



**Caso estudio: Análisis de pórticos en celosía de subestaciones eléctricas de alta tensión
incluyendo comparativo entre análisis sísmicos empleando métodos elásticos estáticos y
elásticos dinámicos.**

Veronica Gómez Ortiz
Santiago Agudelo Buitrago

Monografía presentada para optar al título de Especialistas en Análisis y Diseño de Estructuras

Asesor
Cristian Camilo Londoño Piedrahita, Especialista (Esp) en Análisis y Diseño de Estructuras

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Especialización en Análisis y Diseño de Estructuras
Medellín, Antioquia, Colombia
2023

Cita

(Gómez Ortiz & Agudelo Buitrago, 2023)

Referencia

Estilo APA 7 (2020)

Gómez Ortiz, V., & Agudelo Buitrago, S. (2023). *Caso estudio: Análisis de pórticos en celosía de subestaciones eléctricas de alta tensión incluyendo comparativo entre análisis sísmicos empleando métodos elásticos estáticos y elásticos dinámicos*. [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.



Especialización en Análisis y Diseño de Estructuras, Cohorte X.



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Tabla de contenido

Resumen	9
Abstract	10
Introducción	11
1. Estado del arte.....	13
2. Justificación	19
3. Objetivos	21
3.1. Objetivo general	21
3.2. Objetivos específicos.....	21
4. Marco teórico	22
4.1. Métodos elásticos estáticos (fuerza horizontal equivalente)	23
4.2. Métodos dinámicos elásticos (análisis modal espectral).....	23
4.3. Cálculo de cargas de conexionado	24
4.4. Cálculo de cargas de viento.....	25
4.4.1. Presión básica de viento	25
4.4.2. Fuerza de viento	25
4.5. Factor de pandeo	26
5. Metodología	27
5.1. Definición de parámetros sísmicos	27
5.2. Definición de cargas.....	29
5.2.1 Peso propio.....	31
5.2.2 Flechas y tensiones mecánicas de conductores.....	35
5.2.3 Cargas de viento.....	37
5.2.4 Cargas de montaje y mantenimiento (ML)	38
5.2.5 Cargas de sismo	38

5.3. Combinaciones de carga.....	39
5.4. Modelo estructural.....	41
5.5 Análisis de pandeo	44
6. Resultados.....	45
6.1. Fuerza horizontal equivalente (FHE)	45
6.2. Análisis modal espectral.....	46
6.3. Comparación de resultados de análisis sísmicos.....	49
6.4. Análisis de pandeo	52
7. Conclusiones.....	60
Referencias	63

Lista de tablas

Tabla 1 Resumen comparativo de las metodologías de análisis empleadas en la literatura consultada.....	17
Tabla 2 Valores del Cf según tabla 2-4 de la ASCE 74 (ASCE, 2020).	26
Tabla 3 Parámetros sísmicos de diseño.....	28
Tabla 4 Identificación de elementos de Columna C1.....	32
Tabla 5 Identificación de elementos de Viga V1	33
Tabla 6 Cargas sobre conductores.....	36
Tabla 7 Parámetros de viento	37
Tabla 8 Combinaciones de carga últimas.....	40
Tabla 9 Cortante sísmico estático en x, y.....	45
Tabla 10 Fuerzas máximas y capacidad por tipo de elemento - Método FHE.....	45
Tabla 11 Fuerzas máximas y capacidad por tipo de elemento para combinaciones de carga sísmicas -Método FHE	46
Tabla 12 Periodos, frecuencias y participación de la masa modal	46
Tabla 13 Cortante sísmico dinámico en x, y	48
Tabla 14 Factor de ajuste del cortante en la base en dirección x, y	48
Tabla 15 Cortante sísmico dinámico ajustado en x, y.....	48
Tabla 16 Fuerzas máximas y capacidad por tipo de elemento - Método análisis modal espectral	49
Tabla 17 Fuerzas máximas y capacidad por tipo de elemento para combinaciones de carga sísmicas - Método análisis modal espectral	49
Tabla 18 Comparativo de fuerzas máximas de compresión por tipo de elemento para combinaciones de carga sísmicas.....	50
Tabla 19 Comparativo de fuerzas máximas de tracción por tipo de elemento para combinaciones de carga sísmicas	50
Tabla 20 Factores de pandeo para el caso de carga de viento.....	52

Tabla 21 Factores de pandeo para el caso de carga de cortocircuito54

Tabla 22 Factores de pandeo para el caso de carga de sismo.....57

Lista de figuras

Figura 1 Modos de vibración de torre de telecomunicaciones y sus períodos de oscilación. (Martín & Elena, 2012)	15
Figura 2 Espectro elástico de diseño	29
Figura 3 Disposición física nueva bahía	30
Figura 4 Disposición física de pórticos de llegada de línea	31
Figura 5 Identificación elementos pórtico (Columna C1 y Viga V1)	34
Figura 6 Cargas actuantes sobre el pórtico debido a conductores	36
Figura 7 Geometría del pórtico ejemplo mediante PLS-Tower	41
Figura 8 Aplicación de fuerzas sísmicas en pórtico ejemplo mediante PLS-Tower [N]	42
Figura 9 Geometría del pórtico ejemplo mediante SAP2000	43
Figura 10 Diagrama de incrementos de las solicitaciones sísmicas obtenidos del análisis modal espectral respecto a FHE	51
Figura 11 Modos de pandeo y fuerzas axiales en los elementos para el caso de carga de viento	52
Figura 12 Modos de pandeo y fuerzas axiales en los elementos para el caso de cortocircuito	55
Figura 13 Modos de pandeo y fuerzas axiales en los elementos para el caso de sismo.....	57

Siglas, acrónimos y abreviaturas

AIS	Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica
ASCE	American Society of Civil Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
CREG	Comisión de Regulación de Energía, Gas y Combustibles
CSI	Computers and Structures, Inc.
Esp.	Especialista
FHE	Fuerza Horizontal equivalente
g	Gravedad
h	Hora
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
kV	Kilovoltio
kg	Kilogramos
kN	Kilonewton
km	Kilometro
NSR-10	Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente
msnm	Metros sobre el nivel del mar
m	Metro
PLS	Power Line Systems Inc
STN	Sistema de Transmisión Nacional
s	Segundos

Resumen

Las subestaciones eléctricas son indispensables dada la dependencia humana de los sistemas alimentados por energía eléctrica. El adecuado funcionamiento de una subestación depende, entre otras cosas, de un correcto análisis y diseño que garantice la competencia de todas las estructuras requeridas al interior de esta. Por medio de un caso estudio, se realizó el análisis estructural de un pórtico en celosía parte de una subestación eléctrica de alta tensión para determinar las solicitaciones gobernantes para el diseño de sus elementos. Se consideraron las cargas del peso propio, viento, sismo, tensiones mecánicas de los conductores y cortocircuito, además de determinar los efectos de pandeo generados por cada una de dichas cargas. Se emplearon dos metodologías de análisis para determinar las fuerzas sísmicas, el método elástico estático de la fuerza horizontal equivalente y el método dinámico elástico modal espectral.

Luego de realizar los respectivos análisis, se identificó que las combinaciones de carga gobernantes no incluían componentes sísmicos, sino más bien, las cargas de tensión mecánica, viento y cortocircuito. Sin embargo, se compararon las cargas máximas obtenidas para las combinaciones con componentes sísmicos y se encontró que los resultados obtenidos por medio del análisis modal espectral retornaron resultados hasta un 30% mayores a los calculados con el método de la fuerza horizontal equivalente.

Dicho lo anterior, se pudo establecer que, para este pórtico, las cargas sísmicas no gobiernan el diseño de los elementos, pero en caso de que se trate de un pórtico donde si gobierne el sismo, se recomienda emplear análisis dinámicos como el análisis modal espectral y se prescribe indispensable en pórticos donde se deban instalar equipos electromecánicos, que requieran estructuras de soporte rígidas.

Palabras clave: Pórticos en celosía, subestaciones eléctricas, fuerza horizontal equivalente, análisis modal espectral, pandeo.

Abstract

Electric substations are indispensable given the human dependence on electric power systems. The proper operation of a substation depends, among other things, on a correct analysis and design that guarantees the competence of all the structures required inside the substation. By means of a case study, the structural analysis of a lattice frame, part of a high voltage electrical substation, was carried out to determine the governing internal forces for the design of its elements. Self-weight, wind, earthquake, conductor mechanical stresses and short-circuit loads were considered, in addition to determining the buckling effects generated by each of these loads. Two analysis methodologies were used to determine the seismic forces, the static elastic method of the equivalent horizontal force and the dynamic elastic modal spectral method.

After performing the respective analyses, it was identified that the governing load combinations did not include seismic components, but rather, mechanical tension, wind and short-circuit loads. However, the maximum loads obtained for the combinations with seismic components were compared and it was found that the results obtained by means of the spectral modal analysis give results up to 30% higher than those calculated with the equivalent horizontal force method.

It was possible to establish that, for this latticed frame, seismic loads do not govern the design of the elements, but in the case of a latticed frame where the seismic forces does govern, the use of dynamic analyses such as the spectral modal analysis is recommended and is indispensable in frames where electromechanical equipment is to be installed, which require rigid support structures.

Keywords: Lattice frames, electrical substations, equivalent horizontal force, spectral modal analysis, buckling.

Introducción

Las subestaciones eléctricas son planificadas, diseñadas y materializadas por grupos interdisciplinarios de profesionales entre los cuales se encuentran los ingenieros civiles. Para llevar a cabo los diseños estructurales que se requieren en el desarrollo de los proyectos asociados a subestaciones, es imprescindible conocer los principios fundamentales que describen el comportamiento de cada estructura, con el fin de establecer los criterios y metodologías que orientarán el análisis y diseño de estas. Es necesario mencionar que dichos procedimientos siempre se deberán ejecutar considerando los requerimientos técnicos descritos en la normatividad aplicable en cada caso.

Es una consecuencia de la particularidad de los proyectos que pertenecen al sector de energía, que las condiciones para el análisis y diseño de cada una de las estructuras requiera del conocimiento de aspectos técnicos específicos asociados a la disciplina eléctrica y de cómo interactúan estas variables junto a condiciones eventuales como viento o sismo.

Así, es necesario llevar a cabo un correcto análisis de la estructura que conduzca a un diseño adecuado en respuesta al conjunto de necesidades específicas de cada proyecto.

Algunas de las dificultades que se presentan en el diseño de estructuras en el contexto de una subestación eléctrica es que la normatividad de diseño estructural que rige en el país (Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10), fue concebida principalmente para el diseño de edificaciones. Debido a eso, se presentan requerimientos en la norma que deben ser analizados detalladamente y, donde la experiencia y criterio del ingeniero es determinante.

Ciertamente, la modelación de este tipo de estructuras no convencionales y sus solicitaciones eventuales puede tener implícito cierto grado de incertidumbre en sus resultados, e incluso, derivar en interpretaciones de los parámetros mínimos, pues el reglamento colombiano NSR-10, no es lo suficientemente detallado respecto a los procedimientos y parámetros mínimos aplicables a este tipo de estructuras.

Las solicitaciones sísmicas por si solas son lo suficientemente complejas de representar en estructuras tradicionales como las edificaciones; más aún en este tipo de estructuras de uso industrial dotado de características morfológicas singulares. En el medio de la consultoría generalmente se simplifica el análisis sísmico empleando métodos elásticos como la fuerza

horizontal equivalente (FHE, considerado como un método conservador) para enfatizarse en los efectos de las demás solicitaciones eventuales, como las solicitaciones por viento o las cargas dinámicas debidas a conductores eléctricos.

En efecto, es de suma importancia comprender y modelar adecuadamente este tipo de cargas en las estructuras de interés, más aún si se considera que, en algunos casos, estas solicitaciones gobiernan el diseño estructural; sin embargo, debería considerarse simultáneamente las variables dinámicas de la estructura que no están presentes en la FHE. La contribución de los modos superiores, la rigidez y distribución de masa en altura son algunas de las diversas variables de gran relevancia para efectos de sismorresistencia, toda vez que el principal objetivo del modelo estructural sea capturar con la mayor exactitud posible los aspectos más importantes del comportamiento real de la estructura, especialmente en estas en las cuales el umbral de daño es tan relevante debido al grupo de uso al que pertenece y su carácter imprescindible.

Teniendo en cuenta lo anteriormente descrito, cobra relevancia emplear análisis sísmicos “*más refinados*” siempre que el riesgo sísmico este presente particularmente en estas estructuras cuyas propiedades dinámicas distan mucho del caso de las edificaciones y, por lo tanto, la formulación prescriptiva de la FHE no sería adecuada. Indiscutiblemente, los métodos de análisis elásticos dinámicos como el análisis modal espectral son apropiados para replicar adecuadamente la respuesta de una estructura considerando sus variables dinámicas.

En síntesis, se plantea contrastar los resultados obtenidos al ejecutar sobre la misma estructura el método de la FHE y el análisis modal espectral, considerando que las condiciones y solicitaciones sean las mismas, salvo el componente sísmico, con el objetivo de determinar la relevancia de emplear metodologías de análisis refinadas o si bien, en contraparte, un método simplificado es suficiente para describir adecuadamente el comportamiento sísmico de la estructura. Del mismo comparativo, se busca, además, determinar la importancia relativa que tienen las cargas sísmicas respecto a las demás cargas del sistema y validar cuales son las solicitaciones gobernantes en este tipo de estructuras.

1. Estado del arte

Partiendo de la normativa nacional para el análisis y diseño de estructuras, la NSR-10, se establece en el numeral A.1.2.4 – Excepciones, que el reglamento no se aplica al diseño y construcción de estructuras especiales como las torres de transmisión. No se hace mención explícita de las estructuras pertenecientes a las subestaciones eléctricas, queda a criterio del ingeniero concluir si la categoría de torres de transmisión abarca este tipo de estructuras. Por otro lado, las indicaciones que presenta la norma para el diseño sismo resistente de las estructuras que se salen del alcance del reglamento es presentada en el apéndice A-1, el cual no es de carácter obligatorio.

Complementariamente al apéndice A-1, se puede consultar el documento AIS-180 – Requisitos de diseño sismo resistente para algunas estructuras diferentes a edificaciones (AIS, 2013). Las recomendaciones contempladas en este documento aplican para torres en celosía, nuevamente, depende del criterio del ingeniero considerar asimilables las estructuras de las subestaciones eléctricas.

Con base en la guía práctica de diseño de subestaciones de alta y extra alta tensión elaborada por HMV Ingenieros Ltda. (2021), es posible identificar las metodologías de análisis sísmico-aplicables al diseño de estructuras metálicas y de concreto para subestaciones eléctricas. De acuerdo con la referencia, se puede utilizar el método de la fuerza horizontal equivalente que establece que las fuerzas sísmicas son proporcionales al peso de la estructura. Este documento propone que se puede emplear el método dinámico modal espectral como un método más refinado de análisis para el cálculo de la fuerza sísmica, indicando que su uso se ha vuelto más frecuente en la práctica de diseño.

En cuanto a estudios realizados acerca de análisis sísmicos en estructuras en celosía, Martín & Elena (2012), realizaron un trabajo comparativo de los valores de las fuerzas internas en los elementos estructurales en torres de telecomunicaciones en celosía con la aplicación del método de análisis modal espectral de acuerdo con la norma cubana sismorresistente y el método de análisis dinámico lineal de superposición modal time history. La justificación del trabajo realizado parte de la premisa de que las torres en celosía no presentan el mismo comportamiento dinámico que los edificios frente a las cargas de sismo y, además, las particularidades de estas estructuras normalmente no se abordan en las normas y códigos de diseño sísmico ni se menciona o proponen diferentes metodologías para realizar el análisis y diseño. Destacan, además, que se empleó un

análisis lineal sobre un análisis no lineal debido a que verificaron el comportamiento de la estructura por los dos métodos y los resultados coincidieron para ambos análisis, confirmando de esta manera el comportamiento lineal de la estructura.

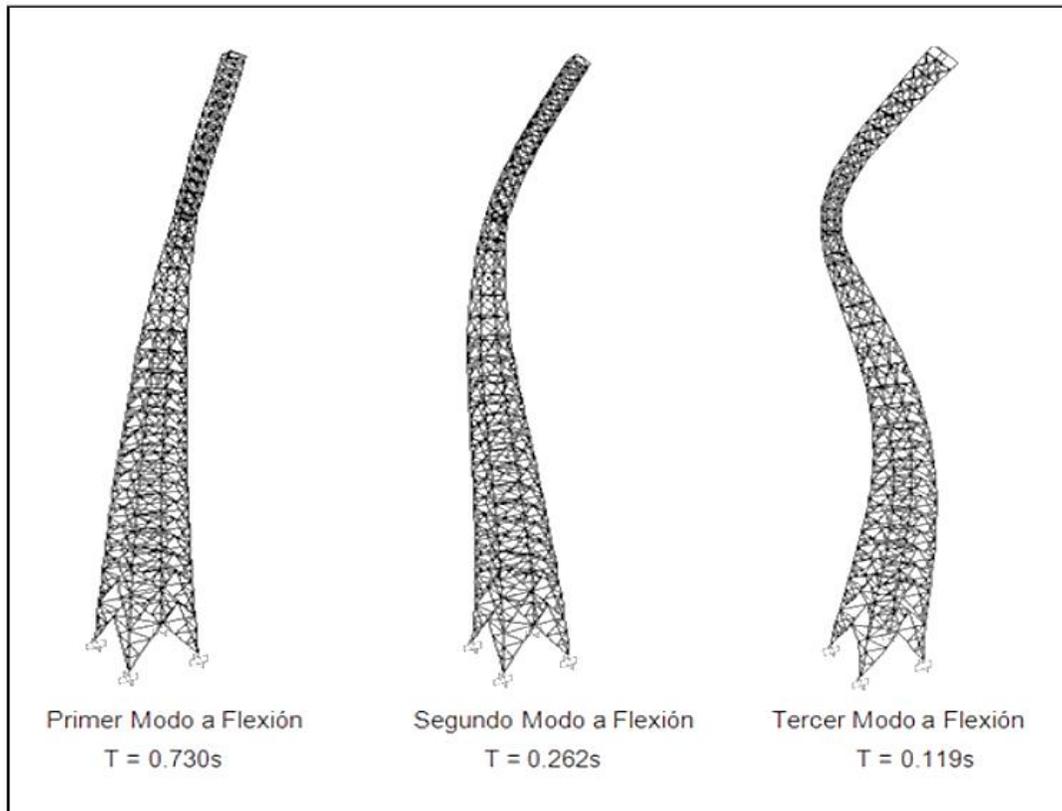
Para el desarrollo del trabajo los autores realizaron modelos de las estructuras objeto del análisis a través del programa de análisis estructural basado en elementos finitos SAP 2000 (CSI, 2007). Las torres fueron modeladas como una armadura espacial y las consideraciones para el proceso de modelación para cada análisis dinámico quedaron consignadas en el documento. Los resultados que fueron comparados entre los métodos analizados fueron los de fuerza axial máxima en los elementos principales de la torre, entendiendo que los elementos que conforman las estructuras en celosía están sometidos principalmente a esfuerzos de compresión y tracción axial. Las fuerzas internas de momento y cortante tienen magnitudes significativamente menores por lo que fueron despreciadas en el análisis de los resultados.

El estudio de comparación entre los métodos del tiempo-historia y la norma sismorresistente cubana, arrojó resultados diferentes en cuanto a los valores máximos de las fuerzas internas en los elementos; los resultados obtenidos por el método del tiempo-historia fueron mayores en todos los casos de estudio. Los incrementos relativos de las fuerzas internas con respecto al método de análisis modal planteado en la norma sismorresistente cubana son del orden del 43% al 78% en los elementos de la torre tipo 1 y del 57% al 181% en la torre tipo 2.

En la **Figura 1** se presenta la representación gráfica de los resultados de los modos de vibración y los periodos de oscilación para uno de los tipos de torre analizados.

Figura 1

Modos de vibración de torre de telecomunicaciones y sus períodos de oscilación. (Martín & Elena, 2012)



Rojas (2017), en su tesis de maestría, llevó a cabo un análisis para determinar qué eventos son determinantes en el diseño de torres de líneas de transmisión eléctrica en Colombia para un nivel de tensión de 110 kV, ante solicitaciones sísmicas, eólicas y de rotura de conductores. Para esto, diseña las torres por métodos convencionales y realiza el análisis ante solicitaciones sísmicas empleando el software PLS-TOWER considerando los parámetros y metodologías establecidas en la NSR-10 (AIS, 2010). Se dejó claro en el documento que actualmente las normativas técnicas colombianas no se encuentran completamente desarrolladas para el diseño de estructuras pertenecientes al sector eléctrico, por lo que el análisis y diseño está abierto a criterio del ingeniero diseñador.

El autor (Mara & Behncke, 2015) siguió la recomendación de la ASCE 74 para el diseño de estructuras de transmisión. Dicho apartado describe que estas estructuras no necesitan ser diseñadas para fuerzas producidas por sismo, debido a que, a lo largo de los años, éstas han

mostrado un buen desempeño ante estas cargas respecto a otro tipo de cargas, tales como las de viento o por la rotura de conductores. A pesar de lo anterior, una de las torres analizadas en el estudio presentaba unas dimensiones y peso tal que las solicitaciones sísmicas fueron mucho mayores que las obtenidas por las demás solicitaciones, por lo cual, para este caso particular, el autor indica que se deben realizar estudios más detallados para determinar la confiabilidad real de la estructura. Además, el estudio se limitó al diseño de torres a 115 kV. Se debería efectuar el mismo análisis para torres en niveles de tensión superiores como 230 kV y 500 kV, teniendo en cuenta que, para mayores niveles de tensión, las estructuras aumentan en altura y peso ya que se diseñan para mayores solicitaciones.

Por otro lado, Zeynalian et al. (2018), desarrollaron una investigación acerca del comportamiento de las estructuras de celosía de acero formado en frío utilizadas en subestaciones eléctricas, incluyendo la estimación de los factores de respuesta sísmica (R). Para desarrollar el objetivo de la investigación se realizaron estudios experimentales y análisis por medio de modelos de elementos finitos a una estructura de soporte de un transformador de corriente. Para el análisis de elementos finitos, fue empleado el software ANSYS 12.0.1 (ANSYS Inc., 2009) para modelar la geometría y el comportamiento no lineal del material de la estructura de soporte en celosía. Para verificar la eficacia y precisión del modelo se compararon sus resultados con los ensayos experimentales y se encontró convergencia razonable entre resultados. Para el análisis sísmico se realizó un análisis estático no lineal (*push-over*).

La investigación elaborada por Zeynalian et al. (2018), es de particular interés ya que permite capturar información acerca de los procesos de modelación de este tipo de estructuras, los softwares utilizados y las metodologías de análisis sísmico empeladas, permitiendo evaluar el grado de precisión de estos procedimientos al presentar comparación de resultados con los obtenidos por métodos experimentales.

En muchos casos, los equipos de las subestaciones necesitan ser instalados sobre estructuras de soporte de acero, entre los cuales se encuentran los pórticos en celosía. La instalación de equipos sobre los pórticos representa un peso adicional que puede resultar en un incremento de la vulnerabilidad sísmica de la estructura, es en estos casos donde los análisis sísmicos cobran especial relevancia. Por este motivo, investigaciones como la desarrollada por Sheng et al. (2017), buscan analizar la respuesta sísmica y los modos de falla del sistema estructura de soporte-equipos. Para tal fin, se elaboró un modelo analítico del sistema y se verificó el nivel de precisión de los

resultados mediante pruebas a escala real. Para determinar los factores que gobiernan la respuesta ante sollicitaciones sísmicas, el sistema soporte-equipo fue analizado a través de análisis tiempo-historia y análisis modal.

De la información recuperada de los textos consultados, se identificó que tanto a nivel investigativo como normativo se presenta ausencia de información y estudios sobre análisis sísmicos orientados a estructuras no convencionales como los pórticos en celosía presentes en las subestaciones eléctricas de alta tensión, específicamente donde se compare los resultados obtenidos a través de los diferentes métodos de análisis sísmicos como los métodos puntualizados en este documento.

Se presenta en la *Tabla 1* el resumen de la información recopilada en la revisión bibliográfica realizada.

Tabla 1

Resumen comparativo de las metodologías de análisis empleadas en la literatura consultada

Autor	Año	Tipo de análisis empleado (s)	Software
HMV ingenieros Ltda.	2021	Valida el uso del método de la FHE e indica que en casos específicos se puede emplear el método dinámico modal espectral como un método más refinado de análisis para el cálculo de la fuerza sísmica.	No recomienda software específico
Martín & Elena	2012	Compara la aplicación del método de análisis modal espectral con el método de análisis dinámico lineal de superposición modal time history.	SAP 2000
Rojas	2017	Métodos convencionales (FHE) considerando los parámetros y metodologías establecidas en la NSR-10 (AIS, 2010).	PLS-Tower
Zeynalian et al.	2018	Estudios experimentales y análisis estático no lineal (Push-over) por medio de modelos de elementos finitos a una estructura de soporte.	ANSYS 12.0.1

Autor	Año	Tipo de análisis empleado (s)	Software
Sheng et al.	2017	Modelo analítico del sistema soporte-equipos y verificación del nivel de precisión de los resultados mediante pruebas a escala real. Para determinar los factores que gobiernan la respuesta ante solicitaciones sísmicas, el sistema fue analizado a través de análisis tiempo-historia y análisis modal.	Software no especificado

2. Justificación

Las subestaciones eléctricas son estructuras que se clasifican en el grupo de uso 4 debido a su relevancia en cuanto a operación durante y después de un sismo dada la dependencia humana de los sistemas alimentados por energía eléctrica. El adecuado funcionamiento de una subestación eléctrica depende de un arreglo de múltiples elementos al interior de esta, especialmente, los equipos electromecánicos con sus respectivas estructuras de soporte. En este sentido, es fundamental garantizar la competencia de todas las estructuras requeridas, bien sean de soporte, servicios o interconexiones considerando tanto las condiciones permanentes del proyecto, como las solicitaciones eventuales, como un evento sísmico o un cortocircuito.

Particularmente, los pórticos de las subestaciones eléctricas son estructuras metálicas cuya función principal es soportar el tendido eléctrico que interconecta los demás componentes de la subestación para su condición de operación. Ocasionalmente, los pórticos pueden soportar en diferentes alturas algunos equipos electromecánicos, dependiendo del nivel de tensión y la configuración con la que se concibe el patio o subestación. En concreto, los pórticos son estructuras de gran relevancia para la operación de este tipo de proyectos.

Generalmente, cuando se busca predecir el comportamiento sísmico de los pórticos, el análisis estructural se realiza a partir de los métodos elásticos estáticos (Método de la fuerza horizontal equivalente FHE). En este, se considera la masa total de la estructura y los parámetros sísmicos de la zona de acuerdo con la normativa local (NSR-10 en Colombia). Por otra parte, es menos recurrente que se realicen análisis más “refinados”, como los que se pueden obtener considerando las variables dinámicas del sistema como la distribución de masa en altura, y la contribución de los modos superiores empleando métodos de análisis elásticos dinámicos (modal espectral, time history). Existen varias razones que explican esta generalidad: a) para algunos pórticos, dada su configuración específica y localización, predominan otras solicitaciones eventuales como aquellas debidas al conexionado de los conductores eléctricos, la presión de viento o una combinación de ambas, b) el enfoque de los códigos y normas de diseño sismorresistente, los cuales, en general, están enfocados en edificaciones.

Dicho esto, resulta bastante interesante y relevante comparar los resultados obtenidos en pórticos metálicos al ejecutar el análisis sismo resistente a través de ambas metodologías: FHE y

modal espectral. El principal objetivo de esta comparación no es otro que determinar cuál de estas metodologías describe mejor la respuesta sísmica de la estructura.

En síntesis, a partir de un caso ejemplo acompañado de una revisión de literatura, se buscará determinar si existen o no, diferencias considerables en los resultados del análisis estructural obtenidos por el método elástico estático (FHE) y el método elástico dinámico (Modal espectral). Se pretende, además, validar cuales son las sollicitaciones gobernantes en este tipo de estructuras y concluir si un análisis sísmico “*refinado*” es necesario para el diseño de los pórticos en celosía de subestaciones de alta tensión.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Comparar, mediante un caso estudio, los resultados obtenidos al analizar pórticos en celosía de subestaciones eléctricas de alta tensión empleando métodos elásticos estáticos (fuerza horizontal equivalente) respecto a los resultados derivados de los análisis elásticos dinámicos (modal espectral), con el fin de determinar la metodología que mejor describe la respuesta sísmica de la estructura y determinar las solicitaciones gobernantes.

3.2. Objetivos específicos

- Analizar el pórtico en celosía del caso estudio ante solicitaciones eventuales de viento, sismo y cortocircuito.
- Determinar si existen o no, diferencias considerables en los resultados de análisis sísmicos obtenidos por el método de la fuerza horizontal equivalente y el método de análisis dinámico modal espectral.
- Determinar cuáles son las solicitaciones gobernantes para el diseño de la estructura.
- Determinar los factores y modos de pandeo de la estructura para cada caso de carga.
- Validar la pertinencia de emplear análisis sísmicos “*refinados*” para el análisis y diseño.

4. Marco teórico

De acuerdo con la CREG (2008), el ciclo de energía eléctrica se compone principalmente de las siguientes actividades: Generación, transmisión, distribución y comercialización. Este conjunto de actividades conforma lo que se denomina la cadena de prestación del servicio de energía eléctrica.

La generación es el proceso de transformar otras fuentes de energía en energía eléctrica. En Colombia, las centrales de generación aprovechan principalmente energía cinética, potencial, térmica y solar. Por otra parte, la transmisión se refiere al transporte de energía eléctrica por el Sistema de Transmisión Nacional (STN) como se le conoce a las redes y equipos que conforman el sistema eléctrico que interconecta a la mayor parte del país y que opera con tensiones iguales o superiores a 220 kV. Asimismo, la distribución permite transportar la energía eléctrica hasta el domicilio del usuario final a través de redes y equipos que operan a tensiones menores a los 220 kV (CREG, 2008). En medio de estos procesos existen las subestaciones eléctricas, las cuales, a grandes rasgos, modifican los niveles de tensión de acuerdo con la necesidad de transporte.

Una subestación eléctrica es un conjunto de equipos utilizados para transferir el flujo de energía en un sistema de potencia, el cual garantiza la seguridad del sistema por medio de dispositivos automáticos de protección y redistribuye el flujo de energía a través de rutas alternas durante contingencias (Ministerio de Minas y Energía, 2008).

Los pórticos en celosía son estructuras modulares en perfiles angulares de acero cuya función es soportar el tendido eléctrico de la subestación conformado típicamente por conductores, aisladores, herrajes y accesorios. Los pórticos son conformados por vigas y columnas.

Mediante el análisis estructural, se busca que cada sección que conforma el pórtico tenga la resistencia y rigidez suficiente para soportar las respectivas solicitaciones (entre ellas las fuerzas sísmicas). Para ello, se evalúa las diferentes condiciones de falla de los elementos modelados, revisando que sus capacidades a compresión, tensión, cortante, ruptura y aplastamiento no sean superadas.

Para la verificación de las estructuras ante eventos sísmicos, normalmente se parte de los espectros sísmicos de diseño, elaborados de acuerdo con el nivel de amenaza sísmica de la zona donde se implantará la estructura para el porcentaje de amortiguamiento asociado al tipo de estructura (HMV Ingenieros Ltda., 2021). Es importante mencionar que el espectro elástico de

aceleraciones de diseño definido en NSR-10, está indicado para un coeficiente del 5% del amortiguamiento crítico, y la construcción del espectro solo depende de las variables asociadas al nivel de amenaza sísmica de la zona.

Para estimar las fuerzas de los elementos a partir de los espectros sísmicos, es posible emplear diferentes métodos de análisis estructural con diferentes características y condicionantes:

4.1. Métodos elásticos estáticos (fuerza horizontal equivalente)

Establece que las fuerzas sísmicas son proporcionales al peso de la estructura y la constante de proporcionalidad es el coeficiente sísmico de diseño, el cual es calculado en el espectro de diseño del sitio según el amortiguamiento y el periodo fundamental de vibración de la estructura (HVM Ingenieros Ltda., 2021).

En la práctica, generalmente cuando se modela un pórtico, se realiza el cálculo del peso asociado a la aferencia de cada nodo de la estructura usualmente con la ayuda de un software de modelación; PLS-Tower (Power Line Systems Inc., 2019), por ejemplo. Posteriormente, se afecta cada uno de los pesos por el coeficiente de aceleración espectral respectivo, con el cual se obtiene el valor de la carga sísmica a ser aplicada en cada uno de los nodos de la estructura. Se utiliza para el diseño de los elementos las combinaciones de carga últimas y para la verificación de las deformaciones las combinaciones de carga en servicio (HVM Ingenieros Ltda., 2021).

4.2. Métodos dinámicos elásticos (análisis modal espectral)

Este tipo de métodos considera las propiedades dinámicas de la estructura con el fin de reproducir de forma más precisa el comportamiento estructural real ante sollicitaciones dinámicas. Se considera la forma de vibrar de la estructura y la contribución de cada modo en la respuesta.

Dicho lo anterior, se puede deducir que generalmente los análisis dinámicos retornan aproximaciones más reales del comportamiento de las estructuras. La diferencia entre el método estático y el dinámico consiste en la forma de considerar el comportamiento inelástico probable y la forma en que se define la excitación sísmica de diseño (Presichi, 2007).

4.3. Cálculo de cargas de conexionado

De acuerdo con los tipos de conductores, sean rígidos o flexibles, las cargas de conexionado se clasifican en cargas de tensión estática y tensión electrodinámica. La tensión estática está asociada a la fuerza ejercida por efecto de la geometría definida en un conductor flexible sobre equipos y pórticos. Se estima con base al peso propio de conductores y cadena de aisladores (IEEE Power and Energy Society Std 1527, 2018).

La tensión electrodinámica es la fuerza dinámica generada en los conductores por efecto del flujo de corrientes de cortocircuito, cuyos efectos se evalúan entre conductores paralelos y es transmitida a la estructura en los puntos de conexión. Cabe mencionar que, al tratarse esta última de una carga dinámica, no se combina con cargas eventuales (sismo o viento) en las combinaciones de carga, si no que se analiza junto al peso propio del elemento y las cargas estáticas, es decir, propiedades intrínsecas del conductor. La guía de diseño de la American Society of Civil Engineers (ASCE MOP 113, 2008) indica como se deben combinar las cargas para el diseño de subestaciones, pues las normas nacionales no especifican directamente los parámetros y lineamientos para el diseño de estructuras no convencionales presentes en las subestaciones eléctricas.

Las cargas de cortocircuito son calculadas de acuerdo con lo prescrito en la norma de la International Electrotechnical Commission 60865 (IEC, 2018). La metodología propuesta permite calcular las fuerzas de atracción o repulsión entre conductores rígidos y flexibles paralelos, las cuales dependen de los espaciamientos entre conductores. Los conductores flexibles experimentan desplazamientos significativos en respuesta a la acción de estas fuerzas en comparación con los conductores rígidos.

El efecto de las conexiones genera cargas verticales, transversales y longitudinales sobre la estructura aplicadas en los puntos de conexión, dichas cargas se combinan con los factores de sobrecarga para considerar la probabilidad de ocurrencia de ciertos eventos y el impacto en la estructura, la cual se diseña para soportar de forma segura las acciones derivadas de las cargas en las conexiones y las demás cargas actuantes.

Para la estimación de las cargas de viento sobre los conductores, se trabaja con la metodología descrita por el manual de práctica No. 74 de la ASCE (ASCE, 2020) considerando la velocidad de viento y demás parámetros ambientales.

4.4. Cálculo de cargas de viento

Las cargas de viento sobre la estructura se estiman como el producto entre la presión de viento y el área expuesta, afectado por los coeficientes de forma y ráfaga respectivos.

La presión básica de viento se calcula de acuerdo con lo indicado en la norma ASCE 74 (ASCE, 2020)

Los parámetros para el cálculo de la presión de viento se presentan en el numeral 5.3.1 y los parámetros para la estimación de las fuerzas de viento se presentan en el numeral 5.3.2.

4.4.1. Presión básica de viento

Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$p' = Q \times K_z \times K_{zt} \times V_{3s}^2$$

Donde,

- Q : Constante numérica.
- V_{3s}^2 : Velocidad básica del viento.
- K_{zt} : Factor topográfico.
- K_z : Coeficiente de exposición de presión por velocidad, en función de la categoría de exposición.

4.4.2. Fuerza de viento

$$F = p' \times G \times C_f \times A_{x,y}$$

Donde,

- G : Factor de respuesta dinámica debida a ráfagas.
- C_f : Coeficiente de arrastre o forma; es función del coeficiente de solidez “ \emptyset ”:

$$\emptyset = \frac{A_s}{A_t}$$

- A_s : Área sólida en la cara expuesta al viento [m²].
- A_t : Área efectiva total de la cara expuesta al viento [m²].

- $A_{x,y}$: Área proyectada normal a la dirección del viento en x o y [m²].

Tabla 2

Valores del C_f según tabla 2-4 de la ASCE 74 (ASCE, 2020).

Coeficiente C_f para estructuras cuadradas en celosía	
$\emptyset < 0,025$	4,0
$0,025 < \emptyset < 0,44$	$4,1 - 5,2 \emptyset$
$0,45 < \emptyset < 0,69$	1,8
$0,7 < \emptyset < 1,00$	$1,3 + 0,7 \emptyset$

4.5. Factor de pandeo

El pandeo se produce cuando una estructura se vuelve inestable bajo una configuración de cargas axiales determinadas. El pandeo debe evaluarse para cada escenario de cargas (que se reflejan en las combinaciones de cargas de diseño) porque, a diferencia de las frecuencias naturales, los modos de pandeo dependen de un patrón de carga determinado, por lo cual, no existe un único conjunto de modos de pandeo para la estructura (CSI, 2017). Durante el análisis de pandeo no lineal-estático, la carga total se aplica en incrementos mientras la rigidez y la respuesta se evalúan en cada uno. En cada paso, la rigidez puede cambiar debido a la no linealidad geométrica proporcionada por los efectos P-Delta.

El resultado principal del análisis de pandeo es un conjunto de factores. Las cargas aplicadas se multiplican por estos factores de forma que la carga se escala hasta el punto en el cual se induce el pandeo.

También pueden considerarse los factores de pandeo como un factor de seguridad: si el factor de pandeo es mayor que uno, las cargas aplicadas deben ser mayores para provocar pandeo; si es menor que uno, las cargas se deben disminuir para evitar el pandeo. El factor de pandeo también puede ser negativo y esto indica que el pandeo se producirá si se invierten las cargas.

5. Metodología

El caso estudio que se va a analizar es una estructura real y construida que comprende un pórtico en celosía de llegada de línea conformado por ángulos metálicos de lados iguales. La estructura se requería para soportar los conductores de alta tensión que hacen parte de la ampliación de la subestación analizada.

Es de interés el análisis realizado a este pórtico dado que, generalmente, para subestaciones de este nivel de tensión, resultan ser estructuras bastante comunes e indispensables para el desarrollo del proyecto, aún más, considerando la creciente tendencia de estandarización en los diseños de este tipo de estructuras. Independientemente si se trata de una subestación nueva o la ampliación de una existente, los pórticos que allí se requieran, serán en todo caso estructuras en celosía.

Dicho lo anterior, con las dimensiones del pórtico, configuración estructural y condiciones de carga asignadas, resulta relevante analizar el comportamiento de dicha estructura con la metodología descrita.

5.1. Definición de parámetros sísmicos

El área donde se ubica la subestación corresponde a una zona de amenaza sísmica alta con una aceleración horizontal A_a de 0,25 g. La clasificación del perfil del suelo según la NSR-10 corresponde a un perfil tipo D según lo reportado por el estudio de suelos.

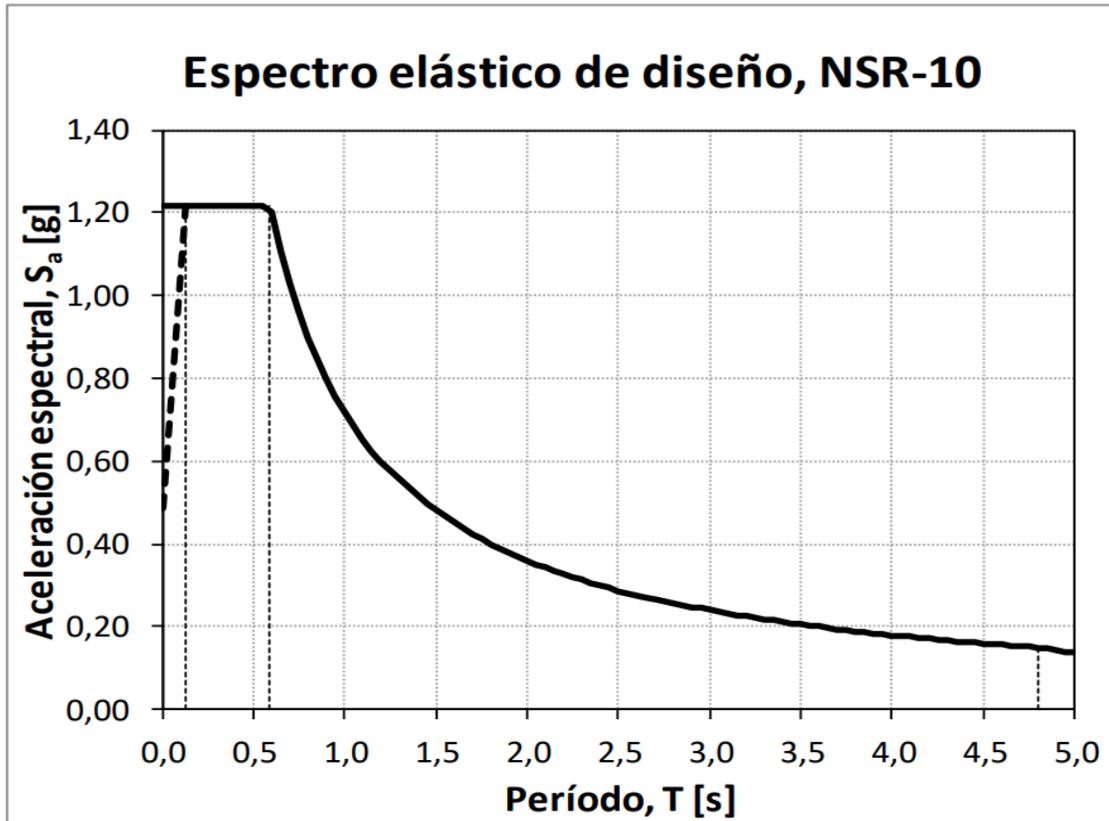
El coeficiente de importancia I para la estructura proyectada es 1,50, considerando grupo de uso IV.

Se resumen los parámetros sísmicos obtenidos de la NSR-10 para la ubicación del proyecto en la **Tabla 3**.

Tabla 3*Parámetros sísmicos de diseño*

Parámetro	Valor
Amenaza sísmica	Alta
A_a [g]	0,25
A_v [g]	0,20
I	1,50
Tipo de suelo	D
F_a	1,30
F_v	2,00
R_0	3,00
T_0 [s]	0,12
T_C [s]	0,59
T_L [s]	4,80

A partir de los parámetros sísmicos se construye el espectro elástico de diseño presentado en la **Figura 2**.

Figura 2*Espectro elástico de diseño*

5.2. Definición de cargas

La configuración electromecánica definida por el diseño eléctrico para la subestación determina las estructuras que se requieren en el proyecto y las variables de entrada para el análisis de cada una.

En la **Figura 3** se presenta la disposición de la bahía que hace parte de la ampliación de la subestación para la llegada de línea.

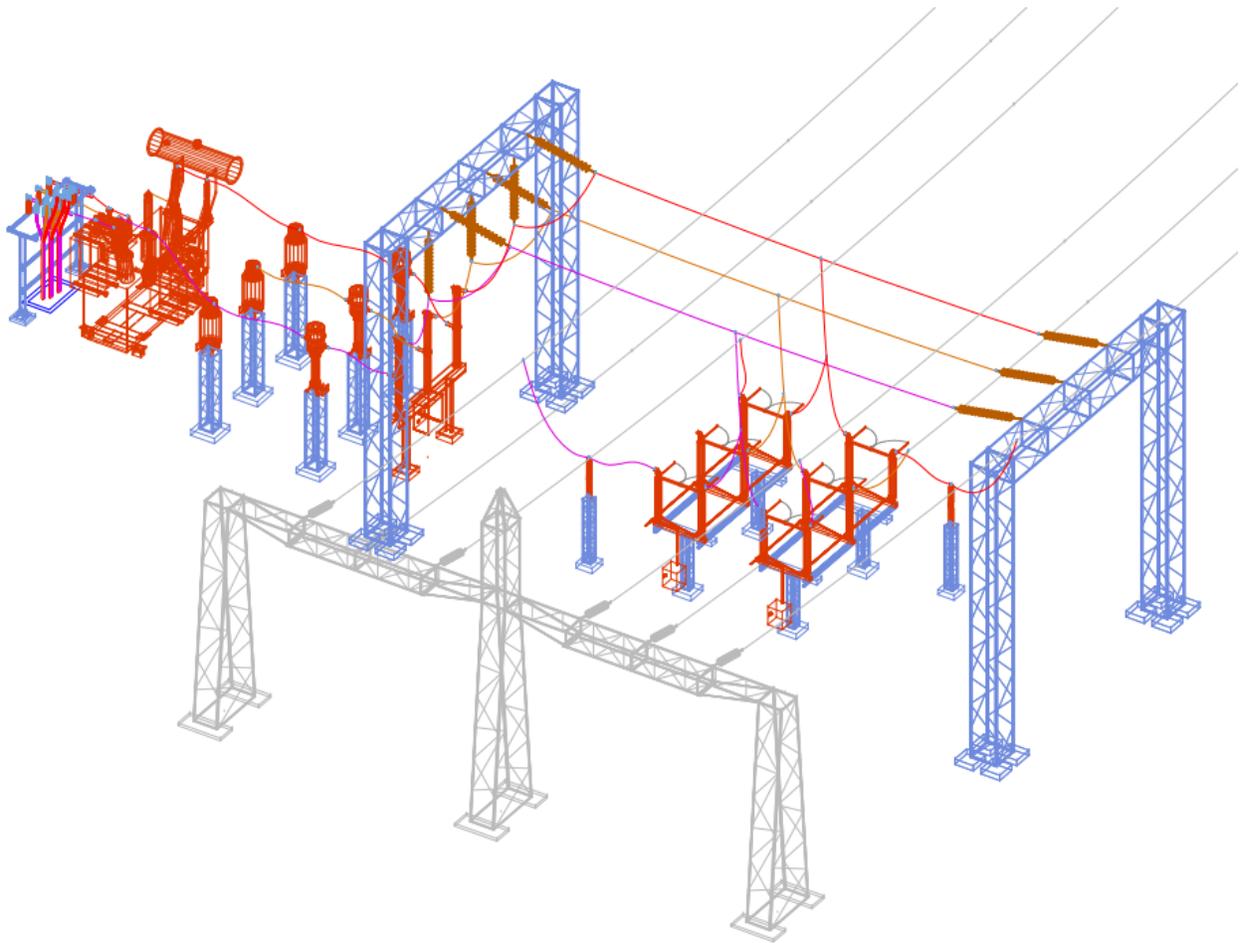
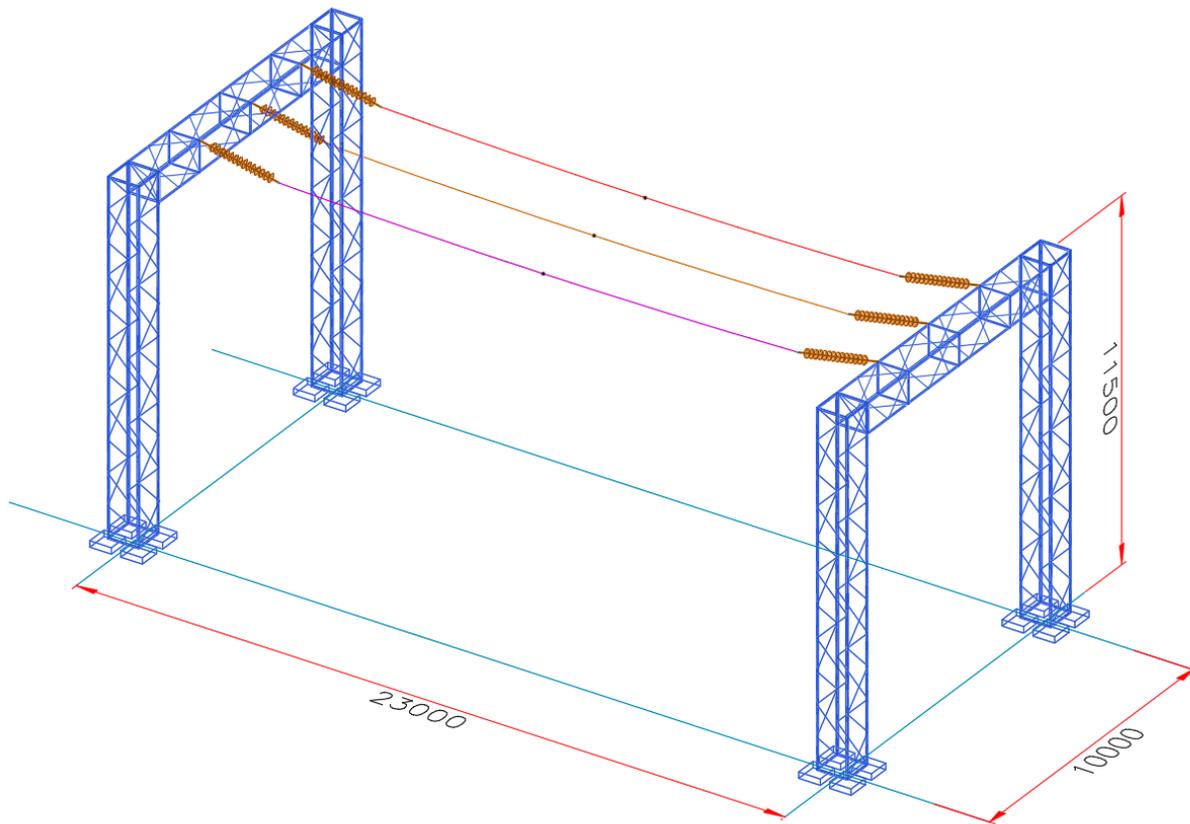
Figura 3*Disposición física nueva bahía*

Figura 4

Disposición física de pórticos de llegada de línea

**5.2.1 Peso propio**

Incluye el peso de la estructura (perfiles, platinas y tornillería).

Los dos pórticos presentados en la **Figura 4** tienen la misma configuración, cada estructura está constituida por dos columnas tipo C1 y una viga soportada en ellas, tipo V1.

Se presenta en la **Tabla 4** y **Tabla 5** los elementos constitutivos de la estructura, indicando la descripción del perfil angular requerido y la cantidad de tornillos necesarios para obtener la capacidad adecuada en la conexión. Se presenta en la **Figura 5** la identificación de los elementos del pórtico.

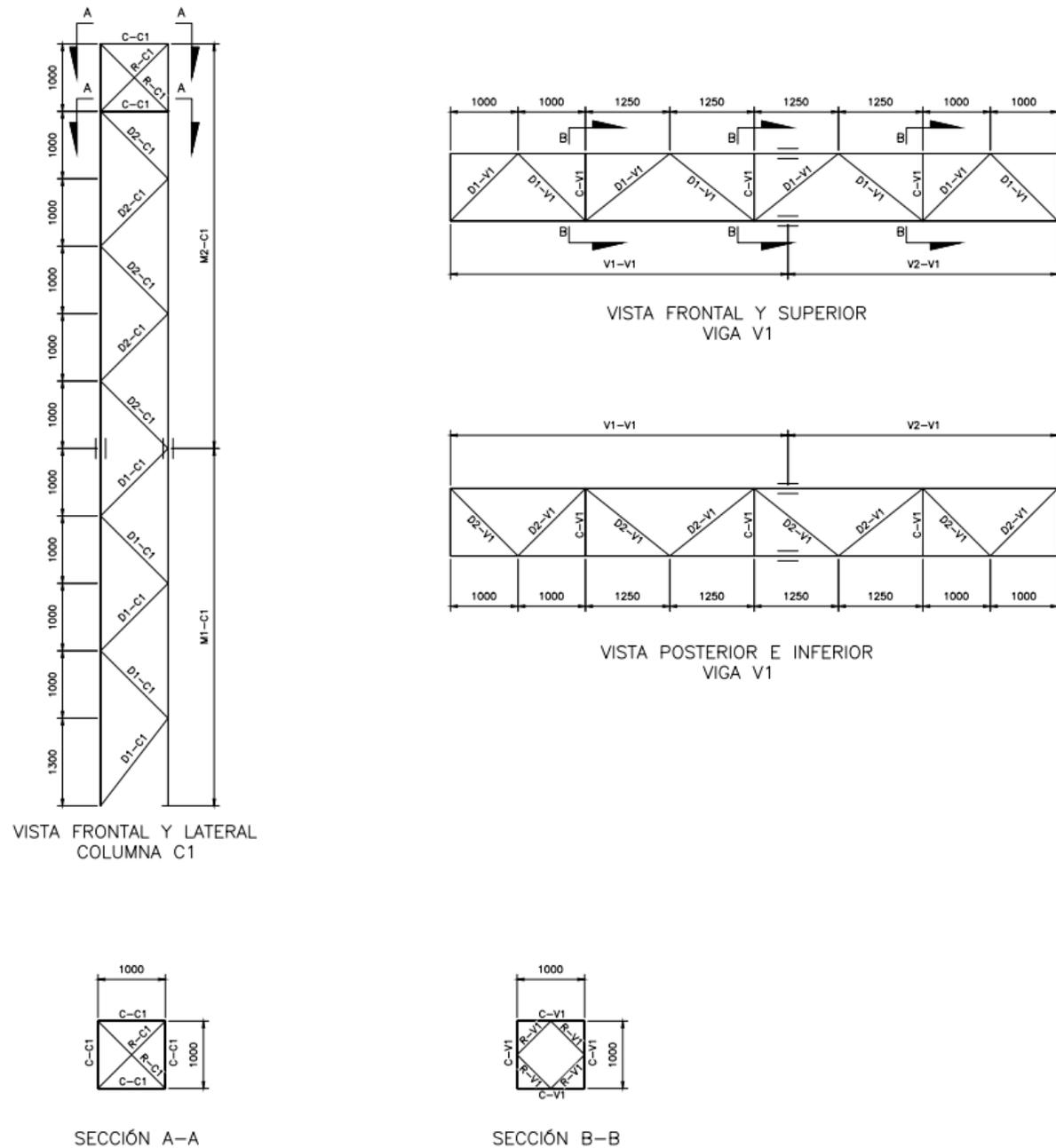
La calidad del acero de todos los perfiles es *ASTM A572 Gr 50*.

Tabla 4*Identificación de elementos de Columna C1*

Columna C1			
Tipo de elemento	Grupo	Descripción	Tornillería
Montante	M2-C1	L 101,6x6,4 mm (4"x1/4")	2 ϕ 5/8"
	M1-C1	L 101,6x6,4 mm (4"x1/4")	2 ϕ 5/8" 4 ϕ 5/8"
Diagonal	D1-C1	L 50,8x4,8 mm (2"x3/16")	1 ϕ 5/8"
	D2-C1	L 50,8x4,8 mm (2"x3/16")	1 ϕ 5/8"
Cierre	C-C1	L 50,8x4,8 mm (2"x3/16")	2 ϕ 5/8"
Riostra	R-C1	L 50,8x4,8 mm (2"x3/16")	1 ϕ 5/8"

Tabla 5*Identificación de elementos de Viga V1*

Viga V1			
Tipo de elemento	Grupo	Descripción	Tornillería
Cuerda	V1-V1	L 76,2x6,4 mm	2 ϕ 5/8"
		(3"x1/4")	2 ϕ 5/8"
	V2-V1	L 76,2x6,4 mm	2 ϕ 5/8"
		(3"x1/4")	2 ϕ 5/8"
Diagonal	D1-V1	L 50,8x4,8 mm (2"x3/16")	1 ϕ 5/8"
	D2-V1	L 50,8x50,8x4,8 mm (2"x3/16")	1 ϕ 5/8"
Cierre	C-V1	L 50,8x4,8 mm (2"x3/16")	2 ϕ 5/8"
Riostra	R-V1	L 50,8x4,8 mm (2"x3/16")	1 ϕ 5/8"

Figura 5*Identificación elementos pórtico (Columna C1 y Viga V1)*

El peso calculado para la estructura a partir de los elementos definidos es de **2583 kg**.

5.2.2 Flechas y tensiones mecánicas de conductores

Las necesidades específicas de la estructura en cuanto a cargas de conexión se derivan a partir del diseño eléctrico, pues se estiman con base en la disposición física, las alturas de conexión de conductores, el nivel de cortocircuito esperado, las variaciones de temperatura del conductor, las condiciones ambientales y meteorológicas del sitio, teniendo en cuenta las diferentes distancias de seguridad y considerando las situaciones más desfavorables.

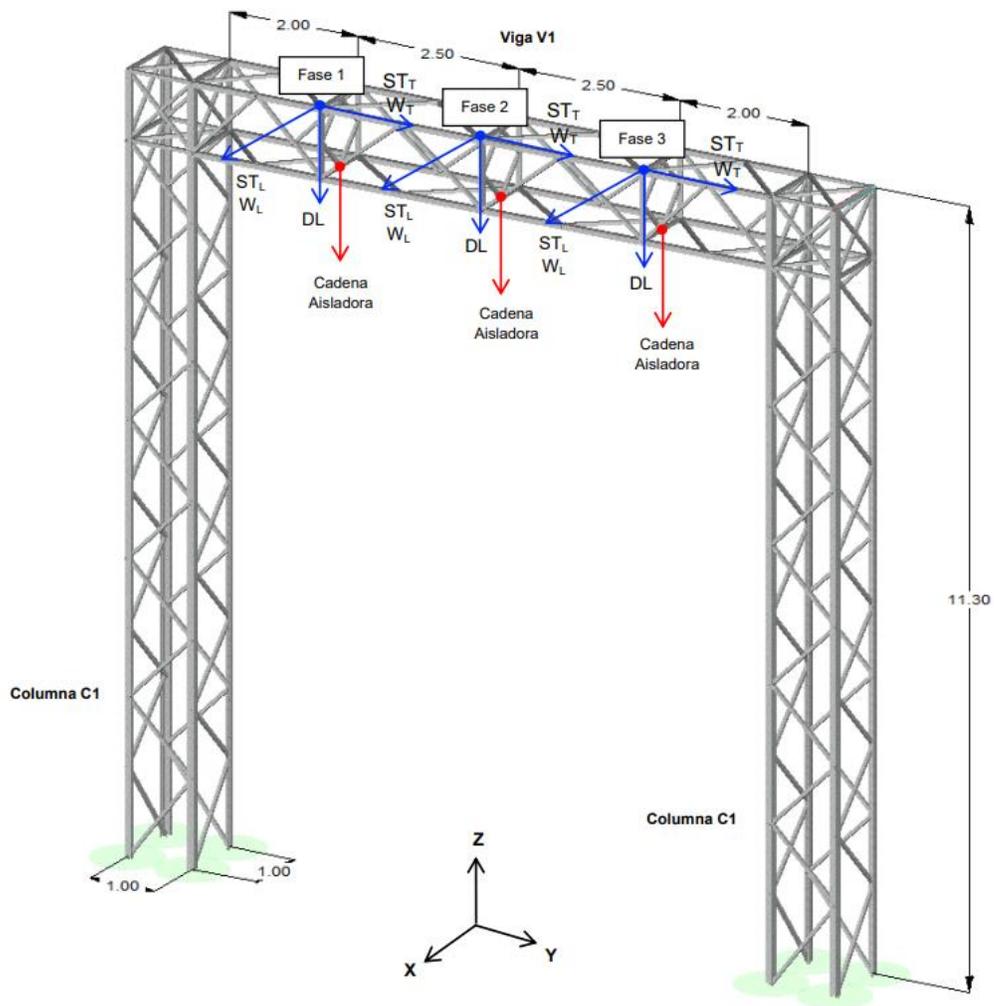
Se consideró una corriente de cortocircuito de diseño de 40 kA como corriente máxima de cortocircuito proyectada de la subestación.

Los conductores eléctricos dispuestos en este tipo de estructuras son conductores flexibles, que en esencia son cables aéreos que conforman un tendido de la subestación. Generalmente se clasifican en templa (Conductor superior en sentido de la llegada de línea de transmisión) o barraje (conductor inferior, conduce mayor energía que la templa y, generalmente, van en sentido perpendicular a la llegada de la línea)

Para el cálculo de cargas de conexión se consideró una flecha como porcentaje de la longitud del vano de 3% para las templas.

Las referencias para la estimación de las cargas de viento sobre los conductores, tensiones mecánicas y las cargas de cortocircuito se indican en el numeral 4.3.

Se presentan los resultados del cálculo de las tensiones mecánicas, de cortocircuito y cargas de viento en los conductores para la templa en la **Tabla 6**, la forma en que son aplicadas sobre los puntos de conexión sobre el pórtico se representa en la **Figura 6**.

Figura 6*Cargas actuantes sobre el pórtico debido a conductores***Tabla 6***Cargas sobre conductores*

Cargas de diseño [kN]						
Vertical	Estáticas		Viento		Cortocircuito	
DL	ST _L	ST _T	W _L	W _T	SC _L	SC _T
0,55	4,20	0,00	0,85	0,30	19,80	1,90

Donde,

DL: Carga vertical de conexión estática

ST_L: Carga longitudinal de conexión estática

ST_T: Carga transversal de conexión estática

W_L: Carga longitudinal adicional de conexión por efecto de viento

W_T: Carga transversal adicional de conexión por efecto de viento

SC_L: Carga longitudinal adicional de conexión por efecto de cortocircuito

SC_T: Carga transversal adicional de conexión por efecto de cortocircuito

5.2.3 Cargas de viento

En cuanto a las cargas de viento, se hace uso del modelo de viento predeterminado en el software PLS-TOWER, el cual está basado en lo descrito en la publicación ASCE 74.

Se presenta en la **Tabla 7** los parámetros para definir la presión básica de viento que se ingresa al programa.

Tabla 7

Parámetros de viento

Parámetros	Valor	
Categoría de exposición	C	
Altitud, [msnm]	963	
V _{3s}	[km/h]	100
	[m/s]	28
Q [kg/m ³]	0,531	
Z _h [m]	7.67	
Z _g [m]	274	
K _z	1,00	
K _{zt}	1,00	
α	9,5	
p' [kN/m ²]	0,410	

5.2.4 Cargas de montaje y mantenimiento (ML)

Como carga de montaje y mantenimiento se considera una fuerza de 1,50 kN actuando en la parte más alta de la estructura en cada conductor, simulando el peso de un hombre con sus herramientas y equipos de trabajo.

5.2.5 Cargas de sismo

Métodos elásticos estáticos (fuerza horizontal equivalente)

En lo referente a las cargas de sismo, PLS-Tower realiza el cálculo del peso asociado a la aferencia de cada nodo de la estructura, teniendo en cuenta los elementos redundantes no modelados. Las fuerzas sísmicas se determinan multiplicando cada uno de los pesos nodales por el coeficiente de aceleración espectral respectivo y distribuyéndolas en altura teniendo en cuenta el exponente de distribución 'k' relacionado con el periodo fundamental, obteniendo así, el valor de la carga sísmica nodal. Para esta estructura, de acuerdo con los valores de los periodos obtenidos más adelante, se determina que el valor de $k = 1$.

Métodos elásticos dinámicos (modal espectral)

Para este análisis sísmico se emplea el software SAP2000 v.24.0.0, el cual permite realizar el análisis modal espectral, considerando como excitación el espectro de respuesta presentado en la **Figura 2**, tomando el valor de $S_a = 2,5A_a F_a I$ desde $T = 0$.

Las fuerzas sísmicas son generadas por el programa de acuerdo con el espectro elástico de aceleraciones ingresado, con el cual se excita cada modo de vibración, se obtiene su respuesta y se combinan todos los resultados para finalmente obtener la respuesta de la estructura.

Se define en el software que la masa sísmica corresponde a la suma del peso propio de los elementos estructurales modelados.

De acuerdo con el numeral A.5.4.5 de la NSR-10, cuando se realiza un análisis dinámico de la estructura con el que se determinen las cargas sísmicas, es necesario ajustar los resultados de cortante basal con base en los obtenidos por el método de la fuerza horizontal equivalente.

Se requiere verificar que el valor del cortante dinámico total en la base sea mayor que cierto valor del cortante sísmico en la base calculado por el método de la FHE y que depende de la irregularidad de la estructura. Para la estructura analizada, el valor del cortante dinámico en la base no puede ser menor que el 90% del cortante calculado por FHE teniendo en cuenta la ausencia de redundancia de la estructura.

Si bien el pórtico se compone de dos columnas y estas de cuatro montantes cada una, la estructura presenta ausencia de redundancia, puesto que, en el instante donde se presente un evento sísmico, cada columna tendrá dos elementos sometidos a tracción y los dos restantes a compresión y cada par de elementos fallaran en el mismo instante. En base a esto, es factible aproximar el comportamiento de cada columna a una sección completa, solicitada a tracción en uno de sus extremos y a compresión en el otro.

5.3. Combinaciones de carga

Las cargas descritas en el numeral 5.2, se combinan para definir las condiciones de diseño más desfavorables posibles.

Las combinaciones de carga empleadas y los factores de sobrecarga utilizados para el análisis son los indicados en la guía de diseño de la ASCE 113. En la **Tabla 8**, se presentan las combinaciones de carga en condiciones últimas.

Se considera en las combinaciones de carga los efectos ortogonales para las cargas sísmicas.

Tabla 8*Combinaciones de carga últimas*

Combinaciones de carga últimas	
U1	1,2 DL + 1,1 ST + ML
U2	1,1 DL + 1,1 ST + SC
U3A	1,1 DL + 1,1 ST + 0,75 SC + 1,6 W _x
U3B	1,1 DL + 1,1 ST + 0,75 SC - 1,6 W _x
U4A	1,1 DL + 1,1 ST + 0,75 SC + 1,6 W _y
U4B	1,1 DL + 1,1 ST + 0,75 SC - 1,6 W _y
U5A	1,1 DL + 1,1 ST + E _x + 0,3 E _y + E _z
U5B	1,1 DL + 1,1 ST - E _x + 0,3 E _y + E _z
U5C	1,1 DL + 1,1 ST - E _x - 0,3 E _y + E _z
U5D	1,1 DL + 1,1 ST + E _x - 0,3 E _y + E _z
U5E	1,1 DL + 1,1 ST + E _x + 0,3 E _y - E _z
U5F	1,1 DL + 1,1 ST - E _x + 0,3 E _y - E _z
U5G	1,1 DL + 1,1 ST - E _x - 0,3 E _y - E _z
U5H	1,1 DL + 1,1 ST + E _x - 0,3 E _y - E _z
U6A	1,1 DL + 1,1 ST + 0,3 E _x + E _y + E _z
U6B	1,1 DL + 1,1 ST - 0,3 E _x + E _y + E _z
U6C	1,1 DL + 1,1 ST - 0,3 E _x - E _y + E _z
U6D	1,1 DL + 1,1 ST + 0,3 E _x - E _y + E _z
U6E	1,1 DL + 1,1 ST + 0,3 E _x + E _y - E _z
U6F	1,1 DL + 1,1 ST - 0,3 E _x + E _y - E _z
U6G	1,1 DL + 1,1 ST - 0,3 E _x - E _y - E _z
U6H	1,1 DL + 1,1 ST + 0,3 E _x - E _y - E _z
U7A	1,1 DL + 1,1 ST + SC

Para las combinaciones de carga se consideran las fuerzas sísmicas reducidas por el coeficiente de disipación de energía, $R = 3,0$, de acuerdo con los criterios contenidos en la norma ASCE 113, consistentes con el valor reportado por las recomendaciones del AIS 180 (AIS, 2013) para estructuras/torres en celosía.

La carga sísmica E_z se define como 2/3 de los valores horizontales del espectro de diseño según lo prescrito en A.2.8.1 de NSR-10 y se aplica en cada nodo de la estructura.

No es alcance del presente documento realizar análisis de estabilidad de la estructura, por lo que no se presentan las combinaciones de carga en servicio ni el chequeo respectivo de deformaciones. Los elementos considerados ya cumplen con los respectivos criterios de estabilidad, de acuerdo con los límites de deformación permitidos para este tipo de estructuras.

5.4. Modelo estructural

El peso propio comprende los elementos modelados más un incremento debido a los elementos no modelados como platinas y tornillería. Se presenta en la **Figura 7** la geometría del pórtico modelado en el software PLS-Tower.

Para el caso del análisis elástico estático a través del método de la fuerza horizontal equivalente, se presenta en la **Figura 8**, la forma en que se aplican las fuerzas sísmicas a los nodos.

Figura 7
Geometría del pórtico ejemplo mediante PLS-Tower

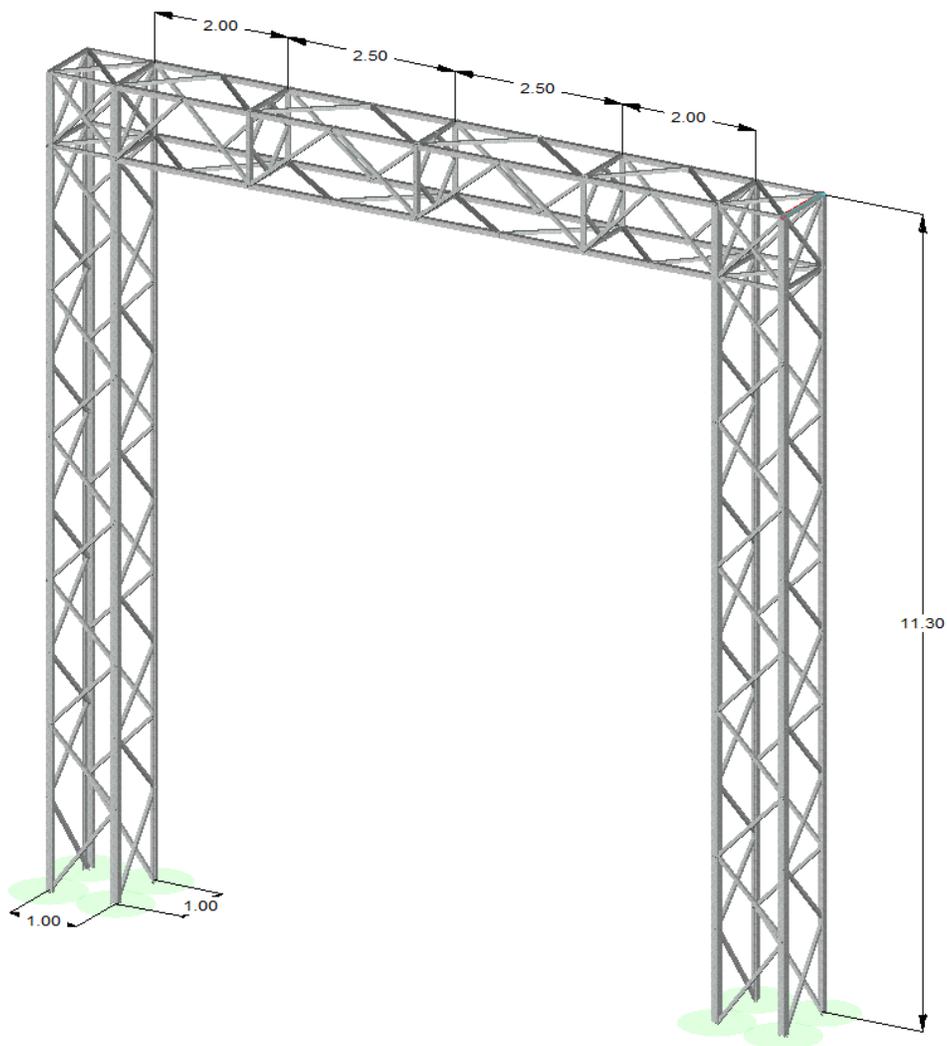
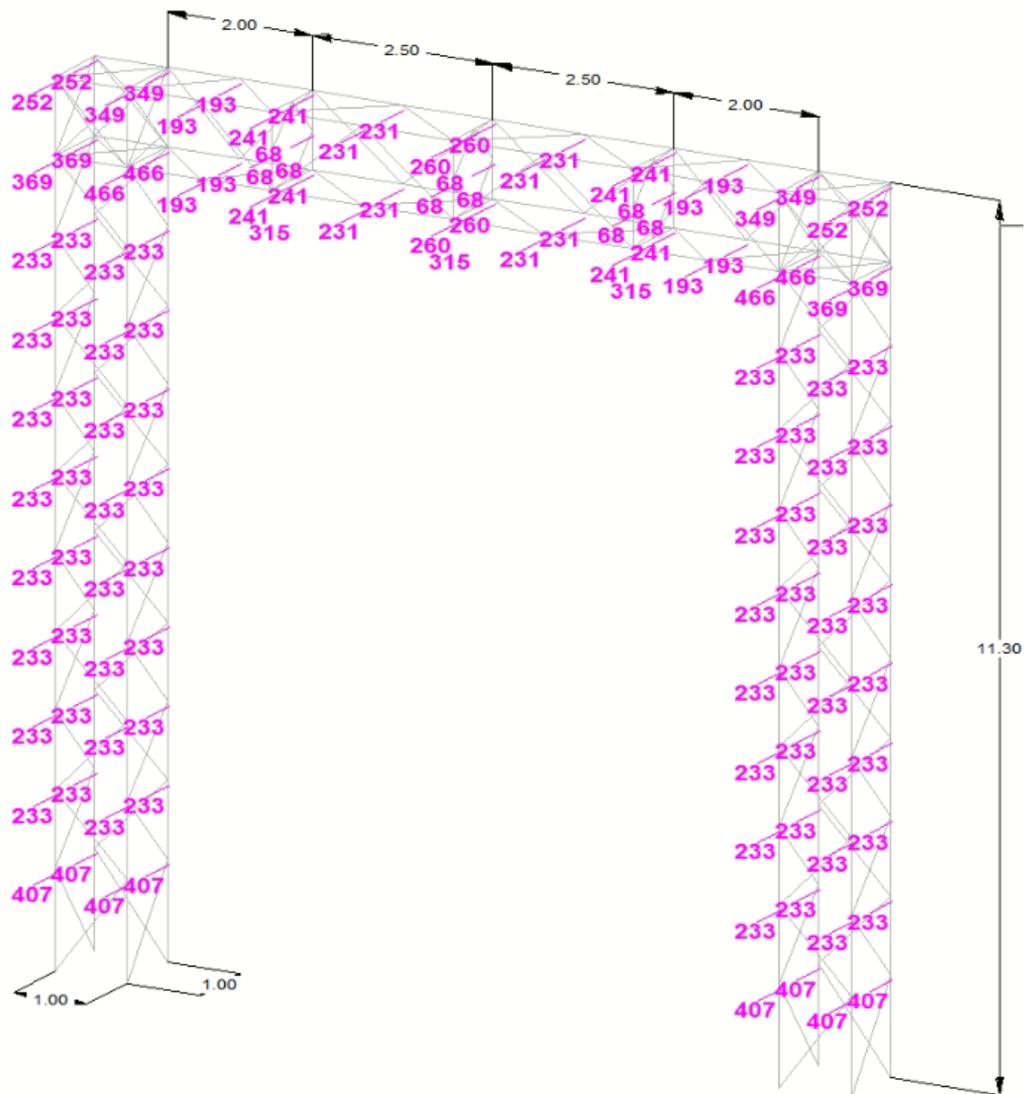


Figura 8

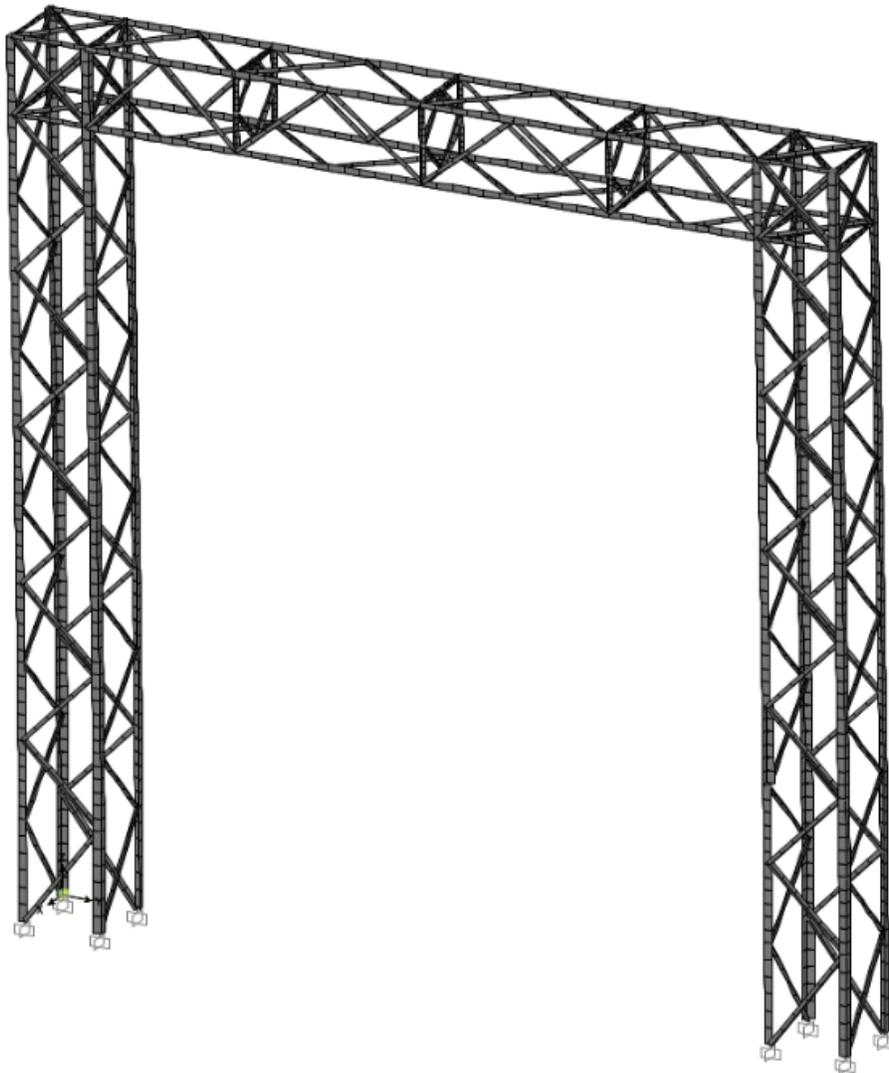
Aplicación de fuerzas sísmicas en pórtico ejemplo mediante PLS-Tower [N]



Para el análisis elástico dinámico (modal espectral), se presenta en la **Figura 9** la geometría del pórtico modelado en el software SAP2000.

Figura 9

Geometría del pórtico ejemplo mediante SAP2000



Como es evidente, se emplearon dos *softwares* para realizar la comparación de los dos métodos de análisis sísmico. PLS-Tower, emplea el método de la FHE y dentro de sus ventajas puede mencionarse que permite asignar modelos de viento automáticos y revisar los estados límite de las conexiones empernadas utilizadas en la estructura. Sin embargo, este software no permite realizar análisis modal espectral, por lo que, para dicho análisis se recurre al software de diseño SAP2000.

Respecto a la aplicación de las cargas en los modelos, las componentes de las fuerzas asociadas a los conductores y conexionado se aplicaron en igual magnitud y punto de aplicación en ambos softwares. Las componentes de la fuerza de viento sobre la estructura fueron extraídas de los resultados obtenidos en PLS-Tower y aplicadas al modelo desarrollado en SAP2000. De esta forma se garantiza que las cargas aplicadas en ambos modelos fueran iguales, exceptuando la carga sísmica, objeto de análisis y comparación.

5.5 Análisis de pandeo

El análisis de pandeo puede evaluarse en SAP2000 mediante un análisis estático no lineal por medio de un proceso iterativo a la vez que se aplica el efecto P-Delta. No se considera el comportamiento no lineal de los materiales.

Al evaluar el pandeo, puede definirse cualquier número de casos de carga, para cada uno de los cuales se debe especificar las cargas (load patterns), la tolerancia de convergencia y el número de modos que deben encontrarse.

Para el análisis de pandeo se definen los casos de carga asociados al viento, sismo y cortocircuito, cada uno acompañado de la carga muerta y la carga de tensión estática, para evaluar los factores y modos de pandeo con el fin de determinar cuál induce efectos sobre la estructura que estén más próximos a generar pandeo de los elementos.

6. Resultados

6.1. Fuerza horizontal equivalente (FHE)

Se presenta el valor de la cortante sísmica estática calculada por el método FHE para ambas direcciones:

Tabla 9

Cortante sísmico estático en x, y

Cortante Basal en X, Y	
Vs [kN]	32,62
0,90 Vs [kN]	29,36

Como se puede evidenciar en la tabla anterior, el valor de la cortante basal es igual tanto para la dirección x, como para la dirección y, dado que, el periodo fundamental de la estructura en ambas direcciones se localiza en la meseta del espectro de diseño, indicando que dicha estructura posee una rigidez considerable.

Se evalúan las diferentes condiciones de falla de los elementos modelados, revisando que sus capacidades a compresión y tensión no sean superadas.

Las fuerzas en los elementos que se utilizan para el diseño estructural son las que se obtienen como resultado de la aplicación de las combinaciones de carga últimas al modelo considerando el análisis de FHE. La capacidad de los elementos se calcula por el método de resistencia última.

Tabla 10

Fuerzas máximas y capacidad por tipo de elemento - Método FHE

Datos de los elementos		Revisión a compresión				Revisión a tracción			
Tipo elemento	Perfilería	Comb.	Cu [kN]	Ca [kN]	Uso [%]	Comb.	Tu [kN]	Ta [kN]	Uso [%]
Montantes Col.	L 4x1/4"	U2	-175	198	88	U2	169	198	85
Cuerdas Viga	L 3x1/4"	U2	-65	114	58	U2	40	99	26
Diagonal Col.	L 2x3/16"	U3A	-26	33	79	U3A	25	50	50
Diagonal Viga	L 2x3/16"	U2	-29	35	84	U2	36	50	76

Donde,

Cu: Fuerza de compresión última.

Ca: Resistencia a la compresión admisible.

Tu: Fuerza de tensión última.

Ta: Resistencia a la tensión admisible.

Se evidencia que las combinaciones de carga gobernantes (U2, U3A) en cada grupo de diseño no incluyen las componentes sísmicas. Se presenta a continuación las cargas máximas de las combinaciones que contienen componentes sísmicas (U5, U6) con la finalidad de comparar los valores con los obtenidos a través del análisis modal espectral.

Tabla 11

Fuerzas máximas y capacidad por tipo de elemento para combinaciones de carga sísmicas - Método FHE

Datos de los elementos		Revisión a compresión				Revisión a tracción			
Tipo elemento	Perfilería	Comb.	Cu [kN]	Ca [kN]	Uso [%]	Comb.	Tu [kN]	Ta [kN]	Uso [%]
Montantes Col.	L 4x1/4"	U5H	-67	198	33	U5D	60	198	30
Cuerdas Viga	L 3x1/4"	U5H	-20	114	18	U6E	16	99	16
Diagonal Col.	L 2x3/16"	U5E	-11	33	33	U5A	11	50	22
Diagonal Viga	L 2x3/16"	U5H	-10	35	29	U5H	9	50	18

6.2. Análisis modal espectral

Se presenta a continuación la información característica de la estructura, periodo fundamental, frecuencia, participación de la masa en cada dirección y cortante sísmico en la base:

Tabla 12

Periodos, frecuencias y participación de la masa modal

Modo	Periodo [s]	Frecuencia [Hz]	UX [%]	UY [%]	SumUX [%]	SumUY [%]	RZ [%]	SumRZ [%]
1	0,197	5,06	74,12	0,01	74,12	0,01	0,00	0,00
2	0,143	7,01	0,01	79,22	74,14	79,23	0,08	0,08
3	0,138	7,22	0,04	0,09	74,14	79,32	71,45	71,53
4	0,038	26,22	0,00	0,00	74,14	79,32	0,00	71,53
5	0,038	26,26	0,00	0,00	74,14	79,32	0,00	71,53
6	0,038	26,26	0,00	0,00	74,14	79,33	0,00	71,53

Modo	Periodo [s]	Frecuencia [Hz]	UX [%]	UY [%]	SumUX [%]	SumUY [%]	RZ [%]	SumRZ [%]
7	0,038	26,31	0,01	0,02	74,15	79,33	0,00	71,53
8	0,038	26,35	8,72	0,01	82,87	79,34	0,00	71,53
9	0,038	26,55	0,04	0,04	82,91	79,34	0,01	71,54
10	0,033	30,61	0,09	0,00	83,01	79,34	0,00	71,54
11	0,033	30,72	0,01	0,00	83,01	79,34	0,03	71,57
12	0,031	32,58	0,04	0,00	83,05	79,34	17,75	89,32
13	0,031	32,63	5,28	0,03	88,33	79,37	0,12	89,44
14	0,030	33,39	0,00	0,00	88,33	79,37	0,29	89,73
15	0,029	34,05	1,39	0,01	89,72	79,38	0,00	89,73
16	0,029	34,84	0,00	12,99	89,72	92,37	0,00	89,73
17	0,027	36,65	1,04	0,20	90,76	92,57	0,00	89,73
18	0,027	37,24	0,02	0,00	90,78	92,57	0,07	89,80
19	0,026	38,41	0,01	0,00	90,79	92,57	0,24	90,04
20	0,024	41,65	0,20	0,05	90,99	92,57	0,01	90,04
21	0,023	43,42	1,04	0,03	92,03	92,60	0,00	90,04
22	0,023	44,03	0,55	0,06	92,58	92,66	0,00	90,04
23	0,022	45,86	0,51	0,27	93,08	92,93	0,00	90,05
24	0,021	46,63	0,59	0,32	93,67	93,25	0,00	90,05
25	0,020	49,62	0,49	0,25	94,16	93,49	0,06	90,11
26	0,020	51,16	0,33	1,80	94,48	95,29	0,00	90,11
27	0,019	52,42	1,23	0,33	95,71	95,62	0,05	90,16
28	0,018	55,48	0,03	0,10	95,75	95,71	0,01	90,17
29	0,016	63,94	0,15	0,12	95,90	95,84	0,00	90,17
30	0,015	68,04	0,28	0,29	96,18	96,13	0,01	90,18
31	0,014	72,79	0,29	0,27	96,47	96,40	0,06	90,24
32	0,013	77,72	0,81	1,15	97,28	97,55	0,00	90,25
33	0,012	80,01	1,02	0,77	98,29	98,32	0,00	90,25
34	0,011	87,84	0,08	0,06	98,37	98,38	0,05	90,30
35	0,007	142,50	0,45	0,10	98,82	98,48	0,03	90,33
36	0,007	148,39	0,08	0,54	98,90	99,01	0,00	90,33
37	0,005	185,66	0,76	0,00	99,66	99,02	0,02	90,35
38	0,005	193,03	0,00	0,69	99,66	99,70	0,01	90,36
39	0,003	298,34	0,32	0,00	99,98	99,70	0,01	90,37
40	0,003	308,87	0,00	0,28	99,99	99,99	0,01	90,38

Donde,

UX: Porcentaje de participación de la masa en X

UY: Porcentaje de participación de la masa en Y

RZ: Porcentaje de participación de la masa en Z

Tabla 13*Cortante sísmico dinámico en x, y*

Caso de carga	Cortante en la base					
	FX [kN]	FY [kN]	FZ [kN]	MX [kN-m]	MY [kN-m]	MZ [kN-m]
Ex Max	17,53	0,36	0,85	2,85	166,36	96,32
Ey Max	0,36	18,74	0,43	172,74	2,75	10,61

Una vez calculados los valores de cortante sísmico por ambos métodos, se procede a verificar si se debe ajustar el cortante dinámico y cuál es su factor de ajuste:

Tabla 14*Factor de ajuste del cortante en la base en dirección x, y*

Dirección	Vs Estático (FHE) [kN]	Vs Dinámico (Modal-espectral) [kN]	Factor de Ajuste
X	29,36	17,53	1,675
Y	29,36	18,74	1,567

Con la corrección del cortante sísmico dinámico para ambas direcciones por medio del factor de ajuste, se tiene los siguientes resultados en la base de la estructura:

Tabla 15*Cortante sísmico dinámico ajustado en x, y*

Caso de carga	Cortante en la base					
	FX [kN]	FY [kN]	FZ [kN]	MX [kN-m]	MY [kN-m]	MZ [kN-m]
Ex Max	29,36	0,60	0,14	4,79	278,62	161,31
Ey Max	0,56	29,36	0,07	270,62	4,31	16,64

Se evalúan las diferentes condiciones de falla de los elementos a compresión y tensión. La capacidad de los elementos se calcula por el método de resistencia última.

Tabla 16*Fuerzas máximas y capacidad por tipo de elemento - Método análisis modal espectral*

Datos de los elementos		Revisión a compresión				Revisión a tracción			
Tipo elemento	Perfilería	Comb.	Cu [kN]	Ca [kN]	Uso [%]	Comb.	Tu [kN]	Ta [kN]	Uso [%]
Montantes Col.	L 4X1/4"	U2	-175	198	88	U2	169	198	85
Cuerdas Viga	L 3X1/4"	U2	-58	114	51	U2	49	99	50
Diagonal Col.	L 2X3/16"	U3A	-26	33	79	U3A	25	50	50
Diagonal Viga	L 2X3/16"	U2	-30	35	85	U2	31	50	62

Al igual que en FHE las combinaciones de carga gobernantes (U2, U3A) en cada grupo de diseño no incluyen las componentes sísmicas. Se presentan las cargas máximas de las combinaciones que contienen componentes sísmicas (U5, U6):

Tabla 17*Fuerzas máximas y capacidad por tipo de elemento para combinaciones de carga sísmicas - Método análisis modal espectral*

Datos de los elementos		Revisión a compresión				Revisión a tracción			
Tipo elemento	Perfilería	Comb.	Cu [kN]	Ca [kN]	Uso [%]	Comb.	Tu [kN]	Ta [kN]	Uso [%]
Montantes Col.	L 4X1/4"	U5A	-124	198	63	U5E	117	198	59
Cuerdas Viga	L 3X1/4"	U6A	-28	114	25	U6A	29	99	29
Diagonal Col.	L 2X3/16"	U5A	-19	33	57	U5E	19	50	38
Diagonal Viga	L 2X3/16"	U6A	-14	35	40	U6A	13	50	26

6.3. Comparación de resultados de análisis sísmicos

Se presentan las fuerzas internas máximas de compresión y tracción para las combinaciones de carga sísmicas obtenidas a través los dos métodos de análisis y se contrasta el porcentaje de uso máximo de cada tipo de elemento:

Tabla 18

Comparativo de fuerzas máximas de compresión por tipo de elemento para combinaciones de carga sísmicas

Tipo de elemento	Capacidad Ca [kN]	FHE			Análisis modal espectral			Diferencia Uso [%]
		Revisión a compresión			Revisión a compresión			
		Comb.	Cu [kN]	Uso [%]	Comb.	Cu [kN]	Uso [%]	
Montantes Col.	198	U5H	-67	33	U5A	-124	63	30
Cuerdas Viga	114	U5H	-20	18	U6A	-28	25	7
Diagonal Col.	33	U5E	-11	33	U5A	-19	57	24
Diagonal Viga	35	U5H	-10	29	U6A	-14	40	11

Tabla 19

Comparativo de fuerzas máximas de tracción por tipo de elemento para combinaciones de carga sísmicas

Tipo de elemento	Capacidad Ta [kN]	FHE			Análisis modal espectral			Diferencia Uso [%]
		Revisión a tracción			Revisión a tracción			
		Comb.	Tu [kN]	Uso [%]	Comb.	Tu [kN]	Uso [%]	
Montantes Col.	198	U5D	60	30	U5E	117	59	29
Cuerdas Viga	99	U6E	16	16	U6A	29	29	13
Diagonal Col.	50	U5A	11	22	U5E	19	38	16
Diagonal Viga	50	U5H	9	18	U6A	13	26	8

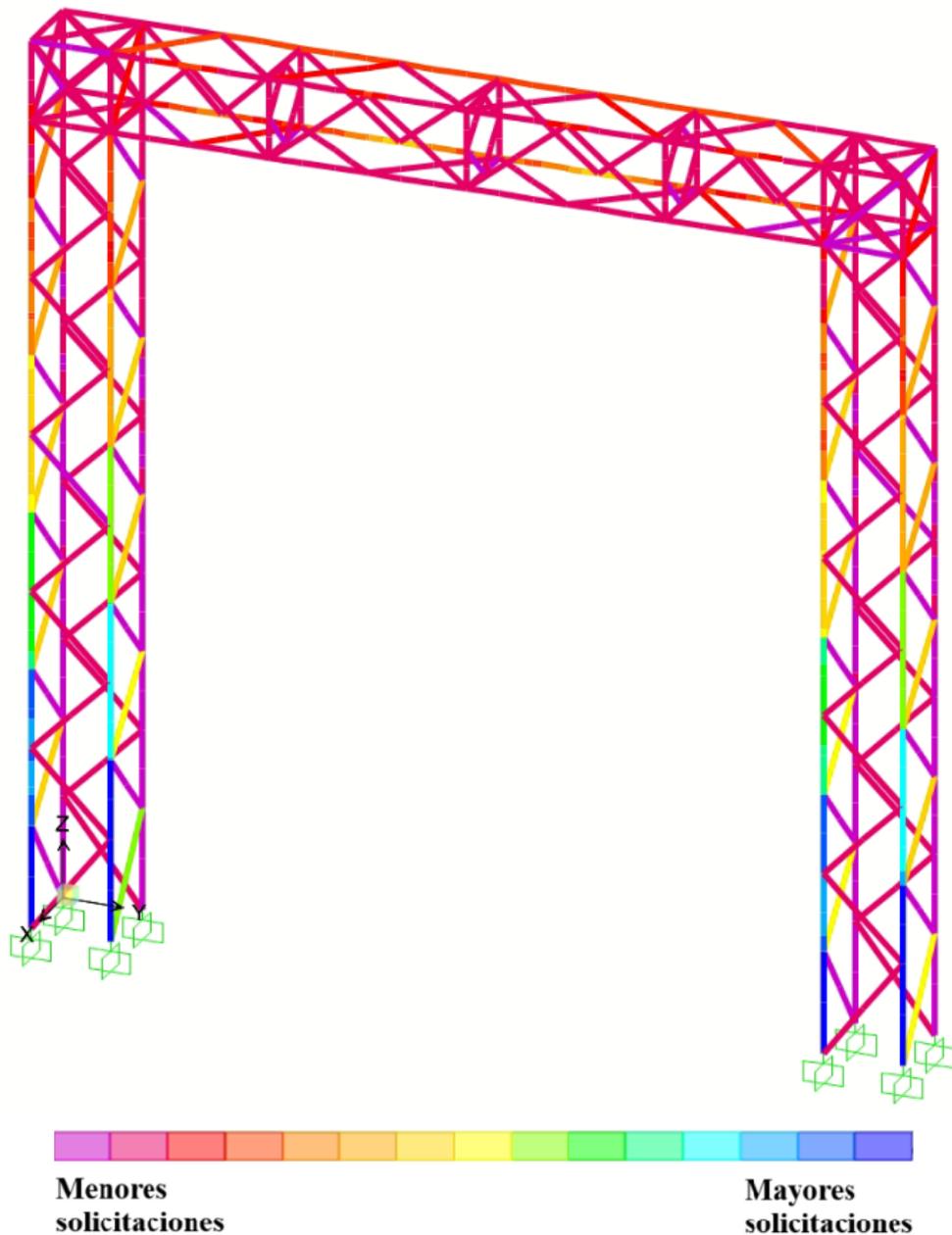
Se aprecia que la comparación de resultados entre los obtenidos a través del método de la FHE y el método de análisis modal espectral presenta diferencias en los valores máximos de las fuerzas internas en los elementos. Los resultados obtenidos por el método de análisis modal espectral fueron mayores en todos elementos del pórtico. Los incrementos relativos de las fuerzas internas con respecto a la FHE son del orden del 7% al 30%.

Con el fin de identificar las zonas de la estructura donde se presentaron los incrementos de la fuerzas internas obtenidos en el análisis modal espectral, se superpusieron los efectos de las cargas sísmicas estimadas por los dos metodos. De esta forma, se pudo establecer que las zonas de la estructura donde el análisis modal espectral reporta fuerzas internas mayores en los elementos respecto a lo calculado por FHE se localizan en la base de las columnas. En la **Figura 10** se presenta un diagrama que muestra la localización de los elementos que tienen fuerzas internas adicionales provenientes del análisis modal espectral respecto a las fuerzas internas calculadas por FHE.

De esta forma, se evidencia que el análisis modal espectral, captura mejor el comportamiento dinámico de la estructura en una zona que resulta ser de crucial importancia para la estabilidad del pórtico.

Figura 10

Diagrama de incrementos de las solicitaciones sísmicas obtenidos del análisis modal espectral respecto a FHE



6.4. Análisis de pandeo

Los factores de pandeo se presentan para los 6 modos definidos en cada caso de carga presente en la estructura.

Tabla 20

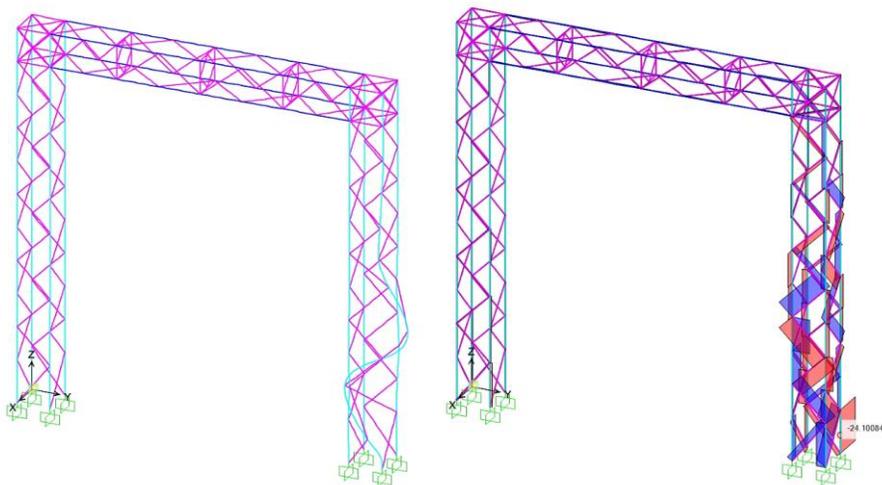
Factores de pandeo para el caso de carga de viento

Factores de pandeo - Viento	
Modo	Factor
1	10,58
2	10,70
3	11,69
4	12,58
5	12,72
6	12,96

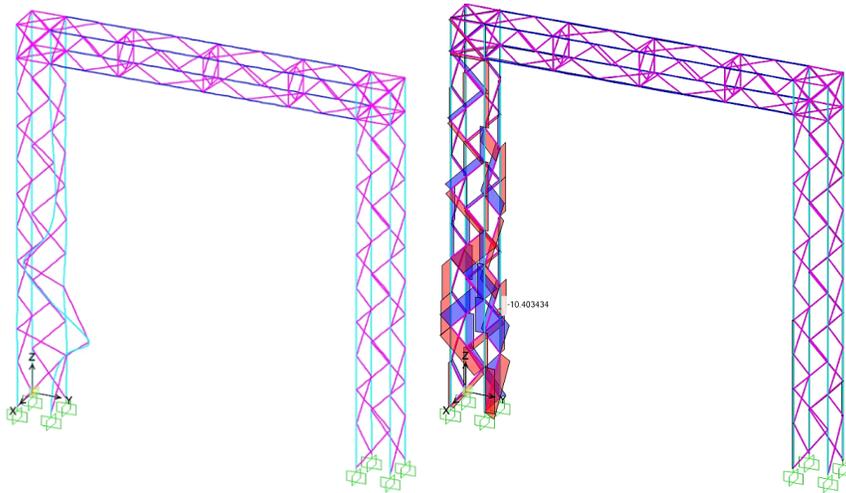
A continuación, la deformación para cada modo de pandeo y la representación gráfica de las fuerzas axiales en los elementos.

Figura 11

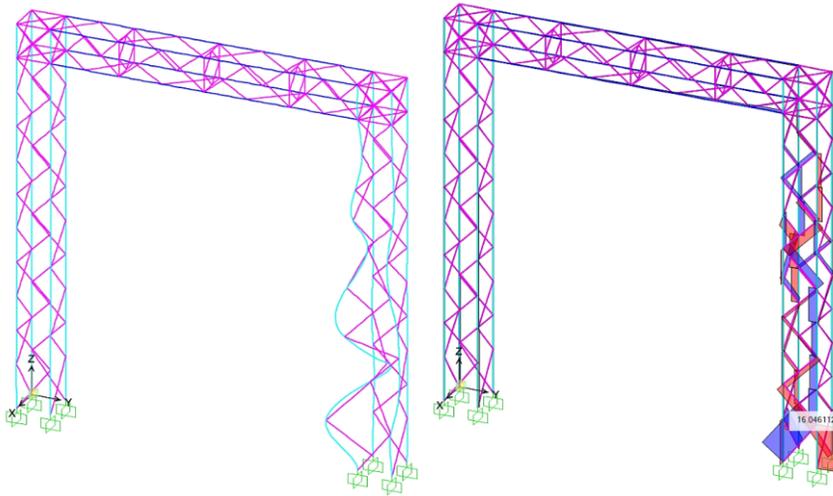
Modos de pandeo y fuerzas axiales en los elementos para el caso de carga de viento



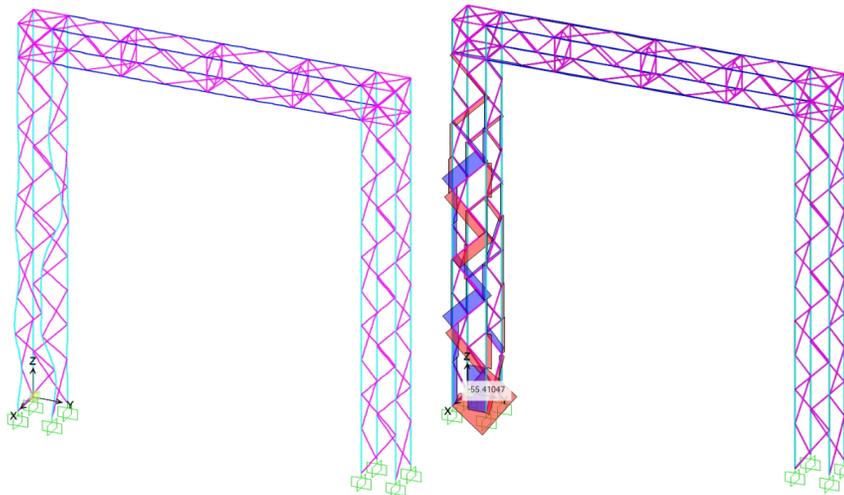
Modo 1



Modo 2



Modo 3



Modo 4

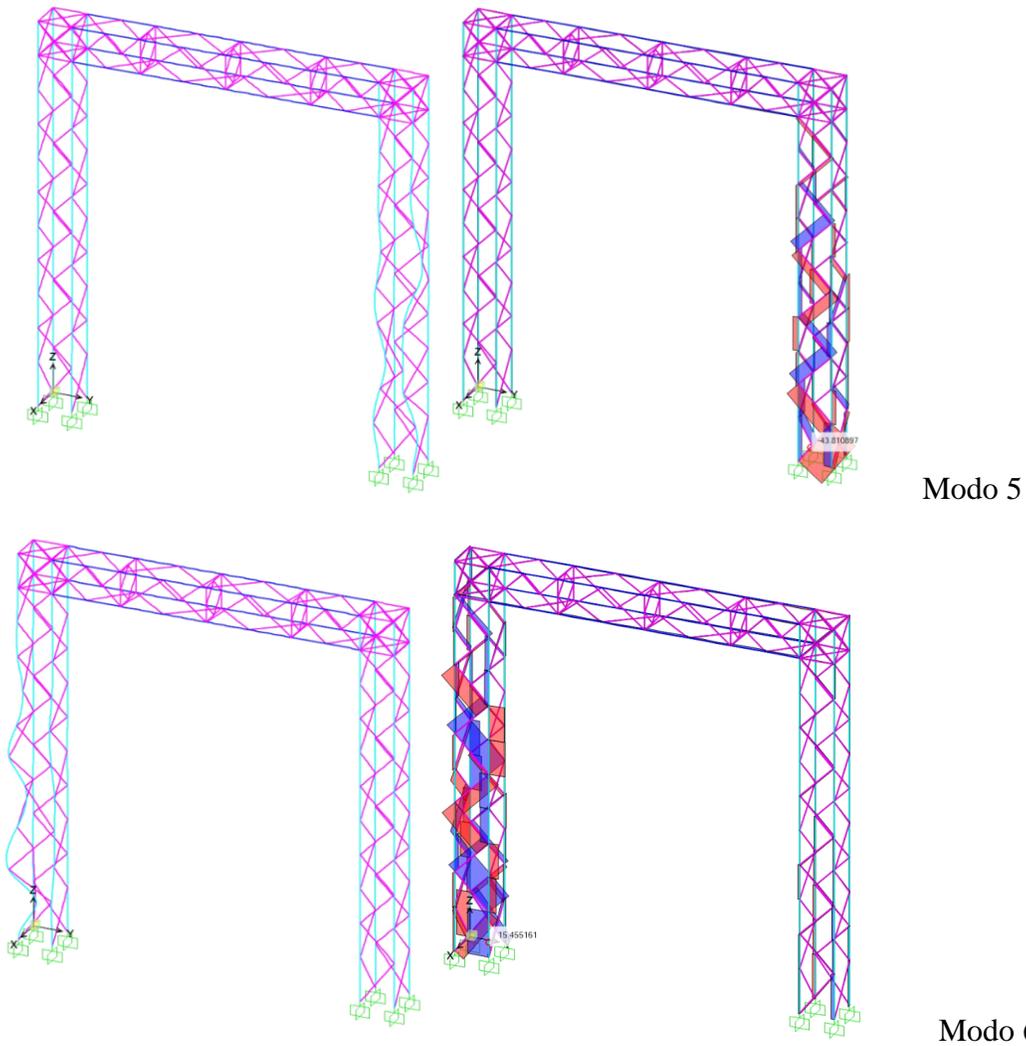
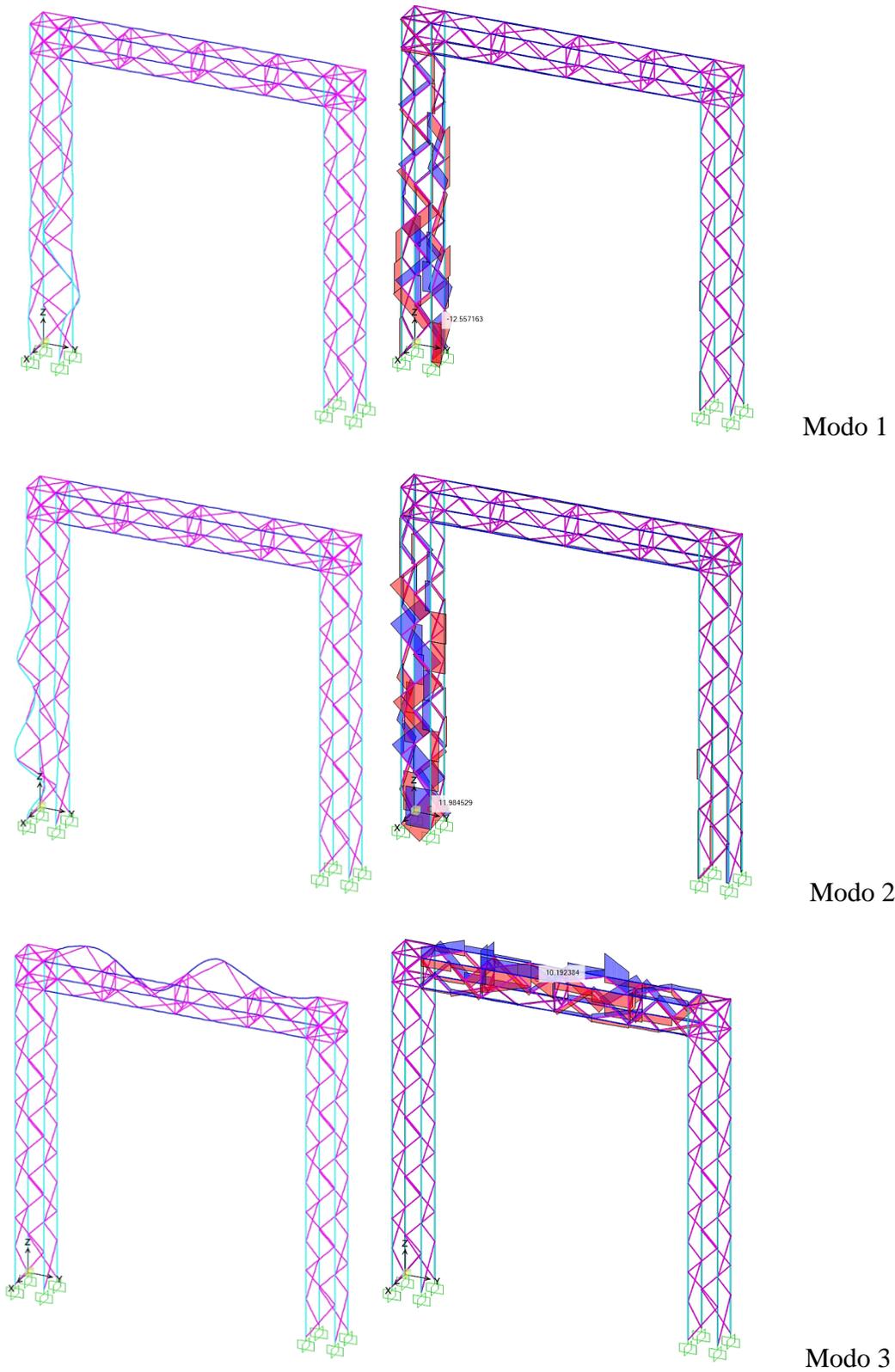


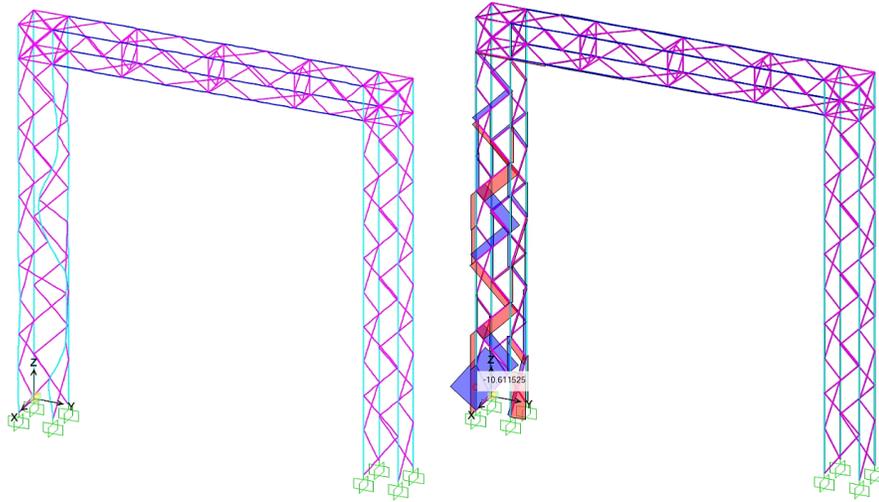
Tabla 21
Factores de pandeo para el caso de carga de cortocircuito

Factores de pandeo - Cortocircuito	
Modo	Factor
1	4,18
2	4,20
3	4,77
4	4,80
5	-4,82
6	-4,84

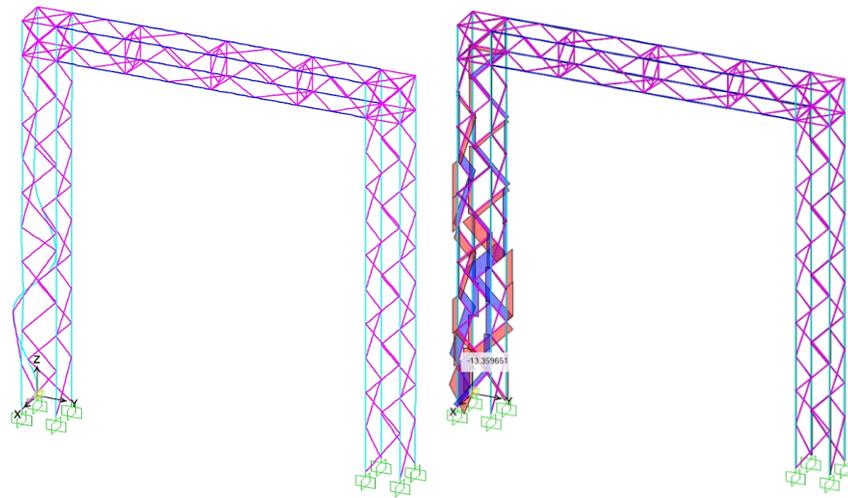
Figura 12

Modos de pandeo y fuerzas axiales en los elementos para el caso de cortocircuito

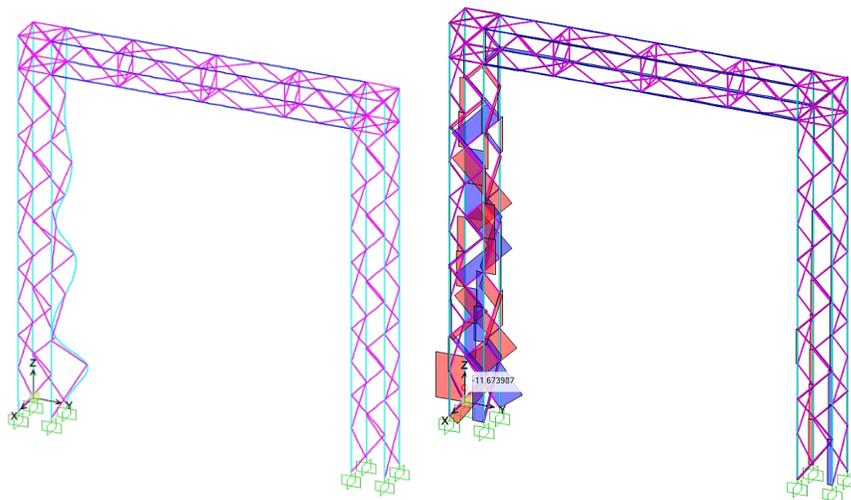




Modo 4



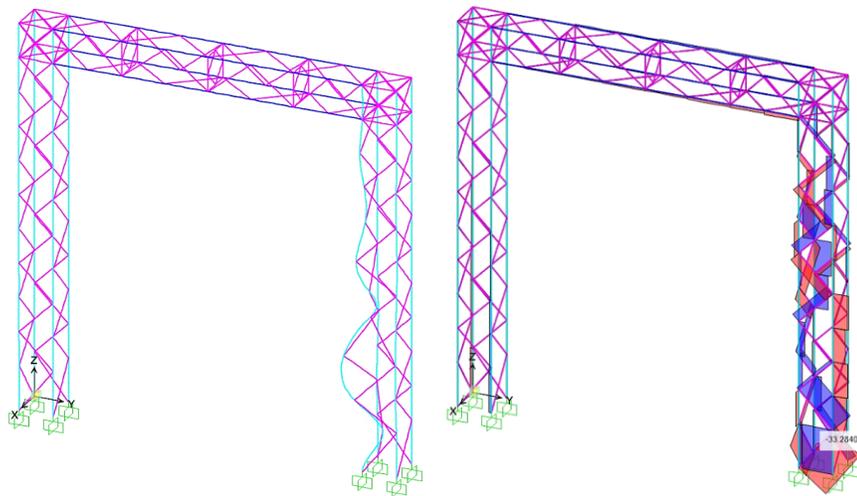
Modo 5



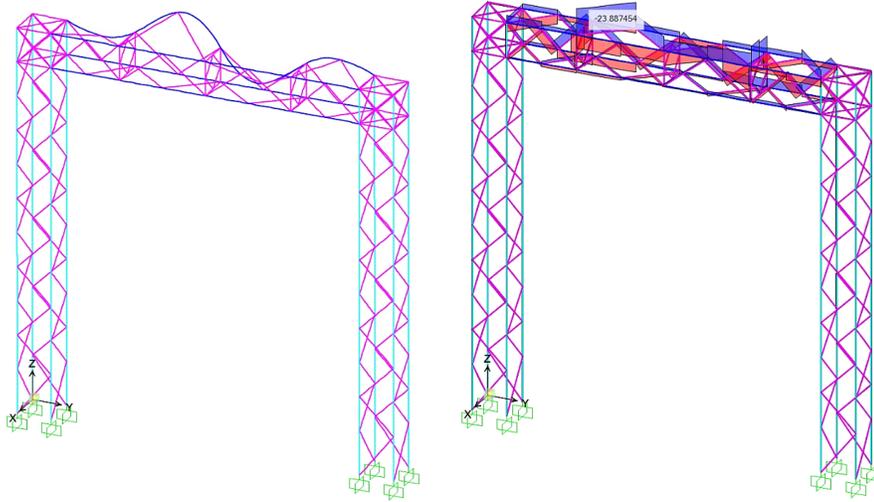
Modo 6

Tabla 22*Factores de pandeo para el caso de carga de sismo*

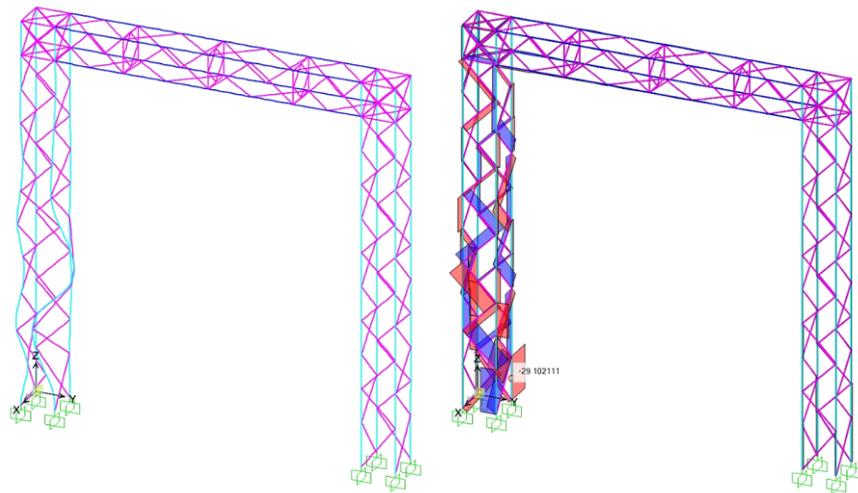
Factores de pandeo - Sismo	
Modo	Factor
1	16,78
2	17,09
3	18,043
4	18,14
5	18,17
6	-20,12

Figura 13*Modos de pandeo y fuerzas axiales en los elementos para el caso de sismo.*

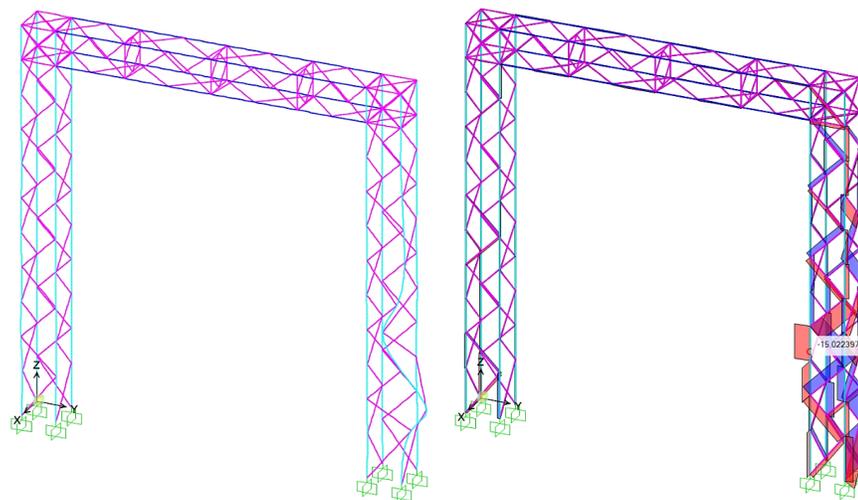
Modo 1



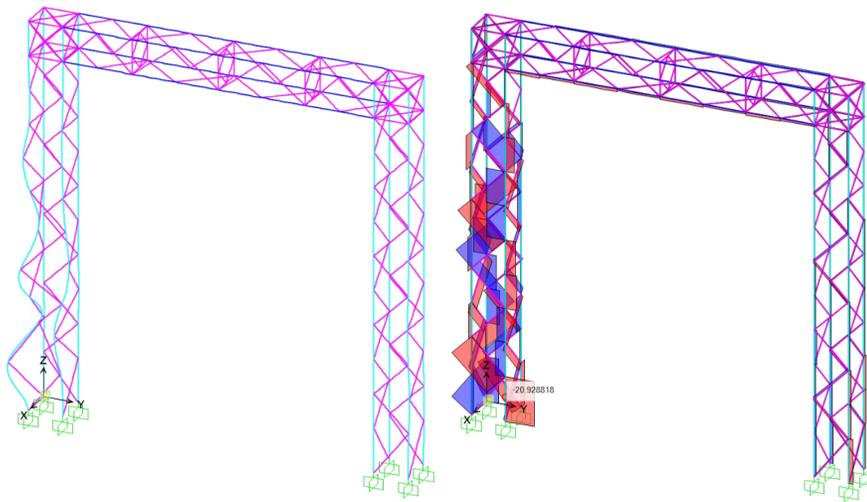
Modo 2



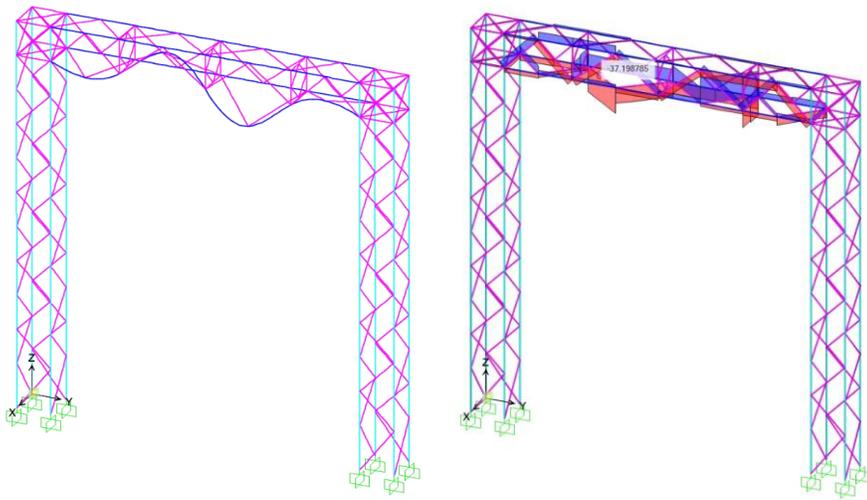
Modo 3



Modo 4



Modo 5



Modo 6

De acuerdo con los resultados del análisis de pandeo, ninguno de los factores obtenidos es menor que 1, por lo cual, las cargas aplicadas deben ser mayores para generar pandeo de los elementos en todos los casos de carga.

Las cargas asociadas al efecto de cortocircuito son las que generan factores de pandeo menores, lo cual implica que son estas cargas las que estarían más cercanas de generar pandeo en la estructura ante un eventual aumento en su magnitud. El caso contrario aplica para las cargas asociadas al evento sísmico, el cual, según los factores obtenidos, son las que tienen un factor de seguridad mayor en cuanto a los efectos de pandeo.

7. Conclusiones

1. Se determinó que las solicitaciones gobernantes para el diseño de la estructura corresponden a las combinaciones de carga U2 y U3A. La combinación U2 está conformada por el peso propio de la estructura, las cargas de tensión mecánica asociadas al conductor y la carga de cortocircuito. Por su parte, la combinación U3A está conformada por el peso propio de la estructura, las cargas de tensión mecánica asociadas al conductor, carga de cortocircuito y cargas de viento en la dirección X. Los montantes son los elementos mas solicitados de la estructura, el elemento crítico tiene un porcentaje de uso del 88% para la combinación de carga U2, en la cual el peso propio representa el 3% de uso, la carga de tensión mecánica el 22% y la carga de cortocircuito el 75%.

Es evidente entonces que las cargas sísmicas no gobiernan el diseño de esta estructura y las combinaciones de carga gobernantes retornan fuerzas máximas superiores a las combinaciones sísmicas (31% aproximadamente). Dicho esto, es posible afirmar que, para estructuras con condiciones similares (peso, geometría y configuración de cargas), el diseño de sus elementos estará gobernado por las solicitaciones asociadas al conductor y al fenómeno de cortocircuito. Esto es particularmente relevante, considerando que para este nivel de tensión resultan ser estructuras bastante comunes, aún más, considerando la creciente tendencia de estandarización en los diseños de este tipo de estructuras.

2. Si bien las combinaciones de carga que contienen las componentes sísmicas no gobiernan el diseño de los elementos del pórtico, existen diferencias en los resultados de análisis sísmicos obtenidos por el método de la fuerza horizontal equivalente y el método de análisis dinámico modal espectral. Se evidenciaron incrementos relativos de las fuerzas internas de hasta el 30% en elementos localizados en la base de la columna empleando el método de análisis modal espectral. De esta forma, se pudo determinar que en esta zona de la pórtico, el análisis modal espectral captura mejor la respuesta de la estructura respecto a FHE. Para las demás zonas, se aprecia que los dos metodos retornan resultados muy similares.
3. El comportamiento dinámico de la estructura es descrito con mayor exactitud al emplear análisis dinámicos estáticos como el análisis modal espectral. A través de este, no solo se obtuvieron fuerzas internas de mayor magnitud respecto a la FHE sino además información modal de la estructura que resulta ser compleja de determinar empleando FHE.

Fue posible obtener, por ejemplo, la frecuencia y periodo dinámico para cada modo de vibración, información que es indispensable para pórticos que en su configuración deban dar soporte a equipos electromecánicos donde generalmente, se debe evaluar la rigidez de la estructura a través de un análisis de frecuencias o validaciones sísmicas para evitar que la estructura y el equipo vibren en resonancia.

Dicho esto, se recomienda emplear análisis dinámicos como el análisis modal espectral para el análisis de este tipo de estructuras. Se prescribe conveniente y práctico en casos donde se deban instalar equipos electromecánicos, aún más donde los fabricantes de equipos especifiquen la rigidez de la estructura de soporte.

4. En el procedimiento de ajuste del cortante basal se destaca que para la estimación del periodo fundamental aproximado (T_a) según tabla A.4.2.1 de NSR-10, no se indican valores de C_t y α para estructuras metálicas en celosía. Este procedimiento solo se precisa para sistemas estructurales resistentes a momento y no es claro en cómo proceder con sistemas estructurales diferentes. Para el caso estudio analizado, como se pretendía comparar los resultados de los análisis sísmicos por FHE y modal espectral, no se calculó el periodo fundamental aproximado T_a , si no que se realizó el ajuste directamente para la cortante basal obtenida por el método de FHE. De esta manera, sería necesario desarrollar ambas metodologías para obtener la cortante de referencia. Por lo anterior, no resultaría práctico llevar a cabo ambas metodologías siempre que se pretenda realizar un análisis dinámico para este tipo de estructuras.

En general, la norma NSR-10, no presenta información detallada de los procedimientos aplicables a este tipo de estructuras y, como en el caso del procedimiento de ajuste del cortante basal, obliga a un ingeniero a remitirse a recomendaciones internacionales y/o criterio propio.

5. En la práctica habitual de diseño de estructuras en celosía de subestaciones eléctricas, no se considera efectuar análisis de pandeo para las diferentes cargas que actúan sobre ellas. Esto podría ser una consecuencia de la ausencia de indicaciones por parte de las normativas de diseño referente a valores mínimos de pandeo que deban ser aplicados según los tipos de elementos o tipos de estructuras consideradas. Por lo anterior, a pesar de que el ingeniero realice un análisis de pandeo para evaluar la estabilidad en su diseño y tener en cuenta el factor de seguridad existente en los elementos, no tendría valores de referencia por parte de

los códigos con el cual pueda comparar sus resultados más allá de los valores de esbelteces máximas que los elementos deben cumplir por norma.

Sin embargo, se recomienda realizar este tipo de análisis ya que, además de su simplicidad de ejecución como paso adicional en un proceso de diseño, proporciona información acerca de los factores de seguridad existentes en los elementos que conforman la estructura. Lo anterior es relevante ya que, por la naturaleza de la disposición y las condiciones de carga, este tipo de estructuras podrían ser vulnerables a los efectos de pandeo debido a la esbeltez de la estructura en la dirección del conductor.

De acuerdo con los resultados del análisis de pandeo realizado para el caso estudio, ninguno de los factores obtenidos es menor que 1, por lo cual, hay un factor de seguridad en cuanto a que las cargas aplicadas deben ser mayores para generar pandeo de los elementos para todos los casos de carga evaluados. Las cargas que presentaron mayor incidencia en la estructura respecto a los efectos estudiados fueron las de cortocircuito según los factores de pandeo obtenidos respecto a las otras cargas (factor de pandeo de 4 con relación a factor de pandeo de 16 para el caso sísmico).

Referencias

- American Society of Civil Engineers [ASCE]. (2020). *ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 74: Guidelines for Electrical Transmission Line Structural Loading - Fourth edition*. ASCE.
- American Society of Civil Engineers [ASCE]. (2008). *ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 113: Substation Structure Design Guide*. ASCE.
- Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica AIS (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10)*. Segunda actualización, Bogotá.
- Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica AIS (2013). *Recomendaciones Para Requisitos Sísmicos de Estructuras Diferentes de Edificaciones (AIS 180)*. Bogotá.
- Comisión de Regulación de Energía, Gas y Combustibles [CREG]. (2008). *Cartilla distribución de energía eléctrica*. Bogotá, Colombia.
- Computers and Structures Inc. (2015). *CSI Analysis reference manual*. California.
- HMV Ingenieros Ltda. (2021). *Subestaciones de alta y extra alta tensión. Medellín*. Colombia.
- IEEE Power and Energy Society (2018). *Recommended Practice for the Design of Buswork Located in Seismically Active Areas*, in IEEE Std 1527-2018 (Revision of IEEE Std 1527-2006), vol., no., pp.1-91, 10 Aug. 2018, DOI: 10.1109/IEEESTD.2018.8439125.
- International Electrotechnical Commission [IEC]. (1993). IEC 60865-1, *Shortcircuit currents - Calculation of effects - Part 1: Definitions and calculation methods*.
- Li, Sheng & Tsang, Hing-Ho & Cheng, Yongfeng & Lu, Zhicheng. (2017). *Considering seismic interaction effects in designing steel supporting structure for surge arrester*. Journal of Constructional Steel Research. 132. 151-163. 10.1016/j.jcsr.2017.01.012.
- Mara, T. & Behncke, R., (2015). Updating ASCE Manual No. 74: *Guidelines for Electrical Transmission Line Structural Loading*. 154-165. 10.1061/9780784479414.013.
- Martín Rodríguez, P., & Elena Parnás, V. B. (2012). *Análisis sísmico de modelos cubanos de torres autosoportadas de telecomunicaciones*. Revista Cubana De Ingeniería, 3(2), 25–34. Recuperado a partir de <https://rci.cujae.edu.cu/index.php/rci/article/view/86>.
- Colombia. Ministerio de Minas y Energía (2008). *Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas RETIE*. Bogota, Colombia: Ministerio de Minas y Energía.
- Cuba (1999). NC46:1999. Construcciones sismorresistentes. *Requisitos básicos para el diseño y construcción*. Cuba.

Power Line Systems Inc. [PLS]. (2019). *PLS-TOWER “Analysis and Design of Steel Latticed Towers Used in Transmission and Communication Facilities.”* [software]. PLS.

Presichi Gerardo, Donobhan. (2007). *Aplicación de los métodos estático y dinámico modal para el diseño sísmico de edificios con disipadores de energía.* (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/446853>

Rojas Molinares, L. (2017). *Comportamiento del sistema de transmisión eléctrica de líneas aéreas de alta tensión conformado por torres metálicas en celosía ante sollicitaciones sísmicas y de viento.* Uniandes.

CSI Berkeley [CSI]. *SAP 2000 “Integrated Software for Structural Analysis and Design.”* (Version V15.1) [software]. CSI.

Zeynalian, Mehran & Bolkhari, Sattar & Rafeei, Pooria. (2018). *Structural performance of cold-formed steel trusses used in electric power substations.* Journal of Constructional Steel Research. 147. 53-61. 10.1016/j.jcsr.2018.04.002.