraciones típicas para la estructura metálica de pórticos con torres sencillas (Figura 43, Figura 44).

Figura 43

Configuración típica para pórticos metálicos

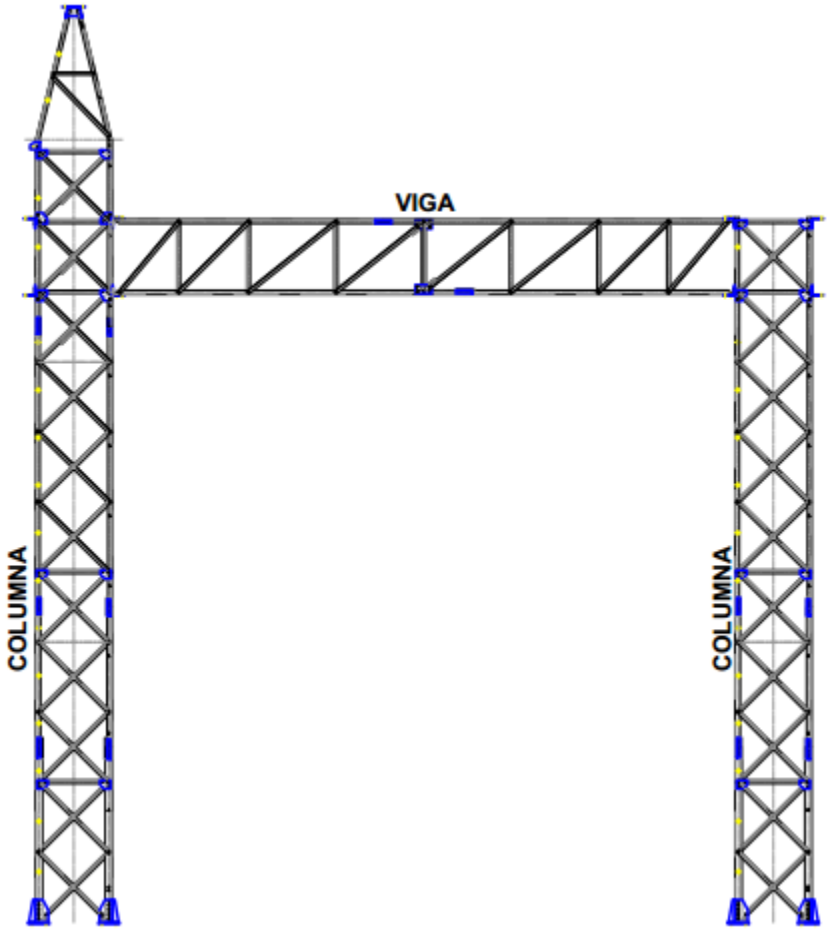
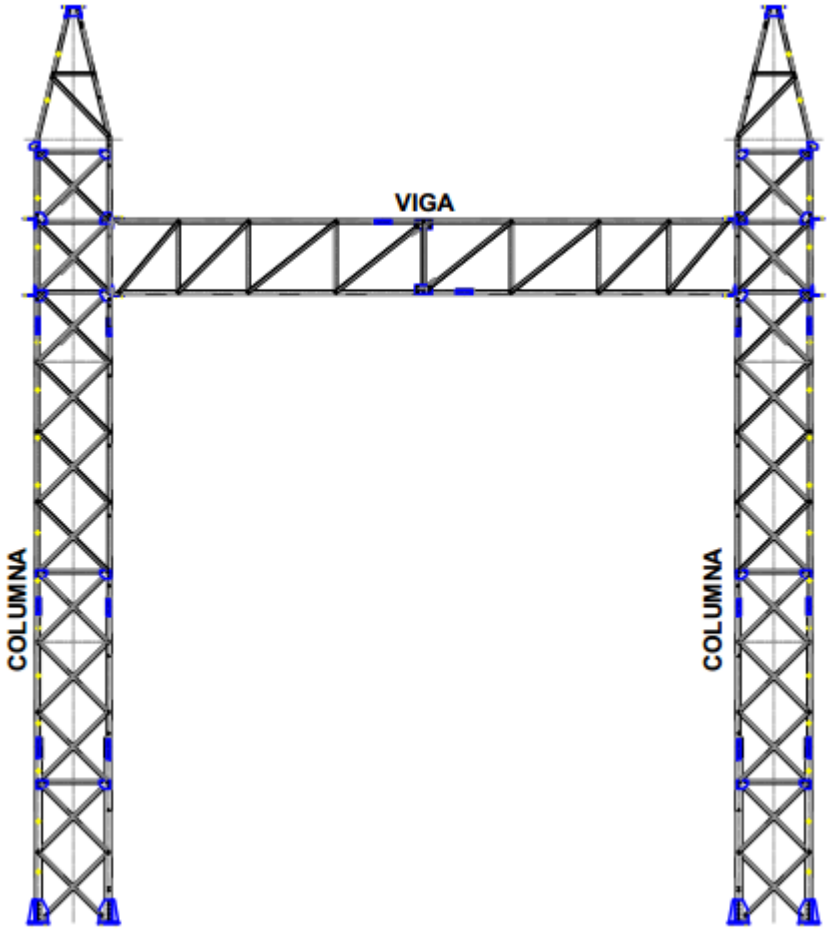


Figura 44

Configuración típica para pórticos metálicos 2



5.1.3.2 Configuración de una estructura metálica para pórticos conectados

Seguidamente se presentan las configuraciones típicas para la estructura metálica de pórticos conectados Figura 62 y 46.

Figura 45

Configuraciones típicas para la estructura metálica de pórticos conectados

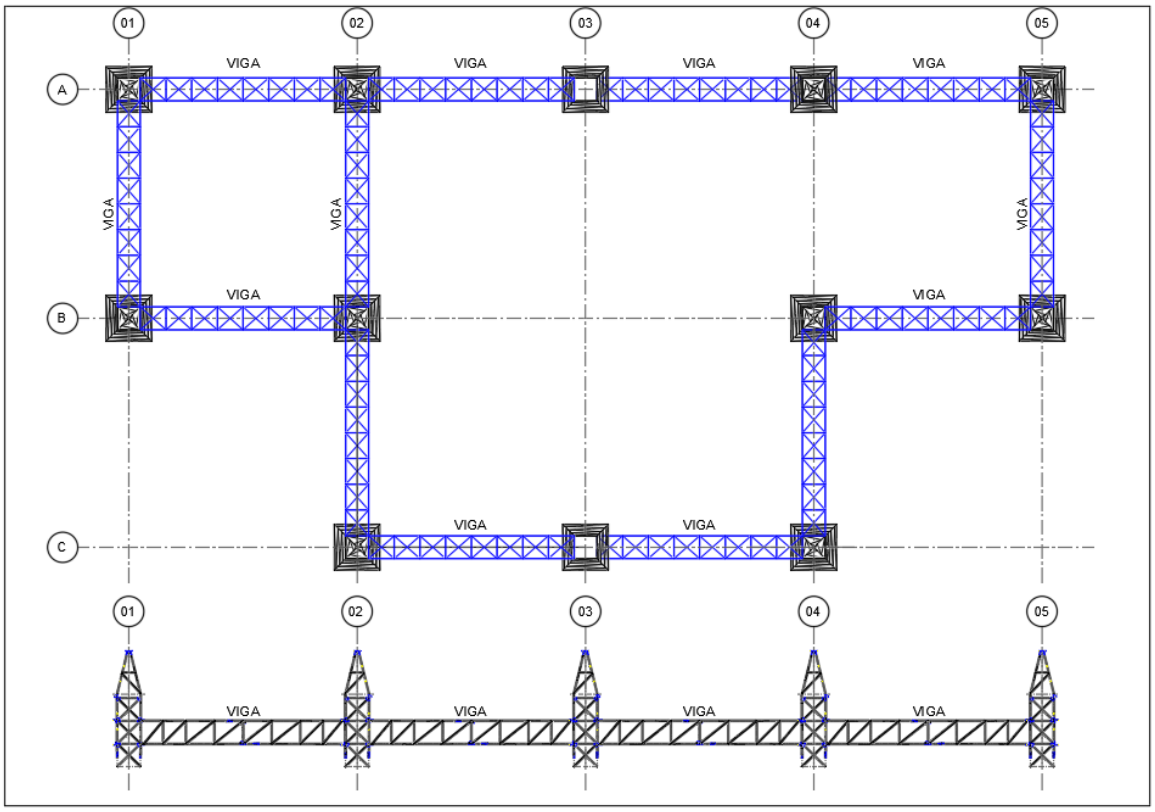
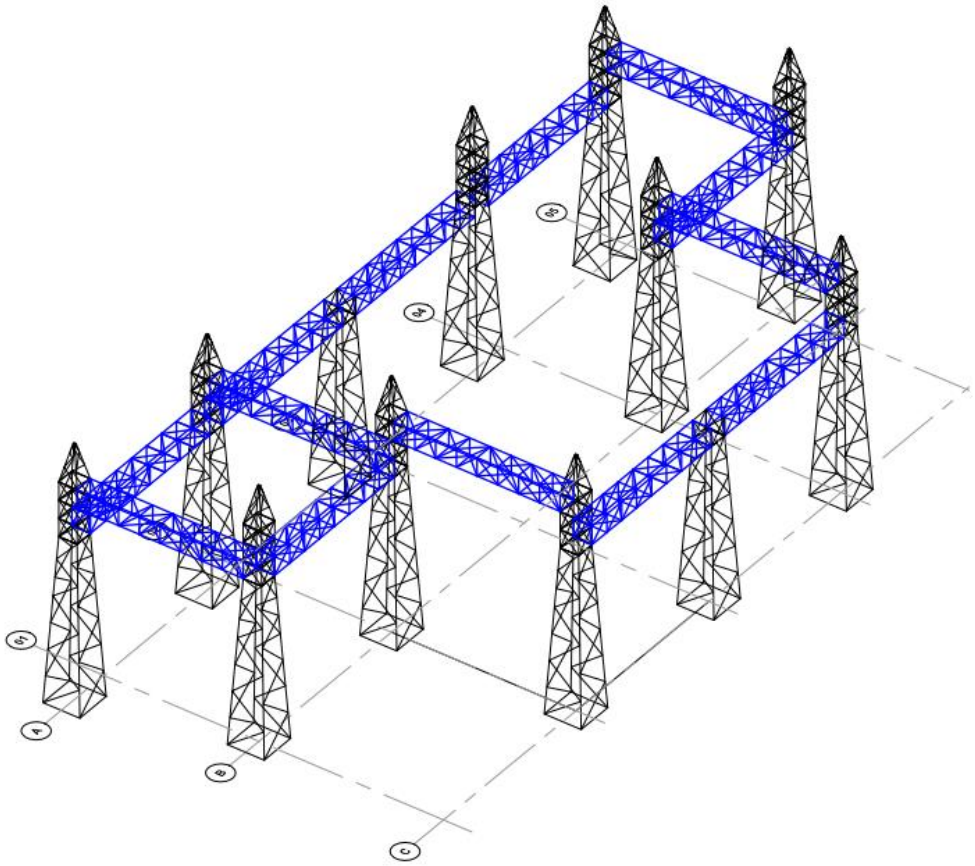

01
02
03
04
05
A
B
C
VIGA
VIGA
VIGA

Figura 46

Modelos de los pórticos



5.1.4 Análisis y aplicación de cargas para las estructuras metálicas que soportan los equipos de patio

Entre los equipos de patio se encuentran los siguientes tipos:

- Interruptores de potencia
- Seccionadores
- Transformadores de tensión
- Transformadores de corriente
- Transformadores de medida no convencionales
- Pararrayos
- Trampas de onda

Se presentan los criterios para el dimensionamiento y las consideraciones que permiten calcular los árboles de carga para elaborar los análisis estructurales y el diseño de las estructuras metálicas de soportes de equipos de patio para las subestaciones convencionales aisladas con aires, a partir de los cuales se puedan obtener las cargas al nivel del pedestal para diseñar las cimentaciones. Estos cálculos se deben realizar con base en las especificaciones de las normas AISC, ANSI, Reglamento Colombiano de Construcciones Sismorresistentes 2010, entre otros. Se presentan las secciones típicas de los soportes que se deben fabricar, así como su geometría, descripción y detalles de los elementos que los conforman.

Adicionalmente, es necesario tener en cuenta las conexiones de alta tensión en subestaciones aisladas con aire, como se evaluó previamente en el capítulo 3. Respecto a la disposición física de las subestaciones, se evidencia el uso de conexiones por medio de conductores flexibles o rígidos, empleando diferentes aisladores.

5.1.4.1 Cálculo de flechas y tensiones del conductor flexible

La flecha es la distancia vertical entre el punto más bajo del conductor y su punto de sujeción. La tensión mínima puede estimarse a la máxima temperatura, con base en la flecha máxima permitida, y la tensión máxima con base en el viento máximo o a la temperatura mínima, dependiendo del lugar en el que se encuentre ubicada la subestación.

Los siguientes parámetros se deben tener en cuenta para dichos cálculos:

1. Estos cálculos se deben desarrollar para cada uno de los equipos de patio que se encuentran en la subestación convencional.
2. Se debe contar con el conductor que se va a emplear, el cual se selecciona a través de los requerimientos del proyecto y se establece según necesidad del área eléctrica.
3. Se inicia con las características eléctricas y mecánicas del conductor.
4. Los criterios de diseño de la subestación ya deben estar planteados.

Para el desarrollo de este cálculo se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones, como se muestra en la (Figura 49)

- **El conductor.** Características como calibre, área, diámetro, masa unitaria, tensión de rotura, módulo de elasticidad y coeficiente de dilatación lineal.
- **Cadenas.** Considerar tipo, peso, longitud y diámetro.
- **Vano horizontal.** Se debe tomar la mayor longitud del conductor que conecta un equipo a otro. A continuación, se muestra la forma como se debe tomar la medida (Figura 47 y Figura 48)
- **Diferencia de altura**

Para los cálculos se consideran las siguientes condiciones de análisis

- EDS (Every Day Stress): Temperatura ambiente media.
- Viento máximo: Temperatura coincidente.
- Temperatura mínima de operación: Temperatura mínima.
- Temperatura máxima de operación: normalmente 75 °C (a menos que en los criterios se indique una temperatura mayor).
- Tendido: 10 °C, 15 °C, 20 °C, 25 °C, 30 °C.

Estas consideraciones permiten determinar las flechas del conductor en cada condición evaluada.

- El valor de la presión de viento se indica únicamente en la condición de viento máximo, que se debe calcular de acuerdo con el manual ASCE 74.
- El porcentaje de flecha permitida debe estar entre 3% y 4%.

Figura 47

Ejemplo de vano horizontal, centro a centro del equipo.

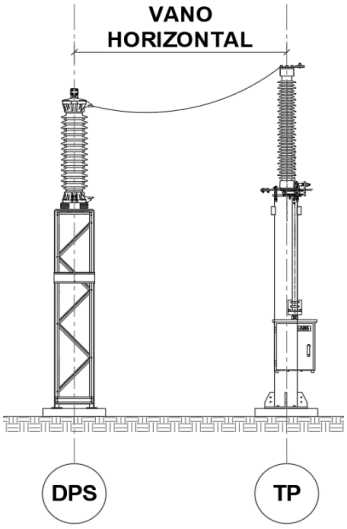


Figura 48

Ejemplo de vano horizontal, conexión con seccionador, centro del polo al centro del equipo.

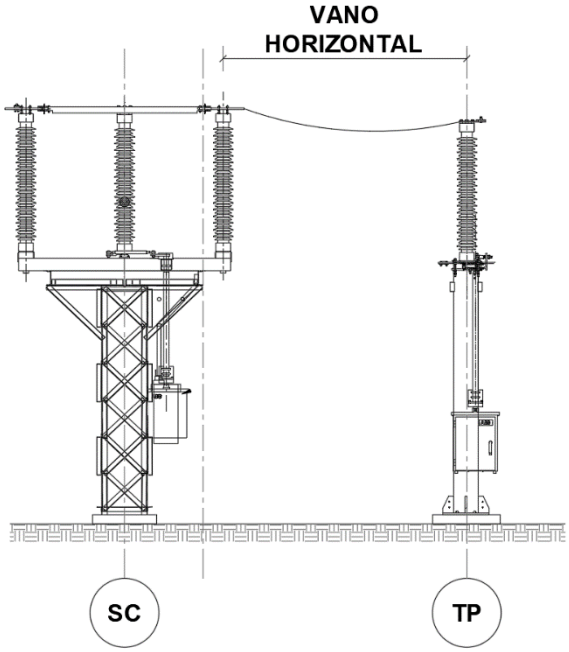
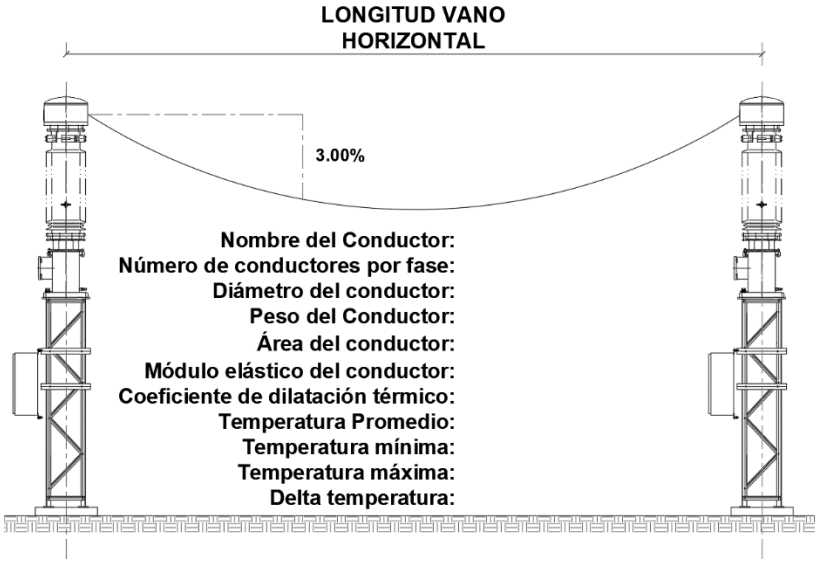


Figura 49

Consideraciones para el cálculo de flechas y tensiones de la conexión entre equipos



5.1.4.2 CÁLCULO DE ESFUERZOS DE CORTO CIRCUITO PARA BARRAJES FLEXIBLES

El método para realizar los cálculos de cortocircuito se plantea en la norma IEC 60865-1, 2013.El cortocircuito se define como una conexión de relativamente baja resistencia entre dos o más puntos de un circuito, que normalmente están a tensiones diferentes.

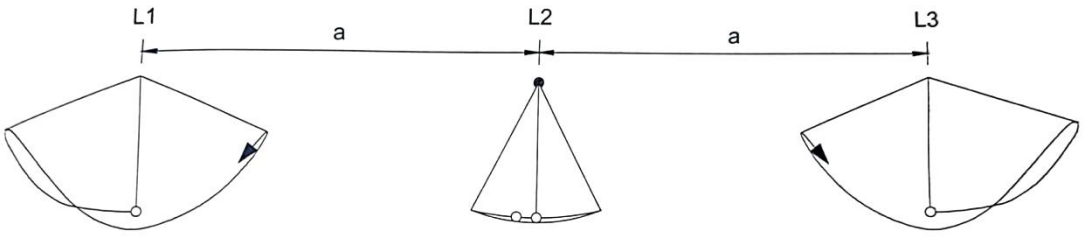
El cortocircuito en un barraje flexible se comporta de la siguiente manera (Checa, 2004) (Figura 50)

En el primer caso, las fases L1 y L3 tienen un movimiento brusco hacia el exterior de la fase L2. La fase central oscila suavemente debido a su inercia y a las fuerzas alternativas bidireccionales que actúan en ella, provocadas por las fases exteriores.

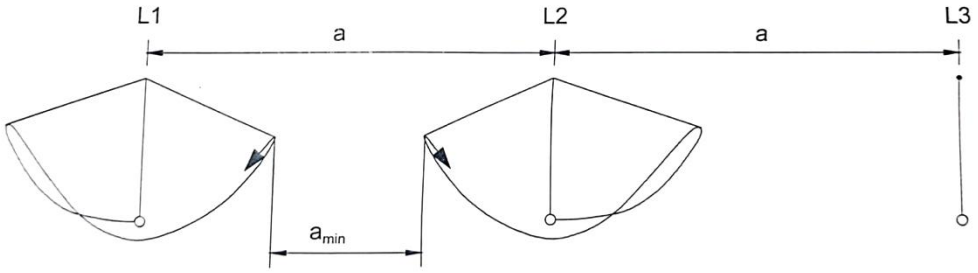
En el segundo caso (b), para cortocircuitos fase-fase, la oscilación del conductor implica la disminución de las distancias entre conductores (*a min*= distancia mínima de seguridad) adyacentes.

Figura 50

Oscilación de fases durante y después de cortocircuito trifásico



a) Oscilación de fases durante y después de cortocircuito trifásico



b) Oscilación de fases durante y después de cortocircuito fase-fase

Nota. Tomado de *Subestaciones de alta y extra alta tensión. Guía práctica de diseño* (HMV Ingenieros Ltda., 2021).

Para calcular los efectos del cortocircuito se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- **Dimensionar los cables conductores por esfuerzos mecánicos de cortocircuito**

  Para este cálculo se deben tomar en cuenta los siguientes aspectos: longitud del vano más largo $[L]$, distancia entre fases $[a]$, longitud de las cadenas de retención $[Li]$, módulo de Young del cable $[E]$, área del cable $[A]$, masa del cable $[m´]$, número de conductores por fase $[n]$, aceleración de la gravedad $[g]$ y rigidez de apoyos en cada extremo $[S]$.

- **Ingresar los datos del cálculo de flechas y tensiones**

  Se deben tener en cuenta los datos para las condiciones de viento máximo, de temperatura mínima y de temperatura máxima, y con cada condición distinta de temperatura se deben incluir los cálculos de las fuerzas de tensión estática de un subconductor $[Fsc]$, de la fuerza de tensión estática del conjunto de conductores $[Fst]$, de la flecha inicial a la tensión estática $[bc]$, de la corriente en cortocircuito simétrica trifásica $[Ik3]$, de la duración del cortocircuito $[Tk1]$, del total de cargas concentradas (conexiones y cadenas de aisladores) $[P]$ y de la masa equivalente del conductor con las cargas concentradas $[m´´]$.

  Así mismo, se debe analizar la tensión resultante durante y después del cortocircuito, con base en el numeral 6 de la norma IEC-60865-1.

- **Fuerza electromagnética (F´) adicional aplicada a la línea en condiciones de cortocircuito**
- Para determinar la fuerza electromagnética se deben hacer los siguientes cálculos:

  $F' =$ Fuerza electromagnética.

  $r =$ Relación entre la fuerza electromagnética y la fuerza gravitacional.

  $\partial =$ Dirección angular de la fuerza.

  $F' = \left(0.15 * \frac{Ik3^2}{a}\right)$

  $r = F'/(n * m'' * g)$

  $\partial = \text{Arctan}(r)$

- **Cálculo de la flecha estática en medio del vano**

  $bc = \frac{n*m'*g*L^2}{8*F_{st}}$

  $n =$ Número de conductores por fase.

  $Fst =$ Tensión estática del conductor.

- **Periodo de oscilación del conductor**

  El cálculo se realiza de la siguiente manera:

  $Tc =$ Periodo de oscilación del conductor.

  $Tc = 2 * \pi * \sqrt{\frac{0.8*bc}{g}} \approx 1.78 * \sqrt{bc}$

  $Tr =$ Periodo de oscilación resultante.

  $T = 0.79 * bc^{0.5}$

$$Tr = \frac{T}{\sqrt[4]{1+r^2} * \left[1 - \frac{\pi^2}{64} * \left(\frac{\partial}{90^\circ}\right)^2\right]}$$

- **Máxima fuerza de tensión resultante durante el cortocircuito (Ft)**

  El cálculo se realiza de la siguiente manera:

  $Es =$ Módulo de elasticidad real.

  $Nc =$ rigidez conjunto conductor – estructura de soporte

  $\zeta =$factor de tensión mecánica del conductor

  $\partial k =$ Ángulo de declinación durante o después del cortocircuito.

  $\varphi =$ Factor de tracción parámetro de carga.

  $\psi =$ factor relativo a la fuerza de tracción en un conductor flexible

  $Ft =$ Máxima tensión durante el cortocircuito.

  $$N = \frac{1}{S*L} + \frac{1}{n*Es*A}$$

  $$Es = \begin{cases} E * \left[0.3 + 0.7 * \sin\left(\frac{90^\circ * Fst}{n*A*\sigma_{fin}}\right)\right] & Si\ \frac{Fst}{n*A} \leq \sigma_{fin} \\ E & Si\ \frac{Fst}{n*A} > \sigma_{fin} \end{cases}$$

  $\sigma_{fin} =$ Menor valor del esfuerzo estático, 5x10^{7}N/m^2.

  $\zeta = (n * g * m'' * L)^2/(24 * Fst^3 * Nc)$

  El vano tiene oscilaciones después del flujo de corriente, fuera del estado estable, con lo cual la posición se determina con el ángulo de oscilación después del flujo de corriente.

  $\partial k = \partial * (1 - Cos\left(360^\circ * \frac{Tk1}{Tr}\right)$ Si Tk1/Trs <= 0.5

  $\partial k = \partial * 2$ Si Tk1/Trs > 0.5

  Tk1= Intervalo de tiempo entre el inicio del cortocircuito y el primer corte de la corriente, s. En caso de que $T_{k1} > 0.4T$ o T_{k1} sea desconocido, se debe tomar Tk1=0.4T en las siguientes condiciones:

  $\varphi = 3 * [(1 + r^2)^{0.5} - 1]$ Si Tk1 >= Trs/4

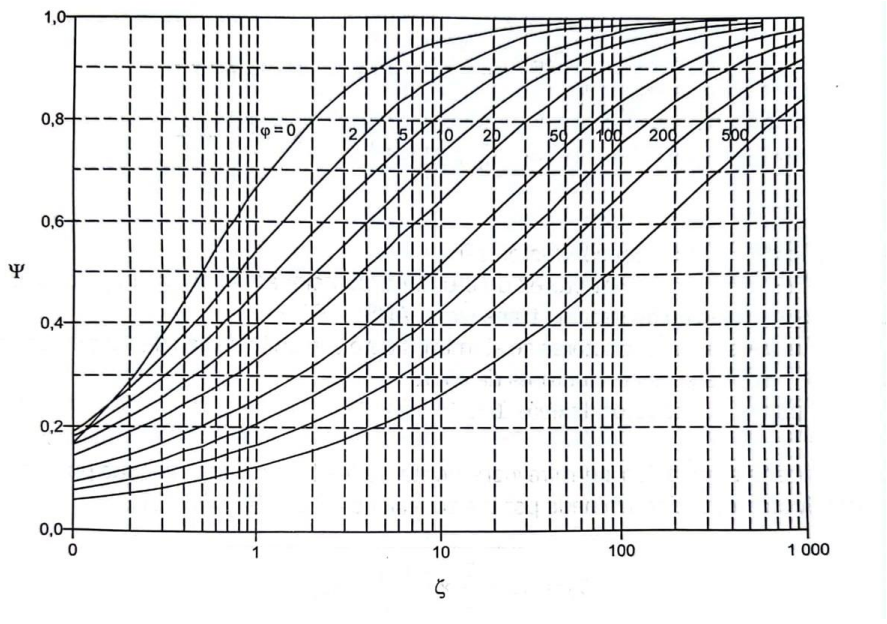
  $\varphi = 3 * [r * sen(\partial k) + \cos(\partial k) - 1]$ Si Tk1 >= Trs/4

  El factor ψ es una función de los factores φ y z, y se puede calcular con la figura 51 o resolviendo la siguiente ecuación, en la que se despeja ψ:

$$\varphi^2 * \psi^3 + \varphi * (2 + \zeta) * \psi^2 + (1 + 2 * \zeta) * \psi - \zeta * (2 + \varphi) = 0$$

Figura 51

Factor ψ relativo a la fuerza de tracción en conductores flexibles.



Nota: Tomado de IEC 60868-1, 2013.

La carga radial ψ causa una fuerza de tensión máxima durante el cortocircuito, dada por:

$Ft = k * Fst * (1 + \varphi * \psi)$

Donde k= 1 para un conductor por fase y k= 1.1 para dos conductores por fase

Durante o después del cortocircuito el ángulo de oscilación máxima (∂m) se calcula de la siguiente manera o con la figura 52.

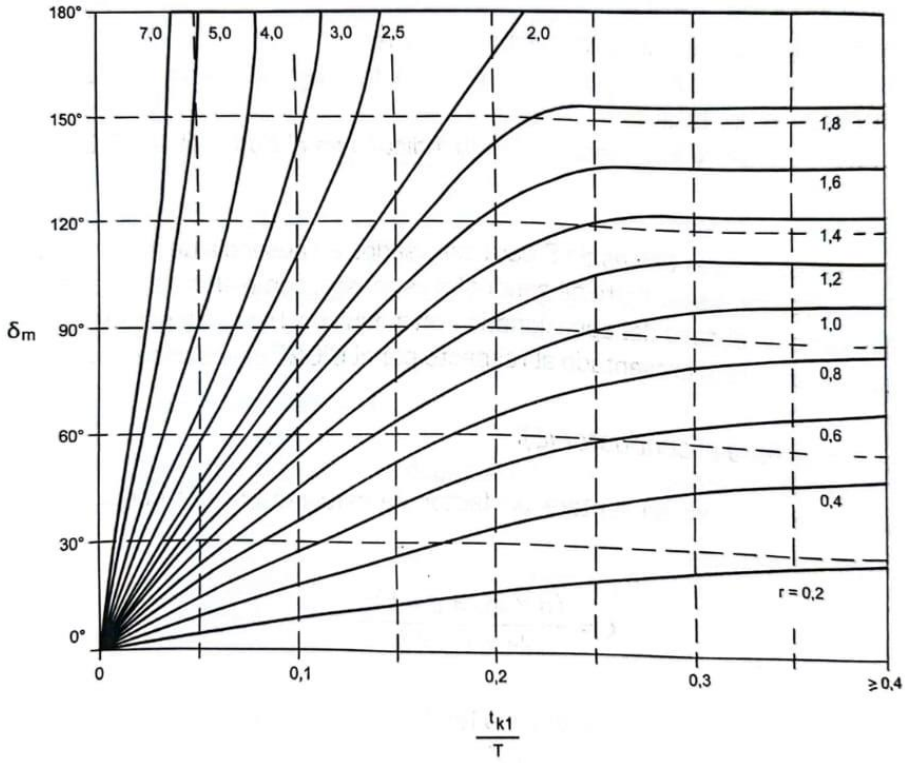
$\partial m =$ Ángulo de declinación máximo durante o después del cortocircuito.

$$x = \begin{cases} 1 - r * sen(\partial k) & Si\ 0 \leq \partial k \leq 90° \\ 1 - r & Si\ (\partial k) > 90° \end{cases}$$

$$\partial m = \begin{cases} 1.25 * \arccos(x) & Si\ 0.766 \leq x \leq 1 \\ 10^{\circ} * \arccos(x) & Si - 0.985 \leq x \leq 0.766 \\ 180° & Si\ x < -0.985 \end{cases}$$

Figura 52

∂m=Ángulo de declinación máximo durante o después del cortocircuito



Nota: Tomado de IEC 60868-1, 2013.

- **Máxima fuerza de tensión resultante después del cortocircuito (Ff)**

  Ff= Tensión después del cortocircuito causada por el movimiento brusco del conductor.

  $$Ff = 1.2 * Fst * \sqrt{1 + 8 * z * \frac{\partial m}{180°}}$$

- **Cálculo pinch force (*Fpi*)**

  Los haces de conductores en una falla aumentan la tensión longitudinal en la conexión, lo cual se conoce como efecto pinch (*Fpi*), produciendo una fuerza de atracción entre los conductores y un posible choque entre ellos. Los conductores chocan cuando las distancias entre los centros y entre los separadores cumplen las siguientes relaciones:

$$\frac{a_s}{d} \leq 2.0 \qquad y \qquad ls \leq 50 * a_s$$

$$\frac{a_s}{d} \leq 2.5 \qquad y \qquad ls \leq 70 * a_s$$

$a_s =$ Distancia entre centros de subconductores, m.

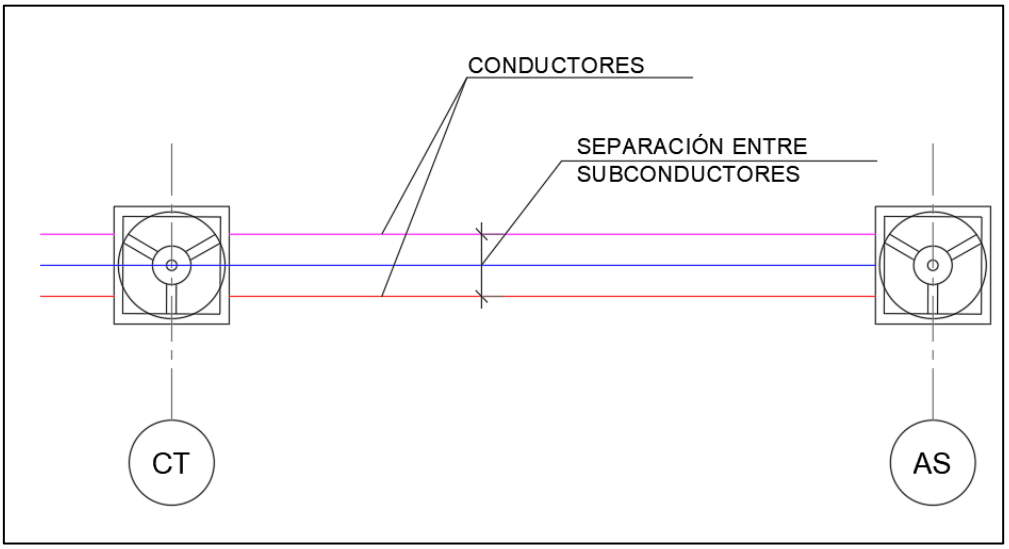
$d =$ Diámetro de un subconductor, m.

$l_s =$ Distancia media entre separadores adyacentes (subvano), m.

- La separación (*as*) corresponde a la distancia entre dos subconductores.

Figura 53

Esquema de separación de conductores



- Teniendo en cuenta que este análisis es para equipos, la separación (*ds*) corresponde a la distancia entre estos o los puntos de conexión.
  La fuerza del cortocircuito está dada por la siguiente ecuación:

$$Fv = (n-1) * \frac{\mu_0}{2\pi} * \left(\frac{I_{k3}}{n}\right)^2 * \frac{ls}{as} * \frac{v2}{v3}$$

- En caso de un sistema monofásico de dos conductores, I_{k3} se sustituye por I_{k2} o según especificación de la norma IEC 60865-1 (2013).
- El valor de V2, se obtiene de acuerdo con la Figura 54 de la norma IEC-60865-1.

Figura 54

V2 como función de V1

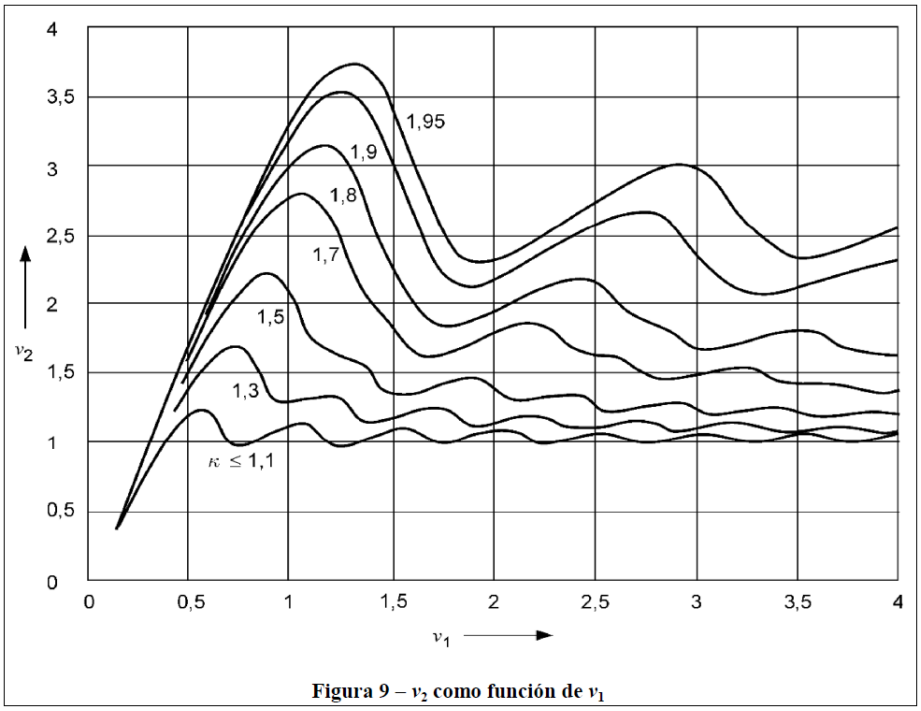


Figura 9 – v_2 como función de v_1

Nota. Tomado de IEC 60865-1 (2013).

- El cálculo del valor V1 se presenta con la siguiente ecuación:

$$V1 = f * \frac{1}{\sin\frac{180°}{n}} * \sqrt{\frac{(as - d) * m'}{\frac{\mu_0}{2\pi} * \left(\frac{I_{k3}}{n}\right)^2 * \frac{n-1}{as}}}$$

El valor V3 está supeditado a la función as/d, como se presenta en la Figura 55.

Figura 55

V3 como función de as/d

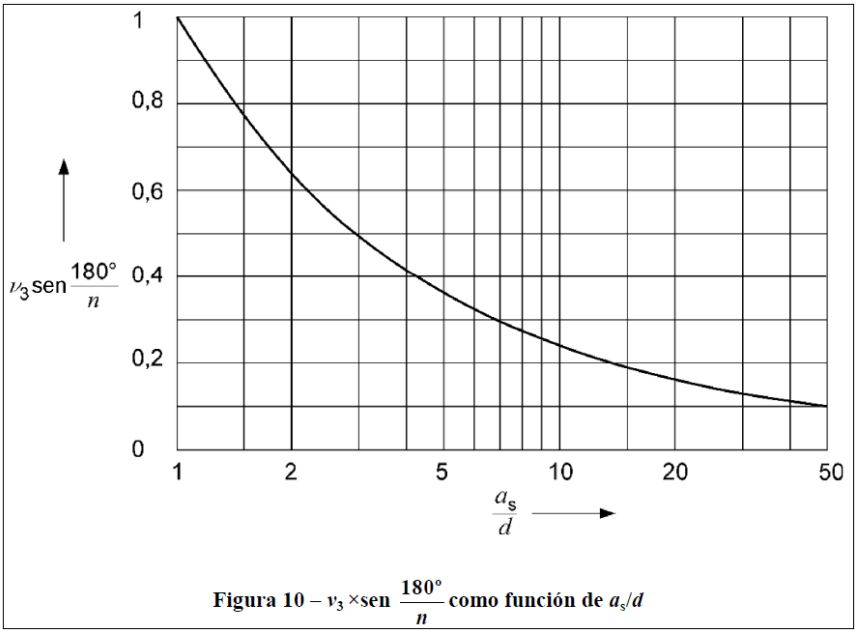


Figura 10 – $v_3 \times \text{sen} \frac{180°}{n}$ como función de a_s/d

Nota. Tomado de IEC 60865-1 (2013).

Otro aspecto importante es la revisión de las deformaciones debidas a la fuerza *Fpi*, que caracterizan la contracción de los haces de conductores. Estas deformaciones se calculan con base en las siguientes ecuaciones:

$$\varepsilon_{st} = 1.5 * \frac{Fst * ls^2 * N}{(a_s - d)^2} * \left(\sin\frac{180°}{n}\right)^2$$

$$\varepsilon_{st} = 0.375 * n * \frac{Fv * ls^3 * N}{(a_s - d)^3} * \left(\sin\frac{180°}{n}\right)^3$$

$$j = \sqrt{\frac{\varepsilon_{pi}}{1 + \varepsilon_{st}}}$$

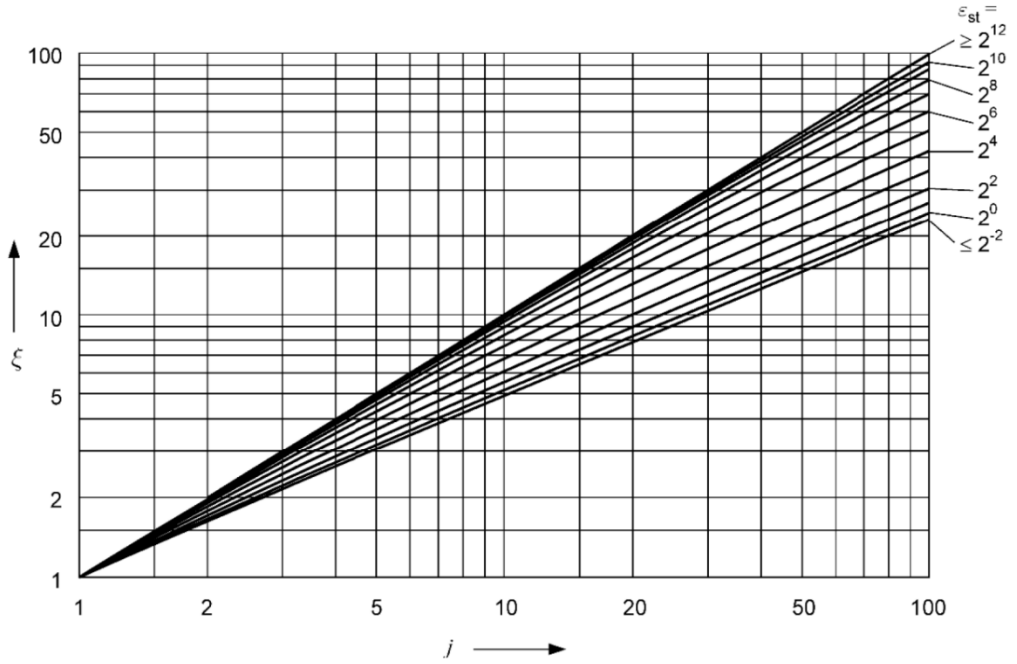
- Si $j \geq 1$ los subconductores chocan entre sí. La fuerza de tracción se calcula de la siguiente manera:

$$F_{pi} = Fst * \left(1 + \frac{V_e}{\varepsilon_{st}}\xi\right)$$

ξ se toma de la figura 56

Figura 56

ξ como función de j y ε_{st}



Nota. Tomado de IEC 60865-1 (2013).

$$V_e = \frac{1}{2} + \left[\frac{9}{8} * n * (n-1) * \frac{\mu_0}{2\pi} * \left(\frac{I_{k3}}{n}\right)^2 N * v2 * \left(\frac{ls}{a_s - d}\right)^4 \frac{\left(\sin\frac{180°}{n}\right)^4}{\xi^3} \left\{1 - \frac{arctan\sqrt{v4}}{\sqrt{v4}}\right\} - \frac{1}{4}\right]^{1/2}$$

$$v4 = \frac{a_s - d}{d}$$

- Si $j < 1$ los subconductores chocan entre sí. La fuerza de tracción se calcula con la siguiente ecuación:

$$F_{pi} = Fst * \left(1 + \frac{V_e}{\varepsilon_{st}} \eta^2\right)$$

η se toma de la figura 55, en función de as/d.

$$V_e = \frac{1}{2} + \left[\frac{9}{8} * n * (n-1) * \frac{\mu_0}{2\pi} * \left(\frac{I_{k3}}{n}\right)^2 N * v2 * \left(\frac{ls}{a_s - d}\right)^4 \frac{\left(\sin\frac{180°}{n}\right)^4}{\eta^4} \left\{1 - \frac{arctan\sqrt{v4}}{\sqrt{v4}}\right\} - \frac{1}{4}\right]^{1/2}$$

El cálculo de η se puede obtener mediante la siguiente ecuación o se puede tomar directamente de las gráficas de la norma IEC 60865-1, 2013.

$$\eta^3 + \varepsilon_{st}\eta - j^2(1 + \varepsilon_{st}) * f_n = 0$$

Con $0 < \eta \leq 1$

$$f_n = \frac{v3}{asw/as}$$

$$\frac{asw}{as} = \frac{2ya/as}{\sin\frac{180°}{n}} * \frac{\sqrt{\frac{1 - 2 * ya/as}{2 * ya/as}}}{arctan\sqrt{\frac{1 - 2 * ya/as}{2 * ya/as}}}$$

$$\frac{2ya}{as} = 1 - \eta(1 - \frac{d}{as})$$

- **Resumen de operaciones**

  Una vez realizado este proceso, se hace un resumen de las cargas para cada una de las hipótesis de diseño (máxima carga de tensión y máxima carga transversal), las cuales hacen parte de la presentación de los árboles de carga.

  - ✓ *Ft* = máxima fuerza de tensión durante el cortocircuito
  - ✓ *Ff* = máxima tensión después del cortocircuito
  - ✓ Máxima tensión para el diseño *(F)*
  - ✓ Máxima carga transversal (F*L')

  Finalmente, se verifica la distancia mínima de seguridad para evitar un cruce entre las fases. El valor de la distancia de seguridad se indica en el plano de disposición física de equipos (distancia fase-fase).

- **Desplazamiento horizontal del vano y mínima distancia en aire**

  e = máxima elongación elástica debida al cambio de tensión.

  et = Máxima elongación térmica debido al calentamiento por la corriente del cortocircuito.

  Cth= 0.27E-18 m^4/A^2s para conductores de aluminio o aleación de aluminio.

Bct = máxima flecha en mitad del vano por elongaciones térmicas y elásticas.

Cf = constante de forma.

Bh = máximo desplazamiento horizontal dentro del vano.

amin = distancia mínima en mitad del vano.

$$e = Nc * (Ft - Fst)$$

$$et = Cth * (Ik3/(n * A))^2 * \min\left(Tk1, \frac{Tr}{4}\right)$$

$$Cd = (1 + \frac{3}{8}\left(\frac{L}{bc}\right)^2 * (e + et))^{0.5}$$

$$bct = Cd * bc$$

$$Cf = 0.97 * +0.1 * r,\ 1.05 \leq Cf \leq 1.15$$

$$bh = Cf * Cd * bc * \left(si\ \partial m \geq 90, 1, sen(\partial m)\right)$$

$$amin = a - 2 * bh$$

Distancia de seguridad mínima

Se debe realizar la siguiente validación

$$amin \geq (Dist\ de\ seguridad)/2$$

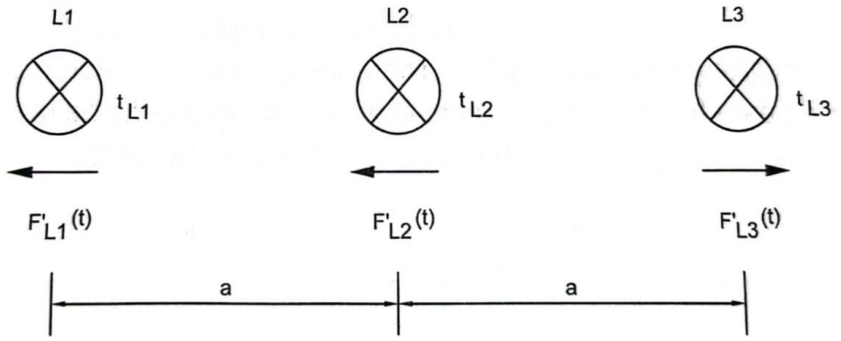
5.1.4.3 CÁLCULO DE ESFUERZOS DE CORTO CIRCUITO PARA BARRAJES RÍGIDOS

El corto circuito en un barraje rígido se comporta con unas características particulares en el sentido de las fuerzas electromagnéticas, se tomará como referencia el libro de Checa (2004), junto con los conceptos del CIGRÉ y de la norma IEC 60865-1 para analizar el comportamiento y el cálculo de estas fuerzas.

A continuación, se muestran los conductores rígidos L1, L2 y L3 con las direcciones de las fuerzas electromagnéticas de cortocircuito (Figura 57). En el peor de los escenarios, las fuerzas por unidad de longitud actuarán en los conductores L1 o L3 durante un cortocircuito trifásico.

Figura 57

Conductores rígidos y dirección de fuerzas electromagnéticas



Nota. Tomado de CIGRÉ Study committee subestations (2002).

El método para realizar los cálculos de cortocircuito se plantea en la norma CIGRÉ 115 y la norma IEC 60865-1.

- **Dimensionamiento de las tuberías conductoras por esfuerzos mecánicos de cortocircuito:**

  Para este cálculo se deben tener en cuenta los siguientes aspectos: longitud del vano más largo $[l]$, distancia entre fases $[a]$, módulo de Young del cable $[E]$, sección transversal del tubo $[A]$, masa del tubo $[m´]$, número de conductores por

fase $[n]$, aceleración de la gravedad $[g]$, diámetro exterior $[Ø]$, espesor $[d]$, frecuencia del sistema $[f]$ y corriente de cortocircuito simétrica trifásica en aK $[Ik3]$. La frecuencia del sistema y el cortocircuito están definidos desde el área eléctrica. Luego de ingresar los datos de entrada se analiza la fuerza electromagnética y se calculan los esfuerzos estáticos y dinámicos, con base en el numeral 5 de la norma IEC-60865-1.

- **Análisis inicial de los datos:**

  Se deben evaluar los datos según la disposición de falla, que normalmente es línea - línea.

  $I_{k3} =$ corriente de cortocircuito simétrica trifásica inicial, kA

  $I_{k2} =$ corriente de cortocircuito simétrica bifásica

  $I_{k2} = \frac{\sqrt{3}}{2} x I_{k3}$

- **Fuerza electromagnética adicional aplicada a la línea en condiciones de cortocircuito (*F'*):**

  $F' = 0.2 * Ik2^2/a$

- **Fuerza pico electromagnética**

  $C' =$fuerza de atracción de corriente monofásica

  $a =$ separación entre fases

  $I_{k3} =$ corriente de cortocircuito simétrica trifásica inicial

  $k =$ factor multiplicador por relación $\frac{R}{X}$ (valor pico de la corriente de corto)

  $\frac{R}{X} =$ relación de resistencia a reactancia

  -Cortocircuito trifásico para los conductores exteriores L1 o L3

  $F'L1P = FL'3P = 0.808 * C' * k^2$

  $C' = 0.2 * ((2)^{0.5} * I_{k3})^2/a$

  $K = 1.02 + 0.98 * e^{-3R/X}$ (Figura 58)

  -Cortocircuito trifásico conductor L2

  $F'L2P = 0.866 * C' * k^2$

  - Cortocircuito fase-fase para cualquiera de las fases falladas Lf

  $F'_{LP} = 0.75 * C' * k^2$

- **Esfuerzos estáticos**

  Los esfuerzos se determinan con las reacciones en cada apoyo y los máximos según las siguientes ecuaciones:

  - Condición con ambos apoyos empotrados

$$\sigma máx = \frac{\beta * F'_{L2p} * L * 10^3}{12 * Z}$$

  - Otras condiciones de apoyo

$$\sigma máx = \frac{\beta * F'_{L2p} * L * 10^3}{8 * Z}$$

  $Z =$ módulo de sección, (mm^3)

  $L =$ longitud del vano en (m)

$$Z = \frac{2 * J}{D}$$

  $J =$ momento de inercia (mm^4)

$$J = \frac{\pi}{64} * (De^4 - di^4)$$

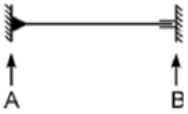
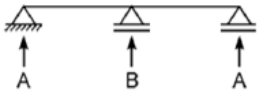
  $De =$ diámetro exterior (mm)

  $di =$ diámetro interior (mm)

  Los valores de α, β y ɣ se definen con base en la forma como se está analizando el barraje.

Tabla 10

Factores αf y β y ɣ para diferentes disposiciones de apoyos de barrajes

Tipo de viga y de soporte		Factor α_f	Factor β*	Factor γ
Vigas de un solo vano	A y B: soportes simples 	A: 0.50 B:0.50	1.0	1.57
	A: soporte empotrado B: soporte simple 	A: 0.625 B:0.375	$\frac{8}{11} = 0.73$	2.45
	A y B: soportes empotrados 	A: 0.50 B:0.50	$\frac{8}{16} = 0.50$	3.56
Vigas continuas con soportes simples equidistantes	Dos vanos 	A: 0.375 B:1.25	$\frac{8}{11} = 0.73$	2.45
	Tres o más vanos 	A: 0.40 B:1.10	$\frac{8}{11} = 0.73$	3.56
* Se incluyen los efectos de plasticidad				

Nota. Adaptado de CIGRÉ Study committee subestations, (2002)

$\alpha_f =$ factor de esfuerzo en los soportes

$\beta =$ factor de esfuerzo sobre el conductor principal

$\gamma =$ factor de la frecuencia natural del tubo

Las reacciones en los puntos de apoyo se determinan de la siguiente manera:

$$R_A = \alpha_A * L * W_T$$

$$R_B = \alpha_B * L * W_T$$

$WT =$ carga resultante actuante sobre el barraje

$L =$ longitud del vano equivalente a la mayor distancia entre soportes, m

- **Cálculo del esfuerzo máximo de la barra**

$$\sigma_{\max} = \frac{\beta * M_{max} * 10^3}{Z}$$

- **Vibración de los barrajes rígidos**

La frecuencia de vibración por el viento laminar y la frecuencia natural de vibración del tubo se pueden calcular de la siguiente manera:

$$fc = \frac{\gamma}{L^2} * \sqrt{\frac{E_C * J}{m_c}}$$

$m_c =$ masa por unidad de longitud

La máxima frecuencia por las fuerzas eólicas se calcula con la fórmula de Von Karman

$$f_e = \frac{51.15 * V}{De}$$

$V =$ máxima velocidad del viento para flujo laminar, $\frac{km}{h}$ $\left(1\frac{km}{h}\ a\ 7\frac{km}{h}\right)$

- **Esfuerzos dinámicos sin autorrecierre trifásico**

  Inicialmente se presenta el cálculo de reacciones en cada apoyo en N

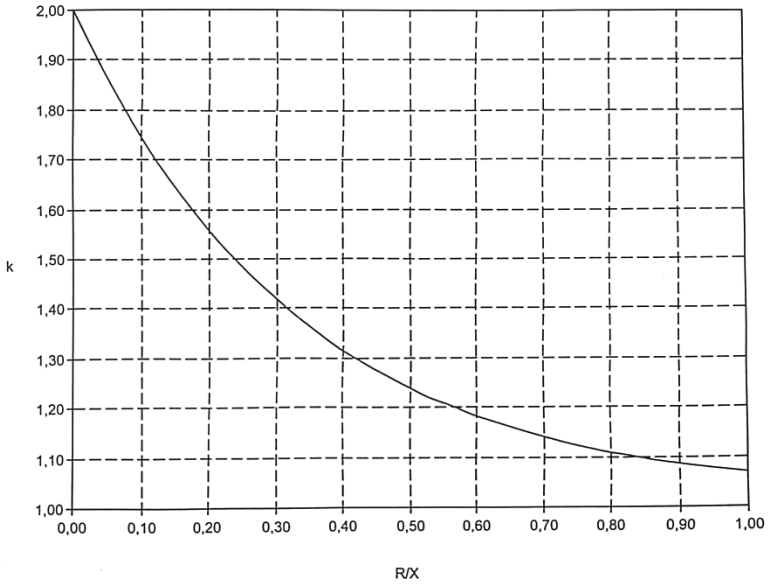
$$R_{Adyn} = RA * V_F$$
$$R_{Bdyn} = RB * V_F$$

  V_F= relación entre las fuerzas dinámicas y estáticas entre los apoyos A y B, relacionadas con la frecuencia natural (f_c). La frecuencia del sistema (f) se toma de la figura 59

  K = el factor para el valor pico de corriente de corto se puede tomar de la figura 58, teniendo la relación de la resistencia a la reactancia del circuito.

Figura 58

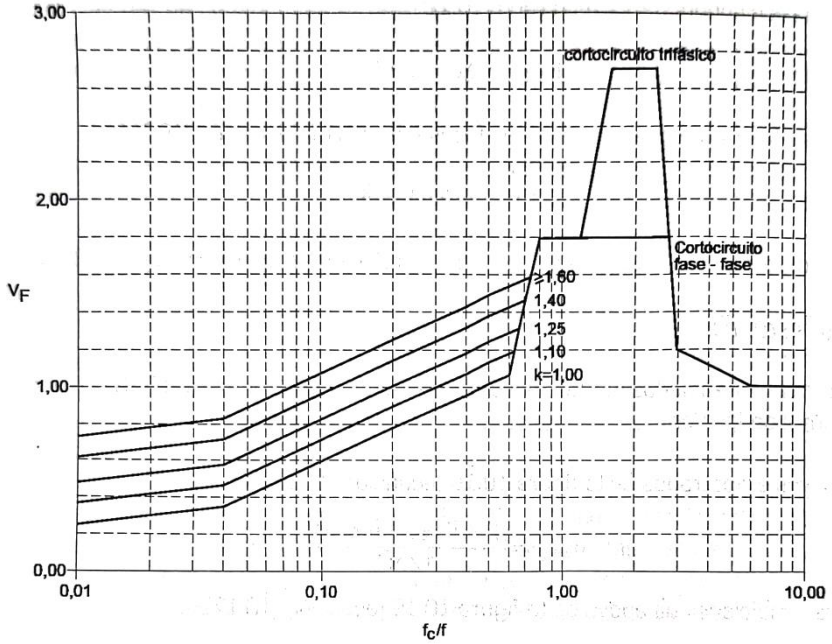
Cálculo del factor k



Nota. Tomado de IEC 60865-1 (2013).

Figura 59

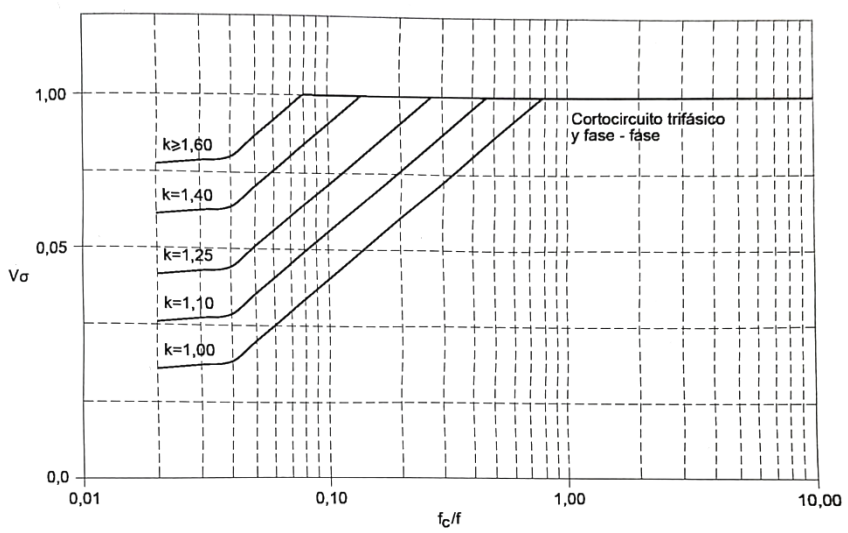
Relación entre la fuerza dinámica y estática de los puntos de apoyo Vf



Nota. Tomado de IEC 60865-1 (2013).

Figura 60

Relación de fuerzas dinámica y estática de conductor V_σ



Nota. Tomado de IEC 60865-1, (2013)

El esfuerzo dinámico se determina con la siguiente ecuación:

$$\sigma_{dyn} = \sigma_{max} * V_\sigma$$

- **Esfuerzos dinámicos con recierre trifásico no exitoso**

  El esfuerzo dinámico se debe multiplicar por V_r, que se valida con la siguiente ecuación.

$$V_r = \begin{cases} 1.8 & Si\ \dfrac{fc}{f} \leq 0.05 \\ 1 - 0.615 * \log\left(\dfrac{fc}{f}\right) & Si\ 0.05 < \dfrac{fc}{f} < 1 \\ 1.0 & Si\ \dfrac{fc}{f} \geq 1 \end{cases}$$

  Donde:

  Vr: relación entre fuerzas dinámicas con y sin recierre presentadas en los apoyos A y B

- **Verificación**

  Verificación de esfuerzos. Se debe calcular validar si sus propiedades mecánicas o esfuerzo admisible es superior al esfuerzo actuante. Esto se verifica teniendo en cuenta la ecuación tomada de IEC 60865-1 (2013).

$$\sigma_{adm} = q * fy$$

  $q =$ factor de forma que depende de las características geométricas de la barra

$$q = 1.7 \left[\frac{1 - \left(1 - \frac{e_c}{De}\right)^3}{1 - \left(1 - \frac{e_c}{De}\right)^4} \right]$$

  $e_c =$ espesor del conductor tubular, mm

  Verificación de deflexiones. Se realiza con las siguientes consideraciones de deformaciones:

  1. Para soportes simples en ambos extremos

$$Y_{max} = \frac{5 * 10^9 * wc * L^4}{384 * E_c * J}$$

  $wc =$ peso por unidad de longitud *daN/m*

  $L =$ separación entre soportes (longitud del vano)

  $E_C =$ módulo de elasticidad del material, *daN/mm²*

  $J =$ momento de inercia, *mm⁴*

  2. Para soporte fijo en un extremo

$$Y_{máx} = \frac{10^9 * wc * L^4}{185 * E_c * J}$$

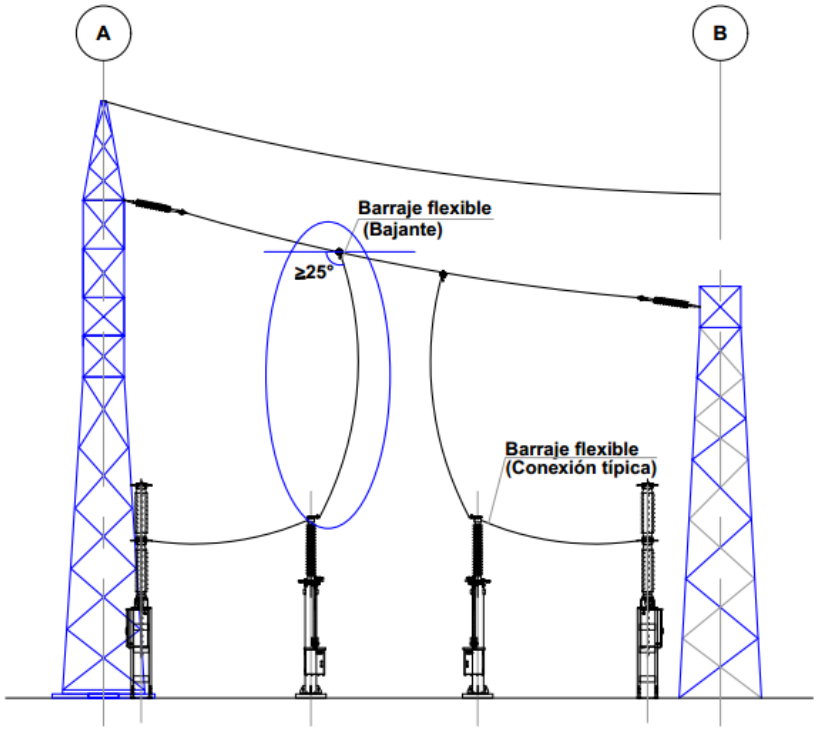
  Los demás soportes se pueden evidenciar en el numeral 10.10.5.6 “Deflexión máxima en barrajes rígidos” del libro de subestaciones de HMV Ingenieros Ltda. (2021).

5.1.4.4 CÁLCULO DE BAJANTES

Se considera bajante en un barraje flexible cuando el ángulo entre los puntos de conexión es mayor o igual a 25°. (Figura 61).

Figura 61

Cálculo de bajante en barraje flexible



El procedimiento para calcular los esfuerzos de cortocircuito (análisis de bajante) se realiza a partir del numeral 6.2.5 de la norma IEC-60865-1, p. 36.

A continuación, se presenta el análisis que se debe realizar con el paso a paso del cálculo de las bajantes.

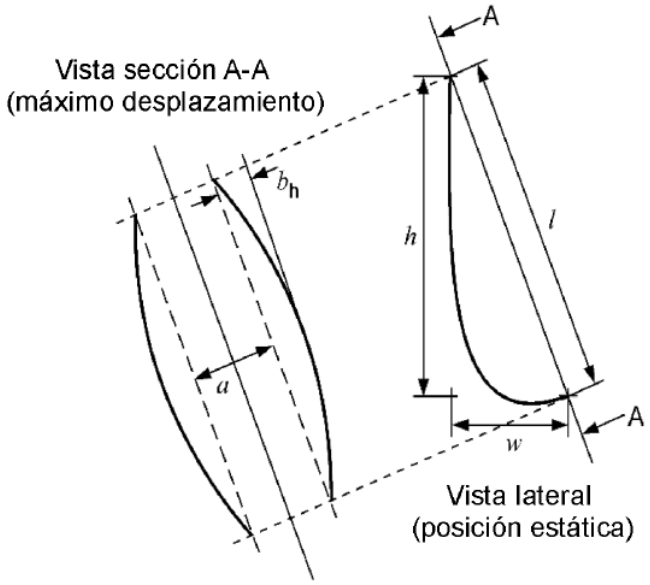
- **Observaciones y datos generales**
- Para este cálculo se deben tener en cuenta los siguientes aspectos: corriente del sistema $[I_{k3}]$, factor pico para cálculo de cortocircuito$[k]$, frecuencia del sistema $[f]$, constante magnética, permeabilidad del vacío $[\mu_0]$, altura de la bajante $[h]$, vano horizontal $[w]$, distancia diagonal entre apoyos $[l]$, longitud del cable $[Lv]$, distancia entre conductores $[a]$, longitud del cable sin accesorios $[Ls]$, distancia entre subconductores $[as]$ y constante de amortiguamiento entre soportes para un vano $[S]$.

Normalmente, la frecuencia del sistema y la corriente se definen desde el área eléctrica.

La altura de la bajante, el vano horizontal y la distancia diagonal entre apoyos se definen con los parámetros que se muestran en la Figura 62 :

Figura 62

Geometría de la bajante



Nota. Tomado de IEC 60865-1, (2013)

- **Características del conductor**

  Inicialmente se debe tener en cuenta la distancia entre conductores, que es la misma entre fases, y considerar un valor para la constante de amortiguamiento. En la tabla 11 se presentan las características específicas del conductor.

Tabla 11

Características específicas del conductor

TIPO DE CONDUCTOR	UNIDAD
Número de subconductores	unidad
Diámetro	d (mm)
Área del subconductor	As (mm^2)
Masa del subconductor	m's (kg/m)
Módulo de Young	E (N/mm^2)
Aceleración de la gravedad	g (m/s^2)

Una vez ingresados los datos, el análisis se hace de acuerdo con el numeral 6.2.7 de la norma IEC-60865-1.

$$F_{t,d} = \frac{5}{3} * lv * \frac{\mu_0}{2\pi} * \frac{(I_{k3})^2}{a} * \frac{lv}{w}$$

Además de la geometría, la corriente de corto y la distancia entre ejes, se debe calcular para longitudes de cable de 1.4w≤ $lv \leq 3.3w$

El desplazamiento (*bh*) depende de la geometría y se calcula para longitudes $lv \leq 2l$

$$bh = \left[0.60\sqrt{\frac{lv}{l} - 1} + 0.44\left(\frac{lv}{l} - 1\right) - 0.32 * ln\frac{lv}{l}\right] * \frac{l^2}{lv}$$

La distancia mínima libre corresponde a lo siguiente:

$$amín = a - 2 * bh$$

Si la bajante tiene más de dos subconductores por fase, se debe realizar el análisis de pinch force. La metodología es igual a la que se indicó previamente.

Finalmente, se obtiene un resumen de cargas que debe incluir la fuerza durante un cortocircuito, pinch force, máxima fuerza longitudinal debida a cortocircuito y la distancia mínima libre entre subconductores. Esta información sirve para el análisis de los árboles de carga.

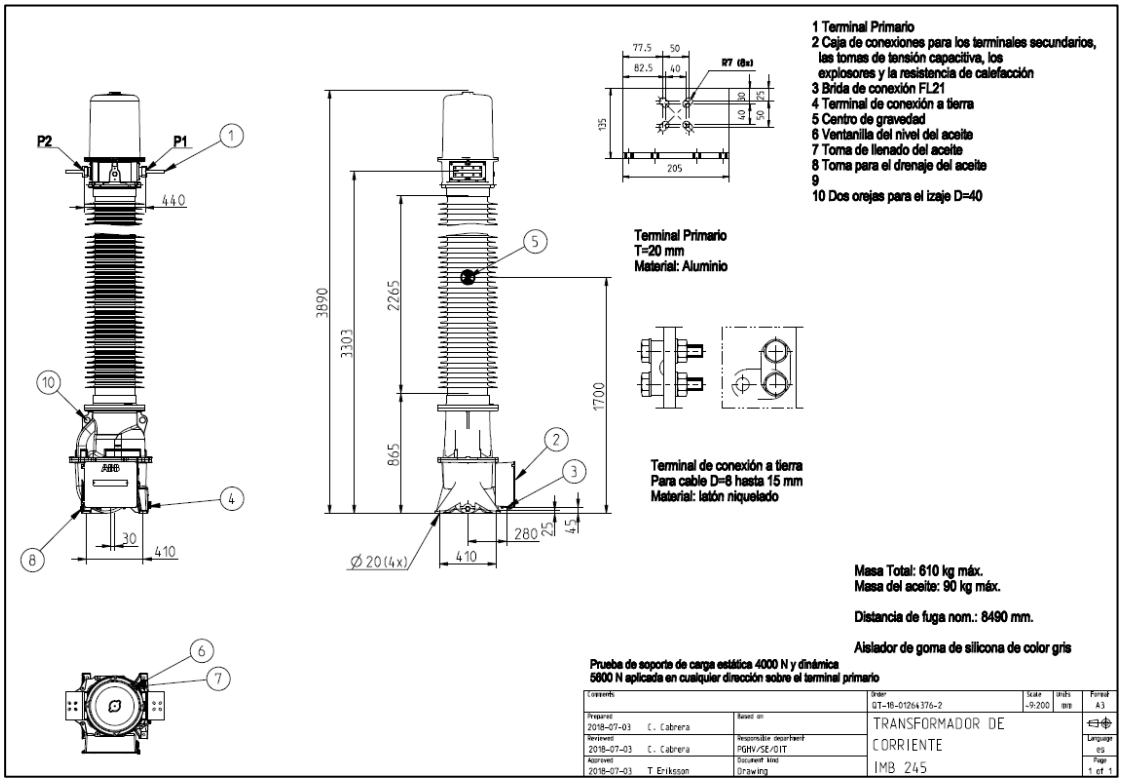
5.1.4.5 CÁLCULO DE ÁRBOLES DE CARGA

Los árboles de carga resumen cargas de tensión, cortocircuito, viento, sismo, cargas de accionamiento, pesos propios y de mantenimiento que actúan en el conductor, el equipo y el soporte del equipo.

A continuación, se muestra la ficha técnica de un equipo y se indica la forma como se deben presentar los resúmenes (Figura 63).

Figura 63

Ejemplo de ficha técnica



Para evaluar los árboles de carga se consideran los siguientes aspectos:

Teniendo en cuenta la ficha técnica del equipo se ingresan sus parámetros básicos.

- **Parámetros básicos del equipo**

  $Tipo$: interruptores de potencia, seccionadores, transformadores de tensión, transformadores de corriente, transformadores de medida no convencionales, pararrayos.

$n =$ número de fases

$[He] =$ altura total del equipo

$[Hc] =$ altura medida desde la base del equipo hasta el punto de conexión.

$[We] =$ peso total del equipo (definido en la ficha técnica)

$[Hm] =$ centroide de masa, definido en la ficha técnica. Si la ficha no tiene valor, se asume el centroide de masa como la mitad de la altura del equipo.

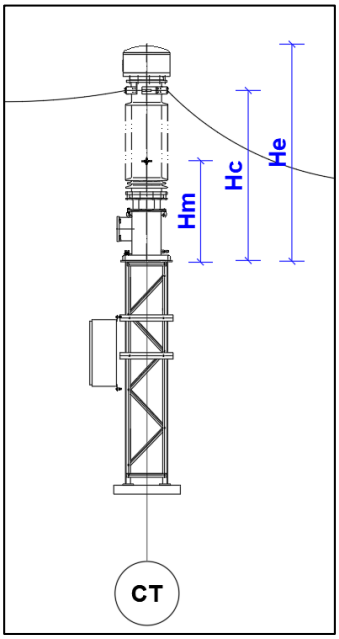
Cargas dinámicas por accionamientos

- $[Fvea] =$ carga en sentido vertical
- $[Ftea] =$carga en sentido transversal
- $[Flea] =$ carga en sentido longitudinal

Las distancias se toman con base en la siguiente imagen Figura 64.

Figura 64

Distancias en equipos de patio para cálculos de cargas



Las cargas de accionamiento se tienen en cuenta únicamente en los interruptores y, ocasionalmente, en los seccionadores.

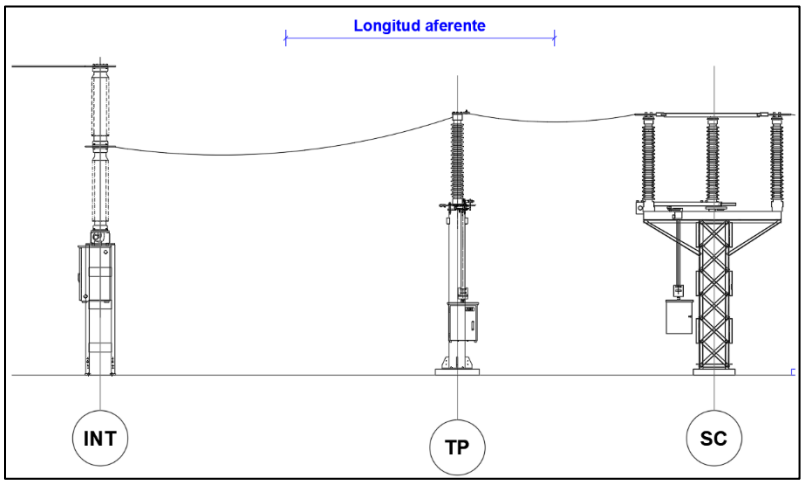
Se deben ingresar los valores de las propiedades del conductor que se han venido indicando en las anteriores hojas de cálculo.

- **Propiedades del conductor**
  - Tipo
  - $[Ø] =$ diámetro
  - $[Nco] =$ cantidad
  - $[L_{af}] =$longitud aferente
  - $[wc] =$ peso unitario
  - $[Fvc] =$ carga vertical actuante
  - $[Flct] =$ tensión longitudinal
  - $[Flcc] =$carga en condición del cortocircuito longitudinal
  - $[Ftcc] =$carga en condición de cortocircuito transversal

Para la longitud aferente (Figura 65) se debe tomar la suma de la mitad de la longitud del conductor que se conecta a los equipos adyacentes:

Figura 65

Distancia aferente entre equipos



De acuerdo con el numeral del cálculo de flechas y tensiones y cortocircuito, se ingresan los datos obtenidos en cada una de ellas.

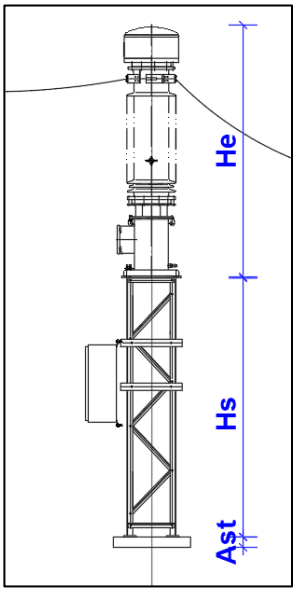
- **Parámetros del soporte metálico**
  - $[Hs] =$altura
  - $[N_{cl}] =$número de columnas

- $[Bst]$ =lado cara transversal
- $[Bsl]$ =lado cara longitudinal
- $[Ws]$ = peso
- $[\phi\beth]$ = relación de solidez cara transversal
- Relación de solidez cara longitudinal $[\phi\lambda]$
- $[Atsop]$ =área neta transversal
- $[Alsop]$ =área neta longitudinal

- **Altura del soporte (Hs).** Corresponde a la altura medida desde la base del soporte (sin tener en cuenta lo que sobresale del nivel de terreno "*Ast*") hasta su parte superior (Figura 66).

Figura 66

Altura de equipo y soportes



- Número de columnas. Depende cómo esté conformado el soporte del equipo. Por ejemplo, en los equipos monofásicos solo se utiliza una columna; por su parte, en los seccionadores se pueden usar una, dos o tres columnas.

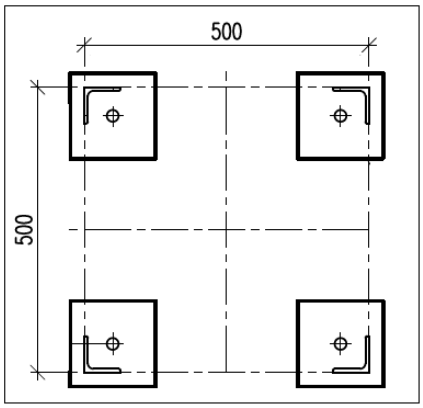
- Lado cara transversal y longitudinal del soporte (*Bst y Bsl*). Corresponde a la distancia medida de borde a borde del soporte. Se usa como valor típico 50 cm en cada cara.

La cara longitudinal corresponde a la del sentido del conductor y la transversal a la perpendicular del conductor.

Ocasionalmente se utilizan perfiles en alma llena y no en celosía; por tal razón, la distancia en cada cara corresponde a la medida de la aleta y el alma (incluyendo espesores de la aleta) del perfil (Figura 67).

Figura 67

Perfiles en celosía, detalle de anclajes para la estructura de soporte



Relación de solidez. Será igual a 0.25 para soportes tipo celosía y 1.00 para soportes en alma llena.

- **Cálculo de la carga de viento**
  - $[Vs]$ = velocidad básica del viento
  - $[Anm]$ =altura sobre el nivel del mar
  - $[\rho]$ = densidad del aire
  - $[Po]$ = presión básica del viento
  - $[C]$ = categoría de exposición
  - $[At]$ = cálculo de área expuesta al viento de equipo
  - $[Hat]$ =centroide de áreas cara transversal / longitudinal
  - $[Ft]$= Fuerza del viento de viento

Tabla 12

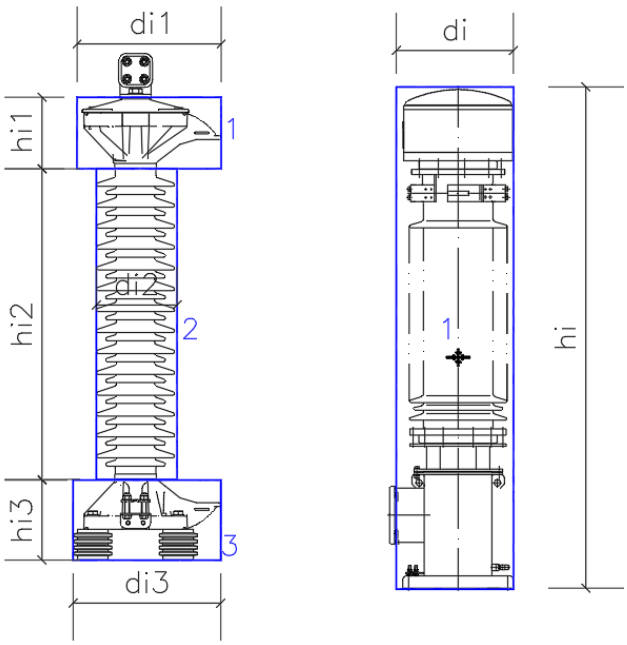
Resumen para el cálculo de la presión del viento

Altura	*kz*	*Área*	*Cf*	*Fv= Po*kz*Cf*A*
Conductor [Ftcv]				
Equipo transversal [Ftev]				
Equipo longitudinal [Flev]				
Soporte transversal [Ftsv]				
Soporte longitudinal [Flsv]				

Si el equipo es casi simétrico solo se debe realizar el cálculo de una sola área; si no lo es, se divide el equipo en varias áreas para calcular el centroide de áreas. Ejemplo (Figura 68):

Figura 68

Áreas aferentes para el cálculo de presión del viento



Después de ingresar los datos se calculan las fuerzas de viento en el conductor, el equipo y el soporte.

- **Cálculo de carga de sismo**
  - $[Fa] =$ coeficiente de amplificación, periodos cortos
  - $[Aa] =$ aceleración pico efectiva
  - $[I] =$ coeficiente de importancia
  - $[Sa] =$ aceleración máxima horizontal
  - $[R] =$ factor de modificación de respuesta
  - $[Sa/R] =$ coeficiente sísmico de diseño
  - $[Sv/Sh] =$ relación sismo vertical / horizontal
  - $[Ftcs = Flcs] =$ fuerza horizontal en el conductor por sismo
  - $[Fvcs] =$ fuerza vertical en el conductor por sismo
  - $[Ftes = Fles]$= fuerza horizontal en el equipo por sismo
  - $[Fves] =$ fuerza vertical en el equipo por sismo
  - $[Ftss = Flss] =$ fuerza horizontal en el soporte por sismo
  - $[Fvss] =$ fuerza vertical en el soporte por sismo

- **Descripción de las cargas**

  Se presenta la tabla 13 con los resúmenes totales de los cálculos de árboles de cargas

Tabla 13

Resumen de los árboles de carga

			Coordenadas punto de aplicación			Cargas de trabajo		
Origen	**Sigla**	**Tipo**	**X**	**Y**	**Z**	**Fx**	**Fy**	**Fz**
Conductor	*Wc*	*Pp*	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
	Ftcv	*Cvy*	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
	Flcs	*Csx*	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
	Ftcs	*Csy*	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
	Fvcs	*Csv*	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
	Flcc/Ftcc	*Cc*	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
	Flct	*Ct*	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
Equipo	*We*	*Pp*	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
	Fles	*Csx*	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
	Ftes	*Csy*	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
	Fves	*Csv*	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
	Flev	*Cvx*	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
	Ftev	*Cvy*	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
	Fdin	*D+*	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
	Fdin	*D-*	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
Soporte	*Ws*	*Pp*	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
	Flss	*Csx*	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
	Ftss	*Csy*	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
	Fvss	*Csv*	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
	Flsv	*Cvx*	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
	Ftsv	*Cvy*	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)

- **Combinaciones de carga, trabajo y diseño**

  Se aplican las combinaciones de cargas descritas en el numeral 5.1 “Combinaciones de carga para diseño de estructuras”, según indica la AISC 113.

  Combinaciones: [*P1, P2, P3x, P4y, P5, P5x+, P5x-, P5y+, P5y-, P6+, P6-, P7x, P7y*]

- **Ubicación de los árboles de cargas**

  A continuación, se presenta la aplicación de los árboles de carga, según cada equipo de patio que se analice (Figura 69, Figura 70)

Figura 69

Árboles de carga para seccionadores

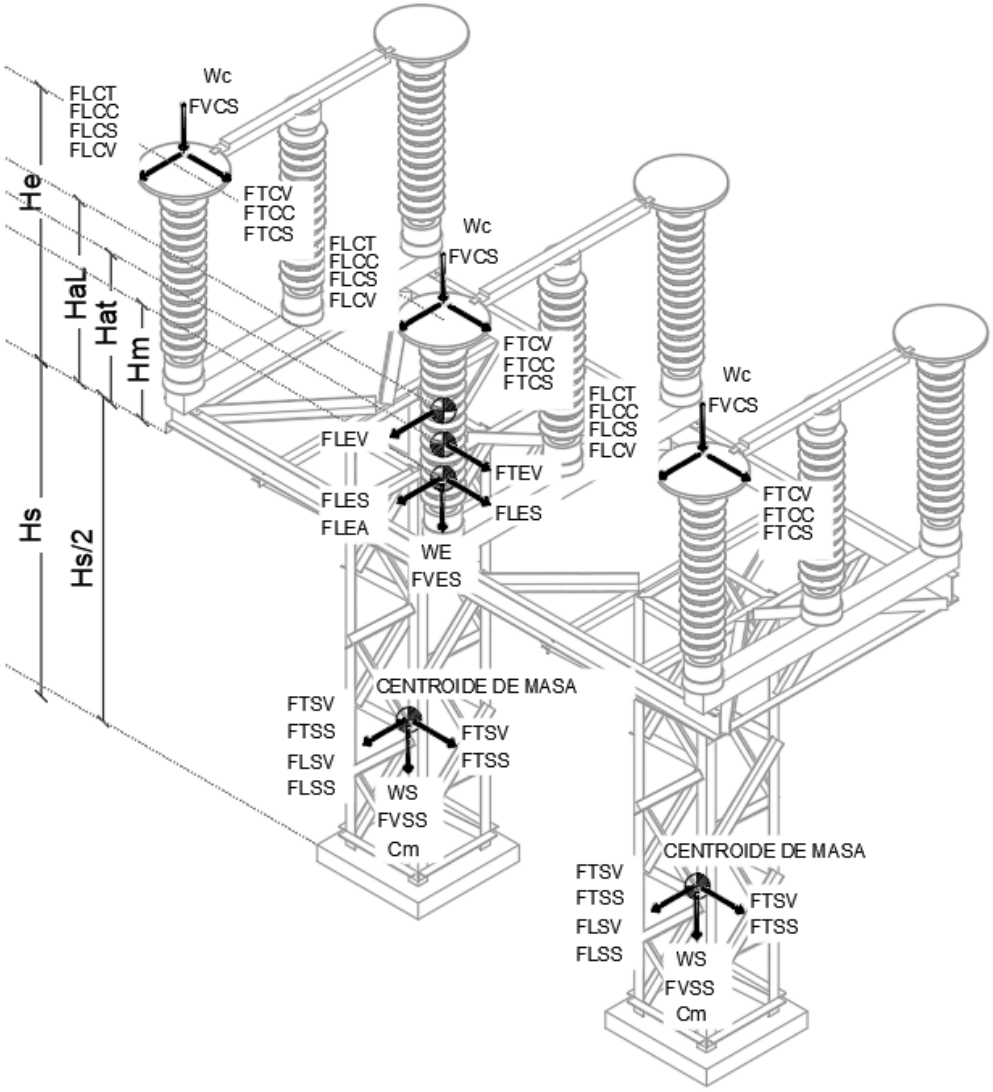
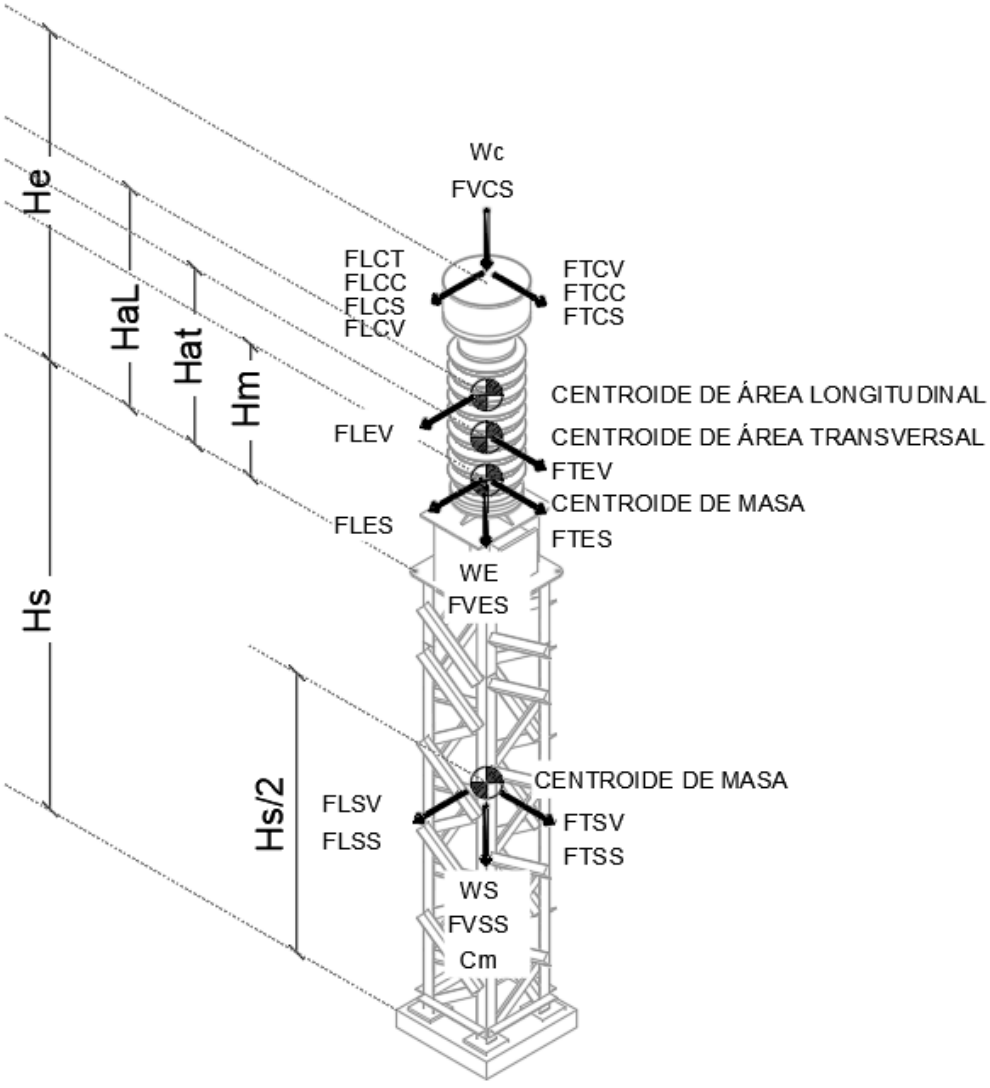


Figura 70

Aplicación de árboles de carga para equipos monopolares



5.1.5 Configuración estructural típica para soportes de equipos de patio

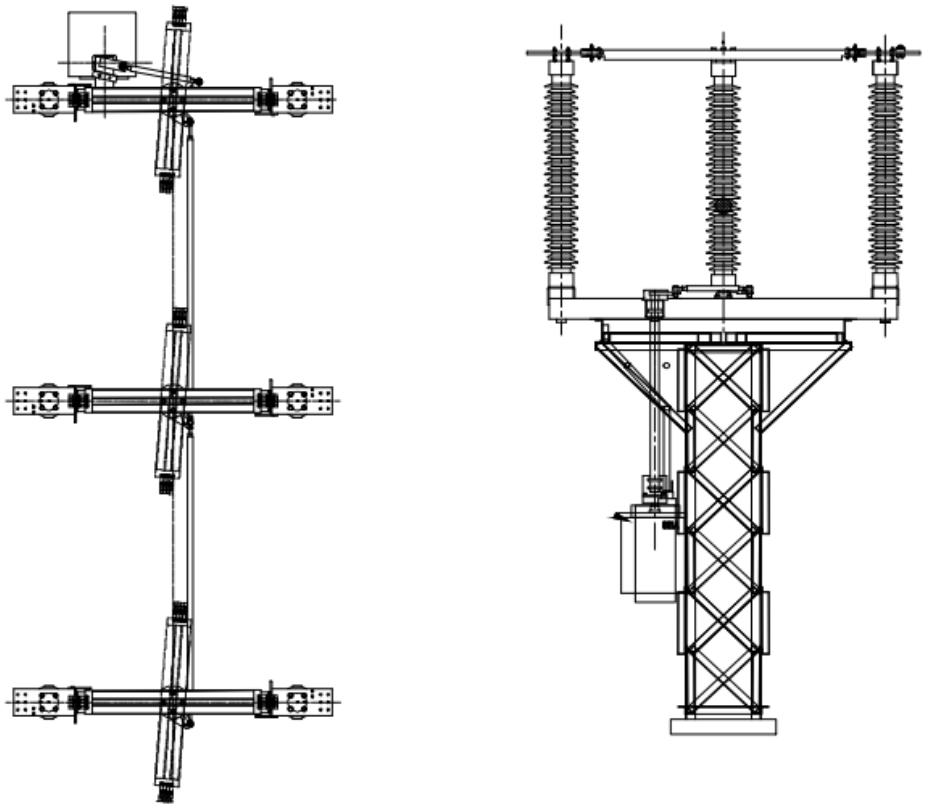
Se presentan las configuraciones típicas para los diversos equipos de patio que se pueden encontrar en las subestaciones aisladas con aire.

5.1.5.1 Configuración estructura de soporte para seccionadores

A renglón seguido se presentan las configuraciones típicas para soportar los equipos de patio, en este caso para seccionadores (Figura 71 y 72).

Figura 71

Estructura tipo de un seccionador

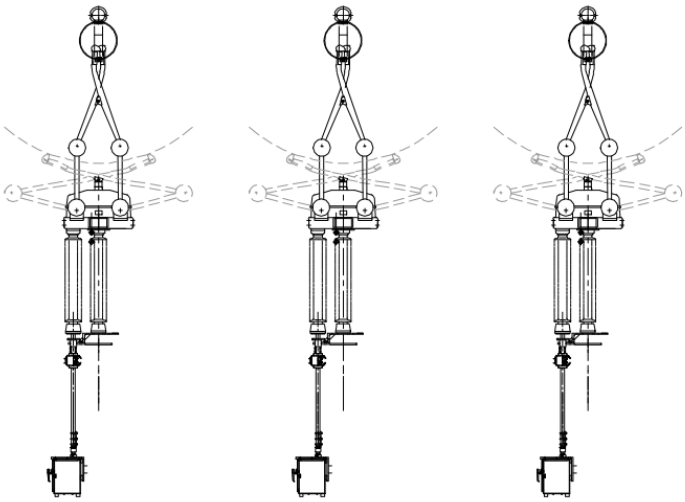


5.1.5.2 Configuración de un seccionador tipo pantógrafo

Se presentan configuraciones típicas de los equipos de patio, en este caso para seccionadores tipo pantógrafo (Figura 72)

Figura 72

Seccionador tipo pantógrafo

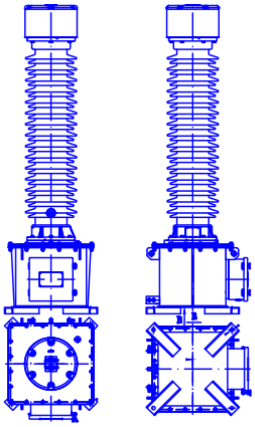


5.1.5.3 Configuración de transformadores de potencia

Se presentan configuraciones típicas de los equipos de patio, en este caso para los transformadores de potencia (Figura 73)

Figura 73

Equipo tipo para transformador de potencia

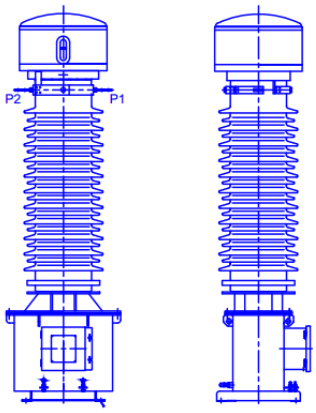


5.1.5.4 Configuración de un transformador de corriente

Se presentan configuraciones típicas de los equipos de patio, en este caso para los transformadores de corriente (Figura 74)

Figura 74

Equipo tipo para transformador de corriente

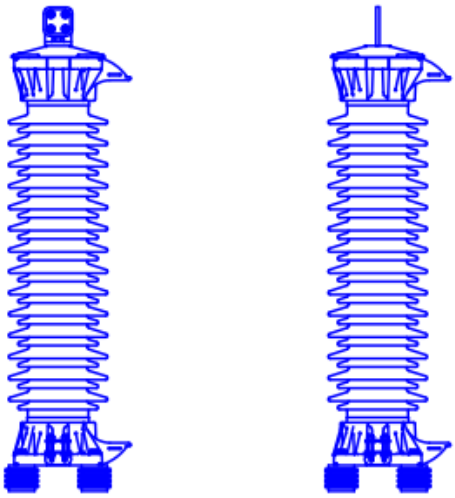


5.1.5.5 Configuración de descargadores de sobretensión

Se presentan configuraciones típicas de los equipos de patio, en este caso para el descargador de sobretensión.

Figura 75

Planos tipo para descargador de sobretensión



5.1.5.6 Configuración de la estructura metálica tipo para soportar los equipos presentados previamente

Se muestran en las figuras 76 y 77 las configuraciones típicas para las estructuras metálicas que soportan los equipos de patio.

Figura 76

Planos tipo para estructuras de soporte en alma llena

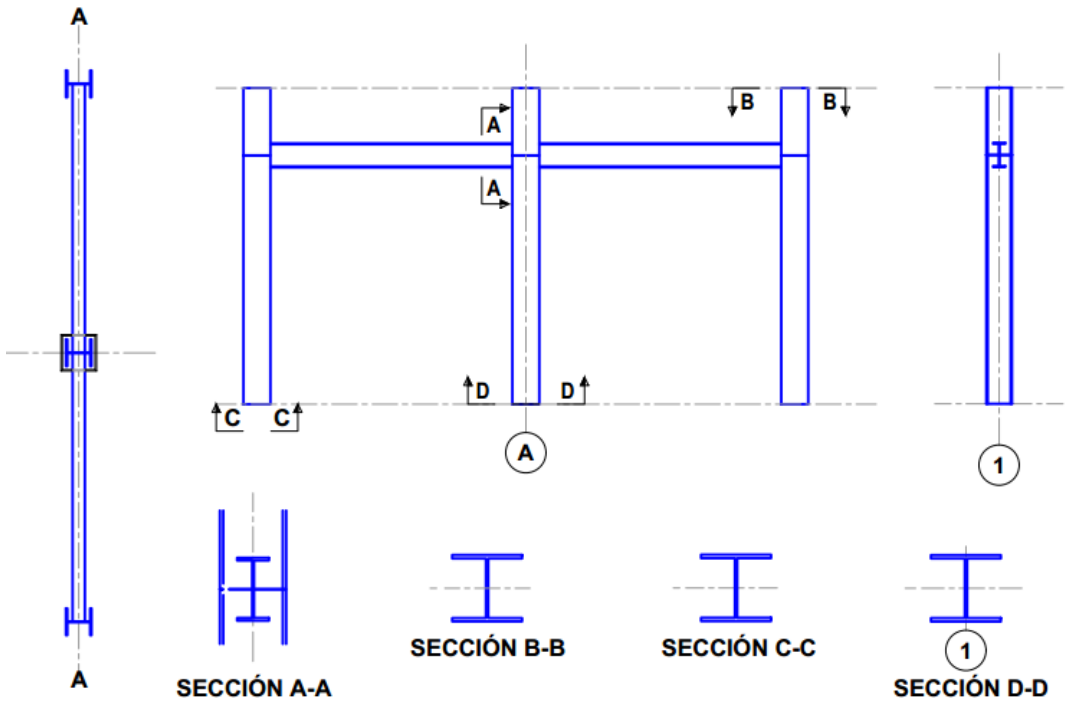
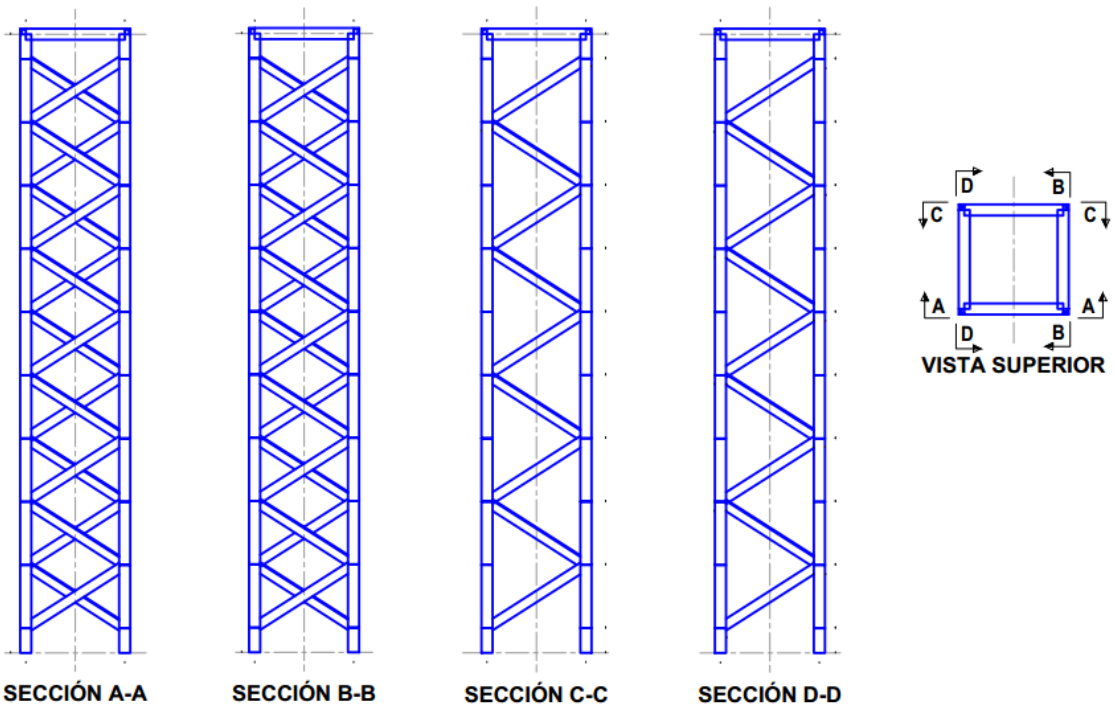


Figura 77

Planos tipo para seccionador tipo pantógrafo



5.1.6 Criterios de diseño para las estructuras metálicas de los equipos de patio y los pórticos

Las estructuras metálicas se deben diseñar según la norma ASCE 10-15 “Design of latticed steel transmission structures” de la ASCE (American Society of Civil Engineers) (ASCE 10-15, 2015). A continuación, se presentan los parámetros de diseño que se deben tener en cuenta.

- **Esfuerzo de diseño a compresión**
- Los esfuerzos a compresión *(Fa)* de los elementos sometidos a cargas axiles se deben calcular con las siguientes ecuaciones:

$$Fa=\begin{cases}\left[1-\frac{1}{2}*\left(\frac{Ke*Ll/rg}{Cce}\right)^2 Fy\right] & si\ \frac{Ke*Ll}{rg}\leq Cc \\ \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{Ke*Ll}{rg}\right)^2} & Si\ \frac{Ke*Ll}{rg}>Cc\end{cases}$$

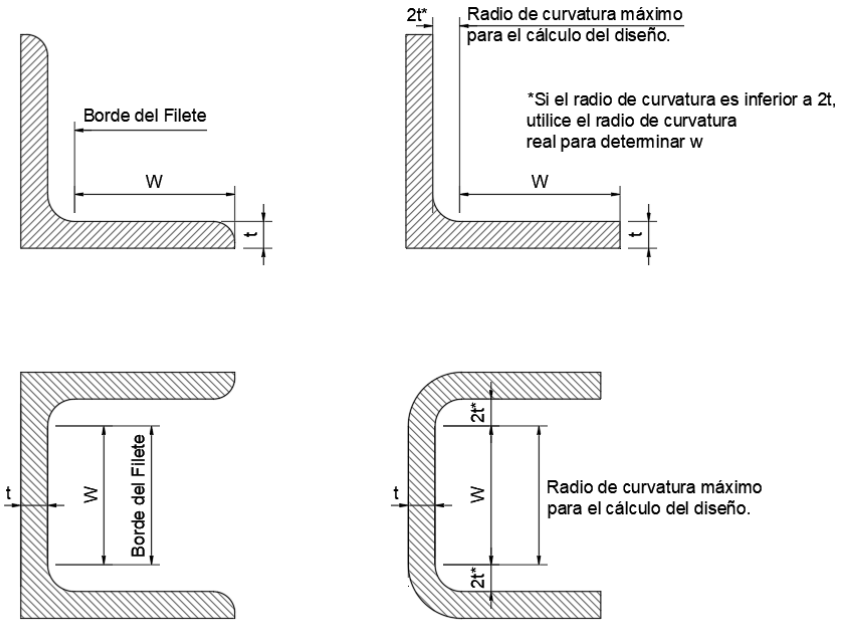
$$Cce=\pi\sqrt{\frac{2E}{Fy}}$$

Fy =esfuerzo de fluencia del acero
E = módulo de elasticidad
Ll =longitud libre
rg =radio de giro
Ke = coeficiente de longitud efectiva
Cce = relación de esbeltez de la columna, que separa el pandeo elástico del pandeo inelástico

- **Máxima relación *w/t* para miembros a compresión con ángulos de 90°**
  La relación máxima *w/t,* donde *w* es el ancho del planto y *t* representa el espesor del montante, no debe ser mayor de 25.

Figura 78

Relación w/t para perfilería estructural



Nota. Adaptado de ASCE 10-15 (2015)

- **Esfuerzo crítico de diseño a compresión**

  El esfuerzo de diseño (*Fa)* se considera según la anterior ecuación, pero solo se aplica si w/t no supera el valor límite, que se calcula con la siguiente expresión:

$$\left(\frac{w}{t}\right) lim = \frac{80\Psi}{\sqrt{Fy}}$$

  Ψ toma valores de 1 para *Fy* en ksi y 2.62 para *Fy* en MPa

$$Fcr = \begin{cases} \left[1.677 - 0.677\frac{w/t}{\left(\frac{w}{t}\right)lim}\right] Fy & Si\ \left(\frac{w}{t}\right) lim \leq \frac{w}{t} \leq \frac{144\Psi}{\sqrt{Fy}} \\ \frac{0.0332\pi^2 E}{(w/t)^2} & Si\ \frac{w}{t} > \frac{144\Psi}{\sqrt{Fy}} \end{cases}$$

  Si la ecuación w/t cumple con alguna de las ecuaciones mencionadas, se remplaza *fy* por *Fcr* y se calcula el esfuerzo, como se muestra a continuación.

$$Fa = \left[1 - \frac{1}{2}\left(\frac{Ke * Ll/rg}{\pi\sqrt{\frac{2E}{Fcr}}}\right)^2\right] Fcr$$

Las longitudes efectivas para diseño de los elementos se tomarán de la tabla 14:

Tabla 14

Tabla de relaciones de esbeltez

Miembros atornillados en ambas caras de las conexiones	$\frac{KL}{r} = \frac{L}{r}; 0 \leq \frac{L}{r} \leq 150$
Miembros con carga concéntrica en ambos extremos	$\frac{KL}{r} = \frac{L}{r}; 0 \leq \frac{L}{r} \leq 120$
Miembros con carga excéntrica en un extremo y excentricidad en el otro extremo	$\frac{KL}{r} = 30 + 0.75\frac{L}{r}; 0 \leq \frac{L}{r} \leq 120$
Miembros con excentricidades en ambos extremos	$\frac{KL}{r} = 60 + 0.5\frac{L}{r}; 0 \leq \frac{L}{r} \leq 200$
Miembros sin restricción a rotación en ambos extremos	$\frac{KL}{r} = \frac{L}{r}; 120 \leq \frac{L}{r} \leq 200$
Miembros con restricción parcial a rotación en un extremo	$\frac{KL}{r} = 28.6 + 0.762\frac{L}{r}; 120 \leq \frac{L}{r} \leq 225$
Miembros parcialmente restringidos a rotación en ambos extremos	$\frac{KL}{r} = 46.2 + 0.615\frac{L}{r}; 120 \leq \frac{L}{r} \leq 250$

Si la ecuación *w/t* cumple con alguna de las ecuaciones anteriores, se remplaza *fy* por *Fcr* y se calcula el esfuerzo, como se muestra a continuación.

- **Diseño a tracción**

  Para miembros cargados concéntricamente será *Fy* sobre el área neta de la sección transversal *An.* También se debe considerar *Ag*, que es el área bruta

de la sección transversal y corresponde a la suma de productos entre el espesor y el ancho bruto de cada elemento medido hasta el eje del miembro.

- ✓ Miembros en ángulo
- ✓ El esfuerzo de diseño a tracción Ft sobre el área neta de los ángulos planos y de borde conectados por una pata será 0.9 Fy. Si las patas son desiguales y la pata corta está conectada, esta se considerada del mismo tamaño de la pata conectada. Si el centroide del patrón del perno en la pata conectada está por fuera del centro de gravedad del ángulo, la conexión debe chequearse a ruptura (también llamado bloque de cortante), como se muestra a continuación.

  Ecuación de chequeo de ruptura:

$$P = 0.60AvFu + AtFy$$

  $P =$ fuerza de diseño a tracción en la conexión

  $Fy =$ esfuerzo de fluencia

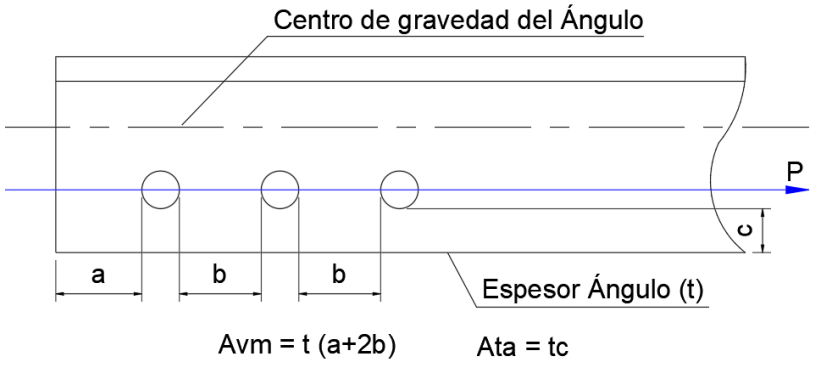
  $Fu =$ resistencia a tracción mínima específica para el miembro

  $Avm =$ área neta mínima (figura 79)

  $Ata =$ área neta mínima en tensión desde el orificio hasta la punta del ángulo perpendicular a línea de fuerza. (figura 79)

Figura 79

Bloque de cortante



Nota. Adaptado de ASCE 10-15 (2015)

- **Diseño a flexo compresión**

  Para este diseño se debe satisfacer la siguiente ecuación:

$$\frac{Pax}{P_a} + \frac{C_{m*}M_x}{M_{ax}}\left[\frac{1}{1 - Pax/P_{ex}}\right] + \frac{C_m M_y}{M_{ay}}\left[\frac{1}{1 - Pax/P_{ey}}\right] \leq 1$$

$$\frac{Pax}{Py} + \frac{M_x}{M_{ax}} + \frac{M_y}{M_{ay}} \leq 1$$

  $Pax =$ compresión axial

  $P_{a=}$ compresión axial de acuerdo con lo calculado en el diseño a compresión

  $Py =$ compresión axial al rendimiento *(Fy*A)*

  $Pex = \frac{\pi^2 EIx}{[KxLx]^2}$

  $Pey = \frac{\pi^2 EIy}{[KyLy]^2}$

  $Ix =$ momento de inercia con respecto al eje x

  $Iy =$ momento de inercia con respecto al eje y

  $KxLx,\ KyLy =$ longitudes efectivas en los correspondientes planos a flexión

  $Mx, My =$ momentos con respecto al eje x y al eje y, respectivamente, en el punto o puntos indicados

  $Max, May =$ momentos admisibles.

  $C_m = 0.6 - 0.4\left(\frac{M_1}{M_2}\right)$ aplica para miembros con restricción de desplazamiento de uno de sus extremos con respecto al otro, sin la presencia de cargas transversales en el plano de flexión en los soportes.

  $C_m = 1$ aplica si existen cargas transversales entre los soportes

  $C_m = 0.85$ si los extremos de los miembros están restringidos

- **Diseño de conexiones**

  Para definir los elementos estructurales se consideran las dimensiones mínimas. Los espesores mínimos para los perfiles, platinas, tornillos y arandelas deben ser los siguientes:

  - ✓ Miembros principales o secundarios con esfuerzos calculados: 4,8 mm
  - ✓ Miembros secundarios redundantes sin esfuerzos calculados: 3,2 mm

- ✓ Tamaño mínimo de perfiles de aletas iguales: 38 x 38 x 3,2 mm
- ✓ Espesor mínimo para platinas de conexión: 4,8 mm
- ✓ Espesor mínimo de láminas para base de estructuras soporte de equipo: 12,7 mm
- ✓ Espesor mínimo de láminas para base de columnas de pórticos: 25,4 mm

Diámetros mínimos de los tornillos:

- ✓ Pernos que conectan elementos principales o secundarios con esfuerzos calculados: 15,9 mm
- ✓ Pernos que conectan elementos secundarios redundantes sin esfuerzos calculados: 12,7 mm

Las partes metálicas de las estructuras se deben conectar preferiblemente por medio de tornillos, tuercas y arandelas, que deben cumplir con la última versión de las normas ASTM A-394 y A-563.

Los diseños de estas conexiones deben tener en cuenta lo siguientes aspectos, según la norma ASCE 10-15 (2015):

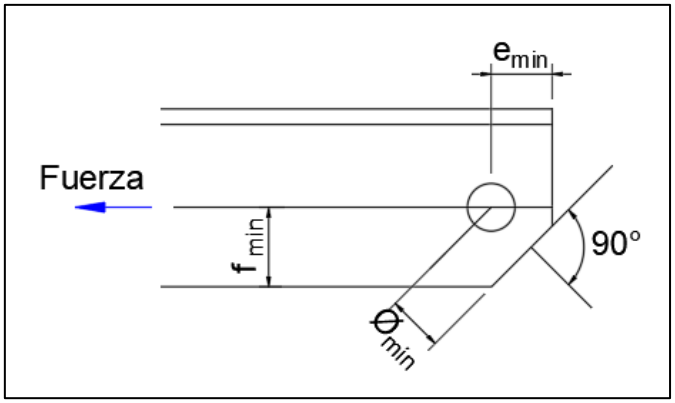
- ✓ Resistencia a cortante
- ✓ Resistencia a tensión
- ✓ Pernos sometidos a cortante y tensión combinados
- ✓ Capacidad de aplastamiento

Se deben tener en cuenta las consideraciones de las distancias mínimas para las conexiones.

- **Distancia de borde.** Considerar el siguiente esquema (Figura 80)

Figura 80

Distancias mínimas de borde "e"



Nota. Adaptado de ASCE 1015 (2015).

Se consideran la distancia mínima y el mayor valor obtenido de las siguientes ecuaciones:

$$e = 1.2 * Ppe/F_u t$$

$$e = 1.3 * dp$$

$$e = t + \frac{dp}{2}$$

$Fu =$ resistencia mínima especificada a la tensión en la parte de la conexión

$t =$ espesor del elemento.

$dp =$ diámetro nominal del perno.

$Ppe =$ fuerza transmitida por el perno.

- **Espaciamiento entre orificios centro a centro.** La distancia entre los centros de los orificios no debe ser menor que el valor para *Smin* obtenido, como se muestra a continuación

$$Smin = 1.2P/F_u t + 0.6d$$

- **Espaciamiento del borde al centro del orificio.** La distancia f, medida desde el centro del orificio hasta el eje del miembro, no puede ser menor que el valor *Fmin,* que se calcula con las siguientes ecuaciones:
  - Distancia mínima al borde laminado:

$$f_{min} = 0.85 * e_{min}$$

- Distancia mínima al borde cizallado:

$$\boldsymbol{f_{min} = 0.85 * e_{min} + 0.0625\Psi}$$

- **Orificios de fijación.** Se aplica para razones entre diámetros de orificios y pernos menores o iguales a 2. La fuerza P para el perno en un orificio de fijación está limitada por la siguiente expresión:

$$Ppe \leq 0.75(Lo - 0.5d_h) * t * Fu$$

$$P \leq 1.53 * d * t * Fu$$

$Lo =$ distancia mínima desde el centro del orificio hasta el eje de cualquier miembro

$dp =$ diámetro nominal del perno

$dh =$ diámetro orificio de fijación

$t =$ espesor del elemento

$Fu =$ resistencia mínima especificada a la tensión del miembro

6. Criterios para obras civiles, cimentaciones y edificios ocupacionales

Las cimentaciones de la infraestructura que conforman las subestaciones implica desarrollar una serie de actividades en términos de obras civiles. Si bien, en la mayoría de casos no incluyen obras de gran impacto, dado que las estructuras que soportan son livianas, es importante considerar la evaluación de cargas para su correcto análisis.

6.1 Análisis de para cimentaciones y fosos para equipos inductivos o transformadores

En este apartado se describen, de manera general, los análisis de cargas que se deben calcular para diseñar la cimentación de los transformadores de potencia, así como los requerimientos para obras complementarias de los equipos, entre las cuales se encuentra el diseño de los muros cortafuego, que se realiza con base en los títulos A, B y C del Reglamento NSR-10.

6.1.1.1 Dimensionamiento, funcionalidad y características generales de la cimentación para los transformadores

Estas cimentaciones se caracterizan por diseñarse geométricamente como unos fosos de contención, ya que se configuran con el fin de que en caso de presentarse una falla en los equipos puedan contener o colectar el aceite derramado para evitar afectaciones ambientales. Las cimentaciones para estos equipos se deben diseñar integralmente, con fosos colectores con descarga a un tanque que debe separar y almacenar el aceite derramado. Las especificaciones básicas de diseño para fosos, tanques de aceite y muros cortafuego son las siguientes:

La norma IEC 61936-1(2021) clasifica los transformadores según su volumen, el tipo de medio aislante, la proximidad y exposición de equipos y las estructuras cercanas a un posible incendio, por el contenido de líquido inflamable que contiene. El transformador se debe ubicar de tal manera que no propague un posible incendio a las estructuras adyacentes. La norma IEC 61936-1 ofrece las medidas específicas de las distancias adecuadas que debe tener un transformador, las cuales están relacionadas con el volumen de líquido inflamable que contenga (Tabla 15)

Tabla 15

Distancias de seguridad para transformadores para uso exterior

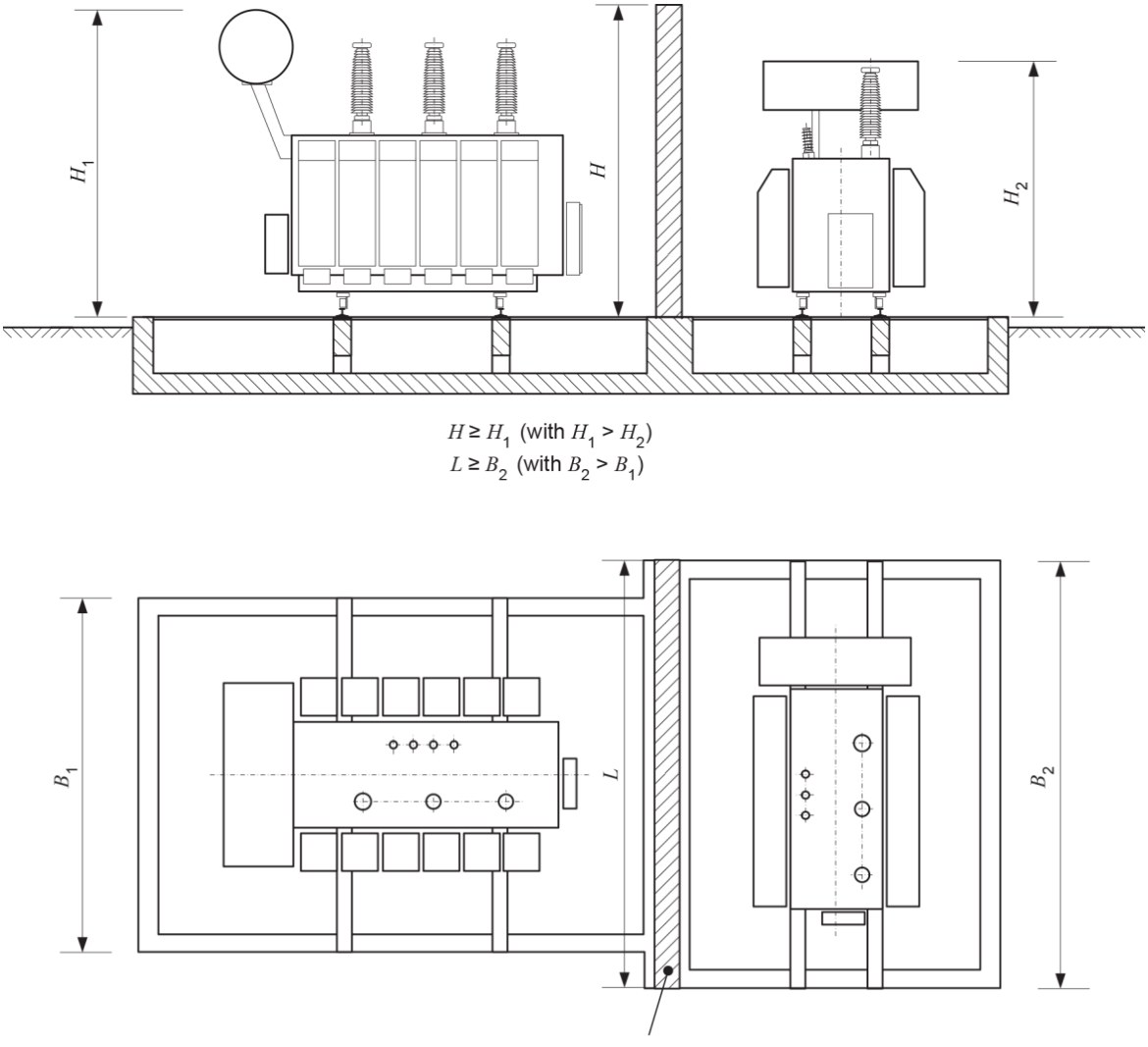
Tipo de transformador	**Volumen líquido (lt)**	**Distancia G1 a otro transformador o estructura con materiales NO combustibles(m)**	**Distancia G2 a otro transformador o estructuras con materiales combustibles (m)**
Transformadores aislados con aceite (O)	1000≤...<2000	3	7.5
	2000≤...<20000	5	10
	20000≤...<45000	10	20
	≥45000	15	30
Líquido menos inflamable, transformadores aislados(k) sin protección mejorada	1000≤...≤38000	7.5	7.5
	> 38000	4.5	15
Líquido menos inflamable, transformadores aislados(k) con protección mejorada	**Espacio libre G1 hasta la superficie del edifio o transformadores**		
	Horizontal (m)	**Vertical (m)**	
	0.9	1.5	
Transformador tipo seco A	**Clase de comportamiento ante el fuego**	**Distancia G1 hasta la superficie del edificio o transformadores adyacentes**	
		Horizontal (m)	**Vertical (m)**
	F0	1.5	3
	F1	NA	NA

Nota. Adaptado de IEC 61936-1 (2021)

Las distancias se presentan en los siguientes esquemas (Figura 81)

Figura 81

Esquemas dimensionales para la cimentación de los transformadores y separación de muros entre equipos



Nota. Tomado de IEC 61936-1 (2021).

$B_1 =$ longitud del foso que apoya el transformador

$B_2 =$ ancho del foso que apoya el transformador

$H *=$ altura de la pared divisoria resistente al fuego

$H_1 =$ altura de la cámara de expansión del transformador o tanque superior del transformador

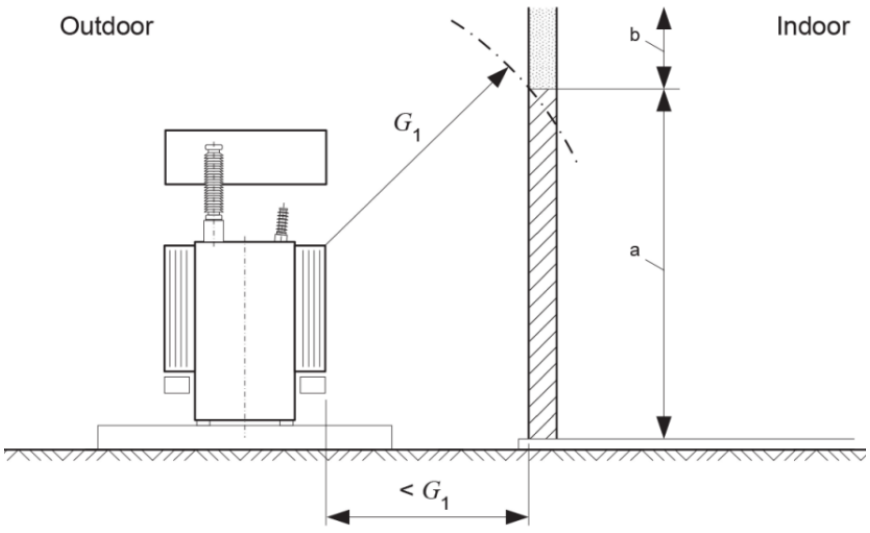
$H_2 =$ Altura de la cámara de expansión del transformador o tanque del transformador inferior

$L *=$ longitud del muro cortafuego

Se anexan las imágenes respecto a las distancias de los transformadores según la tabla15 con dimensiones G1 y G2

Figura 82

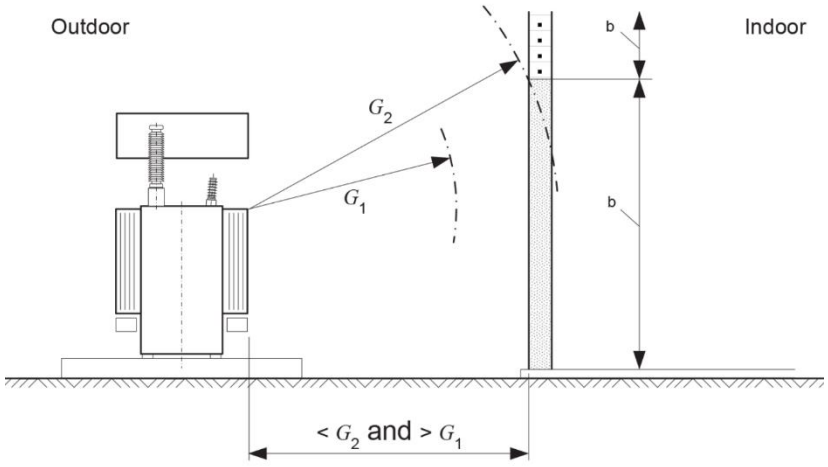
Distancia entre transformador y superficie de edificio de material no combustible



Nota. Tomado de IEC 61936-1 (2021).

Figura 83

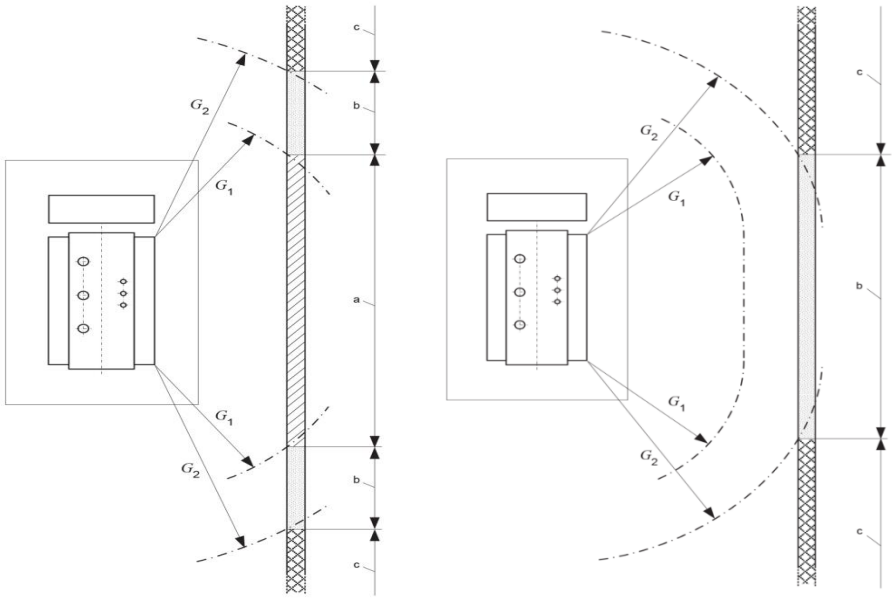
Distancia entre transformador y superficie de edificio de material combustible



Nota. Tomado de IEC 61936-1 (2021).

Figura 84

Distancia entre transformador a estructuras de material no combustible y combustible



Nota. La figura de la derecha presenta distancias a infraestructura con material no combustible y la de la izquierda con material combustible. Tomado de IEC 61936-1 (2021).

El diseño de las cimentaciones para los transformadores debe garantizar esas distancias de seguridad. La longitud del contorno exterior del foso debe estar acorde con las especificaciones de la norma IEC 61936.

Se pueden tener diversos fosos, el primero es el colector, el cual debe tener la capacidad para contener el 20% del volumen de aceite del equipo. Esto implica que estos fosos deben contar con tanques de almacenamiento adosados para cubrir el volumen faltante de aceite.

Así mismo, se pueden construir fosos autocontenedores, que deben contener el 100% del aceite. No obstante, es importante tener presentes las recomendaciones del CIGRÉ 537 (2013), respecto a aumentar la contención del tanque o dique a un 20%, de tal manera que se disminuya la tasa de quema a una atura libre mayor a la que se encuentra el combustible. Por esta razón, se recomienda que los autocontenedores tengan una capacidad del 120% de almacenamiento.

Adicionalmente, se debe disponer de una capa de triturado uniforme, de tal manera que esta grava permita extinguir el fuego en caso de que el aceite caiga inflamado. En las zonas laterales del foso se debe colocar una reja metálica. El equipo se debe anclar a la cimentación con pernos embebidos en el concreto, según las recomendaciones del fabricante del equipo.

En cuanto a la escogencia del tipo de separación física que se debe emplear entre los transformadores que contienen combustible, ubicados en exteriores, y las demás estructuras adyacentes, como cuartos de control y otros tipos de estructura que hacen parte de la subestación, el capítulo 6.1.4 de la Norma NFPA 850 presentan las siguientes especificaciones:

- Tipo y cantidad de aceite en el transformador.
- Tamaño que pueda representar el derrame y el área o superficie de contención.
- Tipo de estructuras adyacentes (con o sin combustibles contenidos).
- Tipo de estructuras adyacentes con equipos expuestos, incluidas las líneas de transmisión, los interruptores, los equipos de control y otros transformadores.
- Potencia nominal del transformador.

- Sistema de protección contra incendios.
- Tipos de relés de protección eléctrica.
- Disponibilidad de transformadores de reserva.

En casos particulares se reflejará la necesidad de emplear muros cortafuegos, los cuales se dispondrán según lo establece la Norma NFPA 850 (2020) en el capítulo 6. A renglón seguido se presentan algunas consideraciones importantes que se deben tener en cuenta para ubicar los muros cortafuego.

- Cuando los transformadores con combustible contengan volúmenes superiores a 100 galones, estos deben estar separados de las áreas adyacentes por barreras contra incendios, que deben tener una clasificación de resistencia al fuego de 3 horas.
- En la tabla 16 se presentan los criterios de separación de transformadores según la NFPA 850.

Tabla 16

Criterios de separación de transformadores

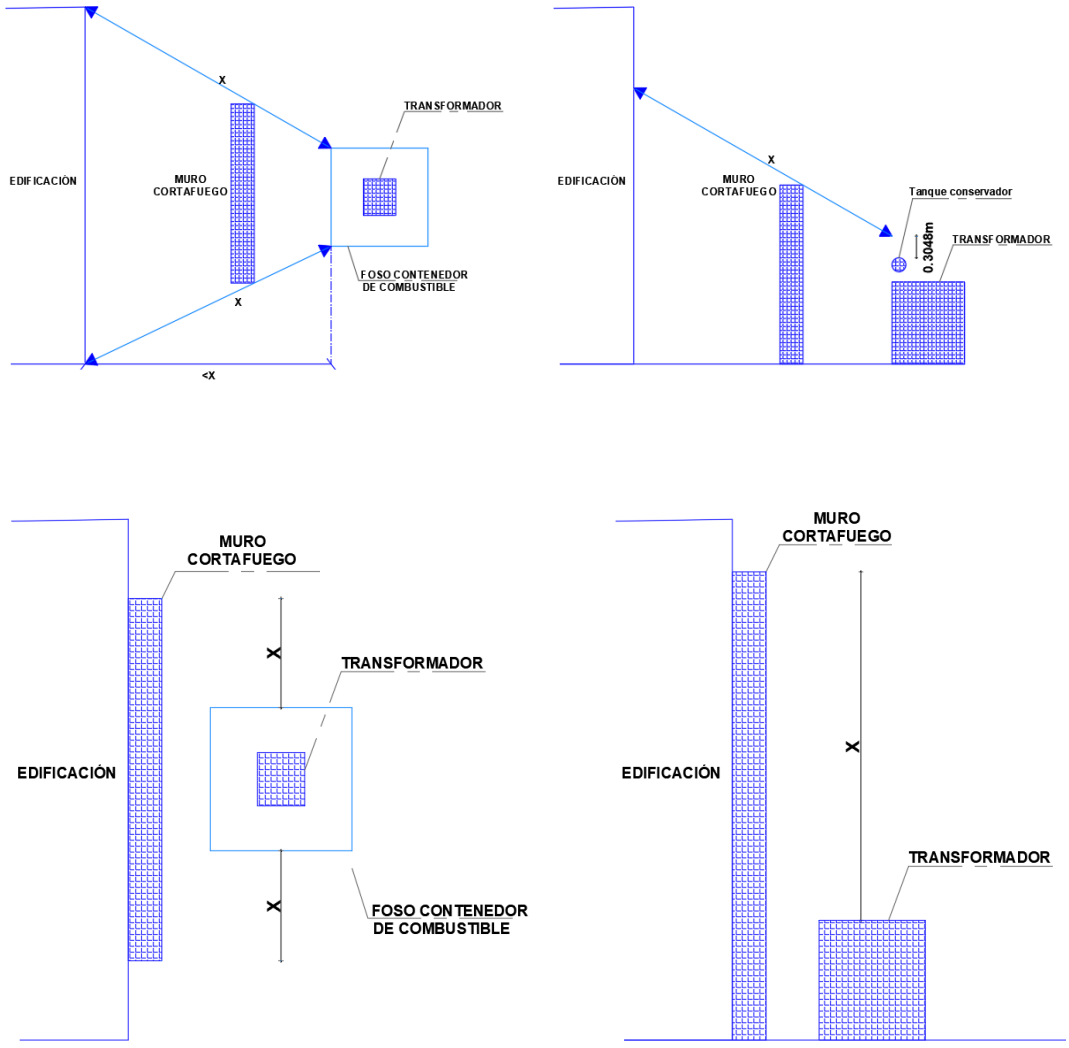
CRITERIOS DE SEPARACIÓN DE TRANSFORMADORES			
Capacidad de aceite del transformador		**Separación mínima sin muro cortafuego**	
Gal	**L**	**Ft**	**m**
<500	<1893	5	1.5
500-5000	1893-18925	25	7.6
>5000	>18925	20	15

Nota. Tomado de la NFPA 850

Seguidamente se presentan gráficamente las recomendaciones de las distancias mínimas que recomienda la NFPA 850

Figura 85

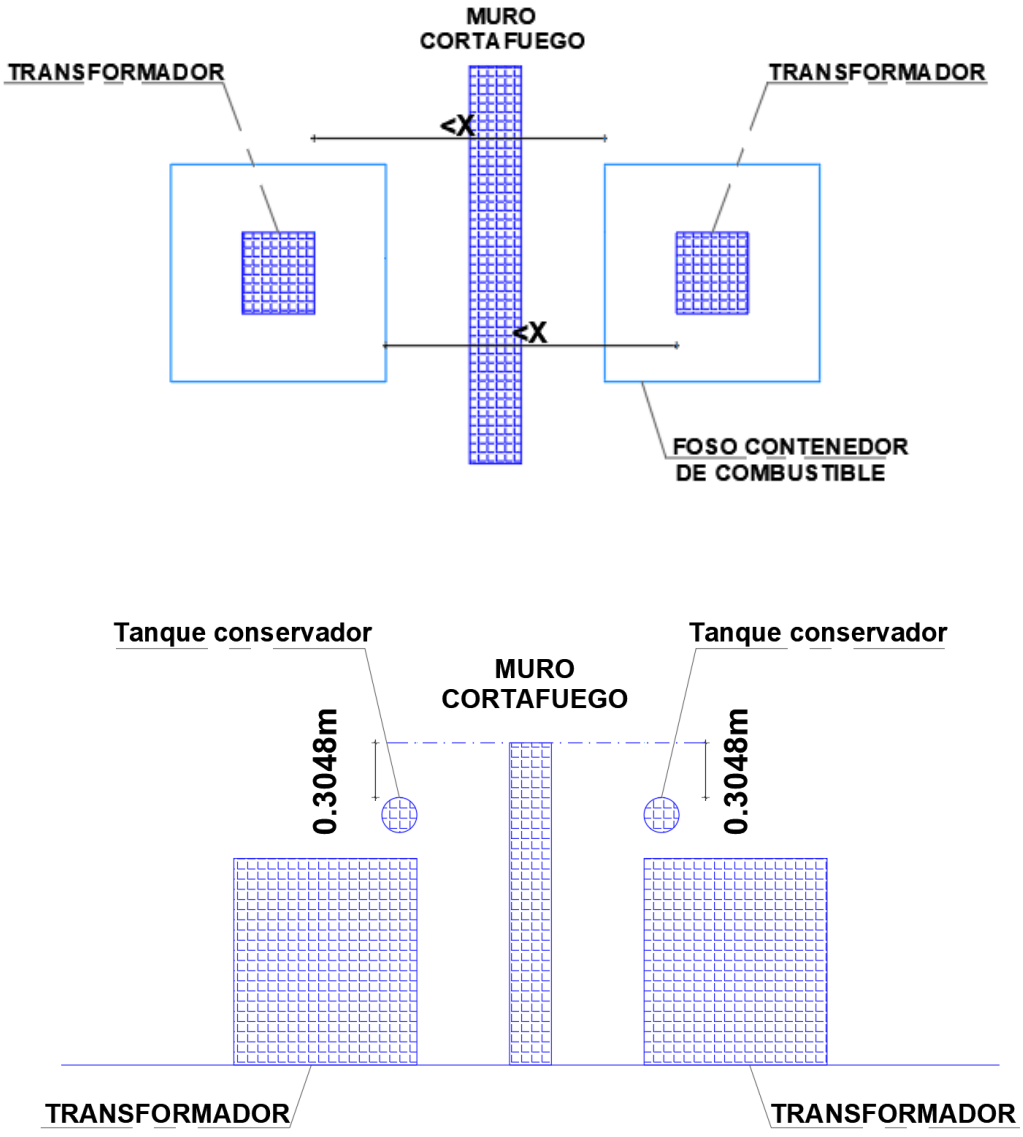
Recomendaciones de las separaciones de transformadores aislados



Nota. Adaptado de la NFPA 850

Figura 86

Criterios de separación de transformadores que contienen aceite, para exteriores



Nota. Adaptado de la NFPA 850

En caso de no cumplir con estas distancias es necesario diseñar el muro cortafuego, aunque se pueden emplear prefabricados.

6.1.1.2 Análisis y consideraciones específicas para el diseño de los fosos de los transformadores

En esta sección se brindan orientaciones básicas para el diseño de la cimentación del transformador, cumpliendo las especificaciones recomendadas por las normas.

Cuando las necesidades específicas del equipo lo requieran, los cimientos de los autotransformadores y reactores deben consistir en vigas con rieles apoyadas en placas de concreto diseñadas para las cargas estáticas y dinámicas que aplican a estos equipos.

A continuación, se presenta un esquema general del dimensionamiento de las cimentaciones para estos equipos.

Figura 87

Esquema para foso y carrilera de transformadores

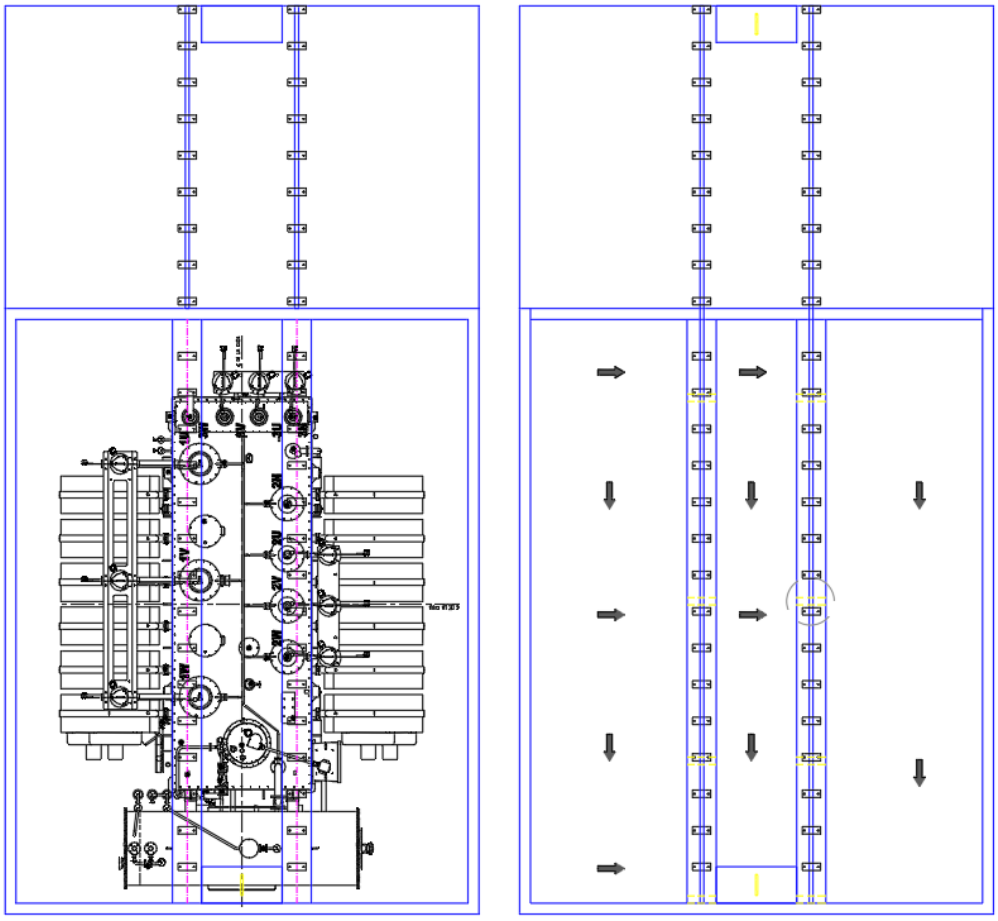
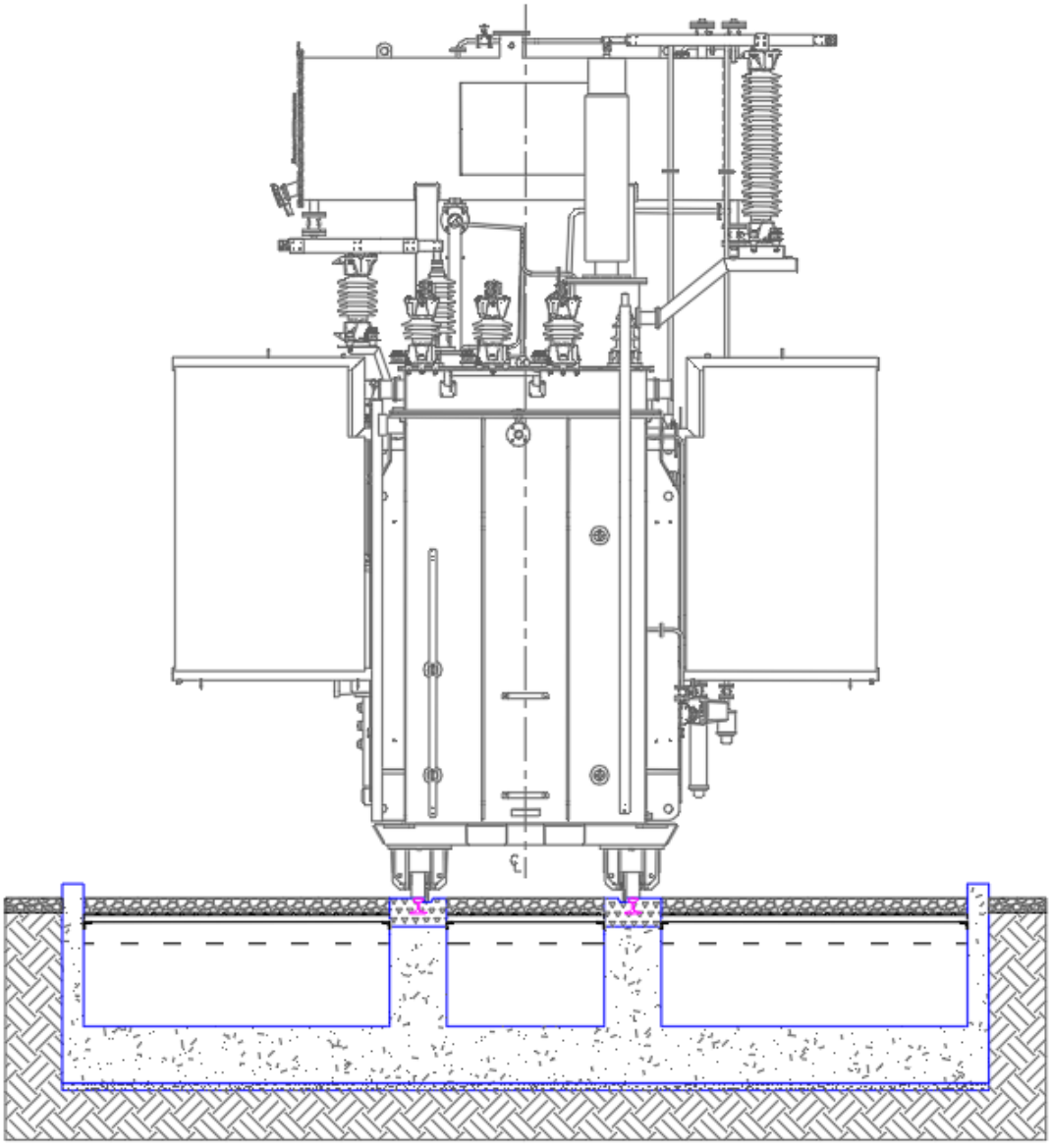


Figura 88

Esquema tipo en alzado para transformadores con ruedas soportado en vigas carrileras.

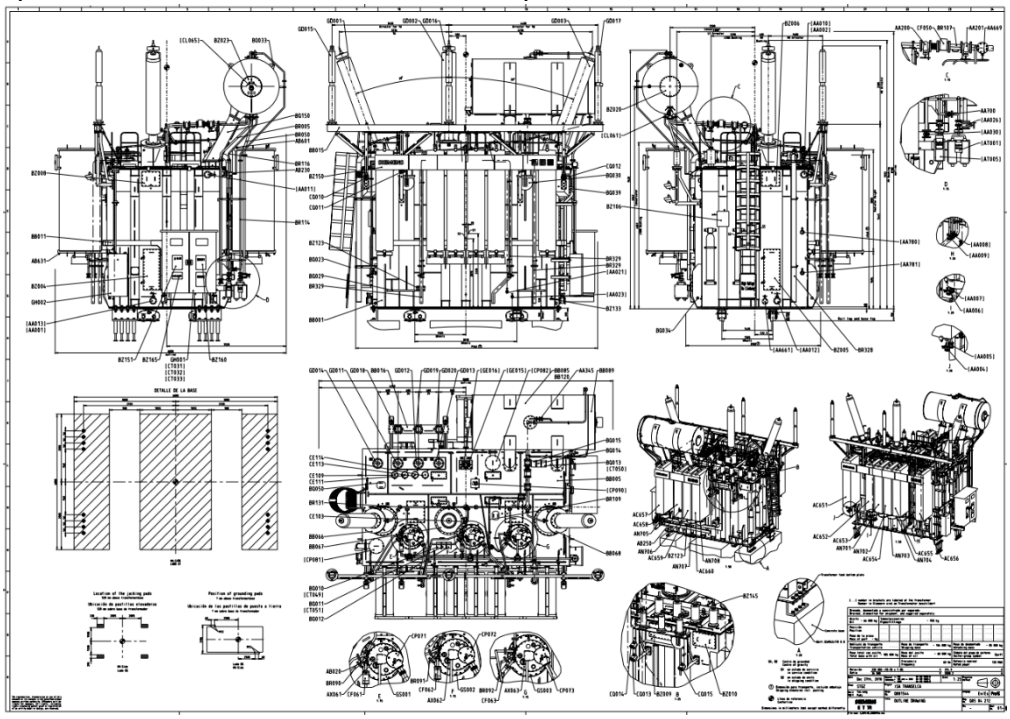


- **Datos iniciales**

Para desarrollar adecuadamente el diseño estructural del foso se debe contar con la siguiente información: cuantías mínimas de diseño para la placa, bordillos, vigas de cimentación y pedestales, cargas muertas constituidas por el peso propio de los elementos estructurales y las cargas adicionales por otros elementos como grava, rejillas, bordillos, etc; cargas vivas (si las requiere), cargas de líquido contenido, parámetros sísmicos, presiones laterales de la tierra, análisis carga por control de fuego y carga de viento (si las requiere), combinaciones de carga de diseño y de servicio, materiales y parámetros geotécnicos. La configuración geométrica para los fosos de los transformadores no es estándar; sin embargo, siempre se debe contar con la ficha técnica (Figura 89) del transformador particular que se va a emplear, ya que esta permite conocer las distancias mínimas de los fosos, las vigas y los pedestales, de acuerdo con las dimensiones del equipo. Esto permite tener las dimensiones preliminares para el análisis inicial de la cimentación.

Figura 89

Ejemplo ficha técnica de un transformador tipo



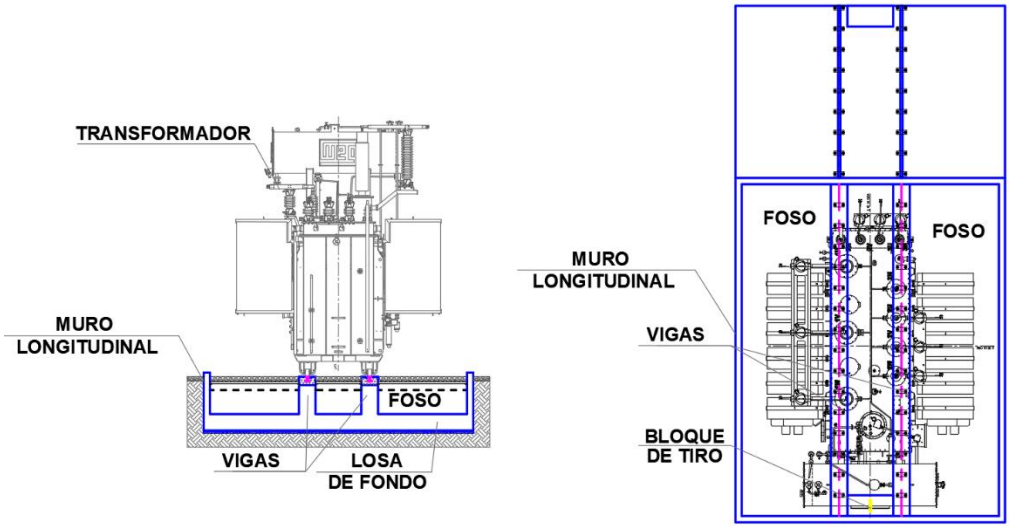
Nota. tomado de un transformador de 120mva de (ABB)

Para realizar un adecuado dimensionamiento de la cimentación es importante revisar en la ficha técnica la siguiente información: localización de los pernos de anclaje, localización de los puntos de gateo, saber si cuenta con ruedas, si es así, verificar la distancia entre ellas, validar el centro de gravedad, el centro geométrico, el volumen del aceite, el peso del equipo, la altura total del equipo con sus respectivas dimensiones de ancho y alto.

La configuración general de la cimentación se presenta a continuación:

Figura 90

Configuración dimensional del foso de un transformador



- **Consideraciones para el análisis y diseño**

  Se debe tener en cuenta como esté constituida la subestación, con el fin de verificar el número de transformadores que la conforman. Es decir, si se cuenta con más de dos equipos en una sola fila, la cimentación de estos corresponderá a una sola losa maciza con muros cortafuego entre ellos, como se muestra en la imagen 9

Imagen 10

Ubicación de muros cortafuego, en casos de no cumplir con distancias de seguridad



Nota. Fotografía de la SE Magdalena Medio

Cualquier método de análisis que se utilice para la cimentación del transformador debe cumplir la verificación de estabilidad por volcamiento, cuyo factor de seguridad debe ser de 1.50; además, el chequeo de los esfuerzos máximos debe ser menor a la capacidad admisible del suelo (valor indicado en el estudio de suelos).

Las cuantías mínimas de diseño (retracción y temperatura) se indican en el título C del reglamento NSR-10 (Tabla 17).

Tabla 17

Tabla de cuantías mínimas para estructuras en concreto

ELEMENTO	CUANTÍA
Placa de cimentación (en contacto permanente con líquidos	0.0030 en área bruta
Vigas de cimentación	0.0030 en área efectiva
Pedestales para anclajes y para soporte de equipos terminales	0.005 en área bruta
Bordillos de retención de aceite	0.0030 en área bruta

Nota. Adaptada de la información de la NSR-10

Se debe verificar una de las cargas críticas actuantes en la cimentación, la cual corresponde a la carga por control de fuego, de acuerdo con el código NFPA 5000, en el que se debe incluir el siguiente análisis

$$Cexpl = Pexpl * Aexp$$

$Cexpl =$ carga producto del fuego en Kn

$Pexpl =$ presión de fuego= 0.24 kN/m^2 (NFPA 5000, 2024)

$Aexp =$ área expuesta del muro cortafuegos, a la aplicación de la presión del fuego en m^2

En el avalúo de cargas se deben validar las fuerzas verticales (por el peso del equipo) que actúan en los puntos de apoyo, considerando la excentricidad del equipo. Adicionalmente, se deben calcular las fuerzas de sismo del equipo que actúan en la cimentación. En el análisis se debe tener en cuenta otro tipo de cargas como grava, rejillas, rieles, muros perimetrales, rellenos, etc.

A continuación, se presenta una metodología, establecida en varios documentos de cimentaciones, que permite evaluar las cargas excéntricas considerando no exceder los esfuerzos permisibles del suelo

$FS_X = \frac{Pv*Bc}{2*M_x}$

$FS_y = \frac{Pv*Ld}{2*M_Y}$

$e_x = \frac{My}{Pv} < \frac{Ld}{4}$

$e_y = \frac{Mx}{Pv} < \frac{B}{4}$

$L' = Ld - 2 * e_x$

$B' = Bc - 2 * e_y$

$\bar{\sigma} = \frac{Pv}{L'*B'}$

$FS_X =$ factor de seguridad al volcamiento en la dirección x

$FS_y =$ factor de seguridad al volcamiento en la dirección y

$Pv =$ carga vertical (daN)

$Ld =$ dimensión de la cimentación en dirección x

$Bc =$ dimensión de la cimentación en dirección y

$Mx =$ momento volcador en dirección x (daN.m)

$My =$ momento volcador en dirección y (daN.m)

$e_x =$ excentricidad de la carga en dirección x

$e_y =$ excentricidad de la carga en dirección y

$L' =$ dimensión efectiva de la cimentación en dirección x

$B' =$ dimensión efectiva de la cimentación en dirección y

$\sigma =$ esfuerzo del suelo (daN/m^2)

$\bar{\sigma} =$ esfuerzo medio equivalente (daN/m^2)

6.1.1.3 Combinaciones de carga

A renglón seguido se presentan las combinaciones de carga para el diseño y la estabilidad de los fosos.

Tabla 18

Combinaciones de cara para el diseño y la estabilidad de las cimentaciones

Combinaciones - Diseño estructural	1) 1.4 PP
	2) 1.2 PP+-1.0Vd(x,y)
	3) 1.2 PP +- 1.0 E(x,y)+1.0 Ez
	4) 0.9 PP+- 1.0 E(x,y) - 1.0Ez
Combinaciones - Estabilidad	1) 1.0 PP
	2) 1.0 PP +- 1.0Vs(x,y)
	3) 1.0 PP +- 0.7 E(x,y) + 0.7Ez
	4) 0.6PP +-0.7 E(x,y)-0.7Ez

Nota. Tomado de Interconexión Eléctrica S.A. E.S.P. – ISA (2022).

$PP =$ peso propio del equipo y/o de la estructura

$V_d =$ carga de viento de diseño sobre el equipo y/o de la estructura.

$V_s =$ carga viento de servicio sobre equipo y/o de la estructura.

$E_{x,y} =$ cargas por sismo horizontal sobre el equipo o la estructura

En el caso particular de los fosos, debido a la rigidez de los equipos que soportan, se debe trabajar con la aceleración del periodo cero del espectro sísmico de diseño.

$E_{x,y} =$ carga por sismo vertical sobre el equipo o la estructura. Se considera que la carga de sismo vertical debe ser $E_{x,y}$* 20%, es decir, 0,2 x 2,5 x Aa x Fa x I.

Respecto al análisis y diseño estructural que confirman la cimentación, este se realiza con una metodología convencional, empleando modelos matemáticos que permitan establecer las solicitaciones de cada elemento, de tal manera que se puedan realizar los diseños del concreto reforzado verificando que cumplan con cuantías mínimas, con fuerzas cortante resistente y momentos.

6.2 Análisis para los muros cortafuego

Con base en lo expuesto, en caso de no cumplir con las distancias mínimas de seguridad se requiere implementar muros cortafuego. A continuación, se presentan algunas recomendaciones y procedimientos de análisis y diseño para estas estructuras.

6.2.1 Procedimiento para el análisis y los cálculos del diseño de los muros cortafuego

Teniendo claras las particularidades evaluadas previamente, que establecen la necesidad de ubicar muros cortafuego en casos específicos en los que no se cumplan las distancias mínimas de seguridad, y considerando los sobreanchos necesarios que exige la norma para que el muro cubra una posible eventualidad de incendio, seguidamente se dan los parámetros generales para estandarizar su proceso de análisis y diseño.

- **Generalidades para el análisis**

  Se deben describir los materiales y dimensiones de las estructuras del muro, tanto del muro como de la cimentación y su profundidad. Para las dimensiones del muro se debe tener en cuenta la distancia entre los radiadores del transformador +1.20 m o la distancia entre los bordes del área de contención. Se toma la mayor entre las dos, según la norma NFPA 850.

  En el análisis se debe considerar la carga por control de fuego. Así mismo, es importante definir el tipo de cargas que aplican, de acuerdo a la norma sismorresistente, tomando los factores del suelo y sismo del estudio de suelos del proyecto.

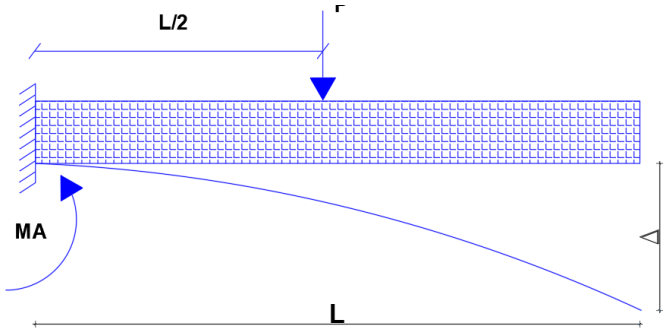
  Para el caso de estudio se emplea un factor de seguridad de volcamiento de 1.5. Para la resistencia al vuelco, solo se toma en cuenta el efecto estabilizador del peso del cimiento, con las reacciones a nivel de la cimentación y los esfuerzos actuantes sobre el suelo.

  Se debe calcular la resultante de cargas de la cimentación, su volumen y volumen de relleno. Cabe tener en cuenta que el modelo empleado está despreciando totalmente la fricción entre las paredes y el bloque de fallas originadas por la cohesión o por la fricción interna del suelo.

  Es importante verificar la deflexión del muro en la parte más alta, la cual se puede simular con una viga empotrada con una longitud que corresponde a la altura del muro, como se muestra a continuación.

Figura 91

Esquema para evaluar la deformación máxima del muro, como una viga empotrada



$$\Delta = \frac{5 * P * L^3}{48 * E * I}$$

Para la fuerza sísmica, con la aceleración máxima del espectro de diseño, se determina la fuerza horizontal aplicada en el muro y se establece la relación entre las solicitaciones y la capacidad estructural de cada elemento del muro cortafuego. Esto se debe validar con el sismo o con la carga de viento.

Seguidamente se presentan las combinaciones de carga para el diseño y la estabilidad de los muros cortafuego.

Figura 92

Tabla con las combinaciones de cargas de diseño y estabilidad de los muros cortafuego

Combinaciones - Diseño estructural	1) 1.4 PP+1.0 Pf
	2) 1.2 PP+-1.0Vd(x,y)
	3) 1.2 PP +- 1.0 E(x,y)+1.0 Ez
	4) 0.9 PP+- 1.0 E(x,y) - 1.0Ez
Combinaciones - Estabilidad	1) 1.0 PP + 1.0 Pf
	2) 1.2 PP +- 1.0Vs(x,y)
	3) 1.0 PP +- 0.7 E(x,y) + 0.7Ez
	4) 0.6PP +-0.7 E(x,y)-0.7Ez

Nota. Tomado de Interconexión Eléctrica S.A. E.S.P. – ISA (2022).

Donde:

$PP =$ peso propio del equipo o de la estructura

$P_f =$ presión por fuego de 0.24 kPa perpendicular a la cara del muro

$V_d =$ carga de viento de diseño sobre el equipo o la estructura

$V_s =$ carga viento de servicio sobre el equipo o la estructura

$E_{x,y} =$ cargas por sismo horizontal sobre el equipo o la estructura

Para los fosos, debido a la rigidez de los equipos que soportan, se debe trabajar con la aceleración del periodo cero del espectro sísmico de diseño.

$E_{x,y} =$ carga por sismo vertical sobre el equipo o la estructura. Se considera que la carga de sismo vertical debe ser $E_{x,y}$* 20%, es decir, $0.20 * 2.5 * Aa * Fa * I$

- **Generalidades para el diseño**

  Se deben considerar los siguientes parámetros: coeficientes de aceleración, coeficientes de sitio, coeficiente de importancia, dimensiones del muro, resistencia a compresión del concreto, coeficientes de disipación de energía y módulo de elasticidad del concreto.

  Se calcula la máxima aceleración horizontal teniendo en cuenta el cálculo del peso del muro y la fuerza sísmica, con la cual se evalúa la disipación de energía y se analizan las solicitaciones del muro en sentido X y en sentido Y. Además, se calcula la cuantía en sentido vertical y horizontal, determinando el área y el refuerzo vertical del muro

  En cuanto al diseño de la cimentación del muro, es importante conocer las reacciones de carga de diseño y de trabajo, contar con los parámetros de diseño del suelo, de tal manera que en el análisis de cargas de trabajo y de diseño se calcule la carga horizontal, la profundidad del bloque de presión, los momentos en la base, el momento estabilizador, el factor de seguridad al vuelco, la excentricidad, el lado efectivo de la zapata y el máximo esfuerzo actuante.

  Si en el análisis con carga de trabajo el momento está dado a nivel de la base no es necesario adicionarle el momento generado por la fuerza horizontal.

Para el diseño de concreto hay que determinar los esfuerzos cortantes, el momento en placa voladizo, el área de acero y la cuantía en cara inferior y superior, tanto para refuerzo longitudinal como para refuerzo transversal.

Para determinar la longitud de desarrollo de refuerzo vertical se deben acatar las recomendaciones de la norma NSR-10

6.3 Análisis para edificios ocupacionales

Se presenta el procedimiento básico para el dimensionamiento de las estructuras ocupacionales que conforman las subestaciones, de tal manera que cumplan con la normatividad vigente.

6.3.1 Análisis para edificaciones

El análisis y el diseño estructural debe ajustarse a lo estipulado en la norma NSR-10, teniendo en cuenta los efectos de cargas, tales como la evaluación de su peso propio, la carga viva y la carga de acabados, al igual que las cargas originadas por movimientos sísmicos, considerando los requisitos indicados en las consideraciones de los espectros de diseño.

Los sistemas estructurales más comunes para las edificaciones ocupacionales de las subestaciones son pórticos resistentes a momento; sin embargo, se pueden presentar casos particulares que solicite el operador de la subestación.

A continuación, se describen las consideraciones específicas para el dimensionamiento y los requerimientos espaciales de los edificios ocupacionales que conforman una subestación.

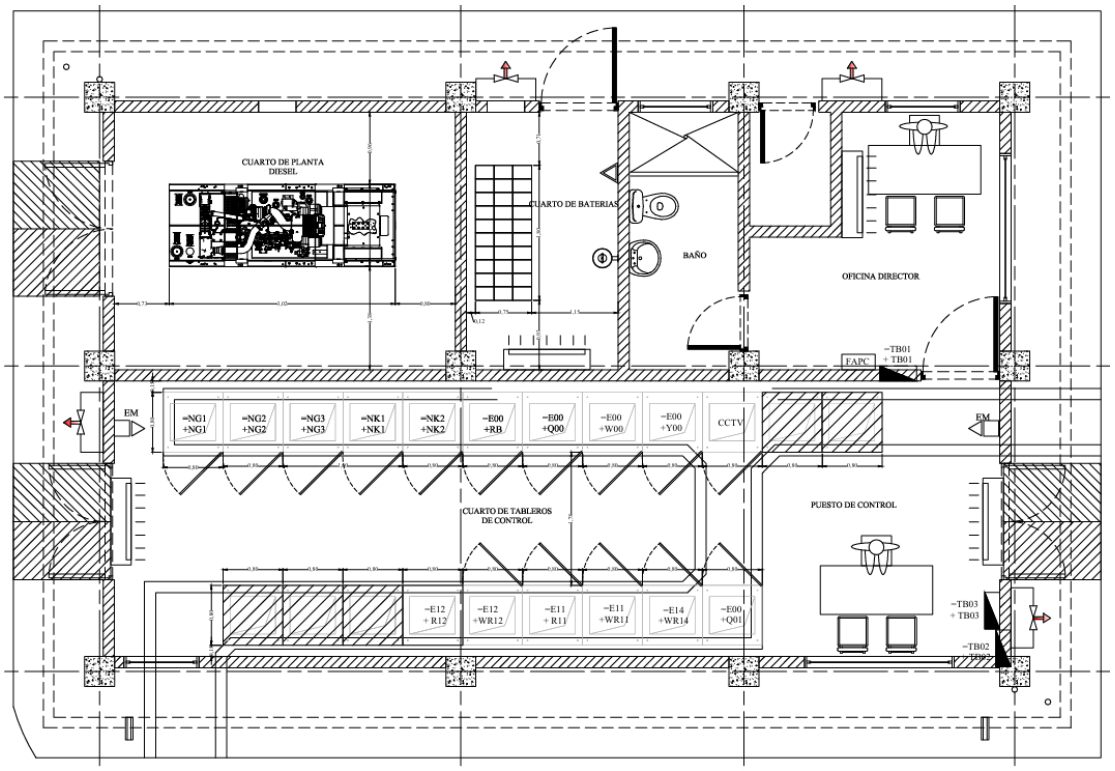
6.3.1.1 Dimensionamiento, funcionalidad y características generales del edificio de control convencional

El edificio de control debe tener los siguientes espacios: sala de control (esta zona se dimensiona según la cantidad de gabinetes o celdas que requiera la subestación), sala de

reuniones, sala de baterías, cocineta, servicios sanitarios, dormitorio para operadores (en algunos casos), bodega, cuarto de químicos. Más adelante se presenta un esquema general de la planta de distribución de espacios del cuarto de control (figura xx).

Figura 93

Ejemplo de un cuarto de control (configuración arquitectónica)



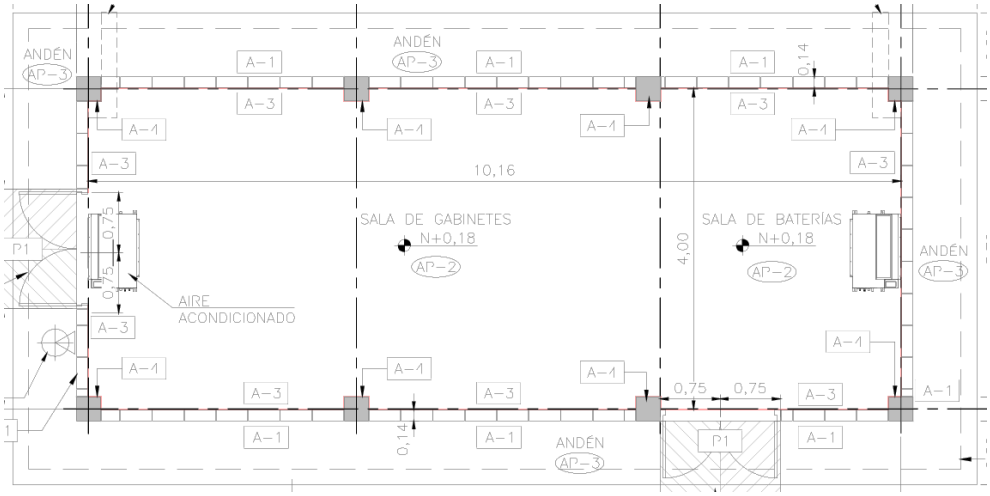
La edificación debe contar con el diseño del sistema estructural, la cimentación, los elementos no estructurales, junto con los diseños adicionales, como el hidráulico y el eléctrico, respectivamente.

6.3.1.2 Dimensionamiento, funcionalidad y características generales de la caseta de relés

Esta caseta debe disponer de un espacio para gabinetes y baterías; además, contar con mínimo dos accesos y aire acondicionado.

Figura 94

Ejemplo de una caseta de relés (configuración arquitectónica).

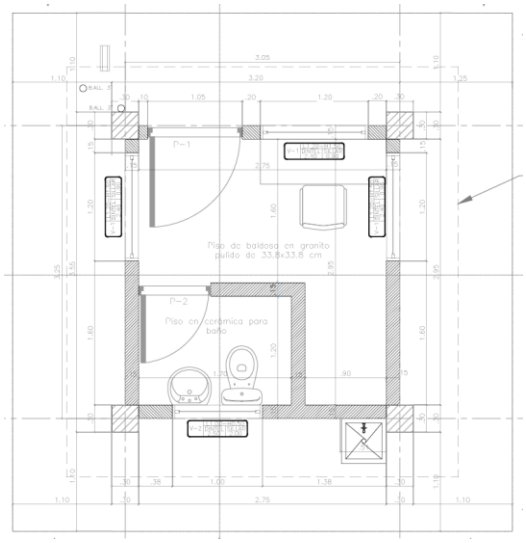


6.3.1.3 Dimensionamiento, funcionalidad y características generales de la portería

Debe disponer de un espacio para el puesto de vigilancia, el camerino y servicios sanitarios

Figura 95

Ejemplo de la portería (configuración arquitectónica).



6.3.1.4 CRITERIOS DE ANÁLISIS Y DISEÑO DE EDIFICIOS OCUPACIONALES ESTRUCTURA

El análisis y el diseño de las edificaciones deben cumplir con la norma NSR-10 Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10 Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2017), la ACI 318 - Requisitos del Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318-19, 2019) y la AISC 360 - Specification for Structural Steel Buildings (AISC 360-16, 2016).

El desarrollo de las memorias estructurales para los edificios ocupacionales debe tener como mínimo, un contenido específico que cumpla con los siguientes aspectos:

- Introducción
- Generalidades y descripción de la estructura
- Consideraciones y análisis de diseño
- Evaluación de cargas
- Combinación de cargas
- Descripción de materiales
- Fuerzas sísmicas de diseño
- Fuerzas sísmicas para el sismo del umbral de daño (grupo de uso IV)
- Cálculo de derivas para el sismo de diseño
- Verificación de derivas para el umbral de daño
- Verificación de irregularidades
- Diseño de los elementos estructurales de la superestructura
- Diseño de cimentación
- Diseño de elementos no estructurales

En las generalidades de la estructura es importante hacer una descripción resumen de sus características, como el detalle de vigas, columnas, muros y espesores de elementos. Además, se debe validar que esta información coincida con los anexos de los cálculos, junto con los planos detallados.

- **Consideraciones para el análisis y diseño**

En el planteamiento del modelo matemático es importante tener definidos los siguientes requerimientos: ubicación y parámetros sísmicos del sistema estructural, en el que normalmente se emplean pórticos resistentes a momento. Partiendo de esa definición, según la zona de amenaza sísmica, se extraen los valores de $R_O\ y\ \Omega$. Se debe definir el tipo de análisis para las fuerzas sísmicas que se van a emplear, lo cual implica establecer si el análisis se realizará por fuerza horizontal equivalente (FHE) o por análisis dinámico por respuesta al espectro sísmico (AD). En la evaluación de cargas se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- $Ds =$ cargas que permanecen siempre en la estructura (pisos, muros, acabado de pisos, fachadas)
- $PP =$ peso de los elementos estructurales (vigas, losas, columnas). Hace parte de la carga muerta.
- $Li =$ carga general de 5 kN/m^2, correspondiente para industrias livianas. Sólo se utiliza para el diseño de la losa de contrapiso. Generalmente en el modelo de la estructura esta carga no se utiliza.
- $Lr =$ carga general de 1.8 kN/m^2; sin embargo, la carga mínima es 0.5 kN/m^2 para cubiertas con pendientes menores a 15° o 30% de pendiente, B4.4.2.1-1. Esta carga es para la cubierta de la estructura, siempre y cuando el acceso sea limitado; si no lo es, el acceso Lr debe ser igual a la menor carga viva utilizada en la estructura.
- $Gr =$ carga 1.0 kN/m^2 para cubiertas con pendientes menores a 15° o 30% de pendiente y 0.5 kN/m^2 para cubiertas con pendientes superiores (según B.4.8.3.1, esta carga debe aplicarse al modelo cuando la altitud donde se ubique el proyecto sea mayor de 2000 m.s.n.m.).
- $Le =$ sólo se aplica cuando se tengan antepechos que permitan la acumulación de agua lluvia en la cubierta.
- $H =$ cuando se utilizan edificaciones con sótanos, se deben utilizar las cargas de empuje de suelo.

$E(x, y, z) =$ carga producida por efectos sísmicos. Con los parámetros sísmicos, según el municipio y los parámetros del suelo, se deben obtener los espectros sísmicos tanto de diseño como de umbral de daño. La fuerza sísmica aplicada al edificio no es la misma calculada con el análisis sísmico seleccionado, la fuerza E debe aplicarse el factor de disipación de energía R.

$$E(x, y, z) = \frac{Fs}{R}$$

- **Combinación de cargas**

La combinación de cargas y los factores de sobrecarga para estructuras metálicas de pórticos y soportes de equipos y cimentaciones de pórticos y soportes de equipos son las siguientes:

Combinaciones para diseño

1.4D	(B.2.4-1)
1.2D + 1.6L + 0.5 (G o Lr o Le)	(B.2.4-2)
1.2D + 1.6 (G o Lr o Le) + 1.0L	(B.2.4-3)
1.2D + 1.0E +1.0L	(B.2.4-5)
0.9D + 1.0E +1.6 H	(B.2.4-7)

Combinaciones de servicio y chequeo de deflexiones

1.0D	(B.2.3-1)
1.0D + 1.0H + 1.0L	(B.2.3-2)
1.0D + 1.0 (G o Lr o Le)	(B.2.3-3)
1.0D + 0.75L + 0.75 (G o Lr o Le)	(B.2.3-4)
1.0D + 0.7E	(B.2.3-6)
1.0D + 0.75L + 0.75 (G o Lr o Le) + 0.75 (0.7E)	(B.2.3-8)
0.6D + 0.7E + 1.0H	(B.2.3-10)

- **Avalúo de cargas y verificación de derivas**

Se deben determinar las cargas muertas, tales como peso de los muros, acabados, impermeabilización de cubierta, aire acondicionado, antepechos y la carga de la cubierta con su respectiva pendiente.

Así mismo, se deben establecer las cargas vivas, como personal de operación, equipos, particiones móviles y demás.

En cuanto a las fuerzas sísmicas, se debe analizar el peso que actúa en la estructura, de tal manera que se pueda calcular su periodo fundamental, el cortante basal y la fuerza sísmica horizontal, según el título A.4 de la NSR-10, el cual presenta la metodología de cálculo de la fuerza horizontal equivalente.

Respecto al cálculo de derivas, y partiendo del cálculo de las fuerzas sísmicas, se deben revisar las deformaciones de las columnas de la estructura en cada piso. El límite de derivas es del 1% de la altura del piso.

Las derivas por fuerzas sísmicas para el sismo de diseño no son de obligatorio cumplimiento para edificaciones de un piso, según A.6.4.1.5. No obstante, si no existen derivas superiores al 1% este chequeo se debe enunciar en el cuerpo de la memoria y registrar el cálculo en los anexos. En caso contrario, se pueden emplear métodos para reducir las derivas, como el aumento de las secciones, el aumento del f'c, de tal manera que aumente el módulo de elasticidad, también revisar con detenimiento la evaluación de cargas muertas o generar algún tipo de arriostramiento a la estructura.

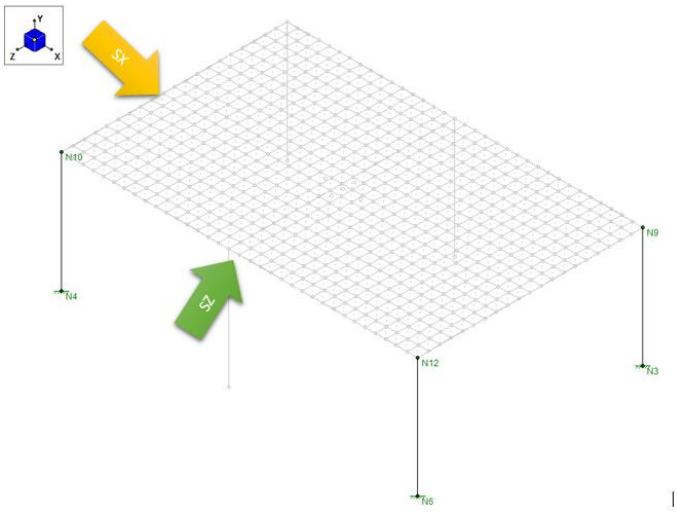
El cálculo de derivas para umbral de daño implica que el límite de derivas es de 0.4% de la altura de piso. Estas deben cumplir para edificaciones de un piso, en caso de que no cumplan el porcentaje, se debe aplicar alguna de las metodologías mencionadas para reducir las derivas.

- **Verificación de irregularidades**

Irregularidad torsional debido a movimientos entre las esquinas de la estructura. Existen dos tipos: normal y extrema. Se debe evaluar cada una de estas irregularidades en ambos sentidos del sismo (Sx y Sy).

Figura 96

Figura esquemática para validación de irregularidades en ambos sentidos sísmicos (Sx y Sy)



Irregularidad en planta Φp. El cálculo de irregularidad torsional para el factor de reducción en planta se debe realizar según la tabla A.3.6 y la figura A.3.1 de la NSR-10.
Irregularidad en Altura Φa. Si la estructura es de más de un piso, se deben revisar las irregularidades de altura y determinar si existe algún tipo de irregularidad, según la tabla A.3.7 y la figura A.3.2 de la NSR-10.
Para cualquiera de los factores enunciados, si existen más de dos tipos de irregularidades que se presenten al tiempo, se debe tomar el menor valor de cada uno.
Ausencia de redundancia Φr. Se determina el factor según los vanos continuos en dirección de las fuerzas sísmicas.

- **Coeficiente de disipación de energía R**

Con los valores obtenidos y el valor de R0, se obtiene el factor de redundancia aplicado para determinar las fuerzas sísmicas de diseño.

$$R = R_0 * \emptyset p * \emptyset a * \emptyset r$$

- **Diseño de los elementos estructurales**

Se debe hacer un resumen del diseño de los elementos que conforman la superestructura. Las pautas para el diseño estructural se presentan en la NSR-10, que permite estructurar una edificación que cumpla con los parámetros mínimos para un adecuado comportamiento sísmico.

6.4 Análisis y configuración de las cimentaciones de las estructuras de equipos de patio y pórticos

En este documento, y en particular en el numeral 5.1, se establecieron los criterios para el desarrollo de árboles de carga, que son el punto de partida para el análisis y diseño de las cimentaciones, tanto para los pórticos como para los equipos de patio, por mencionar un caso en particular, dado que los principios que se mencionan en este capítulo abarcan cimentaciones generales que también incluyen los edificios ocupacionales. Partiendo de este punto, cabe aclarar que para iniciar los diseños estructurales primero se deben realizar los pre-dimensionamientos de las cimentaciones, los cuales se plantean de acuerdo con las reacciones de trabajos provenientes de los análisis desarrollados previamente.

Es importante tener presente que la tipología de las cimentaciones más recurrente en la infraestructura de las subestaciones corresponde a zapatas aisladas o combinadas, lo que implica el uso de cimentaciones superficiales.

- A partir de las reacciones se evalúa y selecciona el caso más crítico, que corresponde a la solicitación con mayor momento en X o en Y. Con esta información se busca la combinación que tenga una carga vertical menor, pues de esta manera se garantiza que sea la más crítica. Por lo general, estas cargas se aplican en el centro del pedestal.

Teniendo las reacciones más críticas del diseño, se deben considerar los resultados de los estudios de suelos de cada sitio, ya que estos parámetros dan las propiedades para un adecuado dimensionamiento, según las características del suelo. Es importante validar que los estudios cuenten con la información completa pertinente a las características del sitio. Adicionalmente, se debe contar con información complementaria que permitirá desarrollar un adecuado diseño, como:

- (*Qadm)* = Esfuerzo admisible del suelo
- *(Anf)* = Ángulo de fricción interna
- (*Kp)* = Coeficiente de presión pasiva
- (*Gc*) = Peso unitario del concreto
- (*Gs*) = Peso unitario del suelo
- (Grel) = Peso unitario del relleno
- (*fy*) = Esfuerzo de fluencia de acero
- (*f'c*) = Resistencia del concreto

Un aspecto importante para el dimensionamiento de las cimentaciones es garantizar la resistencia al volcamiento o arrancamiento debido a las cargas de trabajo, con un factor de seguridad mínimo, según la tabla 19, en las condiciones más críticas, que incluyen combinaciones de cargas variables o accidentales.

En general, los diseños se realizan con cimentaciones superficiales, lo cual implica, en la mayoría de casos, el uso de zapatas aisladas. Esto permite el uso de pedestales y una placa en contacto con el suelo, los cuales se dimensionan según la magnitud de las cargas y las características del suelo, con lo cual se busca obtener cimentaciones estables y económicas.

Criterios de estabilidad

Para asegurar que la estructura de cimentación no tenga problemas de volcamiento, se debe verificar que los momentos actuantes sean menores a los momentos estabilizadores. Usualmente, el volcamiento se verifica en la dirección más crítica; sin embargo, es

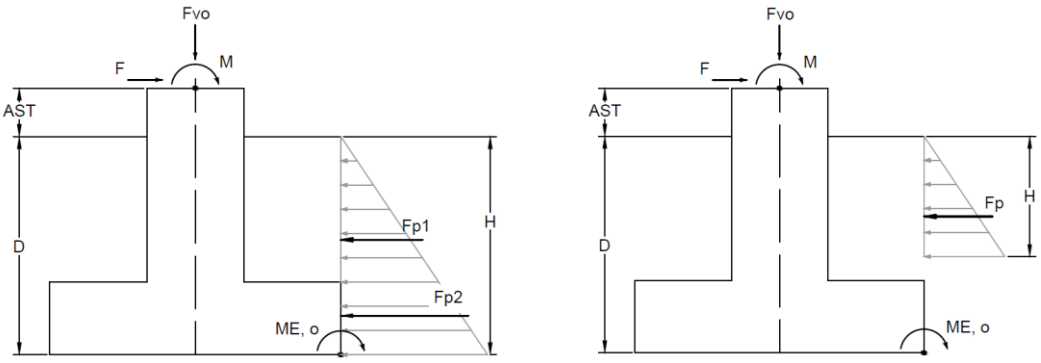
recomendable evaluar ambas direcciones. A renglón seguido se muestra la información general con la que se presenta el dimensionamiento de las cimentaciones superficiales.

- *(Ast)* = Altura del pedestal sobre el suelo
- (*A*,*E*) = Ancho y largo del pedestal
- (*Tz*) = Espesor de la zapata
- (*LP*) = Longitud del pedestal
- (*B, L*) = Lado *x* y lado *y* de la zapata
- (P*D*) = Profundidad de desplante
- (*Rec*) = Recubrimiento de acero de la zapata
- (*WR*) = Peso total del relleno más el cimiento

Para realizar la verificación por volcamiento se tienen en cuenta los siguientes esquemas y variables:

Figura 97

Análisis de cargas para cimentaciones



Profundidad del bloque de presión pasiva (*H).* Se determina igualando la carga horizontal aplicada a la ecuación de fuerza pasiva. Esto se realiza para ambas direcciones. La siguiente es la ecuación de la fuerza pasiva:

$$F = \frac{1}{2} * kp * GS * A * H^2$$

Si la profundidad del bloque es superior a la profundidad de desplante, se debe considerar esta última como la profundidad del bloque de presión pasiva.
Si se tiene un H igual a la profundidad de desplante, la fuerza pasiva es la suma de la fuerza pasiva de la zapata con la fuerza pasiva del pedestal.

- *(Fo)* = Carga horizontal total
- (*FVo)* = Carga vertical total
- (*Mo*) = Momento en la base
- (*ME*) = Momento estabilizador
- (*EX*) = Excentricidad

Tabla 19

Criterios de estabilidad para cimentaciones

Criterios de estabilidad	Esfuerzos trasmitidos al suelo en condiciones permanentes < q_{ult} / 3: q_{adm}
	Esfuerzos trasmitidos al suelo en condiciones extraordinarias < q_{ult} / 1,5: q_{adm_pseudo}
	Volcamiento en condiciones permanentes: FS ≥ 1,5
	Volcamiento en condiciones y eventuales: FS ≥ 1,3
	Porcentaje mínimo de apoyo de losa bajo condiciones permanentes 100 %
	Porcentaje mínimo de apoyo de losa bajo condiciones eventuales 60%

Nota. Tomado de Interconexión Eléctrica S.A. E.S.P. – ISA (2022).

6.4.1 Metodología de análisis y diseño para las cimentaciones superficiales

Inicialmente, se calcula la resultante de cargas a nivel de pedestal, luego los volúmenes de la cimentación y del relleno. La teoría de cálculo que normalmente se emplea no considera el aporte de la fricción entre las paredes y el bloque de fallas originadas por la cohesión o por la fricción interna del suelo, tampoco el efecto de las presiones activas y pasivas del relleno o el suelo circundante.

6.4.1.1 Estabilidad por capacidad del suelo a compresión

Se verifica que el esfuerzo actuante sobre el suelo no supere la capacidad admisible

$$Qadm \geq Qacc$$

Donde:

Qadm= capacidad admisible en condiciones estáticas a nivel de desplante de la zapata, sin considerar la masa de relleno que gravita sobre ella.

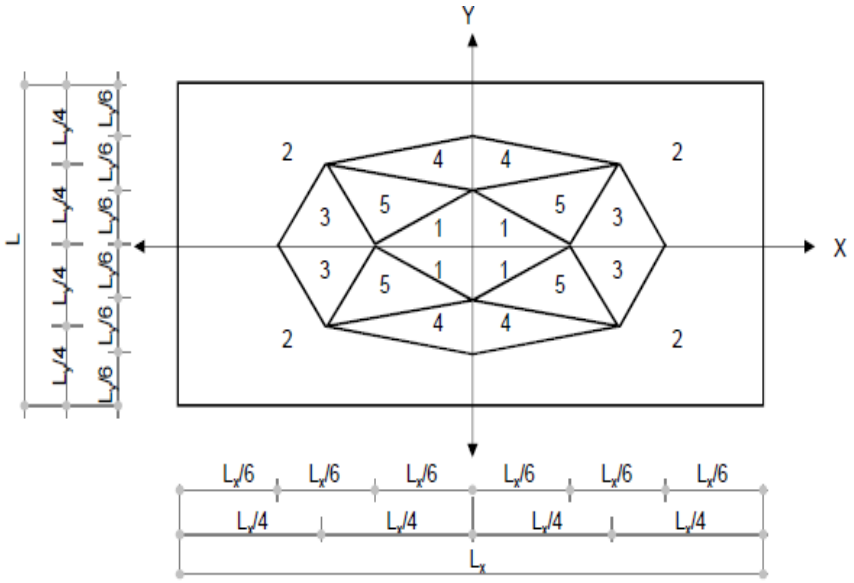
Qacc= esfuerzo máximo neto actuante a compresión

Para calcular Qacc, se contempla el caso de una cimentación aislada que se encuentra sujeta a la acción de momentos que generan excentricidad en dos sentidos. La distribución de esfuerzos en el suelo varía según la dirección en que actúan dichos momentos. Según su orientación y sentido, es posible que la cimentación no ejerza esfuerzos de compresión en toda el área de suelo sobre la que se apoya, haciendo que ellos se concentren en los sectores extremos.

De acuerdo con la posición de la resultante de las cargas dentro de la cimentación, para el análisis de esfuerzos se divide la zapata en 5 zonas, que se muestran en la figura 98. Esta metodología corresponde al libro *Fundamentos de ingeniería geotécnica* (Das, 2015)

Figura 98

Zonas de posible ubicación de cargas resultantes



Nota. Tomada del libro Fundamentos de ingeniería geotécnica (Das, 2015)

Zona 1. Corresponde a toda la cimentación trabajando a compresión.

$$\sigma_{max} = \left(\frac{P}{L_x L_y}\right)\left(1 \pm \frac{6e_x}{L_x} \pm \frac{6e_y}{L_y}\right)$$

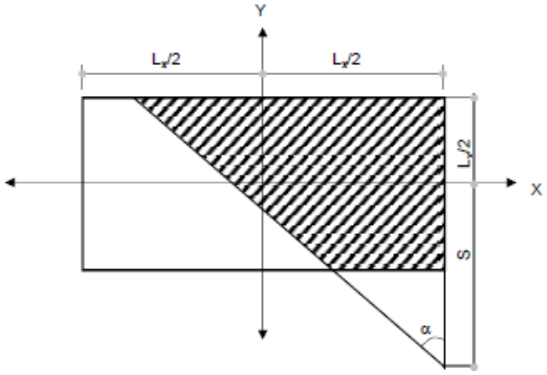
Zona 2. Zona de esfuerzos, sobre la cual no se puede ubicar la resultante de todas las cargas aplicadas porque tendría una condición tal que menos del 50% de la cimentación trabajaría a compresión sobre el suelo.

Zona 3. Corresponde a una parte de la cimentación trabajando a compresión como se muestra a continuación.

$$S = \frac{L_y}{12} \; x \left[\frac{L_y}{e_y} + \sqrt{\frac{L_y^2}{e_y^2} - 12} \right]$$

$$\tan \alpha = \frac{3}{2} \times \frac{b_x - 2\, e_x}{S + e_y}$$

$$\sigma_{max} = \frac{12\, P}{L_y \tan \alpha} \; x \left[\frac{L_y + 2\, S}{L_y^{\,2} + 12\, S^2} \right]$$

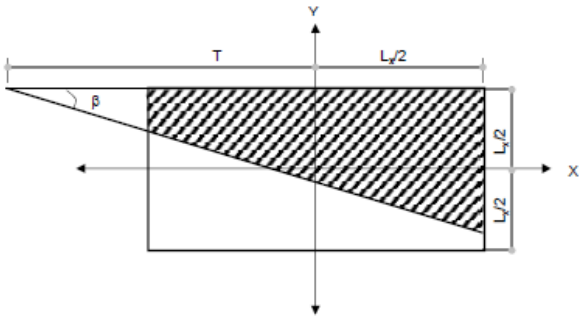


Zona 4. Corresponde a una parte de la cimentación trabajando a compresión como se muestra a continuación.

$$T = \frac{L_x}{12} \; x \left[\frac{L_x}{e_x} + \sqrt{\frac{L_x^2}{e_x^2} - 12} \right]$$

$$\tan \beta = \frac{3}{2} \; x \; \frac{L_y - 2\, e_y}{T + e_x}$$

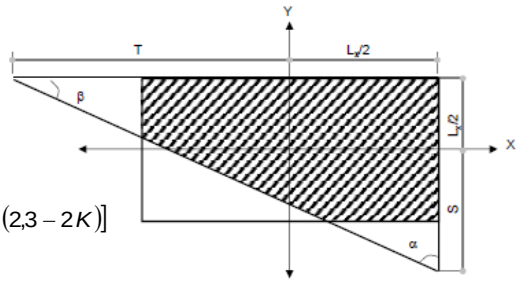
$$\sigma_{max} = \frac{12\, P}{L_x \tan \beta} \; x \left[\frac{L_x + 2\, T}{L_x^2 + 12\, T^2} \right]$$



Zona 5. Corresponde a una parte de la cimentación trabajando a compresión como se muestra a continuación.

$$K = \frac{e_x}{L_x} + \frac{e_y}{L_y}$$

$$\sigma_{max} = \left(\frac{P}{L_x\, L_y} \right) \times K \times \left[12 - 3{,}9 \times (6K - 1) \times (1 - 2L) \times (2{,}3 - 2K) \right]$$



Donde:

- P = carga vertical total
- Ex = excentricidad en el sentido x
- Ey = excentricidad en el sentido y
- Lx = longitud en el sentido x

- Ly = longitud en el sentido y

6.4.1.2 Análisis con cargas de diseño y cálculo de esfuerzo máximo actuante

Es importante conocer el esfuerzo máximo actuante para poder verificar la estructura a cortante y flexión, y de esta manera realizar un diseño adecuado de la cimentación. El cálculo del esfuerzo máximo se realiza siguiendo el mismo procedimiento que se utilizó con las cargas de trabajo, pero el diseño se debe realizar con las cargas últimas. Se deben tener en cuenta las mismas recomendaciones que se hicieron para las cargas de trabajo y contar con los siguientes parámetros:

- (*H*) = Profundidad bloque presión pasiva
- (*Fo*) = Carga horizontal total
- (*FVo*) = Carga vertical total
- (Mo) = Momento en la base
- (*EX*) = Excentricidad
- (*Qmáx*) = Esfuerzo máximo actuante

Antes del diseño estructural final se deben validar los siguientes aspectos:

1.) Cortante en dos direcciones (figura xx)
2.) Cortante en una dirección (figura xx)
3.) Aplastamiento (figura xx)

Figura 99

Cortante en dos direcciones

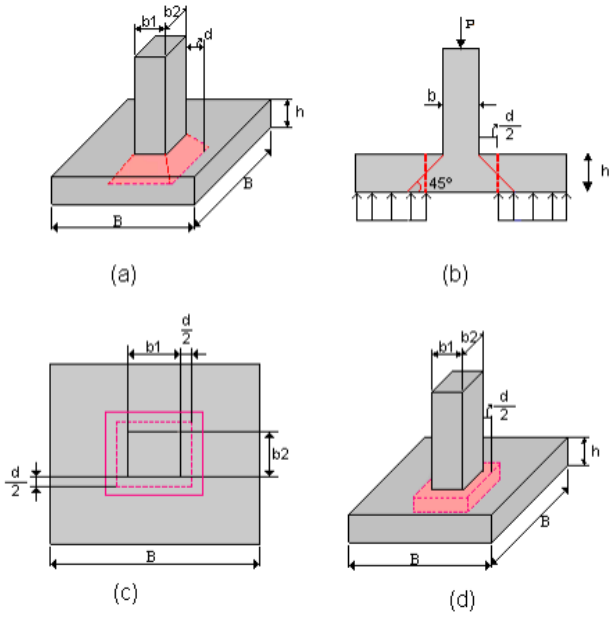


Figura 100

Cortante en una dirección

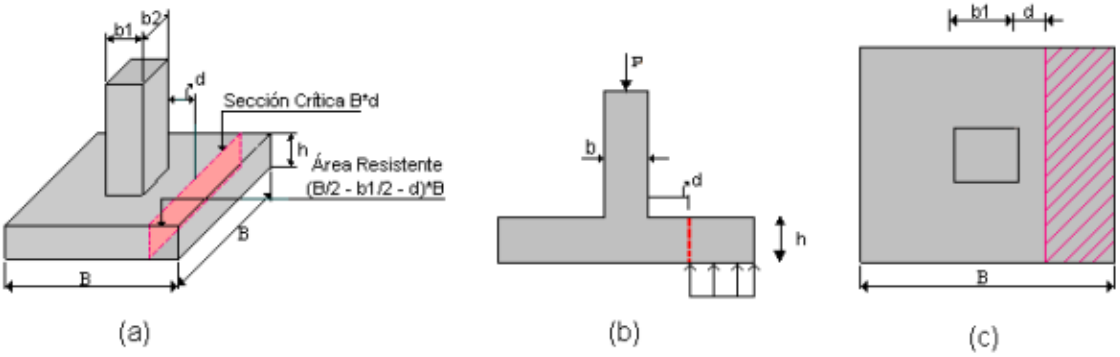
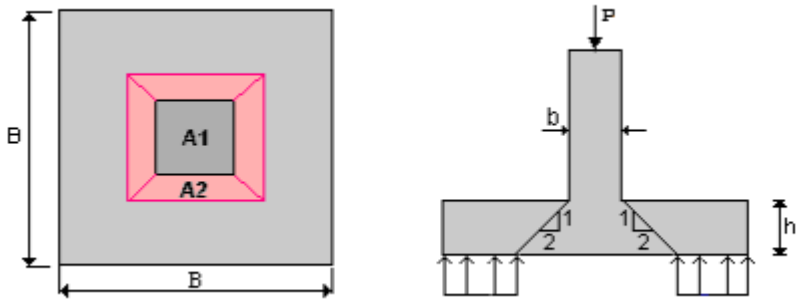


Figura 101

Aplastamiento en la zapata



Para el diseño final de la zapata es importante validar las cuantías mínimas requeridas que se presentan en la NSR-10, título C.7.12.2 y para el pedestal, la NSR-10, título C.15.8.2.1.

Se deben verificar los refuerzos que se van a disponer en la zapata y en el pedestal, de tal manera que cumplan con los límites de espaciamiento y su disposición, según la NSR-10, título C.

6.4.1.3 Pautas para la verificación de anclajes

Para verificar los anclajes se deben considerar los siguientes datos de entrada:

- Resistencia a compresión del concreto
- Resistencia del perno
- Cantidad de pernos
- Ancho y largo del pedestal
- Distancia entre pernos
- Distancias a borde
- Ancho de la platina
- Espesor de la platina
- Profundidad efectiva de embebido de diseño
- Profundidad efectiva de embebido real
- Área de los pernos
- Cargas sobre cimentación

- Cantidad de anclajes que toman tensión

Luego de definir los parámetros, se realiza el cálculo de cada una de las cargas últimas que se deben considerar en las verificaciones.

Carga de compresión última:

$$Cu = \frac{Mx}{(\#\ apoyos\ comp.* S)} + \frac{My}{(\#\ apoyos\ comp.* S)} + \frac{Fz}{(\#\ apoyos)}$$

Carga de tensión última:

$$Tu = \frac{Mx}{(\#\ apoyos\ tens.* S)} + \frac{My}{(\#\ apoyos\ tens.* S)} - \frac{Fz}{(\#\ apoyos)}$$

Cortante último:

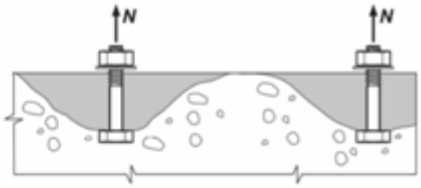
$$Vu = \frac{\sqrt{Fx^2 + Fy^2}}{(\#\ apoyos)}$$

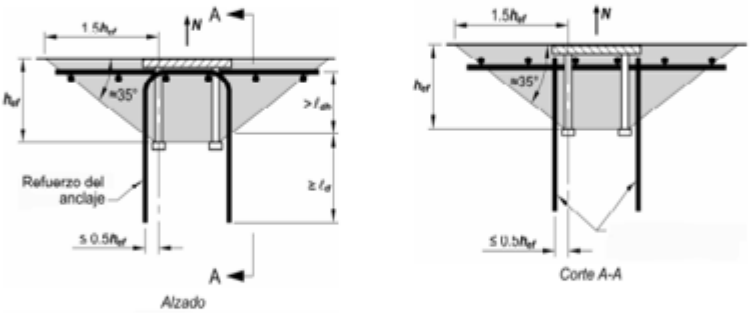
También se debe realizar la verificación de los anclajes a tracción (Tabla 20).

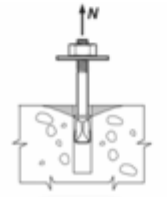
Tabla 20

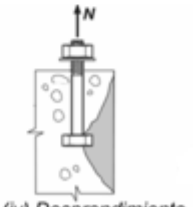
Verificación de anclajes a tracción

<table>
<tr><td>Resistencia a tracción del acero del anclaje.


(i) Falla del acero</td><td>Resistencia del arrancamiento del concreto de un anclaje en tracción


(iii) Arrancamiento del concreto</td></tr>
<tr><td colspan="2">Resistencia del refuerzo del anclaje


Alzado</td></tr>
<tr><td>Resistencia al desprendimiento lateral del concreto de un anclaje con cabeza en tracción


(ii) Deslizamiento</td><td>Resistencia a la extracción por deslizamiento de un anclaje en tracción


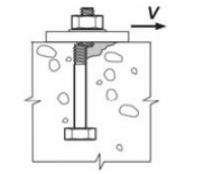
(iv) Desprendimiento lateral</td></tr>
</table>

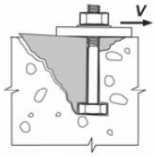
Nota. Adaptada de la NSR-10

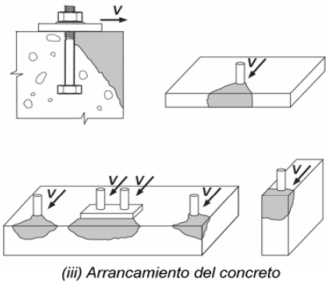
Así mismo se realizan las verificaciones del anclaje a cortante (tabla xx)

Tabla 21

Verificaciones del anclaje a cortante

<table>
<tr><td>Resistencia del acero del anclaje sometido a cortante


(i) Falla del acero precedida por descascaramiento del concreto</td><td>Resistencia al desprendimiento del concreto por cabeceo del anclaje sometido a cortante


(ii) Desprendimiento del concreto para anclajes lejos del borde libre</td></tr>
<tr><td colspan="2">Resistencia al arrancamiento del concreto de anclajes a cortante


(iii) Arrancamiento del concreto</td></tr>
</table>

Nota. Adaptada de la NSR-10

6.4.2 Configuración estructural típica para cimentaciones de equipos y de pórticos

La mayoría de equipos se cimientan con estructuras de fundaciones superficiales, a menos que las condiciones del terreno requieran cimentaciones profundas, lo cual no es muy común en equipos de patio. Se presentan a continuación los esquemas comunes para cimentaciones de equipos monopolares, bipolares y tripolares.

Figura 102

Zapata y pedestal sencilla para equipos de patio monopolares

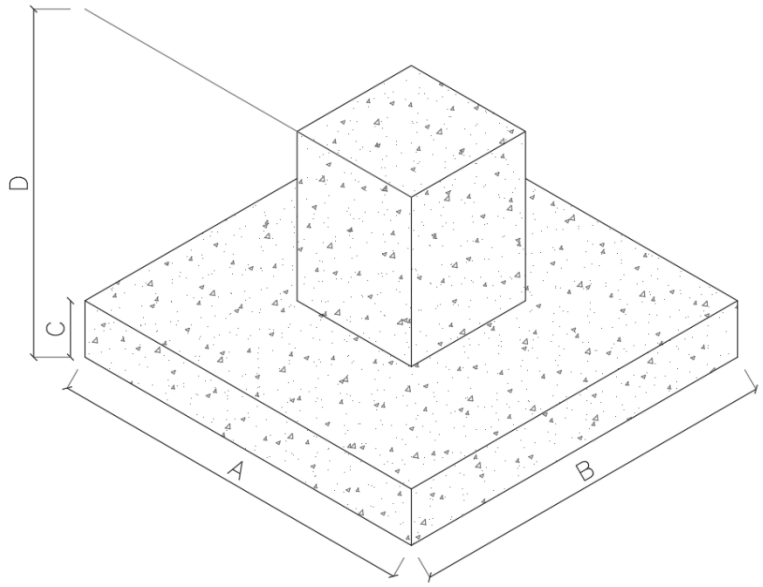


Figura 103

Zapata combinada con dos pedestales para equipos de patio bipolares.

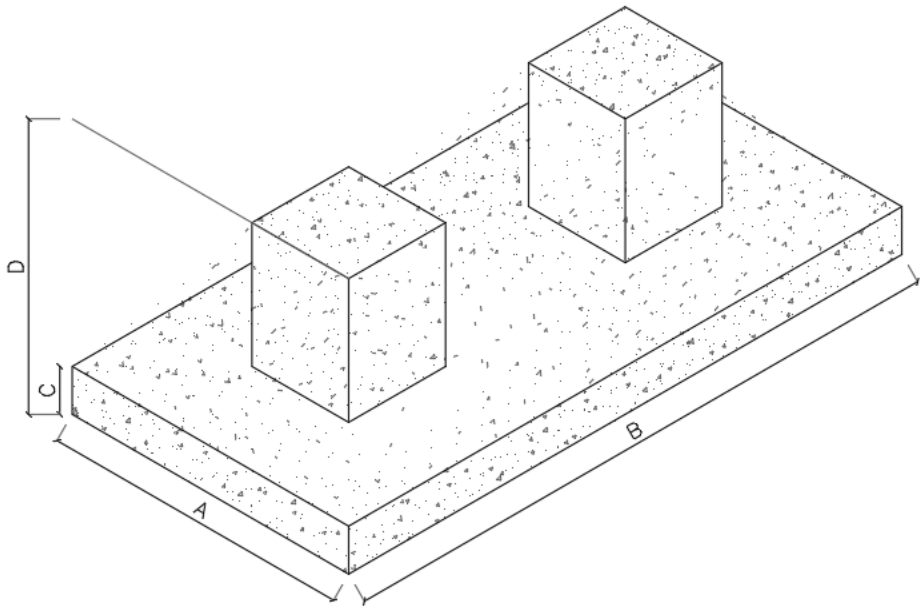


Figura 104

Zapata combinada con tres pedestales para equipos de patio tripolares.

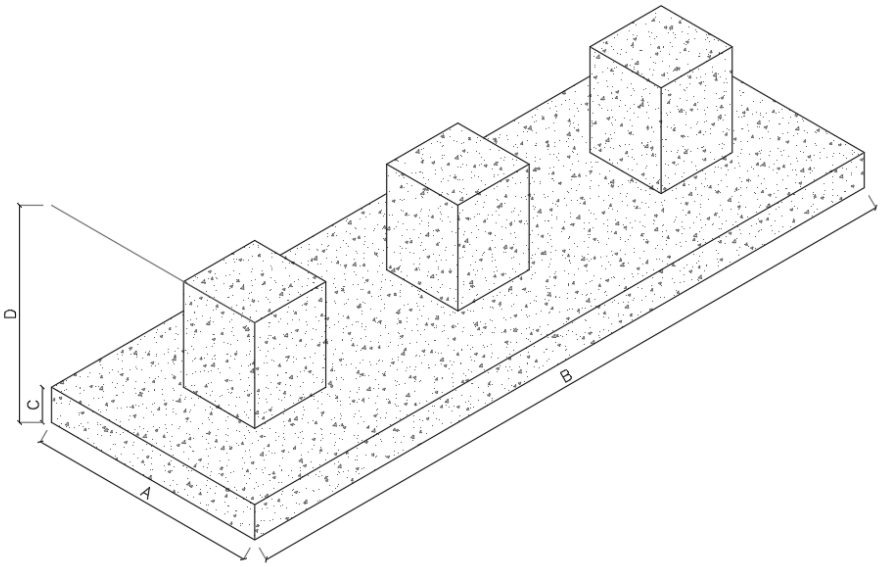
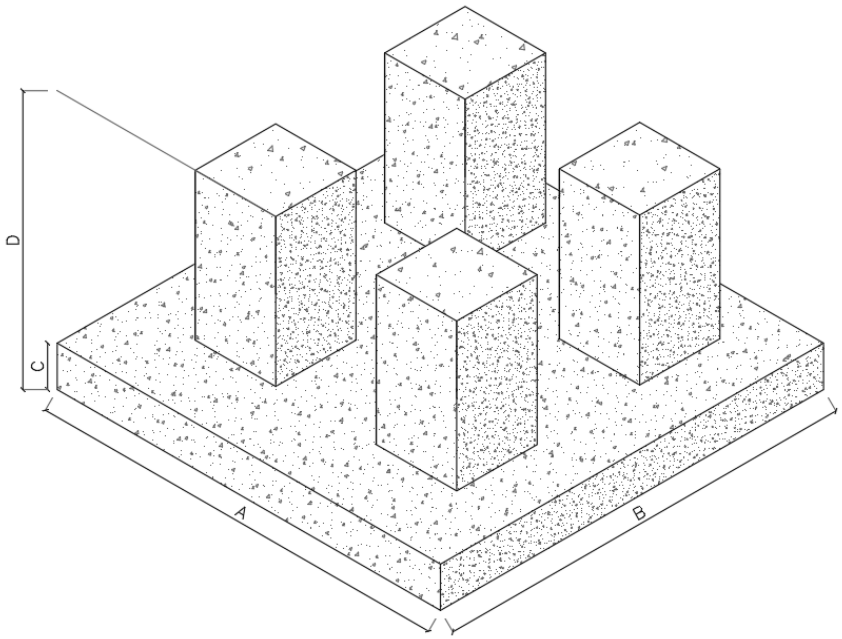


Figura 105

Zapata combinada típica para pórticos.



6.5 Obras complementarias civiles

En este documento se ha evaluado principalmente la infraestructura relacionada con los equipos de patio (pórticos, equipos de transformación y compensación y edificios ocupacionales); sin embargo, no es la única obra que complementa una subestación aislada con aire. Para desarrollar los diseños civiles existen diversas actividades que complementan la información necesaria para un adecuado planteamiento de las obras que abarcan el diseño global en una subestación, entre las que se encuentran las siguientes:

- Localización del sitio de obra
- Elaboración del estudio hidrológico
- Determinación de la topografía del sitio
- Adecuación del terreno
- Estudio geotécnico
- Replanteo de las obras

El objetivo de estas actividades complementarias consiste en tener la información necesaria y suficiente para abordar las obras civiles que corresponden a una subestación. Cada actividad permite plantear soluciones adecuadas para una construcción eficiente, para lo cual se deben complementar los diseños civiles con los siguientes aspectos adicionales.

6.5.1.1 Diseño de drenajes

El diseño del sistema de drenaje está sujeto a la disposición física, a la adecuación del predio, a las vías y a la disposición de los cárcamos en los patios de la subestación, para lo cual se parte con la información mencionada.

Se debe garantizar que el sistema de drenaje recolecte las aguas lluvias de toda el área de la subestación y de sus áreas aferentes.

De acuerdo con la disposición física de la subestación, se traza la red de filtros, procurando que no se presenten interferencias con otras obras.

- Caudal de diseño

Para diseñar las redes de aguas existen diferentes métodos de cálculo, uno de ellos es el método racional, que usa la siguiente ecuación

$$Q_D = C\ x\ I\ x\ A$$

Donde:

Q_D: caudal de diseño, l/s

C: coeficiente de escorrentía

I: intensidad de la precipitación, l/s*ha

A: área tributaria, ha

- Capacidad de los colectores y cunetas

““La capacidad de los colectores y de las cunetas depende de la velocidad del flujo en la estructura hidráulica y su sección útil para transporte del agua. Es usual calcular la velocidad a partir de la ecuación de Manning para flujo uniforme (estable)” (HMV Ingenieros Ltda., 2021)

$$Vc = \frac{1}{nm} x \left(\frac{Ah}{p}\right)^{2/3} x\sqrt{S}$$

Donde:

Vc: velocidad, m/s

nm: coeficiente de rugosidad de Manning

Ah: área hidráulica, m^2

p: perímetro mojado, m

S: pendiente longitudinal, m/m

Se deben obtener los canales máximos de altura mediante las siguientes ecuaciones:

$$Q_d = VxA$$

$$Q_d \geq Q_D$$

Donde:

Q_d: caudal de descarga, l/s

- Tuberías para filtros y colectores

Los cálculos para estas tuberías se hacen para que trabajen a flujo libre. Se debe generar una tabla que contenga los caudales de descarga en los que se evacúen tuberías de diversos diámetros a plena capacidad y con diferente pendiente de diseño.

- Cunetas

La capacidad de la cuneta en pendiente mínima debe garantizar el arrastre de los sedimentos que le llegan, con precipitaciones moderadas. Por su parte, la pendiente máxima debe estar acorde con los valores máximos de adecuación del patio.

- Estructuras de inspección y redes

Se recomienda colocar cajas o cámaras de inspección a lo largo de las tuberías de drenaje, con el fin de que permitan hacer un mantenimiento adecuado al sistema.

6.5.1.2 Diseño de cárcamos y ductos

En los patios de la subestación y los edificios ocupacionales, como el edificio de control o de relés, el trazado de los cárcamos y ductos se deben ajustar a la disposición arquitectónica de los espacios, a los requisitos eléctricos y a la disposición de equipos y gabinetes.

Normalmente, los cárcamos se construyen en concreto reforzado y sus tapas deben tener un diseño liviano. También se pueden construir cárcamos con tapas diseñadas para el tráfico vehicular. Dentro de los cárcamos se deben instalar barreras cortafuego.

6.5.1.3 Sistemas ambientales sostenibles

Se debe consultar con la empresa del servicio de acueducto si es posible usar una conexión existente. Si se usa agua de una fuente natural cercana, es necesario realizar estudios específicos para determinar su calidad. Así mismo, se pueden recolectar aguas lluvias o extraer aguas subterráneas por medio de un pozo profundo.

El origen del agua es importante por su calidad para el almacenamiento y suministro. Si no es apta para el consumo, se debe proveer un sistema de tratamiento de agua potable.

El almacenamiento del agua se puede hacer en tanques enterrados o elevados.

- Alcantarillado o sistema de aguas residuales

"Al diseñar la red, debe preverse un sistema de tratamiento de las aguas residuales, para no descargar dichas aguas con tan alto grado de contaminación y cumplir con los parámetros de purificación establecidos por las autoridades ambientales. Se puede implementar un sistema con filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA), después de que las aguas hayan pasado por la trampa de grasas" (HMV Ingenieros Ltda., 2021).

6.5.1.4 Obras complementarias

Estas obras completan los diseños técnicos de la subestación con criterios de seguridad y ornamentación, entre ellas están las siguientes:

Acabado de patio. Se utiliza como material aislante en la zona de patios de conexión, puede ser una capa de triturado limpio, una capa de pavimento asfáltico o losas de concreto.

Cerramientos. Separan las áreas interiores de la subestación y delimitan su perímetro. Generalmente se usa un muro de mampostería o malla eslabonada. Si el área del predio es más grande que el de la subestación, se pueden utilizar muros o cercos en alambre de púas y postes de concreto o madera para delimitar el sendero.

Ornamentación. Se debe desarrollar un programa de paisajismo para compensar el impacto visual que genera la construcción de una subestación.

Se recomienda sembrar especies nativas de la región que florezcan en diferentes épocas y sirvan como fuente de alimento y hábitat para especies de fauna silvestre.

6.5.1.5 Diseño y planteamiento de vías

Para adecuar los trabajos de una subestación es necesario conocer las características de sus vías internas, que permiten el acceso a las diferentes áreas para cuando se requiere hacer algún mantenimiento.

Estas vías se pueden construir con pavimento flexible o rígido, dependiendo de los resultados de los ensayos de laboratorio que se efectúan sobre el material de la subrasante y los vehículos que las van a utilizar.

- Diseño de vías

El diseño geométrico de la vía de acceso determina su alineamiento horizontal y vertical, puede ser una ampliación, rectificación o adecuación. En su construcción se deben prever obras de drenaje y de carácter geotécnico. Además, es necesario determinar las pendientes longitudinales y transversales, de acuerdo con la adecuación y la disposición física de la subestación.

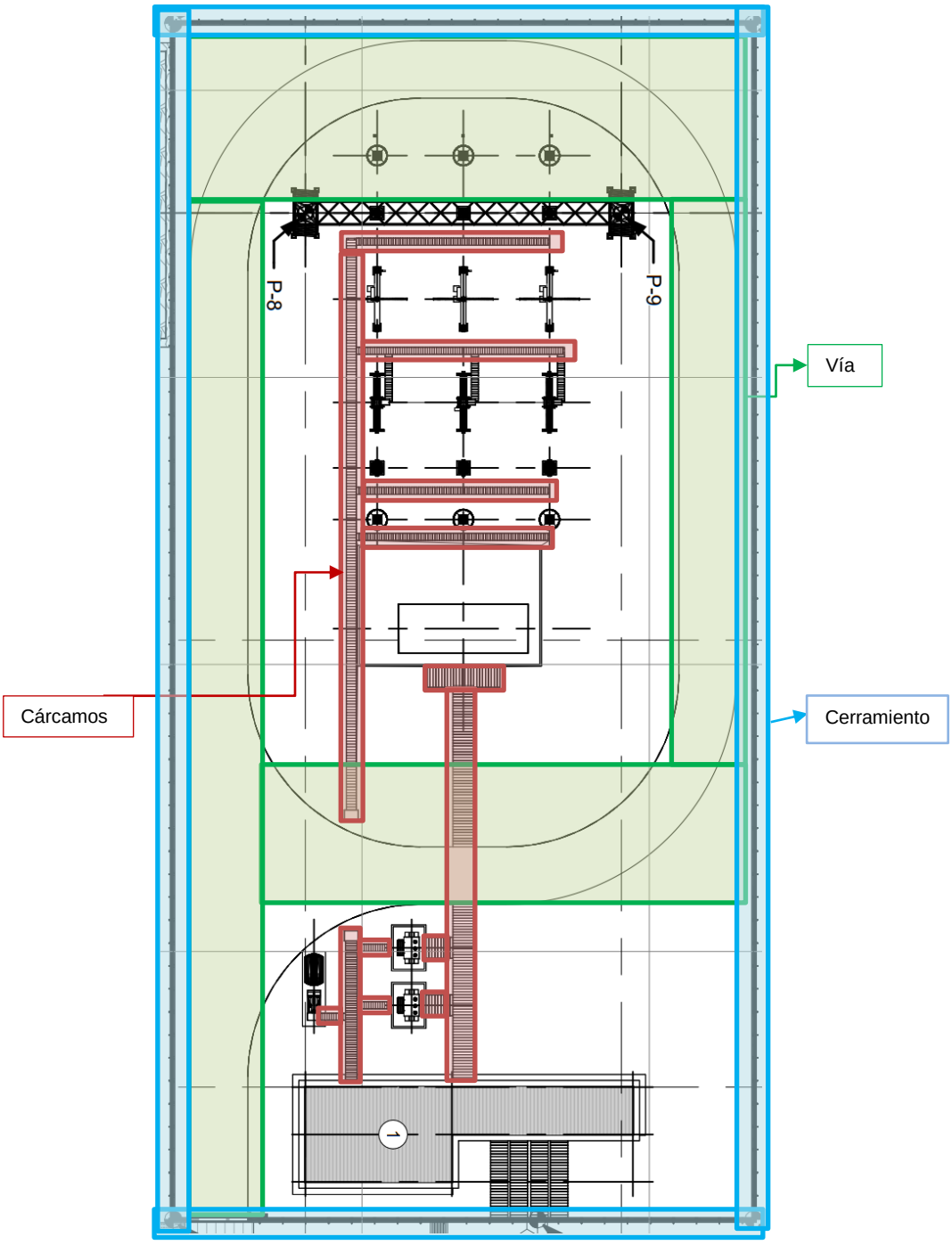
El diseño de la estructura del pavimento determina si debe ser afirmado, flexible o rígido.

Para el diseño del sistema de drenaje de las vías se debe tener en cuenta el buen desempeño del pavimento. El drenaje superficial se da por las pendientes transversales y longitudinales de la vía. La señalización interior de la subestación la conforman los avisos informativos y preventivos, que se definen con base en las características de la subestación y los reglamentos eléctricos vigentes.

Las vías adyacentes a carrileras para transformadores o reactores, integradas a los elementos viales, se diseñan comúnmente como pavimento rígido por el peso de los equipos que se deben instalar.

Figura 106

Plano ejemplo de obras complementarias



7. Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

Si bien el ACI 318-19, AISC 360-16, ASCE10-15, ASCE No 113, ASCE No 74, CIGRÉ, IEC, IEEE, NFPA, NSR-10 hacen un aporte en la infraestructura de la subestación, no existe una normativa específica estructurada en el país que brinde un marco global enfocado en esta área, que establezca los lineamientos detallados para el análisis y diseño civil estructural.

La norma IEC es una de las principales guías para parametrizar y regular los aspectos que influyen en la disposición física de una subestación, partiendo de criterios como recomendaciones de aislamiento y distancias eléctricas mínimas de seguridad de aire; criterios que permiten plantear la disposición de equipos e infraestructura, teniendo en cuenta la confiabilidad, seguridad, flexibilidad operativa y disponibilidad en el mantenimiento.

La normatividad que regula principalmente el funcionamiento, las características eléctricas y la mecánica de los equipos de patio (seccionadores, interruptores, transformadores, pararrayos, equipos de transformación y compensación) se encuentra descrita en las normas IEC e IEEE, las cuales hacen recomendaciones y especificaciones para cada equipo, junto con la regulación de los parámetros sísmicos que deben cumplir.

La AISC No 113 contiene los lineamientos de análisis sísmico y las pautas para el diseño global de estructuras que cumplen con la operatividad de una subestación, teniendo en cuenta los límites de deflexión, el análisis, diseño, fabricación y mantenimiento, específicamente para las estructuras metálicas que soportan equipos o conforman los pórticos.

Las normas IEC, establecen los cálculos detallados para las fuerzas de cortocircuito, que tienen gran importancia en la evaluación de los conductores, y la norma IEEE std 605-2008, plantean los cálculos para las flechas y tensiones de los conductores, junto con algunas evaluaciones de cortocircuito.

La evaluación de cargas es de particular relevancia y especial cuidado durante el proceso de análisis y diseño de las subestaciones ya que este tipo de infraestructura cuenta con cargas no convencionales que provienen de campos electromagnéticos y generan fuerzas significativas en conductores flexibles o barrajes rígidos, los cuales están anclados a los pórticos, pasando por los equipos de patio y llegando a los cuartos de control.

Las combinaciones de carga se toman de la norma AISC No 113 para la evaluación de equipos de patio, los pórticos y los equipos de transformación y compensación. En cuanto a los edificios ocupacionales y demás obras civiles, se pueden acoger los lineamientos y regulaciones de las normas NSR-10, ACI 318, AISC 360-16.

El diseño civil estructural de las subestaciones debe contemplar los pórticos, equipos de patio, equipos de transformación y compensación, edificios ocupacionales e infraestructura correspondiente a otras obras civiles.

Para el diseño de los pórticos y equipos de patio se deben obtener los árboles de carga, necesarios para realizar el análisis estructural correspondiente.

Debido a que los equipos de transformación y compensación contienen líquidos combustibles que generan riesgos inherentes de explosión se debe garantizar su seguridad y la de su infraestructura adyacente con distancias mínimas o muros cortafuego cumpliendo la norma NFPA 850.

El diseño de edificios ocupacionales y demás obras civiles, se puede realizar siguiendo las normas NSR-10, ACI 318 y AISC 360-16, teniendo especial consideración en las disposiciones espaciales que se requieren para los equipos eléctricos del control de la

subestación, contando con cárcamos o semisótanos que permitan distribuir de manera adecuada la disposición de los conductores en la edificación.

7.2 Recomendaciones

Se entrega una guía de proceso que detalla los lineamientos normativos que se deben seguir para los diseños estructurales de una subestación. Se recomienda aplicar las pautas allí plasmadas para facilitar los procesos de análisis y diseño.

Un aspecto importante para analizar en las estructuras de concreto reforzado es la posible corrosión que se pueda generar debido a la inducción eléctrica de los equipos expuestos a campos electromagnéticos fluctuantes. La corrosión del acero tiene efectos negativos en la infraestructura, por lo cual se espera que se puedan dar criterios para el diseño y construcción de concretos sin refuerzo, cuando el riesgo de inducción electromagnética lo requiera.

Se propone plantear configuraciones y diseños paramétricos con la metodología BIM (Building Information Modeling), la cual permite representar de manera gráfica las características físicas y de funcionalidad de las subestaciones, integrando las áreas que intervienen en los proyectos, optimizando los tiempos de diseño y normalizando los procesos de análisis y configuración.

Se recomienda desarrollar una programación que tome como insumo las guías de diseño plasmadas en este documento, de tal manera que se logre un diseño civil estructural completo de la subestación convencional de forma práctica y eficiente.

Anexo 1: Guía de proceso para el diseño civil estructural de subestaciones eléctricas convencionales de alta tensión



GUÍA DE PROCESO

DISEÑO CIVIL ESTRUCTURAL PARA SUBESTACIONES ELÉCTRICAS CONVENCIONALES DE ALTA TENSIÓN

Propuesta creada por Ing. Laura Moreno

Guía elaborada a partir del Trabajo Final:
Lineamientos normativos para el diseño civil estructural de subestaciones eléctricas de alta tensión.

Laura Margarita Moreno Soto

Programa: Maestría en Ingeniería - Estructuras
Directora: Ph. D. Caori Patricia Takeuchi Tam
20-10-2024

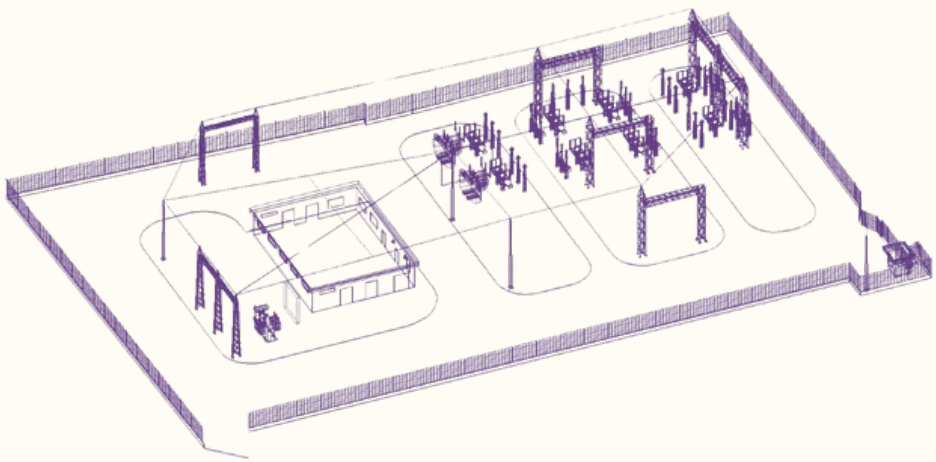
Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de ingeniería civil y agrícola
Grupo de investigación en estructuras (GIES)

Edición: Natalia Andrea Muñoz Soto

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

ÍNDICE

01	Objetivo y alcance	P. 01
02	Equipos de patio	P. 02
03	Pórticos	P. 07
04	Cimentaciones	P. 11
05	Equipos de transformación y compensación	P. 12
06	Edificios ocupacionales	P. 16
07	Obras complementarias	P. 18



OBJETIVO GENERAL



Elaborar un manual que proporcione las instrucciones básicas para el diseño civil estructural de las subestaciones convencionales de alta tensión, considerando principalmente la infraestructura para: equipos de patio, pórticos, equipos de transformación y compensación y edificios ocupacionales.

ALCANCE



Exponer las consideraciones e información que se debe tener en cuenta para desarrollar los cálculos para el análisis estructural de la infraestructura de la subestación. Teniendo en cuenta el efecto de todas las cargas que intervienen y finalmente dando recomendaciones para el diseño y pautas para la revisión del mismo.



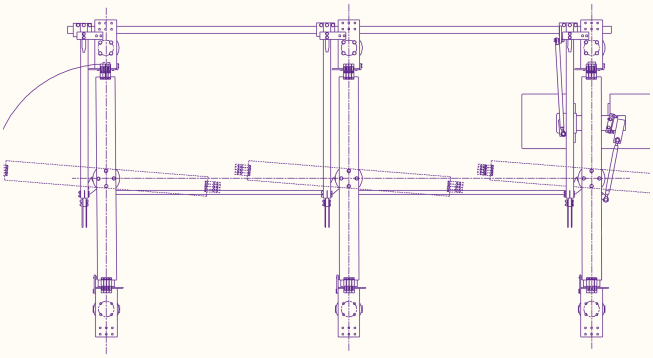
Nota aclaratoria:

Toda alusión a numerales, tablas y/o figuras se debe verificar en el trabajo final de maestría: Lineamientos normativos para el diseño civil estructural de subestaciones eléctricas de alta tensión.

EQUIPOS DE PATIO

Información de contenido

- Nombre del proyecto y del archivo.
- Especificaciones de localización del proyecto.
- Datos del alcance del proyecto.
- Descripción general de los equipos que se diseñarán (Transformadores, descargadores, seccionadores, interruptores, etc) teniendo en cuenta la cantidad de cada uno con sus respectivos soportes y columnas.



Datos iniciales

En el desarrollo de la memoria de cálculo se deben incluir los datos iniciales del diseño, como, por ejemplo:

- Parámetros ambientales y meteorológicos de la subestación (Considerar aspectos como temperaturas máximas mínimas, promedio y velocidades del viento de diseño y de servicio, entre otros que se requieran para la elaboración de los cálculos.
- Características eléctricas y mecánicas del conductor de conexión entre equipos (Rígido o flexible).
- El valor de la corriente de corto circuito y la duración de esta.
- Parámetros para el cálculo de la presión del viento numeral 4.1.6.
- Parámetros para el cálculo de cargas sísmicas numeral 4.1.7.
- Combinaciones de carga y de servicio numeral 5.1.

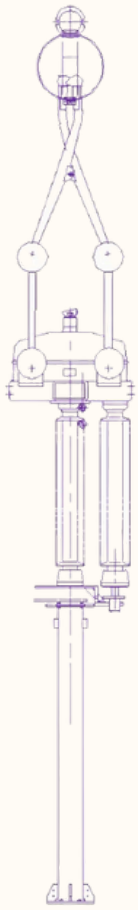
Procesos de cálculo

Luego de presentar los parámetros que intervienen en el diseño y de hacer el análisis general de las cargas globales que afectan la estructura se procede a realizar los cálculos específicos.

- Cálculo de flechas y tensiones
- Cálculo de cortocircuito
- Cálculo de otras cargas que interfieren en el diseño

Cálculo de flechas y tensiones

- Se debe determinar la carga actuante total (WT).
- Establecer la carga externa y uniforme equivalente (Weq).
- Validar el nivel de los apoyos = si se encuentran los apoyos al mismo nivel o en diferentes niveles.
- Si está al mismo nivel se evalúan las trayectorias parabólicas con aisladores según el numeral 4.1.3.
- Si está a desnivel se evalúan las trayectorias de la catenaria con aisladores según el numeral 4.1.3.
- La flecha es una distancia en vertical entre el punto más bajo del conductor y el punto de sujeción del mismo.
- La tensión mínima puede estimarse a la máxima temperatura con base en la flecha máxima permitida.



- La tensión máxima puede estimarse con base en el viento máximo o a la temperatura mínima, dependiendo de donde se encuentra ubicada la subestación.
- Los valores de temperaturas, que se deberán tomar de los criterios de diseño para cada una de las condiciones de análisis:

- EDS (Every Day Stress): Temperatura ambiente media.
- Viento Máximo.
- Temperatura Mínima de operación.
- Temperatura Máxima de operación: 75°C (A menos de que en los criterios de diseño se indique un valor mayor).

Tendido: 10°C, 15°C, 20°C, 25°C, 30°C.

Después de calcular las tensiones mínimas se aplican las ecuaciones para considerar los efectos de temperatura y establecer los cambios de estado en términos de elongación y tensión del cable, considerando los parámetros anteriormente descritos.

Cálculo de cortocircuito

1. Cortocircuito barrajes flexibles
2. Cortocircuito barrajes rígidos
3. Cortocircuito barrajes flexibles - bajantes



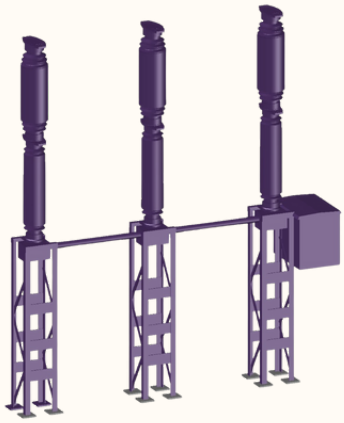
1 Cortocircuito barrajes flexibles



- El método a emplear es el que establece la norma IEC 60865-1, el cual se explica a detalle en el numeral 5.2.4.2.
- Se debe contar con los datos de entrada del dimensionamiento de los cables conductores.
- Se toman los datos del documento de flechas y tensiones con las condiciones de: Viento máximo, temperatura mínima y temperatura máxima.
- Partir de los datos de tensión horizontal del subconductor (Fsc) y flecha en la mitad del vano (bc).
- Revisar la tensión durante y después del corto.
- Realizar el análisis de pinch force en caso que aplique si existen más de 2 conductores por fase.
- Revisar la fuerza electromagnética aplicada a la línea en condiciones de corto circuito.
- Determinar el periodo de oscilación del conductor.
- Calcular la máxima fuerza de tensión resultante durante el corto circuito (Ft).
- Máxima fuerza de tensión resultante después del corto circuito (Ff).
- Generar el resumen de tensiones.
- Desplazamiento horizontal del vano y mínima distancia de aire.

2 Cortocircuito barrajes rígidos

- El método a emplear es el que establece la norma IEC 60865-1, el cual se explica a detalle en el numeral 5.2.4.3.
- Se debe contar con los datos de entrada del dimensionamiento de las tuberías conductoras, contar con los datos mecánicos.
- La frecuencia del sistema y la duración del corto circuito serán definidas por el área eléctrica.
- Se calcula la fuerza electromagnética adicional aplicada a la línea en condiciones de corto circuito (F').
- Calcular la fuerza pico electromagnética.
- Se deben calcular esfuerzos estáticos, con lo cual es importante revisar los tipos de apoyo que apliquen.
- Calcular el esfuerzo máximo de la barra.
- Determinar la vibración de los barrajes rígidos.
- Calcular los esfuerzos dinámicos.
- Realizar la verificación de esfuerzos y las deflexiones.



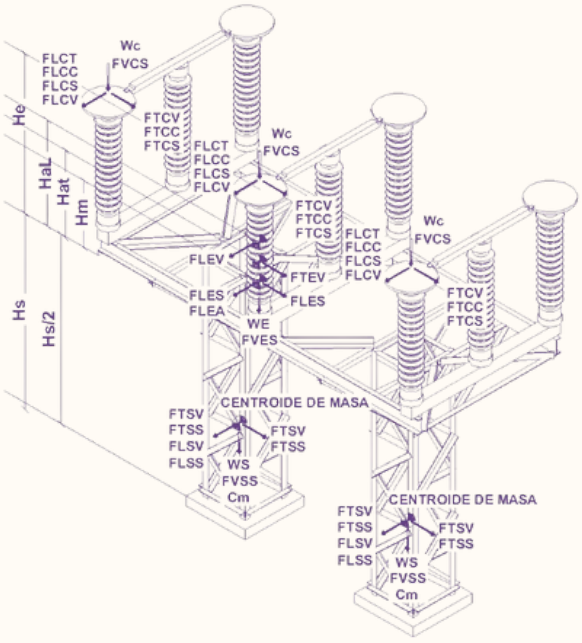
3 Cortocircuito barrajes flexibles – bajantes

- El método a emplear es el que establece la norma IEC 60865-1, el cual se explica a detalle en el numeral 5.2.4.4.
- Se debe contar con los datos de entrada del dimensionamiento de los cables conductores bajantes.
- Complementar la información con la altura de la bajante, el vano horizontal, la distancia diagonal entre apoyos.
- Calcular la tensión producida en el corto circuito y el máximo desplazamiento horizontal
- Validar las distancias mínimas libres entre subconductores.

Cálculo de otras cargas que interfieren en el diseño

Realizar la evaluación de cargas totales que se deben considerar en el diseño global de la infraestructura que soporta los equipos de patio, cargas tales como: cargas muertas, cargas de viento, sismo, cargas de construcción y mantenimiento, cargas operativas de equipos entre otras especiales que se consideren.

- Luego de la evaluación de cargas totales, se presenta el resumen de las mismas actuando en el conductor, el equipo y el soporte (ver numeral 5.2.4.5).
- Tener en cuenta los parámetros básicos del equipo que normalmente se encuentran en las fichas técnicas del proveedor.
- Tener las propiedades del conductor en cuenta.

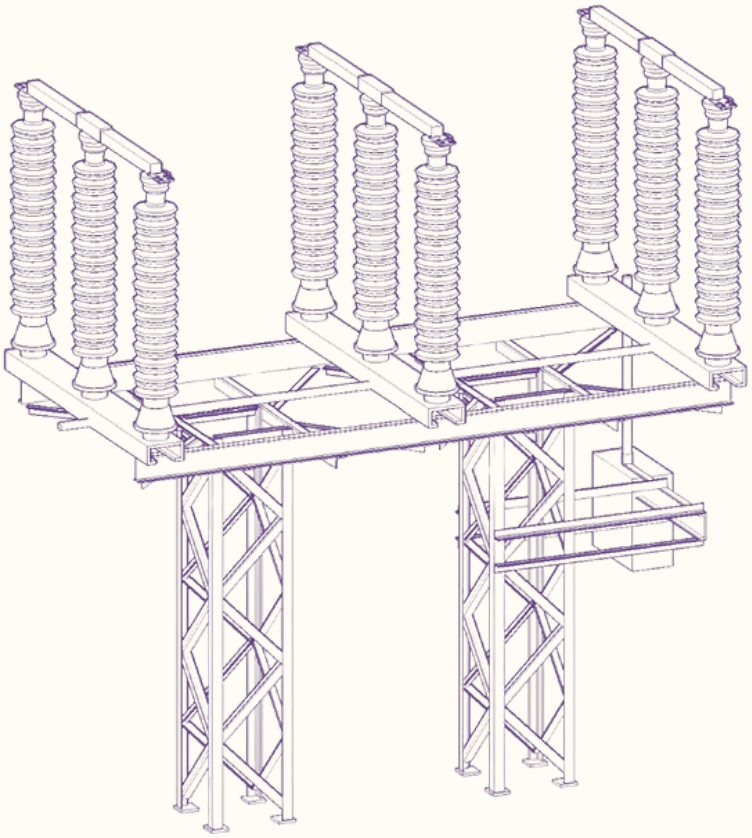


- Asignar en los puntos de apoyo o centros de masa del equipo, las cargas que intervienen.
- Tener en cuenta la configuración típica para las estructuras de soporte metálicas presentadas en el numeral 5.2.5.

Criterios de diseño de las estructuras metálicas

- Luego de evaluar todas las cargas que interfieren en la estructura, se deben aplicar las combinaciones de carga presentadas en el numeral 5.1, de tal manera que se realice el análisis estructural convencional para obtener las solicitaciones de cada combinación.

- En el planteamiento de la configuración de las estructuras se debe procurar la sencillez en la construcción y facilidad de transporte.



- Verificar la perfilería a emplear, pueden ser estructuras en celosía o perfilería en alma llena, esto dependerá de la rigidez que requiera el soporte para el equipo.

- Normalmente se emplean conexiones directas, sin platinaría de conexión, salvo algunos casos especiales que requieran un detalle más específico.

- Tener en cuenta la norma ASCE 10-15 la cual define los parámetros de diseño, con detalles específicos referentes a los límites de relaciones de esbeltez para los miembros metálicos y especificaciones detalladas de las conexiones.

- Todas las estructuras se deben fijar a la fundación por medio de pernos de anclaje, diseñados según la norma 10-15 de la ASCE o mediante el código ACI 318-05 Apéndice D “Anclaje al concreto”.

PÓRTICOS

Información de contenido

- Nombre del proyecto y del archivo.
- Especificaciones de localización del proyecto.
- Datos del alcance del proyecto.
- Contar con la disposición física, de tal manera que se conozca el número del conjunto de templas (conductores de fase, cables de guarda y bajantes).

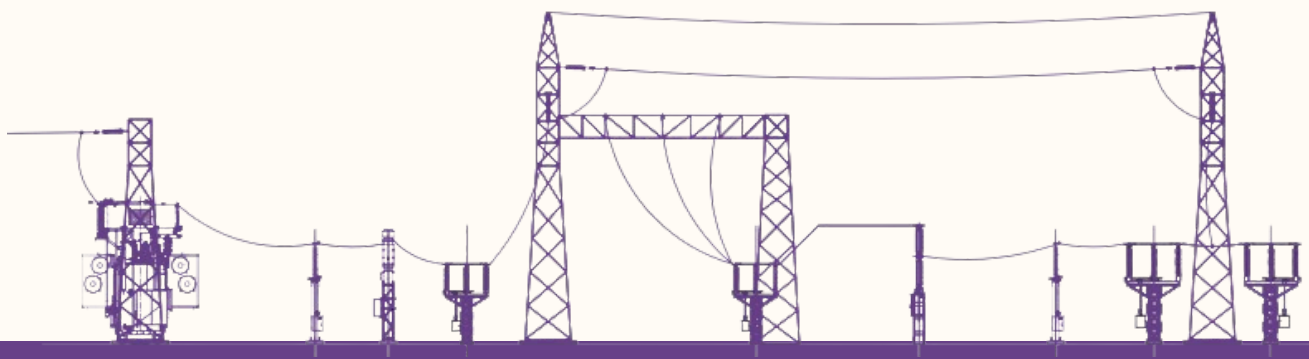
Procesos de cálculo

- Cálculo de flechas y tensiones
- Cálculo de cortocircuito
- Cálculo de otras cargas que interfieren en el diseño

Datos iniciales

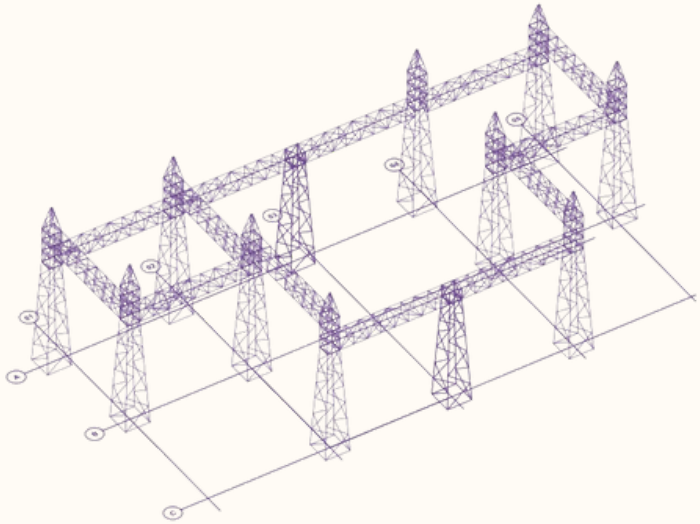
En el desarrollo de la memoria de cálculo se deben incluir los datos iniciales del diseño, como, por ejemplo:

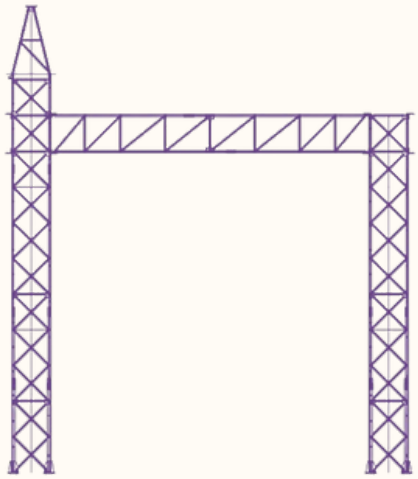
- Parámetros ambientales y meteorológicos de la subestación (Considerar aspectos como temperaturas máximas mínimas, promedio y velocidades del viento de diseño y de servicio, entre otros que se requieran para la elaboración de los cálculos).
- Conocer las variaciones de temperatura.
- Características eléctricas y mecánicas del conductor de conexión entre pórticos (flexible).
- Características eléctricas y mecánicas del cable de guarda.
- Características de herrajes y aisladores.
- Se determinan las longitudes del vano con las diferencias de altura de los apoyos.
- Calcular las cargas concentradas de los vanos, debidas a las bajantes.
- Parámetros para el cálculo de la presión del viento numeral 4.1.6.
- Parámetros para el cálculo de cargas sísmicas numeral 4.1.7 .
- Combinaciones de carga y de servicio numeral 5.1.



Cálculo de flechas y tensiones

- Se debe determinar la carga actuante total (WT).
- Establecer la carga externa y uniforme equivalente (Weq).
- Validar el nivel de los apoyos = si se encuentran los apoyos al mismo nivel o en diferentes niveles.
- Si está al mismo nivel se evalúan las trayectorias parabólicas con aisladores según el numeral 4.1.3.
- Si está a desnivel se evalúan las trayectorias de la catenaria con aisladores según el numeral 4.1.3.
- La flecha es una distancia en vertical entre el punto más bajo del conductor y el punto de sujeción del mismo.
- La tensión mínima puede estimarse a la máxima temperatura con base en la flecha máxima permitida.
- La tensión máxima puede estimarse con base en el viento máximo o a la temperatura mínima, dependiendo de donde se encuentra ubicada la subestación.





- Los valores de temperaturas, que se deberán tomar de los criterios de diseño para cada una de las condiciones de análisis:

- EDS (Every Day Stress): Temperatura ambiente media.
- Viento Máximo.
- Temperatura Mínima de operación.
- Temperatura Máxima de operación: 75°C (A menos de que en los criterios de diseño se indique un valor mayor).
  Tendido: 10°C, 15°C, 20°C, 25°C, 30°C.

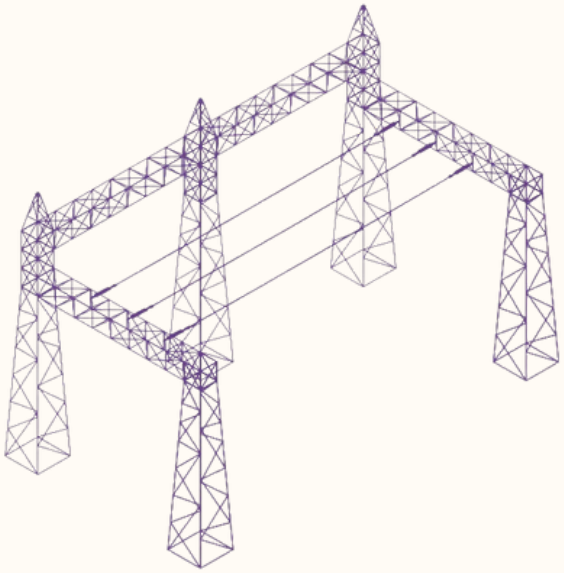
Después de calcular las tensiones mínimas se aplican las ecuaciones para considerar los efectos de temperatura y establecer los cambios de estado en términos de elongación y tensión del cable, considerando los parámetros anteriormente descritos.

Cálculo de cortocircuito

Cortocircuito barrajes flexibles

- El método a emplear es el que establece la norma IEC 60865-1, el cual se explica a detalle en el numeral 5.2.2.2.
- Se debe contar con los datos de entrada del dimensionamiento de los cables conductores.
- Se toman los datos del documento de flechas y tensiones con las condiciones de: Viento máximo, temperatura mínima y temperatura máxima.

- Calcular la fuerza electromagnética en condición de corto.
- Cálculo de la flecha estática en medio del vano.
- Determinar el periodo de oscilación del conductor.
- Máxima fuerza de tensión durante el corto.
- Calcular la máxima fuerza de tensión resultante después del cortocircuito.
- Calcular el desplazamiento horizontal del vano para cumplir la mínima distancia en aire.

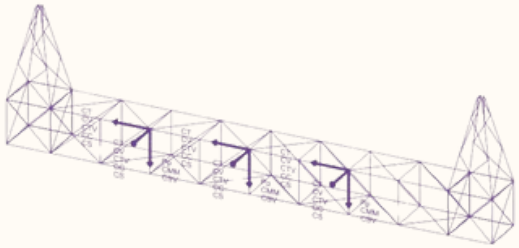


- Realizar el análisis de pinch force en caso que aplique si existen más de 2 conductores por fase.

Cálculo de otras cargas que interfieren en el diseño

Realizar la evaluación de cargas totales que se deben considerar en el diseño global de los conductores y cables de guarda que se conectan a las vigas en celosía de los pórticos. Estas cargas son: cargas muertas, cargas de viento, sismo, cargas de construcción y mantenimiento, cargas operativas de equipos entre otras especiales que se consideren.

Representación de los árboles de carga



- Luego de la evaluación de cargas totales, se presenta el resumen de las mismas actuando en el conductor, el equipo y el soporte (ver tabla 9).
- Tener las propiedades del conductor y del cable de guarda en cuenta.

- Asignar en los puntos de apoyo de los conductores en los vanos de las vigas en celosía de los pórticos que soportan los cables o ubicar el punto de apoyo del cable de guarda en la parte superior de las columnas que conforman los pórticos (ver figura 41 y 42).
- Tener en cuenta la configuración típica para las estructuras de soporte metálicas presentadas en el numeral 5.1.3.

Criterios de diseño de las estructuras metálicas

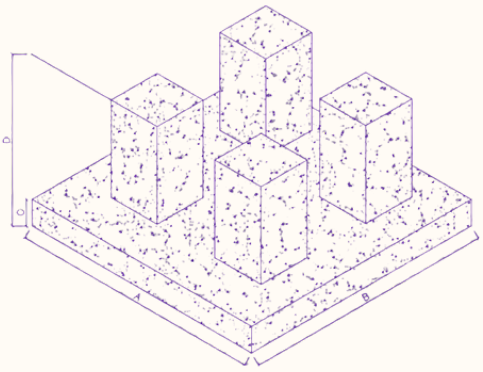
- Luego de evaluar todas las cargas que interfieren en la estructura, se deben aplicar las combinaciones de carga presentadas en el numeral 5.1, de tal manera que se realice el análisis estructural convencional para obtener las solicitaciones de cada combinación.
- En el planteamiento de la configuración de las estructuras se debe procurar la sencillez en la construcción y facilidad de transporte.
- Verificar la perfilería a emplear, la configuración de los pórticos siempre se realiza con estructuras en celosía.
- Normalmente se emplean conexiones directas, sin platinaría de conexión, salvo algunos casos especiales que requieran un detalle más específico.
- Tener en cuenta la norma ASCE 10-15 la cual define los parámetros de diseño, con detalles específicos referentes a los límites de relaciones de esbeltez para los miembros metálicos y especificaciones detalladas de las conexiones.
- Todas las estructuras se deben fijar a la fundación por medio de pernos de anclaje, diseñados según la norma 10-15 de la ASCE o mediante el código ACI 318-05 Apéndice D “Anclaje al concreto”.
- En los cálculos básicos se tiene: el esfuerzo de diseño a compresión, validación de las máximas relaciones w/t de los ángulos de las estructuras de celosía, verificar el esfuerzo crítico a compresión, realizar el diseño a tracción, diseño a flexo-compresión, diseño de las conexiones con la validación de las distancias de borde.

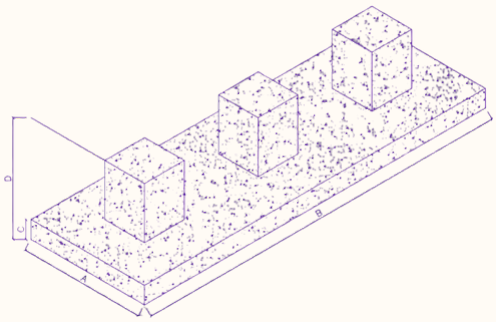


CIMENTACIONES

(Equipos de patio y pórticos)

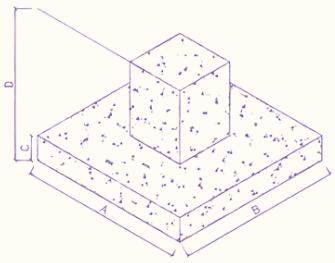
La tipología de cimentación más recurrente corresponde a zapatas aisladas o combinadas

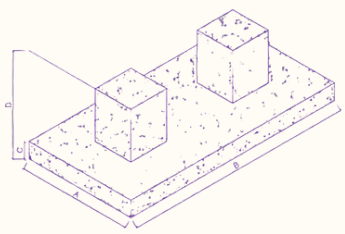




- Se calculan las reacciones críticas de la modelación del soporte, tanto cargas de trabajo como cargas de diseño.
- Evaluar el caso más crítico a momento en ambos sentidos X y Y.
- Definir los parámetros de diseño (esfuerzo admisible del suelo, ángulo de fricción interna, coeficiente de presión pasiva, peso unitario del concreto, peso unitario del suelo, esfuerzo de fluencia del acero, resistencia del concreto.
- Se debe validar el cumplimiento de los esfuerzos admisibles del suelo, al dimensionar la cimentación, cumpliendo con los parámetros de excentricidad, garantizando que no se genere un levantamiento en la cimentación.
- Se deben analizar las cargas de trabajo, revisando el volcamiento en ambas direcciones.

- Se realiza el análisis con cargas de diseño, con el fin de validar la estructura a cortante y a flexión.
- Calcular los esfuerzos actuantes tales como cortante en dos direcciones, cortante en una dirección y aplastamiento.
- En el diseño de la zapata y el pedestal se calcula el momento y cortante validando el cumplimiento de la cuantía mínima para la disposición del acero de refuerzo.
- Diseñar los pernos de anclaje partiendo de la siguiente información inicial: resistencia a compresión del concreto, referencia del perno, dimensiones del pedestal y dimensiones generales del anclaje.
- Se debe realizar las siguientes verificaciones: profundidad efectiva de embebido, verificación del anclaje a tracción, verificación del anclaje a córtate, interacción de las fuerzas de tracción y cortante.

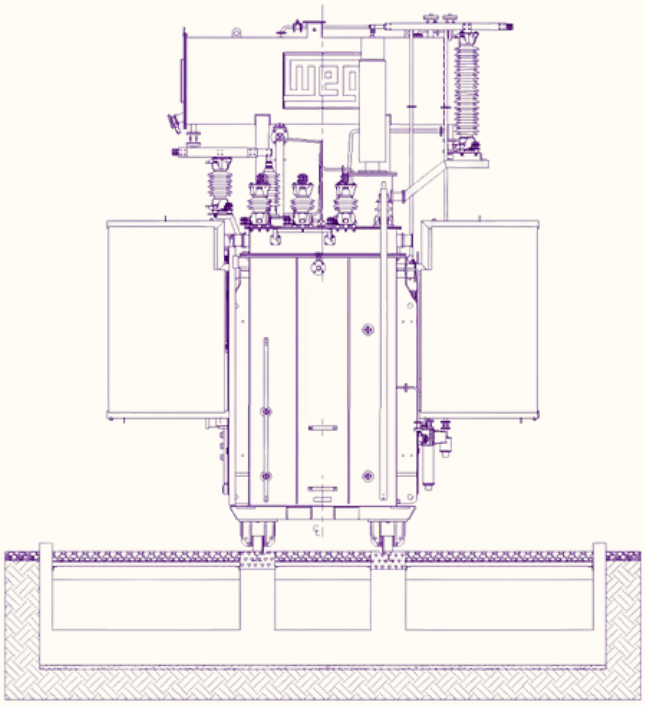




EQUIPOS DE TRANSFORMACIÓN Y COMPENSACIÓN

Información de contenido

- Nombre del proyecto y del archivo.
- Especificaciones de localización del proyecto.
- Datos del alcance del proyecto.
- Contar con la disposición física, de tal manera que se conozca la ubicación de la estructura y su cercanía a infraestructura adyacente.



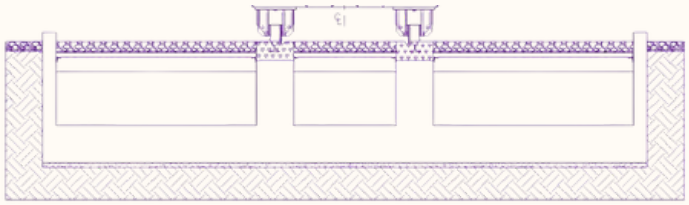
Datos iniciales

En el desarrollo de la memoria de cálculo se deben incluir los datos iniciales del diseño, como, por ejemplo:

- Conocer la clasificación del transformador según su volumen, tipo de aislante, proximidad y exposición a otros equipos. Información contenida en la ficha técnica y en los planos de disposición física.
- Verificar que la disposición física concerniente al equipo, validando la tabla de distancias de seguridad para el uso del transformador con respecto a infraestructura adyacente, según las necesidades propias el proyecto y características del equipo (ver tabla 15).
- Verificar si es necesario ubicar un muro cortafuego, según la validación de distancias de seguridad del paso anterior.
- Según las necesidades del proyecto se debe verificar si se plantea un foso colector o se diseña un foso auto contenedor.
- Según las características del transformador y necesidades del proyecto se validará si se emplea una carrilera para el transformador.
- Verificar los parámetros globales del sitio, para proceder con los cálculos de la cimentación (parámetros para el cálculo de la presión del viento numeral 4.1.6, parámetros para el cálculo de cargas sísmicas numeral 4.1.7).

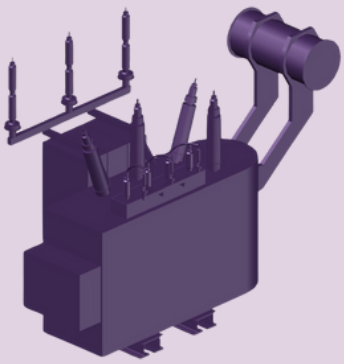
Dimensionamiento del foso

Según la clasificación del transformador y la validación de distancias se verificará a detalle la información de la ficha técnica, con el fin de dimensionar de forma específica el foso.



- Verificar la localización de los pernos de anclaje.
- Localizar los puntos de gateo.
- Revisar si cuenta con ruedas y validar las distancias entre ellas.
- Contar con las características del equipo (centro de gravedad, centro geométrico, volumen de aceite, peso y dimensiones totales).
- Con esta información se realiza el dimensionamiento de la cimentación de acuerdo con la norma IEC 61936-1.
- Validar que la configuración dimensional cumpla con: volumen de contención, muros longitudinales de contención, vigas con rieles en caso de requerir movilizarlo, placa de fondo, pedestales (según características del apoyo), bloques de tiro en caso de requerir puntos de gateo.

Procesos de cálculo para el foso

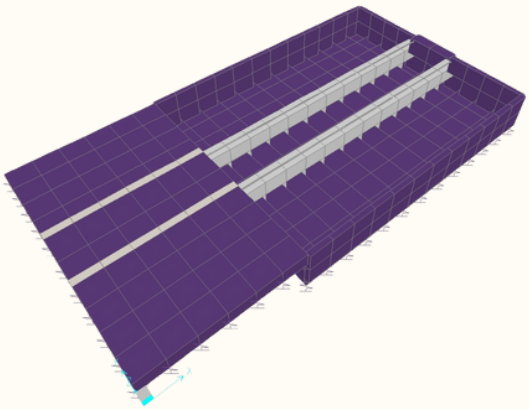


Luego de presentar los parámetros que intervienen en el diseño y de hacer el análisis general de las cargas globales que afectan la estructura se procede a realizar los cálculos específicos para el foso.

- **Diseño estructural del foso**
- **Proceso de cálculo para muro cortafuego (en caso de requerirse)**

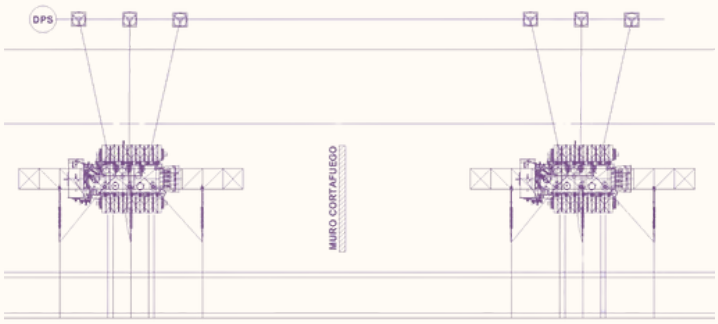
Diseño estructural del foso

- Se debe tener presente el cumplimiento de las cuantías mínimas para el concreto reforzado de estas cimentaciones (tabla 17).
- Realizar el cálculo de la presión de viento según las áreas de contacto que tiene el equipo.
- Analizar todas las cargas verticales y horizontales del equipo.
- Calcular las fuerzas sísmicas del equipo que actúan en la cimentación.
- Plantear las ecuaciones de diseño estructural y de estabilidad.
- Realizar el análisis de estabilidad considerando las cargas que intervienen, se debe verificar la excentricidad con respecto a la cimentación (validar que no se supere el esfuerzo máximo del suelo- junto con el cumplimiento de los factores de seguridad al volcamiento).



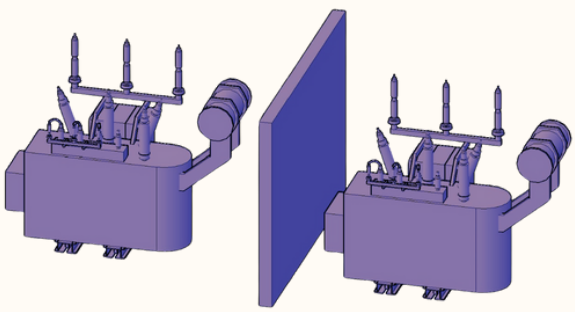
- Indicar los parámetros de concreto y refuerzo para la cimentación.
- Analizar los momentos en la placa de fondo, con la aplicación de las cargas.
- Validar el empuje de tierras, teniendo en cuenta este empuje en la infraestructura de la cimentación.
- Diseñar las vigas de apoyo del equipo, bordillos o muros perimetrales.
- Diseñar el bloque de tiro, en caso de requerirse.
- Diseñar los rieles de las carrileras (en caso de requerirse) -Validar el aplastamiento.
- Diseñar las rejillas que cubren el foso que almacena el líquido combustible.
- Diseñar los anclajes que requiere el equipo para estabilizarlo.

Proceso de cálculo para muro cortafuego (en caso de requerirse)



- Definir materiales y dimensiones del muro con su respectiva cimentación, según distancias de seguridad por cercanía de los transformadores a otra infraestructura.
- Validar requerimientos dimensionales según NFPA 850.
- Definir cargas que aplican al muro según NSR-10, tener en cuenta las cargas para control de fuego según el código NFPA 5000.
- Revisar estabilidad del muro, cumpliendo con el factor de seguridad al volcamiento.
- Calcular la resultante de cargas de la cimentación, teniendo en cuenta el volumen del relleno y peso propio de la estructura.
- Validar las deformaciones del muro simulando su comportamiento al de una viga empotrada.
- Verificar los casos más críticos con sismo y viento, aplicando las combinaciones de carga.

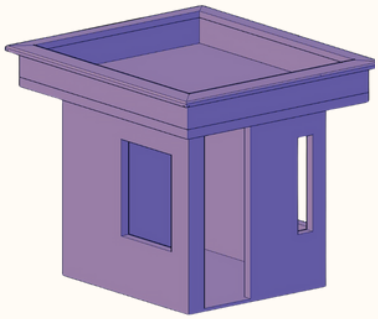
- El diseño estructural implica el cálculo de los momentos en X y Y, para determinar la cuantía de acero vertical y horizontal que requiere la estructura.
- Realizar las validaciones por cortante.
- Con las reacciones de diseño y trabajo, junto con los parámetros del estudio de suelos, se realiza el dimensionamiento de la cimentación.
- Calcular las cargas horizontales, la profundidad del bloque de presión, los momentos en la base, el momento estabilizador, el factor de seguridad al volcamiento, la excentricidad, verificando la longitud efectiva de la cimentación, junto con el cumplimiento de los máximos esfuerzos actuantes.
- El diseño de concreto implica determinar los esfuerzos cortantes y momentos de la placa en voladizo, para calcular el acero requerido.
- Validar longitudes de desarrollo, cumplimiento de cuantías mínimas y separación de refuerzo.



EDIFICIOS OCUPACIONALES

Información de contenido

- Nombre del proyecto y del archivo.
- Especificaciones de localización del proyecto.
- Datos del alcance del proyecto.
- Contar con la disposición física.



Datos iniciales

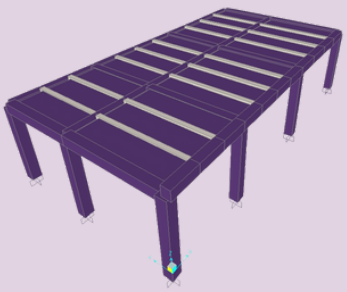
En el desarrollo de la memoria de cálculo se deben incluir los datos iniciales para el análisis y diseño:

- Tener presente la aplicación del Reglamento Colombiano de construcción sismo resistente NSR-10.
- Tener en cuenta la disposición de espacios para disponer las celdas, gabinetes, espacios de reunión, servicios sanitarios, entre otros.
- Definición de aspectos arquitectónicos de la estructura.

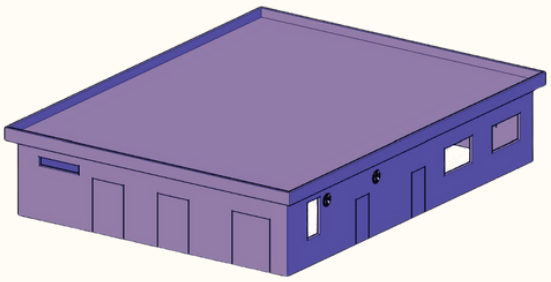
Consideraciones de análisis y diseño estructura principal

En esta sección se planea el modelo matemático a realizar teniendo en cuenta los siguientes pasos:

- Definición de secciones a emplear, vigas, columnas, espesores de placas de entrepiso y contrapiso, en caso de requerir sótano para las bandejas de los conductores se debe verificar para plantear su dimensionamiento.
- Ubicación de parámetros sísmicos.
- Sistema estructural.
- Definición de materiales.
- Definición del tipo de análisis para fuerza sísmica a utilizar.
- Análisis de cargas.

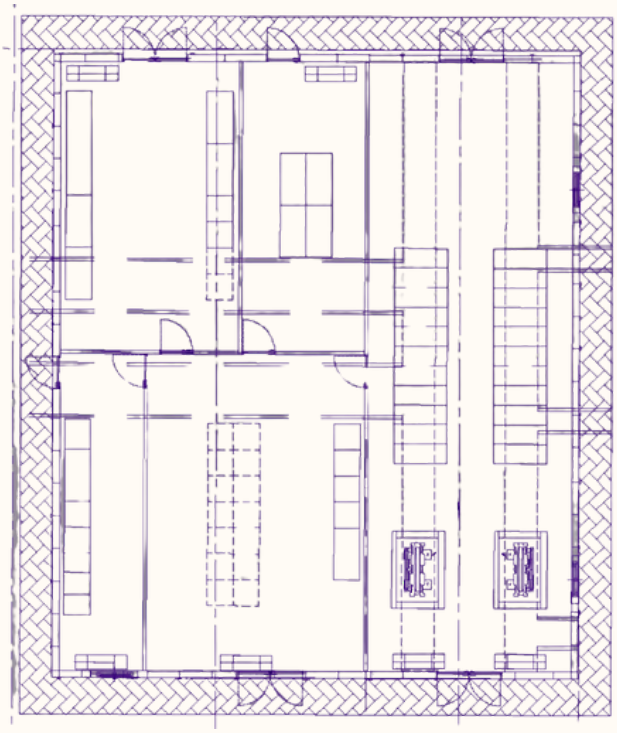


- Análisis con las combinaciones de cargas de diseño y trabajo.
- Durante el análisis se realiza el cálculo de las fuerzas sísmicas de diseño junto con umbral de daño.
- Cálculo de derivas para sismo de diseño y para umbral de daño.
- Verificación de irregularidades.
- Luego del análisis y cálculo de solicitaciones se procede a diseñar la estructura principal (vigas, columnas, placas, elementos no estructurales, entre otros).



Consideraciones de análisis y diseño para cimentaciones

- Con el cálculo de las reacciones se plantea el diseño de la cimentación.
- Con los parámetros establecidos en el estudio de suelos se dimensiona la cimentación, validando el cumplimiento de los esfuerzos admisibles.
- Lo más común es emplear cimentaciones superficiales y en particular zapatas aisladas, tomando en cuenta esta consideración se realiza la validación del dimensionamiento de la zapata, tanto de la placa como del pedestal.
- El diseño de concreto reforzado implica determinar los esfuerzos cortantes y momentos en el elemento, de tal manera que se calcule el acero requerido.
- Se debe calcular las longitudes de desarrollo, cumplimiento de cuantías mínimas y separación de refuerzo.

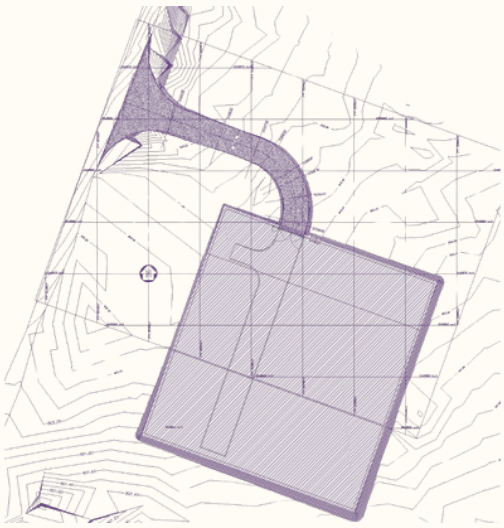


OBRAS COMPLEMENTARIAS

Se desarrollan obras complementarias que abarcan el diseño global de la subestación, entre las que se encuentran:

Descripción de actividades preliminares

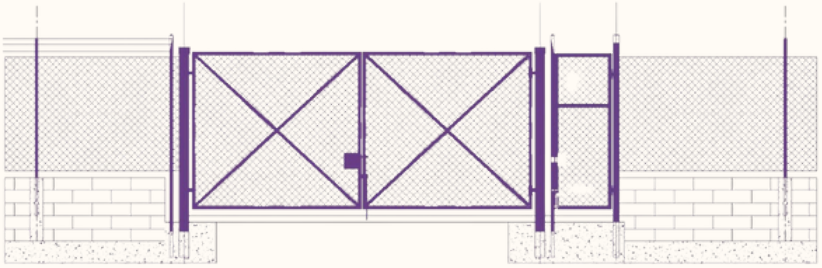
- Localización del sitio de obra.
- Elaboración de estudio hidrológico.
- Determinación de la topografía del sitio.
- Adecuación del terreno.
- Estudio geotécnico.
- Replanteo de obras.



Diseños complementarios

Con el fin de plantear un diseño eficiente se deben complementar los diseños con los siguientes aspectos, teniendo en consideración lo que establece la NSR-10:

- Diseño de drenajes: revisando los caudales de diseño, el coeficiente de escorrentía, la intensidad de la precipitación y las áreas tributarias.
- Se debe validar la tubería para filtros y colectores.
- Diseñar cunetas y estructuras de inspección de redes.
- Diseño de cárcamos y ductos.
- Dimensionamiento y diseño de los sistemas ambientales.
- Planteamiento de vías.
- Otras obras: cerramientos, ornamentación, acabados de patio, entre otros.





UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Anexo 2: Ejemplo de cálculo

9. ANEXO 2: EJEMPLO DE CÁLCULO

Se presentan los cálculos de flechas y tensiones para generar los árboles de carga de un pórtico que soporta los conductores T1 y cables de guarda G1, la carga generada durante y después del corto circuito de los conductores, las cargas de viento y sismo que van a estar soportadas para un caso particular que soportarán los pórticos de una subestación eléctrica de 230kV. A continuación, se presentan los criterios de cálculo que se toman como información inicial o de entrada que normalmente se establecen junto con el equipo electromecánico.

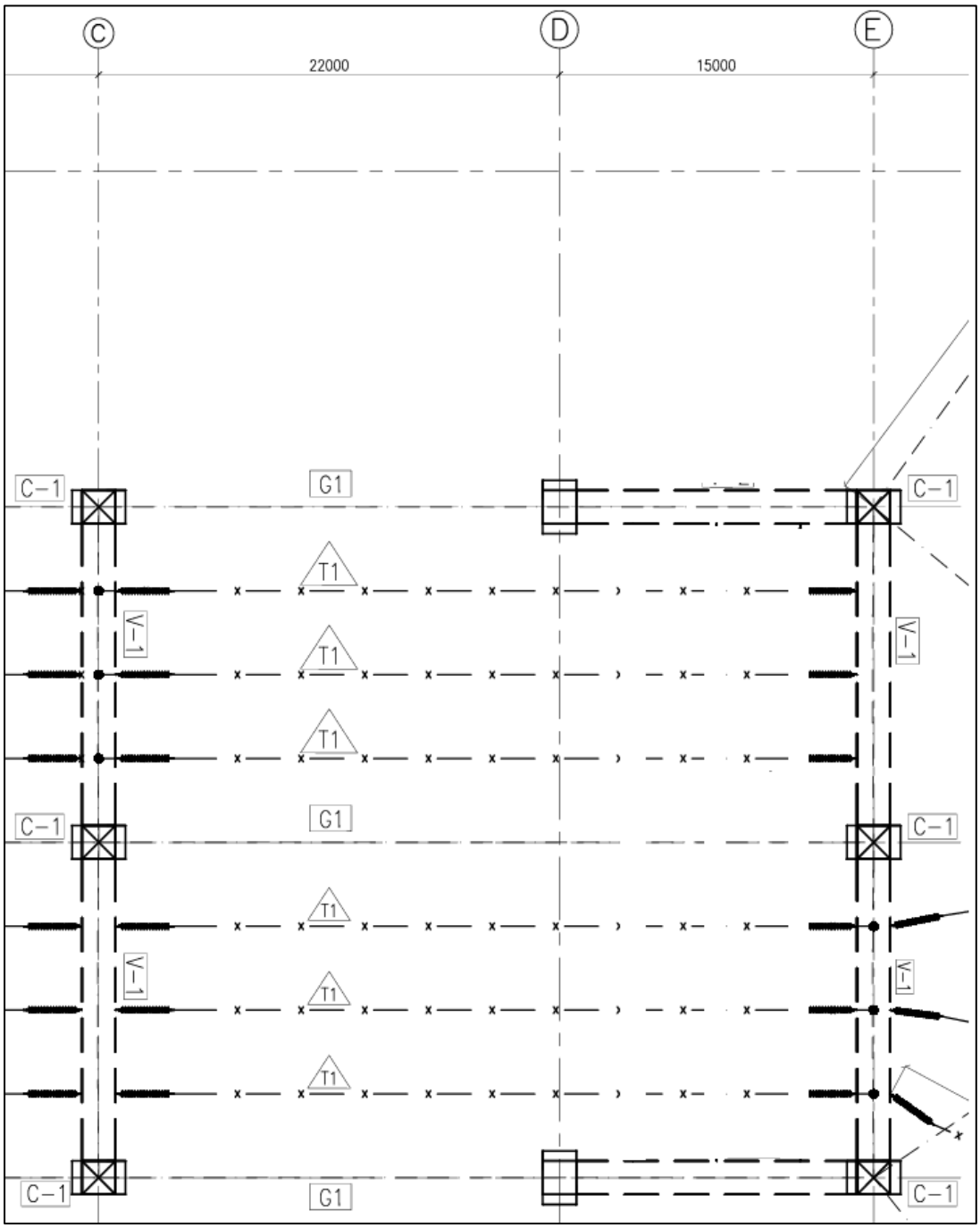
9.1 Generalidades de las estructuras

Se presenta en la figura 107 la disposición general de los pórticos y se indican las templas a tener en cuenta tanto para los conductores como para el cable de guarda.

Se evidencia en la figura que el pórtico planteado está conformado por las columnas C1 a las cuales llegan apoyados los cables de guarda G1 y vigas V1 que para el caso específico soportan los conductores o templas T1, considerando que el vano es de 37m de longitud a ejes.

Figura 1

Configuración de las templas y cables de guarda



Nota. Ejemplo adaptado de una subestación típica para el desarrollo de los cálculos de flechas y tensiones de las templas y cables de guarda

9.2 Parámetros básicos de diseño

Los parámetros ambientales y meteorológicos de la subestación se encuentran descritos en la tabla de parámetros globales, *tomada de la tabla 4 "Parámetros globales"*:

Tabla A

Parámetros globales

PARÁMETRO	VALOR
Altura sobre el nivel del mar, m	437
Temperatura ambiente	
Mínima, °C	21
Media, °C	25
Máxima, °C	30
Tipo de suelo	C
Zona de amenaza sísmica	Alta
Aceleración pico efectiva Aa	0.2
Velocidad horizontal pico efectiva Av	0.25
Nivel de contaminación ambiental	Medio
Precipitación media anual, mm/año	2650
Velocidad básica del viento, km/h	120

9.3 Características eléctricas y mecánicas del conductor entre equipos

Se dan a conocer las características electromecánicas de los conductores y de los cables de guarda contemplados en el cálculo. *Tomado de la tabla 5 "características del conductor"*

Tabla B

Características del conductor

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	MAGNITUD
Nombre de la templa (corresponde con el plano)	Nombre	T1
Tipo de cable	Nombre	AAC COWSLIP
Sección transversal (área)	mm^2	1010.43
Diámetro	mm	41.36
Masa unitaria	kg/m	2.813
Peso unitario	N/m	27.6
Tensión de rotura	kN	151.98
Módulo de elasticidad	Mpa	54000
Coeficiente de dilatación térmica	/°C	0.000023

Tabla C

Características del cable de guarda

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	MAGNITUD
Nombre del cable de guarda (corresponde con el plano)	Nombre	G1
Tipo de cable	Nombre	7#8 ALUMOWELD
Sección transversal (área)	mm^2	58.56
Diámetro	mm	9.78
Masa unitaria	kg/m	0.389
Peso unitario	N/m	3.82
Tensión de rotura	kN	70.88
Módulo de elasticidad	Mpa	162000
Coeficiente de dilatación térmica	/°C	0.000013

Se presentan los datos del cable de guarda, según *la tabla 6 "Características del cable de guarda".*

9.4 Descripción del conductor y cable de guarda

Las características del conductor se denotan a continuación, estos parámetros se definen desde el área electromecánica:

- Diferencia de altura entre el apoyo de ambos extremos: Ninguna
- Longitud del vano: 37 m
- Tipo de conductor: AA COWSLIP
- Cargas concentradas: a una distancia de 8.75m P= 0.33 kN debido a una bajante.
- Cadena izquierda: 0.96 kN de peso, 3.00m de longitud y 0.27m de diámetro.
- Cadena derecha: 0.96 kN de peso, 3.00m de longitud y 0.27m de diámetro.

Las características del cable de guarda se denotan a continuación, estos parámetros se definen desde el área electromecánica:

- Diferencia de altura entre el apoyo de ambos extremos: Ninguna
- Longitud del vano: 37 m
- Tipo de conductor: 7#8 AWG

9.5 Criterios básicos de cálculos de cargas

Para el cálculo de los distintos parámetros se fijan varios criterios básicos, a continuación, se presentan los criterios establecidos

9.5.1 Criterios de tensionado

Para las templas que están entre los pórticos, el cálculo de las tensiones (Cargas) básicas de diseño tendrá como flecha un valor entre el 3% y 4% para el conductor y entre el 2% y 3% para el cable de guarda.

9.5.2 Cargas de corto circuito

Este procedimiento permite el cálculo de las tensiones máximas durante y después del cortocircuito, teniendo cuidado en verificar que la distancia de acercamiento entre conductores no sea menor que la mitad de la distancia de seguridad fase – fase.

El tiempo de duración del corto circuito para los cálculos es de 1 s y la corriente de corto circuito es de 31.50 kA, como se especifica en los criterios de diseño eléctrico. El efecto de cortocircuito se presenta cuando las templas de los pórticos se encuentran alineadas horizontalmente, para los vanos de llegada o salida de línea se asume que el efecto de corto circuito solo se presenta en la mitad del vano (condición más desfavorable) ya que debido a los cambios de altura y la disposición vertical de las templas en las torres se reduce la longitud en la que el barraje estará alineado horizontalmente.

9.5.3 Cargas muertas

Estas cargas están compuestas por el peso propio de los conductores, las conexiones en el conductor, las cadenas de aisladores evaluadas según los planos y las bajantes a equipos que generan cargas concentradas a lo largo de los conductores y son permanentes en la estructura, así como las cargas de mantenimiento. Para el caso de los cables de guarda, las cargas muertas básicamente están compuestas por el peso propio.

9.5.4 Cargas de viento

Se hicieron los cálculos de la carga de viento sobre los conductores usando la metodología presentada en el manual ASCE No 7, considerando la velocidad de viento de ráfaga de 3s con periodo de retorno de 50 años, de 120km/h.

Se contempló una categoría de exposición tipo C correspondiente a un terreno abierto con esporádicas obstrucciones, como es el caso de la zona de estudio.

9.5.5 Cargas de sismo

Es la fuerza máxima que actúa sobre la estructura producto de movimientos sísmicos, la cual evalúa la ocurrencia de estos con un periodo de retorno mayor a 50 años. Para el cálculo de los árboles de carga se consideró el sismo sobre el conductor y el cable de guarda.

Esta aceleración actúa sobre la estructura como una fuerza horizontal. Para este análisis la carga de sismo se evalúa de acuerdo con la NSR-10.

Se considera una aceleración pico efectiva Aa= 0.20 y un coeficiente de suelo Fa= 1.20, con categoría de uso IV y coeficiente de importancia de 1.5 de acuerdo a la norma NSR-10. Para los pórticos metálicos se emplea un coeficiente de reducción R= 3.0

Teniendo en cuenta los valores anteriores se determina la máxima aceleración horizontal de diseño expresada como una fracción de la aceleración de la gravedad (Sa) como sigue:

$$Sa = \frac{2.5 * Fa * Aa * I}{R}$$

$$Sa = \frac{2.5 * 1.20 * 0.20 * 1.5}{3.0} = 0.30$$

9.5.6 Combinaciones de carga

Las combinaciones de carga y los factores de sobrecarga que se utilizan en el análisis se listan a continuación, tomados del *numeral 5.1 "Combinación de cargas para el diseño de estructuras"*

P1 = 1.2 Pp + 1.3 Ct + 1.3 Cm

P2 = 1.2 Pp + 1.3 Ct

P3 = 1.1 Pp + 1.3 Cvx, y + 0.75 Cc + 1.1 Ct

P4 = 1.1 Pp + 1.0 Cc + 1.1 Ct

P5 = 1.1 Pp + 1.1 Ct ± 1.0 Csx, y + 0.30 Csx, y ± Csv

P6 = 1.1 Pp + 0.75 Cc + 1.1 Ct ± 1.0 Da

P7 = 0.90 Pp + 1.20 Ct +/- 1.0 Cv

Combinaciones para trabajo:

P1 = 1.0 Pp + 1.0 Ct + 1.0 Cm

P2 = 1.0 Pp + 1.0 Ct

P3 = 1.0 Pp ± 1.0 Cvx, y + 0.60 Cc + 1.0 Ct

P4 = 1.0 Pp + 1.0 Cc + 1.0 Ct

P5 = 1.0 Pp + 1.0 Ct ± 0.70 Csx, y + 0.21 Csx, y ± 0.70 Csv

P6 = 1.0 Pp + 0.75Cc + 1.0 Ct ± 1.0 Da

P7 = 0.90 Pp + 1.00 Ct +/- 1.0 Cv

Donde:

Csx y Csy= Cargas por sismo horizontal sobre equipos y estructuras.

Csv= La carga de sismo vertical se calcula como el 80% de la carga de sismo horizontal según la ASCE 113.

Pp= Peso propio de la estructura, equipos y cualquier tipo de elemento implícito en la implementación del mismo, como cargas debido a montaje y mantenimiento.

Ct= Cargas horizontal de tiro.

Cc= Cargas de sobretensión en conductores por efecto de cortocircuito.

Cv= Carga de viento.

Da= Cargas de accionamiento

Cm= Cargas de mantenimiento

9.6 Metodología

El cálculo mecánico de las flechas y tensiones de los barrajes flexibles y los cables de guarda de la subestación, es fundamental para predecir el comportamiento de los conductores antes las distintas condiciones ambientales y de operación. Se requiere

conocer los valores de las tensiones para realizar el diseño del pórtico y los valores de las flechas y para calcular las distancias de seguridad en condiciones normales de operación, con carga máxima y en condiciones de cortocircuito.

Para el cálculo de las tensiones se utilizó la ecuación de cambio de estado, estimando la condición más desfavorable a la que estará sometido el conductor del vano, para esto se tuvieron en cuenta las cargas generadas por las cadenas de aisladores y los conductores que bajan a los equipos puesto que varían la curva de la catenaria perfecta y lleva a un análisis matemático más complejo.

9.7 Cálculo de flechas y tensiones

Se presenta a continuación la aplicación del cálculo de flechas y tensiones de acuerdo con lo mencionado en el *numeral 4.1.3 "Cargas de tensión mecánica y cálculo de flechas de los conductores flexibles".* El desarrollo de la catenaria se realiza según la figura 27, la trayectoria del cable varía según las condiciones de temperatura y con ello se determinan las tensiones resultantes aplicando la ecuación de cambio de estado que se presenta en el numeral *"efectos de temperatura".* La cual se soluciona mediante el método de Newton – Rapson.

$$T_{02}{}^3 + T_{02}{}^2 * \left(\frac{Ac * Ec * W_{T1}{}^2 * L^2}{24\ x\ T_{01}{}^2} + Ac * Ec * \alpha * \Delta T * T_{01} \right) - \frac{Ac * Ec * W_{T2}{}^2 * L^2}{24} = 0$$

$\alpha =$ Coeficiente térmico de dilatación lineal del cable, 1/ºC.

$\Delta T =$ Variación de temperatura, ºC

$Ac =$ Área de la sección transversal del cable, cm^2

$Ec =$ Módulo de elasticidad del cable, daN/cm^2

$L =$ Longitud del vano (separación entre soportes), m.

$T_{01} =$ Tensión mecánica horizontal básica en el estado 1, daN.

$T_{02} =$ Tensión mecánica horizontal básica en el estado 2, daN.

$W_{T1} =$ Carga uniforme equivalente sobre el conductor en el estado 1, daN/m

$W_{T2} =$ Carga uniforme equivalente sobre el conductor en el estado 2, daN/m.

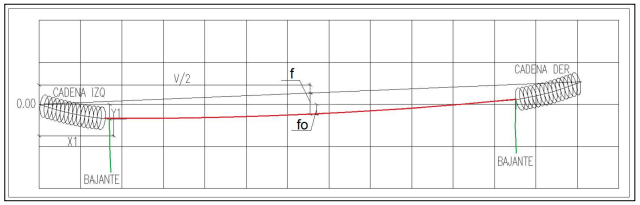
Con la siguiente ecuación se considera la corrección de la carga WT por la temperatura

$$W_{T2} = W_{T1}/(1 + \alpha * \Delta T)$$

CÁLCULO DE FLECHAS Y TENSIONES PARA 1 CONDUCTOR
BARRAJE FLEXIBLE
VANO 37 m - 1 CONDUCTOR POR FASE - TEMPLA T1

Conductor	ACC COWSLIP	
Calibre	2000	Kcmil
Área (A)	1010.43	mm2
Diámetro (Ø)	41.36	mm
Masa unitaria (m)	2.813	kg/m
Peso unitario (Wc)	27.6	N/m
Tensión de rotura (Tr)	151.98	kN
Módulo de elasticidad (E)	5.40E+04	Mpa
Coeficiente de dilatación lineal (a)	2.30E-05	/°C

Cadenas	**Izq**	**Der**	
Tipo	**Retención**	**Retención**	
Longitud (La)	3	3	m
Peso Total (Wa)	0.96	0.96	kN
Diámetro (Øa)	0.27	0.27	m



Vano horizontal (V)	37.00	m
Diferencia de altura (D)	0.00	m

Cargas concentradas

distancia	8.75	m
Carga vertical P	0.33	kN

CONDICIÓN	**TEMPERATURA (°C)**	**PRESIÓN DE VIENTO Pv (kPa)**	**PESO EQUIVALENTE**			**Tensión horizontal**	**Posición grapa**		**Cota punto aplicación carga Cp (m)**	**Cota punto aplicación carga Cp (m)**	**Posición punto más**		**Flecha en mitad de vano f(m)**	**Longitud total LT (m)**
			CONDUCTOR W'C (N/m)	**CADENA IZQ W'a.i (N/m)**	**CADENA DER W'a.d (N/m)**		**Izquierda Ca.i (m)**	**Derecha Ca.d (m)**			**Dist. Horiz. X1 (m)**	**Dist. Vert. Y1 (m)**		
EDS	25	0	27.6	325	325	6500	-0.52	-0.44	-0.53	-1.06	15.68	-1.16	1.14	37.13
VIENTO MÁXIMO	21	0.65	38.53	338.8	338.8	7906	-0.5	-0.43	-0.51	-1.04	16.47	-1.19	1.18	37.13
TEMPERATURA MÍNIMA DE OPERACIÓN	21	0	27.6	325	325	6573	-0.51	-0.44	-0.52	-1.05	15.67	-1.15	1.13	37.13
TEMPERATURA MÁXIMA DE OPERACIÓN	80	0	27.6	325	325	5690	-0.59	-0.5	-0.6	-1.21	15.68	-1.32	1.3	37.17
TENDIDO	10	0	27.6	325	325	5480	-0.48	-0.48	-0.49	-0.85	18.5	-1.09	1.09	37.12
TENDIDO	15	0	27.6	325	325	5407	-0.49	-0.49	-0.49	-0.86	18.5	-1.11	1.11	37.12
TENDIDO	20	0	27.6	325	325	5329	-0.49	-0.49	-0.5	-0.88	18.5	-1.12	1.12	37.13
TENDIDO	25	0	27.6	325	325	5284	-0.5	-0.5	-0.51	-0.89	18.5	-1.14	1.14	37.13
TENDIDO	30	0	27.6	325	325	5182	-0.51	-0.51	-0.51	-0.9	18.5	-1.15	1.15	37.13

CÁLCULO DE FLECHAS Y TENSIONES PARA 1 CABLE DE GUARDA
BARRAJE FLEXIBLE
VANO 37 m - 1 CABLE DE GUARDA POR FASE - TEMPLA G1

Conductor	ALUMOWELD	
Calibre	7#5	Kcmil
Área (A)	58.56	mm2
Diámetro (Ø)	9.78	mm
Masa unitaria (m)	0.389	kg/m
Peso unitario (Wc)	3.82	N/m
Tensión de rotura (Tr)	70.88	kN
Módulo de elasticidad (E)	1.62E+05	Mpa
Coeficiente de dilatación lineal (a)	1.30E-05	/°C

Vano horizontal (V)	37.00	m
Diferencia de altura (D)	0.00	m

CONDICIÓN	TEMPERATURA (°C)	PRESIÓN DE VIENTO Pv (kPa)	PESO EQUIVALENTE			Tensión horizontal	Posición grapa		Cota punto aplicación carga Cp (m)	Cota punto aplicación carga Cp (m)	Posición punto más		Flecha en mitad de vano f(m)	Longitud total LT (m)
			CONDUCTOR W'C (N/m)	CADENA IZQ W'a.i (N/m)	CADENA DER W'a.d (N/m)		Izquierda Ca.i (m)	Derecha Ca.d (m)			Dist. Horiz. X1 (m)	Dist. Vert. Y1 (m)		
EDS	25	0	3.82	0	0	900	-0.04	-0.04	-0.39	-0.57	18.5	-0.73	0.73	37.04
VIENTO MÁXIMO	21	0.65	7.41	3.1	3.1	1910	-0.04	-0.04	-0.42	-0.63	17.53	-0.74	0.73	37.04
TEMPERATURA MÍNIMA DE OPERACIÓN	21	0	3.82	0	0	922	-0.04	-0.04	-0.38	-0.56	18.5	-0.71	0.71	37.04
TEMPERATURA MÁXIMA DE OPERACIÓN	80	0	3.82	0	0	699	-0.05	-0.05	-0.51	-0.74	18.5	-0.93	0.93	37.06
TENDIDO	5	0	3.82	0	0	1029	-0.03	-0.03	-0.34	-0.5	18.5	-0.63	0.63	37.03
TENDIDO	10	0	3.82	0	0	992	-0.03	-0.03	-0.36	-0.52	18.5	-0.66	0.66	37.03
TENDIDO	15	0	3.82	0	0	958	-0.04	-0.04	-0.37	-0.37	18.5	-0.68	0.68	37.03
TENDIDO	20	0	3.82	0	0	928	-0.04	-0.04	-0.38	-0.55	18.5	-0.7	0.7	37.04
TENDIDO	25	0	3.82	0	0	900	-0.04	-0.04	-0.39	-0.57	18.5	-0.73	0.73	37.04

CÁLCULO DE CARGAS PARA PÓRTICOS
VANO 37 m - 1 CONDUCTORES POR FASE - TEMPLA T1

CÁLCULO DE ESFUERZOS DE CORTO CIRCUITO PARA BARRAJES FLEXIBLES

Cálculo realizado a partir del procedimiento descrito en el ***numeral 5.1.2.2.2.1 "Cálculo de esfuerzos de corto circuito para barrajes flexibles"***

1. Observaciones y datos generales:

El método a utilizar a continuación es el utilizado en la norma IEC-865.
Dimensionamiento de cables conductores por esfuerzos mecánicos de corto circuito,

Conductor	**ACC COWSLIP**		
L	Longitud de vano más largo en m	37	
a	Distancia entre fases en m	4.00	
Li	Longitud cadenas de retención en m	2.95	
E	Módulo de Young del cable en N/m^2	5.40E+0.10	
A	Sección transversal del cable en m^2	1.01E-003	
m'	Masa del cable en kg/m	2,813	
n	Número de cables por fase	1	
g	Aceleración de la gravedad en m/s^2	9.81	
S	Rígidez de apoyos en cada extremo en N/m	500000	
		Condición para máxima tensión	Condición para máxima flecha
	Temperatura inicial en C°	21	80
Fsc	Fuerza de tensión estática de un subconductor en N	7906	5690
Fst	Fuerza de tensión estática del conjunto de conductores en N	7906	5690
bc	Flecha inicial a la tensión estática en m	1.18	1.30
Ik3	Corriente de corto circuito simétrica trifásica en kA rms	31.5	
Tk1	Duración del cortocircuito, s	1	
P	Total cargas concentradas (conexiones y cadenas de aisladores) kg	227.44	
m''	Masa equivalente del conductor con las cargas concentradas, kg/m	5.32	

2. Fuerza electromagnética adiconal aplicada a la línea en condiciones de corto circuito (F'):

F'		Fuerza electromagnética			
r		Relación entre la fuerza electromagnética y la fuerza gravitacional			
∂		Dirección angular de la fuerza			
F'	=	$\left(0.15 * \frac{Ik3^2}{a}\right)$	=	31.27 N/m	
r	=	$F'/(n * m'' * g)$	=	0.60	
∂	=	Arctan(r)	=	30.93°	

3. Periodo de oscilación del conductor

T		Periodo de oscilación del conductor			
Tr		Periodo de oscilación resultante			
T	=	$0.79 * bc^{0.5}$	=	1.94	2.04
Tr	=	$\frac{T}{\sqrt[4]{1+r^2} * \left[1 - \frac{\pi^2}{64} * \left(\frac{\partial}{90°}\right)^2\right]}$	=	1.83	1.93

4. Máxima fuerza de tensión resultante durante el corto circuito (Ft)

Es	Módulo de elasticidad real
Nc	Rigidez conjunto conducto
ζ	Factor de tensión mecánica del conductor
∂k	Ángulo de declinación durante o después del cortocircuito
φ	Factor de tracción perímetro de carga
ψ	Factor relativo a la fuerza de tracción en un conductor flexible
Ft	Máxima tensión durante el cortocircuito

Es	=	$\begin{cases} E * \left[0.3 + 0.7 * \sin\left(\frac{90° * Fst}{n * A * \sigma_{fin}}\right)\right] & Si\ \frac{Fst}{n * A} \le \sigma_{fin} \\ E & Si\ \frac{Fst}{n * A} > \sigma_{fin} \end{cases}$		=	2.54E+0.10	2.29E+0.10
Nc	=	$\frac{1}{S * L} + \frac{1}{n * Es * A}$		=	9.30E-0.08	9.74E-0.08
ζ	=	$(n * g * m'' * L)^2/(24 * Fst^3 * Nc)$		=	3,380	8,662
∂k	=	$\partial * (1 - Cos\left(360° * \frac{Tk1}{Tr}\right)$	Si Tk1/Trs <= 0.5	=	ü	ü
		$\partial * 2$	Si Tk1/Trs > 0.5	=	61.85	61.85
φ	=	$3 * [(1 + r^2)^{0.5} - 1]$	Si Tk1 >= Trs/4			
		$3 * [r * sen(\partial k) + \cos(\partial k) - 1]$	Si Tk1 >= Trs/4			
φ	=	(1.00 s >= 1.93 s / 4)		=	0.50	0.50

Resolviendo la ecuación:

ψ	=	$\varphi^2 * \psi^3 + \varphi * (2 + \zeta) * \psi^2 + (1 + 2 * \zeta) * \psi - \zeta * (2 + \varphi) = 0$	=		
ψ			=	0.83	0.92

La carga radial , φ causa una fuerza de tensión máxima durante el corto circuito dada por :

Ft	=	$k * Fst * (1 + \varphi * \psi)$			
Donde k	=	1	para un (1) conductor por fase y		
	=	1.1	para dos (2) conductores por fase		
Ft			=	11174	8302

5. Máxima fuerza de tensión resultante después del corto circuito (Ff)

∂m Ángulo de declinación máximo durante o despues del cortocircuito

Ff Tensión después del cortocircuito causada por el movimiento brusco del conductor

x	=	$\begin{cases} 1 - r * sen(\partial k) & Si\ 0 \le \partial k \le 90° \\ 1 - r & Si\ (\partial k) > 90° \end{cases}$	=	0.472	0.472
∂m	=	$\begin{cases} 1.25 * \arccos(x) & Si\ 0.766 \le x \le 1 \\ 10° * \arccos(x) & Si\ -0.985 \le x \le 0.766 \\ 180° & Si\ x < -0.985 \end{cases}$		ü	ü
∂m			=	71.85	71.85
∂			=	30.93	30.93
∂k			=	61.85	61.85

Sólo se requiere calcular si ∂m >=70°

Ff	=	$1.2 * Fst * \sqrt{1 + 8 * z * \frac{\partial m}{180°}}$	=	32581	32581

6. Resumen de tensiones

Ft	Máxima fuerza de tensión durante el corto circuito	=	11174	8302
Ff	Máxima tensión después del corto circuito	=	32581	36556
Máxima tensión del diseño	(F)	=	32581	36556
Máxima carga transversal	(F*L')	=	1157	1157

7. Desplazamiento horizontal del vano y mínima distancia en aire

e		Máxima elongación elástica debida al cambio de tensión			
et		Máxima elongación términca debido al calentamiento por la corriente de cortocircuito			
Cth		0.27E-18 m^4/A^2s para conductores de aluminio o aleación de aluminio y conductores de aluminio / acero con una relación de sección transversal Al/(St>6)			
Cd		Costante de elongación			
bct		Máxima flecha en mitad de vano por elongaciones térmicas y elásticas			
Cf		Costante de forma			
bh		Máximo desplazamiento horizontal dentro del vano			
amin		Distancia mínima en mitad de vano			
apermitido		Distancia de acercamiento permitida, 1125 mm para 230kV			
e	=	$Nc * (Ft - Fst)$	=	3.04E-004	2.54E-004
et	=	$\begin{cases} Cth * \left(\frac{I_{k3}}{n * A}\right)^2 * \frac{Trs}{4} & Si\ T_{k1} \geq \frac{Trs}{4} \\ Cth * \left(\frac{I_{k3}}{n * A}\right)^2 * T_{k1} & Si\ T_{k1} < \frac{Trs}{4} \end{cases}$	=	1.20E-004	1.26E-004
Cd	=	$\sqrt{1 + \frac{3}{8} * \left(\frac{L}{bc}\right)^2 * (e + et)}$	=	1.08	1.06
bct	=	$Cd * bc$	=	1.27	1.37
Cf	=	$\begin{cases} 1.05 & Si\ r \leq 0.8 \\ 0.97 + 0.1 * r & Si\ 0.8 < r < 1.8 \\ 1.15 & Si\ r \geq 1.8 \end{cases}$	=	1.05	1.05
bh	=	$Cf * Cd * bc * sen(\partial m) < 90°$ $Cf * Cd * bc * sen(\partial m) \geq \partial°$	=	0.68	0.74
amin	=	$a - 2 * bh$	=	2.63	2.52
amin > apermitido			=	ok	ok

Procedimiento desarrollado según el numeral *5.1.2.3 para el cálculo de árboles de carga*

Parámetros Básicos

-Velocidad viento máxima con periodo de retorno de 50 años	120 km/h =	33.33 m/s
-Presión de viento máxima		0.65 kPa
-Altitud sobre el nivel del mar	437 m.s.n.m	
-Velocidad viento coincidente (máxima promedio anual)	120 km/h =	33.33 m/s
-Presión de viento media		0.65 kPa

Categoría de exposición	C	alfa=	9.5
		Ls=	67 m
		K=	0.005
		Zg=	274 m

	Conductor	Cable de Guarda
Tipo:	ACC COWSLIP	ALUMMOWELD
Diámetro total:	4.14E-002 m	9.78E-003 m
Peso unitario:	2.76E-002 kN/m	3.82E-003 kN/m
Número de subconductores:	1	

Datos de cadena

Longitud:	2.95 m
Diámetro:	0.27 m
Peso:	0.96 kN

Altura media de fijación:	15.60 m	19.00 m
Vano medio:	37.00 m	37.00 m
Flecha media:	0.73 m	0.73 m
Altura media cable:	15.12 m	18.52 m

Corrección por altura cables, kz:	1,413	1,474
Corrección por altura cadenas, kz:	1,422	1,482

Carga de mantenimiento por fase:	2.50 kN	2.50 kN
Carga de mantenimiento cable de guarda:	2.50 kN	2.50 kN
Tensión diaria promedio:	6.50 kN	0.90 kN
Tensión máxima en corto-circuito:	32.58 kN	kN
Carga transversalen corto-circuito:	1.16 kN	kN
Tensión con viento máximo:	7.91 kN	1.91 kN
Estructura tipo	VIGA V1	COLUMNA C1
Utilización	RETENCIÓN	RETENCIÓN
Vano viento de diseño:	18.50 m	18.50 m
Vano peso de diseño:	18.50 m	18.50 m
Ángulo de deflexión:	0.00 °	0.00 °

2. Condición normal

CARGAS DE TRABAJO

2.1 Cargas en el conductor

Carga de viento	Cv =	1.50 kN
Carga de ángulo	Ctt =	0.00 kN
Carga vertical	Pp =	2.43 kN
Carga longitudinal	Ctl =	7.91 kN

2.2 Cargas en el Cable de Guarda

Carga de viento	Cv cg=	0.17 kN
Carga de ángulo	Ctt cg=	0.00 kN
Carga vertical	Pp cg=	0.07 kN
Carga longitudinal	Ctl cg=	1.91 kN

3. Condición Anormal: cortocircuito

3.1 Cargas en el Conductor

Carga de ángulo	Ctt =	0.00 kN
Carga transversal de corto	Cct =	1.16 kN
Carga vertical	Pp =	2.43 kN
Carga longitudinal	Ccl =	32.58 kN

3.2 Cargas en el cable de guarda

Carga de ángulo	Ctt cg=	0.00 kN
Carga vertical	Pp cg=	0.07 kN
Carga longitudinal	Ctl cg=	1.91 kN

4. Cargas de Sismo

Aceleración máxima horizontal	Sa =	0.90 g
Factor de modificación de respuesta	R =	3.0
Coeficiente sísmico de diseño	Sa/R =	0.3 g
Relación sismo vertical/horizontal	Sv/Sh =	0.80 g

4.1 Cargas de sismo conductor

Carga de sismo horizontal	CSH =	0.88 kN
Carga de sismo vertical	CSV =	0.70 Kn

4.2 Cargas de sismo cables de guarda

Carga de sismo horizontal	CSH cg=	0.05 kN
Carga de sismo vertical	CSV cg=	0.04 kN

5. Condición de Mantenimiento

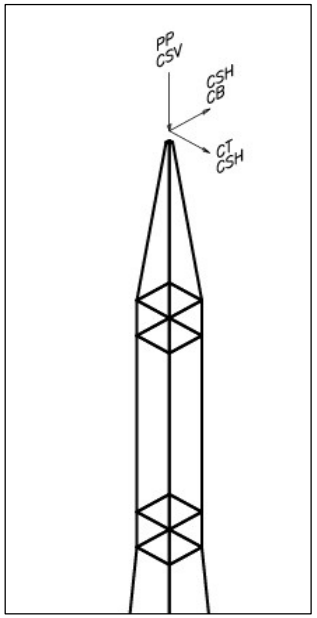
5.1 Cargas en el conductor

Carga de viento	Cv =	0.00 kN
Carga de ángulo	Ctt =	0.00 kN
Carga vertical	Pp =	4.93 kN
Carga longitudinal	Ctl =	0.00 kN

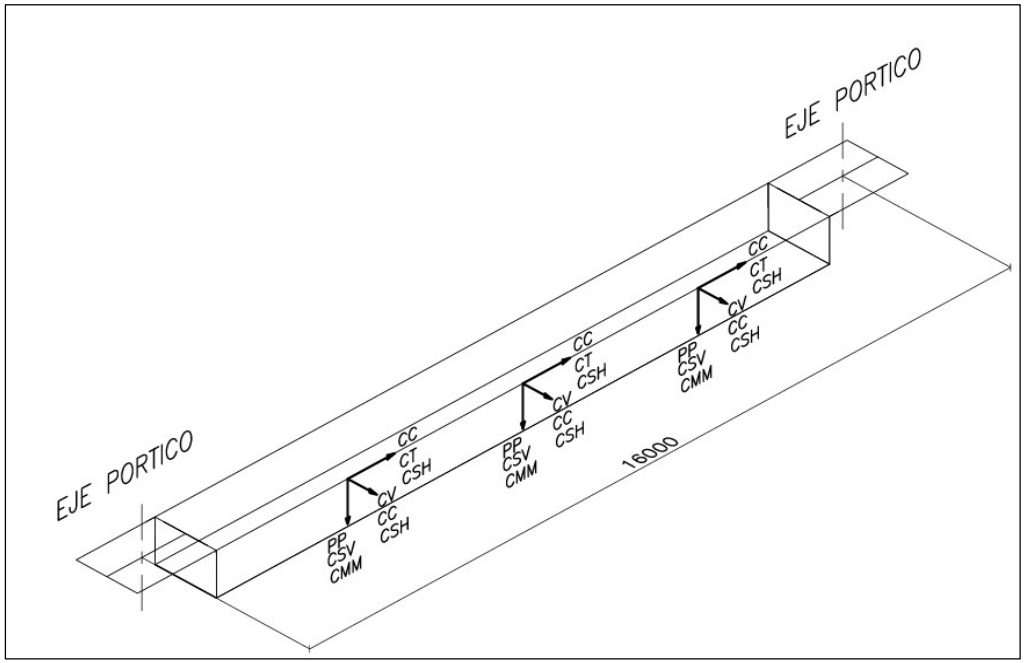
5.2 Cargas en el Cable de Guarda

Carga de viento	Cv =	0.00 kN
Carga de ángulo	Ctt =	0.00 kN
Carga vertical	Pp =	2.57 kN
Carga longitudinal	Ctl =	0.00 kN

ÁRBOLES DE CARGA PARA LA VIGA V1 Y PARA CASTILLETE DE COLUMNA C1



ÁRBOLES DE CARGA CABLE DE GUARDA G1



ÁRBOLES DE CARGA CONDUCTOR T1

DESCRIPCIÓN	ALTURA	NUMERACIÓN TEMPLA	VERTICALES			TRANSVERSALES					LONGITUDINALES		
			PP	CSV	CMM	CV	CB	CBC	CC	CSH	CC	CT	CSH
Conductor 1	15.60 m	T1	2.43	0.7	2.5	1.5	-	-	1.16	0.88	24.67	7.91	0.88
Guarda 1	19.00 m	G1	0.07	0.04	2.5	0.17	-	-	-	0.05	-	1.91	0.05

Bibliografía

ACI 318-19. (2019). *Building code requirements for structural concrete.*

AISC 360-16. (2016). *Specification for structural steel buildings.*

ASCE 10-15. (2015). *Design of latticed steel transmission structures.*

ASCE American Society of Civil Engineers. (2007). *Manual and reports on Engineering practice No 113 Substation structure design guide.*

ASCE No 74. (2020). *Guidelines for electrical transmission line structural loading .* Frank Agnew, P.E.

Checa, L. M. (2004). *Líneas de transporte de energía.* Alfaomega.

CIGRÉ 537. (2013). *Guide for transformer fire safety practices.*

CIGRÉ Study committee (Subestations)115. (2002). *The mechanical effects of short - circuit curents in open air substations.*

Das, B. M. (2015). *Fundamentos de ingeniería geotéccnia.*

Escobar, J. C. (2014). *Diseño de Subestaciones eléctricas.* Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.

Escobar, J. C. (2014). *Diseño de Subestaciones Eléctricas.* Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de ingeniería.

HMV Ingenieros Ltda. (2021). *Subestaciones de alta y extralata tensión.*

HMV Ingenieros Ltda. (2021). *Subestaciones de alta y extralata tensión.*

IEC 60099-4. (2014). *Surge arresters - Part 4: Metal - oxide surge arresters without gaps for a.c. systems.*

IEC 60099-5. (2018). *Surge arresters - Part 5: Selection and application recommendations.*

IEC 60865-1. (2013). *Corrientes de cortocircuito-cálculo de efectos parte 1 definiciones y método de cálculo.*

IEC 60909-0. (2002). *Corrientes de cortocircuito en sistemas trifásicos de corriente altena- Parte 0 cálculos de corrientes.*

IEC 61869-2. (2012). *Instrument transformers - Part 2: Additional requirements for current transformers.*

IEC 61869-3. (2011). *Instrument transformers-Part 3 Additional requirements for inductive voltage transformers.*

IEC 61936-1. (2021). *Power installations exceeding 1kV AC and 1.5kV DC.*

IEC62271-102. (2021). *Aparamenta de alta tensión parte 102: Seccionadores y seccionadores de puesta a tierra de corriente alterna.*

IEEE 693. (2018). *Recommended Practice for Seismic Design of Substations.*

Interconexión Eléctrica S.A E.S.P. - ISA. (2022). *Especificacion técnica GE-ESPE-CIVIL-S-01-D0301.*

Karina Atencio, I. P. (2008). *Elementos de diseño de subestaciones de alta y extra alta tensión.* Cartagena.

Martínez, M. A. (2011). *Análisis y diseño de estructuras metálicas mayores para subestaciones Eléctricas.* Nezahualcóyotl, Estado de México: Universidad Nacional Autónoma de México.

NFPA 5000. (2024). *Building construction and safety code.*

NSR-10 Asociación Colombiana de ingeniería sísmica. (2017). *Reglamento Colombiano de construcción sismo resistente NSR-10.* Bogotá.

NSR-10 Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2017). *Reglamento Colombiano de construcción Sismo Resistente NSR-10.* Bogotá.

NTC 2050. (1998). *Norma NTC 2050 Código Eléctrico Colombiano.*

RETIE. (2024). *Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas.*

Yepes, E. P. (2012). *Dimensionamiento de subestaciones de alta tensión.* Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali.