



REDUCCIÓN DE LA VULNERABILIDAD EN EQUIPOS DE PATIO DE SUBESTACIONES
ELÉCTRICAS CON AISLAMIENTO SÍSMICO

GIOVANNI GÉLVEZ GÉLVEZ

Tesis

Asesor

Juan Diego Jaramillo Fernández

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE CIENCIAS APLICADAS E INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA
MEDELLÍN
2025

Agradecimiento

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que fueron fundamentales en la realización de esta tesis de maestría.

En primer lugar, a mi asesor, el profesor Juan Diego Jaramillo, por su invaluable orientación y sabiduría, las cuales fueron claves para superar obstáculos y enriquecer este trabajo.

Agradezco a mi esposa Bibiana y mis hijos Alejandro y Pedro. Su apoyo incondicional, comprensión y motivación han sido mi fortaleza en este proceso.

Finalmente, agradezco a la Universidad EAFIT, en especial al área de innovación y todo su personal, por brindarme la oportunidad y recursos necesarios para culminar esta etapa de mi vida.

CONTENIDO

pág.

0	INTRODUCCIÓN	11
1	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
2	JUSTIFICACIÓN	15
3	OBJETIVOS	17
3.1	GENERAL	17
3.2	ESPECÍFICOS	17
4	MARCO CONCEPTUAL	18
5	DISEÑO METODOLÓGICO O METODOLOGÍA	20
5.1	ENFOQUE CUANTITATIVO	24
5.1.1	Evaluación de la tasa de falla de equipos de subestaciones eléctricas, con aislamiento sísmico y sin él.....	24
5.1.2	Ocurrencia de intensidades sísmicas en un sitio	24
5.1.3	Fragilidad sísmica de un sistema	27
5.1.4	Equipos instalados en suelo firme y equipos instalados en suelo blando	29
5.1.5	Probabilidad de falla de un equipo.....	35
5.1.6	Periodo de retorno de la falla.	35
6	MATERIALES Y MÉTODOS.....	36
6.1	Criterio de falla del equipo.....	36
6.2	Equipos de patio sin aislamiento Sísmico (NSI)	37
6.2.1	Transformador de corriente 220 kv.	37
6.2.1.1	Estructura de soporte del equipo.....	38
6.2.1.2	Propiedades de los elementos de la estructura de soporte	39

6.2.1.3	Carga de conexionado.....	39
6.2.1.4	Combinaciones de carga.....	39
6.2.1.5	Modelo de elementos finitos.....	39
6.2.1.6	Frecuencias y periodos de vibración.....	40
6.2.2	Interruptor 220 kv.....	42
6.2.2.1	Propiedades de los elementos de la estructura de soporte.....	42
6.2.2.2	Carga de conexionado.....	42
6.2.2.3	Combinaciones de carga.....	43
6.2.2.4	Modelo de elementos finitos.....	43
6.2.2.5	Frecuencias y periodos de vibración.....	46
6.3	Equipos de patio con aislamiento sísmico (SI)	47
6.3.1	Transformador de corriente 220 kv.....	49
6.3.1.1	Frecuencias y periodos de vibración.....	49
6.3.2	Interruptor 220 kv	50
6.3.2.1	Frecuencias y periodos de vibración.....	50
7	RESULTADOS	52
7.1	Equipos sin aislamiento sísmico.....	52
7.1.1	Transformador de corriente 220 kV.....	52
7.1.2	Interruptor 220 kV	58
7.2	Equipos con aislamiento sísmico	65
7.2.1	Transformador de corriente 220 kV.....	65
7.2.2	Interruptor 220 kV	66
8	CONCLUSIONES	68
9	REFERENCIAS	69

LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Análisis de equipos de patio aislados sísmicamente.	23
Tabla 2. Aceleraciones máximas en terreno firme (g) asociadas a 6 tasas de excedencia según el Servicio Geológico Colombiano (SGC).	25
Tabla 3. Rangos de distribución de aceleraciones.	28
Tabla 4. Combinaciones de carga empleadas en el análisis	39
Tabla 5. Periodos y frecuencias naturales.	40
Tabla 6. Participación de masas para cada uno de los modos de vibración.	41
Tabla 7. Combinaciones de carga empleadas en el análisis.	43
Tabla 8. Periodos y frecuencias naturales.	46
Tabla 9. Participación de masas para cada uno de los modos de vibración.	47
Tabla 10. Periodos y frecuencias naturales.	49
Tabla 11. Periodos y frecuencias naturales.	50
Tabla 12. Valores de la curva de fragilidad para el transformador de corriente 220 kV.	53
Tabla 13. Valores de la curva de fragilidad para el interruptor 220 kV.	60

LISTA DE FIGURAS

pág.

Fig 1. Interruptor aislado sísmicamente mediante el sistema Wire Rope.	22
Fig 2. Interruptor aislado sísmicamente mediante el sistema péndulo de fricción.	22
Fig 3. Sistema de aislamiento sísmico EAFIT – Ecuas.	23
Fig 4. Tasa de excedencia de aceleraciones máximas del terreno para las ciudades de Medellín y Popayán, respectivamente.	26
Fig 5. Función de fragilidad.	29
Fig 6. Características del primer estrato de suelo.	31
Fig 7. Características del segundo estrato de suelo.	31
Fig 8. Características del tercer estrato del suelo.	32
Fig 9. Distribución de las características de los estratos de suelo.	32
Fig 10. Espectro de aceleraciones para un acelerograma en roca (línea de color negro) con aceleración máxima en el rango de 75 a 125 gales, y el espectro para el acelerograma en superficie.	33
Fig 11. Espectro de aceleraciones para un acelerograma en roca (línea de color negro) con aceleración máxima en el rango de 325 a 375 gales, y el espectro para el acelerograma en superficie.	34
Fig 12. Espectro de aceleraciones para un acelerograma en roca (línea de color negro) con aceleración máxima en el rango de 575 a 625 gales, y el espectro para el acelerograma en superficie.	34
Fig 13. Imagen de la tabla 1 del documento IEC 60672-3.	36
Fig 14. Disposición de equipos en patio de subestación eléctrica.	37
Fig 15. Dimensiones generales del equipo.	38
Fig 16. Estructura de soporte.	39
Fig 17. Datos para modelamiento del transformador de corriente y estructura de soporte.	40
Fig 18. Deformada para los modos de vibración. Modo 1, periodo 0.22 s y Modo 2 con un periodo de 0.22 s.	41
Fig 19. Dimensiones generales del equipo.	42
Fig 20. Celosía para soporte del equipo.	43
Fig 21. Datos para modelamiento del interruptor y estructura de soporte.	44
Fig 22. Características geométricas del aislador del interruptor, dimensiones en mm.	45
Fig 23. Características geométricas del aislador del interruptor, dimensiones en mm.	45
Fig 24. Vista general del modelo del equipo en elementos finitos.	46

Fig 25. Deformada para los modos de vibración. Modo 1, periodo 0.22 s y Modo 2 con un periodo de 0.22 s.	47
Fig 26. Disposición y geometría del aislador sísmico empleado.	48
Fig 27. Esquema de fabricación del aislador sísmico.	49
Fig 28. Deformada para los modos de vibración. Modo 1, periodo 0.92 s y Modo 2 con un periodo de 0.75 s.	50
Fig 29. Deformada para los modos de vibración. Modo 1, periodo 0.61 s y Modo 2 con un periodo de 0.53 s.	51
Fig 30. Función de fragilidad para el transformador de corriente, porcelana C110.	52
Fig 31. Función de fragilidad para el transformador de corriente, porcelana C120.	52
Fig 32. Función de fragilidad para el transformador de corriente, porcelana C130.	53
Fig 33. Periodo de retorno de la falla para el transformador de corriente con porcelana C110.	54
Fig 34. Periodo de retorno de la falla para el transformador de corriente con porcelana C120.	54
Fig 35. Periodo de retorno de la falla para el transformador de corriente con porcelana C130.	55
Fig 36. Probabilidad de falla en 50 años para el transformador de corriente con porcelana C110.	55
Fig 37. Probabilidad de falla en 50 años para el transformador de corriente con porcelana C120.	56
Fig 38. Probabilidad de falla en 50 años para el transformador de corriente con porcelana C130.	56
Fig 39. Distribución de probabilidad de falla en 50 años superior al 5% ($T_r=1000$ años), Transformador de corriente C110.	57
Fig 40. Distribución de probabilidad de falla en 50 años superior al 5% ($T_r=1000$ años), Transformador de corriente C120.	57
Fig 41. Distribución de probabilidad de falla en 50 años superior al 5% ($T_r=1000$ años), Transformador de corriente C130.	58
Fig 42. Función de fragilidad para el interruptor, porcelana C110.	58
Fig 43. Función de fragilidad para el interruptor, porcelana C120.	59
Fig 44. Función de fragilidad para el interruptor, porcelana C130.	59
Fig 45. Periodo de retorno de la falla para el interruptor con porcelana C110.	60
Fig 46. Periodo de retorno de la falla para el interruptor con porcelana C120.	61
Fig 47. Periodo de retorno de la falla para el interruptor con porcelana C130.	61
Fig 48. Probabilidad de falla en 50 años para el interruptor con porcelana C110.	62
Fig 49. Probabilidad de falla en 50 años para el interruptor con porcelana C120. Fuente:	62
Fig 50. Probabilidad de falla en 50 años para el interruptor con porcelana C130.	63

Fig 51. Distribución de probabilidad de falla en 50 años superior al 5% ($T_r=1000$ años), Interruptor C110.	63
Fig 52. Distribución de probabilidad de falla en 50 años superior al 5% ($T_r=1000$ años), Interruptor C120.	64
Fig 53. Distribución de probabilidad de falla en 50 años superior al 5% ($T_r=1000$ años), Interruptor C130.	64
Fig 54. Periodo de retorno de la falla para el transformador de corriente con porcelana C110.	65
Fig 55. Probabilidad de falla en 50 años para el transformador de corriente con porcelana C110 aislado sísmicamente.	65
Fig 56. Periodo de retorno de la falla para el interruptor con porcelana C110.	66
Fig 57. Probabilidad de falla en 50 años para el interruptor con porcelana C110 aislado sísmicamente.	66
Fig 58. Comparación de la probabilidad de falla en 50 años para el transformador de corriente con porcelana C110 aislado sísmicamente y sin aislamiento.	67
Fig 59. Comparación de la probabilidad de falla en 50 años para el interruptor con porcelana C110 aislado sísmicamente y sin aislamiento.	67

LISTA DE ECUACIONES

pág.

<i>Ecuación 1 Tasa de excedencia de aceleraciones máximas</i>	24
<i>Ecuación 2 Función de densidad de probabilidad</i>	27
<i>Ecuación 3 Función de densidad de probabilidad</i>	27
<i>Ecuación 4 Probabilidad de ocurrencia de aceleración</i>	35
<i>Ecuación 5 Periodo de retorno</i>	35
<i>Ecuación 6 Periodo de retorno a la falla</i>	35

LISTA DE SÍMBOLOS O VARIABLES

$\lambda(a)$ Tasa de excedencia de aceleraciones

$\lambda(o)$ Tasa de excedencia de aceleraciones $\geq a_0$

Resumen

En esta tesis se analiza el efecto de la inclusión de aislamiento sísmico en los equipos de patio de subestaciones eléctricas de alta tensión. La amenaza sísmica corresponde a la estimada para las capitales de los departamentos de la república de Colombia de acuerdo con la información definida en el estudio general de amenaza sísmica de Colombia. La efectividad del aislamiento sísmico se evalúa comparando la probabilidad de daño estimada para los equipos de patio considerados sin incluir aislamiento sísmico y posteriormente incluyéndolo. El daño se asocia a la falla en el elemento más frágil que poseen los equipos de patio, el cual es el aislador en porcelana que compone su cuerpo principal.

Palabras clave: Aislamiento sísmico, Subestación eléctrica, Equipos de patio, Curva de fragilidad

0 INTRODUCCIÓN

La vulnerabilidad sísmica de las subestaciones eléctricas es un tema de preocupación crítica en todo el mundo ya que estas infraestructuras desempeñan un papel fundamental en la generación y distribución de energía eléctrica y su funcionamiento continuo es esencial para mantener la estabilidad y la confiabilidad de las redes eléctricas. Numerosos eventos sísmicos a lo largo de la historia han demostrado los riesgos que enfrentan estas instalaciones en áreas propensas a terremotos y estos eventos han provocado interrupciones significativas en el suministro eléctrico y costosas reparaciones.

La vulnerabilidad de las subestaciones eléctricas ante terremotos se debe a varios factores. En primer lugar, los equipos eléctricos, como transformadores, interruptores y generadores, son componentes críticos y costosos que pueden dañarse fácilmente bajo la influencia de las fuerzas y las aceleraciones sísmicas. Además, las estructuras que albergan estos equipos también pueden sufrir daños estructurales, lo que agrava aún más la situación. La combinación de daños a los equipos y las estructuras puede dar como resultado largos períodos de inactividad en el suministro eléctrico, lo que a su vez afecta la vida cotidiana, la economía y la seguridad pública.

Los estudios y las investigaciones previas han abordado esta problemática desde varias perspectivas. Se han evaluado los efectos de terremotos históricos en subestaciones eléctricas, analizando los patrones de daños y las causas subyacentes. Además, se han desarrollado modelos de análisis de vulnerabilidad sísmica que tienen en cuenta factores como la ubicación geográfica, la sismicidad local y las características de los equipos y las estructuras. Estos modelos han sido fundamentales para comprender mejor los riesgos y para diseñar estrategias de mitigación efectivas.

En resumen, la vulnerabilidad sísmica de las subestaciones eléctricas es un problema crítico que ha sido ampliamente estudiado debido a su impacto en la continuidad del suministro eléctrico y la sociedad en general. El Comité IEEE693, formado por expertos en ingeniería eléctrica y sismología, ha desempeñado un papel crucial en el estudio y la mitigación de la vulnerabilidad sísmica en subestaciones eléctricas. Este comité ha desarrollado estándares y directrices específicas para evaluar el desempeño sísmico de los equipos eléctricos utilizados en subestaciones. Estos estándares incluyen criterios de diseño sísmico, métodos de análisis y requisitos de prueba que son fundamentales para garantizar que los equipos puedan resistir las fuerzas y las aceleraciones generadas por terremotos. El Comité IEEE693, conocido como "IEEE 693 - IEEE Recommended Practice for Seismic Design of Substations," comenzó su trabajo en el desarrollo de estándares en la década de 1980. La primera versión de IEEE 693 se publicó en 1997, estableciendo los principios iniciales para el diseño sísmico de subestaciones eléctricas. En 2005, se realizó una importante actualización de IEEE 693, que incorporó avances en la comprensión de la

sismicidad y las técnicas de diseño sísmico. La versión más reciente fue publicada en septiembre de 2021, denominada IEEE 693-2018, que incorpora avances adicionales en la evaluación y mitigación de la vulnerabilidad sísmica en subestaciones eléctricas. Esta versión continúa siendo ampliamente utilizada como referencia en la industria.

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Durante terremotos, uno de los efectos más devastadores en las subestaciones eléctricas es la ocurrencia de daños en equipos críticos. Estos equipos incluyen transformadores, interruptores, generadores, sistemas de control y otros dispositivos fundamentales para el funcionamiento de la infraestructura eléctrica. A continuación, se detalla cómo estos equipos pueden verse afectados y cuáles son las implicaciones de tales daños en la prestación del servicio de distribución de energía eléctrica:

1. Daño estructural a transformadores: Los transformadores son responsables de cambiar el voltaje de la electricidad y por consiguiente son elementos esenciales en las subestaciones eléctricas. Durante un sismo, las fuerzas inerciales y las vibraciones pueden causar daños estructurales en estos dispositivos, lo que puede resultar en la pérdida de aceite dieléctrico y la inoperatividad del transformador. Esta situación implica la necesidad de reemplazar o reparar estos equipos.
2. Deformación y daño a interruptores, seccionadores, transformadores de corriente y transformadores de tensión: son componentes esenciales para controlar el flujo de energía eléctrica y aislar circuitos en caso de falla. Los movimientos sísmicos pueden causar deformaciones, desplazamientos o daños en estas piezas, lo que puede resultar en una respuesta inadecuada o la imposibilidad de aislar circuitos dañados. Esto puede llevar a cortocircuitos, incendios y una mayor pérdida de equipos y sistemas.
3. Generadores y sistemas de control afectados: Las subestaciones suelen contar con generadores de emergencia y sistemas de control para mantener la operación crítica en situaciones de interrupción. Sin embargo, los terremotos pueden dañar generadores y sistemas de control, lo que impide su capacidad para respaldar la infraestructura eléctrica durante emergencias. Esto puede resultar en una incapacidad para mantener servicios esenciales en hospitales, comunicaciones y otros lugares críticos.
4. Demoras en el restablecimiento del servicio: La reparación o el reemplazo de equipos averiados puede llevar tiempo debido a la complejidad de estos sistemas y la necesidad de pruebas rigurosas antes de su puesta en marcha. Durante este período, las áreas afectadas pueden enfrentar interrupciones prolongadas del servicio eléctrico.
5. Costos elevados de reemplazo y reparación: Los daños en equipos involucran costos altos de reemplazo o reparación. Además, los costos operativos pueden aumentar debido a la necesidad de inspecciones y mantenimiento preventivo más frecuentes.

En resumen, los daños en equipos de patio de subestaciones eléctricas durante terremotos representan una amenaza significativa para la prestación del servicio de transmisión de energía eléctrica. La

indisponibilidad de estos equipos puede ocasionar racionamientos prolongados, costos elevados de reparación y reemplazo, y demoras en el restablecimiento del servicio. Por tanto, este estudio se enfocará en evaluar el impacto en la reducción del riesgo sísmico de los equipos de patio de subestaciones eléctricas ubicadas en las ciudades capitales de departamento de la república de Colombia.

2 JUSTIFICACIÓN

La generación y distribución de energía eléctrica es esencial en el desarrollo de la vida cotidiana y su continuidad es indispensable para garantizar el normal funcionamiento de cada uno de los componentes del aparato productivo de la sociedad. Sin embargo, la vulnerabilidad de las subestaciones de energía ante eventos sísmicos representa una preocupación en lugares expuestos a la ocurrencia de terremotos. Los equipos eléctricos que componen estas subestaciones son componentes esenciales de la infraestructura eléctrica y su daño o destrucción durante un terremoto puede tener consecuencias catastróficas en la confiabilidad del suministro eléctrico. Lo mencionado se puede evidenciar revisando la información acerca de la afectación del sistema eléctrico de transmisión después de un terremoto, por ejemplo, el terremoto de Wenchuan en el año 2008 dejó por fuera del servicio a 90 subestaciones de 110 kV debido a daños estructurales [1]. En el contexto latinoamericano el terremoto de Chile en el año 2010 afectó gravemente el sistema interconectado central, el cual abastece a más del 93% de la población [2].

En este contexto, la tesis acá presentada tiene como objetivo principal estudiar la importancia del aislamiento sísmico de los equipos eléctricos en subestaciones de energía como una estrategia para reducir la vulnerabilidad del sistema ante sismo de gran magnitud. Investigaciones previas han estudiado diversos mecanismos de daño en equipos observados después de pruebas realizadas en mesa vibratoria, por ejemplo, daños en bridas de acople [3] y daños en la conexión entre porcelana y brida metálica [4]. El aislamiento sísmico es una técnica innovadora que busca proteger los equipos eléctricos al reducir las fuerzas y aceleraciones transmitidas durante un evento sísmico. Esta técnica representa una solución efectiva para garantizar la continuidad del suministro eléctrico en áreas sísmicas, minimizando los daños y los tiempos de inactividad asociados a terremotos. La efectividad del aislamiento sísmico en equipos de subestaciones eléctricas ha sido evaluada por diferentes autores con diversos sistemas de aislamiento; un sistema que podemos referenciar se compone de láminas de acero, resortes de poliuretano y una barra de acero y permite obtener una reducción en la demanda sísmica de hasta el 42% en comparación de un equipo sin aislamiento sísmico [5]. Otro sistema de aislamiento esta conformado por interfaces de balanceo en la base (resortes) y un mecanismo que restringe rotaciones excesivas, ofreciendo una reducción del 58% de la demanda sísmica en comparación con el equipo sin aislamiento [6].

Además, esta investigación se apoya en la implementación de metodologías como la estimación de tasas de falla mediante curvas de fragilidad. Estas herramientas permiten evaluar de manera cuantitativa el riesgo de los equipos eléctricos en función de diversos parámetros [7], como la tasa de excedencia de aceleraciones en el sitio y las características estructurales de la subestación. El uso de curvas de fragilidad

proporciona una visión integral de la respuesta sísmica de los equipos eléctricos y permite tomar decisiones informadas sobre la necesidad y la eficacia de las medidas de aislamiento sísmico.

En esta tesis se analizarán detalladamente los beneficios derivados de la implementación del aislamiento sísmico en las subestaciones de energía, respaldados por la evaluación de la reducción en la demanda sísmica asociada al efecto del aislamiento sísmico y por las estimaciones de tasas de falla obtenidas a través de las curvas de fragilidad.

En última instancia, esta tesis busca destacar el papel crucial que desempeña el aislamiento sísmico de los equipos eléctricos, mediante el uso de metodologías de evaluación de riesgos, en la protección de las subestaciones de energía. De igual manera, se pretende conocer más de cerca el impacto de la implementación de aislamiento sísmico, de manera que se tenga información valiosa para la toma de decisiones y la implementación de medidas preventivas en el ámbito de la ingeniería civil asociada al diseño de subestaciones eléctricas.

3 OBJETIVOS

3.1 GENERAL

Analizar la variación del desempeño sísmico de los equipos de patio sin aislamiento sísmico y con aislamiento sísmico, mediante el cálculo de su probabilidad de falla al ser sometidos a diferentes demandas sísmicas asociadas a un sitio geográfico específico en la república de Colombia.

3.2 ESPECÍFICOS

1. Estimar la probabilidad de falla para un interruptor y un transformador de corriente de una subestación eléctrica, en un primer escenario sin considerar aislamiento sísmico.
2. Estimar la probabilidad de falla para un interruptor y un transformador de corriente de una subestación eléctrica, en un segundo escenario implementando aislamiento sísmico.
3. Comparar la variación en la probabilidad de falla de los dos escenarios analizados.

4 MARCO CONCEPTUAL

En el desarrollo del presente trabajo fue necesario abordar una serie de aspectos relevantes dentro del estudio del aislamiento sísmico enfocado a los equipos de patio de subestaciones eléctricas, los cuales se describen a continuación:

1. Introducción al Aislamiento Sísmico en Subestaciones:
 - Definición y conceptos básicos del aislamiento sísmico.
 - Importancia del aislamiento sísmico en la protección de equipos eléctricos en subestaciones.
 - Objetivos de la investigación: Evaluar la efectividad del aislamiento sísmico en la reducción de la vulnerabilidad de los equipos eléctricos ante terremotos.
2. Equipos Eléctricos en Subestaciones:
 - Descripción de los equipos eléctricos críticos presentes en las subestaciones, como transformadores, interruptores.
 - Identificación de los riesgos sísmicos asociados a estos equipos en ausencia de aislamiento sísmico.
3. Aislamiento Sísmico en Equipos Eléctricos:
 - Explicación detallada del aislamiento sísmico y sus componentes.
 - Tipos de sistemas de aislamiento sísmico utilizados en la industria eléctrica.
 - Ventajas y desventajas de la implementación del aislamiento sísmico en subestaciones eléctricas.
4. Curvas de Fragilidad y Probabilidad de Falla:
 - Concepto de curvas de fragilidad y su relación con la tasa de falla.
 - Aplicación de curvas de fragilidad para evaluar el riesgo sísmico de equipos eléctricos en subestaciones eléctricas.
5. Metodología de Investigación:
 - Recopilación de datos sísmicos y geotécnicos relevantes.

- Creación de modelos de elementos finitos para los dos escenarios: sin aislamiento sísmico y con aislamiento sísmico.
 - Análisis de los resultados de los modelos para evaluar la respuesta sísmica de los equipos en ambos escenarios.
6. Evaluación de la Efectividad del Aislamiento Sísmico:
- Comparación de los resultados obtenidos en los modelos de elementos finitos para los dos escenarios.
 - Interpretación de la respuesta sísmica de los equipos eléctricos y su relación con las curvas de fragilidad.
 - Conclusiones preliminares sobre la efectividad del aislamiento sísmico en la protección de los equipos.

5 DISEÑO METODOLÓGICO O METODOLOGÍA

Las subestaciones eléctricas se consideran un sistema vital, ya que de su funcionamiento depende la prestación de un servicio esencial para la vida humana y la estabilización del territorio luego de la ocurrencia de una emergencia. El reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10 contempla la implementación de sistemas de aislamiento sísmico y re-potenciamiento para las “Edificaciones Indispensables” pero no incluye directamente los equipos de patio de las subestaciones eléctricas, lo que implica que, en caso de un sismo de gran intensidad, muchos de los sistemas eléctricos se verían afectados y por ende saldrían de línea limitando el servicio, aunque las edificaciones se mantengan en pie.

El aislamiento sísmico de algunos equipos en Colombia es realizado principalmente por empresas fabricantes europeas, tales como, Siemens, General Electric o ABB; pero sus dispositivos de aislamiento son de alto costo y no se adaptan fácilmente a la tecnología de todos los equipos existentes en el país. Al analizar la amenaza sísmica en el mapa de Colombia, se identifican amplias zonas de actividad sísmica alta y media, lo que significa que se deben implementar equipos mucho más resistentes y por ende con precios elevados en todas estas zonas. Es por esta razón que, en el sector eléctrico nacional, implementar un aislamiento sísmico se considera esencial.

Esta situación es común en la industria eléctrica de la región en la cual muchas empresas del sector eléctrico han realizado el reforzamiento de todos los edificios de las subestaciones de control, los cuales deben permanecer en perfecto estado ante la ocurrencia de un sismo. Pero una central eléctrica no es solo el edificio, es también el patio de la subestación, al que llegan todas las líneas de energía y en la cual la energía se transforma a niveles adecuados de tensión para su transporte, distribución o consumo, con determinados requisitos de calidad. En este momento las empresas del sector eléctrico tienen sus edificios repotenciados, pero resulta que muchos de los equipos de patio no pasan un sismo.

En una subestación eléctrica los equipos de patio trabajan en conjunto para garantizar el funcionamiento seguro, eficiente y confiable de un sistema eléctrico. A continuación, se describe la función en conjunto de estos equipos:

- a) **Medición y Monitoreo Preciso:** Los transformadores de corriente y de tensión permiten la medición precisa de la corriente y el voltaje en el sistema eléctrico. Estos valores son esenciales para evaluar el estado del sistema, diagnosticar posibles problemas y realizar ajustes operativos.
- b) **Protección del Sistema:** Los seccionadores y los interruptores desempeñan un papel crítico en la protección del sistema eléctrico. Los seccionadores permiten aislar secciones específicas para el

mantenimiento, mientras que los interruptores interrumpen el flujo de corriente en situaciones de emergencia, como cortocircuitos, evitando daños al equipo y garantizando la seguridad del sistema.

c) **Ajuste de Niveles de Corriente y Tensión:** Los transformadores de corriente y de tensión ajustan los niveles de corriente y tensión a valores seguros y manejables para su medición y control, contribuyendo así a la seguridad y la eficiencia del sistema.

d) **Operación Segura durante Mantenimientos:** La combinación de seccionadores e interruptores permite realizar operaciones de mantenimiento de manera segura. Los seccionadores aíslan secciones específicas del sistema, mientras que los interruptores facilitan la interrupción controlada del flujo de corriente.

e) **Contribución a la Estabilidad del Sistema:** La capacidad de medir con precisión la corriente y el voltaje, junto con la capacidad de controlar el flujo de energía, contribuye a la estabilidad del sistema eléctrico al permitir una gestión eficiente de la carga y la prevención de condiciones que podrían llevar a inestabilidades.

Actualmente en Colombia no se tiene un gran número de subestaciones eléctricas en las cuales esté implementado el aislamiento sísmico de los equipos de patio. De hecho, es una práctica habitual solamente aislar el interruptor por ser el equipo más costoso del conjunto. Sin embargo, es importante considerar que cualquier equipo (Transformador de Tensión, Transformador de Corriente, Seccionador) que falle en un evento sísmico conlleva la interrupción en la prestación del servicio de transmisión o distribución de energía.

Dentro de las subestaciones que actualmente presentan interruptores aislados sísmicamente podemos mencionar a la subestación Bacata 500 kV, la cual es propiedad de Interconexión Eléctrica S.A. – ISA y la subestación Nueva Esperanza 500 kV, propiedad de Empresas Públicas de Medellín. En la subestación Bacatá 500 kV el sistema de aislamiento sísmico está compuesto por resortes denominados Wire Rope Isolator (ver Fig 1). Por otra parte, el sistema empleado en la subestación Nueva Esperanza es del tipo péndulo de fricción



Fig 1. Interruptor aislado sísmicamente mediante el sistema Wire Rope.

Fuente: Siemens.



Fig 2. Interruptor aislado sísmicamente mediante el sistema péndulo de fricción.

Fuente: Siemens.

Para el año 2024 la empresa Edemco tiene planeado energizar la subestación Guatapuri ubicada en el municipio de Valledupar, departamento de Cesar, la cual incorporará aislamiento sísmico en la totalidad de sus equipos de Patio. El dispositivo elegido corresponde al sistema desarrollado por la Universidad Eafit y Ecuas Consultores el cual es un mecanismo dual que combina amortiguamiento (resortes) y disipación por plastificación de una lámina de metal (ver Fig 3)

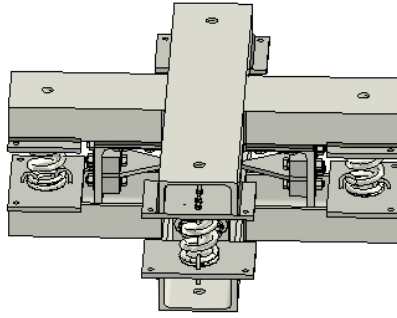


Fig 3. Sistema de aislamiento sísmico EAFIT – Ecuas.

Fuente: Ecuas.

En diferentes congresos internacionales de ingeniería sísmica se han presentado trabajos en los cual se ha evaluado el desempeño de equipos eléctricos aislados sísmicamente, los cuales se presentan en la siguiente tabla con su respectiva eficiencia.

Tabla 1. Análisis de equipos de patio aislados sísmicamente.

Autores	Año	Título	Dispositivo de aislamiento	Impacto
F. Paolacci R. Giannini	2008	Study of the effectiveness of steel cable dampers for the seismic protection of electrical equipment	Wire Rop	Reducción de la demanda sísmica en un factor de 1.92
K. Oikonomou M. Constantinou A.M. Rerinhorn	2012	Seismic Isolation of Electrical Equipment “Seismic Table Simulation”	Lead Rubber Bearing	Reducción de la demanda sísmica en un factor de 2.00
T. Gökçe E. Orakdöğen E. Yüksel	2017	Seismic protection of high voltage bushings By using polyuretanan springs	polyurethane spring	Reducción de la demanda sísmica en un factor de 2.00
J. Jaramillo G.Gélvez	2018	Dispositivo de aislamiento para estructuras esbeltas	Resortes y dispadores histeréticos	Reducción de la demanda sísmica en un factor de 3.50

Fuente: Elaboración propia.

5.1 ENFOQUE CUANTITATIVO

5.1.1 Evaluación de la tasa de falla de equipos de subestaciones eléctricas, con aislamiento sísmico y sin él.

La tasa de falla de un sistema se puede calcular con base en una descripción de la ocurrencia de sismos en el sitio y una descripción del comportamiento del sistema ante diferentes intensidades del evento sísmico.

5.1.2 Ocurrencia de intensidades sísmicas en un sitio

En lo que sigue se considera, como es usual porque así lo muestran los datos de ocurrencia de intensidades sísmicas en un sitio, que este fenómeno se puede describir razonablemente bien como un proceso estocástico Poissoniano, que se caracteriza por tener una distribución de probabilidad exponencial del tiempo entre eventos, cuyo único parámetro estadístico es la media del tiempo entre eventos, o su inverso, la tasa de ocurrencia de eventos, λ_0

Ahora, si se quiere describir la ocurrencia de eventos de diferentes intensidades en un sitio, solo basta multiplicar la tasa de ocurrencia de eventos de cualquier intensidad, λ_0 , por la probabilidad de que, dado que se presenta un evento sísmico, este es de intensidad $\geq I$. A esta función se le conoce como la tasa de excedencia de intensidades sísmicas en un sitio. Los estudios que conducen a estimar estas funciones se les conoce como Estudios de Amenaza Sísmica.

El Servicio Geológico Colombiano, SGC, publica periódicamente sus estimaciones de tasas de excedencia de intensidades sísmicas para muchos sitios en el país, que incluyen, entre otros sitios, todas las capitales departamentales. Estas funciones son una muy buena descripción probabilista de la ocurrencia de intensidades sísmicas en el país.

Aunque estas funciones, estimadas usando algoritmos computacionales y métodos numéricos, no siguen exactamente una forma funcional conocida, debido a la forma usual de las ecuaciones de atenuación del movimiento sísmico durante su propagación por la corteza terrestre, y a la forma usual de las funciones que describen la ocurrencia de magnitudes en las fuentes sísmicas (Tasa de excedencia de magnitudes de Gutenberg-Richter), se puede asumir con muy buena aproximación que la tasa de excedencia de aceleraciones máximas del terreno (medida adoptada de la intensidad del sismo en este trabajo) se puede representar por la expresión:

$$\lambda(a) = Aa^{-b}, \quad (1)$$

donde a representa la aceleración máxima del terreno en suelo firme, y A y b son constantes que dependen de cada sitio y se ajustan a la función publicada por el SGC usando técnicas de mínimos cuadrados. Los

valores estimados de las aceleraciones máximas del terreno en suelo firme (g) por el SGC para las principales ciudades de Colombia se presentan en la Tabla 2 y en la Fig 4 se presenta la comparación entre los valores de tasa de excedencia establecidos por el SGC y los estimados mediante la función de ajuste, a manera de ejemplo, para las ciudades de Medellín y Popayán.

Tabla 2. Aceleraciones máximas en terreno firme (g) asociadas a 6 tasas de excedencia según el Servicio Geológico Colombiano (SGC).

Municipio	Periodo de Retorno (años)						AJUSTE FUNCIÓN		
	31	100	225	475	975	2475	A	b	r ²
	Tasa de excedencia								
	0.03226	0.01000	0.00444	0.00211	0.00103	0.00040			
Medellin	0.030	0.070	0.100	0.140	0.200	0.300	0.000047	-1.927313	0.99
Barranquilla	0.010	0.030	0.050	0.080	0.110	0.180	0.000039	-1.518513	0.98
Bogotá	0.040	0.080	0.130	0.190	0.270	0.400	0.000085	-1.881303	0.99
Cartagena	0.010	0.030	0.060	0.090	0.140	0.220	0.000065	-1.398303	0.98
Tunja	0.040	0.080	0.130	0.180	0.230	0.330	0.000053	-2.052931	0.98
Manizales	0.040	0.090	0.140	0.210	0.290	0.400	0.000097	-1.868844	0.98
Florencia	0.030	0.060	0.100	0.150	0.220	0.320	0.000061	-1.812939	0.99
Popayán	0.080	0.160	0.240	0.350	0.470	0.650	0.000208	-2.062000	0.99
Valledupar	0.020	0.040	0.070	0.110	0.160	0.240	0.000042	-1.718438	0.99
Montería	0.020	0.040	0.060	0.090	0.130	0.200	0.000021	-1.900094	1.00
Quibdó	0.060	0.130	0.200	0.300	0.400	0.600	0.000185	-1.898257	0.99
Neiva	0.040	0.080	0.130	0.180	0.230	0.320	0.000050	-2.069747	0.98
Riohacha	0.010	0.040	0.060	0.100	0.140	0.230	0.000072	-1.401637	0.96
Santa Marta	0.020	0.050	0.080	0.140	0.200	0.320	0.000082	-1.566759	0.99
Villavicencio	0.040	0.080	0.140	0.220	0.320	0.510	0.000146	-1.692954	1.00
Pasto	0.060	0.140	0.220	0.310	0.410	0.600	0.000198	-1.899366	0.98
Cúcuta	0.070	0.140	0.210	0.300	0.400	0.590	0.000159	-2.056589	0.99
Armenia	0.060	0.130	0.210	0.300	0.410	0.590	0.000188	-1.897914	0.99
Pereira	0.060	0.120	0.190	0.270	0.370	0.520	0.000136	-2.000265	0.99
Bucaramanga	0.060	0.130	0.190	0.260	0.340	0.480	0.000109	-2.110863	0.98
Sincelejo	0.020	0.040	0.060	0.100	0.140	0.210	0.000027	-1.829941	1.00
Ibagué	0.050	0.110	0.180	0.260	0.370	0.550	0.000166	-1.815842	0.99
Cali	0.080	0.170	0.270	0.380	0.500	0.690	0.000257	-2.001282	0.98
Arauca	0.020	0.040	0.050	0.070	0.100	0.130	0.000004	-2.327717	0.99
Yopal	0.040	0.090	0.160	0.240	0.370	0.560	0.000190	-1.634824	0.99
Mocoa	0.040	0.100	0.160	0.230	0.320	0.480	0.000142	-1.763480	0.98
San Andrés	0.010	0.040	0.080	0.120	0.180	0.280	0.000118	-1.291228	0.96
Leticia	0.000	0.001	0.001	0.005	0.010	0.030	0.000023	-0.814054	0.95
Puerto Inirida	0.003	0.005	0.008	0.010	0.020	0.040	0.000002	-1.587699	0.98

Municipio	Periodo de Retorno (años)						AJUSTE FUNCIÓN		
	31	100	225	475	975	2475	A	b	r ²
	Tasa de excedencia								
San José de Guaviare	0.005	0.010	0.020	0.030	0.040	0.060	0.000004	-1.699981	0.98
Mitú	0.003	0.005	0.008	0.010	0.020	0.040	0.000002	-1.587699	0.98
Puerto Carreño	0.003	0.005	0.008	0.010	0.013	0.030	0.000000	-1.850825	0.98

Fuente: Elaboración propia.

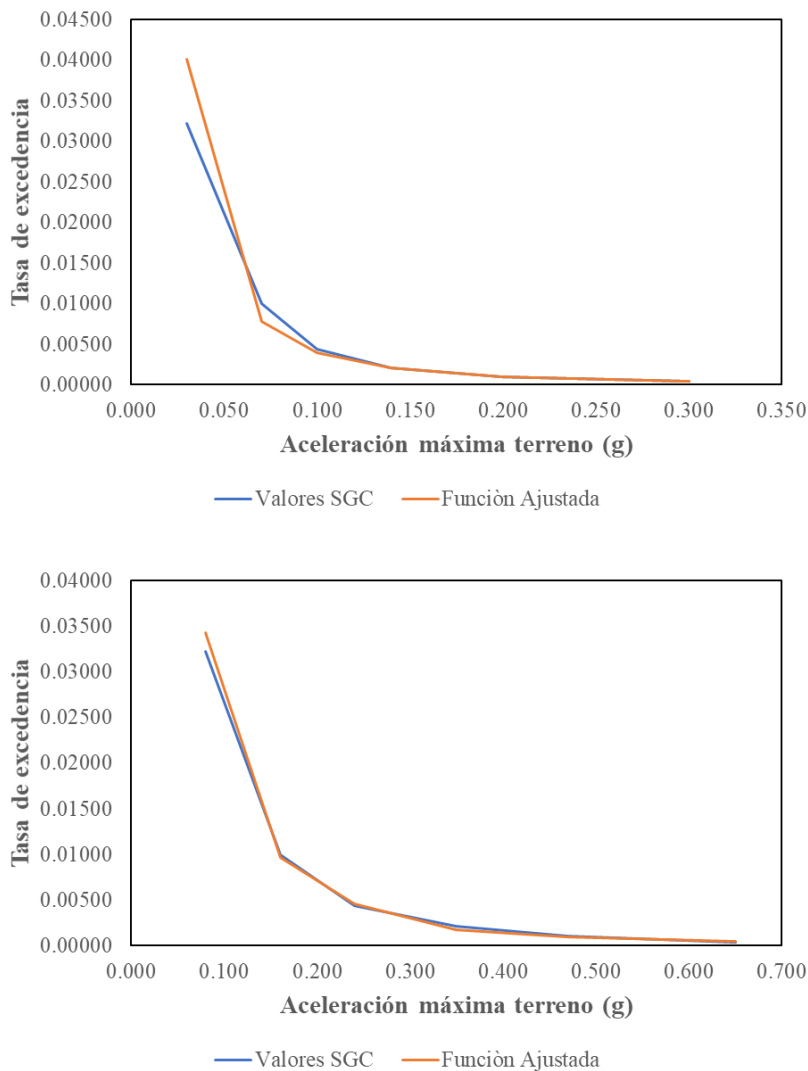


Fig 4. Tasa de excedencia de aceleraciones máximas del terreno para las ciudades de Medellín y Popayán, respectivamente.

Fuente: Elaboración propia.

Sabiendo que $\lambda(a)$ representa la tasa de excedencia de aceleraciones, se sigue que la función de densidad de probabilidad de las aceleraciones, $f_A(a)$, que se presentan en un sitio se escribe como:

$$f_A(a) = -\frac{1}{\lambda_0} \frac{d\lambda(a)}{da} \quad (2)$$

donde λ_0 representa la tasa de ocurrencia de aceleraciones $\geq a_0$, que se considera la aceleración más baja que puede afectar a los sistemas que se están estudiando.

De acuerdo con las ecs. 1 y 2, la función de densidad de probabilidad de las aceleraciones en un sitio se puede escribir:

$$f_A(a) = \frac{1}{\lambda_0} A b a^{-(b+1)} \quad (3)$$

5.1.3 Fragilidad sísmica de un sistema

La Fragilidad sísmica de un sistema se representa a través de una función, $Fr(a)$, que cuantifica la probabilidad de alcanzar o superar determinado nivel de daño, dado que se presenta un sismo con una aceleración máxima del terreno igual a a .

En los sistemas que nos ocupan no hay niveles de daño porque son sistemas muy frágiles, que, o están operativos o no lo están. En otras palabras, cuando hay algún nivel de daño este es total y el sistema deja de operar. En este caso entonces solo hay una función de Fragilidad, aquella asociada al daño total o al colapso del sistema.

Estas funciones de Fragilidad se estiman computacionalmente sometiendo el sistema al cual se le quiere estimar su fragilidad, a análisis dinámicos no lineales 3D muy finos, considerando como excitación un conjunto de señales esperables en el sitio, y todas con la misma aceleración máxima del terreno. De estos análisis, algunos terminarán con el colapso del sistema y otros no. La probabilidad de falla del sistema dada la aceleración a , es justamente el porcentaje de sistemas que colapsan. Se analizaron dos equipos de patio de subestación (Interruptor 230 kV, transformador de corriente 230 kV) los cuales fueron sometidos a un total de 120 registros de aceleraciones distribuidos en 12 grupos discriminados por rangos (ver Tabla 3) y en cada rango se tienen 10 registros con tres componentes, dos horizontales y la vertical. En resumen, se consideraron 360 registros de aceleraciones para el análisis de los equipos mencionados anteriormente.

El procedimiento realizado para obtener los registros de aceleraciones mencionados se describe a continuación:

1. De las bases de datos de acelerogramas se seleccionaron 19 sismos registrados en roca dura y roca blanda con componentes frecuenciales muy variados para representar adecuadamente ambientes tectónicos muy diversos.

2. Por un proceso aleatorio uniforme se define una aceleración A_{\max} objetivo entre 25 y 700 gal. Esta es la media geométrica de las aceleraciones horizontales máximas del terreno objetivo.
3. Se seleccionan aleatoriamente 2 sismos de la base de datos de 19 sismos, que se denominan acelerograma E1 y acelerograma E3.
4. Tanto para el acelerograma E1 como para el E3 se halla la relación Q:
 - a. $Q(E1) = A_{\max} \text{ objetivo} / GM(A_{\max}(E1))$
 - b. $Q(E3) = A_{\max} \text{ objetivo} / GM(A_{\max}(E3))$
5. Se define el espectro objetivo multiplicando el espectro del acelerograma E3 por la relación Q(E3).
6. Se define el acelerograma semilla (se llamará acelerograma E2) multiplicando el acelerograma E1 por la relación Q(E1).
7. Con el Espectro objetivo del numeral 6 y la semilla E2 del numeral 7 y mediante el programa SeismoMatch se generan las tres componentes de la señal sintética que se usará.
8. Este proceso se realiza para cada uno de los intervalos definidos de aceleración: (25-75 gal); (75-125);...;(575-625 gal). En total son 12 rangos cada uno con 10 sismos (cada uno con sus tres componentes). En total 360 acelerogramas (120 sismos)

Tabla 3. Rangos de distribución de aceleraciones.

Rango	Aceleración Inferior (cm/s ²)	Aceleración Superior (cm/s ²)
01	25	75
02	75	125
03	125	175
04	175	225
05	225	275
06	275	325
07	325	375
08	375	425
09	425	475
10	475	525
11	525	575
12	575	625

Fuente: Elaboración propia.

Si para uno cualquiera de los sistemas estudiados se grafica su función de Fragilidad resulta claro que esta se puede aproximar por tres líneas rectas: una inicial que es horizontal y que indica probabilidad cero, una inclinada de pendiente positiva que indica que las probabilidades de falla están incrementando, y finalmente otra tercera línea horizontal indicando que la probabilidad de falla es 1.0 (ver Fig 5). En definitiva, la función de fragilidad se puede describir completamente con dos aceleraciones: aquella en

donde las probabilidades de falla comienzan a tener algún valor no nulo, am, y aquella aceleración a partir de la cual la probabilidad de falla es 1.0.

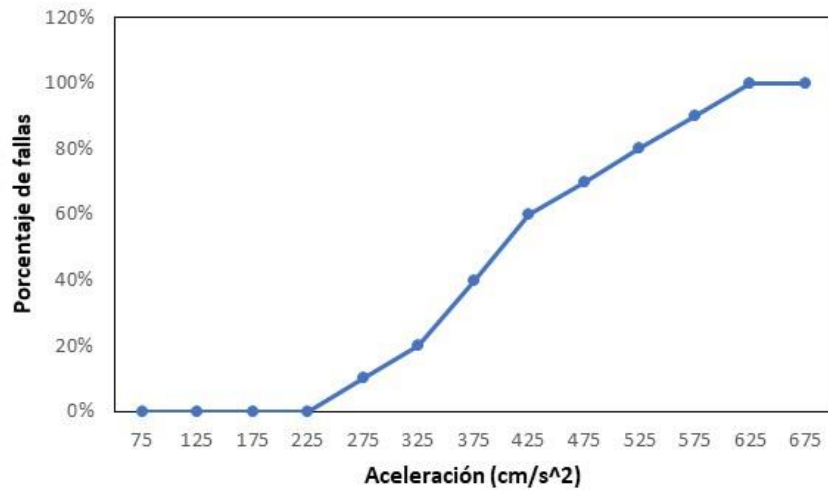


Fig 5. Función de fragilidad.

Fuente: Elaboración propia.

5.1.4 Equipos instalados en suelo firme y equipos instalados en suelo blando

Hasta ahora es claro que estamos estudiando equipos instalados en sitios de suelo firme, para los que se cuenta con la descripción de la tasa de excedencia de aceleraciones estimada por el SGC. ¿Cómo estimamos la tasa de falla de equipos instalados en suelo blando? Una alternativa es estimar la tasa de excedencia de aceleraciones en la superficie de suelos blandos en el sitio, pero esto significaría repetir nuevamente el estudio de amenaza sísmica del sitio, pero cambiando las ecuaciones de atenuación para considerar la propagación desde la fuente hasta la superficie del depósito de suelo blando. En este trabajo optamos por mantener la descripción de la actividad sísmica en los sitios de suelo firme que provee el SGC y considerar el efecto de los suelos blandos propagando los acelerogramas usados en suelos firmes a través del perfil de suelo blando y usar las señales resultantes como excitaciones a los equipos instalados en suelos blandos. En definitiva, el efecto de los suelos blandos se refleja en la función de Fragilidad y no en la tasa de excedencia de aceleraciones en el sitio. Por supuesto, la aceleración máxima con la que se califica la intensidad sísmica y que está asociada a un conjunto de acelerogramas, será la aceleración máxima de los registros en suelo firme que son con los que se excita el perfil de suelo blando.

Para la estimación de los acelerogramas en superficie se empleó el programa DEEPSOIL considerando un perfil del suelo con las siguientes características:

- a) Cantidad de estratos considerados sobre la roca: 3
- b) Primer estrato de suelo (Fig 6):
- Espesor: 2 m (desde el nivel 0m hasta el nivel -2m)
 - Peso Unitarios: 16 kN/m³
 - Velocidad de onda: 216 m/s
 - Esfuerzo vertical efectivo: 16 kPa
 - Resistencia a cortante: 90 kPa
- c) Segundo estrato de suelo (Fig 7):
- Espesor: 6 m (desde el nivel -2 m hasta el nivel -8 m)
 - Peso Unitarios: 17 kN/m³
 - Velocidad de onda: 246 m/s
 - Esfuerzo vertical efectivo: 83 kPa
 - Resistencia a cortante: 90 kPa
- d) Tercer estrato de suelo (Fig 8):
- Espesor: 14 m (desde el nivel -8m hasta el nivel -22m)
 - Peso Unitarios: 18 kN/m³
 - Velocidad de onda: 415 m/s
 - Esfuerzo vertical efectivo: 260 kPa
 - Resistencia a cortante: 90 kPa

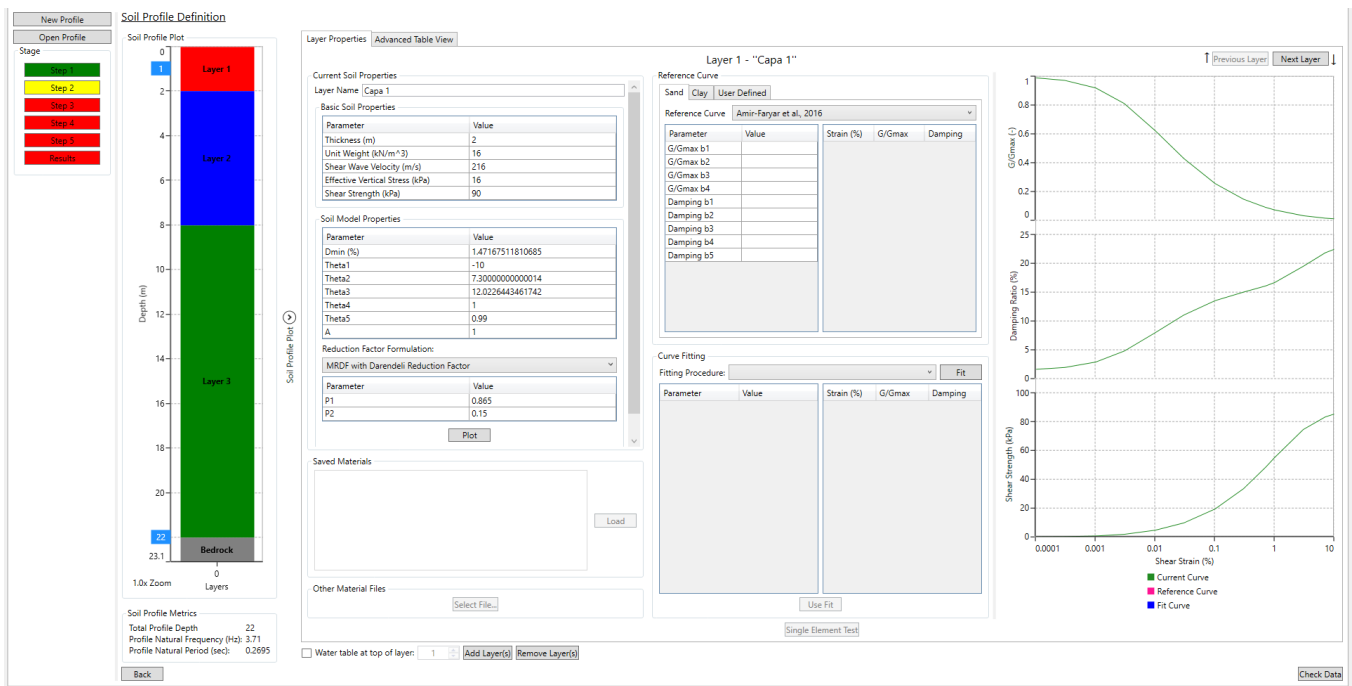


Fig 6. Características del primer estrato de suelo.

Fuente: Elaboración propia.

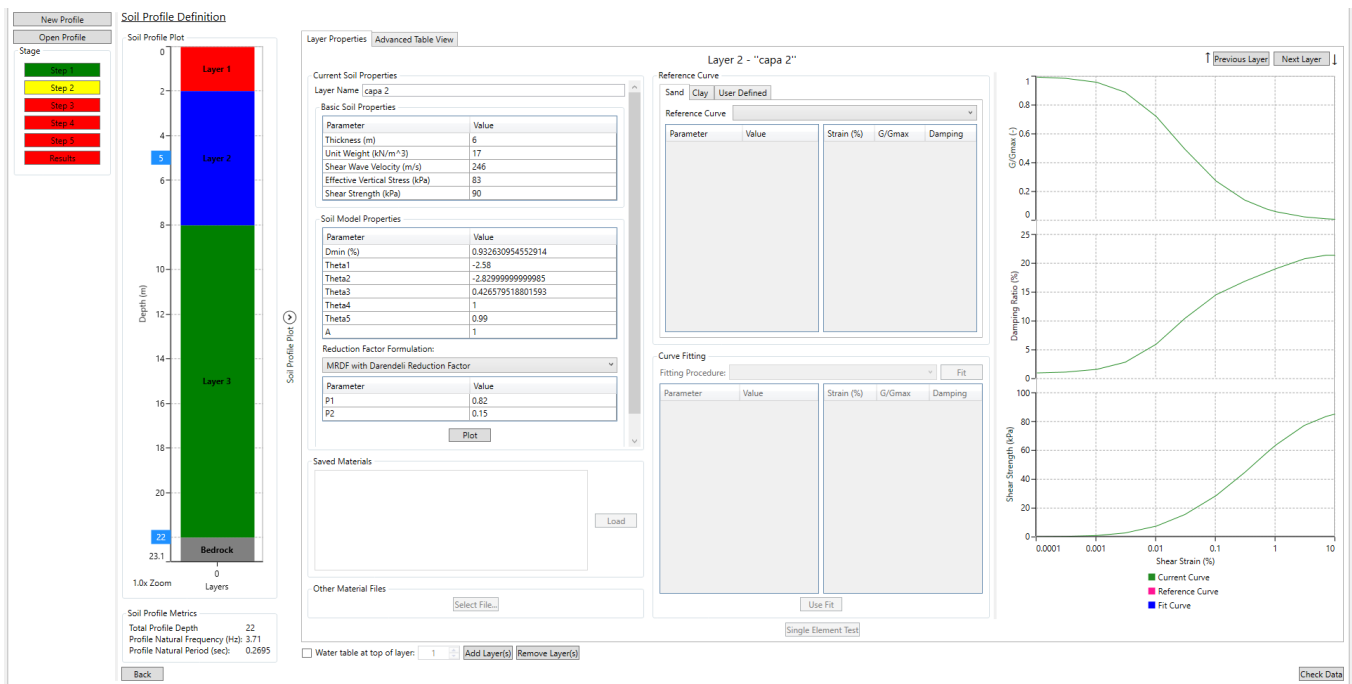


Fig 7. Características del segundo estrato de suelo.

Fuente: Elaboración propia.

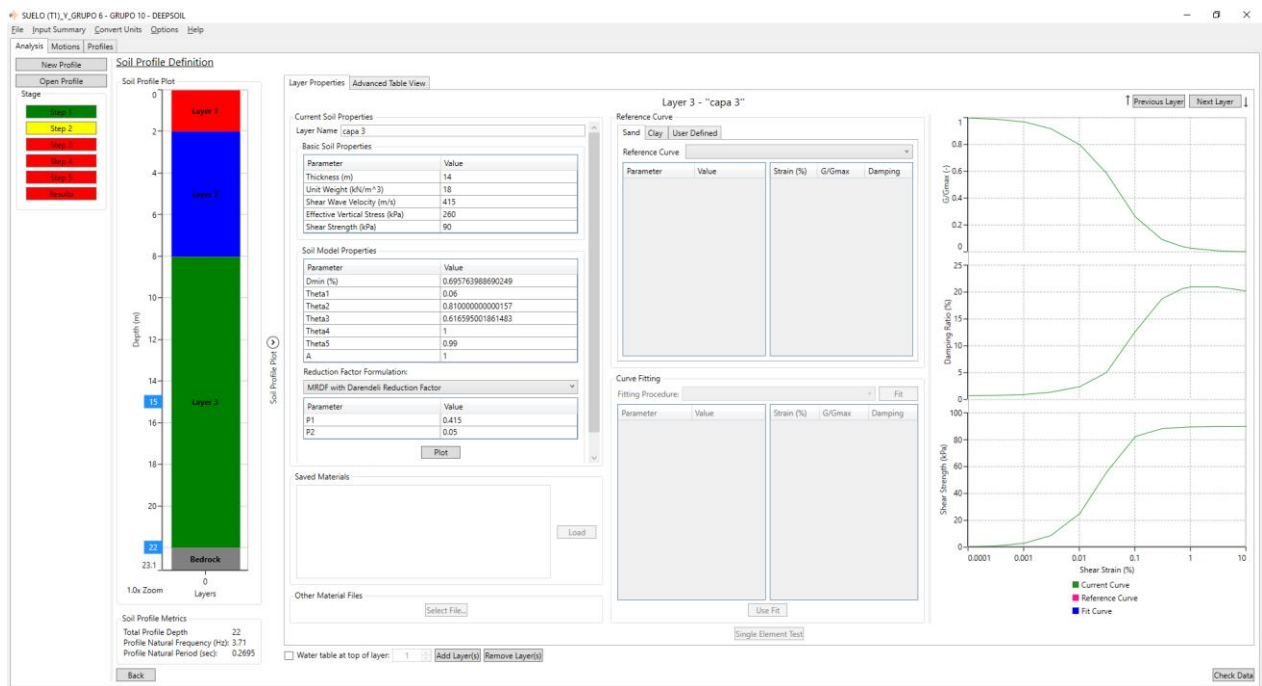


Fig 8. Características del tercer estrato del suelo.

Fuente: Elaboración propia.

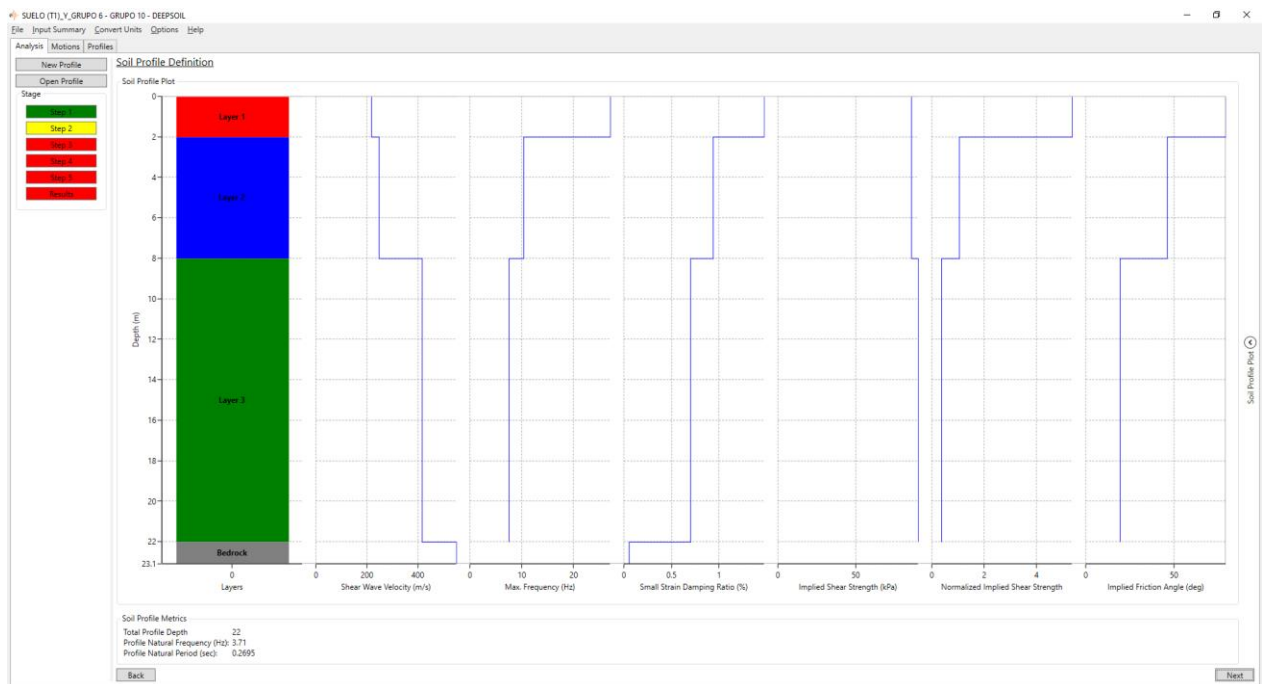


Fig 9. Distribución de las características de los estratos de suelo.

Fuente: Elaboración propia.

En las siguientes figuras se presenta una muestra de los espectros de aceleraciones para los registros en roca y su equivalente en superficie, se presentan para los diferentes rangos de aceleraciones descritos anteriormente.

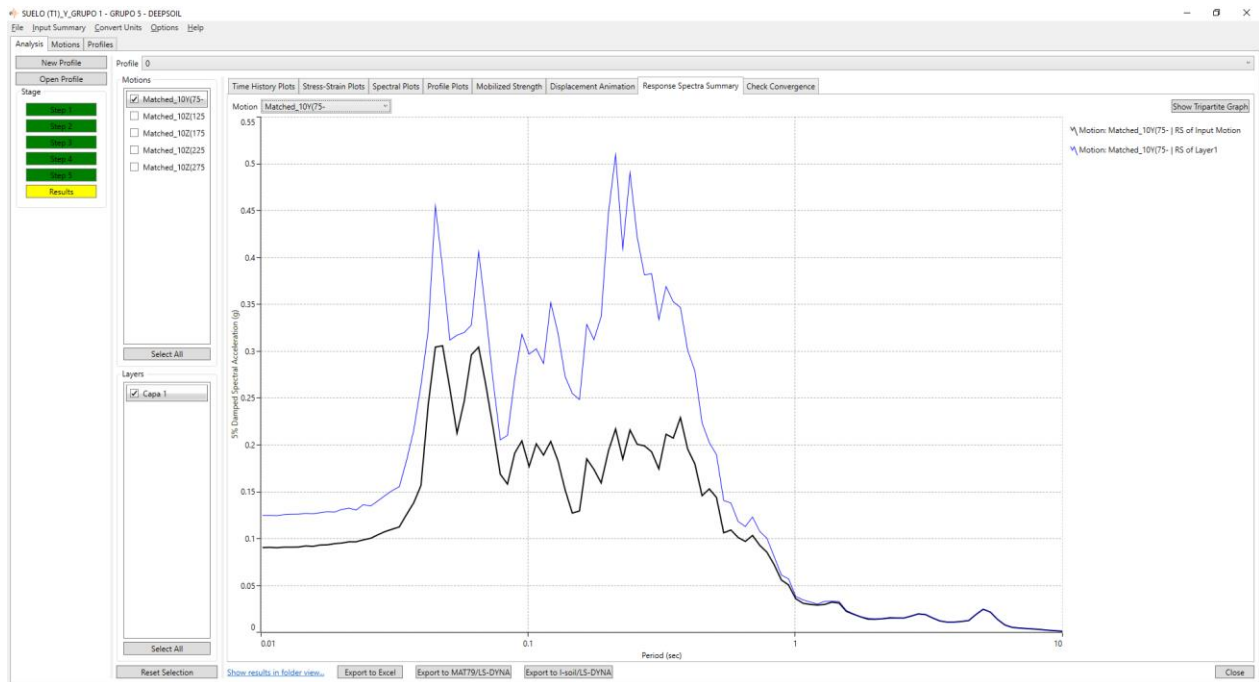


Fig 10. Espectro de aceleraciones para un acelerograma en roca (línea de color negro) con aceleración máxima en el rango de 75 a 125 gales, y el espectro para el acelerograma en superficie.

Fuente: Elaboración propia.

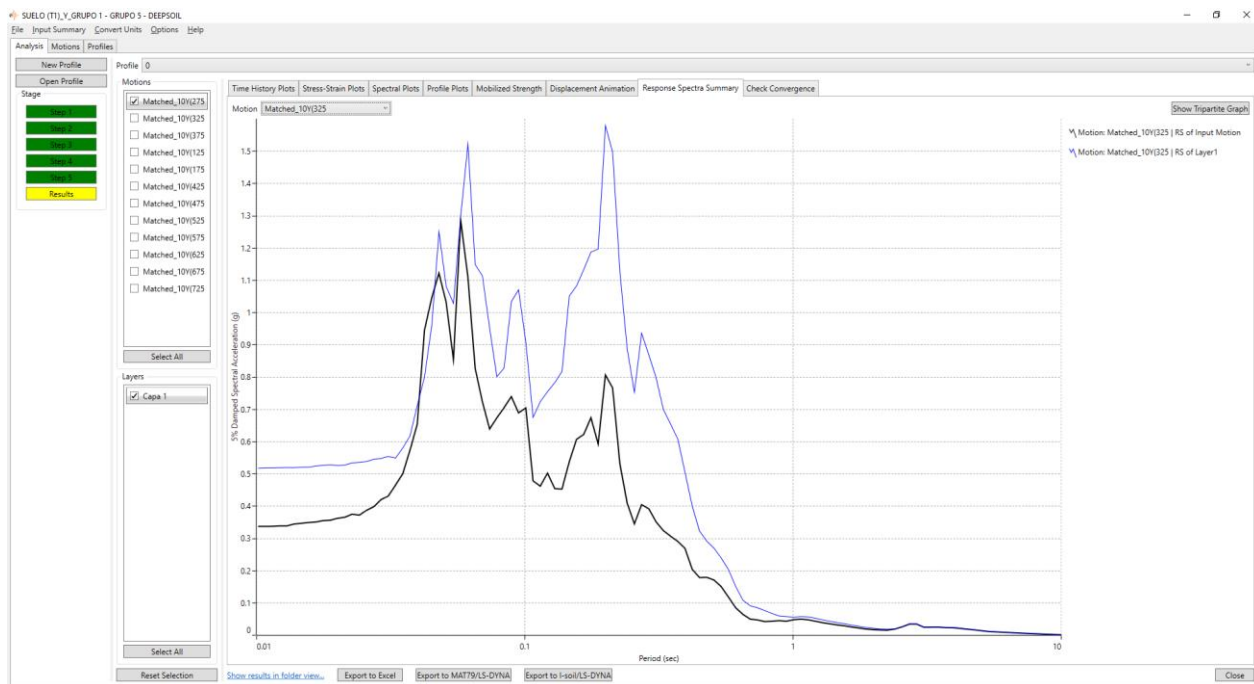


Fig 11. Espectro de aceleraciones para un acelerograma en roca (línea de color negro) con aceleración máxima en el rango de 325 a 375 gales, y el espectro para el acelerograma en superficie.

Fuente: Elaboración propia.

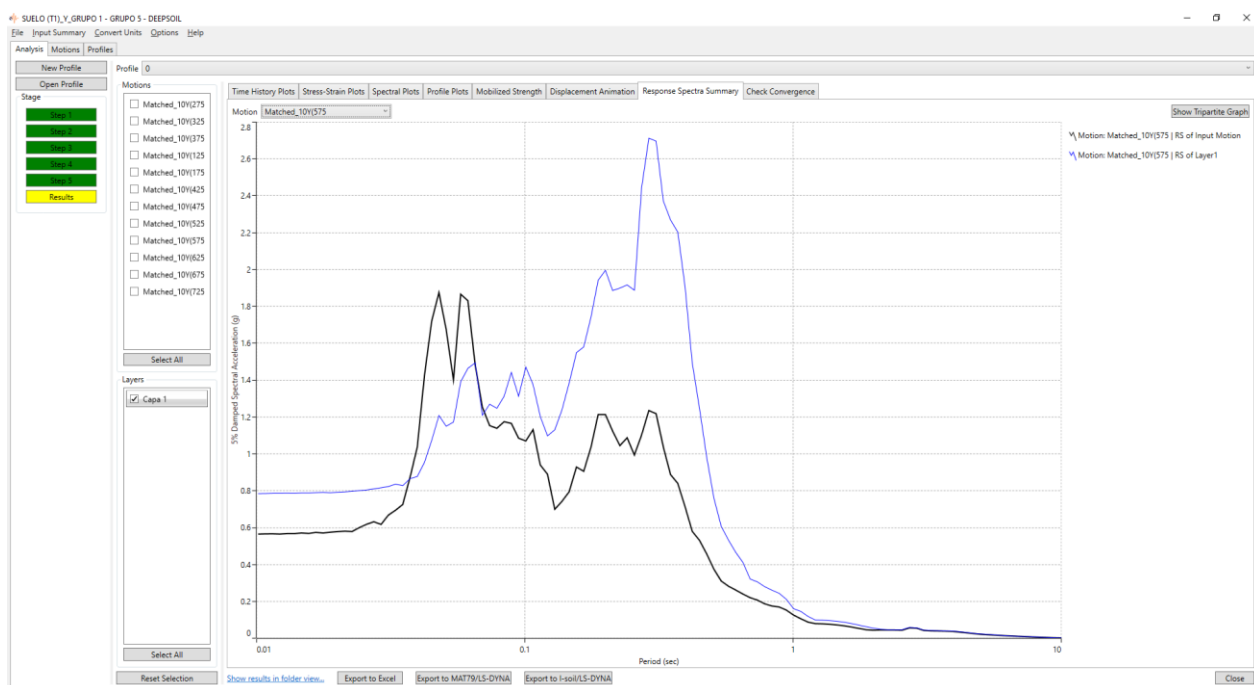


Fig 12. Espectro de aceleraciones para un acelerograma en roca (línea de color negro) con aceleración máxima en el rango de 575 a 625 gales, y el espectro para el acelerograma en superficie.

Fuente: Elaboración propia.

5.1.5 Probabilidad de falla de un equipo.

Con los insumos descritos, la probabilidad de falla de un equipo, PF, instalado en algún sitio del país, se puede calcular como la suma (integral) de la probabilidad de falla dada una aceleración a , por la probabilidad de ocurrencia de esa aceleración:

$$PF = \int_0^{\infty} Fr(a)f_A(a)da \quad (4)$$

Los límites de la integral planteada van desde aceleración nula hasta aceleración infinita. Esto es un formalismo matemático porque en realidad el integrando tiene valor no nulo solo a partir de la aceleración que genera probabilidades de daño en el equipo, que es cuando la función de fragilidad toma valores diferentes de cero, y también, el integrando tenderá a valores nulos para aceleraciones muy altas puesto que la probabilidad de ocurrencia de estas aceleraciones es casi nula. Operativamente solo se debe tener cuidado de que la aceleración asociada a λ_0 , la tasa de excedencia más alta de la que se tiene información, sea menor a la aceleración que comienza a generar fallas en los equipos, y extender la integral hasta una aceleración lo suficientemente alta, a_{∞} , por ejemplo 2g, para asegurar que para aceleraciones mayores la probabilidad de ocurrencia es igual a cero.

5.1.6 Periodo de retorno de la falla.

Hay un parámetro que nos es más familiar que la probabilidad de falla y sobre el que tenemos muchos más antecedentes contra quien comparar, juzgar y tomar decisiones. Nos referimos al Periodo de retorno de la falla del equipo, Pr , que significa: en promedio, cada cuanto tiempo se presentará la falla de un equipo si es que cada vez que falla se reconstruye exactamente con las mismas especificaciones. El Periodo de retorno no es otra cosa que el inverso de la tasa de falla de los equipos, y esta se calcula como la tasa de ocurrencia de eventos significativos, λ_0 , por la probabilidad de falla, PF, cada vez que ocurra un evento, independientemente de su aceleración:

$$Pr = \frac{1}{\lambda_0 PF} \quad (5)$$

Si se consideran las funciones propuestas para la tasa de excedencia de aceleraciones en terreno firme y para la función de fragilidad, la integral planteada para la probabilidad de falla se puede hacer analíticamente y el resultado para calcular el periodo de retorno a la falla resulta igual a:

$$Pr = \left[Ab \left(\frac{1}{(a_M - a_m)b(1-b)} (ba_M^{(1-b)} + (1-b)a_m a_M^{-b} - a_m^{(1-b)}) + \frac{a_M^{-b} - a_{\infty}^{-b}}{b} \right) \right]^{-1} \quad (6)$$

Es claro de la ec. 6 que el periodo de retorno de la falla no depende de la tasa de excedencia de la aceleración mínima significativa, λ_0 , como debe ser.

6 MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Criterio de falla del equipo.

Debido a que la porcelana es el elemento vulnerable del equipo de patio, el criterio de falla corresponderá a una demanda mayor que el esfuerzo de rotura de la porcelana aplicando un factor de seguridad de 2.00, según se establece en la norma IEEE-693-2018. En ese orden de ideas se analizará cada uno de los equipos descritos a continuación considerando tres tipologías de porcelana, a saber: Porcelana C110, C120 y C130. Cada una de las porcelanas descritas presentan un esfuerzo de rotura según lo presentado en la Fig 13. Aplicando el factor de seguridad de 2.00 el esfuerzo admisible queda en los siguientes valores:

- a) Porcelana C110: Esfuerzo rotura: 50 MPa, Esfuerzo admisible 25 MPa
- b) Porcelana C120: Esfuerzo rotura: 90 MPa, Esfuerzo admisible 45 MPa
- c) Porcelana C130: Esfuerzo rotura: 140 MPa, Esfuerzo admisible 70 MPa

Table 1a
(for figures underlined in bold, see clause 2)

1		Group		C 100						
				Alkaline aluminosilicate porcelains						
2		Type		Subgroup						
				C 110	C 111	C 112	C 120	C 130	C 140	
3		Name		Siliceous porcelains, plastic-processed	Siliceous porcelains, pressed	Cristobalite porcelains, plastic-processed	Aluminous porcelains	Aluminous porcelains, high strength	Lithia porcelains	
				4		Properties		Symbol		Units
5	Open (apparent) porosity, maximum	ρ_a	Vol %	<u>0,0</u>	<u>3</u>	<u>0,0</u>	<u>0,0</u>	<u>0,0</u>	<u>0,5</u>	
6	Bulk density, minimum	ρ_b	Mg m ⁻³	<u>2,2</u>	<u>2,2</u>	<u>2,3</u>	<u>2,3</u>	<u>2,5</u>	<u>2,0</u>	
7	Flexural strength, minimum	Unglazed	σ_b	MPa	<u>50</u>	<u>40</u>	<u>80</u>	<u>90</u>	<u>140</u>	<u>50</u>
		Glazed	σ_b	MPa	60	–	100	110	160	60
8	Modulus of elasticity, minimum	E	GPa	60	–	70	–	100	–	
10	Mean coefficient of linear thermal expansion	α_{30-100} (30 °C to 100 °C)	10 ⁻⁶ K ⁻¹	3 to 6	3 to 5	6 to 8	3 to 6	4 to 7	1 to 3	
11		α_{30-300} (30 °C to 300 °C)	10 ⁻⁶ K ⁻¹	3 to 6	3 to 6	6 to 8	3 to 6	4 to 7	1 to 3	
12		α_{30-600} (30 °C to 600 °C)	10 ⁻⁶ K ⁻¹	<u>4 to 7</u>	<u>4 to 7</u>	<u>6 to 8</u>	4 to 7	5 to 7	<u>1 to 3</u>	
13		$\alpha_{30-1000}$ (30 °C to 1 000 °C)	10 ⁻⁶ K ⁻¹	–	–	–	–	–	–	
14	Specific heat capacity 30 °C to 100 °C	$c_{p,30-100}$	J kg ⁻¹ K ⁻¹	750 to 900	800 to 900	800 to 900	750 to 900	800 to 900	750 to 900	
15	Thermal conductivity 30 °C to 100 °C	λ_{30-100}	W m ⁻¹ K ⁻¹	1 to 2,5	1 to 2,5	1,4 to 2,5	1,2 to 2,6	1,5 to 4,0	1,0 to 2,5	
16	Resistance to thermal shock, minimum	ΔT	K	150	150	150	150	150	<u>250</u>	
17	Electric strength, minimum*	E_b	kV mm ⁻¹	<u>20</u>	–	<u>20</u>	<u>20</u>	<u>20</u>	<u>15</u>	
18	Withstand voltage, minimum	U	kV	30	–	30	30	30	20	
19	Relative permittivity 48 Hz to 62 Hz	ϵ_r	–	6 to 7	–	5 to 6	6 to 7	6 to 7,5	5 to 7	
20	Temperature coefficient of permittivity	TK_ϵ	10 ⁻⁶ K ⁻¹	+600 to +500	–	+600 to +500	+600 to +500	+600 to +500	–	
21	Dissipation factor at 20 °C, maximum	48 Hz to 62 Hz	$\tan \delta_{48}$	10 ⁻³	<u>25</u>	–	<u>25</u>	<u>25</u>	<u>30</u>	<u>10</u>
		1 kHz	$\tan \delta_{1k}$	10 ⁻³	–	–	–	–	–	
		1 MHz	$\tan \delta_{1M}$	10 ⁻³	12	–	12	12	15	10
22	Volume resistivity in terms of temperature (d.c.), minimum	30 °C	$\rho_{v,30}$	Ω m	<u>10¹¹</u>	<u>10¹⁰</u>	<u>10¹¹</u>	<u>10¹¹</u>	<u>10¹¹</u>	<u>10¹¹</u>
200 °C		$\rho_{v,200}$	Ω m	10 ⁸	<u>10⁸</u>	10 ⁸	10 ⁸	10 ⁸	10 ⁷	
600 °C		$\rho_{v,600}$	Ω m	10 ²	10 ²	10 ²	10 ²	10 ²	10 ²	
23	Minimum temperature corresponding to a volume resistivity of 1 M Ω m	$T_{\rho 1}$	°C	200	200	200	200	200	200	
24	Minimum temperature corresponding to a volume resistivity of 0,01 M Ω m	$T_{\rho 0,01}$	°C	350	350	350	350	350	350	

* Given values refer to tests on specimens according to figure 6 of IEC 60672-2.

Fig 13. Imagen de la tabla 1 del documento IEC 60672-3.

Fuente: IEEE 693-2018

6.2 Equipos de patio sin aislamiento Sismico (NSI)

Los equipos de patio analizados corresponden a transformador de corriente e interruptor, los equipos mencionados para un nivel de tensión de 220 kV. Cada uno de los equipos fue modelado para dos situaciones: la primera corresponde con el equipo fijo a la fundación mediante su estructura de soporte. La segunda corresponde al equipo + estructura de soporte incluyendo el dispositivo de aislamiento sísmico. Para todos los equipos estudiados el modelo de análisis considera: el equipo y su estructura de soporte (Fig 14).

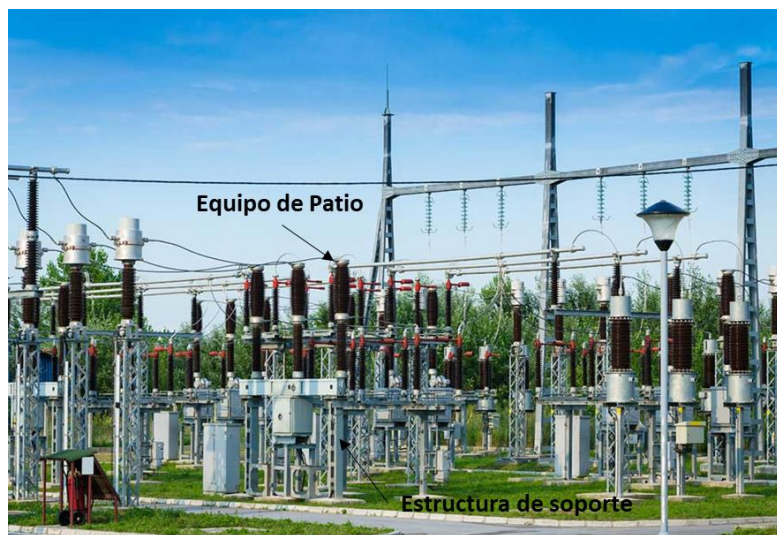


Fig 14. Disposición de equipos en patio de subestación eléctrica.

Fuente internet

6.2.1 Transformador de corriente 220 kv.

El equipo analizado es un transformador de corriente para un nivel de tensión de 220 kV cuyas dimensiones generales se muestran en la Fig 15. La altura total del equipo es 3710 mm hasta el nivel de conexión, su peso total es de 5297 N y está dispuesto sobre una estructura en celosía metálica que presenta una altura de 2200 mm. El acero que conforma la estructura de soporte del equipo cumple con la norma ASTM A572 grado 50, por lo tanto, el esfuerzo de fluencia es 343 MPa.

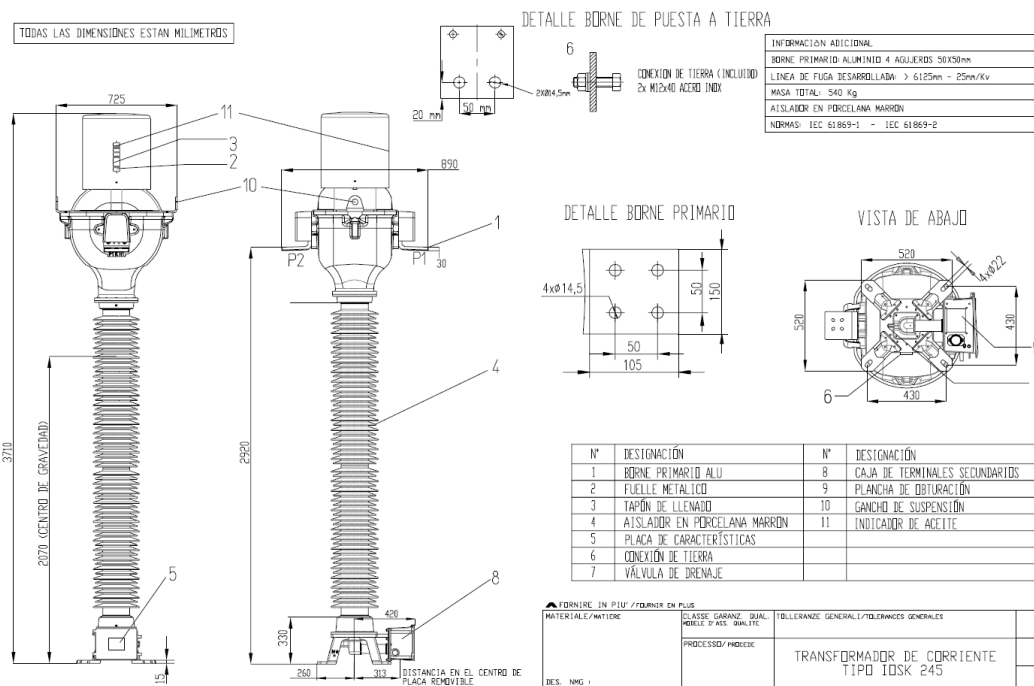


Fig 15. Dimensiones generales del equipo.

Fuente: Edemco.

6.2.1.1 Estructura de soporte del equipo.

El equipo estará dispuesto sobre estructura metálica en celosía. La altura de la estructura es de 2200 mm, los montantes estarán compuestos por secciones de L64x4.8 mm y las diagonales L44x4.8 mm.

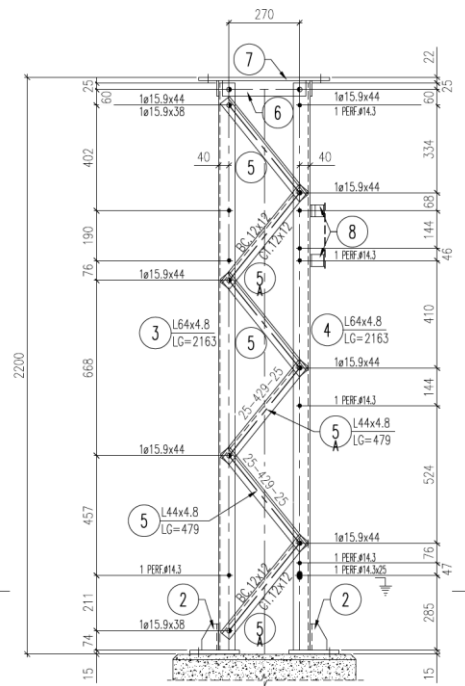


Fig 16. Estructura de soporte.

Fuente: Edemco.

6.2.1.2 Propiedades de los elementos de la estructura de soporte

Montante: L64X4.8 mm

Riostras: L44x4.8 mm

6.2.1.3 Carga de conexionado

Tensión horizontal de 785 N

6.2.1.4 Combinaciones de carga

En la Tabla 4 se presentan las combinaciones de carga empleadas en el análisis del equipo.

Tabla 4. Combinaciones de carga empleadas en el análisis

CONDICIÓN 1	1.00*D+1.00*SISMO+1.00*OPERACIÓN+1.00*TENSION DEL CONDUCTOR
-------------	---

6.2.1.5 Modelo de elementos finitos

En la Fig 17 se presentan las dimensiones generales del transformador de corriente. El elemento que presenta la mayor vulnerabilidad es el aislador, el cual está constituido en porcelana con un diámetro externo de 192 mm e interno de 132 mm. La masa total del equipo por polo es de 5297 N. La estructura de soporte del equipo es metálica conformada por ángulo en acero A572 - 50. El amortiguamiento

considerado es del 2%. El centro de gravedad del equipo se encuentra a una altura de 3480 mm medidos desde su base.

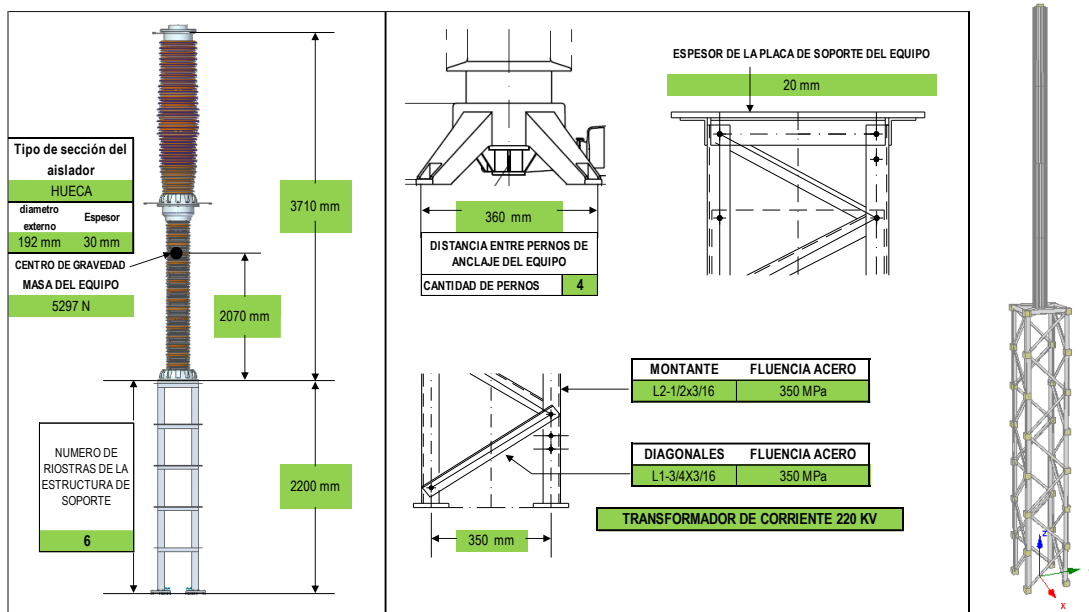


Fig 17. Datos para modelamiento del transformador de corriente y estructura de soporte.

Fuente: Elaboración propia.

6.2.1.6 Frecuencias y periodos de vibración

Para el análisis se incluyeron 12 modos de vibración, para los cuales se logró una participación de masa del 98% en las direcciones X, Y, Z.

Los modos que mayor participación de masa se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 5. Periodos y frecuencias naturales.

Mode	Period	
	(sec)	Frequency (Hertz)
1	0,13	7,90
2	0,13	7,90
3	0,02	48,95
4	0,02	48,95
5	0,01	150,87
6	0,01	150,87
7	0,01	199,72
8	0,00	215,95
9	0,00	215,95
10	0,00	620,30

Mode	Period	
	Frequency	
11	0,00	1052,03
12	0,00	1713,58

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6. Participación de masas para cada uno de los modos de vibración.

Mode	Period	[Ux]	[Uy]	[Uz]
1	0,127	80,19%	0,00%	0,00%
2	0,127	80,19%	80,19%	0,00%
3	0,020	95,11%	80,19%	0,00%
4	0,020	95,11%	95,11%	0,00%
5	0,007	97,19%	95,11%	0,00%
6	0,007	97,19%	97,19%	0,00%
7	0,005	97,19%	97,19%	94,72%
8	0,005	100,00%	97,19%	94,72%
9	0,005	100,00%	100,00%	94,72%
10	0,002	100,00%	100,00%	97,28%
11	0,001	100,00%	100,00%	100,00%
12	0,001	100,00%	100,00%	100,00%

Fuente: Elaboración propia.

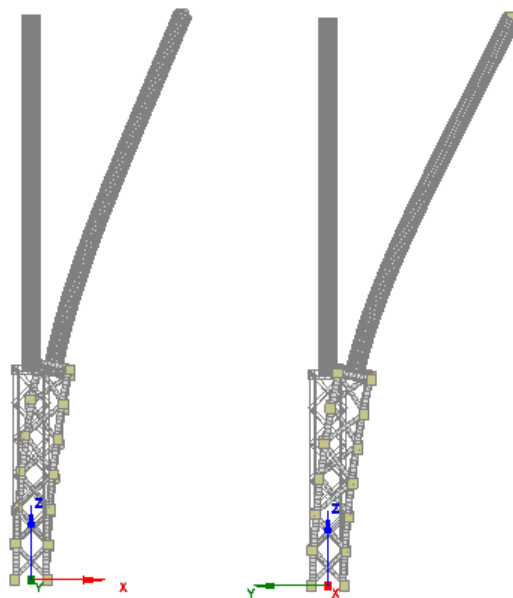


Fig 18. Deformada para los modos de vibración. Modo 1, periodo 0.22 s y Modo 2 con un periodo de 0.22 s.

Fuente: Elaboración propia.

6.2.2 Interruptor 220 kv.

El equipo analizado es un interruptor para un nivel de tensión de 220 kV cuyas dimensiones generales se muestran en la Fig 19. La altura total del equipo es 4684 mm, su peso total es de 9200 N y está dispuesto sobre una estructura en celosía metálica que presenta una altura de 2456 mm. Según la información suministrada por el fabricante del equipo la carga máxima admisible en el terminal de alta tensión es de 2000 N. El acero que conforma la estructura de soporte del equipo cumple con la norma ASTM A572 grado 50, por lo tanto, el esfuerzo de fluencia es 343 MPa.

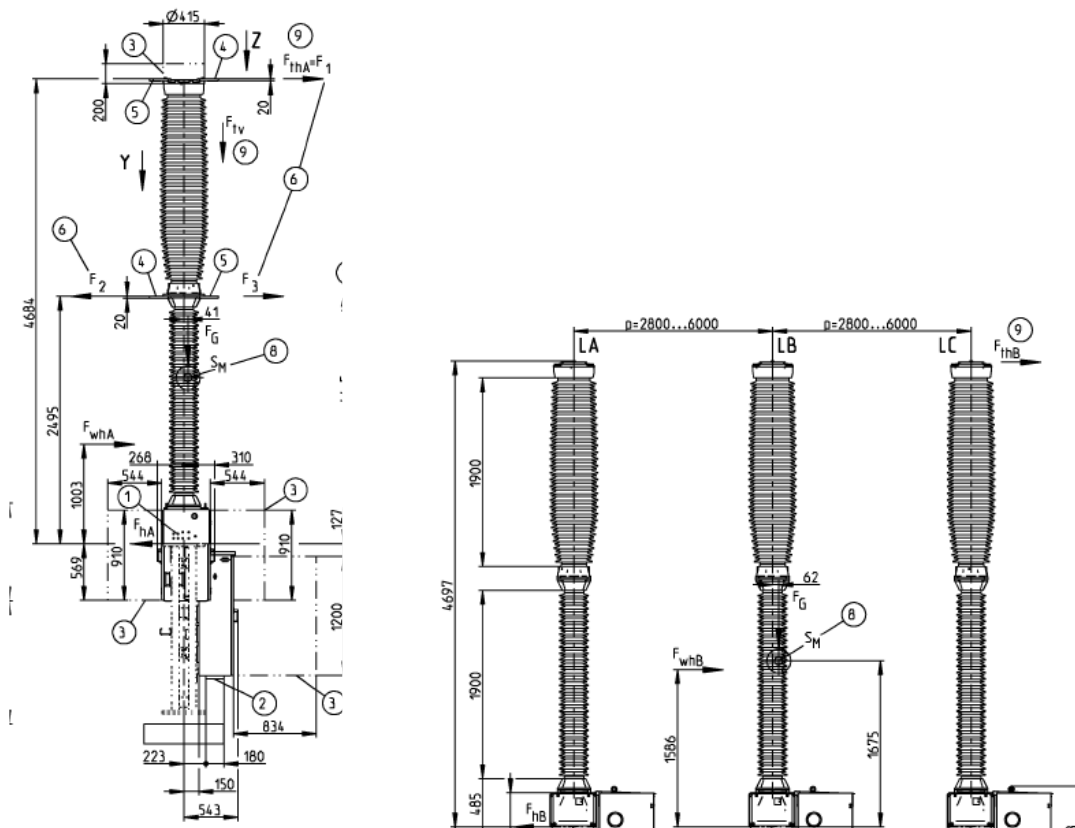


Fig 19. Dimensiones generales del equipo.

Fuente: Edemco.

6.2.2.1 Propiedades de los elementos de la estructura de soporte.

Cada polo del equipo estará dispuesto sobre estructura metálica en celosía, los cuales se presentan en la Fig 20. La altura de cada estructura es de 2456 mm.

6.2.2.2 Carga de conexionado

Tensión horizontal de 785 N

6.2.2.3 Combinaciones de carga

En la siguiente tabla se presentan las combinaciones de carga empleadas en el análisis del equipo.

Tabla 7. Combinaciones de carga empleadas en el análisis.

CONDICIÓN 1	$1.00 * D + 1.00 * SISMO + 1.00 * OPERACIÓN + 1.00 * TENSION DEL CONDUCTOR$
-------------	---

6.2.2.4 Modelo de elementos finitos

En la Fig 21 se presentan las dimensiones generales del interruptor. El elemento que presenta la mayor vulnerabilidad es el aislador, el cual está constituido en porcelana. La masa total del equipo por polo es de 9200 N (938 kg). La estructura de soporte del equipo es metálica conformada por ángulo en acero A572 - 50. El amortiguamiento considerado es del 2%. El centro de gravedad del equipo se encuentra a una altura de 1675 mm medidos desde su base.

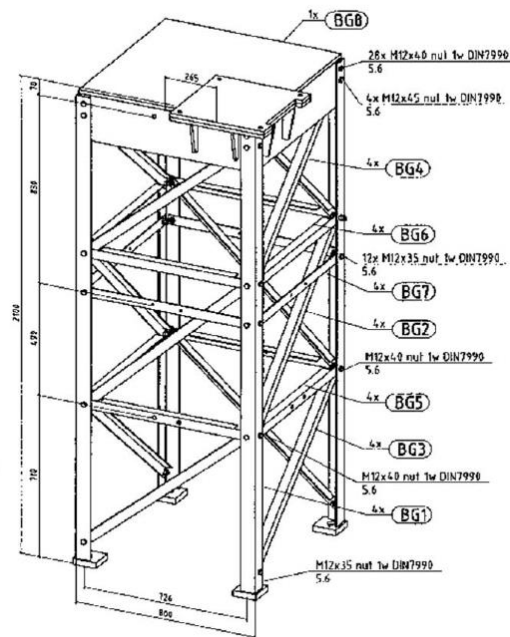


Fig 20. Celosía para soporte del equipo.

Fuente: Edemco.

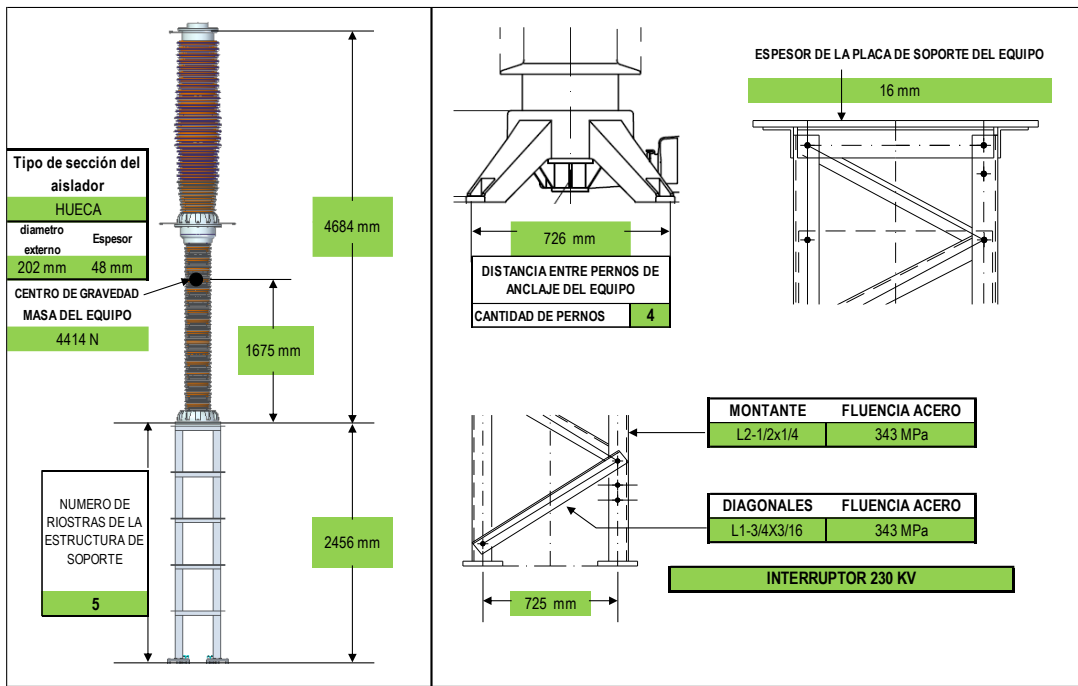
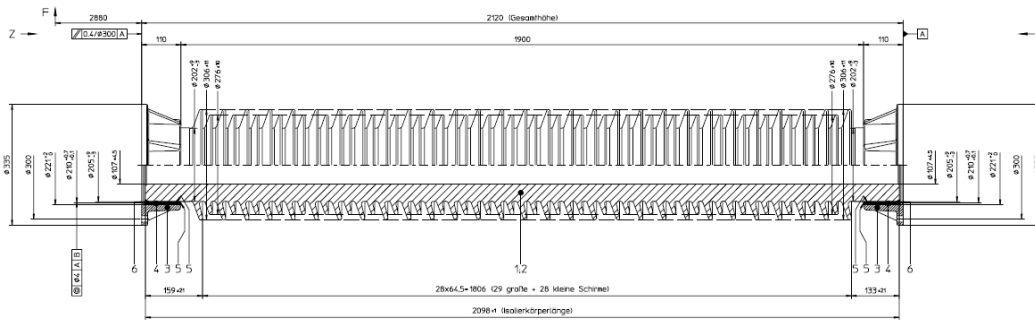
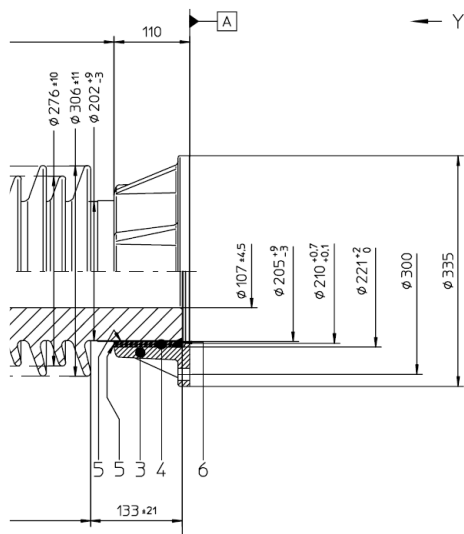


Fig 21. Datos para modelamiento del interruptor y estructura de soporte.

Fuente: Elaboración propia.





Toleranz: IEC 62155 (VDE 0674 Teil 200)
 Splittung: DIN 48 108 Teil 2 - S

Werkstoff:

- * Isolierkörper: C130 IEC 60672-3 (VDE 0335 Teil 3)
- * Armaturen: min. EN-GJS-400-15 - EN 1563
verzinkt
- * Kittung: Portlandzement-Mörtel (Vorschrift 600.2000.106)
- * Versiegelung der bewitterten Kittfugen: Inertol 49 W dick
- * Versiegelung der Schleifflächen-Kittfugen: Terostat
- * Anstrich der Porzellan-Kittstellen: Inertol 49 W dick

Sonstige technische Anforderungen:

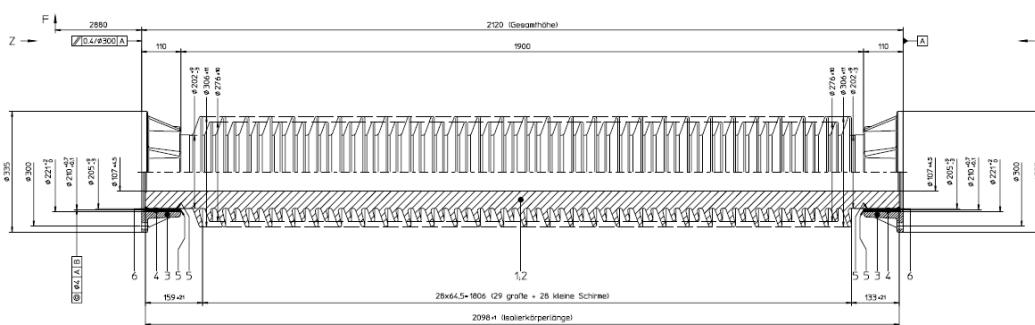
- * Kriechweg nom. 6 279 mm
- * Kriechweg min. 6 125 mm
- * Umbruchmoment M min. = 52 000 Nm
- * Auslegungsdruck: 10 bar

Bemerkungen:

- * Bem.1: Versiegelungsmasse darf nicht an den Isolierkörperstirnflächen überstehen

Fig 22. Características geométricas del aislador del interruptor, dimensiones en mm.

Fuente: Edemco.



Toleranz: IEC 62155 (VDE 0674 Teil 200)
 Splittung: DIN 48 108 Teil 2 - S

Werkstoff:

- * Isolierkörper: C130 IEC 60672-3 (VDE 0335 Teil 3)
- * Armaturen: min. EN-GJS-400-15 - EN 1563
verzinkt
- * Kittung: Portlandzement-Mörtel (Vorschrift 600.2000.106)
- * Versiegelung der bewitterten Kittfugen: Inertol 49 W dick
- * Versiegelung der Schleifflächen-Kittfugen: Terostat
- * Anstrich der Porzellan-Kittstellen: Inertol 49 W dick

Sonstige technische Anforderungen:

- * Kriechweg nom. 6 279 mm
- * Kriechweg min. 6 125 mm
- * Umbruchmoment M min. = 52 000 Nm
- * Auslegungsdruck: 10 bar

Bemerkungen:

- * Bem.1: Versiegelungsmasse darf nicht an den Isolierkörperstirnflächen überstehen

Fig 23. Características geométricas del aislador del interruptor, dimensiones en mm.

Fuente: Edemco.

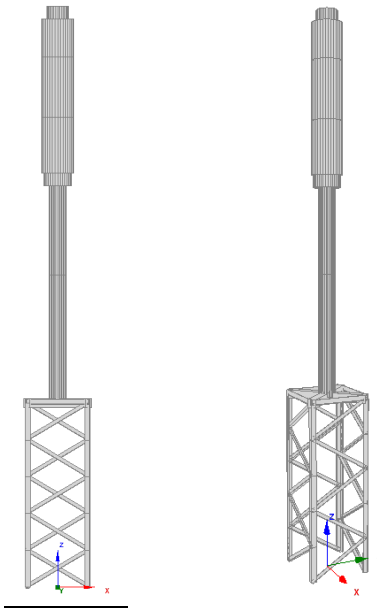


Fig 24. Vista general del modelo del equipo en elementos finitos.

Fuente: Elaboración propia.

6.2.2.5 Frecuencias y periodos de vibración

Para el análisis se incluyeron 10 modos de vibración, para los cuales se logró una participación de masa del 98% en las direcciones X, Y, Z.

Los modos que mayor participación de masa presentan en la siguiente tabla.

Tabla 8. Periodos y frecuencias naturales.

<i>PERÍODOS Y FRECUENCIAS MODALES</i>			
Modo	Período (seg)	Frecuencia (Hertz)	Frecuencia Angular (rad/seg)
1	0.22174116	4.50976268	28.33567461
2	0.22174116	4.50976268	28.33567461
3	0.05531423	18.07852917	113.59074888
4	0.05531423	18.07852917	113.59074888
5	0.02627073	38.06517894	239.17057301
6	0.02627073	38.06517894	239.17057301
7	0.02205699	45.33710908	284.86145763
8	0.02030998	49.23686892	309.36437134
9	0.00921047	108.57211347	682.17870810
10	0.00649105	154.05824079	967.97647501

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9. Participación de masas para cada uno de los modos de vibración.

<i>Modo</i>	<i>Período</i>	[<i>Ux</i>]	[<i>Uy</i>]	[<i>Uz</i>]
1	0.22174116	52.29%	0.00%	0.00%
2	0.22174116	52.29%	52.29%	0.00%
3	0.05531423	52.29%	91.53%	0.00%
4	0.05531423	91.53%	91.53%	0.00%
5	0.02627073	97.70%	91.53%	0.00%
6	0.02627073	97.70%	97.70%	0.00%
7	0.02205699	97.70%	97.70%	4.80%
8	0.02030998	97.70%	97.70%	91.78%
9	0.00873163	97.82%	97.84%	91.78%
10	0.00627393	99.13%	98.01%	91.78%

Fuente: Elaboración propia.

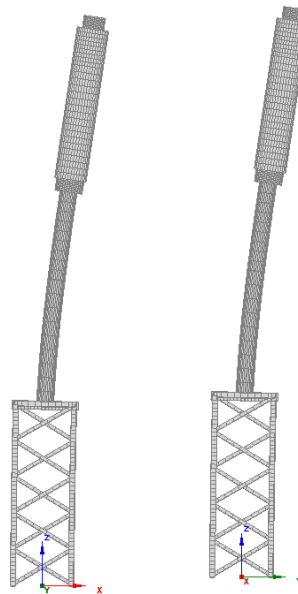


Fig 25. Deformada para los modos de vibración. Modo 1, periodo 0.22 s y Modo 2 con un periodo de 0.22 s.

Fuente: Elaboración propia.

6.3 Equipos de patio con aislamiento sísmico (SI)

En esta etapa se consideraron los equipos analizados incluyendo un dispositivo de disipación y aislamiento sísmico, el cual fue desarrollado por EAFIT y Ecuas Consultores y fue patentado bajo la resolución N° 23771 expedida por la Superintendencia de Industria y Comercio de la República de Colombia.

El Aislador Sísmico ha sido desarrollado en conjunto por Ecuas Consultores y la Universidad EAFIT en el marco de la spin off “Aisladores Sísmicos” y consiste en un dispositivo que aísla y disipa la energía producida por los movimientos sísmicos en estructuras esbeltas. Este mecanismo ha sido construido a partir de resortes y amortiguadores (ver Fig 26) que funcionan de manera similar al sistema de suspensión de un vehículo.

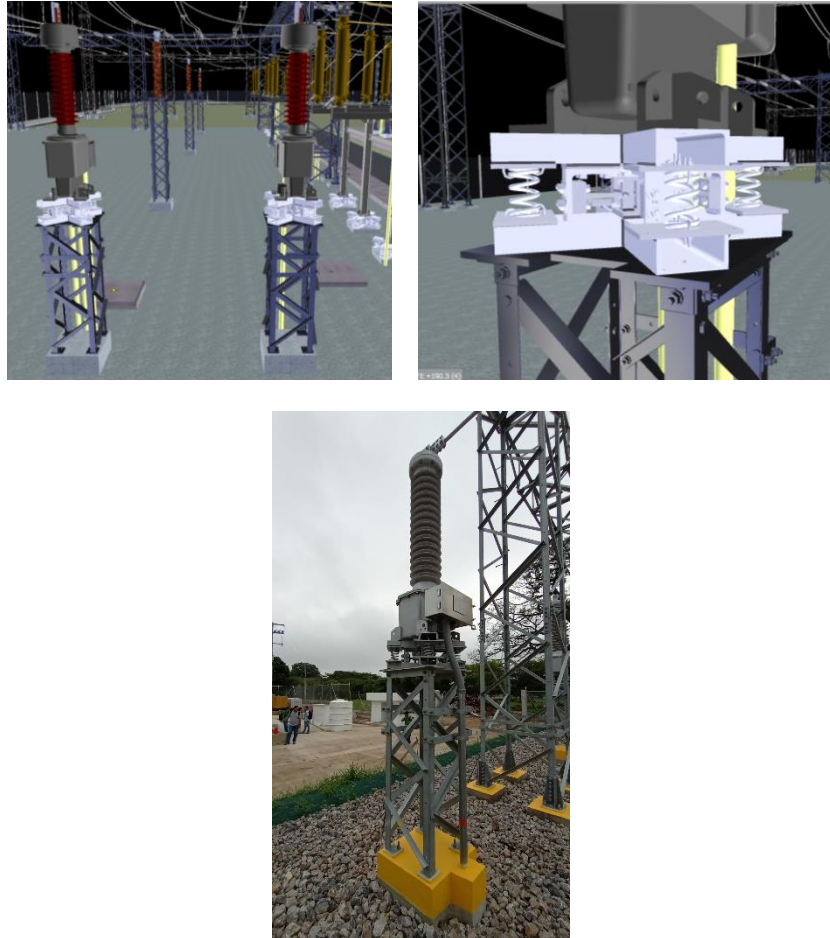


Fig 26. Disposición y geometría del aislador sísmico empleado.

Fuente: Edemco.

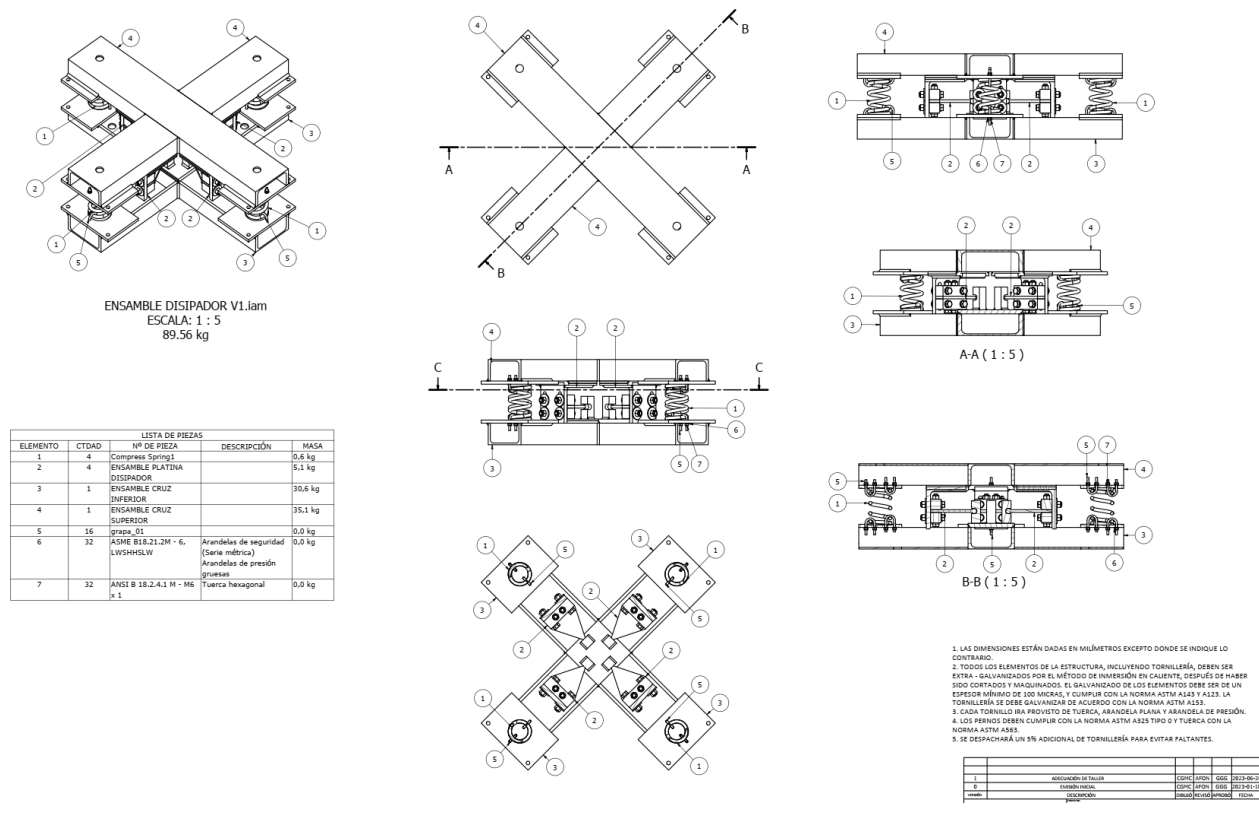


Fig 27. Esquema de fabricación del aislador sísmico.

Fuente Ecuas

6.3.1 Transformador de corriente 220 kv.

6.3.1.1 Frecuencias y periodos de vibración

Para el análisis se incluyeron 10 modos de vibración, para los cuales se logró una participación de masa del 98% en las direcciones X, Y, Z.

Los modos que mayor participación de masa presentan en la siguiente tabla.

Tabla 10. Periodos y frecuencias naturales.

Mode	Period (sec)	Frequency (Hertz)
1	0.92	1.08
2	0.75	1.33
3	0.09	10.67
4	0.05	18.76
5	0.05	20.18
6	0.02	40.87
7	0.02	63.40
8	0.01	89.70

<i>Mode</i>	<i>Period</i>	<i>Frequency</i>
9	0.00	201.55
10	0.00	257.30

Fuente: Elaboración propia.

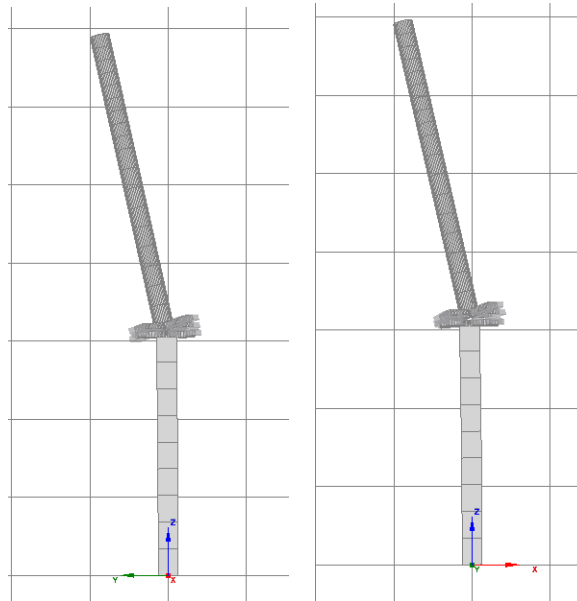


Fig 28. Deformada para los modos de vibración. Modo 1, periodo 0.92 s y Modo 2 con un periodo de 0.75 s.

Fuente: Elaboración propia.

6.3.2 Interruptor 220 kv

6.3.2.1 Frecuencias y periodos de vibración

Para el análisis se incluyeron 10 modos de vibración, para los cuales se logró una participación de masa del 98% en las direcciones X, Y, Z.

Los modos que mayor participación de masa presentan en la siguiente tabla.

Tabla 11. Periodos y frecuencias naturales.

<i>Mode</i>	<i>Period</i>	<i>Frequency</i>
	(sec)	(Hertz)
1	0.61	1.65
2	0.53	1.90
3	0.09	11.30
4	0.07	14.11
5	0.06	17.69
6	0.03	28.69

<i>Mode</i>	<i>Period</i>	<i>Frequency</i>
7	0.03	34.00
8	0.03	36.95
9	0.02	44.57
10	0.02	48.30

Fuente: Elaboración propia.

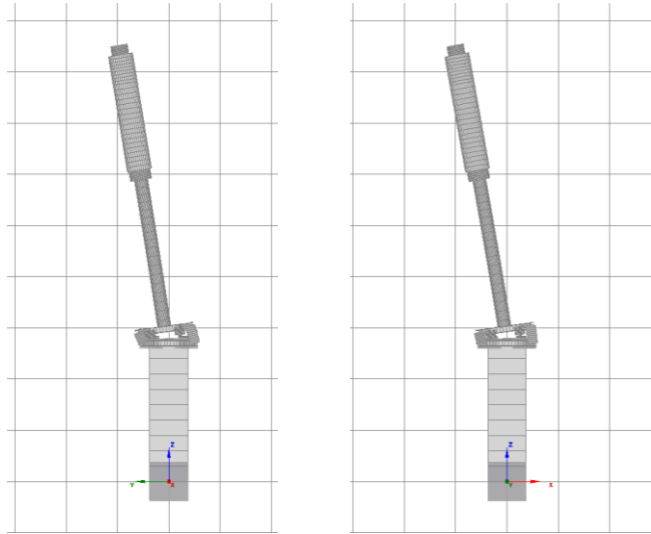


Fig 29. Deformada para los modos de vibración. Modo 1, periodo 0.61 s y Modo 2 con un periodo de 0.53 s.

Fuente: Elaboración propia.

7 RESULTADOS

7.1 Equipos sin aislamiento sísmico

7.1.1 Transformador de corriente 220 kV

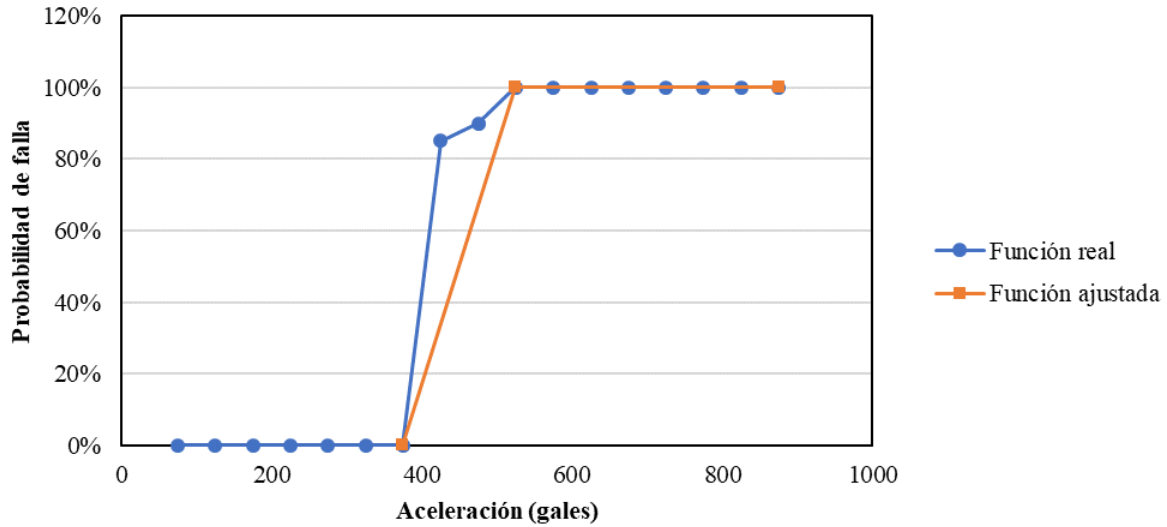


Fig 30. Función de fragilidad para el transformador de corriente, porcelana C110.

Fuente: Elaboración propia.

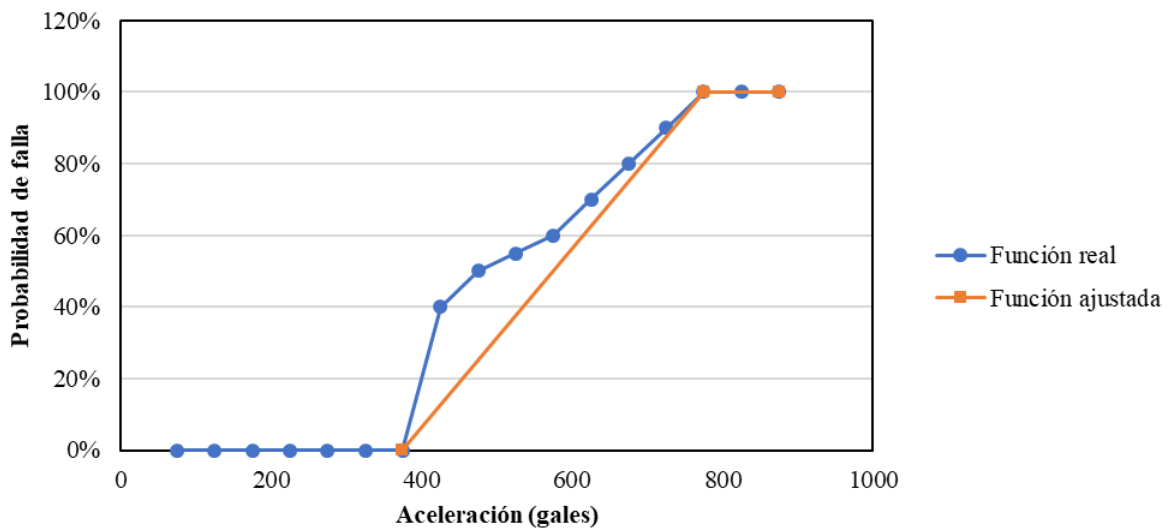


Fig 31. Función de fragilidad para el transformador de corriente, porcelana C120.

Fuente: Elaboración propia.

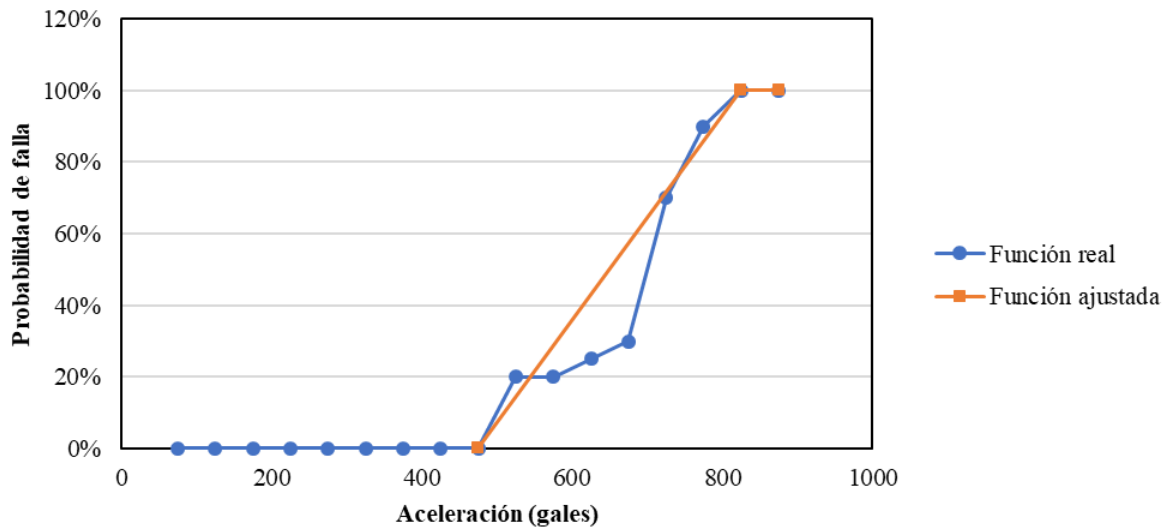


Fig 32. Función de fragilidad para el transformador de corriente, porcelana C130.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12. Valores de la curva de fragilidad para el transformador de corriente 220 kV.

Rango de aceleraciones	Cantidad de equipos con falla		
	Porcelana tipo A (C110)	Porcelana tipo B (C120)	Porcelana tipo C (C130)
	Porcentaje de falla	Porcentaje de falla	Porcentaje de falla
Gales			
75-125	0%	0%	0%
125-175	0%	0%	0%
175-225	0%	0%	0%
225-275	0%	0%	0%
275-325	0%	0%	0%
325-375	0%	0%	0%
375-425	0%	0%	0%
425-475	85%	40%	0%
475-525	90%	50%	0%
525-575	100%	55%	20%
575-625	100%	60%	20%
625-675	100%	70%	25%
675-725	100%	80%	30%
725-775	100%	90%	70%
775-825	100%	100%	90%
825-875	100%	100%	100%
875-925	100%	100%	100%
a₀	0.375	0.375	0.475
a_m	0.525	0.775	0.825
a_M	2	2	2

Fuente: Elaboración propia.

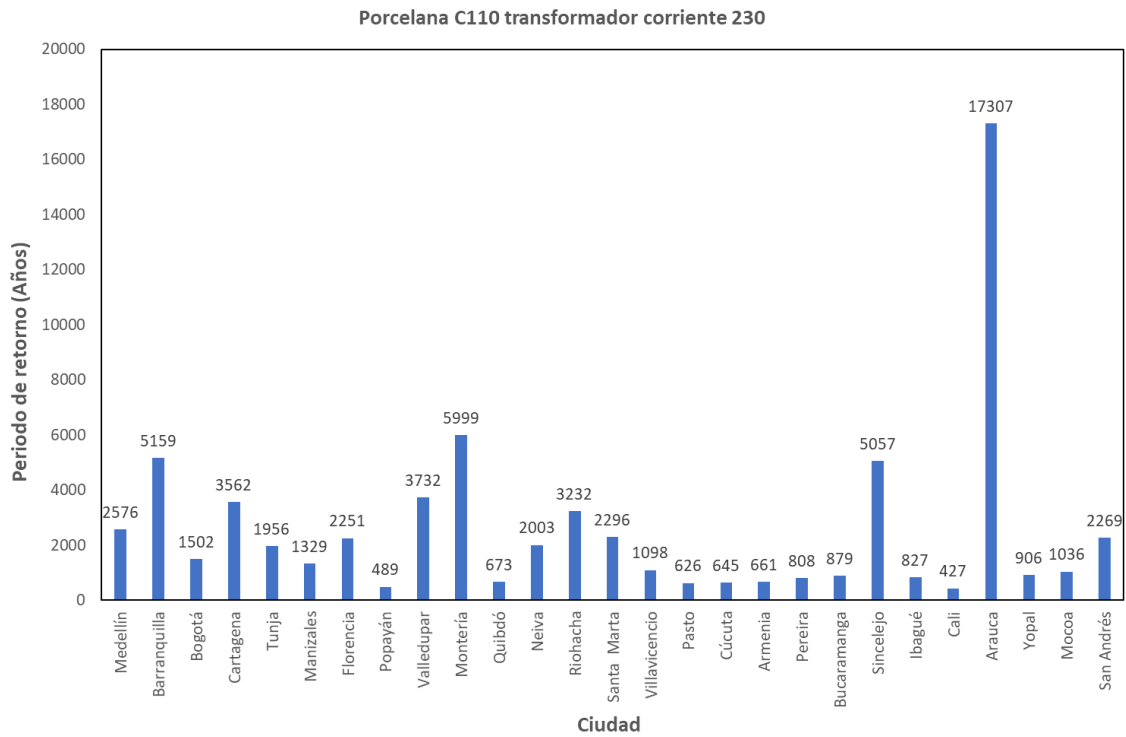


Fig 33. Periodo de retorno de la falla para el transformador de corriente con porcelana C110.

Fuente: Elaboración propia.

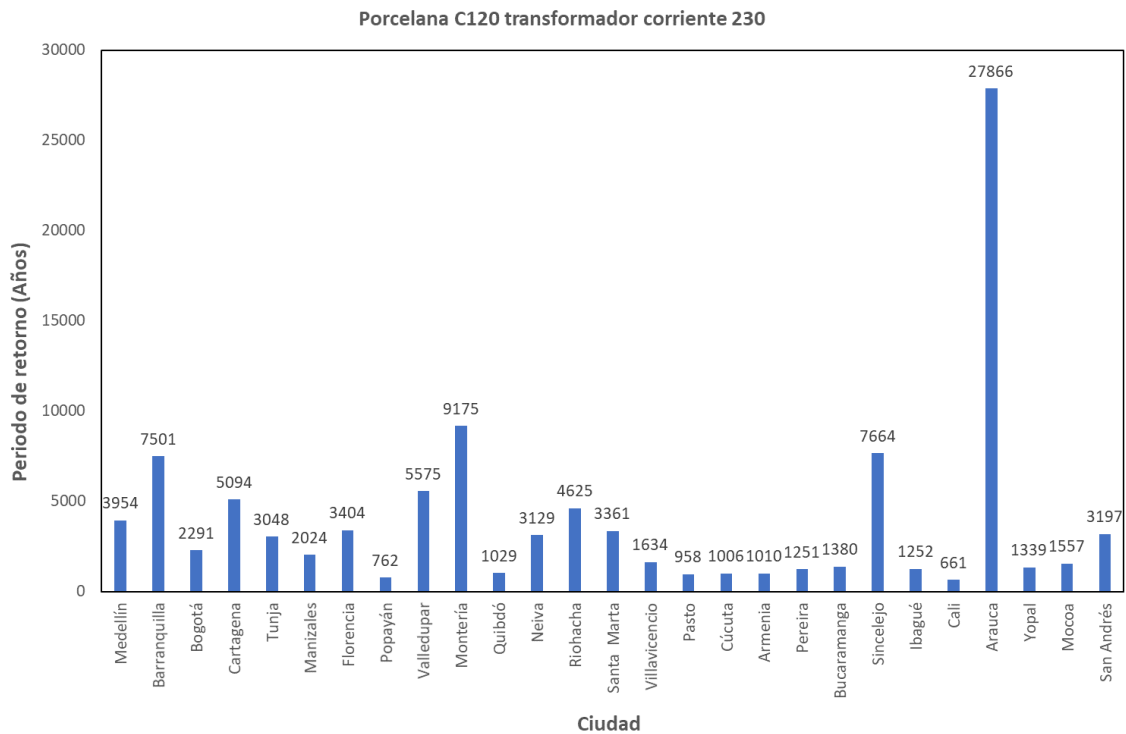


Fig 34. Periodo de retorno de la falla para el transformador de corriente con porcelana C120.

Fuente: Elaboración propia.

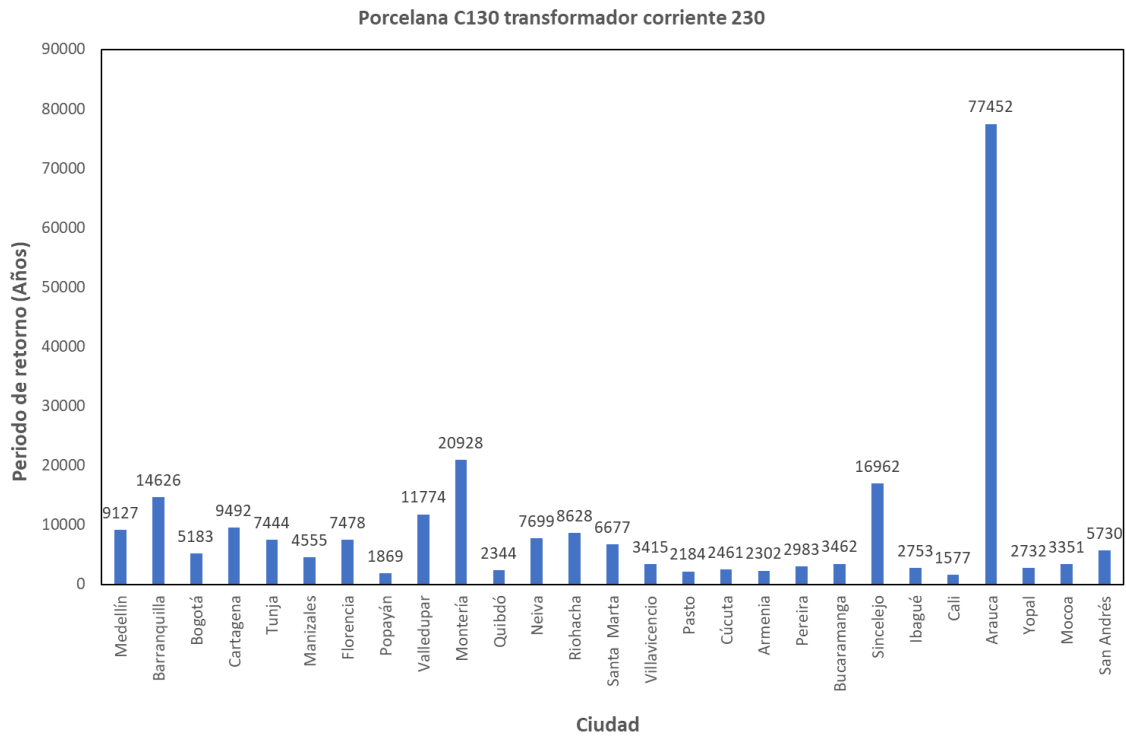


Fig 35. Periodo de retorno de la falla para el transformador de corriente con porcelana C130.

Fuente: Elaboración propia.

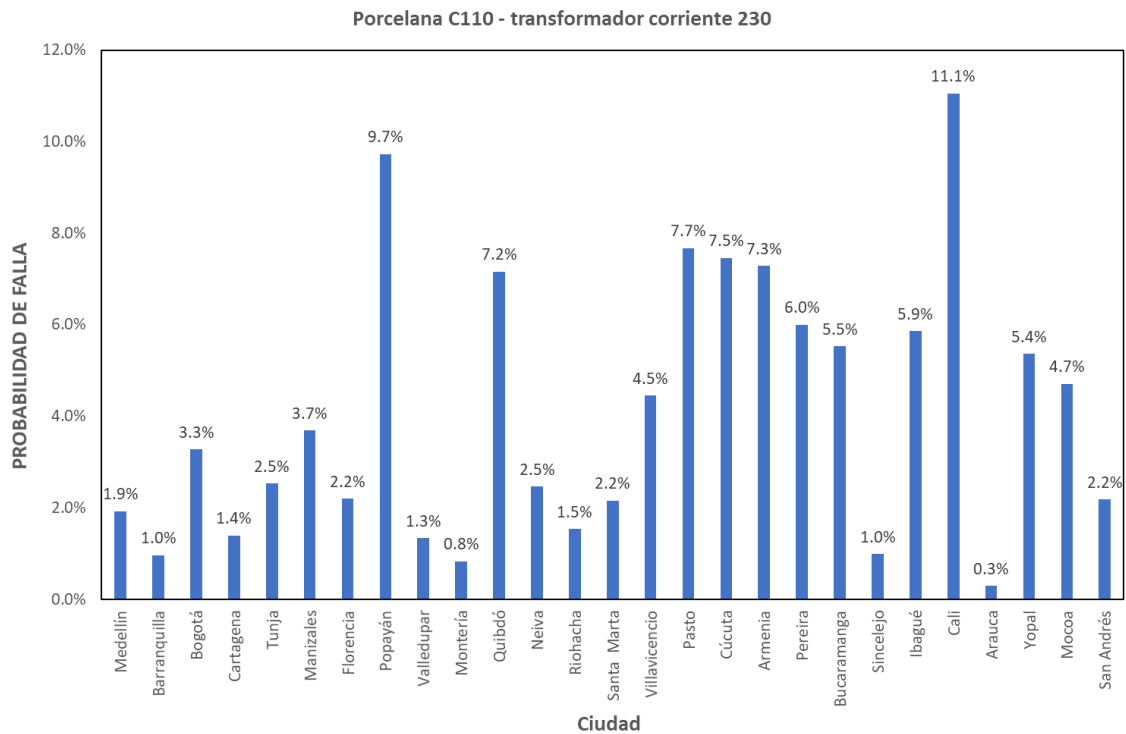


Fig 36. Probabilidad de falla en 50 años para el transformador de corriente con porcelana C110.

Fuente: Elaboración propia.

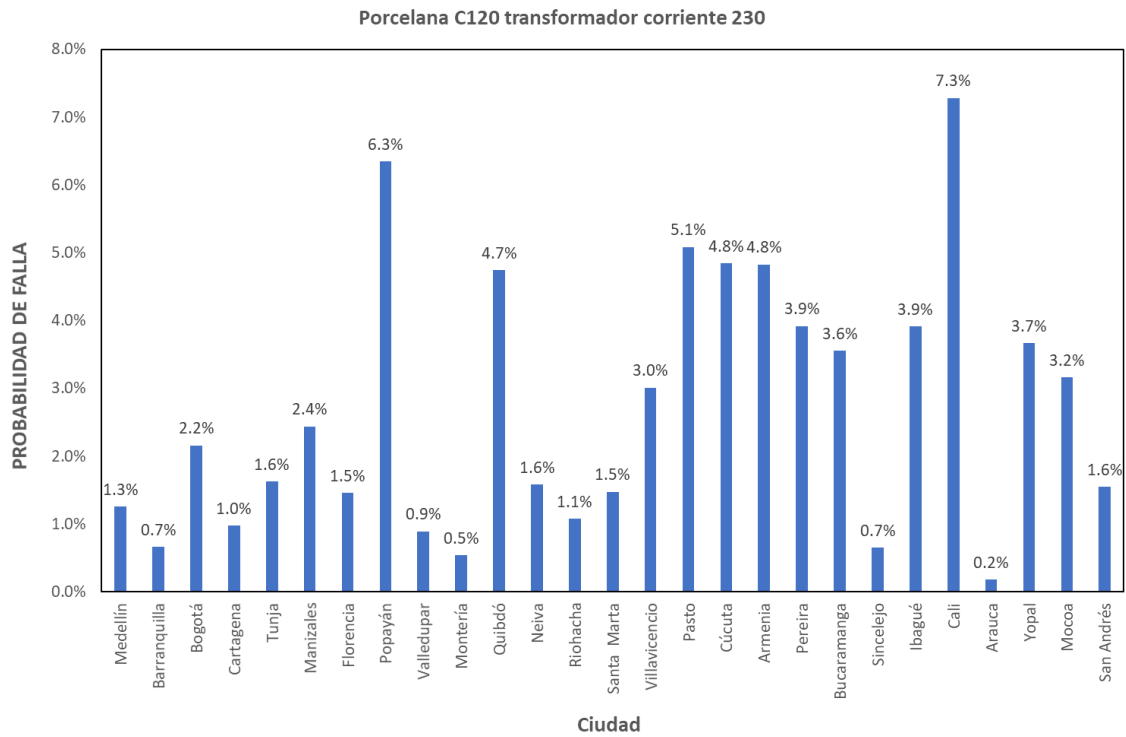


Fig 37. Probabilidad de falla en 50 años para el transformador de corriente con porcelana C120.

Fuente: Elaboración propia.

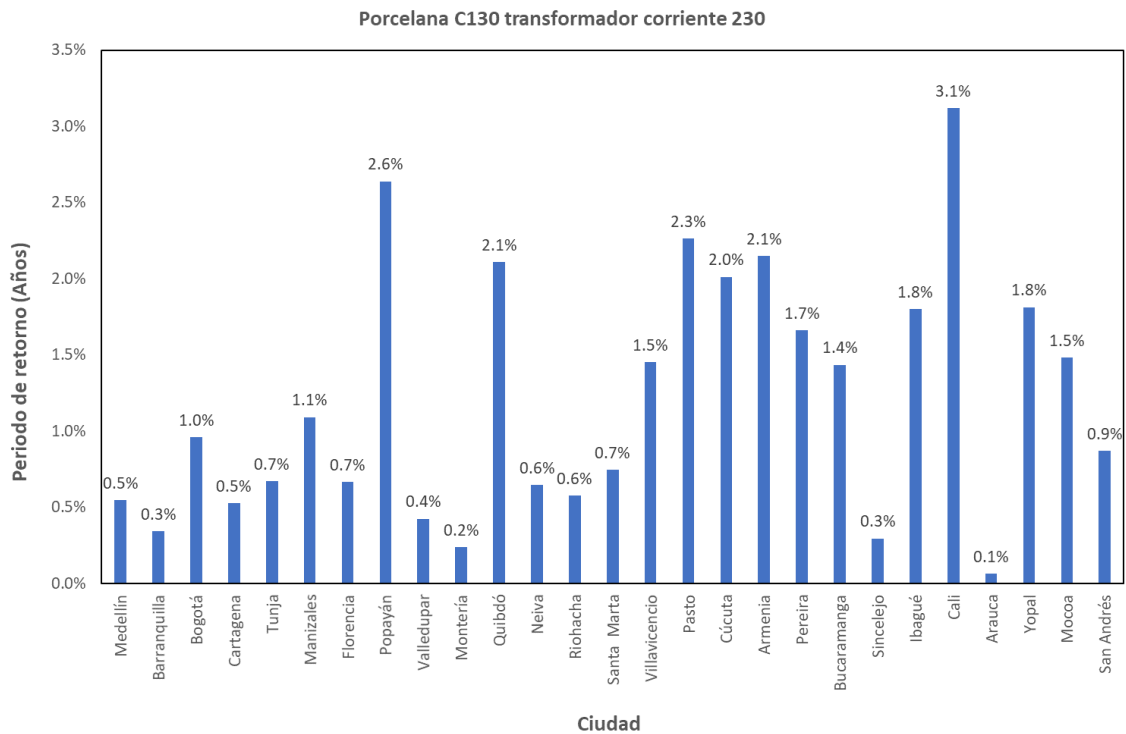


Fig 38. Probabilidad de falla en 50 años para el transformador de corriente con porcelana C130.

Fuente: Elaboración propia.

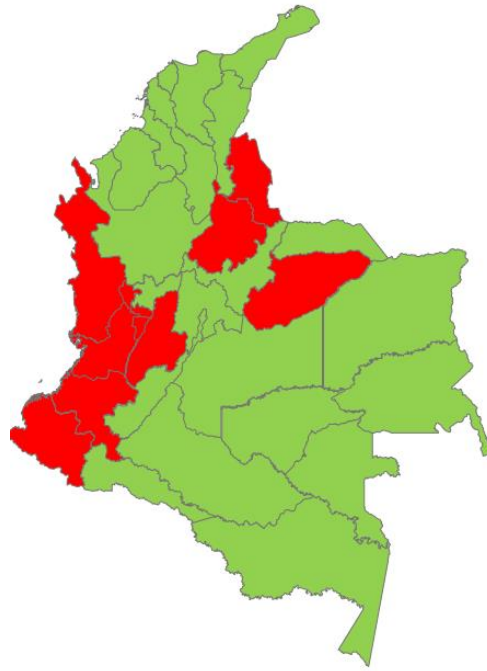


Fig 39. Distribución de probabilidad de falla en 50 años superior al 5% ($Tr=1000$ años), Transformador de corriente C110.

Fuente: Elaboración propia.

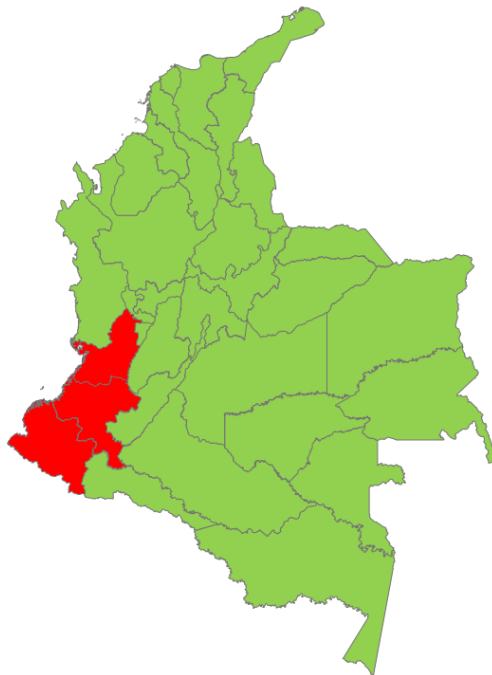


Fig 40. Distribución de probabilidad de falla en 50 años superior al 5% ($Tr=1000$ años), Transformador de corriente C120.

Fuente: Elaboración propia.



Fig 41. Distribución de probabilidad de falla en 50 años superior al 5% ($T_r=1000$ años), Transformador de corriente C130.

Fuente: Elaboración propia.

7.1.2 Interruptor 220 kV

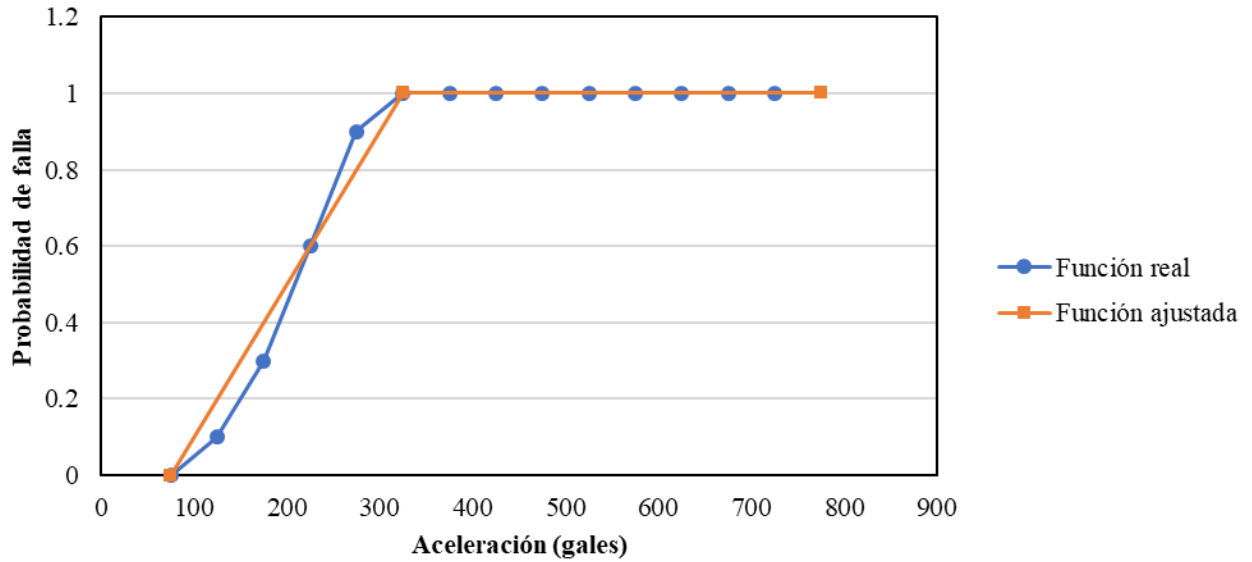


Fig 42. Función de fragilidad para el interruptor, porcelana C110.

Fuente: Elaboración propia.

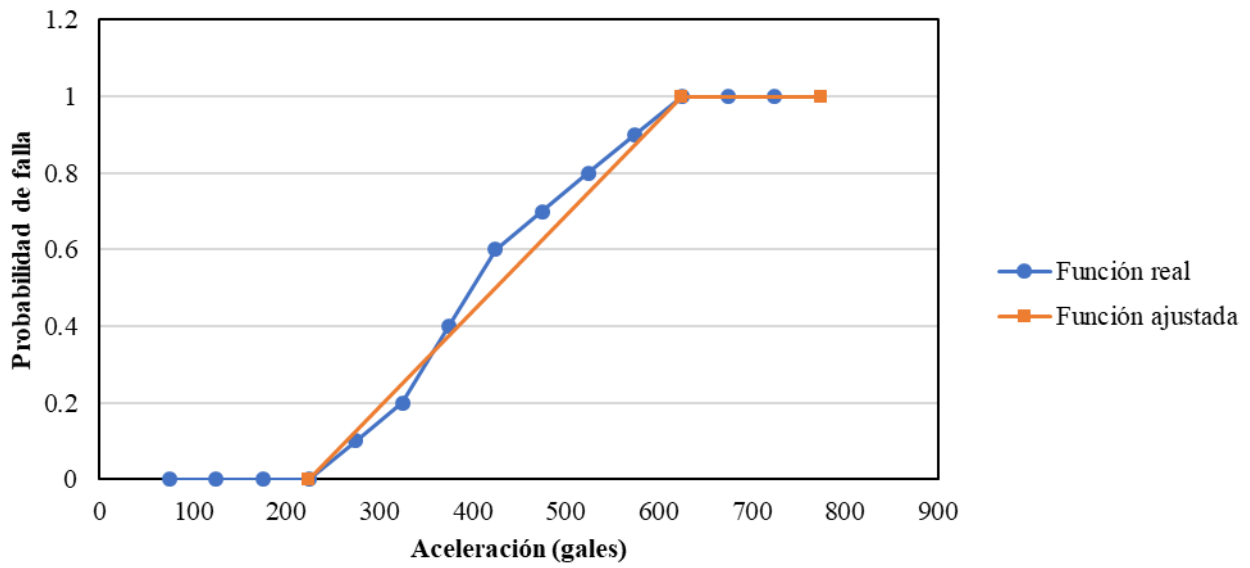


Fig 43. Función de fragilidad para el interruptor, porcelana C120.

Fuente: Elaboración propia.

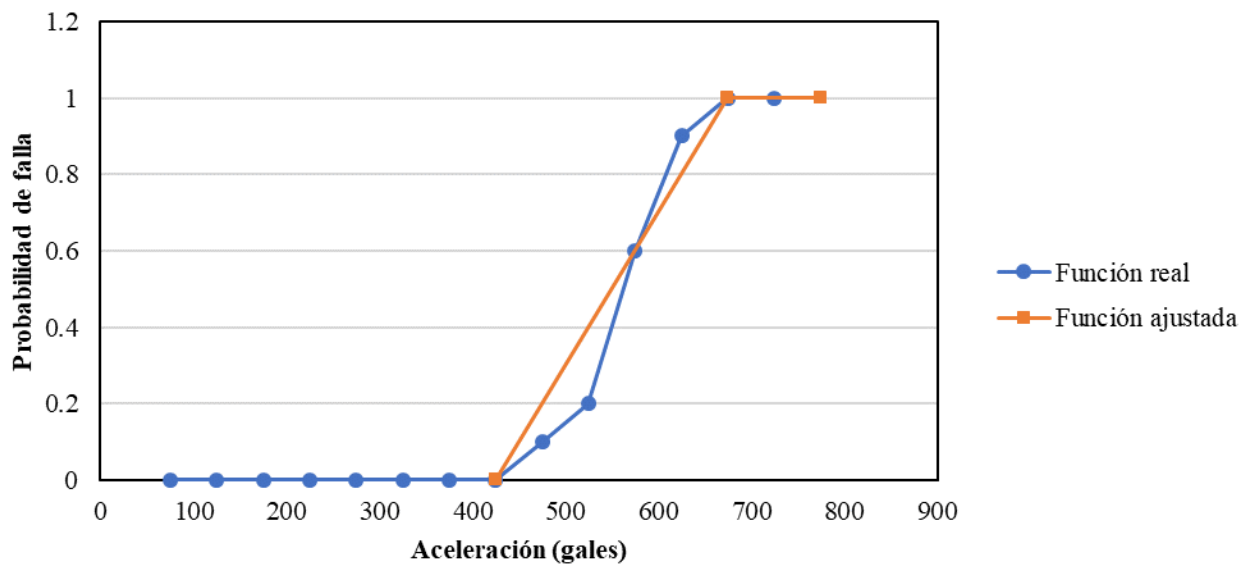


Fig 44. Función de fragilidad para el interruptor, porcelana C130.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13. Valores de la curva de fragilidad para el interruptor 220 kV.

Rango de aceleraciones	Cantidad de equipos con falla		
	Porcelana tipo A (C110)	Porcelana tipo B (C120)	Porcelana tipo C (C130)
	Porcentaje de falla	Porcentaje de falla	Porcentaje de falla
75-125	0	0	0
125-175	10%	0%	0%
175-225	30%	0%	0%
225-275	60%	0%	0%
275-325	90%	10%	0%
325-375	100%	20%	0%
375-425	100%	40%	0%
425-475	100%	60%	0%
475-525	100%	70%	10%
525-575	100%	80%	20%
575-625	100%	90%	60%
625-675	100%	100%	90%
675-725	100%	100%	100%

Fuente: Elaboración propia.

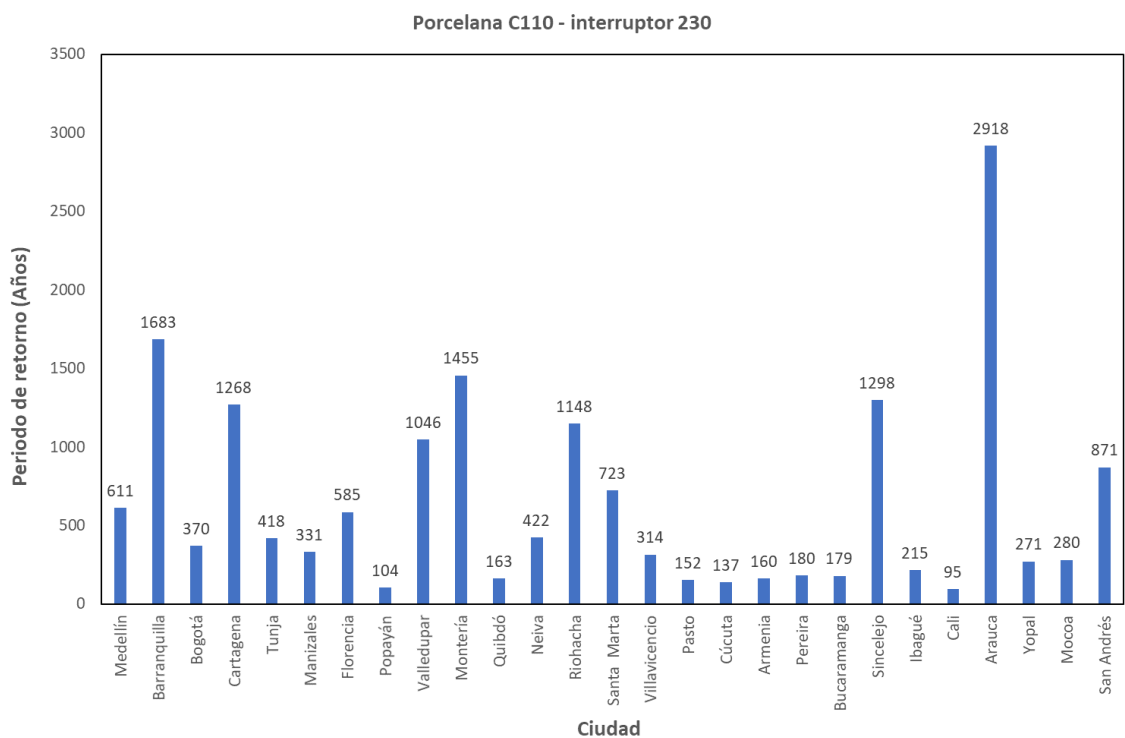


Fig 45. Periodo de retorno de la falla para el interruptor con porcelana C110.

Fuente: Elaboración propia.

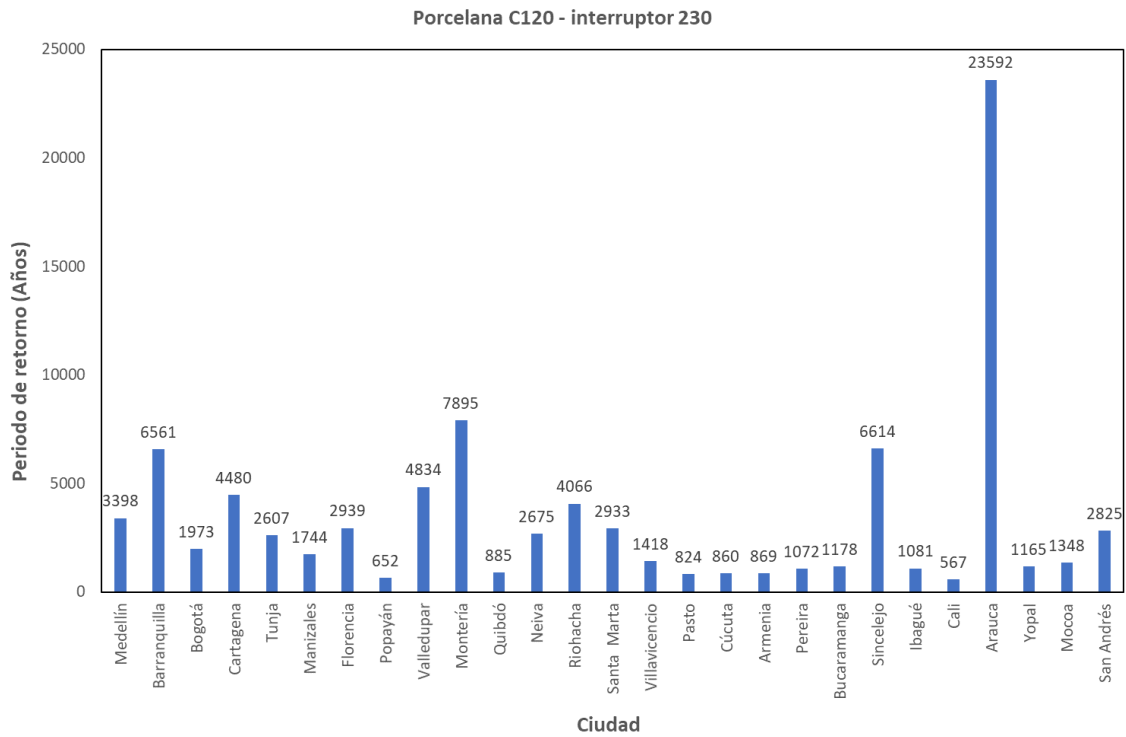


Fig 46. Periodo de retorno de la falla para el interruptor con porcelana C120.

Fuente: Elaboración propia.

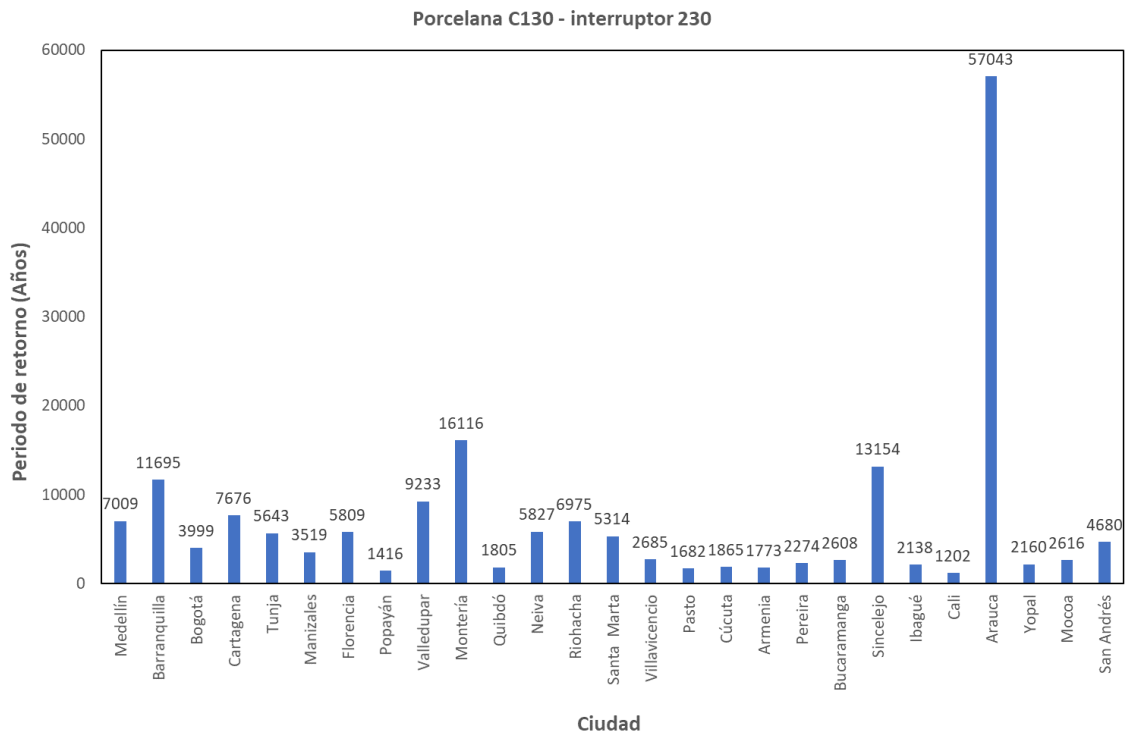


Fig 47. Periodo de retorno de la falla para el interruptor con porcelana C130.

Fuente: Elaboración propia.

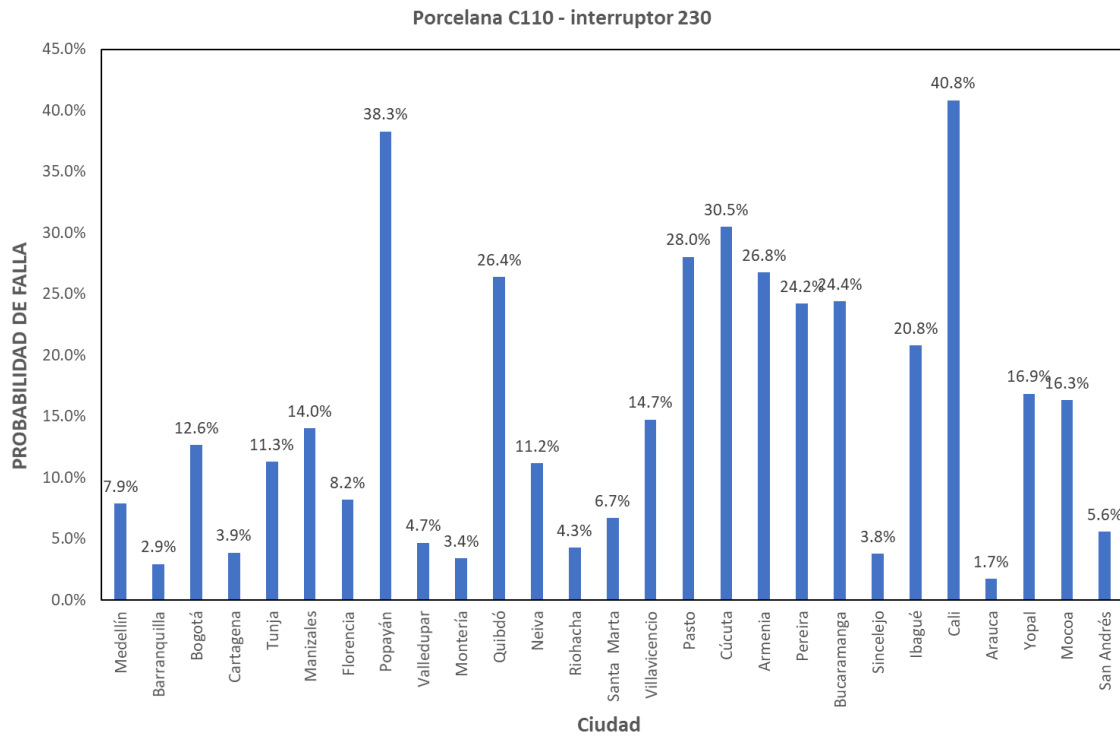


Fig 48. Probabilidad de falla en 50 años para el interruptor con porcelana C110.

Fuente: Elaboración propia.

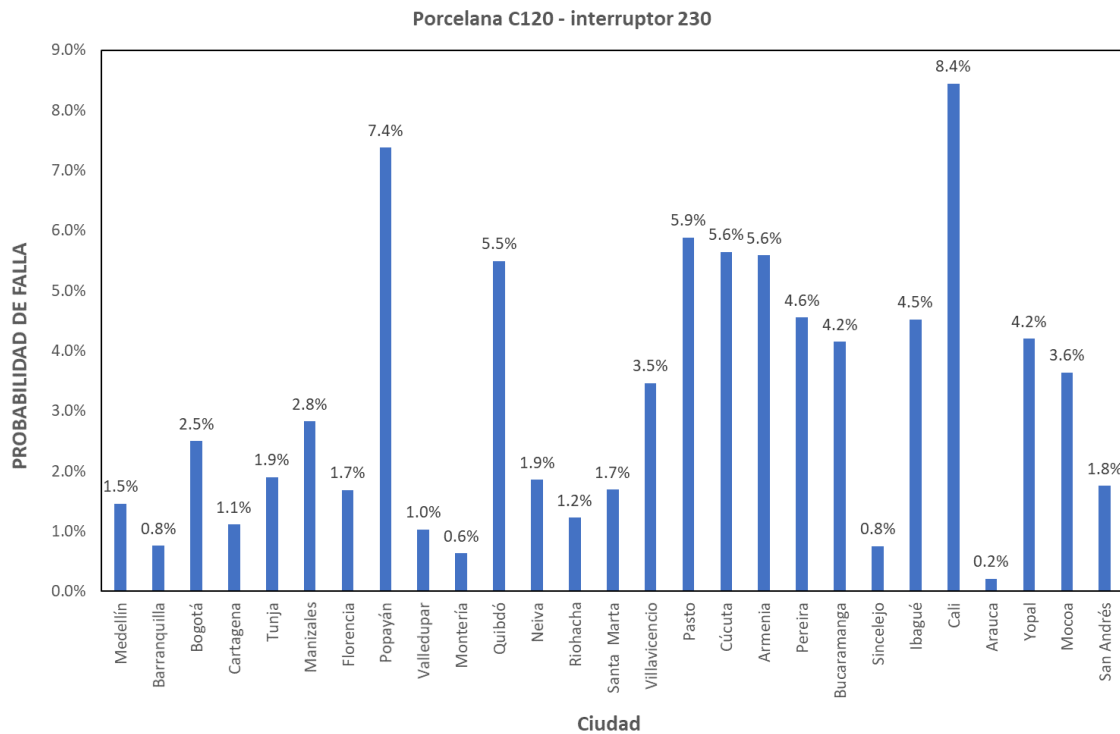


Fig 49. Probabilidad de falla en 50 años para el interruptor con porcelana C120. Fuente:

Elaboración propia.

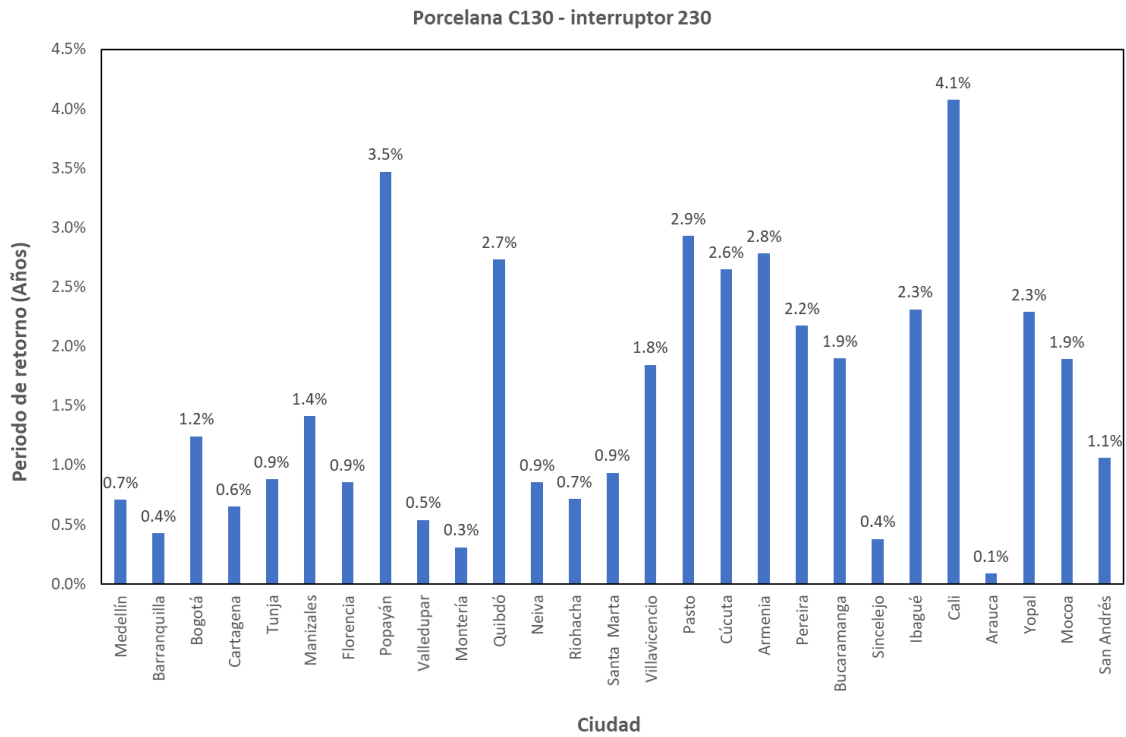


Fig 50. Probabilidad de falla en 50 años para el interruptor con porcelana C130.

Fuente: Elaboración propia.

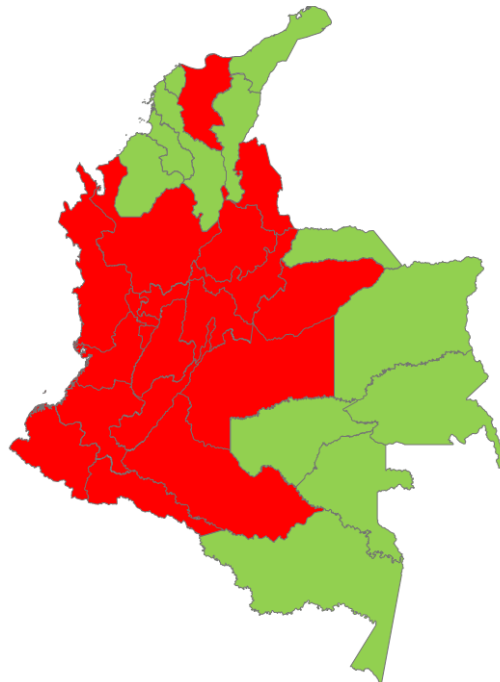


Fig 51. Distribución de probabilidad de falla en 50 años superior al 5% ($T_r=1000$ años), Interruptor C110.

Fuente: Elaboración propia.

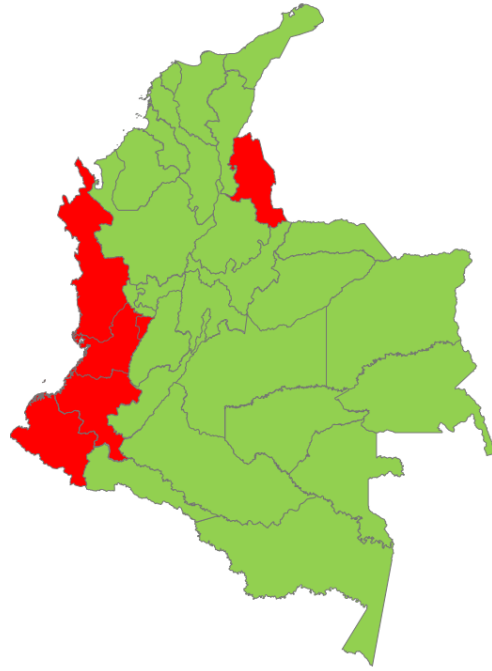


Fig 52. Distribución de probabilidad de falla en 50 años superior al 5% ($T_r=1000$ años), Interruptor C120.

Fuente: Elaboración propia.



Fig 53. Distribución de probabilidad de falla en 50 años superior al 5% ($T_r=1000$ años), Interruptor C130.

Fuente: Elaboración propia.

7.2 Equipos con aislamiento sísmico

7.2.1 Transformador de corriente 220 kV

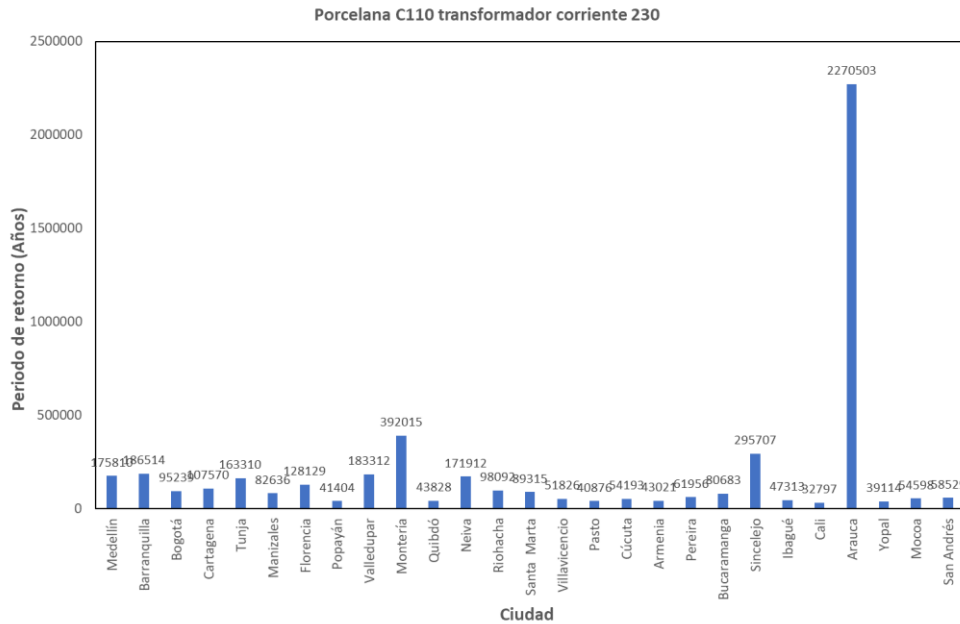


Fig 54. Periodo de retorno de la falla para el transformador de corriente con porcelana C110.

Fuente: Elaboración propia.

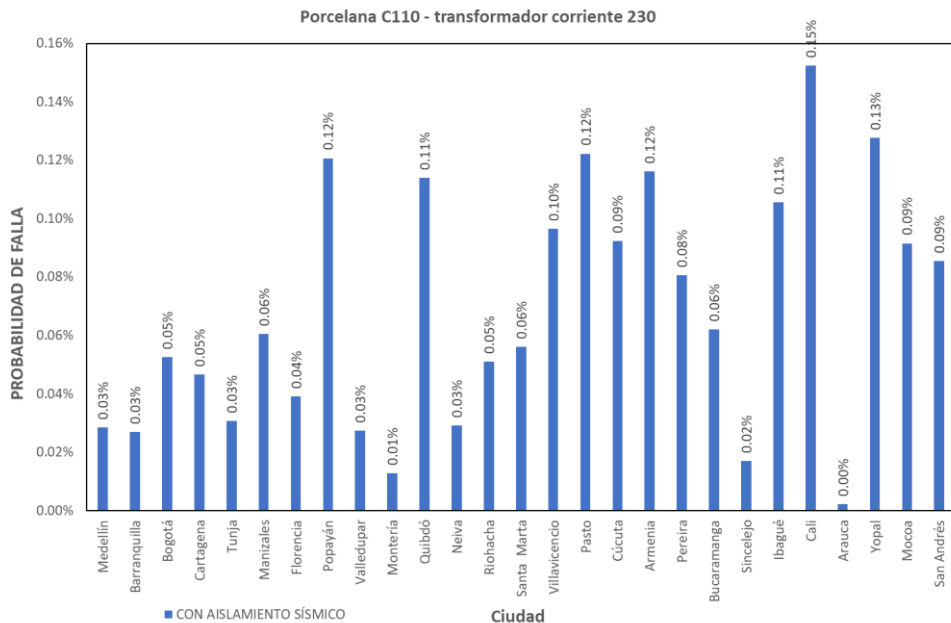


Fig 55. Probabilidad de falla en 50 años para el transformador de corriente con porcelana C110 aislado sísmicamente.

Fuente: Elaboración propia.

7.2.2 Interruptor 220 kV

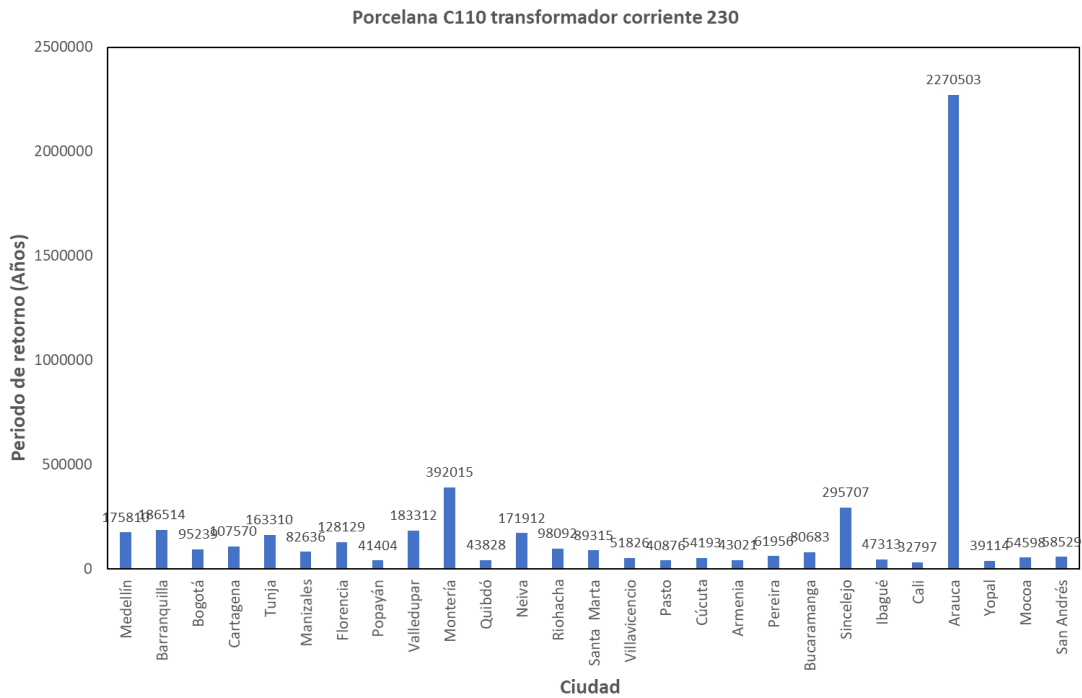


Fig 56. Periodo de retorno de la falla para el interruptor con porcelana C110.

Fuente: Elaboración propia.

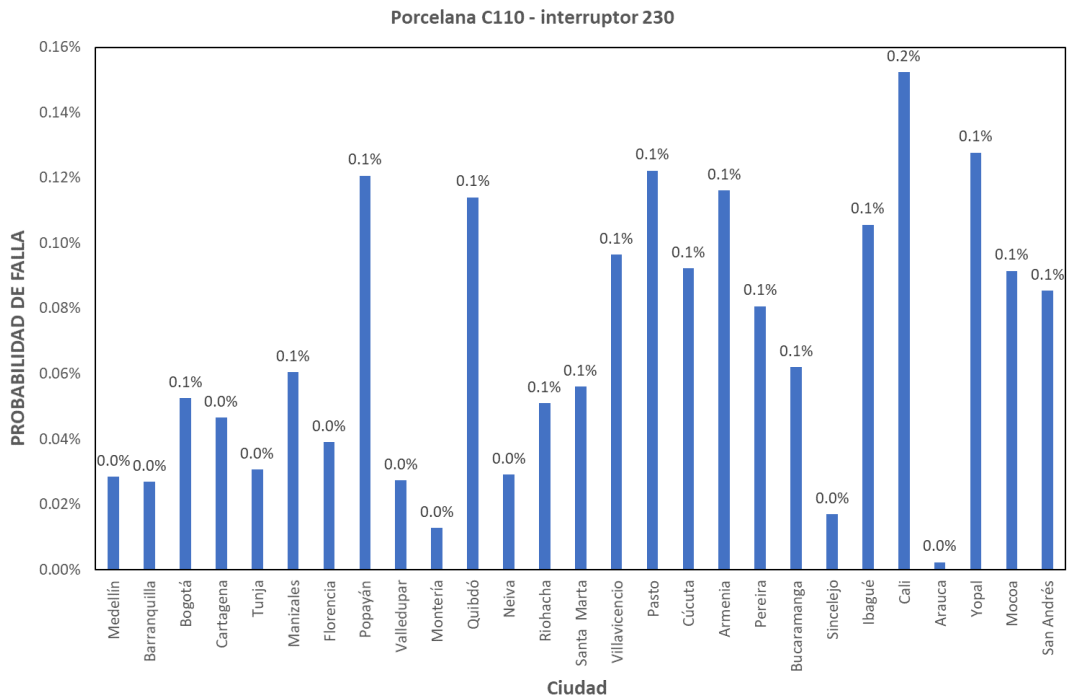


Fig 57. Probabilidad de falla en 50 años para el interruptor con porcelana C110 aislado sísmicamente.

Fuente: Elaboración propia.

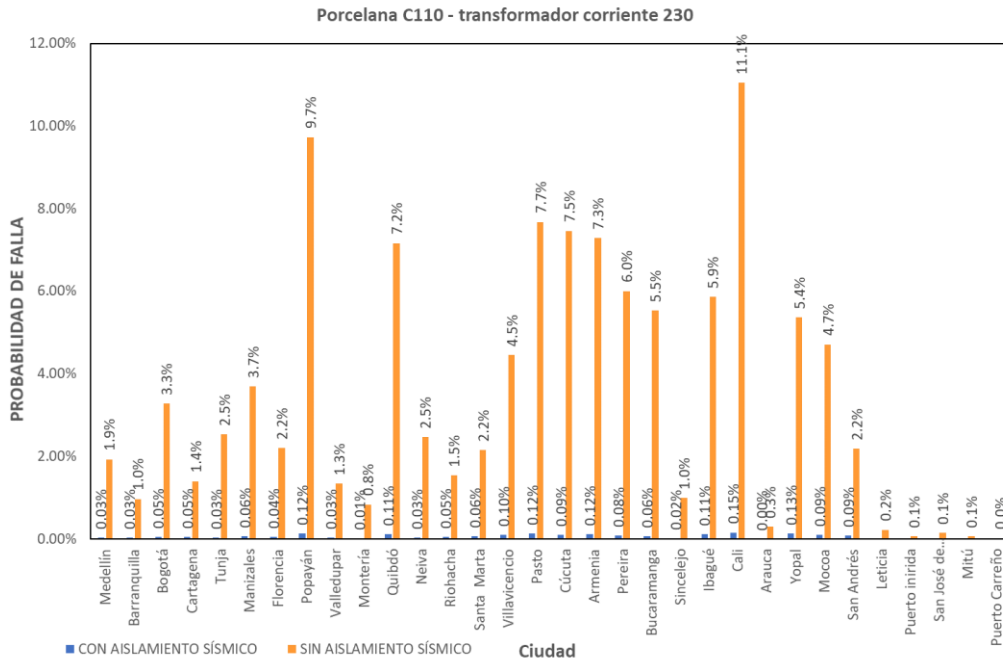


Fig 58. Comparación de la probabilidad de falla en 50 años para el transformador de corriente con porcelana C110 aislado sísmicamente y sin aislamiento.

Fuente: Elaboración propia.

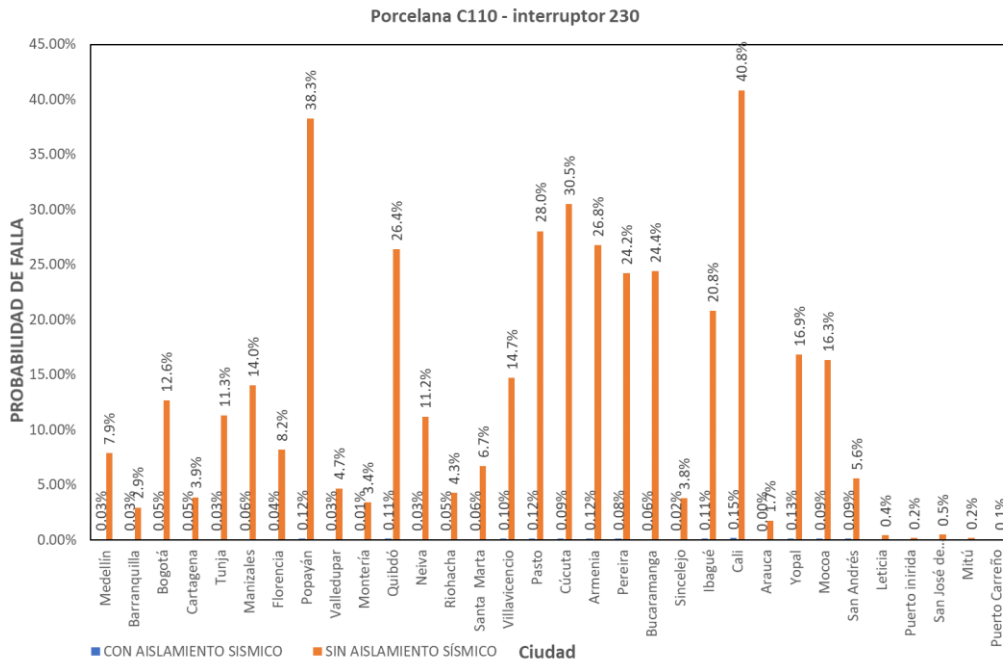


Fig 59. Comparación de la probabilidad de falla en 50 años para el interruptor con porcelana C110 aislado sísmicamente y sin aislamiento.

Fuente: Elaboración propia.

8 CONCLUSIONES

- a) La máxima probabilidad de falla en 50 años en el equipo más demandado (interruptor 230 y con porcelana C110) corresponde a 40.8% para la ciudad de Cali para el modelo sin aislamiento sísmico; al incluir aislamiento sísmico para este equipo en la misma ciudad la probabilidad de falla se reduce a 0.15%.
- b) La máxima demanda para la segunda ciudad con mayor probabilidad de falla, Popayán, corresponde a 38.3% sin aislamiento sísmico; incluyendo el aislamiento sísmico se reduce a 0.12%
- c) El periodo de retorno de falla más bajo en 50 años en el equipo con mayor demanda (interruptor 230 y con porcelana C110) corresponde a 1202 años para la ciudad de Cali, modelo sin aislamiento sísmico; al incluir aislamiento sísmico para este equipo en la misma ciudad el periodo de retorno de falla se aumenta a 32797 años.
- d) Para la ciudad de Popayán el periodo de retorno de falla en el equipo con mayor demanda sísmica pasa de 1416 años, sin aislamiento, a 41404 años al estar sísmicamente aislado.
- e) La reducción de la probabilidad de falla empleando aislamiento sísmico posibilita el uso de equipos de desempeño sísmico bajo en zonas de amenaza sísmica alta, lo cual en equipos en condiciones convencionales de instalación no es posible y no lo recomienda la normatividad vigente, por ejemplo, IEEE 693-2018.
- f) La implementación de aislamiento sísmico reduce la demanda sobre la estructura de cimentación del equipo, lo cual permite el diseño y construcción de fundaciones de menor tamaño, posibilitando el uso de cimentaciones prefabricadas tal como se llevó a cabo en la subestación Guatapurí propiedad de Edemco.

9 REFERENCIAS

- [1] Q. Xie y R. Zhu, «Earth, wind, and ice», *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 9, n.o 2, 2011, doi: 10.1109/MPE.2010.939947.
- [2] J. C. Araneda, H. Rudnick, S. Mocarquer, y P. Miquel, «Lessons from the 2010 Chilean earthquake and its impact on electricity supply», *2010 International Conference on Power System Technology: Technological Innovations Making Power Grid Smarter, POWERCON2010*, 2010, doi: 10.1109/POWERCON.2010.5666023.
- [3] C. He, Q. Xie, y Y. Zhou, «Influence of flange on seismic performance of 1,100-kV ultra-high voltage transformer bushing», *Earthquake Spectra*, vol. 55, n.o 1, 2019, doi: 10.1193/122517EQS266M.
- [4] T. Gokce, E. Orakdöğen, E. Yüksel, E. Orakdogen, y E. Yuksel, «FAILURE MODE INVESTIGATION FOR HIGH VOLTAGE PORCELAIN INSULATORS», 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/325857969>
- [5] T. Gökçe, E. Orakdöğen, y E. Yüksel, «Improvement of the polyurethane spring isolation device for HV post insulators and its evaluation by fragility curves», *Earthquake Spectra*, vol. 37, n.o 3, pp. 1677-1697, ago. 2021, doi: 10.1177/8755293020981967.
- [6] S. Li, Y. Hu, Z. Lu, B. Song, y G. Huang, «Seismic Isolation of Fragile Pole-Type Structures by Rocking with Base Restraints», *Buildings*, vol. 14, n.o 4, abr. 2024, doi: 10.3390/buildings14041176.
- [7] S. Mohammadpour y M. Hosseini, «Experimental system identification of a 63kV substation post insulator and the development of its fragility curves by dynamic finite element analyses», 1 de agosto de 2017, *Earthquake Engineering Research Institute*. doi: 10.1193/102014EQS167M.

