



ESTUDIO DE CASO DE CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DINÁMICO DE AISLADOR SÍSMICO PARA EQUIPOS DE UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA A 230 KV

Brayan Camilo Galindo Anzola

Sebastián Bedoya Pérez

Asesor

Juan Fernando Velásquez Bedoya

I.C. M.Sc. Earthquake Engineering

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Especialización en Análisis y Diseño de Estructuras

Medellín

2024

Cita	(Bedoya & Galindo , 2024)
Referencia	Galindo Anzola, B. C. , & Bedoya, S. A. (2024). <i>Estudio de caso de caracterización y análisis dinámico de aislador sísmico para equipos de una subestación eléctrica a 230 kv</i> [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Antioquia, Seleccione ciudad UdeA (A-Z).
Estilo APA 7 (2020)	



Especialización en Análisis y Diseño de Estructuras, Cohorte XI.



Biblioteca Carlos Gaviria Díaz

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	7
Abstract	8
Introducción	9
Planteamiento del problema	11
Antecedentes	11
Justificación.....	13
Objetivos	14
Objetivo general	14
Objetivos específicos.....	14
Revisión de Literatura	15
Tipos de Aisladores	16
Aplicación y Beneficios	19
Estudio de caso.....	22
Equipo de subestación.....	22
Estructura de soporte.....	25
Estructura de Soporte + equipo	27
Estructura de soporte + equipo + WRI.....	31
Discusión.....	39
Conclusiones	42
Referencias.....	43

Lista de tablas

Tabla 1	Parámetros de equipo de descargador de sobretensión 230kv	22
Tabla 2	Parámetros de efectos de sitio para la construcción del espectro de aceleraciones	30
Tabla 3.	Reacciones máximas en la base del sistema y por aislador.	33
Tabla 4.	Parámetros mecánicos para aisladores WRI ante fuerza axial y cortante.....	34
Tabla 5	Parámetros de aislador W16-406-06.....	35
Tabla 6	Resumen de resultados.....	39
Tabla 7	Reacciones en la base para el sistema aislado y sin aislar	40

Lista de figuras

Figura 1. Ubicación y comportamiento de los aisladores de base	9
Figura 2. Tipos de sistemas de aislamiento	17
Figura 3 Wire Rope isolators (WRI)	19
Figura 4 Representación esquemática de un elemento de sección constante y distribución de masa homogénea.	23
Figura 5 Ecuación de frecuencias naturales de elemento en voladizo empotrado en la base	23
Figura 6 Esquema de idealización de equipo	24
Figura 7 Modelo matemático del descargador de sobretensiones.....	25
Figura 8. Configuración de estructura de soporte	26
Figura 9 Modelo de estructura de soporte.....	27
Figura 10 Modelo en SAP 2000 estructura de soporte +equipo	28
Figura 11 Clasificación de los perfiles de suelo.....	29
Figura 12 Valores del coeficiente F_a , para la zona de períodos cortos del espectro.....	29
Figura 13 Valores del coeficiente F_v , para la zona de períodos intermedios del espectro	30
Figura 14 Espectro de aceleraciones	30
Figura 15 Aceleraciones en el centro de masa del equipo sin WRI.....	31
Figura 16 Disposición de los aisladores	32
Figura 17 Planos de acción de los WRI	33
Figura 18 Recomendaciones de aislador con base en el criterio de fuerzas.....	35
Figura 19 Proceso constructivo común de WRI.....	36
Figura 20 Parámetros del elemento tipo link, direcciones (U1), (U2) Y (U3).....	37
Figura 21 Modelo en SAP 2000 estructura de soporte + equipo + WRI	37
Figura 22 Aceleraciones en el centro de masa del equipo con sistema con WIR.....	38

Siglas, acrónimos y abreviaturas

APA	American Psychological Association
Cms.	Centímetros
ERIC	Education Resources Information Center
Esp.	Especialista
MP	Magistrado Ponente
MSc	Magister Scientiae
Párr.	Párrafo
PBQ-SF	Personality Belief Questionnaire Short Form
PostDoc	PostDoctor
UdeA	Universidad de Antioquia
WRI	Wire Rope insulator

Resumen

Este caso de estudio presenta un análisis de la caracterización y del comportamiento dinámico de un aislador sísmico diseñado específicamente para proteger equipos de una subestación eléctrica de 230 kV, una infraestructura esencial en la transmisión de energía eléctrica. En zonas con alta actividad sísmica, garantizar la estabilidad y funcionalidad de estas subestaciones es fundamental para evitar interrupciones en el suministro eléctrico y preservar la integridad de la red.

La investigación se desarrolló mediante la modelación de la respuesta dinámica del sistema subestación-aislador bajo condiciones sísmicas, utilizando softwares de elementos finitos. En este contexto, se analizaron parámetros críticos como las frecuencias naturales, desplazamientos y fuerzas inducidas sobre el equipo de la subestación con y sin la implementación del aislador sísmico. Los resultados obtenidos indican que el aislador reduce significativamente la transmisión de fuerzas hacia el equipo de la subestación, y aumentando los periodos de vibración de la estructura.

Como conclusión, el caso de estudio enfatiza la efectividad del aislador sísmico como una solución de protección estructural en entornos de alta sismicidad, sugiriendo que su implementación en subestaciones y otras infraestructuras críticas puede asegurar una mayor resiliencia frente a eventos sísmicos. Se recomienda la adopción de esta tecnología en instalaciones de similar importancia para mejorar la seguridad y garantizar la continuidad del servicio eléctrico, protegiendo así tanto la infraestructura como la sociedad que depende de ella.

Palabras clave: Aislador sísmico, Análisis dinámico, investigación Subestación eléctrica, Comportamiento sísmico.

Abstract

This case study analyzes the dynamic behavior and performance of a seismic isolator designed to protect equipment in a 230 kV electrical substation—an essential component of power transmission infrastructure. In seismically active regions, maintaining the stability and functionality of these substations is critical to ensuring uninterrupted power supply and preserving network integrity.

The study employed finite element modeling to evaluate the substation-isolator system under seismic conditions. Key parameters, including natural frequencies, displacements, and forces on substation equipment, were analyzed both with and without the isolator. Results demonstrate that the isolator effectively mitigates force transmission to the equipment and increases the structure's vibration periods.

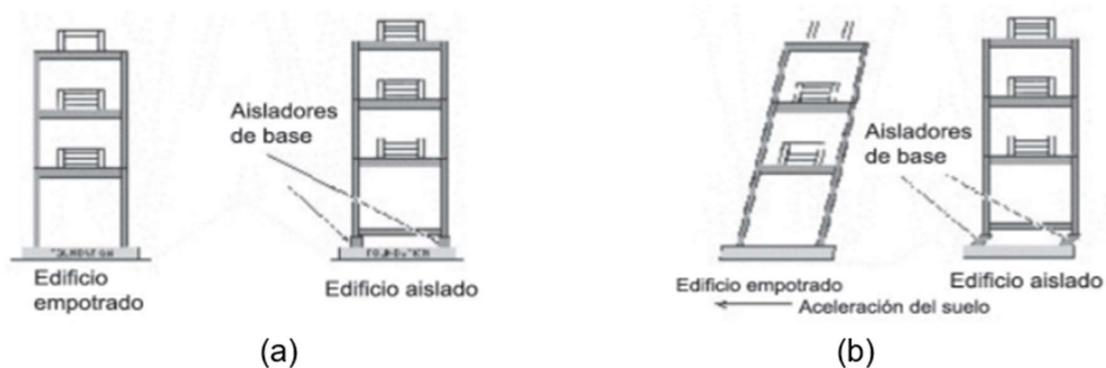
In conclusion, the findings confirm the seismic isolator's effectiveness as a structural protection solution in high-seismic areas. Its adoption in substations and other critical infrastructures is recommended to enhance resilience, safeguard infrastructure, and ensure uninterrupted electric service, thereby benefiting both the system and the communities that depend on it.

Keywords: Seismic isolator, Dynamic analysis, Electrical substation, Seismic behavior

Introducción

En regiones sísmicamente activas, la protección de estructuras indispensables, como las subestaciones eléctricas, es fundamental para garantizar la continuidad del suministro eléctrico al minimizar los daños durante y después de un evento sísmico. Los aisladores sísmicos se han utilizado ampliamente como una solución efectiva para mitigar las fuerzas dinámicas inducidas por los terremotos, mejorando la resiliencia de las estructuras y equipos sensibles. Estos dispositivos funcionan desacoplando la estructura de la base, permitiendo que se mueva de manera independiente y reduciendo la transmisión de energía sísmica hacia los equipos protegidos (Kelly, *Earthquake-resistant design with rubber*, 1997).

Figura 1. Ubicación y comportamiento de los aisladores de base



Nota. Fuente. (González & Aguilar, 2005)

El desarrollo de modelos precisos para la caracterización y análisis dinámico de los aisladores sísmicos es esencial para optimizar su diseño y eficacia. Según (Constantinou, Whittaker, & Reinhorn, 1998), la comprensión detallada de las propiedades mecánicas y dinámicas de los materiales y componentes de los aisladores permite predecir con mayor precisión su comportamiento bajo cargas sísmicas. Esto incluye aspectos como la rigidez, el amortiguamiento y el comportamiento no lineal, los cuales son cruciales para el diseño de sistemas de aislamiento que sean eficientes y fiables.

El desarrollo de modelos precisos para la caracterización y análisis dinámico de los aisladores sísmicos es esencial para optimizar su diseño y eficacia. Según (Constantinou,

Whittaker, & Reinhorn, 1998), la comprensión detallada de las propiedades mecánicas y dinámicas de los materiales y componentes de los aisladores permite predecir con mayor precisión su comportamiento bajo cargas sísmicas. Esto incluye aspectos como la rigidez, el amortiguamiento y el comportamiento no lineal, los cuales son cruciales para el diseño de sistemas de aislamiento que sean eficientes y fiables.

El uso de herramientas computacionales para la ejecución de modelos matemáticos ha avanzado significativamente, permitiendo a los ingenieros realizar análisis detallados y pruebas virtuales de los aisladores sísmicos en una variedad de escenarios sísmicos. Estos modelos no solo ayudan a predecir el comportamiento dinámico de los aisladores, sino que también son fundamentales para la validación y mejora continua del diseño. Por ejemplo, investigaciones recientes han destacado la importancia de la validación experimental de los modelos de simulación para asegurar que las predicciones teóricas se alineen con el rendimiento real observado en pruebas de laboratorio y de campo (Naeim & Kelly, 1999).

Por lo cual, esta monografía tiene como objetivo implementar un modelo para la caracterización y el análisis dinámico de un aislador sísmico destinado a proteger equipos de una subestación eléctrica. Para lograr este objetivo, se llevarán a cabo varias tareas específicas que incluyen la caracterización del material y geométrica del aislador, la elección de un modelo matemático y de la herramienta de cómputo de simulación, y la evaluación del desempeño del aislador bajo condiciones sísmicas. A través de estos esfuerzos, se espera proporcionar recomendaciones valiosas para mejorar la eficacia de los sistemas de aislamiento sísmico en subestaciones eléctricas, contribuyendo así a la protección de infraestructuras críticas en zonas sísmicamente activas.

Planteamiento del problema

Los equipos eléctricos de alto voltaje, como interruptores de circuito, pararrayos o transformadores, en las subestaciones no están diseñados para soportar cargas excepcionales como las que generan los terremotos. Esto ha quedado demostrado en terremotos significativos como los de Northridge (1994) y Kobe (1995), donde este tipo de equipos resultó dañado, afectando la operatividad de infraestructuras eléctricas críticas.

Para mitigar el riesgo sísmico, se pueden adoptar diversas estrategias. Sin embargo, estas estrategias no suelen ser económicamente viables siempre. Dado que los equipos actuales tienen una vida útil de varias décadas, es difícil reemplazarlos a corto plazo y la electricidad es vital para cualquier actividad humana actualmente. Garantizar la operatividad de un sistema eléctrico posterior a un sismo representa una gran ventaja en un plan de acción.

Como solución inmediata y eficiente, se propone el uso de sistemas de aislamiento sísmico, como los amortiguadores de cable de acero, que permiten reducir las tensiones inducidas por los terremotos sin necesidad de reemplazar los equipos existentes. Estos dispositivos, que disipan energía mediante la fricción entre los cables, son una opción prometedora debido a su capacidad de proporcionar aislamiento en múltiples direcciones y reducir las fuerzas flexionales que predominan durante un sismo.

En resumen, el problema principal es la vulnerabilidad sísmica de los equipos eléctricos de alto voltaje, cuya falla puede afectar gravemente la infraestructura eléctrica en caso de sismos, y la necesidad de soluciones eficientes para mejorar su protección sin recurrir a la sustitución completa del equipo.

Antecedentes

El campo de la protección sísmica ha avanzado significativamente en las últimas décadas, con investigaciones recientes que han abordado la caracterización y el análisis dinámico de diversos tipos de aisladores. Estos estudios se han centrado en el comportamiento de los aisladores bajo diferentes condiciones sísmicas, proporcionando datos valiosos para mejorar su diseño y eficacia (Luo et al., 2022).

Las herramientas de modelado y simulación, como el método de elementos finitos (FEM), se utilizan ampliamente para predecir el comportamiento dinámico de los aisladores sísmicos. Estos modelos permiten evaluar la respuesta de los aisladores bajo diferentes escenarios sísmicos y optimizar su diseño. La capacidad de simular diferentes condiciones y ajustar parámetros de diseño en un entorno virtual ha resultado crucial para la evolución de estos dispositivos (Chen et al., 2021).

Ejemplos prácticos de implementación de aisladores sísmicos en subestaciones eléctricas han proporcionado datos valiosos sobre su rendimiento en eventos sísmicos reales. Estos estudios de caso ayudan a validar los modelos teóricos y ajustar los diseños según las necesidades específicas de cada proyecto. A pesar de los avances significativos, aún existen desafíos en la integración de aisladores sísmicos en subestaciones eléctricas, como la optimización de costos y la adaptación a diferentes entornos geológicos. Las futuras investigaciones se enfocarán en el desarrollo de aisladores más eficientes y en la implementación de tecnologías inteligentes que permitan una monitorización y ajuste en tiempo real de los sistemas de aislamiento sísmico, asegurando así una mayor protección y resiliencia ante terremotos (Li et al., 2022).

Justificación

Con base en lo manifestado en el título A capítulo A.2.5.1.1 de la Norma Sismo Resistente de Colombia – NSR-10, las subestaciones eléctricas son edificaciones indispensables, es decir, son aquellas edificaciones de atención a la comunidad que deben funcionar durante y después de un sismo, y cuya operación no puede ser trasladada rápidamente a un lugar alternativo. (Comisión asesora permanente para el régimen de construcciones sismo resistentes, 2010). Por esta razón, el diseño de las subestaciones eléctricas plantea una serie de retos desde el punto de vista de operatividad de cada uno de los elementos que la componen.

Por otro lado, los equipos de patio de subestaciones eléctricas tienen la particularidad de tener una gran esbeltez, es decir, la relación entre la altura y el ancho de la base es muy alta. Un edificio convencional de 20 pisos tiene una esbeltez del orden de magnitud de tres (60 m de alto/20m de base), en cambio, un equipo de patio tiene una esbeltez del orden de magnitud de diez (4.0 m de altura/0.4m de base). De esta forma y por la configuración típica de este tipo de equipos, el centro de masa está localizado en una zona que ante la ocurrencia de un evento sísmico genera momentos y cortantes que en algunos casos llegan a gobernar el diseño, es decir, los esfuerzos asociados superan las solicitaciones derivadas de la carga axial. Así mismo, desde el punto de vista de su respuesta ante movimientos sísmicos: los equipos de patio de subestaciones eléctricas presentan dentro de sus componentes principales elementos fabricados de porcelana, debido al aislamiento eléctrico o químico, dependiendo de las condiciones y funcionamiento del equipo; condición que los hace muy frágiles, es decir, se rompen repentinamente ante fuerzas no muy grandes. De esta forma, el diseño del sistema de cimentación de un equipo de subestación eléctrica no solo está condicionado por la disipación de esfuerzos en la masa de suelo, sino que también presenta una serie de restricciones en cuanto a deformaciones de los componentes.

De allí radica la importancia de aislar sísmicamente los equipos del sistema de cimentación, procurando mitigar la excitación en la base, lo cual, disminuya de forma considerable las fuerzas inerciales que inducirían un aumento de las fuerzas de cortante y momento en la conexión estructura-cimentación y consecuentemente deformaciones del sistema.

Objetivos

Objetivo general

Realizar la caracterización y análisis dinámico de un aislador sísmico del tipo mecánico destinado a proteger equipos de subestación eléctrica a 230 kV, evaluando su efectividad en la mitigación de vibraciones y fuerzas durante un evento sísmico

Objetivos específicos

- Identificar y documentar las propiedades del material y geometría del aislador sísmico, incluyendo propiedades mecánicas como rigidez, amortiguamiento y comportamiento lineal bajo cargas dinámicas en función del equipo de la subestación elegido.
- Ejecutar un modelo matemático en un entorno de simulación computacional (software) para analizar el comportamiento dinámico del aislador sísmico bajo diferentes escenarios sísmicos, validando el modelo con datos teóricos.
- Evaluar la efectividad del aislador sísmico en la protección de un equipo de una subestación eléctrica a 230 kV mediante modelaciones dinámicas, proponiendo mínimo un tipo de configuración del sistema de aislamiento sísmica.

Revisión de Literatura

Los aisladores sísmicos son dispositivos diseñados para proteger estructuras y equipos contra los efectos dañinos de los terremotos. Estos dispositivos funcionan al desacoplar el movimiento del suelo del movimiento de la estructura, permitiendo que la energía sísmica se disipe de manera controlada y reduciendo las fuerzas que actúan sobre la estructura. Este principio de funcionamiento es esencial para mitigar los daños y asegurar la continuidad operativa de infraestructuras críticas, como las subestaciones eléctricas (Mazza et al., 2021).

El aislamiento sísmico se basa en tres principios fundamentales: flexibilidad, disipación de energía y rigidez. Los aisladores son flexibles en el plano horizontal, lo que permite movimientos de vaivén que desacoplan el suelo de la estructura. Adicionalmente, integran materiales viscoelásticos o de fricción para disipar la energía y reducir las vibraciones inducidas por los sismos. Algunos tipos de aisladores también ofrecen rigidez vertical, permitiendo soportar las cargas estáticas sin comprometer la estabilidad de la estructura (Anastasopoulos et al., 2020).

Existen varios tipos de aisladores sísmicos, entre los que destacan los aisladores de laminado de goma, los aisladores de fricción y los aisladores de deslizamiento. Los aisladores de laminado de goma, compuestos por capas alternadas de goma y acero, permiten grandes desplazamientos horizontales mientras soportan cargas verticales significativas. Los aisladores de fricción utilizan superficies de fricción para disipar la energía sísmica, y los aisladores de deslizamiento permiten movimientos horizontales mediante superficies de deslizamiento lubricadas, facilitando así el desacoplamiento entre la estructura y el movimiento del suelo (Zhou et al., 2019).

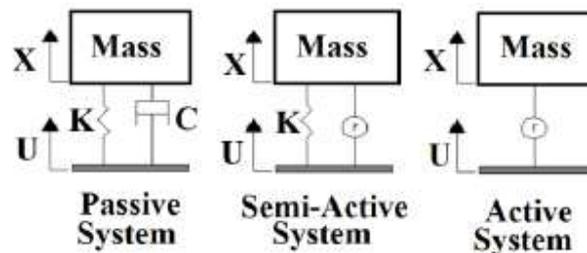
El aislamiento de base es una técnica ya utilizada en algunas aplicaciones, que ha sido juzgada como una de las técnicas más adecuadas para reducir los efectos sísmicos en las estructuras. Desafortunadamente, los aparatos eléctricos de alta tensión tienen formas generalmente esbeltas y masas colocadas en la parte superior y están realizados con materiales frágiles, que no tienen suficientes recursos de ductilidad para limitar las consecuencias de una acción sísmica. Además, el terremoto produce esfuerzos de flexión, claramente predominan las axiales; por lo tanto, los esfuerzos de tracción en los dispositivos aisladores son inevitables.

Tipos de Aisladores

El sistema de aislamiento se clasifica en tres tipos, sistema pasivo, sistema activo y sistema semiactivo. El sistema de aislamiento activo de vibraciones generalmente puede lograr un alto rendimiento en la supresión de las vibraciones estructurales (Klembczyk, 2014). Los aislamientos de vibraciones semiactivos, también llamados sistemas adaptativos-pasivos, contienen junto con el resorte y los amortiguadores, un circuito de retroalimentación que consta de un sensor, un controlador y un actuador (como aleaciones magnetorreológicas - MR o con memoria de forma). El circuito de retroalimentación monitorea la excitación de vibración en tiempo real utilizando sensores y controla los actuadores para disipar la energía y logra un aislamiento relativamente mejor que los métodos de aislamiento pasivo (Preumont, 2002). Sin embargo, un sistema de aislamiento completamente activo (Figura 2) aísla la vibración directamente utilizando sistemas de actuadores sin tener amortiguadores pasivos adicionales (Karnopp, 1995).

Muchos investigadores han estudiado el rendimiento de varios métodos de control para la amortiguación usando fluidos MR (Zhu & Rui, 2014) afirmaron que la propiedad de amortiguación de los actuadores de fluido MR se puede controlar variando la viscosidad del fluido MR usando un campo magnético. Sin embargo, los sistemas activos requieren un diseño muy intensivo y sensores y procesadores para proporcionar datos en tiempo real al aislador. Además, requiere una gran cantidad de energía para funcionar. Estas características necesarias de los sistemas de aislamiento activo lo convierten en el diseño de aislamiento más costoso. Como consecuencia del gasto y el gran requisito de energía, los sistemas de aislamiento activo son muy poco comunes en las principales industrias, excepto en aplicaciones críticas que requieren un alto nivel de aislamiento, como equipos de prueba sensibles (Rivin, 2003).

Figura 2. Tipos de sistemas de aislamiento



Nota. Fuente (Karnopp, 1995)

El aislamiento pasivo de vibraciones, por otro lado, se refiere al aislamiento de vibraciones o mitigación de vibraciones utilizando técnicas pasivas como almohadillas de goma o resortes mecánicos. En su forma más simple, se representa como una combinación de un resorte que tiene rigidez (K) y un amortiguador que tiene coeficiente de amortiguamiento (C), como se muestra en la Figura 2. El resorte proporciona la elasticidad a la estructura y la disipación de energía la proporciona el amortiguador. Actualmente, los dispositivos de disipación de energía pasiva son los sistemas de protección contra vibraciones más utilizados en industrias y edificios debido a su diseño simple y bajo costo (Rivin, 2003). Estos sistemas abarcan una gama de materiales y dispositivos para mejorar la amortiguación, la rigidez y la resistencia, y pueden utilizarse tanto para la mitigación de riesgos naturales como para la rehabilitación de estructuras antiguas o deficientes. A diferencia de los sistemas semiactivos, los sistemas pasivos de disipación de energía no necesitan una fuente de alimentación externa para funcionar. Además, dado que los dispositivos de disipación de energía no son una parte integral de la estructura de soporte, pueden reemplazarse fácilmente para realizar tareas de mantenimiento sin comprometer la integridad estructural (Li & Li, 2009).

Los aisladores de vibración pasivos diseñados convencionalmente presentan un comportamiento lineal tanto en rigidez elástica como en amortiguación, lo que restringe la capacidad de disipación de energía (Ibrahim, 2008). El diseño de aisladores pasivos convencionales necesita un equilibrio entre rigidez y amortiguación. La baja transmisibilidad en un amplio rango de frecuencias se puede obtener reduciendo la rigidez elástica del aislador lo más posible; sin embargo, tal caso conducirá

a grandes desplazamientos estáticos y cuasiestáticos que probablemente sean perjudiciales para el equipo soportado (Simmons, 2007).

Por otra parte, es necesario aumentar la amortiguación del aislador para reducir la transmisibilidad en la resonancia, lo que puede provocar un deterioro de la transmisibilidad en el rango de alta frecuencia. Además, los aisladores pasivos lineales son útiles solo si las frecuencias de excitación están muy por encima de la frecuencia natural de los aisladores y, por lo tanto, están limitados a casos en los que hay perturbaciones ambientales moderadas. Sin embargo, en casos como choques, movimientos aleatorios del suelo o cargas de impacto, el espectro contiene frecuencias bajas que son peligrosas para las estructuras o el equipo. Por lo tanto, las limitaciones de los lineales se pueden superar desarrollando un aislador de vibraciones pasivo que exhiba un comportamiento no lineal (Ibrahim, 2008).

Varios autores han desarrollado diferentes tipos de aisladores de vibraciones no lineales y han investigado los comportamientos dinámicos únicos (Popov G., 1995). (Ibrahim, 2008) realizó un estudio exhaustivo de los desarrollos recientes de aisladores de vibraciones no lineales, en el que muchos estudios citados revelan que la introducción de amortiguación y rigidez no lineales son de gran beneficio en el aislamiento de vibraciones. Recientemente, los aisladores de cable de acero (WRI), un tipo de aislador pasivo que exhibe un comportamiento no lineal tanto en rigidez elástica como en amortiguación, se han convertido en objeto de estudios intensivos (Paolacci & Giannini, 2008). Varias investigaciones han permitido clasificar los amortiguadores de cable de acero (wire rope isolators – WRI por sus siglas en inglés) como el sistema más adecuado para el aislamiento de base de equipos eléctricos (Demetriades 1993, Serino et al 1994, Di Donna et al. 2002).

El aislador de cable metálico (WRI) es un tipo de aislador pasivo, fabricado uniendo dos piezas metálicas mediante alambre de acero, como puede verse en la Figura 3, que actúa como un muelle no lineal con amortiguación interna. El número y el tamaño de los bucles y las dimensiones del cable pueden variar mucho, y todos ellos afectan a la dinámica del WRI. Además de los parámetros del cable metálico, la formación del cable, como la altura, la anchura y el número de bucles y su

ángulo vertical pueden variarse en diseños específicos de la aplicación, para soportar cargas en las direcciones y rangos de frecuencia elegidos. (Rytömaa et al, 2023).

Figura 3 Wire Rope isolators (WRI)



Nota. Fuente (ENIDINE, 2020)

Aplicación y Beneficios

La implementación de aisladores sísmicos en subestaciones eléctricas implica su instalación bajo equipos críticos como transformadores, interruptores y sistemas de control. Estos dispositivos están diseñados para soportar tanto las cargas estáticas del equipo como las fuerzas dinámicas inducidas por un sismo. La instalación y mantenimiento regular de los aisladores son esenciales para garantizar su efectividad a largo plazo. Esto incluye la verificación periódica de su estado y el ajuste de sus componentes según sea necesario (Spencer & Nagarajah, 2003). El uso de aisladores sísmicos en subestaciones eléctricas ofrece numerosos beneficios. Entre ellos se encuentran la reducción del daño estructural y funcional, asegurando la operatividad post-sismo, y la continuidad del suministro eléctrico, vital para la respuesta de emergencia y la recuperación post-desastre (Chaudhary, 2014). Además, se logran ahorros en costos de reparación y mantenimiento debido a la reducción del daño estructural y de equipos (Ismail, 2018).

Los aisladores sísmicos han demostrado ser una solución eficaz para proteger las subestaciones eléctricas en diversas partes del mundo, adaptándose a diferentes tipos de movimientos sísmicos y condiciones geográficas. Por ejemplo, La subestación de San Francisco, que utiliza aisladores elastoméricos, demostró una notable resistencia durante el terremoto de Loma Prieta en 1989 (Johnson et al., 1995). En Japón, las subestaciones adoptan ampliamente aisladores FPS debido a la alta sismicidad del país, proporcionando un rendimiento fiable durante eventos

sísmicos importantes (Kikuchi & Nakamura, 2003). Además, en Nueva Zelanda, la subestación de Wellington ha implementado aisladores de goma con núcleo de plomo (LRB) y ha mostrado una resiliencia significativa frente a los frecuentes terremotos en la región (Smith et al., 2010). En Chile, la subestación de Santiago ha empleado una combinación de aisladores elastoméricos y de fricción pendular, lo que ha permitido mantener la operatividad de sus equipos durante el terremoto de 2010 (Perez & Rodriguez, 2011). Otro caso relevante es la subestación de Los Ángeles, que ha utilizado aisladores de rodillos y deslizadores, evidenciando una reducción sustancial en las fuerzas sísmicas transmitidas durante el sismo de Northridge en 1994 (Brown & Davis, 1996). Estos estudios de caso subrayan la eficacia de los aisladores sísmicos en diversas condiciones geográficas y sísmicas, destacando su importancia en la protección de infraestructuras críticas.

Metodología

Modelado del equipo de la subestación

En la primera etapa, se realiza el modelado independiente del equipo de la subestación en el software de elementos finitos SAP2000, sin incluir la estructura de soporte ni los aisladores sísmicos. El objetivo de esta fase es caracterizar de manera idealizada las propiedades físicas y dinámicas intrínsecas del equipo en el entorno de modelación, permitiendo una representación precisa que pueda ser calibrada para reflejar el comportamiento real del equipo.

Modelado de la estructura de soporte

En esta etapa, se modela la estructura de soporte de forma independiente, sin incluir el equipo de la subestación ni el aislador. La estructura de soporte es un componente crucial, ya que su rigidez, resistencia y capacidad para disipar energía influyen directamente en la respuesta global del sistema. Si bien el diseño detallado de la estructura queda fuera del alcance de este documento, este modelado es esencial para identificar y corregir posibles errores en etapas posteriores, además de permitir un análisis aislado del comportamiento de la estructura, lo que contribuirá a una comprensión más precisa de la interacción entre la estructura y el equipo en los pasos siguientes.

Modelado del equipo de subestación y la estructura de soporte juntos

En la tercera fase, se integra el modelo del equipo de subestación con el de la estructura de soporte, permitiendo evaluar la interacción entre ambos componentes. Este modelo conjunto sirve como punto de referencia clave para el caso de estudio, ya que representa el comportamiento del sistema completo tal como se construye en condiciones normales, sin aisladores. En esta etapa también se aplican las cargas que actuarán sobre la estructura, incluyendo las cargas gravitacionales y las sísmicas, de acuerdo con el espectro de respuesta definido para la ubicación específica de la subestación.

Modelado del equipo de subestación, estructura de soporte y aislador juntos

Finalmente, en esta etapa se incorpora el aislador sísmico en el modelo, formando un sistema integrado que incluye el equipo de subestación, la estructura de soporte y el aislador. Este modelo completo permite analizar cómo el sistema en su conjunto responde a cargas ejercidas y

evaluar la eficacia de los aisladores para proteger el equipo de posibles daños. Para esta etapa deberá estar definido ya el tipo, la distribución y propiedades de los aisladores a modelar.

Una vez realizado el modelo, se debe realizar una comparación entre los modelos con y sin aislador, de esta forma, será posible evaluar las ventajas y desventajas de la implementación de este tipo de elementos en equipos de subestación.

Estudio de caso

Se proyecta analizar la implementación de aisladores sísmicos en la base de un equipo del tipo descargador de sobretensiones perteneciente a una subestación eléctrica a 230 kV. Con el propósito de ajustar el caso de estudio a condiciones reales, se enfoca la instalación de este equipo en una subestación eléctrica localizada en la ciudad de Santiago de Cali. Para lograr el objetivo propuesto, se procede con el desarrollo de la metodología propuesta.

Equipo de subestación

Se eligió un pararrayos de 230 kV para el estudio debido a su papel crucial en la protección de equipos de alta tensión en subestaciones. Este equipo es fundamental para salvaguardar los sistemas eléctricos de las descargas atmosférica, evitando daños en transformadores, interruptores y otros componentes clave. Dado que opera a tensiones elevadas, su fiabilidad es esencial para garantizar la continuidad del servicio eléctrico y la estabilidad de la red. Su correcto funcionamiento es vital para la seguridad y eficiencia de la infraestructura eléctrica en las subestaciones. Para el equipo específico la ficha técnica no indica una frecuencia natural de vibración, sin embargo, la bibliografía señala un rango de 5 a 15 Hz dentro del cual se seleccionó 8 Hz como frecuencia natural del equipo.

Tabla 1

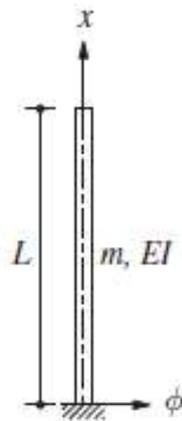
Parámetros de equipo de descargador de sobretensión 230kv

f [Hz]	ω [rad/s]	L [m]	E [GPa]	m [kg]	W/L[kN/m]
8.0	50.27	2.216	70	87.2	0.386

Fuente. Elaboración propia

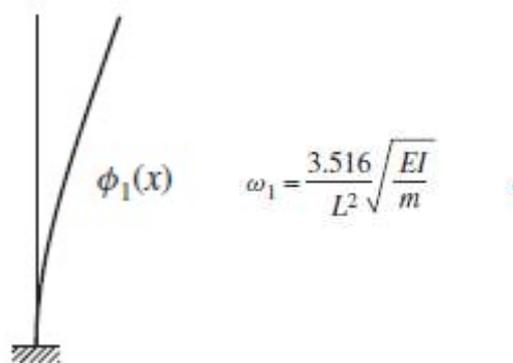
El primer reto es realizar la modelación de un equipo de geometría compleja como lo puede ser el descargador de sobretensión, el cual, está compuesto por diferentes tipos de material y sección irregular. Tomando como premisa los principios de la dinámica de estructuras, se realiza una simplificación del equipo a un elemento de sección constante con distribución de masa homogénea el cual, está empotrado en la base (Ver Figura 4). El procedimiento de análisis se realiza con base en lo planteado por Chopra, A. K. (2017) para elementos con las características ya descritas vibrando en el primer modo.

Figura 4 Representación esquemática de un elemento de sección constante y distribución de masa homogénea.



Nota. Fuente (Chopra, A. K.,2017)

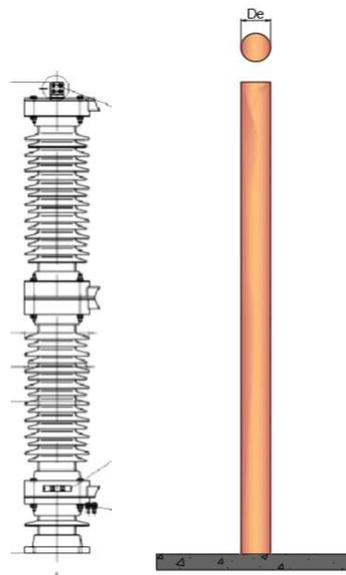
Figura 5 Ecuación de frecuencias naturales de elemento en voladizo empotrado en la base



Nota. Fuente (Chopra, A. K.,2017)

Teniendo en cuenta lo anterior, se tienen como variables conocidas del equipo, la frecuencia, la longitud, la masa. Adicionalmente, se conoce el material, dado que, se idealiza un solo material a lo largo de la sección, el cual, se define como porcelana. De esta forma, solo queda como variable desconocida el segundo momento de inercia, el cual, depende de la sección del elemento. Al realizar los respectivos cálculos, se define un elemento de sección circular con un diámetro equivalente [De], que posee las propiedades descritas del equipo en la Tabla 1. El valor calculado de diámetro equivalente es de 0.087 m.

Figura 6 Esquema de idealización de equipo

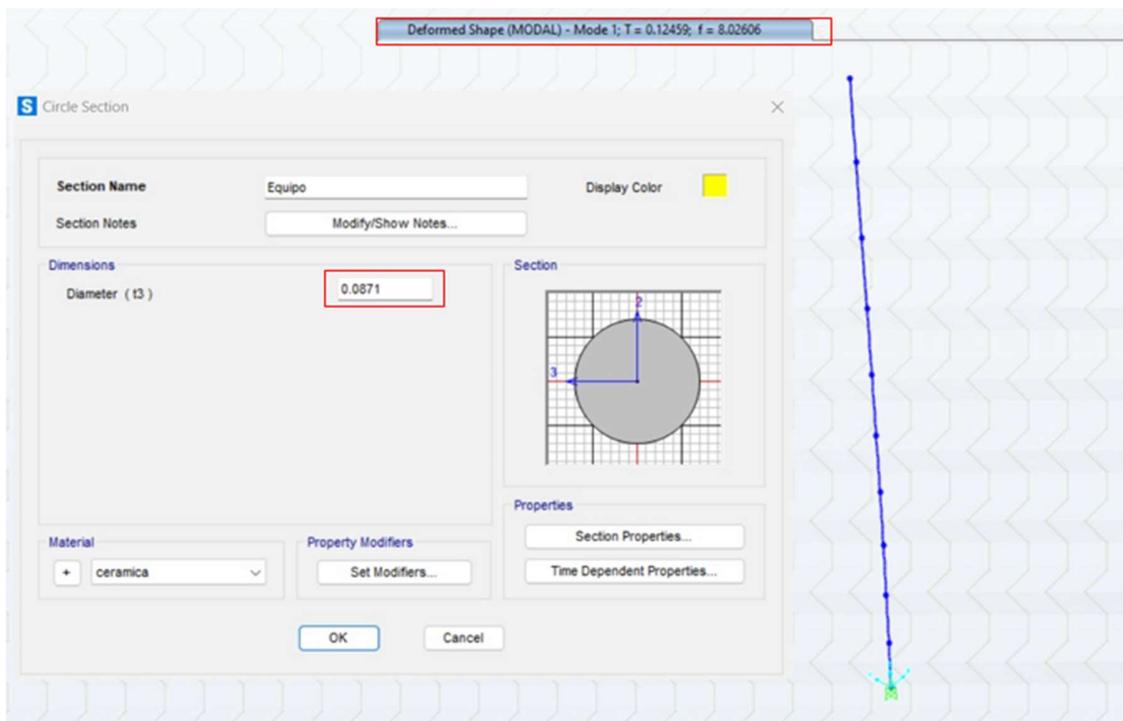


Fuente. Elaboración propia

Posteriormente, con el propósito de validar los resultados, se realiza la modelación de este sistema en un software de elementos finitos, en este caso SAP 2000, en donde se ingresa el material descrito anteriormente, pero con un peso específico infinitesimal con motivo de poder ingresar el peso como una carga gravitacional distribuida a través del elemento. Para el equipo seleccionado, se aplicó una fuerza de 0.386 KN/m, la cual, se deriva de dividir el peso del equipo por la longitud del elemento. Al configurara el modelo con los parámetros descritos, los resultados validan las hipótesis, es decir, el diámetro definido para idealizar el equipo genera una frecuencia similar

[8.02 Hz] a la frecuencia real del equipo [8.00 Hz]. De esta forma, se logra representar el equipo del tipo descargador de sobretensiones por medio de un modelo matemático.

Figura 7 Modelo matemático del descargador de sobretensiones.

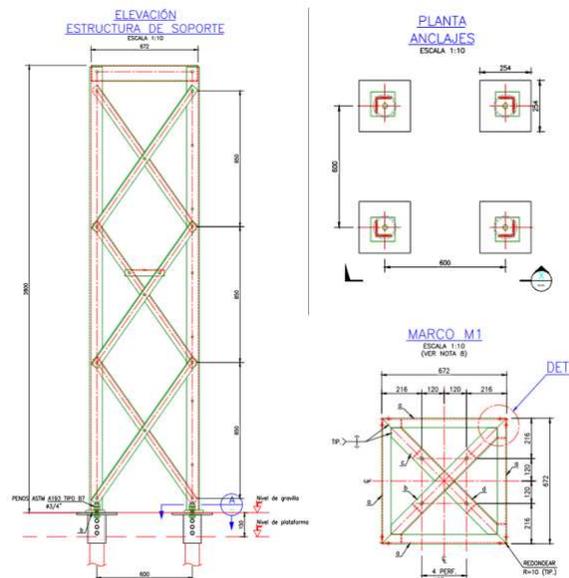


Fuente. Elaboración propia

Estructura de soporte

Aunque el análisis detallado de la estructura de soporte no forma parte de lo abordado en este documento, es importante realizar una caracterización dinámica de este elemento, de tal forma que los resultados estén dentro de los rangos esperados para esta tipología de estructuras. La estructura se modela utilizando elementos tipo *frame* con las secciones y configuraciones indicadas en la Figura 8. A estos elementos se les asigna acero A572 Gr50 como material, con propiedades específicas de densidad ($\gamma = 77 \text{ kN/m}^3$) y límite de fluencia ($F_y = 350 \text{ MPa}$). En este modelo, se asume un comportamiento elástico y lineal para todos los elementos, mientras que las conexiones entre los elementos diagonales y las bases de la estructura se consideran articuladas.

Figura 8. Configuración de estructura de soporte

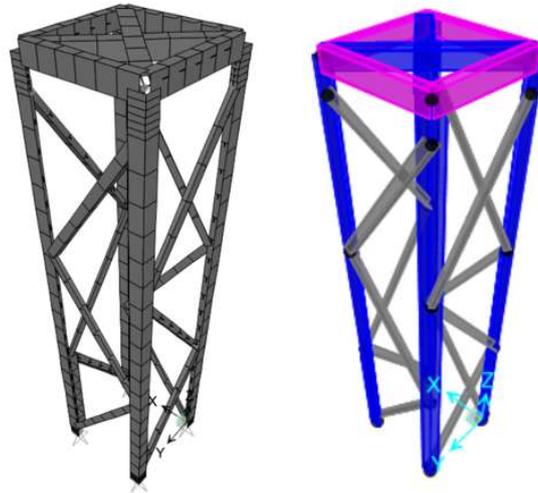


Fuente. Elaboración propia

Para la configuración de la estructura, se implementamos tres (3) tipologías de sección, para las columnas se usó ángulo L80×80×8, las diagonales tienen como sección ángulo L50×50×5 y, por último, la sección usada para el apoyo del equipo en la parte superior es en ángulos L100×50×5

Una vez configurado el modelo, se tiene una masa de aproximadamente 191.4 kg. y una frecuencia natural de vibración en su modo principal de 37.21 Hz. Vale la pena destacar que, para considerar este tipo de elementos rígidos que se puedan analizar por el método de la fuerza horizontal equivalente, la frecuencia deberá ser superior a 30 Hz (SUBGERENCIA PLANIFICACIÓN Y OPERACIÓN CHILECTRA SA, 2003). Por tal razón, los resultados obtenidos son satisfactorios y se alinean con las hipótesis de análisis. Por lo cual, se considera que el modelo representa adecuadamente la estructura de soporte.

Figura 9 Modelo de estructura de soporte

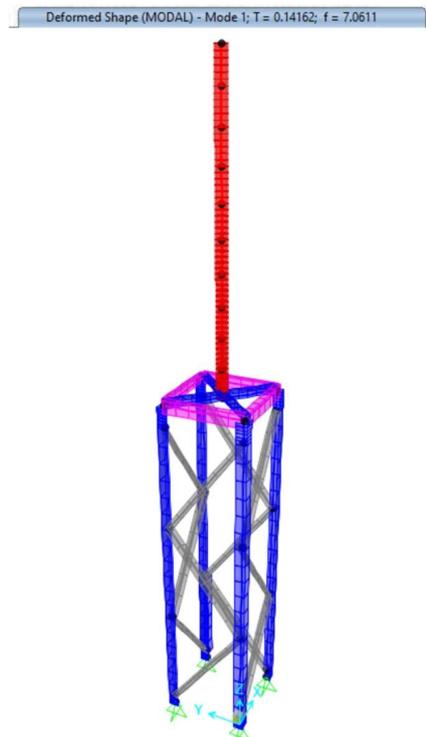


Fuente. Elaboración propia

Estructura de Soporte + equipo

Una vez que se han identificado y calibrado las propiedades de los elementos que representan el equipo de la subestación y la estructura de soporte, se elabora un modelo que integra todo el conjunto (estructura de soporte + equipo), de acuerdo con las características establecidas en los modelos 1 y 2.

Figura 10 Modelo en SAP 2000 estructura de soporte + equipo



Fuente. Elaboración propia

En complemento, con el propósito de simular la magnitud de un posible evento sísmico que podría generar afectaciones sobre la estructura de análisis, se define un espectro de aceleraciones en el rango elástico con base en los lineamientos establecidos por la NSR-10 en su título A. Dado que la normativa sismorresistente de Colombia, NSR-10 establece zonas de amenaza sísmica, se elige la Ciudad de Santiago de Cali debido a que está localizada en una zona de amenaza sísmica alta y a su vez, presenta suelos de diferentes perfiles según la clasificación de los perfiles de suelo presentados en la normativa sismo resistente de Colombia (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo, 2010).

Dentro de los parámetros dinámicos más relevantes en la construcción del espectro de aceleraciones, tenemos la consideración de un amortiguamiento del 5% ($\xi=5\%$), un coeficiente de importancia de 1.50 ($I=1.50$) por ser una estructura de categoría IV y los efectos locales asociados a un perfil de suelo tipo D.

Figura 11 Clasificación de los perfiles de suelo.

Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	$\bar{V}_s \geq 1500$ m/s
B	Perfil de roca de rigidez media	1500 m/s > $\bar{V}_s \geq 760$ m/s
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	760 m/s > $\bar{V}_s \geq 360$ m/s
	perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$N \geq 50$, o $\bar{\sigma}_u \geq 100$ kPa (≈ 1 kgf/cm ²)
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	360 m/s > $\bar{V}_s \geq 180$ m/s
	perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 > N \geq 15$, o 100 kPa (≈ 1 kgf/cm ²) > $\bar{\sigma}_u \geq 50$ kPa (≈ 0.5 kgf/cm ²)
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	180 m/s > \bar{V}_s
	perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas	$IP > 20$ $w \geq 40\%$ 50 kPa (≈ 0.50 kgf/cm ²) > $\bar{\sigma}_u$
F	Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista de acuerdo con el procedimiento de A.2.10. Se contemplan las siguientes subclases: F_1 — Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como: suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc. F_2 — Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas ($H > 3$ m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas). F_3 — Arcillas de muy alta plasticidad ($H > 7.5$ m con Índice de Plasticidad $IP > 75$) F_4 — Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda ($H > 36$ m)	

Fuente. (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo, 2010)

Figura 12 Valores del coeficiente F_a , para la zona de períodos 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.

Fuente. (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo, 2010)

Figura 13 Valores del coeficiente F_v , 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.

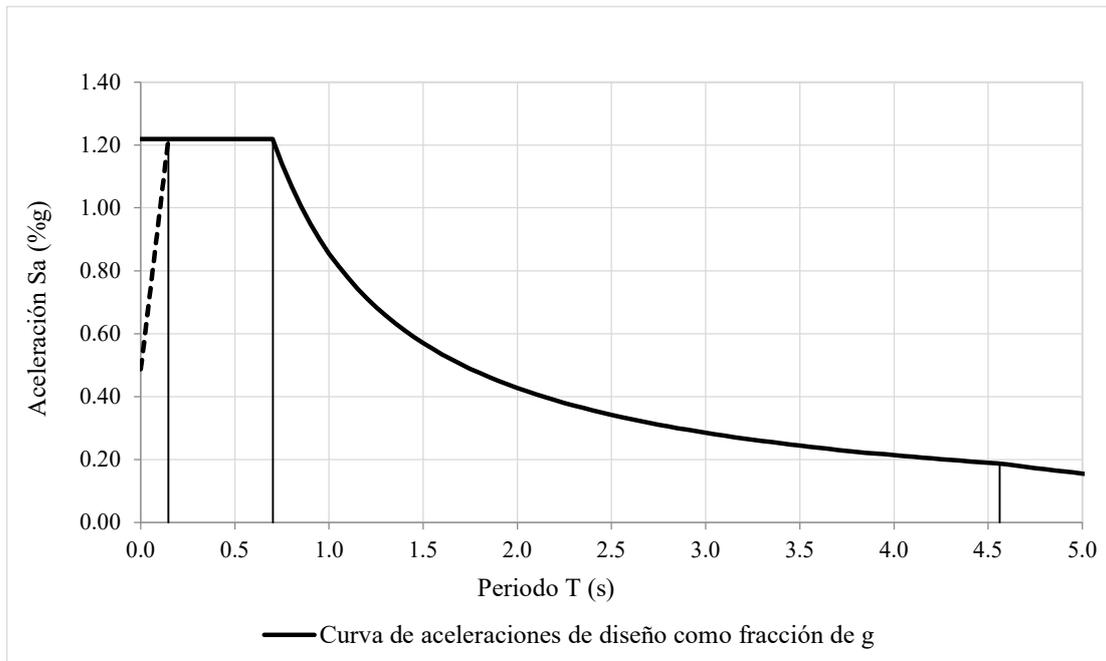
Fuente. (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo, 2010)

Tabla 2
Parámetros de efectos de sitio para la construcción del espectro de aceleraciones

Aa	Av	Fa	Fv	I	Zona amenaza sísmica	Perfil de suelo
0.25	0.25	1.30	1.90	1.50	Alta	D

Fuente. (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo, 2010)

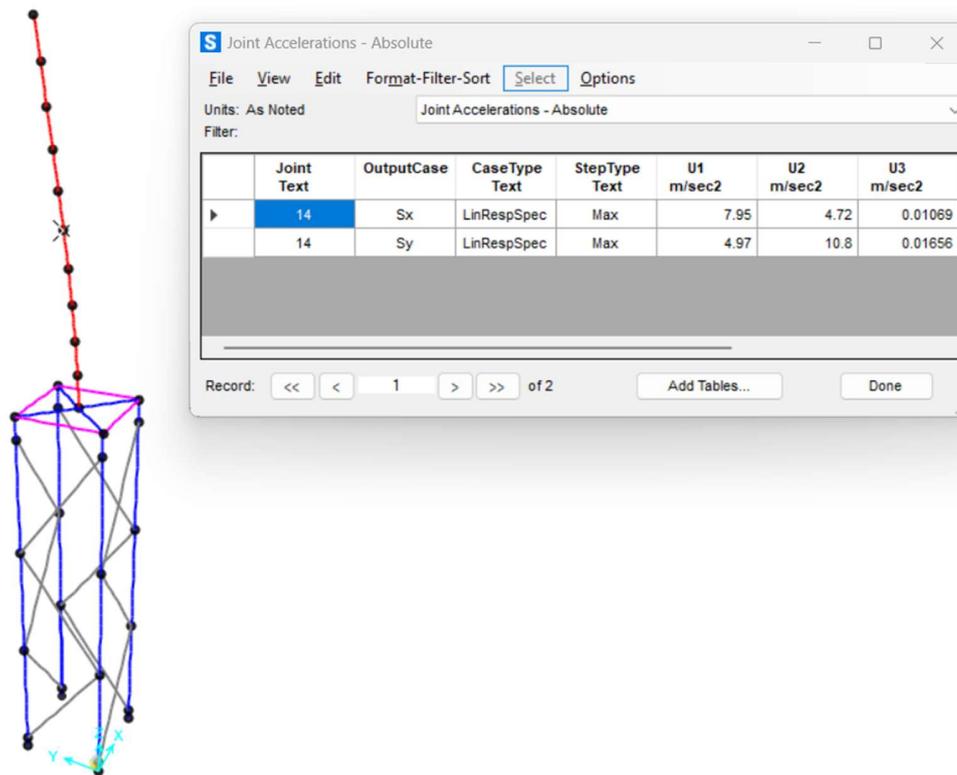
Figura 14 Espectro de aceleraciones



Fuente. Elaboración propia

Al definir un espectro de aceleraciones para el modelo y unificar los modelos de la estructura de soporte con el equipo, se obtiene una frecuencia natural del modo principal de 7.06 Hz. Además, se reportan aceleraciones máximas en el centro de masa del equipo de, aproximadamente, 7.95 m/s^2 , en dirección horizontal X, y de 10.8 m/s^2 en la dirección horizontal Y. y la aceleración máxima ortogonal 4.97 m/s^2 .

Figura 15 Aceleraciones en el centro de masa del equipo sin WRI



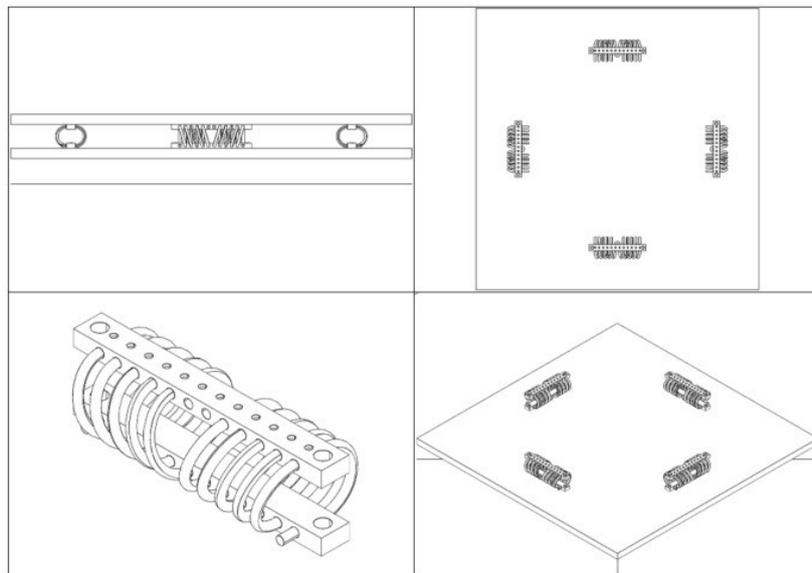
Fuente. Elaboración propia

Estructura de soporte + equipo + WRI

Considerando que el propósito es la implementación de aisladores sísmicos, se toma el sistema sin aislamiento en la base como referencia, de tal forma, que se pueda establecer una comparación entre los resultados con y sin aislamiento en la base; así mismo, poder validar si los resultados obtenidos son congruentes con los resultados asociados a la implementación de este tipo de dispositivos.

Para este modelo se optó por los aisladores tipo Wire Rope Isolators (WRI), dado que, dentro de la revisión bibliográfica se encontraron varios beneficios en su implementación resaltados en dicho capítulo. Del mismo modo, se proyecta una disposición de los aisladores como se observa en la Figura 16; teniendo en cuenta que el comportamiento de estos aisladores varía según la dirección de la carga aplicada, debido a que los aisladores poseen una rigidez mayor en el sentido longitudinal, por lo que se estableció una disposición en la cual dos aisladores quedaran con su eje fuerte orientado a 90° de los otros dos, de este modo si la carga llega en un sentido o en el otro el comportamiento será óptimo.

Figura 16 Disposición de los aisladores

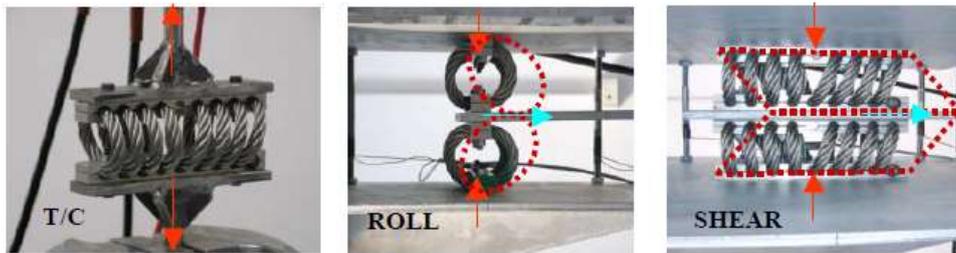


Fuente. Elaboración propia

Realizada la selección del tipo de aislador y su configuración en el sistema, se procede a elegir el tipo de dispositivo ideal en función de las solicitaciones del sistema. La selección del tipo de dispositivo se concreta por medio de catálogos de este tipo de productos. Dentro de los WRI también hay varios tipos, dado que, se varía el número de anillos de cable, el calibre, dimensiones del aislador, entre otros. Debido a esta cantidad de variables para escoger un aislador en específico, los fabricantes definen varios cálculos que acotan la selección.

Las propiedades a compresión corresponden a las cargas en la dirección axial del aislador, y el Shear-Roll indica las propiedades en el plano horizontal del aislador, ya sea en el sentido longitudinal como en el transversal (Figura 17)

Figura 17 Planos de acción de los WRI



Fuente: F. Paolacci and R. Giannini (2008)

Adicionalmente, los aisladores poseen una capacidad axial diferente a la capacidad a cortante. Así mismo, se definen diferentes valores de rigidez y deformación admisible en el rango elástico del aislador. En la

Tabla 4, se presentan las sollicitaciones máximas a base del sistema sin aislador, lo cual servirá para optimizar la selección del elemento. Es importante destacar que se asume una distribución homogénea de las fuerzas axiales y cortantes en los cuatro dispositivos proyectados, por tal razón, las sollicitaciones del aislador será la máxima reacción en la base dividida por el número de elementos implementados.

Tabla 3. Reacciones máximas en la base del sistema y por aislador.

Fuerza Axial total [kN]	Fuerza Cortante total [kN]	Fuerza Axial total [kN]	Fuerza Cortante total [kN]
2.738	3.046	684.5	761.5

Fuente. Elaboración propia

Tabla 4. Parámetros mecánicos para aisladores WRI ante fuerza axial y cortante.

Curve	Model	Max Static Load Lbs. (N)	Max Deflection in. (mm)	Kv (vibration) Lbs./in. (kN/m)	Ks (shock) Lbs./in. (kN/m)	Curve	Model	Max Static Load Lbs. (N)	Max Deflection in. (mm)	Kv (vibration) Lbs./in. (kN/m)	Ks (shock) Lbs./in. (kN/m)
1	WR16-206-06	615 (2 736)	1.26 (32,0)	4,090 (716)	2,010 (352)	1	WR16-206-06	335 (1 490)	1.30 (33,0)	1,260 (221)	1,260 (221)
2	WR16-306-06	515 (2 291)	1.50 (38,1)	3,030 (531)	1,420 (249)	2	WR16-306-06	275 (1 223)	1.58 (40,1)	890 (156)	890 (156)
3	WR16-406-06	485 (2 157)	1.70 (43,2)	2,630 (461)	1,190 (208)	3	WR16-406-06	255 (1 134)	1.78 (45,2)	740 (130)	740 (130)
4	WR16-606-06	390 (1 735)	1.92 (48,8)	1,960 (343)	840 (147)	4	WR16-606-06	205 (912)	2.00 (50,8)	520 (91)	520 (91)
5	WR16-706-06	330 (1 468)	2.36 (59,9)	1,460 (256)	590 (103)	5	WR16-706-06	135 (601)	2.24 (56,9)	340 (60)	340 (60)
6	WR16-806-06	290 (1 290)	2.94 (74,7)	1,120 (196)	410 (72)	6	WR16-806-06	100 (445)	3.06 (77,7)	260 (46)	260 (46)
7	WR16-856-06	255 (1 134)	3.38 (85,9)	880 (154)	310 (54)	7	WR16-856-06	75 (334)	3.58 (90,9)	190 (33)	190 (33)
8	WR16-906-06	205 (912)	4.04 (102,6)	635 (111)	210 (37)	8	WR16-906-06	50 (222)	4.24 (107,7)	130 (23)	130 (23)

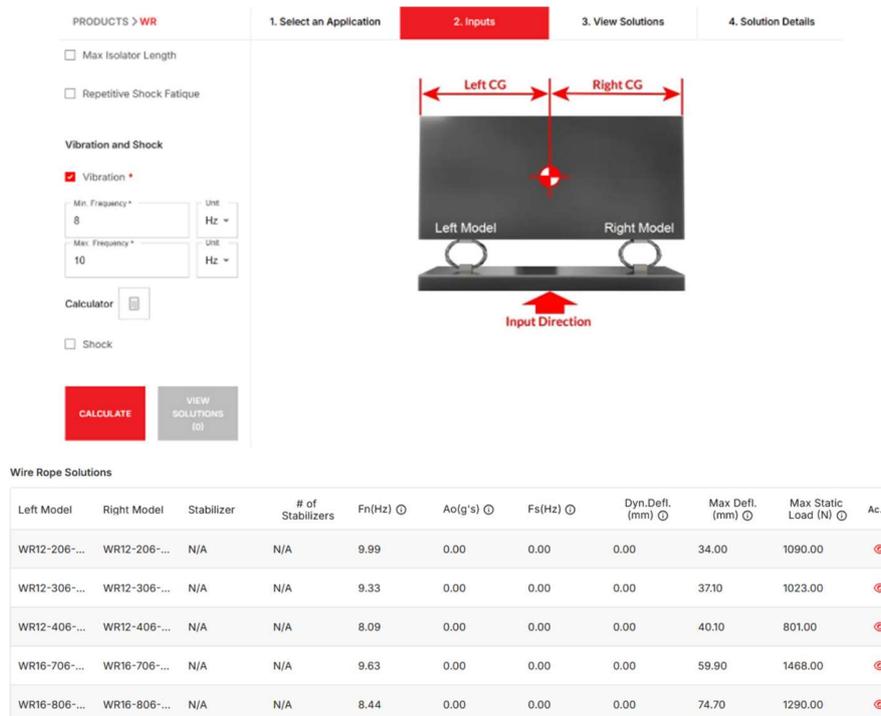
Parámetros para fuerza axial

Parámetros para fuerza de corte

Fuente. (ENIDINE, 2020)

Además de la selección manual del tipo de aislador, con la intención de validar los resultados, el fabricante presenta un aplicativo web para la selección de los aisladores. En esta herramienta se ingresan las solicitaciones en dirección axial y cortante de forma independiente, es decir, el fabricante solo dimensiona el aislador para una condición en particular, por tal razón, este análisis se realiza de forma autónoma y se selecciona el dispositivo que cumpla con los criterios de fuerza y deformación requeridos. Al realizar el procedimiento en el aplicativo web, se confirman los cálculos con la selección del aislador de forma manual.

Figura 18 Recomendaciones de aislador con base en el criterio de fuerzas.



Fuente. Enisize. Sizing software.

Como se puede observar en la Figura 18, los aisladores seleccionados por ambos métodos son pertenecientes a la serie WR12 y WR16, los cuales, poseen parámetros que cumplen las solicitaciones requeridas tanto a cortante como a carga axial. Sin embargo, es importante mencionar que la selección del aislador en el aplicativo *Enisize* no involucra dentro de las variables las deformaciones admisibles del sistema. Por tal razón, la elección final del aislador se debe realizar de forma iterativa, validando las deformaciones del sistema con las deformaciones admisibles del elemento.

Tabla 5 Parámetros de aislador W16-406-06

Referencia	Compresión				Cortante (Shear-Roll)			
	Load	Def	Kv	Ks	Load	Def	Kv	Ks
	[N]	[mm]	[kN/m]	[kN/m]	[N]	[mm]	[kN/m]	[kN/m]
WR12-300-06	2157	43.2	461	208	1134	45.2	130	130

Fuente. (ENIDINE, 2020)

Al finalizar el proceso de selección y caracterización dinámica del aislador, es posible modelar este elemento en el software. La forma de conexión típica de este tipo de aisladores a las estructuras es por medio de placas metálicas en la base como se muestra en la Figura 19, aumentando la superficie de contacto de la estructura para que los aisladores actúen uniformemente. Por lo que en el modelo se debe definir una placa base que se conectará a los aisladores.

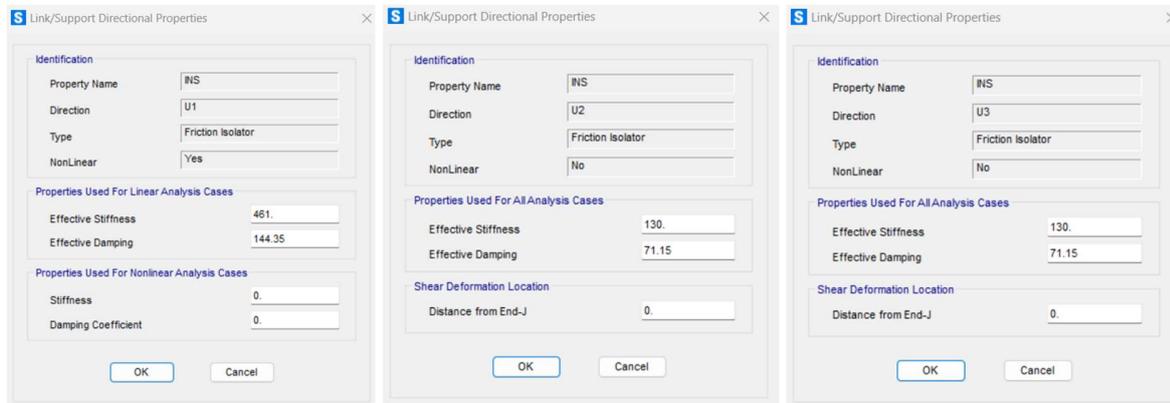
Figura 19 Proceso constructivo común de WRI



Fuente: (S. Alessandri et al, 2015)

En SAP 2000 la manera más directa de modelar un aislador sísmico es por medio de un elemento link con las propiedades del aislador en cuestión. Con las propiedades del elemento seleccionado en la Tabla 5 se define un *link* del tipo *Friction insulator*, dado que, este es el tipo de configuración que más se aproxima al comportamiento de un aislador WRI. Es importante destacar que el análisis realizado es lineal espectral, por lo tanto, no se activarán las opciones en el rango inelástico. Como consecuencia, se solicitan solo dos parámetros, rigidez y amortiguamiento en las direcciones 1, 2 y 3 del *link*. La dirección 1 corresponde a la dirección axial, y las direcciones 2 y 3 a las componentes del plano, es decir, longitudinal y transversal. - shear-roll.

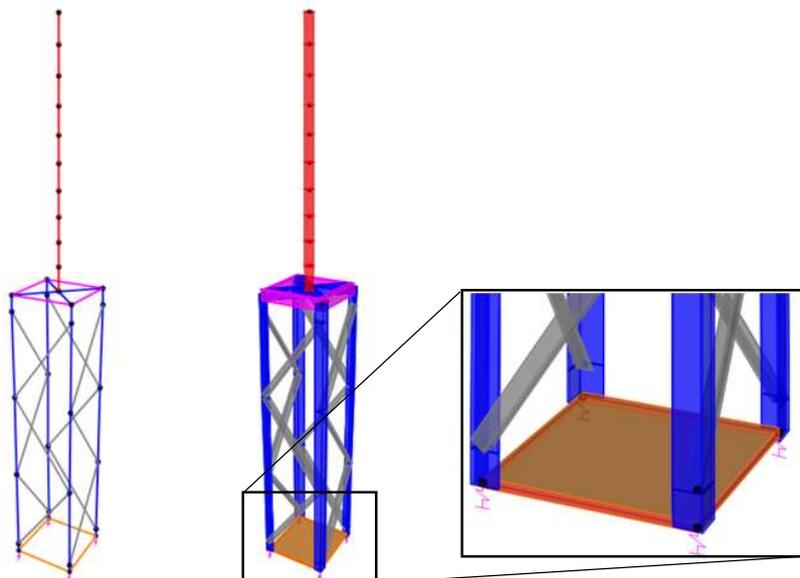
Figura 20 Parámetros del elemento tipo link, direcciones (U1), (U2) Y (U3)



Fuente. Elaboración propia

Al haber configurado el elemento que permite ingresar en el modelo matemático el aislador, se procede localizarlo en la base del sistema. Considerando que los dispositivos se usarán en la base, es pertinente usar la opción de dibujo de *link* por un solo punto, de este modo la propiedad se mantendrá en el apoyo. Teniendo todas estas consideraciones descritas, se obtiene el modelo completo de la estructura de soporte + equipo de subestación + WRI.

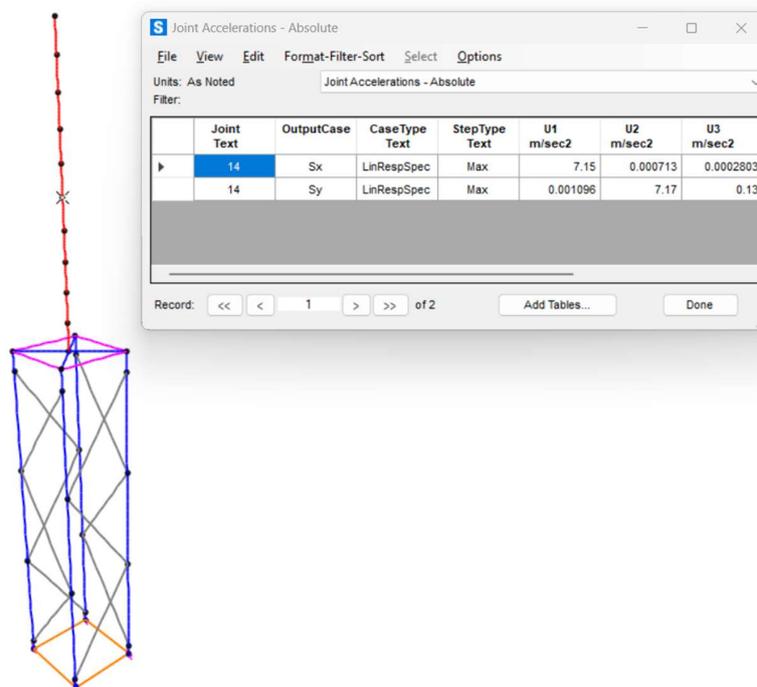
Figura 21 Modelo en SAP 2000 estructura de soporte + equipo + WRI



Fuente. Elaboración propia

Finalmente, al probar varios aisladores de la serie WR16 se optó por un aislador WR16-406-06 debido a que tenía una rigidez axial mayor que otros, lo que disminuía la deformación axial a valores admisibles para el tipo de equipo eléctrico analizado. La modelación de todo el sistema arrojó resultados de frecuencia natural en su modo principal de vibración de 1.404 Hz. Además, la aceleración máxima generada por cargas sísmicas en el eje X es de 7.15 m/s² al igual que en el eje Y.

Figura 22 Aceleraciones en el centro de masa del equipo con sistema con WIR



Fuente. Elaboración propia

Discusión

En La Tabla 6, se presenta la síntesis de los resultados obtenidos del caso de estudio. Inicialmente la modelación independiente de los elementos ayuda a descartar errores futuros en la configuración del modelo, dado que, permite evaluar cada componente de forma individual. Por ejemplo, se confirma que descargador de sobretensiones se ha idealizado de forma correcta, esto debido a que el comportamiento dinámico presenta una frecuencia similar a la supuesta, donde el valor asumido con base en la literatura técnica es de 8 Hz en su modo principal. Condición análoga sucede con la estructura de soporte, donde la frecuencia presenta valores dentro d ellos rangos recomendados por la bibliografía, es decir, se ha obtenido una frecuencia superior a 30 Hz.

Tabla 6 Resumen de resultados

Modelo	Frecuencia	Acel. horizontal CG		Acel. vertical CG	
	f	ah _{CG}		av _{CG}	
Equipo de subestación	8.00 Hz	--	--	--	--
Estructura de soporte	37.21 Hz	--	--	--	--
Estructura de soporte + equipo	7.06 Hz	10.80 m/s ²	1.101 g	0.01 m/s ²	0.001 g
Estructura de soporte + equipo + WRI	1.40 Hz	7.15 m/s ²	0.729 g	0.10 m/s ²	0.010 g

Fuente. Elaboración propia

Debido a que las etapas anteriores de la metodología pretenden solo analizar las propiedades dinámicas inherentes a los elementos, no es relevante la aplicación de cargas externas, por tal razón, el análisis solo se realizó con el peso propio de los elementos. Por otro lado, para el análisis del sistema completo las cargas externas toman relevancia, dado que, se pretende aproximar el comportamiento real de la estructura, por lo tanto, en esta etapa se agregan las cargas sísmicas, de operación, entre otras específicas de este tipo de estructuras.

Los resultados indican que el uso del dispositivo WRI contribuye a una notable disminución (34%) en las aceleraciones totales y, por ende, en las fuerzas sísmicas que afectan al equipo de subestación. Este comportamiento podría estar asociado al desacople en la base de la estructura. Físicamente, el dispositivo WRI disipa parte de la energía generada por el sismo por medio de deformación, es decir, se presenta una disipación de energía debido al trabajo que realiza el aislador al deformarse en el plano paralelo a la aplicación de la fuerza sísmica, lo cual, repercute en una disminución de los esfuerzos internos de los elementos que componen el sistema. Esta capacidad

de disipación es crucial en zonas de amenaza sísmica alta, donde las estructuras tienden a experimentar mayores fuerzas pseudo-estáticas y, por ende, mayores esfuerzos; condición que tiende a incrementar el riesgo de daños estructurales o la falla de componentes frágiles indispensables para el funcionamiento del equipo.

Esta disminución en las aceleraciones del equipo viene relacionada con el aumento del periodo natural de vibración de toda la estructura, ya que, al enfocarse en el espectro de respuesta de aceleraciones (ver Figura 14) al aumentar el periodo de vibración, la pseudoaceleración disminuye, siendo esta una de las principales ventajas del aislador. La disminución de las aceleraciones totales del sistema está estrictamente ligadas a un aumento del período de la estructura. Vale la pena mencionar que, la reducción de la aceleración total trae como principal implicación negativa un aumento en el espectro de desplazamientos. Por lo cual, se debe considerar en el análisis los desplazamientos admisibles del equipo en la zona de conexión a la red eléctrica de la subestación.

Por otro lado, es importante mencionar que en las reacciones en la base de la estructura no presentan variaciones significativas con y sin aislador (Ver Tabla 7). Esta condición podría estar asociada al equilibrio estático del sistema, es decir, la fuerza inercial asociada al sismo induce una reacción en los apoyos al estar estos articulados, por lo tanto, se presentan reacciones en el plano y en dirección ortogonal al plano en cada uno de los apoyos. Por tal razón, no es oportuno considerar la implementación de aisladores sísmicos como un mecanismo para reducir las sollicitaciones en el sistema de cimentación. Mecánicamente el principal efecto de los aisladores es la disminución de esfuerzos internos los componentes del sistema.

Tabla 7 Reacciones en la base para el sistema aislado y sin aislar *Fuente. Propia*

Sin aislador			Con aislador		
Fx	Fy	Fz	Fx	Fy	Fz
[kN]	[kN]	[kN]]	[kN]	[kN]	[kN]]
3.046	1.91	2.738	3.822	1.91	3.385

Fuente. Elaboración propia

La implementación del WRI no solo reduce la carga sísmica sobre los componentes de la subestación, sino que, ante un evento sísmico también disminuye la probabilidad de inoperatividad por fallo en componentes del equipo y/o estructura de soporte. Esta condición tiene un impacto directo en la premisa normativa de procurar mantener operativas este tipo de estructuras después de un evento sísmico. Adicionalmente, se genera un impacto favorable en el componente económico de los proyectos al evitar fallos en el equipo, generando solo reparaciones de componentes. En contraste, una estructura sin aislador podría requerir intervenciones más especializadas, lo cual, representaría un cese en la operación de la subestación, así mismo, incurriría en un costo más elevado. De esta forma, en caso de un evento sísmico el uso de aisladores puede ser el punto de inflexión para garantizar la operatividad de toda la subestación.

Conclusiones

Los resultados obtenidos respaldan la efectividad del uso del dispositivo WRI en el equipo de la subestación eléctrica analizado. La implementación de este tipo de sistemas tiene un mayor impacto en zonas con amenaza sísmica alta. Adicionalmente, la implementación del aislador no solo mejora la respuesta dinámica del sistema, sino que también aporta ventajas significativas en términos de seguridad, costos de mantenimiento y estabilidad operativa. Sin embargo, es importante realizar un análisis de desplazamientos admisibles para no comprometer la conectividad del sistema.

En contraste con los resultados del uso de aisladores, las estructuras sin aislador son más susceptibles a fuerzas sísmicas que pueden comprometer su integridad y funcionamiento durante un evento sísmico. Estos hallazgos sugieren que la adopción de tecnologías de aislamiento sísmico, como los dispositivos WRI, debería considerarse como una práctica generalizada para algunos equipos de subestaciones eléctricas que estén ubicadas en regiones con amenaza sísmica alta.

Referencias

- Chaudhary, M. A. (2014). *Seismic Isolation for Earthquake-Resistant Structures*. Wiley.
- Constantinou, M. C., Whittaker, A. S., & Reinhorn, A. M. (1998). *Seismic isolation of structures*. New York: MCEER.
- Fenz, D. M., & Constantinou, M. C. (2008). Modeling triple friction pendulum Bearings for response History analysis. *Earthquake Spectra*, 24(4), 1011-1028.
- Fernández, J. D., & Gélvez, G. (2023). Aislador sísmico para estructuras esbeltas. *Revista Universidad EAFIT edición 170*.
- González, R., & Aguilar, J. A. (2005). Dificultades para la implementación de dispositivos de aislamiento sísmico en la base en Latinoamérica. *Ciencia y Tecnología en la frontera*, 18-26.
- Ibrahim, R. (2008). Recent advances in nonlinear passive vibration isolators. *Journal of Sound and Vibration*, 371-452.
- Ismail, M. (2018). *Seismic Protection of Electrical Substations Using Base Isolators*. Springer.
- Jangid, R. S., & Kelly, J. M. (2001). Base isolation for earthquake resistance design. *Journal of the Indian Institute of Science*, 81(1), 95-110.
- Karnopp, D. (1995). Active and Semi-Active Vibration Isolation. *Journal of Mechanical Design*, 177-185.
- Kelly, J. M. (1997). *Earthquake-resistant design with rubber*. New York: Springer.
- Kikuchi, M., & Nakamura, Y. (2003). Seismic Performance of Substations with Base Isolation. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 25(4), 289-299.
- Klembczyk, A. R. (20 de 11 de 2014). *Introduction to Shock and Vibration Isolation and Damping Systems*. Obtenido de Taylordevices: <https://www.taylordevices.com/wp-content/uploads/74-Introduction-to-Shock-and-Vibration.pdf>
- Li, G., & Li, H.-n. (2009). Pushover analysis method for asymmetric structure with passive energy dissipation devices. *Proc. SPIE 7288, Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems*.
- Naeim, F., & Kelly, J. M. (1999). *Design of seismic isolated structures: From theory to practice*. New York: John Wiley & Sons.

- Preumont, A. (2002). *Vibration Control of Active Structures: An Introduction*. Springer London.
- Rivin, E. I. (2003). *Passive Vibration Isolation*. Professional Engineering Publishing.
- Simmons, R. (2007). Vibration isolation. *ASHRAE*, 30-40.
- Spencer, B. F., & Nagarajah, S. (2003). State of the art of Structural Control. *Journal of Structural Engineering*, 129(7), 845-856.
- Zhu, W., & Rui, X. (2014). Semiactive Vibration Control Using a Magnetorheological Damper and a Magnetorheological Elastomer Based on the Bouc-Wen Model. *Shock and Vibration*, 1-10.
- ENIDINE. (2020). *Wire Rope Isolator Technologies*. 45–46.
[www.enidine.cohttps://www.enidine.com/CorporateSite/media/itt/Resources/TechnicalData/WR-Catalog_2020.pdf](https://www.enidine.com/CorporateSite/media/itt/Resources/TechnicalData/WR-Catalog_2020.pdf)
- Ibrahim, R. A. (2008). Recent advances in nonlinear passive vibration isolators. In *Journal of Sound and Vibration* (Vol. 314, Issues 3–5, pp. 371–452).
<https://doi.org/10.1016/j.jsv.2008.01.014>
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo. (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR10 - Título A: Requisitos Generales de Diseño y Construcción Sismo Resistente. *Nsr-10, Título A*, 1–174.
- Paolacci, F., & Giannini, R. (2008). Study of the Effectiveness of Steel Cable Dampers for the Seismic Protection of Electrical Equipment. *The 14 Th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Popov G., S. S. (1995). Modelling and analysis of non-linear orifice type damping in vibration isolators. *Journal of Sound and Vibration*, 183(5), 751–764.
- SUBGERENCIA PLANIF E ING CHILECTRA SA. (2003). Acción Sísmica En Equipos Eléctricos Y Acción Sísmica En Equipos Eléctricos Y Mecánicos. *Gerencia De Procesos Distribución Y Comercial Regional*, 1, 13.
https://www.eneldistribuido.com.br/rj/documentos/E-SE-010_R-01.pdf